

APORTES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS DEL INIA A LAS **TRAYECTORIAS AGROECOLÓGICAS**

Editores: Georgina Paula García-Inza, José Paruelo y Roberto Zoppolo



**Aportes científicos y tecnológicos
del Instituto Nacional de
Investigación Agropecuaria (INIA) del Uruguay
a las trayectorias agroecológicas**

**Aportes científicos y tecnológicos
del Instituto Nacional de
Investigación Agropecuaria (INIA)
del Uruguay a las trayectorias
agroecológicas**

**Georgina Paula García-Inza, José María Paruelo y
Roberto Zoppolo
(Editores generales)**

**Alfredo Albin, Gabriel Ciappesoni, Verónica Ciganda,
Carolina Leoni, Miguel Sierra y Roberto Zoppolo
(Editores de secciones)**

Aportes científicos y tecnológicos del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) del Uruguay a las trayectorias agroecológicas / Georgina Paula García-Inza; José María Paruelo; Roberto Zoppolo; Editado por Alfredo Albin ... [et al.]. - 1a ed - Ciudad Autónoma de Buenos Aires : Fundación CICCUS, 2023.

560 p. ; 23 x 16 cm.

ISBN 978-987-693-926-3

1. Agronomía. 2. Ecología Agrícola. 3. Fertilidad del Suelo.

I. Albin, Alfredo, ed. II. Título.

CDD 630

Primera edición: febrero 2023

© Ediciones CICCUS - 2023
Moreno 2640 (1094) CABA
Tel. (54 11) 4308 3649
ciccus@ciccus.org.ar
www.ciccus.org.ar



Diseño de tapa: Sebastián Fernández de Agencia Creativa_uy

Corrección: Véronique Celton

Coordinación: Alejandra Tejjido - Andrea Hamid

Diseño y producción editorial: Andrea Hamid

Este libro es un aporte del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) al Proyecto Sistemas Agroecológicos y Resilientes en Uruguay – SARU del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) financiado por el Banco Mundial.

Hecho el depósito que marca la ley 11.723.

Prohibida la reproducción total o parcial del contenido de este libro en cualquier tipo de soporte o formato sin la autorización previa del editor.

Impreso en Argentina

Printed in Argentina



Ediciones CICCUS recibió el **Diploma de Honor Suramericano** que otorga la Fundación Democracia desde su

Programa de “Formación en Valores en el Mercosur y la Unasur”.

Círculo de Legisladores,
Honorable Congreso de la Nación.



Ediciones CICCUS ha sido merecedora del reconocimiento **Embajada de Paz**, en el marco del Proyecto-Campaña “Despertando Conciencia de Paz”, auspiciado por la Organización de las Naciones Unidas para la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Índice

Siglas y acrónimos	9
---------------------------------	---

Introducción general. ¿De qué hablamos cuando decimos agroecología y trayectorias agroecológicas?, <i>José María Paruelo, Roberto Zoppolo y Georgina Paula García-Inza</i>	13
---	----

Primera sección. Transitando hacia la protección agroecológica de los cultivos. *Editora: Carolina Leoni*

Introducción. Transitando hacia la protección agroecológica de los cultivos, <i>Carolina Leoni</i>	35
---	----

Capítulo 1. Hacia un manejo agroecológico de las chinches en soja, <i>María Stella Zerbino y Carolina Leoni</i>	41
--	----

Capítulo 2. Manejo de plagas en frutales de hoja caduca: hacia un norte agroecológico, <i>Valentina Mujica y Diana Valle</i>	53
---	----

Capítulo 3. Aportes al manejo agroecológico de enfermedades en trigo, <i>Silvia Pereyra</i>	67
--	----

Capítulo 4. Rotaciones hortícolas y su contribución al manejo de enfermedades de suelo, <i>Carolina Leoni</i>	83
--	----

Capítulo 5. Alternativas para el manejo de patógenos de suelos en los sistemas hortícolas, <i>Leticia Rubio, Roberto Bernal, Jorge Arboleya y Diego Maeso</i>	95
--	----

Capítulo 6. Malezas en sistemas ganaderos y agrícolas, <i>Amparo Quiñones Dellepiane, Tiago Edu Kaspary y Alejandro M. García</i>	107
--	-----

Segunda sección. La agroecología y el manejo sustentable de los recursos naturales en los sistemas agropecuarios. *Editora: Verónica Ciganda*

Introducción. Tecnología aplicada a los recursos naturales y al cuidado del ambiente, <i>Verónica Ciganda</i>	131
--	-----

Capítulo 7. Tecnología de inoculantes rizobianos y aporte de nitrógeno proveniente de la atmósfera a los sistemas de producción, <i>Elena Beyhaut, Eduardo Abreo, Claudia Barlocco, Valeria Larnaudie y Nora Altier</i>	137
--	-----

Capítulo 8. Almacenaje y secuestro de carbono en suelos del Uruguay, <i>Virginia Pravia, Andrés Quincke, Valentina Rubio, Raquel Barro, Ignacio Macedo, Jorge Sawchik, José Terra y Verónica Ciganda</i>	151
---	-----

Capítulo 9. Coberturas vegetales y manejo del suelo en la citricultura de Uruguay, <i>Carmen Goñi y Álvaro Otero</i>	181
---	-----

Capítulo 10. Eficiencia en el uso del agua: estrategias de manejo del agua de riego, <i>Álvaro Otero y Claudio García</i>	199
--	-----

Capítulo 11. Cultivos de servicios para aumentar la oferta de servicios ecosistémicos en sistemas agrícolas, <i>Priscila Pinto, José María Paruelo, Jorge Sawchik y Gervasio Piñeiro</i>	215
---	-----

Capítulo 12. Evaluación de la heterogeneidad estructural y funcional de los pastizales naturales para su manejo, <i>José María Paruelo y Alice Altessor</i> . . .	235
--	-----

Capítulo 13. Uso y manejo del microbioma para el desarrollo de bioinsumos de uso agrícola, <i>Nora Altier, Eduardo Abreo, Elena Beyhaut, Federico Rivas, Claudia Barlocco y Silvia Garaycochea</i>	257
Capítulo 14. Índice de Integridad Ecosistémica: hacia un análisis multidimensional de la integridad ecológica en sistemas productivos, <i>Oscar Blumetto</i>	279

Tercera sección. Tecnologías con enfoque en la productividad y la calidad
Editores: Roberto Zoppolo y Gabriel Ciappesoni

Introducción. Tecnologías con enfoque en la productividad y la calidad, <i>Roberto Zoppolo y Gabriel Ciappesoni</i>	295
Capítulo 15. Cultivares locales y mejoramiento hortícola en procesos de trayectoria agroecológica, <i>Gustavo Giménez</i>	301
Capítulo 16. Oportunidades para la transición agroecológica en tomate bajo invernáculo en el sur de Uruguay: una metodología para evaluar el avance hacia sistemas más sostenibles, <i>Paloma Bertoni, Mariana Scarlato, Cecilia Berrueta y Santiago Dogliotti</i>	329
Capítulo 17. Cultivares locales, portainjertos y mejoramiento frutícola, <i>Maximiliano Dini, Danilo Cabrera y Roberto Zoppolo</i>	347
Capítulo 18. Investigación y aplicación de la mejora genética animal para una producción ganadera más sostenible, <i>Olga Ravagnolo, Ignacio Aguilar, Gabriel Ciappesoni y Elly Ana Navajas</i>	373
Capítulo 19. La gestión del pastoreo como herramienta para las trayectorias agroecológicas en sistemas lecheros, <i>Santiago Fariña</i>	395

Cuarta sección. Innovación en agroecología: intercambios que generan valor
Editores: Alfredo Albín y Miguel Sierra

Introducción. Innovación: procesos interactivos que generan valor, <i>Alfredo Albín y Miguel Sierra</i>	413
Capítulo 20. Coinnovación como enfoque para promover transiciones agroecológicas: avances desde la investigación en Uruguay, <i>Verónica Aguerre, Andrea Ruggia, María Marta Albicette, Carolina Leoni, Oscar Blumetto, Santiago Scarlato, Raúl Gómez Müller y Alfredo Albín</i>	419
Capítulo 21. Uso de la sombra como herramienta de mitigación del riesgo de estrés calórico en sistemas de producción animal, <i>Pablo Rovira, Alejandro La Manna y Guadalupe Tiscornia</i>	441
Capítulo 22. Modelo para la optimización en la planificación de usos del suelo (MOPUS) en cuencas lecheras con objetivos productivos y ambientales, <i>Andrés Castagna, Lorena Rodríguez Gallego, Antonio Mauttone, Federico Matonte, Agustín Araujo, Agustina Parrilla, Santiago Mancebo, Valentina Moncalvo y Oscar Blumetto</i>	469
Capítulo 23. Mitigación de estrés nutricional y sanitario en colmenas de abejas melíferas mediante estrategias agroecológicas, <i>Belén Branchiccela, Karina Antúnez, Loreley Castelli, Yamandú Mendoza, Estela Santos y Ciro Invernizzi</i>	491
Capítulo 24. TIC para sistemas agropecuarios más sostenibles, <i>Guadalupe Tiscornia, Adrián Cal y Juan Manuel Soares de Lima</i>	513

Acerca de los autores	527
--	-----

Siglas y acrónimos

AC	Agricultura continua
ACV	Análisis de ciclo de vida
ADN	Ácido desoxirribonucleico
AFOLU	Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (sector económico)
AHPPN	Apropiación humana de la productividad primaria neta
AIS	Sistemas de innovación agrícola (siglas en inglés)
ANII	Agencia Nacional de Investigación e Innovación
ARU	Asociación Rural del Uruguay
BHS	Balance hídrico del suelo
CAMM	Comisión Administradora del Mercado Modelo
CAS	Sistemas adaptativos complejos (siglas en inglés)
CATA	<i>Chek all that apply</i> (marcar todo lo que corresponda [método])
CBL	Cultivo con barrera laterales
CBT	Cultivo con barrera total
CC	Cultivos de cobertura
CIP	Centro Internacional de la Papa
CIV	Consorzio Italiano Vivaisti
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CNCR	Colección Nacional de Cepas de Rizobios (Uruguay)
CNFR	Comisión Nacional de Fomento Rural
CONAPROLE	Cooperativa Nacional de Productores de Leche
COS	Carbono orgánico del suelo
CP	Con pastura
CS	Cultivos de servicio
CV	Coefficiente de variación
DEP	Diferencias esperadas en la progenie (también EPD, por sus siglas en inglés)
DGF	Dirección General Forestal
DIEA	Dirección de Estadísticas Agropecuarias
DIGEGRA	Dirección General de la Granja
DON	Deoxinivalenol
EfC	Eficiencia de conversión
ELP	Experimentos de largo plazo
EM	Emisiones de metano

EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENC	Evaluación nacional de cultivares
ENL	Energía neta de lactancia
ET	Evapotranspiración
FA	Facultad de Agronomía (también Fagro)
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
FBN	Fijación biológica de nitrógeno
FPTA	Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria
FV	Facultad de Veterinaria
GEI	Gases de efecto invernadero
GESIR	Gestor inteligente del riego
GRAS	Unidad de Agro-clima y Sistemas de información (INIA)
HPG	Huevos por gramo
ICT4V	<i>Information and Communication Technologies for Verticals</i>
I+D+i	Investigación, desarrollo e innovación
IIE	Índice de Integridad Ecosistémica
INALE	Instituto Nacional de la Leche
INASE	Instituto Nacional de Semillas
INIA	Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Uruguay)
INTA	Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (Argentina)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organización Internacional de Normalización)
ITH	Índice de temperatura y humedad
LEAP	Alianza sobre evaluación ambiental y desempeño ecológico de la ganadería
MAOM	<i>Mineral Associated Organic Matter</i> (Materia orgánica asociada a los minerales)
MESMIS	Marco para la evaluación de sistemas de manejo de recursos naturales incorporando indicadores de sustentabilidad
MET	Modelos de estados y transiciones
MGAP	Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (Uruguay)
MIP	Manejo integrado de plagas, enfermedades y malezas
MO	Materia orgánica
MOPUS	Modelo para la optimización en la planificación de usos del suelo
MOS	Materia orgánica del suelo
MS	Materia seca
MU	Instituto Control y Mejoramiento Lechero Uruguay
NDVI	Índice de vegetación de diferencia normalizada (siglas en inglés)
NFB	Nitrógeno fijado biológicamente
NN	Número de nódulos
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica)

ODS	Objetivos de desarrollo sostenible
OMS	Organización Mundial de la Salud
ONG	Organización no gubernamental
PAC	Cámaras de acumulación portátiles (siglas en inglés)
PAD	Porcentaje de agua disponible
PAR	<i>Participatory Action Research</i> (Proceso participativo de investigación-acción)
PEI	Plan estratégico institucional
PIPA	<i>Participatory Impact Pathways Analysis</i> (Análisis participativo de senderos de impacto)
PMGT	Programa de mejoramiento genético de trigo
PLN	Procesamiento de lenguaje natural
PMRP	Plan de manejo regional de plagas
POM	<i>Particulate Organic Matter</i> (Materia orgánica particulada)
PSN	Peso seco de nódulos
PSN	Productividad secundaria neta
PSPA	Peso seco de la parte aérea
PVA	Protección vegetal agroecológica
QTL	<i>Quantitative Trait Locus</i> (Locus de rasgo cuantitativo)
REDD	Reducción de Emisiones causadas por la Deforestación y la Degradación forestal (programa)
REM	Red de estaciones meteorológicas (Argentina)
RFI	<i>Residual Food Intake</i> (Consumo de alimento residual)
RFID	Identificación por radiofrecuencia (siglas en inglés)
RNC	Registro Nacional de Cultivares
SB	Cultivo sin barrera
SCYT	Sistema de ciencia y tecnología
SE	Servicios ecosistémicos
SFR	Sociedad de Fomento Rural
SIG	Sistema de información geográfica
SNIG	Sistema Nacional de Información Ganadera
SNP	Polimorfismos de un solo nucleótido (siglas en inglés)
SRGen	Sistema de registros genéticos
SSE	Sistema socioecológico
SUL	Secretariado Uruguayo de la Lana
TIC	Tecnologías de la información y la comunicación
UAM	Unidad Agroalimentaria Metropolitana
UDELAR	Universidad de la República (Uruguay)
UE	Unión Europea
UG	Unidades ganaderas
UV	Ultravioleta

Símbolos

C	Carbono
K	Potasio
N	Nitrógeno
P	Fósforo
S	Azufre

Introducción general

¿De qué hablamos cuando decimos agroecología y trayectorias agroecológicas?

José María Paruelo, Roberto Zoppolo y Georgina Paula García-Inza

1. Un poco de historia

Desde inicios del siglo xx se instaló, particularmente en el ámbito académico, la idea de aplicar principios y modelos ecológicos para comprender los desafíos que planteaba el manejo de sistemas agrícolas y operar sobre ellos. En un primer momento, la preocupación fundamental era la productividad de los cultivos. En 1973, Richard Levins argumentó extensamente acerca del beneficio de integrar los marcos conceptuales de la ecología y de las ciencias agrarias. El uso de modelos de dinámica de poblaciones para simular el comportamiento de un insecto plaga, el estudio de las comunidades vegetales para entender las interacciones en cultivos polifíticos, el uso de modelos relativos a la dinámica predador-presa para analizar la relación entre un fitófago y una avispa parásita, el esquema de dinámica de los nutrientes en el ecosistema para caracterizar niveles de fertilidad actual y potencial o la aplicación de los procesos de selección asociados a la formación de ecotipos son algunos de los ámbitos en donde la ecología ayudó a entender procesos de importancia agronómica.

Pero también la agronomía contribuyó al desarrollo de la ciencia ecológica: los cultivos y las pasturas sembradas se constituyeron en laboratorios en donde se desarrollaron, por ejemplo, nuevos modelos de la interacción entre especies, de procesos coevolutivos o de la dinámica trófica. Un ejemplo que documenta este vínculo, muy difundido e influyente, es la aplicación de la idea de sucesión ecológica propuesta por Clements (1916) al manejo de pastizales en los Estados Unidos

(Dyksterhuis, 1949). Este modelo conceptual incorporaba la idea de “climax” sucesional y de factores de perturbación que apartaban al sistema de pastizal de dicho estado. Típicamente, esos factores eran el pastoreo y la sequía. Estas ideas contribuyeron mucho al manejo de estos sistemas, pero en la segunda mitad del siglo xx se acumularon evidencias que mostraban sus limitaciones. El desarrollo de la teoría ecológica, en particular las ideas de no-equilibrio y de estados alternativos, permitió a Westoby *et al.* (1989) desarrollar un modelo conceptual nuevo.

En nuestra región, Alberto Soriano resumió el aporte de la ecología a la comprensión de los procesos de enmalezamiento en Argentina en un artículo titulado “Gloria y miseria de las malezas” (Soriano, 1975), en el que hacía una síntesis de cómo el estudio de la autoecología de las plantas, de las relaciones de competencias, de las presiones de selección, entre otros temas, ayuda al diseño de sistemas de control de las malezas eficaces y eficientes. Esas ideas cristalizaron el desarrollo de sistemas de control del chamico (*Datura ferox*) y del sorgo de Alepo (*Sorghum halepense*) que ponían el énfasis en la dinámica del agroecosistema y que constituyen excelentes ejemplos de manejo integrado de plagas (Ghersa *et al.*, 1990; Satorre *et al.*, 1985, 2003).

Si bien el término “agroecología” había sido acuñado en los años 60 (Tischler, 1965), no necesariamente se aplicó a la descripción de los trabajos en los que la teoría ecológica contribuía a dar respuesta a problemas agronómicos. A partir de la década de 1980, el concepto se consolidó (Altieri, 1989) y comenzó a difundirse en la literatura y en la práctica social. Al objetivo original de usar modelos ecológicos para el desarrollo de sistemas más productivos se sumó la preocupación por cuestiones ambientales y sociales. El desarrollo del “ambientalismo” en esta parte del siglo xx (Mann, 2018) tuvo sin duda una influencia decisiva en la consolidación de la idea de agroecología. A esta influencia se añadió la articulación de saberes asociados a movimientos campesinos y a pueblos originarios con el trabajo académico.

2. Agroecología y trayectorias

El término agroecología es un concepto polisémico cuyo alcance depende del contexto de utilización. La agroecología es alternativamente concebida como un movimiento social o político, una disciplina científica o como una práctica agronómica. Por un lado, se asocia al diseño de sistemas de producción agropecuaria más amigable desde el punto de vis-

ta social y ambiental. En la definición de estos sistemas suele haber un componente muy relacionado con valores ligados a prácticas ancestrales, respecto a formas de producción tradicional, a perspectivas ideológicas, etc. Esta acepción representa una visión normativa o prescriptiva de la agroecología. Desde una óptica más estrecha, se agrupa bajo esta denominación tanto al estudio de patrones y procesos ecológicos en sistemas agropecuarios como al uso de los conceptos ecológicos en la solución de problemas agronómicos. En el primer caso, los estudios de manejo integrado de plagas, de competencia en policultivos, de efectos del pastoreo o de eficiencia trófica ponen de manifiesto cómo los agroecosistemas permiten entender aspectos ecológicos básicos. En el segundo caso, los conceptos aportados por la ecología, en combinación con la agronomía, permiten diseñar prácticas y tecnologías que satisfacen distintos estándares en cuanto a una serie de aspectos asociados, entre otros, al nivel de aplicación de insumos (principalmente agroquímicos), a la preservación de la biodiversidad o a aspectos sociales (por ejemplo, adecuación a producciones familiares, de pueblos originarios o agricultura campesina).

Todas estas acepciones del término agroecología describen entidades conceptuales valiosas e importantes, pero distintas. Por lo tanto, es necesario definir con claridad el alcance específico del término, particularmente cuando en torno al mismo se van a desarrollar acciones específicas (investigaciones, transferencia, actividades sociales y/o políticas, etc.). Las definiciones son muchas y variadas en cuanto a los énfasis. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) resumió buena parte de las definiciones disponibles, tanto en el ámbito académico, empresario, de organizaciones no gubernamentales (ONG) como político.¹ Estas definiciones muestran la diversidad de enfoques con que se aborda la agroecología y pueden evaluarse sobre la base de los aspectos que se considera: económicos, ambientales, sociales, o del vínculo con la soberanía alimentaria, la comercialización, las prácticas agronómicas. También pueden evaluarse en cuanto a la promoción de la diversificación, de la investigación, la educación, la equidad de género y la incorporación de tecnologías (Tabla 1). Ninguno de los enfoques considera todos estos aspectos, aunque sí, en general, son multidimensionales, incluyendo referencia a entre seis y diez dimensiones.

1 Véase: <[http://www.fao.org/agroecology/knowledge/definition/es/?page=3&ipp=6&no_cache=1&tx_dynalist_pi1\[par\]=YT0xOntzOjE6IkwiO3M6MT0iMiI7fQ=>](http://www.fao.org/agroecology/knowledge/definition/es/?page=3&ipp=6&no_cache=1&tx_dynalist_pi1[par]=YT0xOntzOjE6IkwiO3M6MT0iMiI7fQ=>)>.

TABLA 1. INSTITUCIÓN U ORGANISMO, SITIO WEB Y DIMENSIONES MENCIONADAS EN LAS DEFINICIONES DE “AGROECOLOGÍA” RECOPIADAS POR LA FAO

Definición	Sitio web	Dimensiones mencionadas en la definición												
		Económica	Ambiental	Social	Ecológica	Soberanía alimentaria	Comercialización	Prácticas agronómicas	Diversificación	Investigación	Educación	Equidad	Géneros	Tecnologías
United States Department of Agriculture (USDA)														
Francia - Les fondements de l'agro-écologie														
Costa Rica - Reglamento de la Ley de Uso, Manejo y Conservación de Suelos	http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/cos30828.pdf													
Brasil - National Policy for Technical Assistance and Rural Extension	http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/bra158754.pdf													
Nicaragua - Norma técnica obligatoria nicaragüense sobre caracterización, regulación y certificación de unidades de producción agroecológica	http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/nic138639.pdf													
Venezuela - Ley de Salud Agrícola Integral	http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/ven83245.pdf													
Sevilla Guzmán y Soler Motiel, 2009	https://seminariod-lae.files.wordpress.com/2012/10/c2-eduardo-sevilla-y-marta-soler.pdf													
Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología (SOCLA), 2015	https://agroeco.org/wp-content/uploads/2015/11/Agroecology-training-manual-TWN-SOCLA.pdf													

(Continúa en página siguiente)

Aportes científicos y tecnológicos del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) del Uruguay...

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), 2005	http://www.agroeco.org/doc/agroecology-engl-PNUMA.pdf																					
Altieri, 1999	http://agroeco.org/wp-content/uploads/2010/10/Libro-Agroecologia.pdf																					
Altieri, 1995	http://www.agroeco.org/doc/new_docs/Agroeco_principles.pdf																					
Francis <i>et al.</i> , 2003	https://www.researchgate.net/publication/233138094_Agroecology_The_Ecology_of_Food_Systems																					
American Society of Agronomy, 2004	https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.2134/agronmonogr43.frontmatter																					
Vía campesina, 2018	https://viacampesina.org/es/para-la-via-campesina-la-agroecologia-es-un-enfoque-tecnologico-subordinado-a-objetivos-politicos-profundos/																					
Declaration of the International Forum for Agroecology, 2015	https://viacampesina.org/en/declaration-of-the-international-forum-for-agroecology/																					
Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD), 2003	https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=81																					
European Association for Agroecology, 2016	https://www.agroecology-europe.org/our-approach/our-understanding-of-agroecology/																					
Carrefour, 2014	https://www.carrefour.com/en/newsroom/what-agroecology																					

Desde una perspectiva institucional, en el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) del Uruguay nos referiremos a la agroecología como la aplicación de principios y conceptos ecológicos al diseño y manejo de agroecosistemas más sostenibles. Esta definición se alinea con la enunciada en la Ley 19.717 sancionada por el Parlamento de Uruguay en 2018. La visión agroecológica implica necesariamente un enfoque de sistema, coevolutivo y participativo, que más allá de abordar aspectos ambientales debe tener en cuenta la dimensión social y económica. En lugar de investigar prácticas agrícolas de manera aislada se contempla el conjunto de interacciones entre los cultivos, el suelo y sus organismos, las plagas y sus enemigos, los flujos de materia y energía, las condiciones ambientales y el manejo que los humanos realizan (Gliessman, 2015). Pasan a considerarse, a su vez, los efectos de los sistemas agropecuarios sobre los ecosistemas naturales circundantes.

La sostenibilidad es un aspecto central de las definiciones del concepto de agroecología y en tal sentido debe ser caracterizada en términos más precisos. El adjetivo sostenible remite al concepto de sostenibilidad, o sustentabilidad, cuya definición y marco conceptual no está exenta de disputas. La sostenibilidad funciona como un objetivo o meta variable de acuerdo con los valores de los actores involucrados y del contexto (Werkheiser y Piso, 2015). Más allá de las críticas y los reparos que genera (Seghezzeo, 2009), una de las definiciones más difundidas y aceptadas es la del *Informe Brundtland* publicado por la World Commission on Environment and Development (WCED, 1987). En este caso, se define un concepto asociado, el de “desarrollo sostenible”: es aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de generaciones futuras de satisfacer las propias”. Esta definición se complementa con la idea de los “tres pilares” en los cuales se apoya la sostenibilidad: el económico, el social y el ambiental. Sin duda, uno de los problemas asociados a esta definición es la dificultad para traducirla en términos operativos o para definir indicadores. Plantearse en términos absolutos si una práctica o un sistema es sostenible o no es virtualmente imposible. Un camino para tornar más operativa la idea de sostenibilidad es plantear su discusión en términos comparativos o relativos: ¿cuál sistema es más sostenible? Sí, es posible cuantificar la sostenibilidad en términos relativos a partir de comparaciones en el espacio (entre sistemas) o en el tiempo (un mismo sistema). Los cambios en sostenibilidad son vistos entonces como un proceso y no como una meta. Esto abona la importancia del concepto de *trayectorias agroecológicas* en tanto enfatiza en los procesos y no exclusivamente en la meta.

En el ámbito de la investigación, el énfasis estará puesto en conocimientos y tecnologías que promuevan *trayectorias agroecológicas*, o sea, cambios en los sistemas de producción que los tornen más sostenibles que los que se busca reemplazar. El incremento de la sostenibilidad ambiental está asociado a un aumento de la oferta de servicios ecosistémicos (SE) de regulación y soporte (Véase Caja 1 en Anexo). En tal sentido, resulta crítico evaluar la sostenibilidad ambiental de las prácticas agronómicas a considerar. Esta evaluación debería contemplar las siguientes dimensiones (Garibaldi *et al.*, 2019):

1. Promover la diversidad específica aérea y subterránea.
2. Reducir las aplicaciones de productos sintéticos.
3. Mantener o restaurar áreas naturales o seminaturales.
4. Proteger y usar eficientemente los recursos naturales y mantener y/o aumentar la oferta de servicios ecosistémicos.
5. Promover procesos y sistemas naturales, reciclar, reutilizar.
6. Promover la diversidad de hábitats.
7. Integrar prácticas a nivel del paisaje.
8. Asumir la perspectiva de una sola salud (ambiental, humana, vegetal, animal, del suelo, etc.).
9. Facilitar la participación y el entrenamiento de los productores.
10. Potenciar el intercambio de saberes.
11. Promover el desarrollo rural y territorial.
12. Acercar la producción a los consumidores.
13. Cuidar la inocuidad de los alimentos.
14. Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

Esta lista no es exhaustiva y puede ampliarse o reducirse en función de los contextos productivos, ambientales, institucionales, políticos o culturales que se consideren. Estos aspectos se corresponden (y expanden) a los diez elementos de la agroecología que consensuó la FAO en 2018:

Diversidad.

Creación conjunta e intercambio de conocimientos: las innovaciones agrícolas.

Sinergias.

Eficiencia.

Reciclaje.

Resiliencia.

Valores humanos y sociales.

Cultura y tradiciones alimentarias.

Gobernanza responsable.

Economía circular y solidaria.

El debate en torno de las dimensiones o los pilares de la sostenibilidad (económica, ambiental y social) y la vinculación con los SE –y, por tanto, con el bienestar humano– sugiere que el análisis de la sostenibilidad y de las trayectorias agroecológicas que la promuevan debe abordarse a nivel de sistema socioecológico (SSE). Los sistemas socioecológicos se han definido como sistemas adaptativos y complejos en los que interactúan componentes biofísicos y humanos (Liu *et al.*, 2007; Ostrom, 2009). Los SSE pueden definirse a diferentes escalas espaciales, temporales y organizativas, que a su vez pueden estar vinculadas en forma jerárquica (Cumming *et al.*, 2006; Vallejos *et al.*, 2020). El marco conceptual del SSE ofrece la posibilidad de estudiar las múltiples interacciones e interdependencias entre los componentes naturales y humanos en el marco de un proceso de transición entre sistemas de producción (Ostrom, 2009). El componente humano se beneficia de los bienes y servicios que proporcionan los agroecosistemas y, además, genera intervenciones que modifican directa o indirectamente su estructura y funcionamiento.

3. ¿Transformar o adecuar los sistemas de producción agropecuarios?

En torno de la agroecología se generaron disputas que, si bien incluyen la dimensión ecológica y agronómica, se vinculan a aspectos políticos, filosóficos, culturales e ideológicos. En buena medida se contraponen la visión agroecológica a la del régimen agroalimentario dominante (Levidow *et al.*, 2014). En ese marco, la discusión respecto de la agroecología puede plantearse en distintos planos. En un primer plano aparece la necesidad de entender la estructura y el funcionamiento de los agroecosistemas –por ejemplo, las relaciones tróficas en la comunidad de artrópodos, los controles de la productividad primaria y el consumo de herbívoros, los factores que afectan la eficiencia en el uso del nitrógeno (N) y el fósforo (P), el vínculo entre diversidad microbiana y acumulación de carbono (C) orgánico en el suelo, etc.–. Esto constituye la base indispensable para acceder al segundo plano, el desarrollo de tecnologías que, reconociendo cómo se estructura y funciona un agroecosistema, aumenten la oferta de servicios ecosistémicos de regulación y provisión (Véase Caja 1 en Anexo). El tercer plano se vincula a la manera en que esas tecnologías se combinan entre sí y con otras

menos sistémicas (materiales genéticos no modificados, agroquímicos, mecanización, etc.) en el diseño de sistemas de producción. Gliessman (2015) se refiere a este último plano y plantea “niveles” de cambio del sistema alimentario (Véase Caja 2 en Anexo). Los tres primeros niveles describen los pasos que los productores pueden dar en sus explotaciones para convertir sus agroecosistemas. Los otros dos niveles adicionales van más allá del predio y aluden al sistema alimentario en un sentido más amplio y a las sociedades en las que están inmersos.

Si bien cualquier empresa humana está asociada a factores subjetivos –por ejemplo, decidir estudiar la estructura trófica o la dinámica de los mercados a término tiene detrás visiones personales–, los primeros dos planos que se señaban (estudios de estructura y funcionamiento de agroecosistemas y desarrollo de tecnologías) pueden ser abordados objetivamente, es decir, con una aproximación científica en la que los criterios de verdad se vinculan a la estructura lógica de las afirmaciones y a la evidencia empírica. El tercero de los planos implica decidir promover algunos de los niveles de transformación del sistema agroalimentario (una o más de las 14 dimensiones reseñadas antes), no solo a nivel predial. En este caso, si bien hay elementos objetivos para considerar, la subjetividad de los actores pasa a jugar un papel muy importante. Los valores de los individuos y los colectivos y las disputas políticas juegan un papel más relevante. Algunos actores harán uso de las tecnologías que promueven transiciones para “adecuar” el sistema y otros buscarán usarlas para “transformarlo”.

4. ¿Cuál es el papel del sistema de ciencia y tecnología (SCYT) agropecuaria en esta discusión sobre la agroecología?

Ya sea que se busque adecuar los sistemas –por ejemplo, a nuevas regulaciones, a exigencias de los mercados, a la variación en la disponibilidad de recursos– o transformarlos desde el punto de vista socioproductivo, la disponibilidad de tecnologías para promover y evaluar las transiciones agroecológicas es crítica. En este libro se presentan ejemplos de tecnologías desarrolladas por investigadores/as del INIA en trabajos conjuntos con otras instituciones. Las tecnologías apuntan tanto a impactar sobre alguna de las 14 dimensiones asociadas a las transiciones agroecológicas como a cuantificar su contribución.

En Paruelo (2016) se discuten algunos aspectos vinculados al papel de los/las científicos/as, o sea aquellos/as que profesionalmente se dedican a la investigación en el marco del scyt, en temáticas ambientales que incluyen las transiciones agroecológicas. Estas personas se constituyen en intermediarios privilegiados entre el “banco de conocimientos” y la sociedad. Más aún, pueden aportar contribuciones específicas al “banco de conocimientos” en relación con un sistema en particular, por ejemplo, relevando la vegetación, los suelos o las principales plagas en donde se plantea una transición agroecológica. El entrenamiento y la familiaridad con algunos temas permiten a las personas dedicadas a la actividad científica extrapolar experiencias de otros ámbitos, adaptar modelos conceptuales y promover aproximaciones novedosas para la caracterización del sistema socioecológico, la evaluación de impactos o el monitoreo de los recursos.

La participación del scyt no puede estar aislada de los otros actores. Esto determina que el *modelo lineal*, en donde la producción de conocimiento, el desarrollo de tecnologías, la transferencia y la extensión ocurren secuencialmente, muestre limitaciones en un proceso de promoción de transiciones agroecológicas. Los componentes técnicos, políticos y administrativos asociados a transiciones agroecológicas están unidos de manera intrincada. El modelo lineal empieza a desdibujarse en la medida en que las necesidades, los problemas, valores e intereses entran en juego. Por ello, la participación del scyt tiene que ocurrir en estrecha colaboración con otros actores del proceso. Las experiencias de coinnovación en sistemas ganaderos reseñadas en este libro ejemplifican la manera en la cual puede darse esta colaboración.

Darle un papel a la ciencia en el desarrollo de la agroecología es el camino para construir alternativas basadas en las evidencias (empíricas y lógicas) y en la discusión de estas con el resto de los actores. El aporte de la ciencia y los/las científicos/as parece el camino más corto para minimizar los efectos negativos de los factores que generan deterioro en los sistemas socioecológicos y promover sistemas más sostenibles. Para ello, el scyt debería ser capaz de establecer en el territorio un diálogo con los/las actores/actrices que haga posible reconocer los intereses y funciones del sistema socioecológico que está en discusión y proveer las tecnologías, la información y la guía necesarias para llevar adelante una transición agroecológica.

La visión sistémica y la promoción de la multi/inter/transdisciplinariedad son aspectos que deben atenderse especialmente. Abandonar

el reduccionismo es una enorme tarea dado el tipo de formación disciplinaria desde la cual los académicos participan en la promoción de transiciones agroecológicas (Levins, 1973). Lograr una visión sistémica y dialéctica de la realidad que evite los “holismos místicos” requiere la integración de distintas visiones disciplinarias, las cuales muchas veces parten de marcos conceptuales distintos y no comparten un mismo lenguaje.

5. ¿Cuál ha sido el aporte específico del INIA a las trayectorias agroecológicas?

La generación de sistemas de producción agropecuarios más sostenibles ha sido un objetivo explícito del desarrollo de la agenda de investigación del instituto. Si bien la agroecología no estaba presente de manera explícita en el Plan Estratégico Institucional (PEI), sí lo estaba un concepto relacionado, la *intensificación sostenible*. De hecho, uno de los siete ejes estratégicos definidos para el período 2015-2020, con proyección a 2030, fue la generación de “aportes científicos y tecnológicos al desarrollo y la implementación del concepto de ‘intensificación sostenible’ en el sector agropecuario”. En esta definición queda explícita la convicción de que el desarrollo de sistemas más sostenibles en el sector agropecuario requiere de ciencia y de tecnología. Cinco grandes temas estructuraron la agenda de investigación:

1. Incremento sostenible de la productividad.
2. Eficiencia productiva.
3. Calidad, inocuidad y diversificación de productos y procesos.
4. Gestión de los recursos naturales e impacto ambiental.
5. Economía y gestión de los sistemas productivos.

En todos estos temas se contemplan aspectos vinculados a una o más de las 14 dimensiones ya reseñadas. En este libro se presentan algunas de las contribuciones que, desde el INIA, en conjunto con otras instituciones, se realizaron a la generación de conocimiento y tecnologías que aportan a transiciones agroecológicas en distintos sistemas de producción (Tabla 2).

TABLA 2. CONTRIBUCIONES DE LOS CAPÍTULOS DEL LIBRO A LA GENERACIÓN DE CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍAS QUE APORTAN A LAS TRAYECTORIAS AGROECOLÓGICAS EN DISTINTOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN, RESPECTO DE LAS 14 DIMENSIONES

Tecnologías	Descriptor	Sistema de producción al que aporta	Dimensiones asociadas a las trayectorias agroecológicas																	
			1. Biodiversidad	2. Reducir aplicaciones productos químicos	3. Mantener o restaurar áreas naturales	4. Uso eficiente de recursos naturales	5. Preservar procesos naturales, reciclar, reutilizar	6. Diversidad de hábitats	7. Integrar prácticas en el paisaje	8. Una sola salud	9. Participación y entrenamiento de los productores	10. Intercambio de saberes	11. Desarrollo territorial	12. Acercar la producción a los consumidores	13. Inocuidad	14. Reducir emisiones				
Manejo agroecológico de las chinches en soja	Alternativas de control de chinches en soja mediante cultivos atrayentes como alimento preferencial de la plaga y cultivos consociados tipo barrera viva	Agrícola																		
Manejo de plagas en frutales de hoja caduca: hacia un norte agroecológico	Control de lepidópteros en frutales mediante trapeo masivo con atrayentes semioquímicos. Control biológico de la psila del peral mediante el manejo de la oferta de hábitats de enemigos naturales	Vegetal intensivo																		
Manejo de malezas en sistemas ganaderos y agrícolas	Diseño de estrategia combinada de control mecánico + químico de malezas en sistemas extensivos. Cultivos de cobertura combinado con rolado de desecación para disminuir el establecimiento de malezas en cultivos.	Agrícola/ ganadero																		

Aportes científicos y tecnológicos del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) del Uruguay...

Almacenaje y secuestro de carbono en suelos del Uruguay	Promoción de la retención de carbono en el suelo mediante rotaciones, secuencias de cultivos y siembra directa. Validación de modelos de simulación de la dinámica del carbono y el nitrógeno a largo, mediano y corto plazo	Agrícola/ gana- dero, Vegetal intensivo																	
Coberturas vegetales y manejo del suelo en la citricultura de Uruguay	Aumento de la disponibilidad hídrica, disminución de la erosión y de la viabilidad de patógenos y semillas con incorporación de mulch orgánico en la fila. Siembra de tapiz vegetal en la entrefila para disminuir la erosión y la compactación del suelo.	Vegetal intensivo																	
Evaluación de la heterogeneidad estructural y funcional de los pastizales naturales para su manejo	Identificación, descripción y creación de protocolos de evaluación de las comunidades de pastizal natural para uso ganadero de Uruguay	Gana- dero																	
Uso y manejo del microbioma para el desarrollo de bioinsumos de uso agrícola	Identificación, caracterización, bioproducción y formulación de insumos a partir de microorganismos del suelo. Desarrollo de bioinsumos para la protección y nutrición vegetal	Vegetal intensivo, Agrícola, Forestal																	
Inoculantes rizobianos y aporte de nitrógeno proveniente de la atmósfera a los sistemas de producción	Selección de cepas eficientes, competitivas y persistentes de rizobio utilizando cepas naturalizadas y adaptadas. Estudio de la ecología de la FBN (análisis del ciclo de vida) con el objetivo de lograr inoculantes rizobianos para leguminosas sostenidos en la FBN	Agrícola/ gana- dero, Vegetal intensivo																	

(Continúa en página siguiente)

Introducción

<p>Cultivares locales y mejoramiento hortícola en procesos de transición agroecológica</p>	<p>Obtención de cultivares más productivos, adaptados a las condiciones agroclimáticas y a los sistemas productivos locales (boniato, papa, cebolla, frutilla, tomate, ajo y mani). Incorporación de resistencias a plagas y enfermedades</p>	<p>Vegetal Intensivo</p>																	
<p>Oportunidades para la transición agroecológica en tomate bajo invernáculo en el sur de Uruguay</p>	<p>Construcción de un índice integrador de la sostenibilidad ambiental. El índice permite el aprendizaje del productor de sus pares y tiene en cuenta la trayectoria particular para cada predio</p>	<p>Vegetal intensivo</p>																	
<p>Cultivares locales y mejoramiento frutícola</p>	<p>Mejoramiento genético de frutales orientados a obtener variedades resistentes a enfermedades y adaptadas a las condiciones agroclimáticas del Uruguay. Recuperar, valorizar y promover el cultivo de frutos nativos</p>	<p>Vegetal intensivo</p>																	
<p>Investigación y aplicación de la mejora genética animal: efectos sobre la dimensión ambiental de la sostenibilidad de la producción ganadera</p>	<p>Direccionamiento de índices de selección de bovinos y ovinos hacia una mayor eficiencia de conversión, resistencia a parásitos gastrointestinales e incorporación del criterio de selección directa "emisión de metano"</p>	<p>Ganadero - Lechero</p>																	
<p>Uso de la sombra como herramienta de mitigación del riesgo de estrés calórico en sistemas de producción animal</p>	<p>Implantación de "bosque" con especies nativas para abrigo térmico de animales. Objetivo de umentar el bienestar animal, la ganancia de peso y producción de leche en bovinos</p>	<p>Ganadero - Lechero</p>																	

(Continúa en página siguiente)

Aportes científicos y tecnológicos del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) del Uruguay...

<p>Modelo para la optimización en la planificación de usos del suelo (MOPUS) en cuencas lecheras con objetivos productivos y ambientales</p>	<p>Creación de un modelo que trabaja a distintos niveles (de lote a microcuenca) y que considera múltiples objetivos en conflicto. El modelo permite la toma de decisiones de manejo minimizando la exportación de fósforo a la cuenca además de contemplar objetivos productivos</p>	<p>Lechero</p>														
<p>Mitigación de stress nutricional y sanitario en colmenas mediante el uso de productos naturales</p>	<p>Aumento de población, menor infección por Nosema y disminución del tiempo de recuperación en colmenas suplementadas con polen multifloral ensilado ubicadas en monocultivos. Utilización continua exitosa de formulado orgánico para el control de Varroa.</p>	<p>Agrícola - Forestal</p>														
<p>Coinnovación como enfoque para promover transiciones agroecológicas: avances desde la investigación en Uruguay</p>	<p>Promoción de las transiciones agroecológicas a través de proyectos interdisciplinarios de investigación-acción. Constituyendo un proceso cíclico de investigación-reflexión-acción</p>	<p>Agrícola - ganadero, Familiar</p>														
<p>Tecnologías de la Información y la comunicación (TIC) como aportes a la transición de la agricultura agroecológica</p>	<p>Desarrollo de sistemas de información para la planificación y toma de decisiones de manejo. Disponibilidad y acceso libre a la información a través de portales web y apps.</p>	<p>Vegetal intensivo, Ganadero, Agrícola/ ganadero, Lechero, Forestal, Familiar</p>														
<p>Aportes al manejo agroecológico de enfermedades en trigo</p>	<p>Desarrollo de estrategias complementarias/alternativas al control químico de enfermedades basados en manejo por resistencia genética, biocontrol y secuencia de cultivos.</p>	<p>Agrícola, Agrícola-ganadero</p>														

Introducción

Índice de Integridad Ecosistémica: hacia un análisis multidimensional de la integridad ecológica en sistemas productivos	Diseño de un índice de evaluación del estado del ecosistema. Integra información sobre la estructura de la vegetación, comunidad florística, erosión del suelo, zonas riparias y lo evalúa respecto a una situación de referencia óptima	Agrícola, Agrícola-ganadero																	
Manejo de enfermedades de suelo en sistemas hortícolas	Desarrollo y combinación de medidas tácticas (solarización y biofumigación) y estratégicas (rotaciones y uso de abonos verdes) para el manejo de enfermedades en sistemas hortícolas.	Vegetal intensivo																	
Rotaciones de cultivos y pasturas – La base de los sistemas agrícola-ganaderos que producen granos, carne y servicios ecosistémicos	Diseño de secuencia de rotaciones de cultivos y pasturas con el objetivo de minimizar la erosión, promover el ciclo de nutrientes y actividad biológica del suelo	Agrícola, Agrícola-ganadero																	
La gestión del pastoreo como herramienta de transición agroecológica en sistemas lecheros	Optimización de la cosecha de forraje para aumentar la vida útil de las pasturas perennes	Lechería																	
Cultivos de servicio	Evaluación de provisión de servicios (secuestro C, reducción de la erosión, control de plagas y malezas, regulación hídrica) de cultivos no destinados a la cosecha	Agrícola-ganadero																	

Los aspectos asociados a la promoción de la diversidad específica aérea y subterránea, la reducción de las aplicaciones de productos sintéticos, el aumento en la eficiencia en el uso de los recursos y el enfoque de

“Una sola salud” son abordados en más del 70% de los capítulos. Solamente una de esas dimensiones (acercar la producción a los consumidores) no está considerada de manera explícita en alguno de los capítulos. Las tecnologías presentadas tratan en promedio cinco de estos aspectos.

Referencias

Altieri, M.

(1989), “Agroecology: A new research and development paradigm for world agriculture”, en *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 27, pp. 37-46.

Clements, F. E.

(1916), *Plant Succession: An Analysis of the Development of Vegetation*. Washington (DC): Carnegie Institute of Washington.

Cumming, G. S, Cumming, D. H. M. y Redman, C. L.

(2006), “Scale Mismatches in Social-Ecological Systems: Causes, Consequences, and Solutions”, en *Ecology and Society*, 11 (1).

Dyksterhuis, E. J.

(1949), “Condition and management of range land based on quantitative ecology”, en *Journal of Range Management*, 2, pp. 104-115.

Garibaldi, L. A., Pérez-Méndez, N., Garratt, M. P. D., GemmillHerren, B., Miguez, F. E. y Dicks, L. V

(2019), “Policies for ecological intensification of crop production”, en *Trends in Ecology and Evolution*, 34, pp. 282-286.

Ghersa, C. M., Satorre, E. H., Van Esso, M. L., Pataro, A. y Elizagaray, R.

(1990), “The use of thermal calendar models to improve the efficiency of herbicide applications in Sorghum halepense (L.)”, en *Pers. Weed Research*, 30, pp. 153-160.

Gliessman, S. R.

(2015), *Agroecology. The Ecology of Sustainable Food Systems*, CRC Press Taylor & Francis Group, 364 pp.

Levidow, L., Pimbert, M. y Vanloqueren, G.

(2014), “Agroecological Research: Conforming—or Transforming the Dominant Agro-Food Regime?”, en *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 38:10, pp. 1127-1155. DOI: 10.1080/21683565.2014.951459.

Levins, R.

(1973), “Fundamental and Applied Research in Agriculture: A dichotomy in biology harms both theory and practice”, en *Science*, 181, pp. 523-524. DOI: 10.1126/science.181.4099.523.

Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N. et al.

(2007), “Complexity of Coupled Human and Natural Systems”, en *Science*, 317(5844), pp. 1513-1516. <<https://doi.org/10.1126/science.1144004>>.

Mann, C. C.

(2018), *The Wizard and the Prophet. Two remarkable scientists and their dueling visions to shape tomorrow's world*, Knopf, Nueva York, 640 pp.

Ostrom, E.

(2009), "A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems", en *Science*, 325(5939), pp. 419-422. <<https://doi.org/10.1126/science.1172133>>.

Paruelo, J. M.

(2016), "El papel de la ciencia en el proceso de ordenamiento territorial (y en otras cuestiones vinculadas con problemas ambientales)", en *Ecología Austral*, 26, pp. 051-058.

Paruelo, J.M. y Littera P.

(2019), *El lugar de la naturaleza en la toma de decisiones*, Ediciones CICCUS, Buenos Aires, 567 pp.

Satorre, E. H., Ghersa, C. M. y Pataro, A. M.

(1985), "Prediction of Sorghum halepense (L.) Pers. rhizome sprout emergence in relation to air temperature", en *Weed Research*, 25, pp. 103-109.

Satorre, E. H., Benech Arnold, R. L., Slafer, G. A., de la Fuente, E. B., Miralles, D. J., Otegui, M. E. y Savin, R.

(2003), *Producción de Granos. Bases funcionales para su manejo*, Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires.

Seghezzo, L.

(2009), "The Five Dimensions of Sustainability", en *Environmental Politics*, 18(4), pp. 37-41. <<https://doi.org/10.1080/09644010903063669>>.

Soriano, A.

(1975), "Gloria y miseria de las malezas de los cultivos", *Anales ANAV*, tomo XXIX, pp. 13-34. Disponible en: <<http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/29149>>.

Tischler, W.

(1965), *Agrarökologie*, Gustav Fischer Verlag, Jena (Alemania), 499 pp.

Vallejos, M., Aguiar, S., Baldi, G., Mastrángelo, M., Gallego, F., Pacheco-Romero, M., Alcaraz-Segura, D. y Paruelo, J. M.

(2020), "Social-Ecological Functional Types: Connecting people and ecosystems in the Argentine Chaco". *Ecosystems*. Doi.org/10.1007/s10021-019-00415-4

World Commission on Environment and Development (WCED)

(1987), *Our Common Future: Brundtland Report*, United Nations. General Assembly, & World Commission on Environment.

Werkheiser, I. y Pison, Z.

(2015), "People Work to Sustain Systems: A Framework for Understanding Sustainability", en *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(12). <[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000526](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000526)>.

Westoby, M., Walker, B. y Noy-Meir, I.

(1989), "Opportunistic management for rangelands not at equilibrium", *J. Range Manage*, 42(4), pp. 266-274.

Anexo

Caja 1. Servicios ecosistémicos

La idea de servicios ecosistémicos (SE) conecta la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas con los beneficios que estos brindan a los humanos. El modelo de “cascada”, donde la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas producen servicios intermedios, que son el soporte de servicios finales, los que proporcionan a su vez beneficios a los humanos, describe la conexión entre los procesos ecológicos, los SE y los beneficios. Como servicios intermedios se incluyen aquellos aspectos de los ecosistemas que, sin proporcionar directamente beneficios, son fundamentales para la provisión de servicios (por ejemplo: la productividad primaria o el almacenamiento de la materia orgánica en el suelo), mientras que los servicios finales son aquellos aspectos del ecosistema que directamente producen beneficios (producción de forraje o granos, carne, etc.). La iniciativa Millenium Ecosystem Assesment (2005) (Evaluación de los ecosistemas del milenio) clasifica los servicios ecosistémicos de la siguiente manera.

Servicios de suministro: se refiere a la provisión de productos de los ecosistemas que son directamente apropiables y en general involucran una extracción de materia y/o energía. Estos incluyen los alimentos, la madera, el agua potable, fibras, entre otros.

Servicios de regulación: son aquellos procesos del ecosistema que regulan y mantienen el funcionamiento del ecosistema, ayudando a su estabilidad (regulación hídrica, regulación del clima, polinización, control biológico de plagas, etc.).

Servicios culturales: son aquellos beneficios no materiales que obtenemos de los ecosistemas como su uso para recreación, educación, investigación científica o experimentación, o simplemente para su disfrute estético o escénico. Se incluyen los aspectos culturales, espirituales o religiosos asociados a los ecosistemas.

Servicios de apoyo: son aquellas estructuras y aquellos procesos ecosistémicos que sirven de base para la provisión del resto de los servicios ecosistémicos (como ser la productividad primaria neta, la formación de suelo, el ciclado de nutrientes, etc.).

La biodiversidad ha sido incluida en los servicios de apoyo en algunas clasificaciones, pero en la de la Evaluación de los ecosistemas del milenio ocupa una categoría aparte por su gran importancia en el sustento de

los ecosistemas. Si bien no es considerada un servicio ecosistémico, se la considera como un facilitador para la provisión de todos los servicios ecosistémicos. La biodiversidad es en general uno de los aspectos más afectados por las actividades humanas y su pérdida es claramente irreversible, a diferencia de lo que ocurre en algunos de los otros servicios ecosistémicos.

La evaluación del nivel de oferta de los SE requiere de técnicas que se apoyan en la cuantificación de procesos y la estructura de los ecosistemas y que pueden o no incluir valoraciones económicas (Paruelo y Laterra, 2019).

Caja 2. Niveles de conversión a agroecosistemas sostenibles (Transiciones agroecológicas) (Basado en Gliessman, 2015, cap. 22).

Nivel 1: aumentar la eficiencia de las prácticas y los manejos agropecuarios convencionales para reducir el uso y el consumo de insumos costosos, escasos o perjudiciales para el ambiente.

Nivel 2: sustituir los insumos, prácticas y manejos convencionales por prácticas alternativas.

Nivel 3: rediseñar el agroecosistema para que funcione sobre la base de un nuevo conjunto de procesos ecológicos.

Nivel 4: restablecer una conexión más directa entre los que cultivan los alimentos y quienes los consumen.

Nivel 5: sobre la base de los agroecosistemas sostenibles, agroecosistemas a escala de predio asociados al nivel 3 y a las relaciones producción-consumo del nivel 4, construir un nuevo sistema alimentario global, basado en la equidad, la participación y la justicia, que no solo sea sostenible, sino que también ayude a restaurar la oferta de servicios ecosistémicos en el planeta.

Primera sección
Transitando hacia la protección
agroecológica de los cultivos

Editora: Carolina Leoni

Introducción

Transitando hacia la protección agroecológica de los cultivos

Carolina Leoni

Desde los años 1960, el manejo integrado de plagas, enfermedades y malezas (MIP) ha sido el paradigma de la protección vegetal de los cultivos. Idealmente y para cada cultivo se priorizan las medidas preventivas, el uso de variedades resistentes/tolerantes, métodos culturales, físicos y biológicos de control y se recurre al control químico solamente cuando es indispensable. A su vez, el control químico se realiza según umbrales de intervención y prefiere los principios activos con menor impacto ambiental y sobre la salud humana (FAO, 2021). Sin embargo, el control químico, por su simplicidad y relativo bajo costo –entre otras razones–, sigue siendo la opción dominante y no la última, con los múltiples efectos negativos que conlleva. Si bien a nivel nacional se ha trabajado en generar información y tecnología para contribuir al MIP, según estadísticas del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP, 2021) la importación de fitosanitarios en el año 2020 fue cercana a US\$ 124 millones para 11,3 millones de kilogramos (kg) de materia activa, lo que equivale a 3 kg de materia activa por hectárea (ha) agrícola.¹ Estos montos implicaron, con respecto al año 2005, un aumento en US\$ de 178%, 166% y 211% para insecticidas, fungicidas y herbicidas, respectivamente, explicado en parte por el incremento del área agrícola nacional. La materia activa con mayor volumen de importación para cada grupo corresponde al insecticida clorpirifos, al fungicida mancozeb y al herbicida glifosato. Todos

¹ Se consideró como área agrícola la definida en el *Anuario Estadístico 2021* (MGAP-DIEA, 2021) para los cultivos de secano, arroz, fruticultura, horticultura, plantaciones forestales y praderas sembradas + verdeos forrajeros en la producción ganadera, agrícola-ganadera y lechera. La superficie total de estas actividades es de 3.912.000 ha.

ellos están cuestionados por sus impactos negativos en la salud y el ambiente, y, por ejemplo, el clorpirifos y el mancozeb no están permitidos en la Unión Europea (UE), mientras que el glifosato tiene autorización hasta diciembre de 2022 (EUR-Lex, 2021).

Este relativo fracaso del MIP nos interpela y demanda un nuevo paradigma que oriente la protección vegetal. Ese nuevo paradigma se plantea desde la agroecología y se denomina Protección Vegetal Agroecológica (PVA) (Deguine *et al.*, 2021). La PVA sustituye el foco en el binomio cultivo – enfermedad/plaga/maleza por el de salud del agroecosistema. Ese cambio implica el rediseño de los agroecosistemas y propone prácticas a nivel de cuadro, de predio y de paisaje simultáneamente, así como la valoración ecológica y socioeconómica de las mismas. El rediseño de los agroecosistemas busca fortalecer los servicios ecosistémicos de regulación y provisión, establecidos por las múltiples interacciones entre plantas, animales y comunidades microbianas tanto aéreas como del suelo, así como reducir los insumos químicos y promover los insumos alternativos (principalmente biológicos), ya sean externos o propios del sistema. Para que ello sea posible es necesario promover la biodiversidad aérea y subterránea y la salud del suelo.² Pero no debemos olvidar que para alcanzar los objetivos de la PVA es necesario rediseñar también el concepto de investigación, desarrollo tecnológico e innovación (I+D+i) de la protección vegetal, lo cual implica integrar actores (productores, técnicos, investigadores) y disciplinas (ecología, fisiología, bioinformática, ciencia de datos) que nos permitan entender mejor el agroecosistema con sus procesos y servicios, implementar y mejorar las estrategias de manejo que vienen del MIP (prácticas culturales, control biológico, rotaciones, resistencia genética, resistencia inducida), desarrollar nuevas herramientas y comunicar mejor.

En el camino hacia la PVA, podemos implementar y mejorar medidas de manejo que vienen del MIP (prácticas culturales, control biológico, control físico, rotaciones, resistencia genética, resistencia inducida), sin perder el objetivo de potenciar globalmente la salud del agroecosistema. Esas medidas de manejo, o prácticas agronómicas, pueden ser estratégicas o tácticas, según su impacto sea a corto o largo plazo (Tabla 1). El INIA ha desarrollado y/o evaluado prácticas agronómicas que aportan a

² Salud del suelo: Capacidad sostenida del suelo de funcionar como un sistema vivo que soporte la productividad biológica, mantenga la calidad ambiental y promueva la salud de las plantas, los animales y las personas (Larkin, 2015).

repensar la protección vegetal en los diversos sistemas productivos del país y en los capítulos siguientes se presentan algunos ejemplos.

TABLA 1. ALGUNAS MEDIDAS ESTRATÉGICAS Y TÁCTICAS QUE CONTRIBUYEN AL REDISEÑO DE LOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN, CON FOCO EN LA PROTECCIÓN AGROECOLÓGICA DE LOS CULTIVOS

MEDIDAS ESTRATÉGICAS (MEDIANO Y LARGO PLAZO)	MEDIDAS TÁCTICAS (CORTO PLAZO)
<ul style="list-style-type: none"> • Planificación y sistematización del predio • Diversificación productiva (sistemas mixtos de producción animal y vegetal; especies vegetales anuales y plurianuales) • Biodiversidad planificada (rotaciones, cultivos asociados, cultivos de servicios, coberturas vivas, cercos vivos, fajas de vegetación permanente) • Infraestructura ecológica (corredores e islas de biodiversidad; cortinas y cercos vivos) • Solarización y biofumigación 	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad del material de propagación (identidad genética, sanidad, vigor) • Variedades/cultivares (resistencia genética duradera, materiales multilínea) • Época de siembra y cosecha • Manejo del suelo (laboreo: cero, reducido, vertical; enmiendas orgánicas; abonos verdes; uso de mulch) • Manejo del agua (riego localizado, calidad de agua) • Tratamientos sanitarios específicos <ul style="list-style-type: none"> o Control biológico inundativo (predadores, parasitoides, agentes microbianos) o Uso de semioquímicos (feromonas, kairomonas y otros volátiles de plantas y/o insectos) o Insumos alternativos (inductores de resistencia, extractos de plantas y algas, sales y minerales) o Control mecánico de malezas

Una medida táctica-estratégica clásica de estudio en el INIA ha sido la resistencia genética a enfermedades y en menor medida a plagas. En esta primera sección, Silvia Pereyra (Capítulo 3) presenta los avances del mejoramiento genético en trigo por resistencia a varias enfermedades, pero otros aportes del INIA se presentan en la tercera sección “Tecnologías con enfoque en la productividad y la calidad”.

Asimismo, se ha trabajado en valorizar y conservar la diversidad vegetal y la fauna asociada como estrategia para el manejo de plagas, enfermedades y malezas. Se muestra cómo es posible, mediante el uso de la diversidad vegetal, manejar poblaciones de insectos plaga como los hemípteros fitófagos de soja (“chinchas”) empleando cultivos trampa y/o barreras vivas (Zerbino y Leoni, Capítulo 1), o contribuir al control de la

psila del peral mediante el manejo de la vegetación espontánea en las entrefilas de los montes (Mujica y Valle, Capítulo 2). Las rotaciones de cultivos son otra forma de favorecer la diversidad vegetal y ha sido una estrategia clásica para el manejo de enfermedades. Se muestra cómo es posible manejar las enfermedades ocasionadas por patógenos de suelo como *Sclerotium rolfsii* y *Fusarium oxysporum* f.sp.*cepae* en sistemas hortícolas si se plantea una adecuada secuencia de cultivos (Leoni, Capítulo 4), o cómo las rotaciones de cultivos favorecen la sanidad del cultivo de trigo y cebada, no solo al evitar la sobrevivencia de los patógenos sino por la promoción de comunidades microbianas benéficas como *Trichoderma* spp. (Pereyra, Capítulo 3). También, Amparo Quiñones-Dellepiane *et al.* (Capítulo 6) evidencian la importancia de la diversidad de campo natural, y la eficiencia de las herramientas de control mecánico en regular las poblaciones de cardilla (*Eryngium* spp.) y carqueja (*Baccharis* sp.) si se combinan con un adecuado pastoreo que evite el consumo excesivo de las especies de interés.

Finalmente, se presentan algunas medidas dirigidas específicamente a reducir y/o eliminar el control químico. Entre ellas, el manejo de las poblaciones de lepidópteros plaga en frutales de hoja caduca mediante el empleo de feromonas sexuales y volátiles de plantas para mejorar la eficiencia de las capturas en trampas, haciendo más efectivo el control y monitoreo (Mujica y Valle, Capítulo 2). Por otra parte, Leticia Rubio y colaboradores (Capítulo 5) plantean los beneficios de la solarización y biofumigación con crucíferas para el control de nematodos formadores de agallas (*Meloidogyne* spp.) en sistemas hortícolas protegidos y de la solarización a campo en el cultivo de cebolla para el control del nematodo del tallo (*Ditylenchus dipsaci*) y de la podredumbre blanca (*Sclerotium cepivorum*), y la reducción del banco de semillas de malezas. Por último, y pensado específicamente en una alternativa al glifosato en los sistemas agrícolas de siembra directa, se muestra como el rolado de los cultivos de cobertura permite sustituir el “quemado químico” y controlar malezas en las etapas iniciales del cultivo de soja (Quiñones-Dellepiane *et al.*, Capítulo 6).

Referencias

Deguine, J. P., Aubertot, J. N., Flor, R. J., Lescourret, F., Wyckhuys, K. A. G. y Ratnadass, A. (2021), “Integrated pest management: good intentions, hard realities. A Re-

view”, en *Agronomy for Sustainable Development*, 41, p. 38. <<https://doi.org/10.1007/s13593-021-00689-w>>.

EUR-Lex

(2021), Diario oficial de la Unión Europea. Disponible en: <<https://eur-lex.europa.eu>> [Consulta: 5 de noviembre de 2021].

FAO

(2021), “Manejo integrado de plagas y plaguicidas”. Disponible en: <<https://www.fao.org/pest-and-pesticide-management/ipm/integrated-pest-management/es/>> [Consulta: 5 de noviembre de 2021].

Larkin, R. P.

(2015), “Soil Health Paradigms and Implications for Disease Management”, en *Annual Review of Phytopathology*, 53, pp. 199-221.

MGAP

(2021), Importaciones de productos fitosanitarios. Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/datos/importaciones-productos-fitosanitarios>> [Consulta: 5 de noviembre de 2021].

MGAP-DIEA

(2021), *Anuario Estadístico Agropecuario 2021*. Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/diea>>.

Capítulo 1

Hacia un manejo agroecológico de las chinches en soja

María Stella Zerbino y Carolina Leoni

1. Introducción

En las últimas décadas se registraron importantes cambios en la agricultura en Uruguay. La superficie ocupada por los cultivos de secano se incrementó considerablemente, como consecuencia del aumento exponencial del área destinada a la soja. En los últimos diez años, este cultivo representó en promedio el 63% del área destinada a cultivos de secano.

La soja es una especie originaria de regiones templadas frías donde los insectos plaga son de escasa importancia. A medida que este cultivo se desarrolla en latitudes menores, los insectos fitófagos son uno de los factores bióticos adversos más importantes. En Uruguay, se suma la coexistencia del cultivo con áreas donde se realizan leguminosas forrajeras, que comparten la mayoría de los insectos plaga. Es un cultivo que en nuestro país requiere normalmente entre una y dos, y a veces más aplicaciones de insecticidas para mantener las poblaciones por debajo del umbral de daño.

Entre los grupos de insectos que causan daño a la soja se destacan los hemípteros fitófagos (Hemiptera: Pentatomidae), denominados vulgarmente “chinches”, porque son los que tienen mayor potencial de causar importantes pérdidas económicas. Las especies presentes en este cultivo son *Piezodorus guildinii* (Westwood), *Nezara viridula* (L.), *Diceraeus furcatus* (Fabr.) y *Edessa meditabunda* (Fabr.) (Figura 1). De todas ellas, la de mayor importancia económica es *P. guildinii*, por ser la que causa los mayores daños en la superficie y la profundidad de los granos (Depieri y Panizzi, 2011) y la más abundante (Zerbino *et al.*, 2016b) (Figura 2).

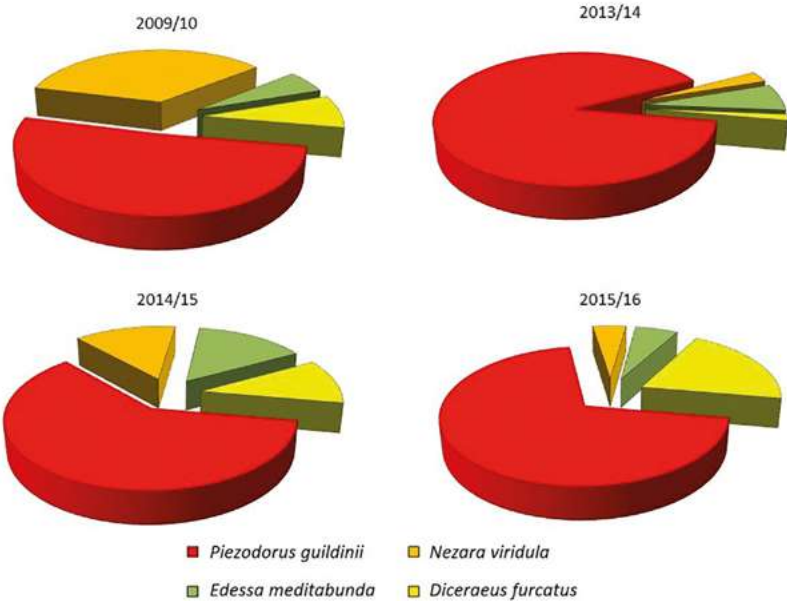
FIGURA 1. ESPECIES QUE COMPONEN EL COMPLEJO DE HEMÍPTEROS FITÓFAGOS (“CHINCHES”) QUE COLONIZAN LA SOJA



Diceraeus furcatus *Edessa mediatubunda* *Nezara viridula* *Piezodorus guildinii*

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2. IMPORTANCIA RELATIVA DE LAS ESPECIES QUE COMPONEN EL COMPLEJO DE HEMÍPTEROS FITÓFAGOS DE LA SOJA (“CHINCHES”) EN LAS ZAFRAS 2009-2010, 2013-2014, 2014-2015 Y 2015-2016



Fuente: Elaboración propia.

Las chinches tienen aparato bucal pico suctor y en general se alimentan de las vainas y los granos. Los daños que producen resultan de la frecuencia de introducción de los estiletes y de la duración del período de alimentación. Además, las secreciones salivales que producen durante el período de alimentación pueden ser tóxicas y causar necrosis (Panizzi, 2000). Como resultado de su alimentación, pueden inutilizar las semillas o reducir su viabilidad, dando origen a plántulas de escaso vigor, afectar la producción y la calidad del grano (contenido de aceite y proteína), así como también el metabolismo de las plantas, lo cual impide una maduración adecuada y dificulta la cosecha. Durante el proceso de alimentación pueden favorecer infecciones oportunistas en la herida y/o transmitir microorganismos patógenos bacterianos o fúngicos (Panizzi y Silva, 2009).

2. Manejo actual de los hemípteros fitófagos (“chinches”) en soja

El manejo de estos insectos es una tarea compleja y dificultosa. Causan daños económicos en bajas densidades. La dispersión de adultos puede ocasionar rápidos incrementos de las poblaciones, por lo que es frecuente la necesidad de aplicaciones adicionales de insecticidas para mantener las poblaciones por debajo de los niveles de daño. Tienen tolerancia intrínseca a los principios activos comúnmente utilizados, por lo que para su control se requieren dosis altas de insecticidas (Corso y Gazzoni, 1998). Las opciones de control químico con distintos modos de acción que tienen probada eficiencia y que están en consonancia con el MIP (Manejo Integrado de Plagas) son escasas, por lo que la rotación de principios activos resulta muy difícil (Panizzi, 2013). La falta de opciones para el control químico conduce a que, en una misma temporada y durante varios años, se utilicen principios activos con un modo de acción similar. Esta situación favorece la evolución de la resistencia de estos insectos a los insecticidas.

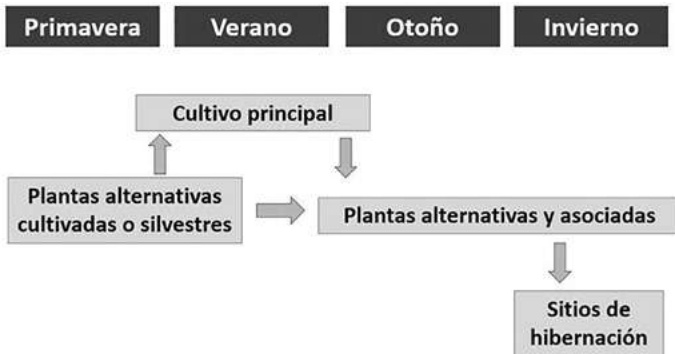
Los cambios producidos en los sistemas de producción y la disminución del costo de los insecticidas es un inconveniente para la aplicación correcta del MIP clásico. El incremento de áreas cultivadas homogéneas plantea dificultades para realizar muestreos de chinches que sean representativos. A esto se suma la disminución considerable del costo de los insecticidas, lo que muchas veces conduce a su uso de manera injustificada.

3. Alternativas tecnológicas para el manejo de hemípteros fitófagos (“chinches”) en soja

3.1. Uso de la diversidad vegetal para el manejo de chinches

Las chinches son insectos polífagos que tienen una relación intensa con las plantas. La disponibilidad y la calidad del alimento, fundamentalmente semilla, son factores que regulan su dinámica poblacional. Cuando la planta preferida es un cultivo anual, que es una fuente nutricional efímera, necesitan una secuencia de plantas huéspedes para el desarrollo de las sucesivas generaciones (Panizzi y Silva, 2009). Las especies que causan daños en soja comienzan a colonizar el cultivo cuando se inicia la formación de vainas y lo abandonan en el momento de la cosecha (Panizzi, 2000). Los adultos se pueden desplazar a otras plantas alternativas donde se reproducen y desarrollan, y/o dispersar a plantas asociadas, las cuales son utilizadas como abrigo y eventualmente como fuente de nutrientes y agua, pero generalmente allí no se reproducen. También se pueden trasladar a sitios de hibernación, como los rastrojos de cultivos, la hojarasca o la corteza de los árboles, que son utilizados como refugios (Zerbino *et al.*, 2015). Estos tres tipos de estrategias: plantas alternativas y asociadas, y sitios de hibernación son eslabones esenciales en la intrincada historia de vida de los hemípteros, los cuales habitualmente han sido subestimados (Panizzi, 2000) (Figura 3).

FIGURA 3. ESQUEMA DE LA SECUENCIA DE PLANTAS Y HÁBITAT COLONIZADOS POR LAS SUCEVAS GENERACIONES DE HEMÍPTEROS FITÓFAGOS (“CHINCHES”)



Fuente: Elaboración propia.

Las chinches son insectos relativamente poco móviles, que responden fuertemente a las fronteras de vegetación, por lo que el “efecto de borde” es un factor importante en el momento del ingreso al cultivo (Tillman *et al.*, 2014). La colonización y dispersión tiende a disminuir cuando el cultivo principal se encuentra rodeado por un área de otra especie vegetal de mayor altura. En consecuencia, en el momento de diseñar estrategias de manejo es importante considerar que, en la dispersión de estos insectos, además de influir la preferencia alimenticia de especies vegetales, también tiene efectos importantes la estructura de la vegetación que rodea al cultivo principal. El manejo de la dispersión y colonización de los insectos se puede realizar mediante estrategias variadas.

Todo lo anteriormente expuesto indica que, en el caso particular de las chinches, el uso y manejo de la diversidad vegetal es un componente fundamental en la implementación de programas de MIP sustentables y eficientes. Las plantas huéspedes cultivadas o silvestres que pueden ser utilizadas en cultivos consociados, como cultivos trampa o barreras vivas, son una excelente oportunidad para reducir el impacto de estos insectos en el cultivo de soja y, en consecuencia, en la aplicación de insecticidas.

3.2. Cultivos trampa

En el caso de implementar cultivos trampa, se debe utilizar la especie vegetal más atractiva. De esta manera se impide o reduce la probabilidad de colonización del cultivo principal (Hokkanen, 1991). Consiste en ubicar fajas adyacentes de las plantas alternativas para atraer y concentrar los insectos, para aplicar alguna táctica de control en un área más reducida y así disminuir los daños en el cultivo comercial. En los cultivos trampa, la táctica de control más adecuada es la liberación de agentes de control biológico (enemigos naturales y/o entomopatógenos); al ser áreas más pequeñas, la probabilidad de éxito es mayor. Los cultivos trampa pueden proporcionar recursos (hábitat y alimento) a los enemigos naturales, de modo que se desarrollen, sobrevivan, multipliquen y aumenten sus poblaciones. En última instancia, se puede considerar la aplicación de medidas de control químico; las consecuencias negativas en el ambiente y el costo de la aplicación son considerablemente menores.

Piezodorus guildinii (Westwood) es el hemíptero fitófago más abundante y que causa los mayores daños en el cultivo de soja, razón por la que la mayoría de los estudios en Uruguay se centraron en este insecto.

En el oeste de nuestro país, donde se cultiva aproximadamente el 85% de la soja, la alfalfa es la principal planta huésped alternativa, la cual es colonizada antes y después del cultivo de soja (Zerbino *et al.*, 2020). Resultados de laboratorio indican que cuando ninfas y adultos utilizan soja o alfalfa como alimento tienen similar tiempo de desarrollo, mortalidad y performance reproductiva de las hembras (Zerbino *et al.*, 2016a). El conjunto de esta información demuestra que la alfalfa es la especie vegetal indicada para ser utilizada como cultivo trampa.

Para el uso de cultivos trampa es fundamental conocer los patrones de movimiento del insecto entre ambos cultivos, en este caso particular, soja y alfalfa. Los movimientos predominantes de *P. guildinii* son desde la soja hacia la alfalfa, entre los estados reproductivos de la soja R2 (fin floración) y R7 (inicio de madurez), cuando la alfalfa permanece en estado de fructificación (Miguel *et al.*, 2018). La mínima distancia media de dispersión de los adultos es de 17,4 metros. Estos resultados sugieren que la siembra a esa distancia de una faja de alfalfa que permanezca en fructificación durante los estados reproductivos de la soja puede ser una táctica efectiva para disminuir la colonización de *P. guildinii* en la soja (Miguel *et al.*, 2018). Para poder implementar el uso de fajas de alfalfa como cultivo trampa, resta aún conocer cómo debe ser el arreglo espacial de las fajas de alfalfa en el gran cultivo, si deben ser ubicadas en el perímetro y/o intercaladas, de manera que sean efectivas en disminuir o impedir la colonización de *P. guildinii* en la soja.

Es necesario profundizar también en el conocimiento de la ecología de los enemigos naturales a escala de predio y de paisaje. Es preciso conocer cómo responden los parasitoides al cambio de cultivo / plantas huéspedes en la secuencia de plantas que utilizan las chinches, dado que podría ser de mucha utilidad para desarrollar estrategias de control biológico.

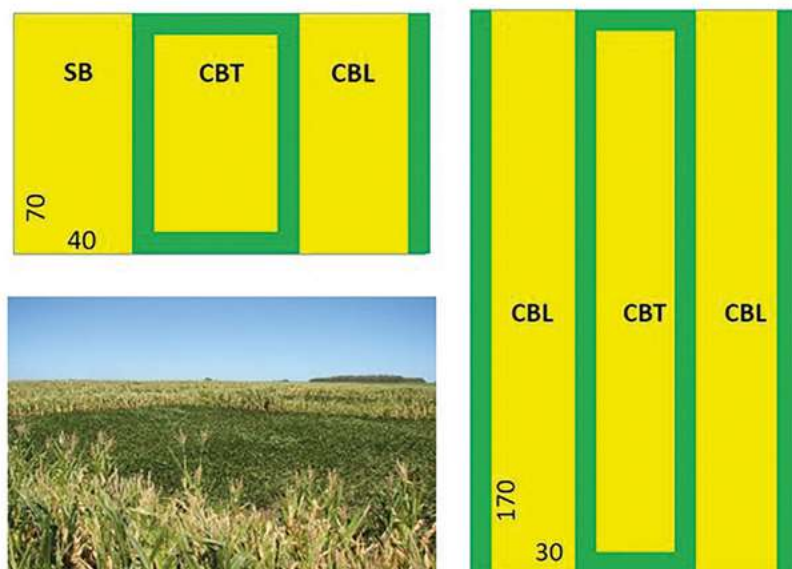
3.3. Barreras vivas

Los cultivos consociados con un dosel más alto dispuestos en el borde y/o intercalados en el cultivo principal actúan como barreras físicas, retrasando el ingreso y el incremento de las poblaciones de las chinches (Zerbino, 2014). Para desarrollar e implementar esta táctica, es necesario determinar cuáles son las especies vegetales que actúan efectivamente como “barreras vivas”, así como el ancho (número de surcos) y la distancia entre las mismas, de manera que esta táctica sea efectiva para las distintas especies que componen el complejo de chinches (Zer-

bino, 2014). El cultivo que actúa como “barrera viva” puede proporcionar otros beneficios, como mejorar el hábitat de los enemigos naturales y/o ser fuente de alimento, lo que favorece su sobrevivencia y multiplicación (Tillman *et al.*, 2015). Por otra parte, cuando esta herramienta es utilizada en cultivos con residuos muy lábiles, como en el caso de la soja, el aporte de residuos al suelo es otro servicio que puede prestar, protegiendo al mismo de la erosión.

El cultivo de maíz, con respecto al sorgo y el girasol, tiene mayor potencial para ser utilizado como barrera viva, y retrasar el ingreso y el incremento de las poblaciones de las chinches en el cultivo de soja (Zerbino *et al.*, 2010). Sobre la base de estos resultados, durante las zafas 2014-2015 y 2015-2016 se realizaron evaluaciones de dos arreglos espaciales de barreras de maíz de seis surcos: soja con barreras laterales (CBL) y con barrera total (CBT) en escalas mayores respecto del largo de parcela (Figura 4).

FIGURA 4. DIAGRAMAS DE LAS BARRERAS VIVAS DE MAÍZ EVALUADAS EN LAS ZAFRAS 2014-2015 (IZQUIERDA) Y 2015-2016 (DERECHA).

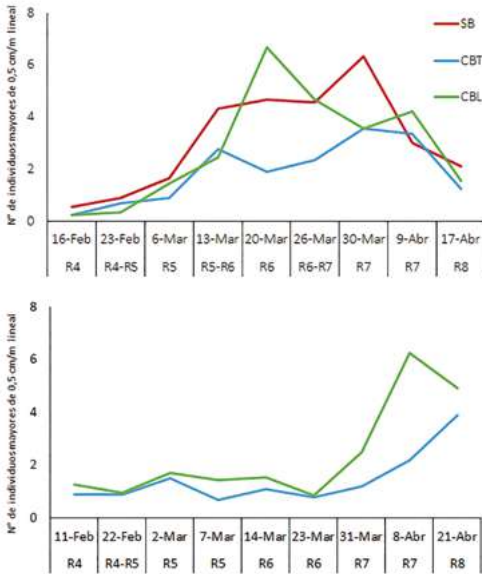


Nota: Los números expresan en metros el largo y el ancho de las parcelas. SB: cultivo sin barrera, CBT: cultivo con barrera total, CBL: cultivo con barrera laterales.

Fuente: Elaboración propia.

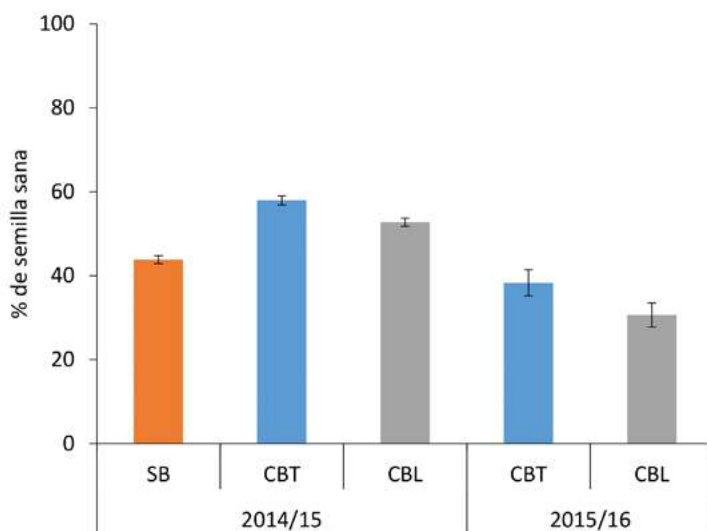
El crecimiento de la densidad poblacional de ninfas mayores y de adultos durante el período en que la soja es sensible al daño (R5-R6, formación y llenado de granos) fue más lento en los cultivos que tuvieron barrera total o lateral (CBT, CBL) que en el cultivo sin barrera (SB) (2014-2015). Además, la densidad poblacional en CBT fue menor que en CBL (2014-2015 y 2015-2016) (Figura 5). Estas diferencias determinaron que hubiera diferencias en el porcentaje de semilla sana. El porcentaje de semilla sana en CBT y CBL fue superior al registrado en SB. A su vez, el valor correspondiente a CBL fue significativamente menor que el de CBT (Figura 6).

FIGURA 5. NÚMERO DE INDIVIDUOS MAYORES DE 0,5 CM (ADULTOS Y NINFAS MAYORES) POR METRO LINEAL EN LOS DISTINTOS ESTADOS FENOLÓGICOS DE CULTIVO PARA LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS DE BARRERAS VIVAS



Nota: SB: cultivo sin barrera; CBT: cultivo con barrera total, CBL: cultivo con barreras laterales. R4 = fin de formación de vainas; R5 = inicio de formación de granos; R6 = fin de llenado de granos; R7 = inicio de madurez; R8 = fin de madurez.
Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 6. PORCENTAJE DE SEMILLA SANA PARA CADA TRATAMIENTO EN LAS ZAFRAS 2014-2015, 2015-2016



Nota: SB: cultivo sin barrera; CBT: cultivo con barrera total, CBL: cultivo con barreras laterales.

Fuente: Elaboración propia.

4. Consideraciones finales

Durante más de 50 años, para enfrentar los problemas de insectos prevalió un enfoque terapéutico, mediante el uso de químicos, que demostró ser efectivo solo en el corto plazo. Soluciones eficientes y de largo plazo requieren un cambio desde una concepción reduccionista a una holística (Ehler, 2000; Panizzi y Parra, 2009, 2012), que considere tanto la historia de vida de la plaga como el diseño del paisaje y su efecto en la residencia, el desarrollo y la multiplicación de los enemigos naturales residentes.

Los resultados obtenidos en relación a la importancia de la alfalfa en la historia de vida de *P. guildinii* y al movimiento de este insecto entre cultivos adyacentes de soja y alfalfa (Miguel *et al.*, 2018, Zerbino *et al.*, 2020) sugieren que esta leguminosa forrajera es una especie promisoría para utilizar como cultivo trampa, si bien para poder establecer una es-

trategia de control más sólida resta confirmar si la alfalfa, en las condiciones de manejo realizadas en este experimento, disminuye el daño del insecto en el cultivo de soja.

A su vez, las “barreras vivas” conformadas por cultivos de mayor altura que el cultivo principal, soja en este caso, son una alternativa para que la velocidad de colonización de las chinches sea más lenta y, en consecuencia, el daño en el grano, menor. El arreglo espacial más efectivo de las barreras vivas determinado hasta este momento consiste en sembrar seis surcos de maíz alrededor del cultivo de soja e intercalar en el cultivo franjas de maíz del mismo ancho a 40 metros de distancia. Mediante la aplicación de esta táctica de manejo, el uso de insecticidas podría verse reducido.

El manejo de la diversidad vegetal propuesto impacta sobre las distintas dimensiones que promueven transiciones agroecológicas. Además de disminuir la aplicación de productos de síntesis (insecticidas en este caso), favorece la diversidad de agentes de control biológicos en el agroecosistema. El uso de cultivos trampa y de barreras vivas incrementa la diversidad funcional del paisaje y provee otros servicios ecosistémicos, como la regulación del movimiento de agua y el control de procesos erosivos.

Referencias

Corso, I. y Gazzoni, D.

(1998), “Sodium Chloride: an insecticide enhancer for controlling pentatomids on soybeans”, en *Pesq. Agrop. Bras.*, Brasilia, 33 (10), pp. 1563-1571.

Depieri, R. y Panizzi, A. R.

(2011), “Duration of feeding and superficial and in-depth damage to soybean seed by selected species of stink bugs (Heteroptera: Pentatomidae)”, en *Neotropical Entomology*, 40, pp.197-203.

Ehler, L. E.

(2000), *Farmscape Ecology of stink bugs in Northern California*, ESA, Maryland, 59 pp.

Hokkanen, H. M. T.

(1991), “Trap cropping in pest management”, en *Annual Review of Entomology*, 36, pp. 119-138.

Miguel, L., Panizzi, A. R. y Zerbino, M. S.

(2018), “Dispersión de adultos de *Piezodorus guildinii* (Hemiptera: Pentatomidae) entre cultivos de soja y de alfalfa”, en *Agrociencia Uruguay*, 22(2), pp. 1-10. ISSN electrónico 2301-1548.

Panizzi, A. R.

(2000), "Suboptimal nutrition and feeding behavior of hemipterans on less preferred plant food sources", en *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, 29(1), pp. 1-12.

Panizzi, A. R.

(2013), "History and Contemporary Perspectives of the Integrated Pest Management of Soybean in Brazil", en *Neotropical Entomology*, 42, pp. 119-127.

Panizzi, A. R. y Parra, J. R. P.

(2009), "A bioecologia e a nutrição de insetos como base para o manejo integrado de pragas", en Panizzi, A. R. y Parra, J. R. P. (eds.), *Bioecologia e nutrição de insetos; base para o manejo de pragas*, Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, pp. 1107-1139.

Panizzi, A. R. y Parra, J. R. P.

(2012), "Introduction to Insect Bioecology and nutrition for integrated pest management (IPM)", en Panizzi, A. R. y Parra, J. R. P. (eds.), *Insect bioecology and nutrition for integrated pest management*, CRC Press, Boca Raton, pp. 3-11.

Panizzi, A. R. y Silva, F. A. C.

(2009), "Insetos sugadores de sementes (Heteroptera)", en Panizzi, A. R. y Parra, J. R. P. (eds.), *Bioecologia e nutrição de insetos; base para o manejo de pragas*, Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, pp. 465-522.

Tillman, P. G., Cottrell, T. E., Mizell, R. F. III y Kramer, E.

(2014), "Effect of field edges on dispersal and distribution of colonizing stink bugs across farmscapes of the Southeast US", en *Bulletin Entomological Research*, 104, pp. 56-64.

Tillman, P. G., Khirman, A., Cottrell, T. E., Mizell, R. F. y Johnson, W. C.

(2015), "Trap cropping systems and a physical barrier for suppression of stink bugs (Heteroptera: Pentatomidae) in Cotton", en *Journal of Economic Entomology*, 108, pp. 2324-2334.

Zerbino, M. S.

(2014), "Herramientas para el manejo sustentable de hemípteros fitófagos en soja", 3er Congreso de Zoología del Uruguay, 7-12 de diciembre, Facultad de Ciencias, Montevideo.

Zerbino, M. S., Altier, N. y Panizzi, A. R.

(2015), "Seasonal occurrence of *Piezodorus guildinii* on different plants including morphological and physiological changes", en *Journal of Pest Science*, 88, pp. 495-505.

Zerbino, M. S., Altier, N. y Panizzi, A. R.

(2016a), "Performance of nymph and adult of *Piezodorus guildinii* (Westwood) (Heteroptera: Pentatomidae) feeding on cultivated legumes", en *Neotropical Entomology*, 45, pp. 114-122.

Zerbino, M. S., Altier, N. y Panizzi, A. R.

(2016b), "Estudios sobre la bioecología de *Piezodorus guildinii* (Hemiptera:

Heteroptera: Pentatomidae) en Uruguay”, Congresso Brasileiro de Entomologia (26 : 2016 : Maceió, SE), IX Congresso Latino-Americano de Entomologia: Anais / Elio Cesar Guzzo ... [et al.], editores técnicos, Embrapa, Brasília. PDF (670 pp.). ISBN 978-85-7035-615-4. Disponible en: <<http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/>>.

Zerbino, M. S., Miguel, L., Altier, N. A. y Panizzi, A. R.

(2020), “Overwintering of *Piezodorus guildinii* (Heteroptera, Pentatomidae) populations”, en *Neotropical Entomology*, 49, pp. 179-190.

Zerbino, M. S., Silva, F. A. C. y Panizzi, A. R.

(2010), “Avanços recentes sobre a interação plantas hospedeiras/percevejos no Uruguai”, Congresso Brasileiro de Entomologia, (23: 2010: Natal, RN)

Capítulo 2

Manejo de plagas en frutales de hoja caduca: hacia un norte agroecológico

Valentina Mujica y Diana Valle

1. Introducción

El sistema vegetal intensivo de Uruguay presenta características distintivas: está comprendido en el 1% de la superficie del país, nuclea al 18% de las explotaciones agrícolas y es responsable por el 20% de la mano de obra que se genera en la agricultura. Pero el atributo más importante es su característica familiar y, aun así, aporta el 96% de las frutas y hortalizas que consumimos (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, 2011).

En el caso particular de los frutales, la producción se ve afectada por diferentes factores, tanto bióticos como abióticos. Entre estos se destaca la presencia de diferentes plagas pertenecientes a diversos órdenes (Cross *et al.*, 1999), siendo las más relevantes incluidas en los órdenes Lepidoptera y Hemiptera (Núñez y Scatoni, 2013). Entre los lepidópteros, los más importantes son *Cydia pomonella*, *Grapholita molesta*, *Argyrotaenia sphaleropa* y *Bonagota salubricola* (Figura 1). Hacia ellas van dirigidas la mayoría de las intervenciones de control en estos cultivos. Cuando se considera las plagas pertenecientes al orden Hemiptera, se aprecia que, a pesar de ser mayoritariamente secundarias, bajo determinadas circunstancias pueden convertirse en plagas clave, como es el caso de la psila del peral (*Cacopsylla bidens*) (Figura 2) o de las cochini-llas y moscas blancas.

FIGURA 1. ADULTOS DE *ARGYROTAENIA SPHALEROPA* (1), *BONAGOTA SALUBRICOLA* (2), *GRAPHOLITA MOLESTA* (3), *CYDIA POMONELLA* (4)



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2. ADULTO DE *CACOPSYLLA BIDENS*



Fuente: Elaboración propia.

2. Manejo actual de plagas

En la actualidad, el control de plagas se basa casi íntegramente en el control químico, optando en especial por el uso de insecticidas no selectivos. Históricamente el punto clave para el control, tanto de lepidópteros como de hemípteros, era el manejo de las poblaciones invernantes durante la dormancia tardía, antes que las plagas retomasen sus ciclos estacionales (Burts, 1968). Para estas aplicaciones resultó muy eficaz el uso de aceite invernal (solo o en mezcla), en particular para insectos de la orden hemiptera como las cochinillas o la psila del peral. En el caso de los lepidópteros, las intervenciones de control estaban dirigidas hacia los picos de emergencia de larvas a lo largo del año.

El uso de fitosanitarios, si bien es necesario en determinadas circunstancias, implica una serie de costos sociales, económicos y ambientales. Cabe resaltar que el riesgo para los consumidores y los aplicadores adquiere siempre mayor relevancia: por un lado, por los eventuales residuos que pueden quedar sobre las frutas y hortalizas cuando no se cumple con los plazos establecidos y, por otro, debido a la cercanía de centros poblados o instituciones educativas a las zonas frutícolas. A esto se debe agregar el costo económico del manejo convencional, que se incrementa año a año debido a que la estrategia basada íntegramente en la aplicación de insecticidas no logra controlar las poblaciones por completo, generándose la necesidad de aumentar dosis y número de aplicaciones. Estos productos de síntesis inciden en los costos de forma significativa, representando el 15% de los gastos de producción, siendo los segundos en importancia después de la mano de obra (MGAP-Opypa, 2017). Con relación al costo ambiental, este último ha adquirido más relevancia en las últimas décadas, debido al siempre mayor interés por la preservación de las fuentes de agua y del ambiente.

Sumado a esto, el manejo basado íntegramente en insecticidas ha demostrado que no siempre es efectivo. Esto se debe a que, con el uso masivo que se hizo de estos productos, se han ido seleccionando en forma involuntaria poblaciones resistentes a los principios activos usados, haciendo que las plagas sean muy difíciles de controlar (Burts, 1968; šek Kocourek y Stará, 2006; Civolani *et al.*, 2010). Además, tanto los insecticidas organofosforados como los piretroides se caracterizan por ser altamente tóxicos para la fauna benéfica, lo que ha promovido la desaparición de los enemigos naturales de las diferentes plagas (Erler y Cetin, 2005), impulsando la necesidad de usar principios activos más específicos y de menor toxicidad para especies no blanco y benéficas.

Asimismo, es necesario tomar en cuenta que, adicionalmente al uso de insecticidas, el manejo de los montes frutales incluye el mantenimiento de una entrefila empastada, pero mantenida al ras del suelo, y las filas sin vegetación, siendo el uso periódico de herbicidas una práctica habitual. Este escenario hace que el paisaje resulte fuertemente simplificado, creándose así un escenario poco favorable para la presencia de enemigos naturales, ya que la mayoría de ellos son dependientes de fuentes de alimento y de refugios promovidos por un hábitat más biodiverso.

El conjunto de estos efectos negativos nos traslada a la etapa actual, en la que se necesita encontrar estrategias alternativas al uso intensivo de plaguicidas alineado con un plan agroecológico para los cultivos.

3. Alternativas tecnológicas para el manejo de plagas en fruticultura

3.1. Control biológico de conservación de la psila del peral

Cuando se considera la psila del peral, el control biológico adquiere un rol primario en la regulación de las poblaciones de las plagas en los cultivos, siendo este identificado como la supresión de las poblaciones de un organismo por medio de organismos vivos o virus. Dicho control se basa en el efecto positivo indirecto de los agentes de control biológico sobre las actividades humanas, mediado por efectos negativos directos o indirectos de estos agentes sobre las poblaciones de una o más especies objetivo. Se reconocen tres modelos de control biológico basado en cómo son manipulados los antagonistas: el control natural, el control biológico de facilitación directa (control biológico de importación, o clásico, y control biológico aumentativo) y el control biológico de facilitación indirecta (control biológico de conservación) (Heimpel y Mills, 2017).

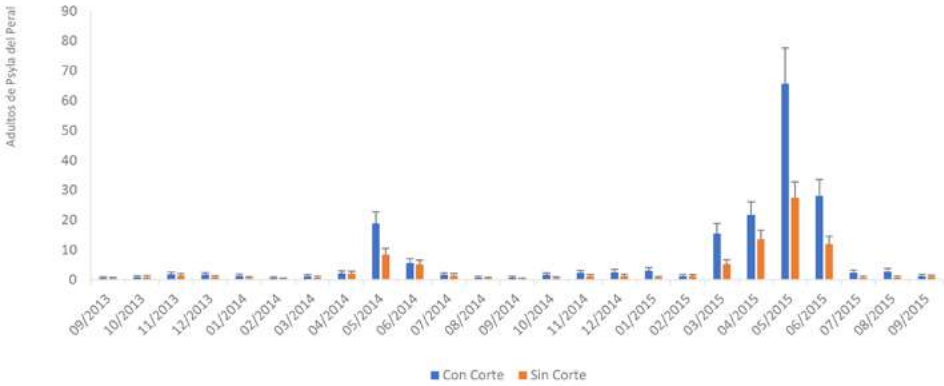
Se han determinado varios enemigos naturales, tanto predadores como parasitoides, que pueden controlar las poblaciones de psila (Westgard *et al.*, 1979). A nivel mundial, algunos de los principales predadores de psila son *Anthocoris nemoralis*, *Orius insidiosus* y *Pilophorus gallicus* (Hemiptera), además de diferentes especies de Chrysopidae, Coccinelidae, Syrphidae y Araneae (Solomon *et al.*, 2000; Sanchez y Ortín-Angulo, 2011). Entre los parasitoides se determinaron once géneros

asociados a Psylloidea, entre los cuales el género *Trechnites* con la especie *Trechnites insidiosus* que en España es un activo parasitoide de *Cacopsylla pyri*, especie estrictamente emparentada con *C. bidens* (Avilla *et al.*, 1992; Guerrieri y Noyes, 2009).

Es en el marco de un proyecto que se desarrolló en el INIA Las Brujas (2012-2016) que se pudieron determinar los principales enemigos naturales presentes en los montes de perales de nuestra región y se pudo concluir que están presentes todas las familias mencionadas, relacionadas con el control de esta plaga a nivel mundial. Gracias a estos datos, se pudo ir concentrando los esfuerzos de investigación hacia un control biológico de conservación, fomentando la presencia de los enemigos naturales mediante el aumento de la biodiversidad vegetal. Este trabajo se fundamentó en la hipótesis de que los enemigos naturales presentes necesitan un ambiente más biodiverso para proliferar de la mejor forma. A nivel mundial, de hecho, es común encontrar a la venta mezclas de plantas en flor que pueden ser sembradas para atraer todos los insectos benéficos capaces de brindar un cierto control de las diferentes plagas. En el caso concreto del trabajo recién mencionado, se quiso optar por dejar crecer la flora espontánea presente en los montes, ya que la misma se encuentra adaptada a las condiciones del país y no implicaría un costo adicional para los productores.

Para determinar si este tipo de control es asequible en nuestra región, se diseñó un ensayo en el que se compararon dos diferentes tratamientos: el tratamiento 1 consistió en la aplicación del manejo tradicional (corte de la vegetación de la entrefila y uso de herbicida en la fila), mientras que en el tratamiento 2 no se realizó ningún manejo, permitiendo que la vegetación espontánea prosperara naturalmente. Como método de muestreo se utilizó aspirado de los árboles y de la vegetación circundante. El material recolectado se analizó y se clasificaron los enemigos naturales a nivel de familia, contabilizando los adultos y las ninfas de psila presentes. Los muestreos fueron semanales, desde septiembre de 2013 hasta septiembre de 2015.

FIGURA 3. PROMEDIOS MENSUALES DE CAPTURAS DE PSILA EN LOS TRATAMIENTOS CON CORTE Y SIN CORTE DE LA ENTREFILA

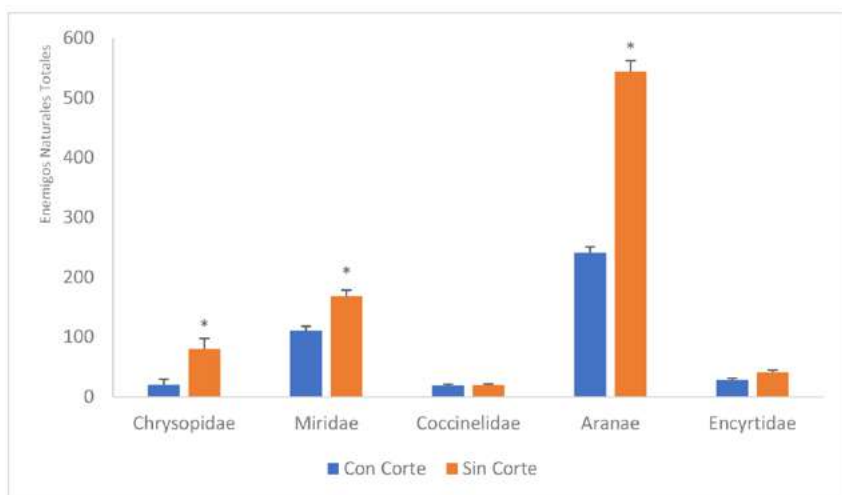


Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos fueron muy promisorios (Figura 3), permitiendo concluir que el manejo de la cobertura vegetal afecta directamente la presencia de psila en los montes, tanto en el tamaño de las poblaciones como en el desarrollo de la plaga, debido al efecto sobre la presencia de los enemigos naturales. Los enemigos naturales necesarios para el control de psila ya están presentes en los montes (Figura 4), pero no en densidades suficientes, por lo que este tipo de manejo cultural podría ser considerado como práctica de complemento dentro de una estrategia de manejo integrado de plagas, que es hacia donde apuntan las producciones sustentables y de alto valor.

Asimismo, estos resultados evidencian que, si bien los montes seleccionados para los muestreos eran predios con un historial de manejo convencional con productos de síntesis, el abandono de estas prácticas permitió en pocos años ir aumentando de forma paulatina el número de enemigos naturales, haciendo así el control biológico de conservación en nuestro agroecosistema una práctica asequible.

FIGURA 4. EFECTO DE LA COBERTURA VEGETAL SOBRE LOS ENEMIGOS NATURALES EN TRATAMIENTOS CON Y SIN CORTE DE LA ENTREFIA



* Diferencias significativas GLMX, Wlad type test, $p < 0,05$.

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Manejo de lepidópteros plaga mediante semioquímicos

Al igual que lo que sucede con la psila del peral, el control de lepidópteros basado únicamente en el uso de insecticidas ha demostrado, con el correr de los años, ser ineficiente por sí solo. El uso de insecticidas en forma indiscriminada crea desequilibrios, dificultando aún más el control de las plagas en el mediano y largo plazo. Por esta razón, desde hace ya varios años se viene implementando en el país el Plan de Manejo Regional de Plagas (PMRP), el cual tiene como objetivos: en primer lugar, reducir el daño ocasionado por lepidópteros en fruta; en segundo lugar, racionalizar y disminuir el uso de insecticidas; y, en tercer lugar, recuperar, abrir y mantener los mercados de exportación. Las herramientas para lograr los mencionados objetivos son el uso de confusión sexual a escala regional para los insectos a controlar, el monitoreo sistemático de las especies plaga y la aplicación de insecticidas según umbrales de daño. Este plan comenzó como piloto en el año 2010 y se convirtió en una política estatal

a partir de 2013 (Zoppolo *et al.*, 2016). Actualmente, el Plan de Manejo Regional de Plagas abarca el 77% de la superficie total de frutales de hoja caduca y el 60% de los productores (Tabla 1).

TABLA 1. EVOLUCIÓN DEL PLAN DE MANEJO REGIONAL DE PLAGAS (PMRP)

	2012-2013	2013-2014	2014-2015	2015-2016	2016-2017	2017-2018	2018-2019	2019-2020
N° Productores	175	302	360	397	408	410	417	399
Superficie (ha)	2100	3201	3543	3370	3773	3700	3427	3429
N° Monitoreadores	40	75	68	64	63	66	59	46*
N° Coordinadores de campo	-	-	16	12	11	12	13	14
% Área RNHF en PMRP	-	-	-	70	80	80	78	77

Notas: RNHF: Registro Nacional Frutihortícola, PMRP: Programa de Manejo Regional de Plagas

**Predios con más de 30 ha pueden contratar a su monitoreador en forma privada.*

Fuente: Base de datos de DIGEGRA (RNHF).

El uso de las feromonas sexuales en el control de plagas tiene varias ventajas, como son la reducción del daño de la plaga a controlar; ser una herramienta totalmente selectiva, ya que no afecta a la fauna benéfica; su aplicación no deja residuos en la fruta y, además de lo anteriormente expuesto, permite la disminución del número de aplicaciones de control necesarias. Otra de sus ventajas radica en que, a diferencia de las aplicaciones de control convencionales, las feromonas no pierden efectividad con la lluvia, siendo asimismo un complemento importante para el manejo de la resistencia a los insecticidas.

Sin embargo, existen situaciones en las cuales la confusión sexual no puede expresar todo su potencial como, por ejemplo: ante una alta presión de población, cuando la instalación de la feromona se realiza posteriormente al inicio de los vuelos, cuando la colocación en los montes/árboles no es la correcta o cuando no existe uniformidad en la distribución de los emisores, y cuando tenemos monitoreos de plagas deficientes o incorrectos.

Desde 2012 se viene trabajando en el INIA para levantar algunas de estas limitantes, con el fin de permitir que la tecnología exprese su potencial para lograr en los cultivos una disminución de los daños que estas especies causan (Figura 5).

FIGURA 5. DAÑOS CAUSADOS POR LEPIDÓPTEROS: CARPOCAPSA (A), GRAFOLITA (B), LAGARTITAS (C)



Fuente: Elaboración propia.

Históricamente, el monitoreo de plagas se ha realizado con trampas de feromonas, pero, ¿qué nos falta entonces para mejorarlo? Para el caso puntual de grafolita se necesita que las trampas no se “apaguen” cuando usamos confusión sexual. Otra de las necesidades es que los atrayentes usados para el monitoreo de plagas funcionen por igual para machos y hembras, por lo que surge el requisito de agregar a la ecuación otros componentes como lo son los volátiles de plantas para lograrlo.

Existen diferentes atrayentes que han demostrado su efectividad en atraer ambos sexos, por ejemplo: el terpenil acetato (aroma a banana y ligeramente a pera), el ácido acético, el acetato de hexenilo (olor a fruta) o el β -ocimeno (fragancia dulce y herbal) (Mujica *et al.*, 2018).

La adición de volátiles de plantas a la feromona sexual de grafolita no solamente aumentó la captura total de insectos en trampas, sino que también favoreció la captura de hembras. Esto es de gran importancia en el control de poblaciones de lepidópteros, ya que el hecho de capturar hembras ayuda a un control más rápido y eficiente de las poblaciones plaga.

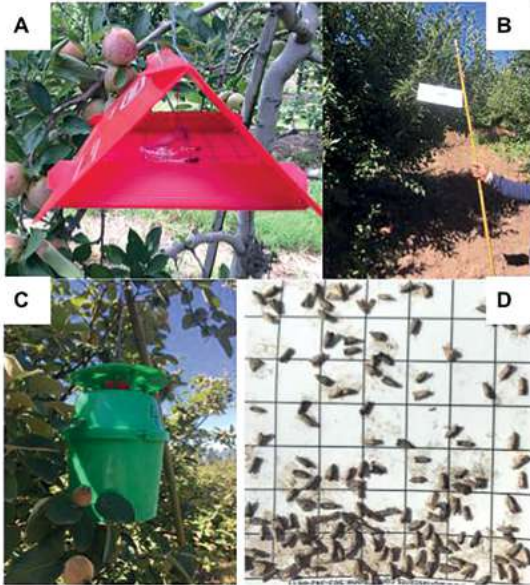
En el caso de carpocapsa, su monitoreo ha estado basado en la feromona sexual, fundamentalmente en el componente principal de la misma (E-E 8-10 dodecadien - 1- ol). En estos últimos años se ha investigado en la adición de kairomonas y otros semioquímicos a las mezclas usadas para monitorear la polilla de la manzana (Knight *et al.*, 2019).

El primer compuesto de esta clase en ser descubierto fue el éster de pera, en el año 2001 (Knight *et al.*, 2018). Este compuesto, el etil (2E,

4Z)-2,4-decadienoato, es un compuesto único identificado como kairomona, y presenta la particularidad de actuar sobre machos, hembras y larvas.

Existen también otros compuestos con diferentes grados de atractividad, como, por ejemplo: DMNT: (E)-4,8-dimetil-1,3,7-nonatrieno, β -ocimeno: (E)- β -ocimeno, N-butil sulfide (BS), ácido acético, pyranoid/furanoid/linalool oxide, entre otros (Preti *et al.*, 2021). La ventaja de su uso radica en que son atrayentes para machos, hembras y larvas, pero presentan una marcada atracción para las hembras. Un atractivo de estas características no solo podría usarse para monitoreo, sino también para otro tipo de herramientas de control como *attract and kill* o trapeos masivos, entre otras (Figura 6).

FIGURA 6. TRAMPAS USADAS PARA MONITOREO DE POBLACIONES (A Y B) O PARA TRAMPEO MASIVO (C) Y CAPTURA DE MACHOS Y HEMBRAS DE CARPOCAPSA (D)



Fuente: Elaboración propia.

Las mezclas de feromonas más kairomonas son el camino para seguir para mejorar la captura de estas especies, pero no cualquier mezcla da lo mismo.

¿Qué aprendimos de todo esto?

- No cualquier mezcla es eficiente o captura lo que necesitamos.
- La habilidad de capturar un gran número de hembras con estas nuevas mezclas puede mejorar muchos aspectos del manejo de plagas.
- Los atractivos dirigidos a capturar ambos sexos proporcionan una mayor discriminación de la densidad de la plaga y permiten la implementación de programas de aplicaciones más precisos, lo que acompaña los ingredientes activos de nueva generación.
- Las capturas de hembras en trampas cebadas con éster de pera no son influenciadas por la altura de estas, y la mejoría en la captura de hembras con la mezcla de cuatro componentes permitiría que las trampas de monitoreo se coloquen a una altura más baja y más conveniente en el dosel, a diferencia de lo que sucede actualmente, ya que las trampas deben ser instaladas a la mayor altura posible para que el dato que proporcionan sea confiable.

Este nuevo acercamiento al control de lepidópteros necesita de más estudios respecto de la efectividad de las mezclas y, sumado a esto, de la evaluación de las ventajas del establecimiento de un biofix para hembras *versus* el tradicional de machos, porque podemos mejorar las predicciones del inicio de la eclosión de los huevos.

El control de plagas como los lepidópteros debería orientarse en un futuro a un enfoque holístico, el cual considere distintas herramientas como el "*attract an kill*", el cultivo bajo mallas y la técnica del insecto estéril. En el caso de esta última, no debería usarse en forma unitaria en el caso de carpocapsa o grafolita. Su implementación debería realizarse en forma conjunta con otras técnicas como la confusión sexual, el control químico (con insecticidas botánicos/naturales y específicos), el retiro de la fruta dañada de los montes, la colocación de bandas de cartón en los troncos para retirar las larvas invernantes de los montes y la erradicación de montes abandonados.

4. Consideraciones finales

En el marco de una transición hacia estrategias de manejo más sostenibles y en línea con los preceptos de la agroecología, reorientar el control de plagas hacia un enfoque holístico es la respuesta. En esta nueva perspectiva, el control biológico de conservación debería ser uno de los ejes centrales en el cual concentrar los esfuerzos de investigación. La po-

sibilidad de usar la fauna benéfica autóctona, favoreciendo su presencia con prácticas de manejo relativamente sencillas, debería incentivar la adopción de este tipo de manejo. Cabe destacar que el hecho de usar las especies vegetales normalmente presentes en los montes es un punto de fuerza de este tipo de estrategia, abriendo su acceso a todos los productores, sin necesidad de sumar costos adicionales.

Conjuntamente, entre las herramientas disponibles, la posibilidad de controlar insectos utilizando su propia biología mediante el uso de semioquímicos abre las puertas a un nuevo tipo de control altamente específico y de mínimo impacto ambiental, el cual, si se combina con el control cultural y biológico, constituye una estrategia capaz de obtener una producción sustentable en el largo plazo. Es la sinergia entre los diferentes tipos de control la que favorecerá una menor carga de productos de síntesis en el ambiente, debido a la menor necesidad de realizar aplicaciones de productos insecticidas. Esto impacta directamente en el agroecosistema circundante, el cual sufre menos alteraciones ante la menor carga insecticida y la especificidad de la tecnología, lo que redundará en una producción de frutas más inocua y sustentable.

Detalle de la tecnología propuesta

Se describen en la Tabla 2 las tecnologías de mediano, corto y largo plazo usadas en el control de plagas de frutales de hoja caduca, con un claro enfoque agroecológico.

TABLA 2. TECNOLOGÍAS DE CONTROL DE PLAGAS DE FRUTALES DE HOJA CADUCA

MEDIDAS ESTRATÉGICAS (MEDIANO Y LARGO PLAZO)	MEDIDAS TÁCTICAS (CORTO PLAZO)
Uso de feromonas semioquímicos para control de poblaciones	Prácticas culturales (poda, manejo del vigor de las plantas, manejo de las entrefilas, uso de cartones para bajar poblaciones de lepidópteros)
Implementación de control de conservación y aumentativo	Elección de principios activos de control selectivo
	Uso de semioquímicos para el monitoreo de poblaciones
	Uso de bioinsumos: agentes microbianos de control biológico, extractos botánicos

Fuente: Elaboración propia.

Referencias

Avilla, J., Artigues, M., Marti, S. y Sarasua, M. J.

(1992), "Parasitoides de *Cacopsila pyri* (L.) (= *Psila pyri* (L.)) presentes en una plantación comercial de peral en Lleida no sometida a tratamientos insecticidas", en *Boletín de Sanidad Vegetal. Plagas*, 18, pp. 133-138.

Burts, E. C.

(1968), "An area control program for the pear psila", en *Journal of Economic Entomology*, 61, pp. 261-263.

Civolani, S., Cassanelli, S., Rivi, M., Manicardi, G. C., Peretto, R., Chicca, M., Pasqualini, E. y Leis, M.

(2010), "Survey of Susceptibility to Abamectin of Pear Psila (Hemiptera: Psyllidae) in Northern Italy", en *Journal of Economic Entomology*, 103, pp. 816-822.

Cross, J. V., Solomon, M. G., Babandreier, D., Blommers, L., Easterbrook, M. A., Jay, C. N., Jenser, G., Jolly, R. L., Kuhlmann, U., Lilley, R., Olivella, E., Toepfer, S. y Vidal, S.

(1999), "Biocontrol of Pests of Apples and Pears in Northern and Central Europe: 2. Parasitoids", en *Biocontrol Science and Technology*, 9, pp. 277-314.

Erler, F.

(2004), "Natural enemies of the pear psylla *Cacopsylla pyri* in treated vs untreated pear orchards in Antalya, Turkey", en *Phytoparasitica*, 32, pp. 295-304.

Erler, F. y Cetin, H.

(2005), "Evaluation of some selective insecticides and their combinations with summer oil for the control of the pear psylla *Cacopsylla pyri*", en *Phytoparasitica*, 33, pp. 169-176.

Guerrieri, E., Noyes, J. S.

(2009), "A review of the European species of the genus *Trechnites* Thomson (Hymenoptera: Chalcidoidea: Encyrtidae), parasitoids of plant lice (Hemiptera: Psylloidea) with description of a new species", en *Systematic Entomology*, 34, pp. 252-259.

Heimpel, George E. y Mills, Nicholas J.

(2017), *Biological control*, Cambridge University Press.

Knight, A. L., Light, D. M., Judd, G. J. R. y Witzgall, P.

(2018), "Pear Ester – From Discovery to Delivery for Improved Codling Moth Management", en *Roles of Natural Products for Biorational Pesticides in Agriculture*, pp. 83-113. doi:10.1021/bk-2018-1294.ch008.

Knight, A. L., Mujica, V., Herrera, S. L. y Tasin, M.

(2019), "Addition of terpenoids to pear ester plus acetic acid increases catches of codling moth (Lepidoptera: Tortricidae)", en *Journal of Applied Entomology*. Doi:10.1111/jen.12646.

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca

(2011), *Censo Agropecuario 2011*. Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-02/censo2011.pdf>> [Consulta: 10 de junio de 2021].

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Oficina de Programación y Política Agropecuaria

(2017), *Anuario 2017*. Disponible en: <https://descargas.mgap.gub.uy/OPYPA/Anuarios/Anuario%202017/anuario_opypa_2017.pdf> [Consulta: 10 de junio de 2021].

Mujica, V., Preti, M., Basoalto, E., Cichon, L., Fuentes-Contreras, E., Barros-Parada, W. y Knight, A. L.

(2018), "Improved monitoring of oriental fruit moth (Lepidoptera: Tortricidae) with terpinyl acetate plus acetic acid membrane lures", en *Journal of Applied Entomology*, 142(8), pp. 731-744. doi:10.1111/jen.12528.

Nuñez, S. y Scatoni, I.

(2013), *Tecnología disponible para el manejo de plagas en frutales de hoja caduca*, INIA, Montevideo, 164 pp. (Serie Técnica; 210).

Preti, M., Knight, A. L., Mujica, M. V., Basoalto, E., Larsson Herrera, S., Tasin, M. y Angeli, S.

(2021), "Development of multi-component non-sex pheromone blends to monitor both sexes of *Cydia pomonella* (Lepidoptera: Tortricidae)", en *J Appl. Entomol.* pp. 1-9. <<https://doi.org/10.1111/jen.12898>>.

Juan Antonio Sánchez, María Carmen Ortín-Angulo

(2012), "Abundance and population dynamics of *Cacopsylla pyri* (Hemiptera: Psyllidae) and its potential natural enemies in pear orchards in southern Spain", *Crop Protection*, 32, pp. 24-29, ISSN 0261-2194, <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2011.11.003>.

šek Kocourek, F., & Stará, J.

(2006), "Management and control of insecticide-resistant pear psylla (*Cacopsylla pyri*)" en *Journal of Fruit and Ornamental Plant Research*, 14(3).

Solomon, M. G., Cross, J. V., Fitzgerald, J. D., Campbell, C. A. M., Jolly, R. L., Olszak, R. W., Niemczyk, E. y Vogt, H.

(2000), "Biocontrol of pests of apples and pears in northern and central Europe-3. Predators", en *Biocontrol Science and Technology*, 10, pp. 91-128.

Westgard, P. H., Lombard, P. B. y Berry, D. W.

(1979), "Integrated Pest Management of Insects and Mites Attacking Pears in Southern Oregon", en *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 95(1), pp. 34-36.

Zoppolo, R., Scatoni, I. B., Duarte, F., Mujica, M. V. y Gabard, Z.

(2016), "Area-wide pest management in deciduous fruits of southern Uruguay", *Acta Hort. 1137. ISHS*, en Bellon, S. et al., Proc. Int. Symp. on Innovation in Integrated and Organic Horticulture (INNOHORT) DOI 10.17660/Acta-Hortic.2016.1137.21

Capítulo 3

Aportes al manejo agroecológico de enfermedades en trigo

Silvia Pereyra

1. Introducción

Durante los últimos años, los sistemas de producción agrícolas han estado sujetos a cambios significativos de intensificación y simplificación. Desde principios de los años 2000 se registró una sustitución relevante de un modelo mixto de rotaciones de cultivos agrícolas y pasturas de leguminosas y gramíneas por uno agrícola (Díaz *et al.*, 2004; Paruelo *et al.*, 2006). Este modelo se caracteriza por una menor diversificación en las secuencias de los cultivos y cultivares sembrados, un incremento en el uso de agroquímicos y la utilización generalizada de la siembra directa, entre otros aspectos. Estos factores han inducido cambios en la dinámica de las poblaciones de microorganismos benéficos y patógenos y en las problemáticas asociadas a estos últimos.

Específicamente, a lo anterior se suma que las características agroecológicas de producción de trigo en Uruguay determinan que las enfermedades representen limitantes importantes para el logro de rendimientos, calidad e inocuidad adecuados y estables a lo largo de los años. Las enfermedades constituyen, además, la principal causa de reemplazo de cultivares a nivel de producción (Pereyra *et al.*, 2011).

Los grupos de enfermedades más importantes, por su relevancia económica, son la fusariosis de la espiga (*Fusarium graminearum*, predominantemente), royas y manchas foliares. El complejo de manchas foliares incluye la mancha de la hoja o septoriosis (*Zymoseptoria tritici*), mancha amarilla (*Pyrenophora tritici-repentis*) y estría bacteriana (*Xanthomonas translucens* pv. *undulosa*). Entre las royas se destacan, por su relevan-

cia, la roya de la hoja (*Puccinia triticina*), roya del tallo (*P. graminis* f. sp. *tritici*) y roya amarilla (*P. striiformis* f. sp. *tritici*) (Pereyra *et al.*, 2011).

Las pérdidas estimadas de rendimiento de grano en Uruguay han sido de hasta el 54% para mancha de la hoja, el 84% para mancha amarilla, el 60% para roya de la hoja y el 30% para fusariosis de espiga (Pereyra *et al.*, 2011). A esto se deben agregar las pérdidas en la calidad del producto, por cuanto las enfermedades pueden afectar: a) la calidad física e industrial del grano (peso hectolítrico, niveles de proteína, enzimas líticas); b) la inocuidad del producto final (micotoxinas); y c) el valor de siembra de la semilla (germinación, vigor).

La información que compartimos en este trabajo incluye conocimientos y herramientas obtenidos por el INIA y, en parte, en colaboración con instituciones asociadas, en el marco de líneas de investigación orientadas a integrar medidas más sustentables y amigables para el manejo de enfermedades en trigo. En este contexto, los conocimientos aquí vertidos podrían asistir a transitar las primeras fases hacia una transformación agroecológica en sistemas de producción de los que el cultivo de trigo es parte: lograr una mayor eficiencia en el uso de insumos reduciendo los efectos negativos asociados a este, avanzar en la sustitución de insumos y prácticas convencionales por otras opciones agroecológicas y, eventualmente, contribuir al rediseño de agroecosistemas centrado en la prevención de las problemáticas sanitarias (Gliessman, 2016).

2. Situación y manejo actual de las enfermedades en trigo

La simplificación de los sistemas de producción agrícolas, sobre la base de los factores mencionados en el apartado anterior, ha llevado durante las últimas dos décadas a una mayor ocurrencia e intensidad de enfermedades en trigo tales como royas, manchas foliares (tanto fúngicas como bacterianas) y fusariosis de la espiga. A su vez, la demanda del sector productivo por cultivares de alto potencial, en este último período, conllevó el uso de genética no adaptada a las condiciones favorables a enfermedades en nuestro ambiente de producción. Adicionalmente, muchos de estos cultivares se siembran en grandes áreas de la misma región epidemiológica (Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay), contribuyendo así a una mayor homogeneidad regional del cultivo y en un área importante, donde puede multiplicarse inóculo. Lo anterior es especialmente relevante para promover epifitias de enfermedades causadas por esporas

que se trasladan a grandes distancias por las corrientes de aire, como el caso de las royas (Germán *et al.*, 2009).

A su vez, el uso generalizado de la siembra directa y la menor diversidad de especies vegetales en las secuencias (periodos reducidos de rotación) aseguran la presencia de rastrojo en la superficie del suelo. Este representa el principal reservorio de los patógenos que sobreviven y se multiplican en él como los causales de las manchas foliares y la fusariosis de la espiga (Stewart *et al.*, 2004; Pereyra y Dill-Macky, 2008; Pereyra y Díaz de Ackermann, 2009).

En la actualidad, el manejo de las enfermedades está fuertemente basado en el uso de fungicidas, a pesar de la adopción progresiva de otras medidas. El promedio de aplicaciones de fungicidas en trigo por ciclo de cultivo fluctúa de 1,5 a 1,8, llegando hasta dos a tres aplicaciones por ciclo en cultivares muy susceptibles en condiciones altamente favorables a enfermedades. El uso intensivo de fungicidas pertenecientes básicamente a tres grupos químicos (estrobilurinas, triazoles y carboxamidas) representa una amenaza para el surgimiento de cepas de hongos menos sensibles o resistentes a los mismos. Trabajos en este sentido han demostrado la presencia de aislados de *F. graminearum* menos sensibles a tebuconazol, fungicida muy utilizado (solo o en combinación) para el control de enfermedades foliares y fusariosis de la espiga durante los años 2000 (Umpiérrez-Failache *et al.*, 2013).

Por lo tanto, el mayor desafío en el manejo de las enfermedades en trigo es transitar de un enfoque curativo fuertemente basado en el uso de fungicidas, pasando por la integración de medidas, a otro preventivo menos dependiente del control químico y, eventualmente, a un manejo agroecológico. Estos sistemas utilizan el conocimiento generado sobre la biología de los patógenos, la epidemiología y las relaciones planta-patógeno-comunidad microbiana benéfica-ambiente, para integrar más eficientemente las medidas como el uso de variedades resistentes, prácticas culturales y métodos biológicos, de forma de minimizar el uso de fungicidas.

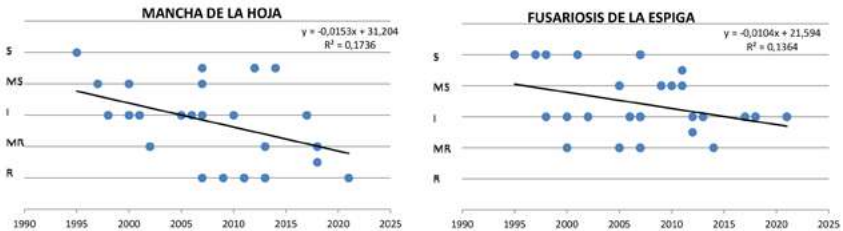
3. Opciones tecnológicas para el manejo de enfermedades en trigo

3.1. Uso de variedades con resistencia genética durable a enfermedades múltiples

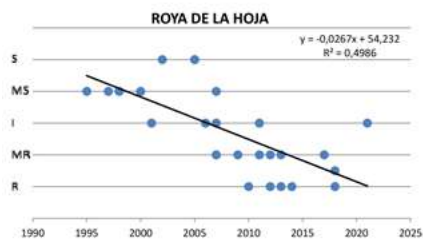
La resistencia genética constituye uno de los pilares básicos para el manejo de las enfermedades en cultivos y contribuye a la resiliencia estática en la salud vegetal. El uso de bases genéticas diversas de resistencia, de tipo cuantitativo más que de genes mayores –que son fácilmente vulnerados por patógenos de alta variabilidad– y durable, es un objetivo constante para el manejo sustentable de las enfermedades en trigo.

La selección de cultivares resistentes a las principales enfermedades en trigo en nuestras condiciones ha sido un objetivo relevante para el Programa de Mejoramiento Genético (PMGT) del INIA desde 1929, cuando ocurrió la primera gran epidemia de roya amarilla, o estriada. A medida que otras enfermedades causaron graves pérdidas económicas, se sumaron sucesivamente nuevos objetivos: resistencia a roya del tallo y roya de la hoja, desde los inicios del programa; mancha de la hoja, a partir de los años sesenta; fusariosis de la espiga, a partir de 1977; y mancha amarilla, a partir de los años noventa, acompañando la adopción de la siembra directa (Germán *et al.*, 2018). El resultado de este trabajo ha permitido avances sostenidos, combinando la resistencia a mancha de la hoja, roya de la hoja y fusariosis de la espiga (Figura 1).

FIGURA 1. PROGRESO GENÉTICO EN LA RESISTENCIA GENÉTICA FRENTE A LA ROYA DE LA HOJA (CAUSADA POR *PUCCINIA TRITICINA*), MANCHA DE LA HOJA (CAUSADA POR *ZYMOSEPTORIA TRITICI*) Y FUSARIOSIS DE LA ESPIGA (CAUSADA PRINCIPALMENTE POR *FUSARIUM GRAMINEARUM*), DE LAS VARIEDADES LIBERADAS POR EL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO GENÉTICO DEL INIA DURANTE LOS ÚLTIMOS 25 AÑOS



(Continúa en página siguiente)



Referencias: R: resistente; MR: moderadamente resistente; MS: moderadamente susceptible; S: susceptible; I: MR MS.

Fuente: Modificado de Quincke et al. (2018).

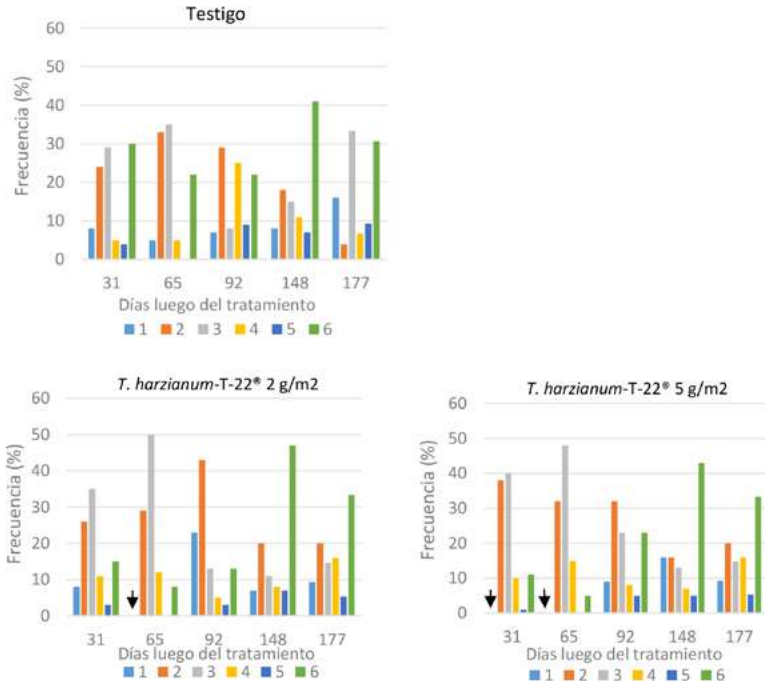
3.2. Uso de agentes microbianos para el control biológico: el caso de *Trichoderma*

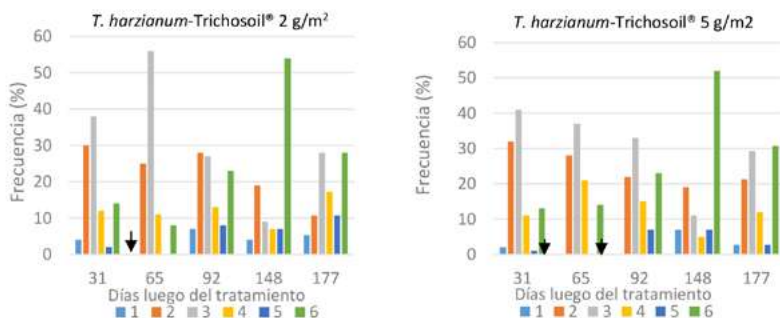
El control biológico constituye una opción complementaria para reducir la incidencia y la severidad de las enfermedades en cultivos, particularmente aquellas causadas por patógenos que sobreviven y se multiplican en el rastrojo de trigo y de otras especies hospedadoras. Esta práctica ha sido poco utilizada en sistemas de producción agrícolas por varios motivos, entre los que se incluyen eficiencia de control errática y muy dependiente de las condiciones ambientales, variabilidad en la interacción del agente de biocontrol con otros componentes de la comunidad microbiana (patógenos, benéficos) y en la expresión de los atributos que confieren el control (Hoitink y Boehm, 1999). Sin embargo, representa una herramienta capaz de reducir el uso de control químico y, así, su efecto negativo para la salud y el ambiente (Mondino *et al.*, 2014). Podría ser una herramienta alternativa para incorporar en el manejo agroecológico de enfermedades de cultivos agrícolas.

En el caso de la fusariosis de la espiga, enfermedad fundamentalmente monocíclica, el rastrojo infestado constituye además la principal fuente de inóculo. En las condiciones de Uruguay, *F. graminearum* (*Gibberella zeae*) es capaz de sobrevivir en diversos rastrojos, entre ellos los de trigo y de cebada por dos años y en rastrojo de maíz, hasta por tres años (Pereyra y Dill-Macky, 2008). Por lo tanto, el uso de antagonistas adaptados a las condiciones de campo que sean capaces de reducir el nivel de inóculo inicial en los rastrojos representa una herramienta útil en el manejo integrado de esta enfermedad. En el INIA, a partir de 2001 evaluamos el efecto de la aplicación de agentes microbianos como *Bacillus subtilis* y *Trichoderma harzianum*, disponibles comercialmente en ese momento en Estados Uni-

dos y Uruguay, en el biocontrol de la fusariosis de la espiga en el rastrojo de trigo (Pereyra *et al.*, 2005). Los resultados obtenidos indicaron la potencialidad de *Trichoderma* para la reducción de producción de peritecios y ascosporas (inóculo primario) en condiciones semicontroladas. A modo de ejemplo, los rastrojos inoculados con *T. harzianum* T-22® (2 y 5 g/m²) y *T. harzianum* Trichosoil® (5 g/m²) presentaron una significativamente ($p < 0.05$) menor producción de peritecios por mm² de rastrojo, a los tres meses de aplicar estos antagonistas. En este caso, la menor producción de peritecios de *G. zea* estuvo en parte explicada por una ausencia de aquellos estados de madurez categoría 1 de la escala de Paulitz, que corresponde a inicios de peritecios (Figura 2). Sin embargo, esta respuesta solo pudo ser cuantificada en un periodo de tiempo muy concreto.

FIGURA 2. FRECUENCIAS (%) DE LOS ESTADOS DE MADUREZ DE LOS PERITECIOS DE *GIBERELLA ZEA* (*F. GRAMINEARUM*) PARA TRATAMIENTOS DE BIOCONTROL CON *TRICHODERMA HARZIANUM*-T22® Y *T. HARZIANUM*-TRICHOSOIL® Y PARA EL TESTIGO SIN TRATAR EN CINCO MOMENTOS DE MUESTREO (31, 65, 92, 148 Y 177 DÍAS LUEGO DEL TRATAMIENTO) SEGÚN LA ESCALA DE PAULITZ (BUJOLD *ET AL.*, 2001)





Referencias: 1: peritecios de color beige, inmaduros; 2: peritecios de color azul claro, inmaduros; 3: peritecios negro-azulados sin ascas ni ascosporas; 4: peritecios negro-azulados con ascas, pero sin ascosporas maduras; 5: peritecios negro-azulados con ascas y con ascosporas maduras; y 6: peritecios negro-azulados sin ascas o vacías o con ascosporas arrugadas o abultadas.

Fuente: Modificado de Pereyra et al., 2005.

Esta información preliminar sugirió la necesidad de contar con información de cepas de *Trichoderma* provenientes de rastrojo de trigo de nuestros sistemas de producción y de profundizar en el conocimiento del (o los) modo(s) de acción de estos agentes de control biológico, el momento óptimo para la aplicación de los mismos, los aspectos ecológicos del patógeno y de los antagonistas, la formulación más adecuada según la estrategia objetivo y la compatibilidad de la aplicación con otras prácticas de producción de los cultivos (Pereyra *et al.*, 2005; Cabrera *et al.*, 2020).

Trichoderma es un hongo cosmopolita, presente habitualmente en suelo y rastrojo, con gran capacidad de colonización y degradación de este último (Harper y Lynch, 1985), y, además, con potencial antagónico relevante frente a patógenos que residen en estos (Bruehl y Lai, 1966). Este género posee múltiples mecanismos de acción, entre los que se incluyen micoparasitismo, antibiosis, competencia por nutrientes y sitios, tolerancia al estrés, inducción de resistencia en plantas, inactivación de enzimas de patógenos, solubilización y secuestro de nutrientes inorgánicos, descomposición de rastrojos (Ghisalberty y Sivasithamparam, 1991; Tronsmo y Hjeljord, 1998). Ello lo posiciona como una excelente opción en cuanto agente microbiano para el control de enfermedades transmitidas por rastrojo.

Sobre la base de los resultados obtenidos, las características intrínsecas descritas de *Trichoderma* y la relevancia de obtener aislados del agente de biocontrol provenientes del ambiente del patosistema¹ en estudio, y la colaboración con el grupo de Microbiología de la Facultad de Química de la Universidad de la República (UDELAR, Montevideo), nos enfocamos en el aislamiento de cepas de *Trichoderma* spp. a partir de muestras de rastrojo de trigo provenientes de chacras del litoral oeste del país. Se caracterizaron 16 cepas de distintas especies de *Trichoderma* por su capacidad de producir diferentes enzimas líticas, compuestos antifúngicos, y por su habilidad para inhibir el crecimiento del patógeno en condiciones *in vitro*. De estas se seleccionaron cinco cepas que se caracterizaron en el INIA La Estanzuela por su capacidad de inhibir la producción de peritecios de *G. zae* sobre rastrojo de trigo. Todos los aislados redujeron significativamente la producción de peritecios sobre el rastrojo de trigo, hasta en el 85% en el caso de un aislado identificado como *T. atroviride*. Este presentó además mayor capacidad de producción de compuestos antifúngicos volátiles y solubles y de quitinasas. Adicionalmente, se destacó por la mayor producción de xilanasas, que favorecerían la degradación de xilanos del rastrojo, contribuyendo así a su degradación (Cabrera *et al.*, 2020).

Desde un enfoque ecológico, incluso cuando se realicen inoculaciones con cepas microbianas nativas del sitio donde se está utilizando (biocontrol inundativo), las poblaciones del agente inoculado se enfrentan a ambientes hostiles que naturalmente evitaron su presencia en altas densidades (Garret, 1970). En 2006 se iniciaron estudios con el objetivo de identificar el efecto de algunas medidas de manejo sobre las poblaciones nativas de *Trichoderma*, no solo con el fin de favorecer altas poblaciones indígenas ya presentes en suelo y rastrojo, sino también para promover ambientes que puedan capitalizar inoculaciones de cepas eficientes de *Trichoderma* (como las identificadas en estudios previos) para el biocontrol de los principales patógenos de cultivos extensivos, entre ellos, *Gibberella zae* (*F. graminearum*), *Bipolaris sorokiniana* y *Drechslera* spp. (Pérez y Villar, 2011; Pereyra *et al.*, 2012; Villar *et al.*, 2019).

¹ Patosistema: subsistema dentro del sistema vegetal, constituido por un hospedante (planta o cultivo) susceptible, un patógeno virulento y un ambiente favorable a la enfermedad.

3.3. Uso de secuencias de cultivos para la promoción de poblaciones de *Trichoderma*

Las medidas más sustentables para lograr disminuir el riesgo de infección a enfermedades transmitidas por rastrojo en un sistema de agricultura intensiva en donde más del 80% de los cultivos de trigo se siembran bajo la modalidad de siembra directa incluyen el uso de variedades resistentes y la rotación de cultivos. El menú de variedades de cultivos de invierno disponibles actualmente no asegura resistencia a todas las enfermedades asociadas al rastrojo. Por otra parte, la lista reducida de especies vegetales manejadas en el presente en los sistemas agrícolas compromete el beneficio de una rotación de por lo menos dos años sin cultivos susceptibles, como es la recomendación basada en resultados obtenidos en trabajos de investigación (Pereyra y Díaz de Ackermann, 2009; Pérez y Villar, 2011).

Las diferentes especies vegetales son capaces de alterar la composición y la actividad de las comunidades microbianas endófitas,² de la rizósfera³ y del suelo, principalmente por la acción de exudados de raíces y rastrojos (Hartmann *et al.*, 2009). A partir de esta premisa, estudiamos la dinámica de patógenos de trigo y cebada –algunos específicos y otros compartidos entre estos cultivos– dependientes del rastrojo, como *Fusarium graminearum*, *Bipolaris sorokiniana* y *Drechslera* spp., y de hongos benéficos del género *Trichoderma* en diversas secuencias de cultivos sobre siembra directa, en distintos trabajos llevados en el INIA y en el conjunto con la Facultad de Agronomía (UDELAR).

En un experimento de largo plazo en siembra directa, establecido en el INIA La Estanzuela en 2003, realizamos muestreos de rastrojos y restos secos cada tres a cuatro meses en el período diciembre de 2006-octubre de 2009. Los tratamientos consistieron en combinaciones de tipo de rastrojo (especie vegetal), edad del mismo y rotación. Las rotaciones estudiadas fueron: agricultura continua (AC) (soja/cebada-girasol/trigo) y rotación corta con pastura (CP) (maíz/cebada-soja/pastura bianual). La pastura estuvo integrada por raigrás (*Lolium multiflorum* L.), trébol rojo (*Trifolium pratense* L.) y trébol blanco (*Trifolium repens* L.). Se deter-

2 Endófito: microorganismo que pasa la mayor parte o todo su ciclo de vida colonizando los tejidos de la planta hospedera, sin causar daño evidente.

3 Rizósfera: zona del suelo más cercana a las raíces de las plantas (1-5 mm) y que se encuentra bajo la influencia directa de estas.

minó que la secuencia de cultivos afecta significativamente la población de *Trichoderma* spp (Pereyra *et al.*, 2012).

Se recuperó *Trichoderma* spp. a partir de todos los restos de cultivos estudiados (Tabla 1). Los rastrojos con mayores porcentajes de colonización fueron los de cebada, raigrás y trigo. En forma coincidente, otros trabajos que estudiaron la población de *Trichoderma* en suelo en secuencias de cultivos en siembra directa indican que las mayores poblaciones de *Trichoderma* se registraron luego de la presencia del cultivo de cebada (Pérez y Villar, 2011; Villar *et al.*, 2019). Los rastrojos de leguminosas, girasol y maíz presentaron menores valores, en promedio, respecto de las gramíneas antes citadas. Analizando las dos secuencias, la colonización de los rastrojos provenientes de agricultura continua (AC) fue significativamente ($p > 0.0017$) mayor (32,2%) que la registrada en los rastrojos de la rotación cultivo-pastura (CP, 24,0%) (Pereyra *et al.*, 2012). Esta información coincide, además, con la registrada en el mismo periodo en muestreos de chacras con historia trigo-soja (AC) y trigo-soja-maíz-alfalfa (CP) por al menos dos ciclos consecutivos en las zonas de San Pedro y La Horqueta, Colonia (datos no presentados).

TABLA 1. PESO SECO RELATIVO Y COLONIZACIÓN DE DISTINTOS RASTROJOS DE DIFERENTES EDADES RECUPERADOS DE DOS ROTACIONES DE CULTIVOS EN SIEMBRA DIRECTA POR HONGOS PATÓGENOS Y BENÉFICOS EN MUESTRAS COLECTADAS EN EL PERÍODO DICIEMBRE DE 2006 A OCTUBRE DE 2009

TRATAMIENTO			Peso seco relativo ³ (%)	COLONIZACIÓN (%)				
Tipo de rastrojo	Edad del rastrojo ¹	Rotación ²		<i>Fusarium</i> spp.	<i>F. gram</i> ⁴	<i>B. sorok</i> ⁵	<i>Drechslera</i> spp. ⁶	<i>Trichod. spp.</i> ⁷
Trigo	1	AC	80,6 a ⁸	31,7 d ⁹	15,6 a ⁹	3,5 bc ⁹	1,4 b ⁹	37,1 9 ⁸
Trigo	2	AC	8,9 de	40,7 cd	6,2 b	4,7 bc	0,6 b	29,8 b
Cebada	1	AC	49,9 b	50,3 c	4,8 b	11,9 a	4,0 a	52,8 a
Cebada	1	CP	49,4 b	54,4 c	5,0 b	7,1 ab	3,8 a	35,6 b
Cebada	2	AC	2,1 e	41,4 cd	1,5 c	6,4 ab	2,6 ab	(84,0 abcd)
Cebada	2	CP	20,9 cd	74,6 ab	2,8 bc	4,8 bc	0,6 b	40,5 b

(Continúa en página siguiente)

Soja	1	AC	12,9 de	71,4 ab	0,1 d	nd	nd	16,4 cd
Soja	1	CP	55,7 b	61,3 c	0,0 d	nd	nd	17,3 cd
Soja	2	AC	5,8 e	34,1 d	nd	nd	nd	(20,2 cd)
Soja	2	CP	22,6 cd	14,7 e	0,0 d	nd	nd	13,4 d
Maíz	1	CP	74,9 a	82,8 a	0,3 d	nd	nd	20,8 cd
Maíz	2	CP	23,5 c	73,2 b	0,3 d	nd	nd	15,8 d
Girasol	1	AC	48,2 b	52,3 c	0,0 d	nd	nd	20,4 cd
Girasol	2	AC	13,4 cde	13,0 e	0,0 d	nd	nd	18,2 cd
Raigrás	1	CP	48,4 b	36,8 d	0,9 d	2,4 c	1,1 b	26,4 bc
Raigrás	2	CP	17,8 cde	38,7 d	0,4 de	3,0 bc	0,9 b	45,4 bc
T. Blanco	1	CP	3,9 de	15,3 e	0,0 d	nd	nd	(25,0 abc)
T. Rojo	1	CP	30,2 d	32,0 d	0,0 d	nd	nd	21,0 cd
T. Rojo	2	CP	6,7 de	14,0 e	nd	nd	nd	26,0 bc
$p>F$			0.0001					
$p>\chi^2$				0.0001	0.0001	0.0008	0.0001	0.0001

Notas:

¹ 1: 365 días o menos; 2: 366 días o más.

² AC: agricultura continua, soja/cebada-girasol/trigo; CP: cultivos-pastura bianual (maíz/cebada-soja/ raigrás + trébol blanco + t. rojo).

³ Peso seco relativo sobre la base del peso seco total de rastrojos colectados por cuadro.

⁴ *Fusarium graminearum*; ⁵ *Bipolaris sorokiniana*; ⁶ Especie aislada en trigo: *D. tritici-repentis*; en cebada: *D. teres*; en raigrás: *D. nobleae*; ⁷ *Trichoderma spp.*

⁸ Los valores son medias de cada tratamiento (rastrojo-edad-rotación) de diez muestreos. Valores con letras diferentes en una misma columna son significativamente diferentes al $p = 0.05$ según MDS.

⁹ Los valores son medias de cada tratamiento (rastrojo-edad-rotación) de diez muestreos en el período diciembre de 2006-octubre de 2009. Valores con letras diferentes en una misma columna son significativamente diferentes al $p = 0.05$ basado en estadística de máxima verosimilitud.

nd: no determinado.

() : dato basado en un bajo número de muestras.

Fuente: Pereyra et al. (2012).

La incorporación de fuentes de carbono al suelo, como los restos de cultivos, aumenta la disponibilidad de nutrientes para su comunidad microbiana, posibilitando así un aumento en la población. También se da

una mayor competencia en donde se benefician los microorganismos con superior habilidad competitiva frente a residuos con baja relación carbono/nitrógeno. En resumen, existe potencial para favorecer el incremento de poblaciones de especies benéficas de *Trichoderma* mediante su inoculación en sistemas agrícolas y el uso de gramíneas en las secuencias de cultivos.

4. Consideraciones finales

Una transición desde los sistemas actuales de producción agrícolas hacia un enfoque agroecológico debe estar basada en un nuevo conjunto de interrelaciones ecológicas. Ello implica continuar avanzando en los conocimientos y en el esfuerzo de obtención de variedades con niveles aceptables de resistencia a enfermedades múltiples y de tipo durable, adherirse al esquema de por lo menos dos años sin rastrojo de trigo y explorar otras medidas que se integren al uso de microorganismos benéficos, como por ejemplo hongos del género *Trichoderma* y secuencias de cultivos que los beneficien. Es necesario profundizar en la comprensión de las múltiples interacciones entre las poblaciones de los patógenos causales de enfermedades en trigo y en los diferentes cultivos que integran los sistemas de producción agrícolas, y su interacción con las poblaciones de microorganismos con potencial de biocontrol y en cómo las diferentes medidas de manejo los afectan. La información compartida en este capítulo pretendió contribuir en este sentido.

Bibliografía

Beare, M., Pohlad, B., Wright, D. y Coleman, D.

(1993), "Residue placement and fungicide effects on fungal communities in conventional and non-tillage soils", en *Soil. Sc. Soc. Am. J.*, 57, pp. 392-399.

Bruehl, G. W. y Lai, P.

(1966), "Prior-colonization as a factor in the saprophytic survival of several fungi in wheat straw", en *Phytopathology*, 56, pp. 766-768.

Bujold, I., Paulitz, T.C. y Carisse, O.

(2001), "Effect of *Microsphaeropsis* sp. on the production of perithecia and ascospores of *Gibberella zeae*", en *Plant Disease*, 85, pp. 977-984.

Cabrera, M., Garmendia, G., Rufo, C., Pereyra, S. y Vero, S.

(2020), "*Trichoderma atroviride* como controlador biológico de fusariosis de espiga de trigo mediante la reducción del inóculo primario en rastrojo", en

Terra Latinoamericana, 38-3, pp. 629-651. DOI: <<https://doi.org/10.28940/terra.v38i3.66>>.

Díaz, R., Souto, G. y Ferrari, J. M.

(2004), "Tecnología y estructura de producción", en *Resúmenes del Simposio Sustentabilidad de la intensificación agrícola en el Uruguay*, INIA, Serie Actividades de Difusión 365, pp.1-6.

Garret, S. D.

(1970). "*Pathogenic root-infecting fungi*", Cambridge University Press, Cambridge, 294 pp.

Germán, S., Díaz de Ackermann, M., Silva, P., Quincke, M. y Pereyra, S.

(2018), "Mejoramiento por resistencia a enfermedades de trigo en Uruguay", en Germán, S., Quincke, M., Vázquez, D., Castro, M., Pereyra, S., Silva, P. y García, A. (eds), *Seminario Internacional 1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela*, Serie Técnica 247, INIA, Montevideo, pp. 148-166.

Germán, S., Campos, P., Chaves, M., Viedma, L. y Madariaga, R.

(2009), "Are rust pathogens under control in the Southern Cone of South America?", en *Borlaug Global Rust Initiative (BGRI) Technical Workshop, oral papers*, pp. 65-73.

Ghisalberti, E. L. y Sivasithamparam, K.

(1991), "Antifungal antibiotics produced by *Trichoderma* spp.", en *Soil Biol. Biochem.*, 23, pp.1011-1020.

Gliessman, S.

(2016), "Transforming food systems with agroecology", en *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 40, pp187-189. DOI: 10.1080/21683565.2015.1130765.

Harper, S. H. T. y Lynch, J. M.

(1985), "Colonization and decomposition of straw by fungi", en *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 85, pp. 655-661.

Hartmann, A., Schmid, M., Tuinen, D.V. y Berg, G.

(2009). "Plant-driven selection of microbes", en *Plant Soil* 321, pp. 235-257 <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9814-y>

Hoitink, H. y Boehm, M.

(1999), "Biocontrol within the context of soil microbial communities: A substrate-dependent phenomenon", en *Annu Rev Phytopathol*, 37, pp. 427-446.

Mondino, P., Altier, N., Vero, S., Pereyra, S. y Folch, C.

(2014), "Control biológico de enfermedades de plantas en Uruguay", en Bettiol, W., Rivera, M. C., Mondino, P., Montealegre, J. R. y Colmenárez, Y. C. (eds.), *Control biológico de enfermedades de plantas en América Latina y el Caribe*, Facultad de Agronomía, UDELAR, Montevideo, 404 pp.

Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Piñeiro, G., Jobbágy, E. G., Verón, S. R., Baldi, G. y Baeza, S.

(2006), "Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis", en *Agrociencia Uruguay*, 10(2), pp. 47-61.

Pereyra S. A, Dill-Macky, R.

(2008), “Colonization of the Residues of Diverse Plant Species by *Gibberella zeae* and their Contribution to Fusarium Head Blight Inoculum”, en *Plant Disease*, 92, pp 800-807.

Pereyra, S. y Díaz de Ackermann, M.

(2009), “Enfermedades transmitidas por rastrojo en trigo y cebada”, en *Jornada Técnica de Cultivos de Invierno*, INIA, Serie Actividades de Difusión 566, Montevideo, pp. 25-34.

Pereyra, S., Díaz de Ackermann, M., Germán, S. y Cabrera, K.

(2011b), *Manejo de enfermedades en trigo y cebada*, INIA-Hemisferio Sur, Serie Técnica 189, Montevideo. 200p.

Pereyra, S., Garmendia, G., Cabrera, M., Vero, S., Pianzolla, M. y Dill-Macky, R.

(2005), “Control biológico de la Fusariosis de la espiga de trigo y cebada”, en *Agrociencia Uruguay*, 9, pp. :337-343.

Pereyra, S., Germán, S. y Díaz, M.

(2011a), “Del patógeno al cultivo: sus interacciones y alternativas de manejo en la producción de trigo y cebada”, en Hoffman, E., Ribeiro, A., Ernst, O. y García, F. O. (eds.), *II Simposio Nacional de Agricultura de Secano*, Hemisferio Sur, Montevideo, pp. 89-110.

Pereyra, S., Ríos, A. y Zerbino, S.

(2012), “Efecto de la frecuencia de cultivos sobre la dinámica de los patógenos”, en *Uso de la biodiversidad para la evaluación del impacto de la intensificación agrícola y el diseño de agroecosistemas sustentables*. INIA, Serie Actividades de Difusión 674, pp. 101-105

Pérez, C. y Villar, H. A.

(2011), “Control biológico en cultivos extensivos: cuando el enfoque condiciona el éxito”, en Pereyra, S., Díaz de Ackermann, M., Germán, S. y Cabrera, K. (eds.), *Manejo de enfermedades en trigo y cebada*, INIA-Hemisferio Sur, Serie Técnica 189, Montevideo, pp. 49-62.

Quincke, M., Pereyra, S., Vázquez, D., Silva, P. y Germán, S.

(2018), “Mejoramiento genético de trigo en Uruguay”, en Germán, S., Quincke, M., Vázquez, D., Castro, M., Pereyra, S., Silva, P. y García, A. (eds), *Seminario Internacional 1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela*, INIA, Serie Técnica 247, Montevideo, pp. 2-11.

Stewart, S., Pereyra, S. y Díaz, M.

(2004), “El efecto de la intensificación agrícola en las enfermedades de los cultivos”, en *Resúmenes del Simposio Sustentabilidad de la intensificación agrícola en el Uruguay*, INIA, Serie Actividades de Difusión 365, pp.19-24.

Tronsmo, A. y Hjeljord, L. G.

(1998), “Biological control with *Trichoderma* species”, en Boland, G. J. y Kuykendall, L. D. (eds.), *Plant-microbe interactions and biological control*, Marcel Dekker Inc., Nueva York, pp. 111-126.

Umpiérrez-Failache, M., Garmendia, G., Pereyra, S., Rodríguez-Haralambides, A., Ward, T. J. y Vero, S.

(2013), “Regional differences in species composition and toxigenic potential among *Fusarium* head blight isolates from Uruguay indicate a risk of nivale-nol contamination in new wheat production areas”, en *International Journal of Food Microbiology*, 166(1), pp. 135-140.

Villar, A., Ernst, O., Cadenazzi, M., Vero, S., Pereyra, S., Altier, N., Chouhy, D., Langone, F. y Pérez, C. A.

(2019), “Efecto de la secuencia de cultivos sobre la población nativa de *Trichoderma* spp. en agricultura sin laboreo”, en *Agrociencia Uruguay*, 23, pp. 18-27. doi: <<http://dx.doi.org/10.31285/agro.23.1.5>>.

Capítulo 4

Rotaciones hortícolas y su contribución al manejo de enfermedades de suelo

Carolina Leoni

1. Introducción

La agricultura moderna tradicional ha experimentado procesos de intensificación y especialización asociados a un aumento del uso de energía fósil por el incremento en el uso de agroquímicos, mecanización y riego. Como consecuencia, se constatan importantes pérdidas de suelo por erosión, disminución de la materia orgánica del suelo asociada a pérdidas de estructura y capacidad de almacenamiento de agua, incrementos en los problemas de plagas y enfermedades, pérdidas de biodiversidad, y una mayor vulnerabilidad a los eventos climáticos extremos. Todos estos cambios resultan en sistemas de producción no sustentables, por lo que es necesario transitar hacia sistemas de producción alternativos. Estos deberán mantener y/o incrementar la productividad de los sistemas en el mediano y largo plazo mediante el fortalecimiento de los procesos ecológicos, la reducción de la dependencia de insumos externos no renovables y la eficiencia en el uso de los recursos (Leoni, 2013).

La rotación de cultivos es una de las estrategias más antiguas de la agricultura, tanto para el manejo de su nutrición como para el de las malezas, plagas y enfermedades, principalmente aquellas de suelo. Pero también, una adecuada rotación ayuda a mantener la estructura del suelo y reducir la erosión, brindar una oferta más regular de alimentos a lo largo del año y distribuir mejor el trabajo y el ingreso de los productores. La selección de una rotación es el balance entre criterios ecológicos y criterios prácticos para asegurar beneficios económicos en el corto y mediano plazo. Varias rotaciones –combinaciones de cultivos– pueden ser adecuadas para un determinado predio y sistema de producción, y

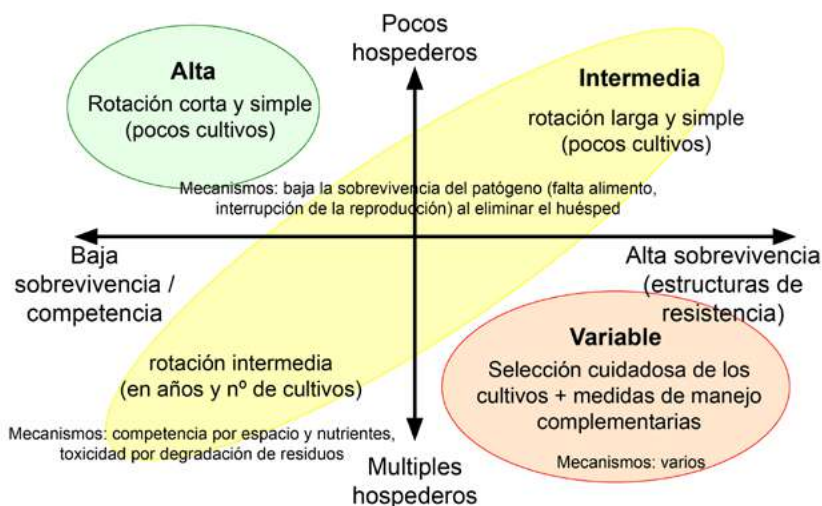
la elección final dependerá de las preferencias del productor y de cómo combine sus recursos productivos.

Los sistemas de producción sostenibles buscan emular el funcionamiento y la estructura de los sistemas naturales o de referencia, para lo cual es necesario un cuidadoso diseño de estos. La rotación de cultivos es una valiosa herramienta de diseño de los agroecosistemas pues proporciona biodiversidad espacial y temporal, tanto aérea como subterránea. Además, sistemas de producción sostenibles se asocian a la salud del suelo¹ y a su capacidad para suprimir enfermedades (van Bruggen y Semenov, 2000). El tamaño y la forma en la cual se organizan las parcelas y los cultivos, es decir cómo se diseñan una rotación y el paisaje circundante, tienen un gran impacto sobre el desarrollo de las enfermedades y la ocurrencia de plagas.

El manejo de las enfermedades de suelo no es simple. Las estrategias de control químico no han sido eficientes y los principios activos recomendados están cuestionados por su impacto negativo en el ambiente, por lo que en los últimos años muchos de ellos han sido retirados del mercado. La rotación de cultivos es una alternativa viable para el manejo de estos patógenos, pero su efectividad depende de la frecuencia de las especies vegetales hospederas de patógenos en la secuencia de cultivos y de las habilidades del patógeno para sobrevivir. Como se esquematiza en la Figura 1, es relativamente más fácil manejar los patógenos con estrecho rango de hospederos y baja habilidad de sobrevivencia que aquellos que poseen un rango amplio de hospederos y/o alta capacidad de sobrevivencia. Para el manejo de estos últimos, además de una cuidadosa selección de los cultivos integrantes de la rotación, se deberán emplear otras medidas de manejo (resistencia/tolerancia genética, control biológico, control cultural).

¹ Salud del suelo: “Capacidad sostenida del suelo de funcionar como un sistema vivo que soporte la productividad biológica, mantenga la calidad ambiental y promueva la salud de las plantas, los animales y las personas” (Larkin, 2015).

FIGURA 1. EFECTIVIDAD DE LA ROTACIÓN DE CULTIVOS EN EL MANEJO DE PATÓGENOS DE SUELO EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE ESPECIES VEGETALES HOSPEDERAS Y DE LA ESTRATEGIA DE SOBREVIVENCIA DEL PATÓGENO



Fuente: Modificado de Leoni (2013).

2. Las rotaciones y la dinámica poblacional de patógenos de suelo en sistemas hortícolas a campo

El diseño de una rotación no es simple y gran parte de los trabajos nacionales se han centrado en el impacto sobre la productividad y las propiedades fisicoquímicas del suelo (Arboleya *et al.*, 2012; Alliaume *et al.*, 2013; Dogliotti *et al.*, 2004), con información limitada acerca del impacto de los cultivos sobre la dinámica de los patógenos. En general, las secuencias se diseñan buscando alternar cultivos que no sean hospederos de los mismos patógenos, lo cual no siempre es posible, especialmente para los patógenos polípagos y/o con alta capacidad de supervivencia por poseer estructuras de resistencia. Ejemplos de estos patógenos que ocasionan importantes pérdidas en los sistemas hortícolas nacionales son *Sclerotium rolfsii* y *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae*. *S. rolfsii* tiene más de 500 hospederos, forma esclerotos que pueden sobrevivir varios años

en el suelo y las enfermedades que ocasiona se desarrollan durante la temporada primavera-estival (Xu *et al.*, 2008). *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* tiene un rango de hospederos menor –es importante en los cultivos de cebolla y ajo–, pero posee varias estrategias de sobrevivencia como macro y microconidios, clamidosporas, micelio colonizando plantas sin causar enfermedad (Abawi y Lorbeer, 1972).

Con el fin de aportar al diseño de rotaciones hortícolas a campo para el sur del país, se realizó una serie de experimentos que estudiaron la dinámica de los patógenos *S. rolfsii* y *F. oxysporum* f.sp. *cepae* en diferentes situaciones productivas. En forma complementaria, dada la imposibilidad de evaluar todas las combinaciones de cultivos posibles, se realizaron simulaciones mediante modelos matemáticos simples, que permitieron definir, por ejemplo, aquellas secuencias más adecuadas para el manejo de las enfermedades estudiadas. Estas simulaciones también ayudan a seleccionar algunas rotaciones que luego son validadas a campo, reduciendo los tiempos y recursos necesarios para la investigación.

2.1. Efecto de la rotación en la dinámica poblacional de *Sclerotium rolfsii*

Se estudió el efecto de la sobrevivencia de los esclerotos de *S. rolfsii* luego de la incorporación de 17 abonos verdes y en tres secuencias de cultivos diferentes. A partir de los datos generados, se ajustaron dos modelos poblacionales simples que, combinados, simulan la dinámica poblacional de *S. rolfsii* bajo diferentes rotaciones. Los parámetros de los modelos se estimaron sobre la base de datos experimentales generados en macetas y en microparcelas a campo (Leoni *et al.*, 2014).

La incorporación de los abonos verdes al suelo mostró diferentes efectos sobre la capacidad de sobrevivencia de los esclerotos de *S. rolfsii*, debido a que los compuestos que liberan los tejidos vegetales al descomponerse en el suelo difieren entre las especies evaluadas. Algunos abonos verdes como sudangrass, moha, crotolaria, alfalfa, avena y trigo disminuyeron la sobrevivencia de los esclerotos, mostrando su aptitud para ser incorporados en la rotación en aquellos sitios que presentan problemas con este patógeno (Tabla 1).

TABLA 1. EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE DIFERENTES ABONOS VERDES EN LA SOBREVIVENCIA DE ESCLEROTOS DE *S. ROLFSII*

SOBREVIVENCIA DE LOS ESCLEROTOS	ABONO VERDE DE VERANO	ABONO VERDE DE INVIERNO
Disminuye	Sudangrass (<i>Sorghum x drummondii</i>)	Avena blanca (<i>Avena strigosa</i>)
	Moha (<i>Setaria itálica</i>)	Avena negra (<i>Avena byzantina</i>)
	Crotolaria (<i>Crotalaria juncea</i>)	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)
	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)	Alfalfa (<i>Medicago sativa</i>)
No cambia	Maíz (<i>Zea mays</i>)	Nabo forrajero (<i>Brassica napus</i>)
	Girasol (<i>Helianthus annus</i>)	Trébol rojo (<i>Trifolium pratense</i>)
		Lupino azul (<i>Lupinus angustifolius</i>)
Aumenta	Poroto negro (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Lupino blanco (<i>Lupinus albus</i>)
	Caupi (<i>Vigna unguiculata</i>)	Vicia peluda (<i>Vicia villosa</i>)

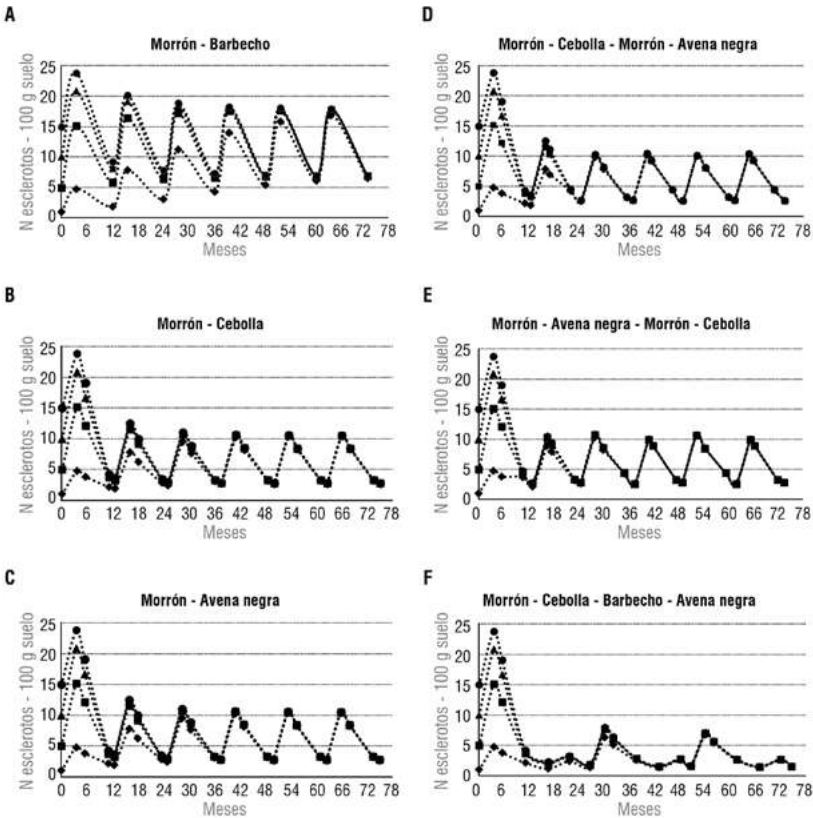
Fuente: Elaboración propia.

La dinámica poblacional de *S. rolf sii* se simuló para diversas rotaciones teóricas, donde se partía de diferentes densidades de esclerotos en el suelo y se corría el modelo hasta alcanzar un equilibrio dinámico, es decir, hasta que los cambios en las poblaciones de esclerotos fueran iguales para cada ciclo de la rotación. Inicialmente, para *el monocultivo de morrón* (Figura 2A), la situación de equilibrio se alcanzó a los 66 meses (5 años): allí, luego de un período de barbecho (en invierno), la población de esclerotos baja de 18 a 7 esclerotos/100 g de suelo, y al instalarse el cultivo de morrón (primavera-verano) se pasa de 7 a 18 esclerotos/100 g de suelo entre trasplante y fin de ciclo del cultivo. Si establecemos un umbral de 10 esclerotos/100 g de suelo como máximo tolerable que permita el desarrollo del cultivo, podemos observar que luego de tres años de monocultivo la producción estará seriamente comprometida, situación que es observable en chacras comerciales.

En rotaciones más complejas con cultivo de *morrón todos los años en el verano y alternando con cebolla y avena negra en invierno* (Figura 2D y E), el equilibrio se alcanza a los 48 meses (4 años), con densidades de esclerotos entre 3 y 11/100 g suelo. Aquí, la simulación indica que la mitad de las veces el cultivo de morrón estará comprometido por razo-

nes sanitarias. Si avanzamos a una rotación más larga con *un cultivo de morrón cada dos años y alternando con cebolla y avena negra en el invierno* (Figura 2F), la densidad de esclerotos oscila entre 1 y 7 /100 g de suelo, por debajo del umbral establecido.

FIGURA 2. SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA POBLACIONAL DE *SCLEROTIUM ROLFSSII* PARA DIFERENTES SECUENCIAS DE CULTIVOS. LAS SIMULACIONES SE INICIAN EN EL MES 0 CON LA INSTALACIÓN DEL CULTIVO DE MORRÓN Y PARA CUATRO NIVELES POBLACIONALES DE *S. ROLFSSII* EN EL SUELO (1, 5, 10 Y 15 ESCLEROTOS/100 G DE SUELO)



Nota: Cada punto indica el valor inicial de la población de esclerotos para la fase de la rotación evaluada (cultivo de morrón, de cebolla, de avena o barbecho de verano).

Fuente: Modificado de Leoni et al. (2014).

2.2. Efecto de la rotación en la dinámica poblacional de *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* (Foc)

En primer lugar, se determinó la sobrevivencia y la multiplicación de *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* (Foc) en 13 especies vegetales diferentes a cebolla –hospedero natural del patógeno–, para conocer mejor la dinámica de Foc en el suelo y seleccionar entre ellas las más adecuadas para el manejo de la podredumbre basal de la cebolla mediante la rotación de cultivos. Luego se ajustaron los modelos de dinámica poblacional, que consideran la capacidad de cada cultivo de multiplicar el patógeno, la densidad radicular y la tasa de descomposición de las raíces. Este último parámetro determina la liberación del patógeno al suelo y su posibilidad de infectar nuevas raíces (Leoni *et al.*, 2013). Finalmente, se corrió el modelo y se validaron los resultados con datos poblacionales obtenidos en chacras comerciales de cebolla (Leoni, 2013).

Contrariamente a lo esperado, las 13 especies de plantas evaluadas multiplicaron el patógeno, aunque en diferente grado. Las especies vegetales que presentaron menor capacidad para multiplicar a Foc fueron trigo, girasol, caupí y moha, mientras que la mayor tasa de multiplicación se observó en poroto negro. Sin embargo, cuando consideramos la densidad radicular, el sudangrass fue la especie que más cantidad de unidades infectivas produjo por planta (Tabla 2).

TABLA 2. CAPACIDAD DE DIFERENTES ESPECIES VEGETALES DE MULTIPLICAR *FUSARIUM OXYSPORUM* F.SP. *CEPAE* (Foc) POR GRAMO DE RAÍZ Y POR HECTÁREA

CAPACIDAD DE MULTIPLICAR FOC POR GRAMO DE RAÍZ		CAPACIDAD DE MULTIPLICAR FOC POR HECTÁREA**	
Baja (10^2 ufc)*	Trigo (<i>Triticum aestivum</i>)	Baja (10^9 ufc)	Trigo
	Moha (<i>Setaria italica</i>)		Moha
	Girasol (<i>Helianthus annuus</i>)		Girasol
	Caupí (<i>Vigna unguiculata</i>)		Caupí
Media (10^3 ufc)	Avena (<i>Avena sativa</i>)	Media (10^{10} ufc)	Avena
	Avena negra (<i>Avena byzantina</i>)		Avena negra

(Continúa en página siguiente)

	Lupino azul (<i>Lupinus angustifolius</i>)		Lupino azul
	Lupino blanco (<i>Lupinus albus</i>)		Lupino blanco
	Tomate (<i>Solanum lycopersicum</i>)		Tomate
	Maíz dulce (<i>Zea mays</i>)		Poroto negro
	Maíz (<i>Zea mays</i>)		Maíz dulce
	Sudangrass (<i>Sorghum x drummondii</i>)		Maíz
Alta (10^4 ufc)	Poroto negro (<i>Phaseolus vulgaris</i>)	Alta (10^{11} ufc)	Sudangrass

Notas:

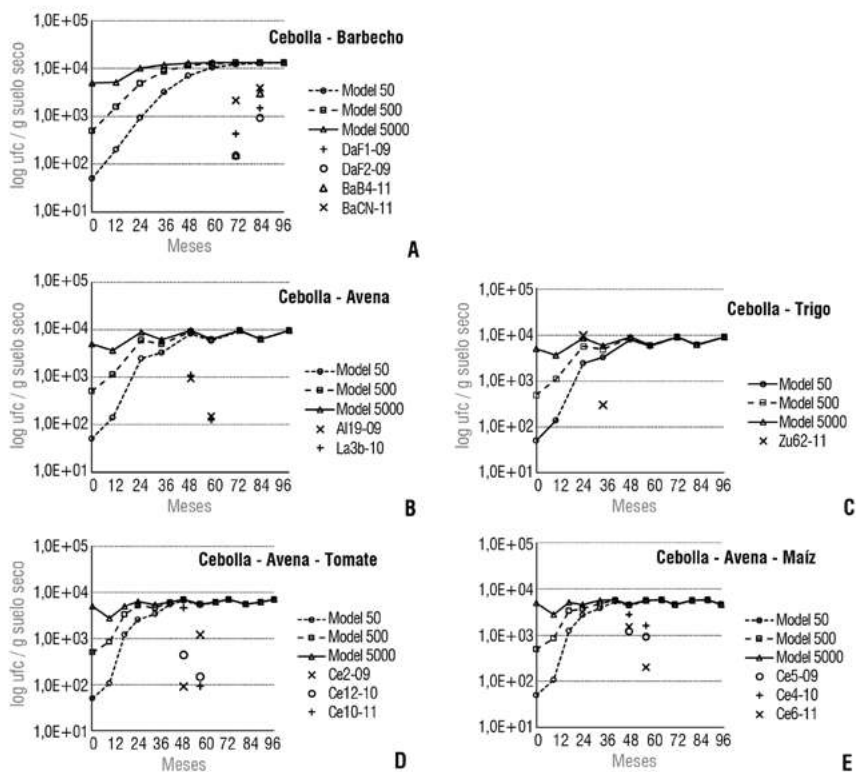
* *ufc* = unidades formadoras de colonias.

** Calculado en base a la densidad de raíces por hectárea de cada especie vegetal.

Fuente: Elaboración propia, basada en Leoni et al. (2013).

Al igual que para *S. rolfssii*, en el estudio de la dinámica poblacional de *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* (*Foc*) se simuló rotaciones teóricas que partían de diferentes densidades de *Foc* en el suelo, y se corrió el modelo hasta alcanzar un equilibrio dinámico. Luego, esas simulaciones se validaron con datos obtenidos en chacras comerciales. Los resultados de la simulación indicaron que el *monocultivo de cebolla* lleva a un incremento de la densidad de *Foc* en el suelo, alcanzando esta densidad valores de $1,3 \times 10^4$ ufc/g de suelo (Figura 3A). Al simular *rotaciones* con otros cultivos, el equilibrio se alcanza aproximadamente a los seis años y los valores de *Foc* en suelo son menores en un 47%, oscilando entre 7×10^3 ufc/g de suelo para las secuencias *cebolla-avena-tomate* y *cebolla-trigo-maíz dulce* (Figura 3D y 3E). Sin embargo, en general las simulaciones sobreestiman las poblaciones de *Foc* medidas en chacras comerciales, lo cual indica la necesidad de ajustar el modelo. Por ejemplo, en este deberían incluirse factores ambientales abióticos (temperatura, humedad) y bióticos, tanto de la planta (por ejemplo, densidad de plantación) como de los microorganismos benéficos que compiten con el patógeno y que fueron aislados en las muestras de suelo de las chacras evaluadas (*Trichoderma* spp.; *Pseudomonas* fluorescentes, actinomicetes, etc).

FIGURA 3. SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA POBLACIONAL DE *FUSARIUM OXYSPORUM* F.SP. *CEPAE* (*FOC*) PARA DIFERENTES SECUENCIAS DE CULTIVOS. LAS SIMULACIONES SE INICIAN EN EL MES 0 CON LA INSTALACIÓN DEL CULTIVO DE CEBOLLA Y PARA TRES NIVELES DIFERENTES DE *FOC* EN EL SUELO



Notas: Cada punto indica el valor inicial de la población de *Foc* para la fase de la rotación evaluada (cultivo de cebolla, de avena, de trigo, de tomate, de maíz o barbecho de invierno). Los símbolos x, o y + indican las evaluaciones en chacras comerciales y se comparan con los valores de la simulación (puntos conectados por líneas) luego de alcanzado el equilibrio dinámico de *Foc* en el suelo.

Fuente: Modificado de Leoni (2013).

3. Conclusiones y perspectivas

Las rotaciones de cultivos nos brindan diversos servicios ecosistémicos, entre ellos la regulación de poblaciones de patógenos, como analizamos en este capítulo. Se comprobó que es posible diseñar rotaciones de cultivos que minimicen las poblaciones de patógenos y permitan una producción equilibrada de alimentos a lo largo del tiempo.

Sin embargo, el diseño no es sencillo, pues la efectividad depende de la frecuencia de los hospederos en la secuencia de cultivos y de las habilidades del patógeno para sobrevivir. A partir de los resultados presentados vemos que la elección de los cultivos es crucial y no basta simplemente con “rotar familias” de cultivos –por ejemplo, alternar gramíneas y leguminosas–, ya que cultivos de una misma familia pueden tener efectos contrapuestos (Tabla 1) o magnitudes muy diferentes (Tabla 2). De los resultados surge también que podemos emplear como abono verde de invierno otras especies no “tradicionales”, por ejemplo, trigo en lugar de avena, tanto para el manejo de *S. rolfsii* como de *Foc*.

Si bien el diseño de las rotaciones no es sencillo, es necesario continuar y profundizar en el estudio de las interacciones bióticas y abióticas que se establecen en cada rotación. Debemos conocer más acerca de qué cultivos y secuencias son promotores de la salud del suelo y, por ende, del sistema. Para ello debemos saber, entre otros factores, cómo cambia el microbioma² del suelo y, más particularmente, cómo podemos favorecer las comunidades promotoras del crecimiento y las antagonistas a los patógenos, de forma de contribuir al establecimiento de suelos supresivos³ a enfermedades. No considerar estas interacciones puede explicar, por ejemplo, los desvíos en los modelos presentados en este trabajo (Figura 3). Constituye un gran desafío incluir esta información en los nuevos modelos que desarrollemos para explorar potenciales rotaciones hortícolas antes de implementarlas en el campo.

2 Microbioma: es la comunidad microbiana que ocupa un espacio definido por sus propiedades fisicoquímicas (por ejemplo, el suelo). Incluye además los elementos estructurales y metabólicos de los microorganismos, y material genético. Todo esto resulta en la formación de un nicho ecológico específico (Berg *et al.*, 2020).

3 Un suelo supresivo es aquel en el cual no se desarrolla la enfermedad, aunque estén presentes el huésped y el patógeno y las condiciones ambientales sean las adecuadas.

Referencias

Abawi, G. S. y Lorbeer, J. W.

(1972), "Several aspects of the ecology of *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae*", en *Phytopathology*, 62, pp. 870-876.

Alliaume, F., Rossing, W. A. H., García, M., Giller, K. E. y Dogliotti, S.
(2013), "Changes in soil quality and plant available water capacity following systems re-design on commercial vegetable farms", en *European Journal of Agronomy*, 46, pp. 10-19.

Arbolea, J., Gilsanz J. C., Alliaume, F., Leoni, C., Falero, M. y Guerra, S.
(2012), "Minimum tillage and vegetable crop rotation", en *Agrociencia Uruguay* (número especial), 16(3), pp. 62-70.

Berg, G., Rybakova, D., Fischer, D. Cernava, T., Champomier Vergès, M. C. et al.

(2020), "Microbiome definition re-visited: old concepts and new challenges", en *Microbiome*, 8:103. DOI: 10.1186/s40168-020-00875-0.

Dogliotti, S., Rossing, W. A. H. y van Ittersum, M. K.

(2004), "Systematic design and evaluation of crop rotations enhancing soil conservation, soil fertility and farm income: a case study for vegetable farms in South Uruguay", en *Agricultural Systems*, 80, pp. 277-302.

Larkin, R. P.

(2015), "Soil Health Paradigms and Implications for Disease Management", en *Annual Review of Phytopathology*, 53, pp. 199-221.

Leoni, C.

(2013), *Crop rotation design in view of soilborne pathogen dynamics. A methodological approach illustrated with Sclerotium rolfsii and Fusarium oxysporum f.sp. cepae*, PhD tesis, Universidad de Wageningen, Wageningen, Países Bajos, 173 pp.

Leoni, C., de Vries, M., ter Braak, C. J. F., van Bruggen, A. H. C. y Rossing, W. A. H.

(2013), "*Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae* dynamics: in-plant multiplication and crop sequence simulations", en *European Journal of Plant Pathology*, 137, pp. 545-561.

Leoni, C., ter Braak, C. J. F., Gilsanz, J. C., Dogliotti, S., Rossing, W. A. H. y van Bruggen, A. H. C.

(2014), "*Sclerotium rolfsii* dynamics in soil is affected by crop sequences", en *Applied Soil Ecology*, 75, pp. 95-105.

van Bruggen, A. H. C. y Semenov, A. M.

(2000), "In search of biological indicators for soil health and disease suppression", en *Applied Soil Ecology*, 15, pp. 13-24.

Xu, Z., Gleason, M. L., Mueller, D. S., Esker, P. D., Bradley, C. A., Buck, J. W., Benson, D. M., Dixon, P. M. y Monteiro, J. E. B. A. (2008), “Overwintering of *Sclerotium rolfsii* and *S. rolfsii* var. *delphinii* in different latitudes of the United States”, en *Plant Disease*, 92, pp. 719-724.

Capítulo 5

Alternativas para el manejo de patógenos de suelos en los sistemas hortícolas

Leticia Rubio, Roberto Bernal, Jorge Arboleya y Diego Maeso

1. Introducción

La horticultura es una actividad intensiva en el uso de recursos y especializada. En general, se realiza más de un cultivo por año, o un cultivo de ciclo largo en un mismo cuadro o invernáculo, lo que implica varias labores de preparación del suelo, una alta extracción de nutrientes y pérdida de materia orgánica, necesidad de riego, entre otras medidas de manejo. Este manejo conduce al deterioro del recurso suelo y consecuentemente, al aumento de patógenos que limitan la productividad de los cultivos.

La producción hortícola de Uruguay se realiza en las zonas sur (Canelones, Montevideo y San José) y en el norte del país (Salto y Bella Unión), se extiende sobre 9.774 ha y ocupa 2.430 productores. El 66% de la producción se genera en la zona sur y esta es mayoritariamente proporcionada por cultivos a campo, principalmente cebolla, boniato, zanahoria y zapallo. La zona norte, con el 34% de la producción, concentra la producción protegida, con cultivos de tomate, pimiento, zapallito, frutilla y berenjena (DIEA, 2015).

En la zona sur, la producción de cultivos a campo ha utilizado ampliamente el laboreo convencional (arado de rejas, rastras y rotovador en elevado número de veces), manejo que ha contribuido a la degradación del suelo, disminuyendo sus propiedades físicas y generando procesos erosivos (Arboleya *et al.*, 2010). En este sentido, a partir del año 2000 se han desarrollado numerosas investigaciones tendientes a implementar distintas prácticas tecnológicas para revertir los procesos de degradación del suelo, tales como la inclusión de abonos verdes, el laboreo reducido y

el uso de enmiendas orgánicas. Los problemas sanitarios, fundamentalmente de malezas en etapa de almácigos, han constituido otra limitante para los cultivos del sur y han requerido de la implementación de nuevas técnicas para la desinfección de suelos.

En la zona norte, la horticultura protegida tuvo sus primeras experiencias en la década de 1970; paulatinamente, se fue incrementando y se generalizó en la de 1990. Esta tecnología permitió extender la temporada de cultivos, producir en contra-estación y mejorar la calidad de las hortalizas comercializadas. Actualmente, hay unas 400 ha de invernaderos en los alrededores de Salto y Bella Unión y 300 ha en el sur del país (DIEA, 2015), en las que se cultiva esencialmente tomate y morrón. Estos sistemas productivos hacen un uso intensivo del suelo pues los invernaderos son estructuras costosas que permanecen en el mismo lugar por lo menos diez años; por lo tanto, se procura tener cortos intervalos de tiempo sin cultivos. Con los años, la intensificación del uso del suelo y la estructura protegida han acentuado algunos problemas como: la degradación del suelo por exceso de sales, la disminución de la materia orgánica y el aumento de plagas y enfermedades. Algunas enfermedades de suelo se tornaron complejas de manejar y causaron importantes pérdidas y los nematodos se convirtieron en un gran problema. Con la aparición del bromuro de metilo, fumigante utilizado para la desinfección de suelos, las limitantes sanitarias fueron controladas durante varios años. Se trataba de un producto de rápida acción, amplio espectro y fácil aplicación. Las ventajas de manejo y su eficiencia para control de nematodos, malezas y algunos hongos de suelo, determinaron que muchos productores lo adoptaran y fueran dependientes de su uso. No obstante, al constatarse que el bromuro de metilo, además de ser peligroso para la salud y de ser un biocida no selectivo, era perjudicial para la capa de ozono, se firmaron acuerdos para disminuir progresivamente su aplicación hasta la prohibición total de su utilización. En este contexto, fue necesario recurrir a la búsqueda de alternativas sostenibles y eficientes para la desinfección de suelos hortícolas. En el año 1999 se comenzó un proyecto demostrativo (INIA-ONUDI-DINAMA) de tecnologías alternativas al bromuro de metilo en Salto y Bella Unión, donde se instalaron diferentes manejos químicos, físicos, biológicos y combinaciones de ellos, con el objetivo del control de plagas de suelos en una forma sustentable.

2. Métodos de desinfección de suelos

Las alternativas para la desinfección de suelos pueden clasificarse en:

- **Químicas:** en general son productos fumigantes de amplio espectro, que ofrecen una solución rápida y eficiente, pero cuestionados por sus efectos ambientales adversos. Entre ellos se encuentran los principios activos: 1,3 dicloropropeno/cloropicrina, metam sodio, yoduro de metilo, algunos fosforados y abamectina.
- **Físicas**
 - Solarización y colector solar, que utilizan la energía solar para calentar el suelo o sustrato y desinfectarlo.
 - Vapor de agua: se utiliza un flujo de vapor que pasa a través del suelo o sustrato, elevando su temperatura para desinfectarlo.
- **Biológicas**
 - Biofumigación: combina la solarización y la descomposición de materia orgánica incorporada al suelo.
 - Microorganismos, tales como *Trichoderma* y *Azospirillum*, aplicados al suelo para combatir patógenos.

3. Alternativas físicas y biológicas utilizadas para la desinfección de suelos hortícolas en Uruguay

3.1. Solarización

Esta técnica se basa en el calentamiento del suelo a una temperatura de entre 36 y 50 °C en los primeros 30 cm, mediante la radiación solar, con la finalidad de controlar organismos patógenos. Este incremento de la temperatura resulta letal para muchos patógenos, semillas y nematodos (Pullman *et al.*, 1981). Además, la solarización provoca cambios favorables en las poblaciones y actividades microbianas, y en las propiedades físicas y químicas del suelo, mejorando el desarrollo, el crecimiento y la productividad de los cultivos (De Vay y Katan, 1991).

La técnica consiste en cubrir un suelo, que debe permanecer húmedo, con un polietileno fino y transparente, quedando expuesto a la luz solar durante los meses con mayor radiación solar (Figura1). La efectividad del método depende de la duración del día, la intensidad solar, las características del plástico y del tipo de suelo (Bernal, 2005; Casanello, 2003).

Las temperaturas en el suelo solarizado son 5-15 °C mayores comparadas con las del suelo no solarizado (Katan y Gamliel, 2012). En suelos

solarizados donde se ha logrado buen control de malezas y enfermedades, las temperaturas máximas obtenidas se sitúan en torno de 45 a 50 °C y 38 a 45 °C a profundidades de 10 a 20 cm, respectivamente.

¿Cómo se realiza la solarización?

Es importante una buena preparación del suelo (no debe quedar compactado y no debe haber terrones), de forma de lograr una buena colocación del polietileno y un calentamiento homogéneo. El polietileno debe colocarse bien tensado y sellado para evitar la presencia de espacios de aire entre él y el suelo, pues estos espacios se tornan en una capa aislante que reduce la absorción de radiación y el calentamiento del suelo, lo cual reduce el efecto de solarización (Figura 2). En el caso de invernaderos, es recomendable que cubra toda la superficie y no solo los canteros, de modo de evitar que queden zonas desprotegidas y con potencial presencia de inóculo (efecto borde). Es aconsejable utilizar polietileno ultravioleta (UV) transparente de 35-40 micrones de espesor. Se debe mantener el suelo húmedo, en al menos 50 cm de profundidad, durante todo el tratamiento, ya que la humedad aumenta la conductividad del calor en el suelo. Cuando la técnica se realiza en invernaderos, estos deben permanecer cerrados y sin roturas.

3.1. Biosolarización y biofumigación

La **biofumigación** consiste en suprimir patógenos de suelo mediante sustancias químicas volátiles liberadas por la descomposición de residuos orgánicos (Mitidieri, 2005). Existe una amplia lista de residuos orgánicos que se pueden usar con tal fin como estiércoles, abonos verdes (sorgo y maíz), brásicas y restos de cultivos. La técnica en sí consiste en enterrar la materia orgánica fresca, a razón de 5-10 kg/m², a una profundidad de unos 25 cm (Figura 3). Posteriormente, se riega y se mantiene la humedad para retener los gases que la materia orgánica desprende en su descomposición.

Se ha comprobado que esta técnica mejora la estructura del suelo, promueve el crecimiento radicular del cultivo y estimula la actividad de los microorganismos benéficos. Sus efectos son duraderos y pueden servir para más de un cultivo, siendo acumulativos a largo plazo. La efectividad de las enmiendas depende de su composición (en general tienen baja relación carbono (C)/nitrógeno (N), menor a 20), del estado de hidrata-

ción de los residuos antes de su incorporación al suelo, de su concentración y del tiempo de exposición.

La **biosolarización** es la acción combinada de la solarización y la biofumigación, o sea, es la incorporación al suelo de diferentes materiales orgánicos (estiércoles, abonos verdes, restos de cultivos, etc.) y su posterior cobertura con polietileno transparente de 35-40 micrones.

FIGURA 1. SOLARIZACIÓN EN INVERNÁCULO (IZQUIERDA), SOLARIZACIÓN EN CANTEROS PARA CEBOLLA O FRUTILLA (DERECHA)



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2. COLOCACIÓN DEL POLIETILENO EN LOS CANTEROS A SOLARIZAR



Fuente: E. Vicente y J. Arboleya.

FIGURA 3. CULTIVOS DE SORGO Y COLZA UTILIZADOS PARA REALIZAR BIOSOLARIZACIÓN.



Fuente: E. Vicente.

Experiencias de solarización y biosolarización para la desinfección de suelos hortícolas en Uruguay

Zona norte

En la década de 1980, Bernal hizo las primeras experiencias de solarización en la Estación Experimental Litoral Norte, Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger. Luego, ambas técnicas fueron evaluadas por INIA a través de distintos proyectos como métodos de desinfección de suelos en sistemas protegidos de Salto y Bella Unión, entre 1999 y 2005.

Se evaluó el efecto de la solarización y de la solarización más la incorporación de distintas fuentes de materia orgánica (maíz, sorgo, brócoli, compost, restos de tomate y pimiento, gallinaza y cáscara de arroz) sobre el control de nematodos y otros patógenos, el rendimiento del cultivo y la presencia de microorganismos benéficos.

Los periodos de solarización fueron de 3 a 5 semanas. La efectividad de estos tratamientos fue evaluada a través de la contabilización del número de nematodos, raíces con presencia de agallas, población de bacterias benéficas, presencia de enfermedades y rendimiento comercial (número y peso de fruta).

Los resultados demostraron que la solarización por sí sola fue una medida efectiva para el control de nematodos y otros patógenos, alcanzando temperaturas de hasta 65 °C en los primeros 5 cm del suelo. Sin embargo, la incorporación de algunas enmiendas orgánicas, como el maíz y la gallinaza, permitió aumentar la temperatura del suelo con respecto a la solarización por sí misma, por lo que en años en que las con-

diciones no son buenas para la solarización (baja radiación), el agregado de enmiendas tiene un efecto positivo. Además, se observó que todas las enmiendas utilizadas mejoraron las propiedades físicas del suelo y contribuyeron a un mayor desarrollo radicular. El compost y la cáscara de arroz no controlaron satisfactoriamente a los nematodos; sin embargo, los rendimientos del cultivo fueron similares a los logrados con los tratamientos con fumigantes, quizás, porque estos tratamientos contribuyeron seguramente a una mayor exploración radicular. En cuanto a las enmiendas evaluadas, la biosolarización con brócoli y con restos de maíz (5-10 kg/m²) tuvo igual o mejor control de nematodos y rendimiento comercial que los fumigantes (Tabla 1), por lo que son manejos altamente recomendados. Finalmente, las incorporaciones sucesivas de enmiendas orgánicas con solarización aumentaron la población de bacterias benéficas y mejoraron las propiedades físicas del suelo.

Estos trabajos permitieron concluir que la solarización y la biosolarización son métodos efectivos para la desinfección de suelos hortícolas en el norte del país. Para maximizar su eficiencia deben realizarse desde mediados de diciembre y hasta fines de enero, y por un periodo de al menos 30 días (Bernal *et al.*, 2003). Actualmente, aproximadamente el 90% de los productores de cultivos protegidos del norte del país aplica la solarización.

TABLA 1. EFECTO DE LOS DISTINTOS TRATAMIENTOS SOBRE EL RENDIMIENTO, LA NODULACIÓN DE RAÍCES, Y EL CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (MO) Y NITRATOS

Tratamiento	Rendimiento (kg/m ²)	Índice de nodulación*	M.O. %**	Nitratos
Maíz + Solarización	8.5 a	0.3 b	1,64	33
Cáscara de arroz	7.5 b	5.4 a	1,99	18
Bromuro de metilo	7.0 bc	0.6 b	1,21	18
Metam sodio + Solarización	6.8 bc	5.5 a	1,55	18
Testigo	6.0 c	7.0 a	1,39	17

Notas:

* Nodulación de raíces por nematodos, según escala de Bridge y Page (1980).

** Porcentaje de materia orgánica.

Los tratamientos seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes, LSD al 5%.

Fuente: Bernal *et al.* (2005).

Zona sur

En la zona sur del país, la solarización se implementó en la década de 2000, para el control de enfermedades y malezas en canteros para almácigos de cebolla. Se logró una reducción muy significativa en el número de malezas en canteros solarizados (Tabla 2), efecto que se mantuvo en los 100 días posteriores a levantar el polietileno de los almácigos. Los tratamientos solarizados alcanzaron, en los primeros 5 cm de suelo, temperaturas superiores a 60 °C (Figura 4), mayores a las que se citan como necesarias para afectar la germinación de las malezas. Se concluyó, además, que el periodo de solarización de 30 días es adecuado y reduce significativamente el banco de semillas de malezas, siendo más efectivo si se realiza antes de que finalice el mes de enero (Arboleya, 2018).

TABLA 2. NÚMERO DE MALEZAS POR METRO CUADRADO DE CANTERO SOLARIZADO Y NO SOLARIZADO EN ALMÁCIGOS DE CEBOLLA

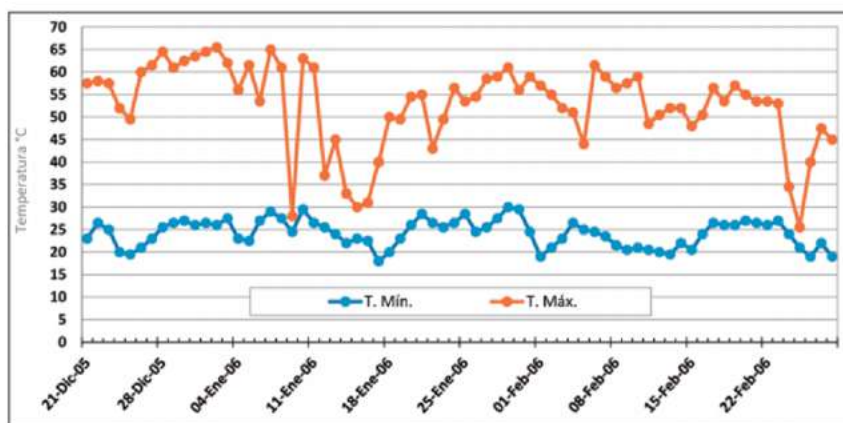
Tratamiento	N° de malezas/m ²		
	sitio 1	sitio 2	sitio 3
Sin solarización	760	350*	6934
Solarización + Riego	3	6	0
Solarización, sin riego	0	25	118

Notas:

* Con 3 aplicaciones de glifosato.

Fuente: Arboleya (2018).

FIGURA 4. TEMPERATURA MÁXIMA Y MÍNIMA A 5 CM DE PROFUNDIDAD EN SUELO SOLARIZADO



Fuente: Arboleya (2018).

En cuanto al efecto de la solarización para el control del nematodo del tallo (*Ditylenchus dipsaci* (Kühn) Filip.) en los almácigos de cebolla, la técnica no fue 100% efectiva; sin embargo, redujo significativamente la enfermedad. Si bien la solarización reduce los problemas de este nematodo, debe complementarse con alguna otra medida, como puede ser la rotación con otras especies no hospederas, para mejorar su control.

Otro problema sanitario de los almácigos de cebolla lo constituye la podredumbre blanca causada por el hongo *Sclerotium cepivorum* Berk., el cual produce estructuras de resistencia llamadas esclerotos, que pueden sobrevivir en el suelo y en restos de cultivo por cinco a seis años. La incidencia de podredumbre blanca y el número de esclerotos/100 g de suelo fueron evaluados tras distintos periodos de solarización. Se observó que la incidencia de la enfermedad y el número de esclerotos tuvieron una reducción significativa en las parcelas en las que se solarizó consecutivamente y que por el contrario el beneficio se pierde gradualmente al dejar de solarizar (Tabla 3).

TABLA 3. NÚMERO DE ESCLEROTOS/100 G DE SUELO EN EL MOMENTO DE SEMBRAR EN TRES TEMPORADAS

	Temporada de siembra		
	2012	2013	2014
No solarizado	13	36 a	29 a
Solarizado 1 año (2011)	4	14 ab	19 b
Solarizado 2 años (2011, 2012)	3	12 b	15 b
Solarizado 3 años (2011, 2012 y 2013)	4	8 b	3 c

Nota: Los tratamientos seguidos por la misma letra no son significativamente diferentes, LSD al 5%.

Fuente: Arboleya (2018).

La solarización constituye una técnica eficiente y eficaz para desinfectar canteros de almácigos de cebolla, ya que controla malezas y reduce significativamente los problemas por nematodos y podredumbre blanca, por lo que es una técnica ampliamente usada.

4. Consideraciones finales

Actualmente, se dispone de varios métodos alternativos a los tradicionales fumigantes para el control de patógenos de suelos, estos pueden usarse solos o complementarse. La solarización y biosolarización en nuestros sistemas productivos han demostrado alta eficiencia para el control de malezas y nematodos, así como un incremento en los niveles de nutrientes y de organismos antagonistas en el suelo. Por ello, la solarización ha sido adoptada por un gran número de productores como herramienta fundamental antes de instalar un cultivo. Además de los beneficios mencionados, estas prácticas de manejo garantizan la seguridad alimentaria y el cuidado del ambiente y, aunque son procedimientos que requieren planificación y tiempo, en el mediano y largo plazo se vuelven equilibrados, sustentables y más rentables.

Referencias

Arboleya, J.

(2018), *Solarización: una técnica de manejo integrado de malezas y plagas en horticultura*, Serie técnica 245, INIA, Montevideo.

Arboleya, J., Gilsanz, J., Allauime, F., Leoni, C., Falero, M. y Guerra S.

(2010), *Manejo sustentable en la producción hortícola intensiva*, Serie Actividades de Difusión 624.

Bernal, R.

(2005), "Solarización: una alternativa al bromuro de metilo", *Revista INIA*, 5.

Bernal, R., Mendoza, Y. y Orihuela, C.

(2003), *Alternativas al Bromuro de Metilo*, Serie Actividades de Difusión 340. Proyecto INIA, ONUDI, DINAMA.

Casanello, M. E.

(2003), *Solarización*. Disponible en: <<http://www.pv.fagro.edu.uy/fitopato/publica/Solarizacion.pdf>>.

De Vay, J. y Katan, J.

(1991) *Soil Solarization*, CRC Press, Boca Ratón (Florida, EE. UU.).

DIEA

(2015), *Anuario Estadístico de DIEA 2015*. Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/noticias/resultados-encuesta-horticola-litoral-norte-2016>>.

Katan, J. y Gamliel, A.

(2012), *Soil Solarization: Theory and Practice*, American Phytopathological Society, St. Paul (Minnesota, EE. UU.).

Mitidieri, M.

(2005), "La biofumigación en el marco del manejo integrado de plagas y enfermedades en cultivos hortícolas", INTA, Buenos Aires. Disponible en: <https://inta.gob.ar/sites/default/files/intasp-mitidieri_ms-biofumigacion-ed2005.pdf>.

Pullman, G., De Vay, J. y Garber, R.

(1981), "Soil solarization and thermal death: a logarithmic relationship between time and temperature for four soilborne plant pathogens", en *Phytopathology*, 71, pp. 959-964.

Capítulo 6

Malezas en sistemas ganaderos y agrícolas

Amparo Quiñones Dellepiane, Tiago Edu Kaspar y
y M. Alejandro García

1. Introducción

1.1. Contextualización de la problemática de malezas

Las malezas son plantas no deseadas que se desarrollan fuera de lugar e interfieren con las actividades o el bienestar humano (WSSA, 1956). Estas “surgen” junto con la agricultura, cuando la modificación del ambiente para el cultivo de plantas comestibles favorece la proliferación de otras, no deseadas (Radosevich *et al.*, 2007). Por tanto, las malezas no comparten un conjunto específico de características, una familia o un ambiente, sino que la categorización de maleza se basa en la percepción humana, influyendo, entre otras cosas, el momento, el lugar, la situación o el sistema de producción. Los efectos negativos de las malezas pueden ocurrir de forma directa sobre las especies de interés, a través de la competencia por recursos y espacio; o indirectamente, comprometiendo las cosechas, contaminando el producto final, depreciando el valor de los campos, o aun siendo hospederas alternativas de plagas y enfermedades nocivas. Sin embargo, las malezas también pueden proveer servicios ecosistémicos, por ejemplo, el control de insectos, el incremento de nutrientes en el suelo y en la diversidad de polinizadores (Blaix *et al.*, 2018).

Por tanto, en los sistemas de producción conservacionistas y en los agroecológicos se busca balancear efectos perjudiciales y beneficios de las especies consideradas malezas. En este contexto, el manejo integrado de malezas está basado en el uso criterioso y asociado de estrategias culturales, mecánicas, químicas y biológicas, de modo de reducir al máximo el impacto ambiental. Especial atención se pone en la reducción del

uso de herbicidas de síntesis, en consideración de los potenciales daños ambientales y a la salud que su uso indiscriminado o incorrecto puede ocasionar.

1.2. Las malezas y el uso de herbicidas en Uruguay

La producción agropecuaria de Uruguay comprende distintos sistemas productivos, entre los que se destacan los sistemas agrícolas, agrícolas ganaderos y de ganadería extensiva. En cada sistema productivo las malezas cumplen un rol distinto, generando diferentes impactos sobre la actividad humana y exigiendo el uso de herramientas de manejo direccionadas a estas particularidades.

En los sistemas ganaderos extensivos son frecuentes las malezas de campo natural, que comprenden subarbustos y arbustos, perennes, en su mayoría nativos, de mediano y alto porte, que son poco consumidos por el ganado. Existen aproximadamente 40 especies nativas de diferentes familias (Rosengurtt, 1979) que con frecuencia son consideradas malezas. Es una característica común en estas la presencia de mecanismos para evitar la herbivoría (espinas o producción de compuestos secundarios, por ejemplo) y/o estructuras de reserva subterráneas. Las especies más representativas de malezas de campo son: cardilla (*Eryngium horridum*), carqueja (*Baccharis trimera*), mío-mío (*Baccharis coridifolia*), chilca (*Acanthostyles buniifolius*) y senecios (*Senecio* spp.). Los enmalezamientos de campo ocurren cuando una o varias de estas especies se tornan dominantes y disminuyen tanto la superficie útil de pastoreo como los recursos disponibles para el crecimiento de las plantas forrajeras. Además, dificultan las tareas de vigilancia del ganado, especialmente de categorías jóvenes. Algunas presentan el problema adicional de ser tóxicas.

En los sistemas más intensivos, las malezas se presentan como uno de los principales problemas fitosanitarios en cultivos y pasturas cultivadas. Además de generar pérdidas productivas y dificultar la cosecha, la presencia de malezas y sus propágulos reducen la calidad del producto final al contaminar lotes de granos, semillas y/o reservas de alimentos destinados a distintos animales. El manejo de las malezas en estos sistemas productivos se ha basado, en los últimos 20 años, principalmente en el uso de herbicidas. Esta estrategia ha generado la selección de poblaciones de raigrás (*Lolium multiflorum*), yerba carnífera (*Conyza* spp.) y de yuyo colorado (*Amaranthus* spp.) resistentes a herbicidas en Uruguay

(Félix y Urioste, 2016; Kaspary *et al.*, 2020a). Esta problemática ha elevado los costos de manejo de estas poblaciones y ha promovido el uso de mayores cargas herbicidas.

En Uruguay, las importaciones de herbicidas pasaron de 6.000 toneladas en 2005 a más de 17.000 en 2019, representando actualmente en promedio el 60% del valor monetario del total de productos fitosanitarios importados (MGAP, 2020). El glifosato es el de mayor importancia, tanto en cantidad como en valor de sus importaciones. El uso incorrecto de fitosanitarios puede generar efectos nocivos a la salud humana, impactos negativos sobre la fauna y flora, además de conflictos sociales (Tuduri y Uval, 2019). Por tanto, a pesar de las características particulares de las diferentes problemáticas de malezas, la reducción en el uso de herbicidas y la conservación de los recursos naturales constituyen un desafío compartido por los diferentes sistemas productivos.

2. Abordaje actual del manejo de malezas

2.1. Sistemas ganaderos

En los sistemas ganaderos extensivos, el principal recurso forrajero es el pastizal, o campo natural (Pallarés *et al.*, 2005), que ocupa aproximadamente el 60% de la superficie de Uruguay (Baeza y Paruelo, 2020). En general, las comunidades de campo natural tienen entre dos y tres estratos. En el primer estrato se desarrollan las especies de interés forrajero, mayormente gramíneas perennes, cuya altura óptima está entre los 6 y 12 cm (Jaurena *et al.*, 2018, 2021). En el segundo (hasta los 30-40 cm) y el tercer estrato (> 50 cm) se encuentran subarbustos, arbustos, gramíneas erectas y pastos altos. Cuando los subarbustos y arbustos dominan en la comunidad, compiten eficientemente por espacio, nutrientes y luz, y reducen el área efectiva de pastoreo. Además, pueden provocar un aumento en la presión de pastoreo sobre las especies más palatables, afectando la cobertura y la productividad de las gramíneas forrajeras nativas. En esas situaciones, las especies pasan a catalogarse como malezas de campo.

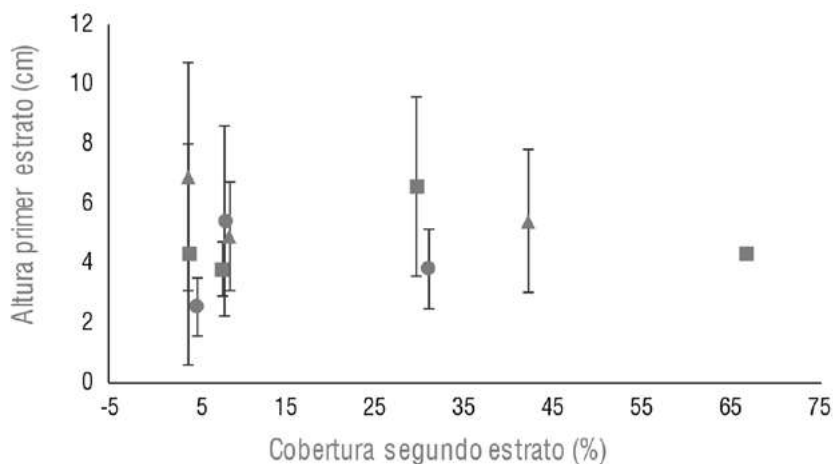
La cardilla (*Eryngium horridum*) es considerada por los ganaderos como una de las malezas de campo más perjudiciales, por su potencial de ocupar el espacio, su habilidad competitiva y su tolerancia a diferentes métodos de control, dado que la muerte de la parte aérea generalmente es

sucedida por el rebrote desde las numerosas yemas axilares (Carámbula *et al.*, 1995; Lallana, 2007). La cardilla es muy frecuente en los pastizales densos de Sierras del Este, la cuenca sedimentaria del noreste y centro Sur: comunidad *Eryngium horridum*-*Juncus capillaceus* (Lezama *et al.*, 2019). En esta comunidad, Altesor *et al.* (2019) identificaron diferentes estados y fases.¹ En algunas de ellas la cobertura del segundo estrato supera el 30% y puede llegar hasta el 65%, lo cual suele estar acompañado de valores de altura del primer estrato inferiores a los 6 cm (Figura 1), que, como ya se mencionó, es el valor mínimo para garantizar un buen desempeño animal (Jaurena *et al.*, 2018, 2021). Por tanto, en muchos predios el control de malezas de campo, en conjunto con un ajuste del pastoreo, repercutiría favorablemente en la productividad ganadera.

Para disminuir el impacto de estas especies, a nivel predial se usa el control mecánico con rotativa o herramientas de arrastre (por ejemplo, riel lastrado), y/o el control químico con máquinas pulverizadoras o de control posicional (de alfombra o sogas). El control mecánico es altamente efectivo en el corto plazo, pero el porcentaje de control merma a los pocos meses, dado que la mayoría de las especies rebrotan luego del corte (Pellegrini *et al.*, 2007; Formoso y Martínez, 2012). El control químico es más efectivo en el largo plazo, pero su uso debe ser evaluado con cuidado. Los herbicidas no brindan selectividad a nivel de especie, lo que en comunidades muy diversas como los campos naturales conlleva el riesgo de daño en especies no-blancas. Las máquinas de control posicional minimizan este riesgo, pero no lo impiden en todas las situaciones, dado que puede haber especies que no sean malezas en el segundo estrato o incluso puede llegar herbicida al primer estrato si la regulación es deficiente. Otro de los aspectos a considerar en el control químico es el estado de crecimiento de las malezas (Harrington y Ghanizadeh, 2017) y su estructura poblacional. Las malezas de gran tamaño y biomasa son más tolerantes al control y pueden proteger a las juveniles. Por lo que, en situaciones de alto enmalezamiento, es aconsejable el control integrado (mecánico + químico).

¹ Según Altesor *et al.* (2019: 74), “la heterogeneidad de la vegetación derivada del manejo ganadero puede ser organizada e interpretada en términos de estados o de fases dentro de un mismo estado, que representan distintas etapas de la dinámica de una comunidad”.

FIGURA 1. RELACIÓN ENTRE LA ALTURA DEL PRIMER ESTRATO Y LA COBERTURA DEL SEGUNDO ESTRATO EN LOS PASTIZALES DENSOS DE LA COMUNIDAD DE *ERYNGIUM HORRIDUM*-*JUNCUS CAPILLACEUS*.



Nota: Los símbolos se corresponden con las regiones geográficas: Sierras del Este (círculo), Centro-Sur (cuadrado) y Cuenca Sedimentaria del Noreste (triángulo). Cada símbolo representa el promedio de una de las fases y las barras el desvío estándar.
Fuente: Elaboración propia, en base a Altesor et al., 2019.

2.2. Sistemas agrícolas

Los sistemas agrícolas de secano comprenden dos zafra anuales para granos secos, siendo los cultivos de invierno compuestos mayoritariamente por trigo, cebada y colza; y alcanzando en la campaña 2020 cerca de 540 mil hectáreas sembradas (MGAP, 2021). En tanto que los cultivos de verano corresponden a soja, maíz y sorgo, con aproximadamente 903, 149 y 33 mil hectáreas sembradas de cada uno de estos, respectivamente (MGAP, 2021). De forma mayoritaria la agricultura en nuestro país utiliza la siembra directa como modo de establecimiento de los cultivos.

En los sistemas de siembra directa, el uso de herbicidas es la principal herramienta de manejo de las malezas, ya que, en este escenario, estos son usados para la preparación de barbechos limpios y para así posibilitar la siembra y el establecimiento de los cultivos. Debido a sus características como un excelente herbicida total, el más usado tradicionalmente para lograr un barbecho químico ha sido el glifosato. Co-

múnmente también se utilizan herbicidas selectivos para el control de malezas luego de la emergencia del cultivo sembrado. Sin embargo, la utilización de cultivos transgénicos también promovió el uso de menos principios activos herbicidas, tornando casi inexistente la rotación de diferentes mecanismos de acción y basando el control químico principalmente en la utilización de glifosato. Estas tecnologías, utilizadas por varios años y sin formar parte de una estrategia integrada de manejo de malezas, significaron un aumento en el uso de herbicidas y una modificación en la frecuencia de las especies de malezas, culminando con la selección de biotipos resistentes a herbicidas (Ríos *et al.*, 2013; Félix y Urioste, 2016).

Relatos de observaciones de técnicos y estudios a nivel nacional corroboran fallas en el control de raigrás (*Lolium multiflorum*), yuyo colorado (*Amaranthus* spp.) y yerba carnícera (*Conyza* spp.) después de la utilización de herbicidas registrados para el control de estas malezas (Ríos *et al.*, 2013; Félix y Urioste, 2016; Kasparý *et al.*, 2020a). Coincidentemente, estos géneros se encuentran entre los citados con mayor frecuencia a nivel mundial, presentando en algunos casos resistencia a 11, 8 y 7 herbicidas con diferentes sitios de acción, respectivamente (Heap, 2021).

Según datos preliminares de un estudio realizado por el INIA, que busca caracterizar la resistencia a herbicidas, en Uruguay, de 70 poblaciones testeadas de raigrás, 75 de yuyos colorados y 45 de yerba carnícera, el 85, el 80 y el 87% resistieron la dosis recomendada de glifosato, respectivamente. Este escenario ha promovido el uso progresivo de mayores dosis de este herbicida o, en muchos casos, de otros herbicidas con peores perfiles ecotoxicológicos, incrementando los costos de producción e impactos ambientales. Por ende, la adopción de un manejo integrado de malezas que incluya prácticas de control culturales, mecánicas y un uso más diversificado y criterioso de herbicidas es clave para reducir el uso de estos productos y lograr un manejo exitoso de malezas resistentes (Balbinot Jr. *et al.*, 2007).

3. Tecnología propuesta

La constante búsqueda de alternativas que contribuyan a mejorar la sostenibilidad ambiental en Uruguay ha impulsado en los últimos años la adopción de estrategias que apuntan a un manejo más integrado de malezas en los sistemas agrícolas y ganaderos. En este contexto, la suma de

esfuerzos entre los diferentes actores del sistema productivo uruguayo ha generado y continúa generando cada vez más insumos para apoyar a técnicos y productores en la reducción de la dependencia del uso de herbicidas como herramienta de manejo de malezas.

3.1. Sistema ganadero. Manejo integrado de malezas

El manejo de malezas de campo debe estar comprendido en una estrategia general de manejo del pastoreo que promueva una estructura óptima para el desempeño animal (Jaurena *et al.*, 2021) y minimice las chances de recolonización de las malezas. El control de estas puede basarse exclusivamente en herramientas mecánicas o complementarse con el uso de herbicidas (Figura 2). La elección dependerá, entre otras cosas, del tipo de sistema y de la disponibilidad de herramientas. En situaciones de alta cobertura inicial (> 30%) es recomendable hacer una primera intervención mecánica para disminuir la cantidad de biomasa aérea, promover el rebrote, disminuir la cantidad de biomasa subterránea y homogeneizar el tamaño de las plantas. Todo ello genera las condiciones para elevar la efectividad del control químico y minimizar la cantidad de herbicida necesario. Este proceso de “preparación” es más rápido si la intervención mecánica se realiza en primavera temprana y en el siguiente otoño se aplica el control químico. En otoño, las malezas perennes estivales acumulan reserva en sus órganos subterráneos, por lo que se logra un buen flujo de herbicida a los puntos de crecimiento. Para la aplicación de herbicidas en pastizales es aconsejable el uso de máquinas de aplicación posicional en lugar de pulverizadoras. Las máquinas de control posicional son utilizadas para el control de malezas en pasturas en diferentes partes del mundo, siendo el factor común en los diversos modelos la deposición del herbicida en el estrato superior de la pastura (Harrington y Ghanizadeh, 2017). Una de las ventajas de esta herramienta es que evita el contacto del herbicida con las especies del estrato inferior, minimizando el daño en especies no-blanco, como hierbas de pequeño porte y gramíneas forrajeras. En Uruguay, las máquinas más populares son las denominadas “de alfombras” (Ríos, 2007). Independientemente del método utilizado, la evaluación del éxito de una intervención de control no debe estar sesgada a la disminución de la densidad y/o cobertura de la/s maleza/s en el corto plazo, sino que debe constatar un efecto positivo de la remoción de la/s maleza/s de las especies de interés.

FIGURA 2. HERRAMIENTAS DE CONTROL MECÁNICO (IZQUIERDA) Y QUÍMICO (DERECHA) DE MALEZAS DE CAMPO. SE MUESTRA UN RIEL LASTRADO ELABORADO ARTESANALMENTE Y LA MÁQUINA DE ALFOMBRA SUPERÁTILA



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Sistemas agrícolas. Uso de cultivos de cobertura y rolado en el manejo de malezas

A partir de la adopción de un manejo integrado de malezas, los cultivos de cobertura (cc), también conocidos como cultivos de servicio (cs), y el rolado como método de desecación son herramientas promisorias para los sistemas productivos uruguayos, que apuntan a un uso más eficiente de herbicidas y a contribuir al desarrollo de sistemas agrícolas sostenibles (Kaspary *et al.*, 2020b). Los cc proporcionan cobertura vegetal durante los períodos en que no está presente un cultivo con destino a ser cosechado, contribuyendo a controlar la erosión, mejorar la infiltración y la retención de agua por el perfil del suelo. Además, pueden incrementar los nutrientes y controlar malezas. La supresión de malezas puede ocurrir durante el ciclo de desarrollo vegetativo de los cc y también después de su desecación, por efectos de sus rastrojos en superficie. La interferencia de los cc y sus rastrojos reducen la germinación, el establecimiento y el desarrollo de malezas a partir de efectos físicos, alelopáticos y biológicos. Estos efectos sumados bajan la densidad o evitan el establecimiento de malezas, reduciendo las dosis y/o el número de aplicaciones de herbicida necesarias para su control, o eventualmente hasta permitiendo prescindir del herbicida en ciertos momentos de la secuencia de cultivos.

Los rápidos establecimiento y cobertura del suelo son factores muy deseables en los cc, que, sumados a la gran capacidad de producción de biomasa, interfieren directamente en el establecimiento y desarrollo de malezas. Estos factores están directamente relacionados con la/es especie/s usada/s y con otros, relativos a su siembra, que incluyen: la densidad, el tipo (en línea o al voleo) y el momento (en pre o poscosecha del cultivo de verano). En Uruguay, la avena negra es la especie de cc de ciclo invernal más usada, debido a su precocidad y alta tasa de crecimiento durante el invierno (Sawchik *et al.*, 2015). Al mismo tiempo, presenta un gran potencial de supresión de malezas y posibilita, cuando es necesario, la utilización de herbicidas selectivos para el control de especies de hoja ancha, como la yerba carnífera. En los últimos años, desde el INIA y otras instituciones nacionales –como por ejemplo la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (FAGRO-UDELAR)–, se ha trabajado para determinar los factores que permitan optimizar el desarrollo de los cc y maximicen el control de malezas, en las condiciones de Uruguay. En este sentido, la adecuación de los factores de siembra antes mencionados y el uso de rolado como método de terminación han demostrado ser variables que permiten maximizar el control de malezas y reducir el uso de herbicidas.

El rolado es una alternativa mecánica para la desecación de los cc. A modo de descripción general del proceso de rolado, el objetivo del rolo es quebrar y aplastar las plantas, pero no cortarlas. Esta técnica, realizada en el momento adecuado, provoca la muerte del cc, que queda anclado al suelo y dispuesto de una forma que minimiza la entrada de luz al mismo. Al mismo tiempo, también puede controlar algunas malezas que lograron sobrevivir a pesar de la competencia del cc. La eficiencia de este método es muy dependiente de la especie a ser rolada, su estadio de desarrollo y la cantidad de biomasa verde presente. Además de eso, la siembra del cultivo de interés económico debe ser orientada en el mismo sentido del rolado, evitando la necesidad de cortar gran parte del rastrojo (Curran y Ryan, 2010). Por lo tanto, a través del rolado se logran oportunos controles, con una adecuada desecación, aportando un mantillo superficial de rastrojo con potencial para disminuir la germinación y el desarrollo posterior de malezas. Cuando por diferentes motivos no se logran adecuados controles, es necesario complementar con aplicaciones de herbicidas para optimizar el manejo (Creamer y Dabney, 2002). Sin embargo, la cantidad de herbicida requerido para lograr el objetivo es significativamente menor (Kaspary *et al.*, 2020b). En la agricultura, es-

pecialmente en cultivos orgánicos, existen varios tipos de rolos, pudiendo ser estos: i) lisos; ii) de cuchillas rectas; iii) de cuchillas helicoidales; y iv) de cuchillas rectas dispuestas en ángulo. Este último es el más usado para manejo de cultivos de cobertura, por su menor costo (Figura 3).

FIGURA 3. UTILIZACIÓN DE ROLO DE CUCHILLAS RECTAS (A) Y DE CUCHILLAS RECTAS DISPUESTAS EN ÁNGULO (B) EN EL ROLADO DE AVENA NEGRA Y SORGO



Fuente: *Elaboración propia.*

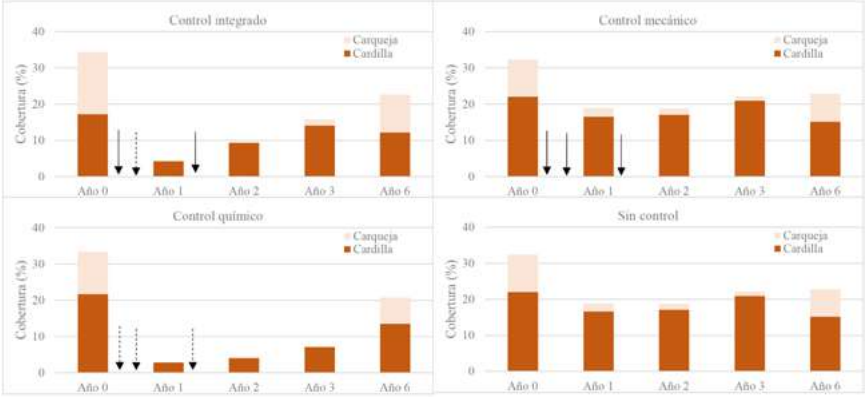
4. Mejoras a partir del uso/de la implementación de la tecnología propuesta

4.1. Sistema ganadero. Efectos directos e indirectos del control de malezas

El manejo de malezas en campo natural debe estar comprendido en una estrategia general de manejo de la vegetación que incluye la promoción de las especies deseadas y la supresión de las no deseadas, sin comprometer la salud del pastizal en el largo plazo (Heady y Child, 1994). El enfoque reduccionista de las malezas (centrado en el control) puede promover prácticas de control que, directa o indirectamente, degraden la comunidad y exacerben el problema (Radosevich *et al.*, 2007; Sheley *et al.*, 2006). En este marco, en el INIA se realizó un experimento de seis años de duración, durante el cual se evaluó la efectividad de tres métodos de control (mecánico, químico e integrado) sobre la dinámica de

rosetas de cardilla y la respuesta de la comunidad de pastizales densos de Sierras del Este. Los tres métodos de control evaluados disminuyeron la cobertura de cardilla y carqueja, y el nivel de control (muerte de plantas) en el tratamiento mecánico fue menor. El uso de herbicida (2,4-D + picloram aplicado con máquina de alfombra) aumentó la efectividad y la residualidad del control. La integración del control químico y mecánico logró una efectividad similar al químico, pero con 1/3 de la dosis aplicada (Figura 4). Ambos tipos de control difieren en sus efectos sobre la dinámica poblacional de la especie. El control mecánico reduce el tamaño medio de roseta, pero no afecta la densidad de rosetas. Ello implica una inmediata disminución de la cobertura, pero que a los meses se revierte por el proceso de rebrote y crecimiento de las rosetas. En cambio, el control químico sí logra disminuir la densidad de rosetas y, por tanto, logra una mayor reducción de la cobertura y, por ende, de la residualidad del control (Quiñones *et al.*, 2020). Independientemente del tratamiento, la efectividad del control se relaciona con la presencia de rosetas grandes (> 60 cm de diámetro), que son susceptibles tanto de ser arrancadas por el riel como mojadas por la alfombra. En cambio, cuando la población se compone de rosetas chicas (< 40 cm) y medianas (40-60 cm), la reducción de la cobertura es mínima, ya que muchas de estas pueden escapar y/o tolerar dichas herramientas, como ocurrió en el tercer momento de aplicación de los tratamientos. Por lo tanto, las intervenciones de control no se deberían aplicar anualmente. Además, es importante considerar que estas especies son componentes naturales de los pastizales y su sola presencia no implica un daño ecológico; por el contrario, la heterogeneidad de estratos es un atributo deseable, que debe ser integrado al manejo productivo (Fuhlendorf *et al.*, 2017). Independientemente del método seleccionado, el objetivo debe ser disminuir la cobertura a niveles bajos (por ejemplo: < 10% cobertura), no su eliminación de la comunidad.

FIGURA 4. COBERTURA DE CARDILLA (NARANJA OSCURO) Y CARQUEJA (NARANJA CLARO) EN PRIMAVERA SEGÚN MÉTODO DE CONTROL (INTEGRADO, MECÁNICO, QUÍMICO Y TESTIGO SIN CONTROL) DESDE EL AÑO



O AL 6

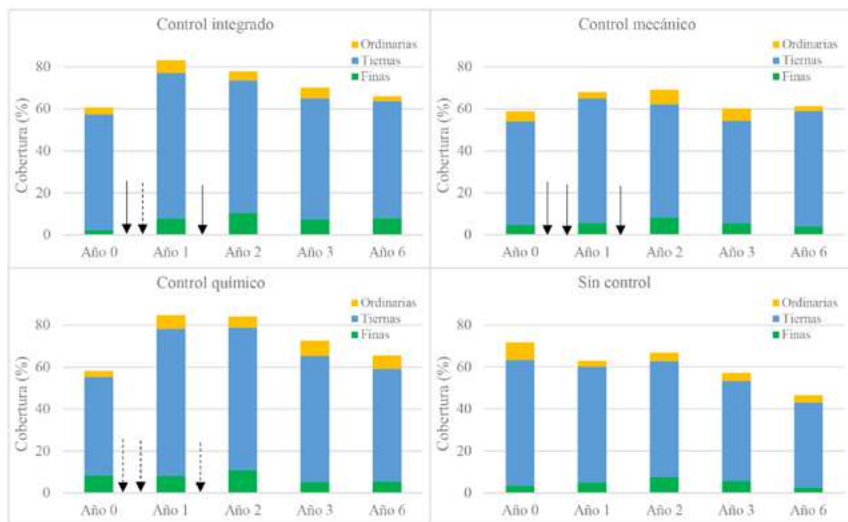
Nota: Los valores corresponden a la cobertura promedio evaluada en primavera. Los controles (flecha) fueron efectuados en tres momentos; primavera año 0 (luego de la primera medición), otoño año 1, y primavera año 1 (luego de la segunda medición). El control mecánico (flecha entera) se realizó con un riel lastrado; el químico (flecha punteada), con máquina de alfombra con 2,4-D + picloram y el control integrado, como la secuencia: mecánico + químico + mecánico.

Fuente: Elaboración propia.

La disminución de la cobertura de malezas de campo fue acompañada por el aumento de la cobertura de gramíneas forrajeras nativas, no existiendo cambios profundos en la proporción de los tipos productivos definidos por Rosengurtt (1979)² (Figura 5).

² Los tipos productivos son una categorización subjetiva que integra la productividad y apetecibilidad de las especies. Las especies finas son las que reúnen mejores condiciones, seguidas por las tiernas y luego las ordinarias.

FIGURA 5. COBERTURA DE GRAMÍNEAS FORRAJERAS FINAS (VERDE), TIERNAS (CELESTE) Y ORDINARIAS (AMARILLO) SEGÚN MÉTODO DE CONTROL (INTEGRADO, MECÁNICO QUÍMICO Y TESTIGO SIN CONTROL) DESDE EL AÑO 0 AL 6



Nota: Los valores corresponden a la cobertura promedio evaluada en primavera. Los controles (flecha) fueron efectuados en tres momentos; primavera año 0 (luego de la primera medición), otoño año 1, y primavera año 1 (luego de la segunda medición). El control mecánico (flecha entera) se realizó con un riel lastrado; el químico (flecha punteada), con máquina de alfombra con 2,4-D + picloram y el control integrado, como la secuencia: mecánico + químico + mecánico.

Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, el resultado productivo del control dependerá en gran medida de la presencia de gramíneas de interés forrajero y de su manejo. Para capitalizar el aumento en los recursos de crecimiento liberados por la muerte de las malezas luego del control, es preciso monitorear y manejar la pastura, mediante el control de la altura, disponibilidad u oferta de forraje, enfocándose principalmente en el estado de las especies forrajeras más valiosas. Por más efectivo que sea el control, no repercutirá en la productividad primaria ni secundaria si se sobrepastorea el primer estrato.

4.2. Sistemas agrícolas

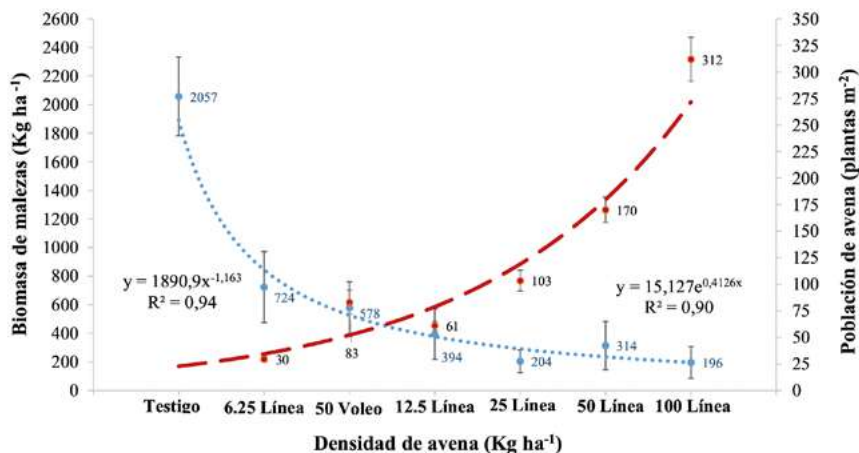
Densidad de siembra de avena negra y control de malezas

La capacidad de los cc de reducir la incidencia de malezas resulta de su habilidad para competir por recursos (luz, agua, nutrientes) e interferir sobre la germinación, el establecimiento y el desarrollo de estas especies eventualmente no deseables. Por lo tanto, la rápida cobertura del suelo por parte del cc es de fundamental importancia para optimizar su efecto sobre el establecimiento y desarrollo de malezas. Uno de los factores que posibilitan un rápido cubrimiento del suelo por el cc es el uso de una óptima densidad de plantas, obtenida a su vez por adecuada densidad de siembra. En los últimos años, el INIA comenzó con el desarrollo de una serie de ensayos que buscan optimizar ciertas variables de los cc para las condiciones de nuestros sistemas de producción, siendo una de ellas la densidad de siembra de avena negra, luego de cosechado el cultivo de verano.

Dentro de cierto rango, es posible obtener mejores índices de implantación de avena negra (plantas m^{-2}) con el incremento de la densidad de siembra (Figura 6). La excepción fue la siembra al voleo que, con una densidad de 50 kg, presentó una implantación similar a las densidades de 12,5 y 25,0 kg en la línea. Por lo tanto, en términos de plantas logradas no es lo mismo realizar la siembra en línea o al voleo, siendo que, en el caso de esta última, debe ser considerada esa menor tasa de implantación. Es importante mencionar también la calidad de la semilla que se debe usar o, en su defecto, contemplar para lograr el número de plantas deseadas. En estos experimentos, los lotes de semillas usados tenían entre 96 y 98% de germinación.

La biomasa de malezas antes de la desecación del cc es una variable muy confiable para determinar la capacidad de supresión de malezas de estos cultivos. Las densidades más altas, 25, 50 y 100 $kg\ ha^{-1}$, lograron reducir la biomasa en 90, 85 y 90%, respectivamente, con respecto al testigo sin cobertura, solo por efecto de la competencia de avena negra (Figura 6). En líneas generales, los tratamientos de mayor densidad de avena restringieron de forma más eficaz el desarrollo de las malezas que los tratamientos con baja densidad o el tratamiento en el que la avena negra fue sembrada al voleo. Es importante resaltar que la comunidad de malezas fue compuesta en su gran mayoría por yerba carnífera, raigrás y gamochaeta (*Gamochaeta* spp.).

FIGURA 6. POBLACIÓN DE AVENA NEGRA LOGRADA (LÍNEA DE RAYAS) Y BIOMASA DE MALEZAS (LÍNEA DE PUNTOS) EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA DEL CC Y TESTIGO SIN CC



Fuente: Jorajuría (2019).

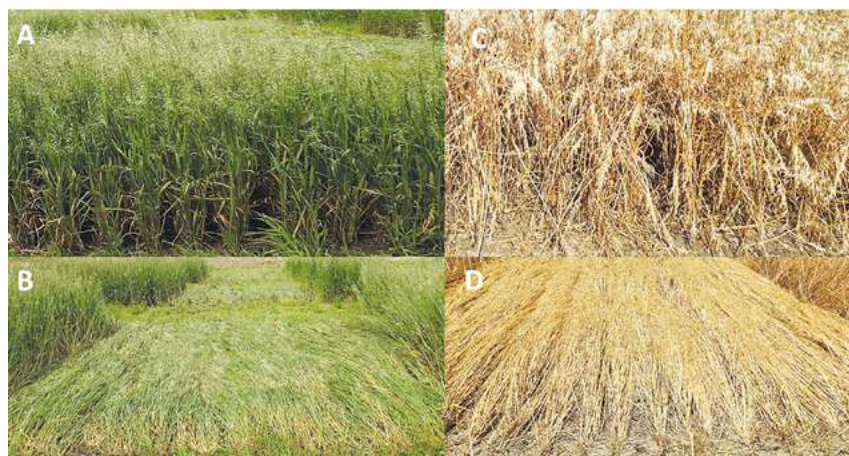
El aumento de la población de avena negra disminuyó la biomasa de malezas, demostrando que la capacidad supresora del cc se correlaciona con la densidad de plantas. Analizando de forma conjunta las dos curvas, biomasa de malezas y población de avena negra, se estima que una densidad de siembra de avena negra en línea de 40 kg ha⁻¹, sembrada luego de la cosecha del cultivo de verano, es capaz de suprimir entre 80 y 90% de la biomasa de malezas (Figura 6). En términos de control de malezas, estos resultados sugieren que la avena negra bien implantada, con una densidad de plantas superior a 160 plantas m⁻², es capaz, solo por su efecto de competencia, de reducir drásticamente la presencia y el desarrollo de malezas durante el invierno (Jorajuría, 2019; Kaspary *et al.*, 2020b).

Rolado como método de terminación en avena negra

El rolado de avena negra fue probado como método alternativo de “desecación” no química, sin uso de herbicida. Para eso, fue usado un rolo con cuchillas (sin filo) de modo que aplastara, pero no cortara el cc. La

avena negra fue rolada en grano lechoso. El rolado se mostró eficiente como método de desecación de la avena negra, logrando matar el CC (Figura 7) y posibilitando la siembra de soja como el cultivo sucesor sin disminución en el número de plantas logradas, en comparación con la desecación química.

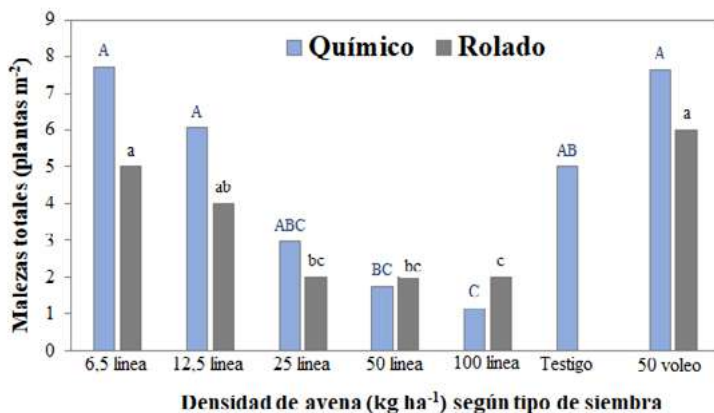
FIGURA 7. AVENA NEGRA (50 kg HA^{-1}) 0 Y 20 DÍAS DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS QUÍMICOS (A Y C) Y ROLADO (B Y D)



Fuente: Kaspary et al. (2020b).

En evaluaciones posteriores, durante la fase inicial de desarrollo del cultivo de soja, los tratamientos de baja densidad de avena negra ($6,5$; $12,5$ y 25 kg ha^{-1}) desecados mediante rolado presentaron, en general, un menor número de malezas con respecto a los desecados con herbicidas (Figura 8). En cuanto que para siembras de 50 y 100 kg ha^{-1} en línea estas diferencias no fueron observadas. Estos resultados sugieren que, a bajas densidades de avena negra, la disposición de rastrojo que genera el rolado limita más la germinación de malezas en primavera en comparación con lo que sucede cuando se deseca químicamente. En este último caso, el rastrojo no queda tan bien distribuido en la superficie del suelo y hay más oportunidades para que llegue luz a los estratos inferiores, permitiendo la germinación de las malezas.

FIGURA 8. DENSIDAD DE MALEZAS EN ETAPAS INICIALES DEL CULTIVO DE SOJA, EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE SIEMBRA DE AVENA Y EL MÉTODO DE DESECACIÓN QUÍMICO O ROLADO.



Nota: Letras distintas difieren significativamente ($p < 0.05$) según el test de Fisher.

Fuente: Jorajuría (2019).

El rolado constituye una alternativa para la desecación de los cc sin uso de herbicidas y reduce la germinación de malezas como yerba carnífera, sin afectar el rendimiento del cultivo posterior. De este modo, la utilización en conjunto de una densidad adecuada de siembra y el rolado constituyen importantes herramientas del manejo integrado de malezas. Por lo tanto, pueden reducir la dependencia de herbicidas y contribuyen a mejorar la sostenibilidad de los sistemas productivos de Uruguay.

5. Nuevas tecnologías y perspectivas

5.1. Uso de *Paspalum notatum* INIA Sepé para el manejo de capín Annoni

El capín Annoni (*Eragrostis plana*) es un pasto invasor originario de África que constituye una amenaza para la sustentabilidad de la ganadería. Se caracteriza por una elevada tasa de crecimiento, bajo valor nutritivo, gran capacidad de competencia y resistencia a condiciones adver-

sas, como suelos pobres y déficits hídricos. Sus principales daños son la reducción de la biodiversidad y del desempeño animal. Esta especie se ha diseminado a gran parte de Uruguay a través de la caminería (MGAP, 2017) y en la zona norte del país es común encontrarlo “porteras adentro”. En virtud de ello, el INIA se ha abocado al diseño de estrategias para su manejo, destacándose como alternativa forrajera promisorio *Paspalum notatum* cv. INIA Sepé. El rol que este cultivar puede tener para recuperar la productividad primaria en comunidades dominadas por capín Annoni es parte de la Red de Evaluación de Forrajes INIA.

5.2. Aplicaciones de precisión para el manejo de malezas

Las aplicaciones de herbicidas para el control de malezas emergidas en el total del área de una chacra son comunes, incluso en escenarios de menos del 20% de cobertura de malezas, provocando que la mayoría del producto no se deposite eficientemente en la planta que se quiere controlar. Esta práctica puede generar impactos ambientales, además de elevar los costos. Actualmente están disponibles sistemas de pulverización de precisión que permiten identificar y asperjar solamente las malezas, reduciendo el uso de herbicidas y el riesgo de selección de malezas con resistencia. El sistema de aplicación de precisión está basado en el uso de sensores que logran diferenciar las plantas fotosintéticamente activas (verdes) de la vegetación muerta o el suelo desnudo, posibilitando la deposición del herbicida principalmente sobre las malezas (Lamb y Brown, 2001). La utilización de estos sensores inteligentes puede reducir el uso de herbicida del 47 hasta el 90% en casos en los que la cobertura verde que se requiere controlar no es homogénea (Ahrens, 1994; Fischer *et al.*, 2020). En este escenario, se están desarrollando en el INIA los primeros ensayos con utilización de sensores en aplicaciones de precisión, buscando adecuar la tecnología a la realidad de los sistemas productivos uruguayos. Se espera que en el corto a mediano plazo estos sensores y, por lo tanto, la aplicación inteligente no solo se basen en la detección de vegetación viva, sino que también logren diferenciar entre el cultivo y las malezas y solo apliquen herbicida donde detecte a estas últimas. Incluso, ya hay robots comerciales que funcionan de esta manera, aunque no se prevé su adopción masiva para el control de malezas en el corto plazo. Por ende, usar en forma criteriosa y eficiente los herbicidas sigue siendo una de las principales prioridades de la investigación en esta disciplina.

También se encuentra en pleno desarrollo la utilización de drones para reconocimiento y mapeo de malezas. Esto permitiría llevar en las chacras mejores registros de la localización y evolución de los enmalezamientos, favoreciendo aplicaciones más precisas y eficientes, y una estrategia de manejo más proactiva.

El desarrollo y la adopción de estas y otras herramientas modernas y su uso de manera sinérgica y/o complementaria a las descritas en esta publicación constituyen una gran oportunidad para mejorar el manejo de malezas y, simultáneamente, disminuir la cantidad aplicada de herbicidas, contribuyendo significativamente a la sostenibilidad ambiental y productiva de los sistemas agropecuarios de nuestro país.

Bibliografía

Ahrens, W. H.

(1994), "Relative costs of a weed-activated versus conventional sprayer in Northern Great Plains Fallow", en *Weed Technology*, 8(1), pp. 50-57.

Altesor, A., Ferrón, M., Gallego, F., López-Mársico, L. et al.

(2019), "¿Pastizales degradados o conservados? Una descripción objetiva de la heterogeneidad generada por el manejo ganadero.", en Altesor, A. et al. (eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II*, Serie FPTA 69, INIA, Montevideo, pp. 51-72.

Baeza, S. y Paruelo, J. M.

(2020), "Land use/land cover change (2000–2014) in the Rio de la Plata Grasslands: an analysis based on MODIS NDVI time series", en *Remote Sensing*, 12(3), p. 381. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/rs12030381>>.

Balbinot Jr., A. A., Moraes, A. y Backes, R.L.

(2007), "Efeito de coberturas de inverno e sua época de manejo sobre a infestação de plantas daninhas na cultura de milho", en *Planta Daninha*, 25, pp. 473-480.

Blaix, C., Moonen, A. C., Dostatny, D. F., Izquierdo, J., Le Corff, J. Morrison, J., Von Redwitz, C., Schumacher, M. y Westerman, P. R.

(2018), "Quantification of regulating ecosystem services provided by weeds in annual cropping systems using a systematic map approach", en *Weed Research*, 58(3), pp. 151-164.

Carámbula, M. Ayala, W., Bermúdez, R. y Carriquiry, E.

(1995), *Control de cardilla*, Serie Técnica 57, INIA, Montevideo.

Creamer, N. G. y Dabney, S. M.

(2002), "Killing cover crops mechanically: Review of recent literature and assessment of new research results", en *American Journal of Alternative Agriculture*, 17, pp. 32-40.

Curran, W. y Ryan, M.

(2010), *Cover crop rollers for northeastern grain production*, Penn State University y S. Mirsky, USDA-ARS. Disponible en: <Roller-Cover-Crops-NE-Grain-Production-Curran-PennState-2010.pdf (rutgers.edu)>. [Consulta: 8 de febrero de 2021].

Félix, E. y Urioste, S.

(2016), *Primer reporte de resistencia a glifosato en poblaciones de Lolium multiflorum Lam en Uruguay y susceptibilidad de estas a herbicidas inhibidores de la ACCasa*, Tesis Ing. Agr., Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Montevideo, 43 pp.

Fischer, J. W., Thorne, M. y Lyon, D.

(2020), “Weed-sensing technology modifies fallow control of rush skeletonweed (*Chondrilla juncea*)”, en *Weed Technology*, 34(6), pp. 857-862.

Formoso, D. y Martínez, M.

(2012), “Control de malezas de campo sucio”, en *Revista Instituto Plan Agropecuario*, 141, pp. 48-50.

Fuhlendorf, S. D., Fynn, R. W., McGranahan, D. A. y Twidwell, D.

(2017), “Heterogeneity as the basis for rangeland management”, en Briske, D. (ed.), *Rangeland systems. Springer series on environmental management*, Springer, Cham, pp. 169-196.

García, A.

(2007), “Efecto del manejo del pastoreo sobre la dinámica poblacional de malezas de campo sucio”, en Ayala, W. y Saravia, H. (eds.), *Seminario de actualización técnica en manejo y control de malezas de campo sucio*, Serie técnica 164, INIA, Montevideo, pp. 7-14.

Harrington, K. C. y Ghanizadeh, H.

(2017), “Herbicide application using wiper applicators. A review”, en *Crop Protection*, 102, pp. 56-62.

Heady, H. F. y Child, R. D.

(1994), *Rangeland Ecology and Management*, Westview Press, Boulder (Colorado, EE. UU.), 520 pp.

Heap, I.

(2021), “Resistance weed by species” (en línea). s.l., International Survey of Herbicide Resistant Weeds. s.p. Disponible en: <<http://www.weedscience.org/>> [Consulta: 8 de febrero de 2021].

Hoffman, E. et al.

(2010), “Manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay. Propuesta para el manejo del nitrógeno en cultivos de invierno en Uruguay”, en *Informaciones Agronómicas*, 46, pp. 13-18.

Jaurena, M. et al.

(2018), “La regla verde: una herramienta para el manejo de campo natural”, *Revista INIA Uruguay*, 58, pp. 26-29.

Jaurena, M., Durante, M., Devincenzi, T. et al.

(2021), “Native grasslands at the core: a new paradigm of intensification for the campos of southern south America to increase economic and environmental sustainability”, en *Frontiers in Sustainable Food Systems*. Disponible en: <<https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.547834>>.

Jorajuría, N. P.

(2019), *Efecto de la densidad de avena (Avena strigosa) y el rolado como método de desecación sobre el control de malezas y el rendimiento de soja*. Tesis Ing. Agr. Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Montevideo, 50 pp.

Kaspary, T. E., García, A., Marques, S., Cabrera, M., García, E. y García, R.

(2020a), “Identificación de ocurrencia y manejo de yuyos colorados (*Amaranthus* spp.) resistentes a herbicidas en Uruguay”, en *Revista INIA Uruguay*, 62, pp. 50-54.

Kaspary, T. E., García, A., Jorajuría, P. y Cabrera, M.

(2020b), “Uso de avena negra y rolado en el manejo de malezas”, en *Revista INIA Uruguay*, 61, pp. 47-51.

Lallana, V. H.

(2007), “Ecofisiología de la cardilla (*Eryngium horridum* Malme)”, en *Seminario de actualización técnica en manejo de malezas* (2007, Young, Uruguay), Serie de actividades de difusión 489, INIA, pp. 79-106.

Lamb, D. W. y Brown, R. B.

(2001), “Remote-sensing and mapping of weeds in crops”, en *Research in Agricultural Engineering*, 78, pp. 117-125.

Lezama, F., Pereira, M., Altesor, A. y Paruelo, J. M.

(2019), “¿Cuán heterogéneos son los pastizales naturales en Uruguay?”, en Altesor, A. et al. (eds.), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II*, Serie FPTA 69, INIA, Montevideo, pp. 15-26.

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP)

(2017), “Relevamiento capim Annoni: situación actual”. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-05/relevamiento_2017_de_capin_annoni_compressed_compressed.pdf> [Consulta: 8 de febrero de 2021].

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP)

(2020), “Importaciones de productos fitosanitarios 2019”. Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/datos/importaciones-productos-fitosanitarios>>. [Consulta: 8 de febrero de 2021].

Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP)

(2021), Encuesta agrícola “Primavera 2020”. Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/diea-presenta-resultados-encuesta-agricola-primavera-2020>>. [Consulta: 26 de junio de 2021].

Pallarés, O. R., Berretta, E. J. y Maraschin, G. E.

(2005), “The south American campos ecosystem”, en Suttie, J. M. *et al.* (eds.), *Grasslands of the world*, FAO, Roma, pp. 171-219.

Pellegrini, L., Nabinger, C. de Faccio CarvalhoII, P. C. y Neumann, M.

(2007), “Diferentes métodos de controle de plantas indesejáveis em pastagem nativa”, en *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36(5), pp. 1247-1254.

Quiñones, A., Lattanzi, F., Saldain, N. y Lezama, F.

(2020), “Weed control in natural grasslands: a case study using a perennial native forb from the South American *Campos*”, en *Austral Ecology*, 45(7), pp. 909-920.

Radosevich, S., Holt, J. S. y Ghersa, C. M.

(2007), *Ecology of weeds and invasive plants: relationship to agriculture and natural resource management*, Wiley, Nueva York, 3ª ed., 589 pp.

Ríos, A.

(2007), “Control posicional de cardilla (*Eryngium horridum*) en campo sucio”, en Ayala, W. y Saravia, H. (eds.), *Seminario de actualización técnica en manejo y control de malezas de campo sucio*, Serie Técnica 164, INIA, Montevideo, pp. 35-47.

Ríos A. *et al.*

(2013), “Prevención de la resistencia de Raigrass anual (*Lolium multiflorum* LAM) y Yerba Carnicera (*Conyza bonariensis* L.) en Uruguay”, en Ríos, A. (ed.), *Viabilidad del glifosato en sistemas productivos sustentables*, Serie Técnica 204, INIA, Montevideo, pp. 83-97.

Rosengurtt, B.

(1979), *Tablas de comportamiento de las especies de plantas de campos naturales en el Uruguay*, División Publicaciones y Ediciones, Montevideo, 86 pp.

Sawchik, J., Siri, G., Ayala, W., Barrios, E. *et al.*

(2015), “El sistema agrícola bajo amenaza: ¿qué aportan los cultivos de cobertura y/o las pasturas cortas?”, en IV Simposio Nacional de Agricultura, Paysandú, Trabajos presentados, Paysandú, Uruguay, casa editora, pp. 150-168.

Sheley, R. L., Mangold, J. M. y Anderson., J. L.

(2006), “Potential for successional theory to guide restoration of invasive-plant-dominated rangeland”, *Ecological Monographs*, 76, pp. 365-379.

Tuduri, A. y Uval, N.

(2019), “Denuncias ante MGAP por uso incorrecto de agroquímicos crecieron desde 2013”, en *La diaria*. Disponible en: <<https://ladiaria.com.uy/rioabierto/articulo/2019/2/denuncias-ante-mgap-por-uso-incorrecto-de-agroquimicos-crecieron-desde-2013/>>. [Consulta: 26 de junio de 2021].

WSSA (Weed Science Society of America)

(1956), *Terminology Committee Report-WSSA*, Weeds, 4, pp. 278-287.

Segunda sección
La agroecología y el manejo sustentable
de los recursos naturales en los sistemas
agropecuarios

Editora: Verónica Ciganda

Introducción

Tecnología aplicada a los recursos naturales y al cuidado del ambiente

Verónica Ciganda

Las líneas de trabajo e investigación del INIA, orientadas al aumento de la productividad de los distintos sistemas y rubros de producción, han incorporado históricamente la mejora de la eficiencia en el uso de los recursos naturales y de su preservación como uno de los ejes centrales. Si bien el uso del término “agroecología” se remonta a los años 70, es relativamente novedosa su inserción en los planes de trabajo de INIA. Más allá de los términos, las bases teóricas y los conceptos clave asociados a la agroecología han sido frecuentemente incluidos, con énfasis variables, y han formado parte del desarrollo de las líneas de investigación de INIA.

La FAO ha planteado en 2018 diez elementos de la agroecología a fin de brindar orientaciones a los países para que transformen sus sistemas agrícolas y alimentarios, integren la agricultura sostenible a gran escala y contribuyan al logro de varios de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). Estos diez elementos recopilados por la FAO están interrelacionados y son interdependientes, y se los propone como una herramienta analítica que puede ayudar a los países a poner en práctica la agroecología. Entre ellos, y en línea con el marco de esta sección del libro, se destacan la diversidad productiva, la coinnovación agrícola, las sinergias de los sistemas alimentarios, la eficiencia de utilización de los recursos, el reciclaje y la resiliencia de los ecosistemas para lograr sistemas de agricultura sostenible. A su vez, dentro de esta sección se contemplan varias de las dimensiones planteadas por Garibaldi *et al.* (2019), entre las que se destacan la promoción de la diversidad específica aérea y subterránea, el mantener o restaurar áreas naturales o seminaturales, la protección y el uso eficiente de los recursos naturales, y el aumento de la oferta de

servicios ecosistémicos, la reducción de aplicaciones de productos sintéticos, así como la perspectiva de una sola salud.

En particular, esta sección se focaliza en temáticas relacionadas con la biodiversidad, el secuestro de carbono en el suelo, los servicios ecosistémicos, la eficiencia en el uso del agua, la importancia de los bioinsumos y la fijación biológica de nitrógeno, así como prácticas de manejo agropecuario que favorecen la transición hacia la agroecología.

El suelo, en especial por su capacidad de acumular carbono (C), es clave para la sostenibilidad productiva. Procesos de intensificación ecológica que aumentan o mantienen los contenidos de carbono orgánico en el suelo tienden a maximizar la disponibilidad y eficiencia en el uso de nutrientes, promueven el reciclaje interno de estos y favorece la retención de agua. Esto permite minimizar la dependencia de fertilizantes sintéticos y mejora la eficiencia en el uso del agua. Una práctica de manejo, ampliamente difundida hoy, que permite conservar y aumentar el almacenaje de C en el suelo es la siembra directa de cultivos y pasturas. Esta práctica permite reducir las pérdidas de carbono por erosión y descomposición, y la utilización de cultivos de cobertura que mejoran el balance de carbono, no solo reduciendo su pérdida, sino también aumentando su ingreso al suelo. Los diversos experimentos de largo plazo instalados en el INIA, en distintos momentos a partir del año 1963 y con diversos objetivos, han permitido conocer cuantitativamente los cambios ocurridos en el suelo como respuesta al gradiente de sostenibilidad productiva de los sistemas evaluados. Claramente, los sistemas de rotación de cultivos y pasturas han mostrado ser prácticas de manejo agronómico con un impacto directo y positivo en la conservación de las características físicas, químicas y biológicas del recurso suelo, las cuales afectan directamente su sostenibilidad y capacidad productiva (Díaz *et al.*, 2009).

El uso eficiente del agua en el sector agropecuario es un factor clave para mejorar la sostenibilidad y la estabilidad de la producción. En este sentido, el desarrollo de tecnologías para un adecuado manejo del agua, asociado al manejo del suelo, es un factor crucial para incrementar la producción sostenible de alimentos. La búsqueda de la maximización de la eficiencia del uso del agua es de importancia central y atraviesa todas las escalas que afectan al sistema de producción: desde la cuenca, la subcuenca, el predio y la chacra. Mayor aprovechamiento y eficiencia en el uso del agua aportan directamente a la generación de trayectorias agroecológicas. El manejo agronómico del cultivo o de la pastura para alcanzar los rendimientos potenciales contribuye directamente a hacer

un uso más eficiente del agua, ya sea aprovechando al máximo la precipitación, o el agua aplicada (García y Otero, 2020). Al mismo tiempo, la cuantificación de la disponibilidad de agua del sistema para riego, el cálculo de la superficie del cultivo o de la pastura a regar, la definición de la lámina de agua y la selección de un adecuado sistema de riego a utilizar, así como el momento de aplicación, son todas variables críticas que contribuyen directamente al uso eficiente de los recursos naturales y en las cuales el INIA viene trabajando para su correcta definición en las diversas situaciones productivas.

Las trayectorias agroecológicas de nuestros sistemas de producción agropecuaria requieren de una gradual independencia de la utilización de productos químicos, como los fitosanitarios y los fertilizantes sintéticos. En este sentido, el conocimiento sobre la estructura y la función de las comunidades microbianas de la rizósfera y del suelo y los microorganismos endófitos y simbioses (el microbioma) ha permitido el desarrollo de tecnologías que promueven el papel del microbioma en la nutrición y la sanidad de las plantas (Altier *et al.*, 2013b; Trivedi *et al.*, 2021). El microbioma interviene en diversos procesos ecosistémicos importantes y determinantes de la salud y la productividad de los cultivos. Por lo tanto, las prácticas agronómicas que tienen en cuenta el funcionamiento del microbioma y utilizan las tecnologías desarrolladas sobre la base de microorganismos benéficos claramente favorecen las trayectorias agroecológicas y mejoran la producción, la calidad y la salud de las plantas, así como las características biológicas del suelo y el ambiente. En el INIA, a partir del 2006 se viene trabajando en líneas de investigación que apuntan a hacer disponibles tecnologías basadas en los bioinsumos; por ejemplo, se han desarrollado cepas de bacterias solubilizadoras de fósforo del suelo, aumentando su disponibilidad para la planta, así como biofungicidas y bioplaguicidas. A su vez, la fijación biológica de nitrógeno del aire por bacterias específicas (*Rhizobium* sp.) para cada cultivo de leguminosas, lograda a través de la práctica de inoculación de la semilla y consecuente formación de nódulos radiculares, es ampliamente utilizada en nuestro país, a la vez que las cepas se encuentran en permanente mejora y cuidado en las instalaciones del INIA.

El desarrollo de alternativas de uso sostenible del territorio necesita del conocimiento de la estructura y del funcionamiento de los ecosistemas. Esto incluye una adecuada cuantificación de su diversidad. Al mismo tiempo, la gestión sostenible del territorio requiere de herramientas e indicadores que, con costos y plazos razonables, cuantifiquen el desem-

peño ambiental en línea con una transición agroecológica. En este sentido, diversos trabajos de investigación del INIA han llevado al desarrollo de índices que permiten cuantificar los efectos del sistema de producción sobre distintos aspectos de la estructura y el funcionamiento del ecosistema. El Índice de Integridad Ecosistémica (Blumetto *et al.*, 2019), descrito en detalle en uno de los capítulos de esta sección, integra distintos indicadores para interpretar el estado y el funcionamiento del agroecosistema, comparándolo con situaciones de referencia en una ecorregión.

Los pastizales naturales son un hábitat amenazado, tanto por la expansión de la agricultura y la forestación como por la degradación. Las trayectorias agroecológicas en sistemas ganaderos que se basan en el uso del campo natural deben apoyarse en la evaluación de su estado de conservación y en la incorporación de prácticas de manejo que minimicen los procesos de deterioro y/o promuevan la restauración, preserven la oferta de servicios ecosistémicos y favorezcan la biodiversidad. En este sentido, diversos proyectos financiados por el INIA han contribuido al desarrollo de herramientas tecnológicas que permiten reconocer, mapear y manejar los distintos tipos de pastizales naturales del Uruguay (Lezama *et al.*, 2019) así como sistematizar la caracterización del estado de conservación de los hábitats naturales (Altesor *et al.*, 2019).

Es importante destacar, además, los aportes que el INIA ha hecho a las trayectorias agroecológicas de los sistemas de producción a través de la coinnovación (Altesor *et al.*, 2019), posicionando al productor como centro y referente del trayecto hacia la agroecología.

Referencias

- Altesor, A., Gallego, F., Ferrón, M., Pezzani, F., López-Mársico, L., Lezama, F., Baeza, S., Pereira, M., Costa, B. y Paruelo, J. M.** (2019a), “An inductive approach to build State-and-Transition Models for Uruguayan grasslands”, en *Rangeland Ecology & Management*, 72, pp.1005-1016. <<https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.06.004>>.
- Altier, N., France, A., Correa de Mello, S., Peticari, A. y Rodríguez, P.** (2013b), *Documento Base: Recursos Microbianos*. Procisur, IICA. 35 pp. Disponible en: <http://www.procisur.org.uy/adjuntos/procisur_libro-microbianos_e3b.pdf>.
- Blumetto, O., Castagna, A., Cardozo, G., García, F., Tiscornia, G., Ruggia, A., Scarlato, S., Albicette, M., Aguerre, V. y Albin, A.** (2019), *Ecosystem Integrity Index, an innovative environmental evaluation tool for agricultural production systems Ecological Indicators*, vol. 101, pp. 725-733.

Díaz, R., Quincke, A., Morón, A., Sawchik, J., Ibáñez, V. y Balzarini, M. (2009), “Efecto de la degradación del carbono orgánico del suelo en la productividad potencial de los cultivos”, en Morón, A. (coord.), *Efectos de la agricultura, la lechería y la ganadería en el recurso natural suelo: impactos y propuestas: resúmenes expandidos*, Serie Actividades de Difusión 587, INIA, Montevideo.

García, C. y Otero, O.

(2020), “¿Es una alternativa la utilización de riego en el sistema agropecuario de Uruguay?”, en Rodrigues L. N. y Zaccaria, D. (eds.), *Agricultura irrigada Um breve olh*, Inovagri, Fortaleza (CE Brasil), pp. 132-137.

Garibaldi, L. A., Pérez-Méndez, N., Garratt, M. P. D., Gemmill Herren, B., Míguez, F. E. y Dicks, L. V.

(2019), “Policies for ecological intensification of crop production”, en *Trends in Ecology & Evolution*, 34 (4). pp. 282-286. ISSN 0169-5347. Disponible en: <doi:https://doi.org/10.1016/j.tree.2019.01.003>.

Lezama, F., Pereira, M., Altesor, A. y Paruelo, J. M.,

(2019), “Grasslands of Uruguay: classification based on vegetation plots”, en *Phytocoenologia*. Disponible en: <https://doi.org/10.1127/phyto/2019/0215>.

Trivedi, P., Mattupalli, C., Eversole, K. y Leach, J. E.

(2021), “Enabling sustainable agriculture through understanding and enhancement of microbiomes”, *New Phytol*, 230, pp. 2129-2147. <https://doi.org/10.1111/nph.17319>.

Capítulo 7

Tecnología de inoculantes rizobianos y aporte de nitrógeno proveniente de la atmósfera a los sistemas de producción

Elena Beyhaut, Eduardo Abreo, Claudia Barlocco,
Valeria Larnaudie y Nora Altier

1. Introducción

El nitrógeno (N) es el nutriente de mayor demanda a nivel mundial y su condición de limitante es manejada en la agricultura moderna mediante el uso de fertilizantes nitrogenados producidos por síntesis química. Si bien el uso de fertilizantes nitrogenados incrementa la productividad, tiene impactos negativos en el ambiente. Como alternativa al uso de fertilizantes, la fijación biológica de nitrógeno (FBN), mediada por la asociación de mutuo beneficio entre leguminosas y rizobios, es capaz de aportar 175 millones de toneladas de N por año (Paul, 1988), aproximadamente el 50% de todo el nitrógeno usado en la agricultura a nivel global. Los rizobios son bacterias edáficas pertenecientes al *phylum* Proteobacterias, capaces de promover el desarrollo de nódulos en las raíces de las leguminosas. Mediante esta asociación simbiótica específica, ambos socios, leguminosas y rizobios, interactúan de manera finamente coordinada para que el nitrógeno gas (N_2), constituyente mayoritario de la atmósfera, sea transformado en formas químicas que las plantas pueden absorber. La FBN no solamente evita la contaminación de las aguas, sino que también reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contribuye a la conservación de la biodiversidad. En Uruguay, el uso agropecuario de la FBN está enmarcado en una política de Estado desde la década de 1960.

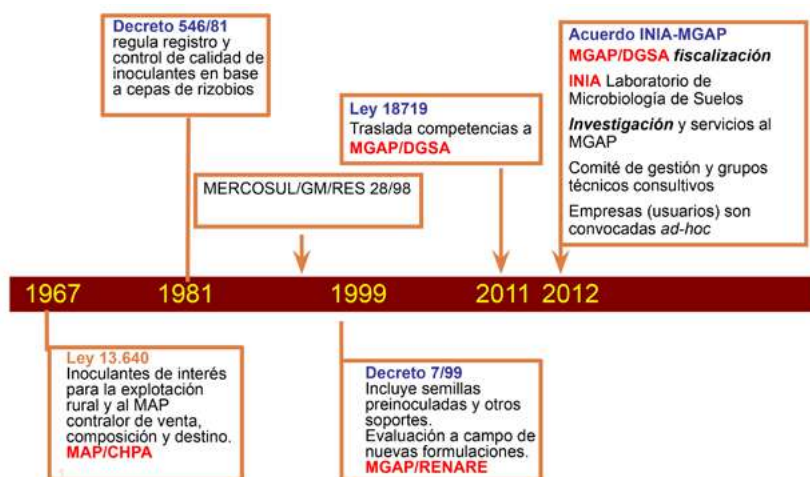
El nitrógeno que ingresa a los sistemas de producción por la vía de la FBN en Uruguay puede valuarse en torno de 400 millones de dólares cada año. Esta estimación se basa en que, por un lado, en nuestras condicio-

nes las leguminosas forrajeras derivan más del 80% de su N de la atmósfera y fijan aproximadamente 30 kilos de nitrógeno por tonelada de materia seca producida (Danso *et al.*, 1988; Danso y Curbelo, 1991). Por otro lado, el cultivo de soja requiere 80 kilos de nitrógeno por cada tonelada de grano producido y no menos del 50% es provisto por la FBN (Salvagiotti *et al.*, 2008). Por último, es razonable estimar que, del fertilizante nitrogenado que se aplica a los sistemas de producción, el 50% acaba fuera de estos y no es absorbido por los cultivos (Dobermann y Cassman, 2005). Combinando estas cifras, y sobre la base de algunos supuestos relativos a los precios, se llega a la estimación del orden mencionado. Son divisas que el país ahorra, pero, además, por ser una tecnología amigable para el ambiente, la FBN es una pieza clave para la producción sostenible (Peoples y Craswell, 1992; Hungría *et al.*, 2006) y para la transición hacia producciones agroecológicas.

2. Fijación biológica de nitrógeno a escala país: una política de Estado

En 1967 se estipuló por ley que los inoculantes eran de interés para la explotación rural (Figura 1), otorgando al Ministerio de Agricultura y Pesca (así denominado en la época) potestades de contralor de la venta, composición y destino de estos. Más adelante se implementó el Sistema Nacional de Registro y Control de Calidad de Inoculantes, marcando el inicio de un trabajo coordinado entre el Sector Público y el Sector Privado que continúa hasta nuestros días, dando el contexto para el desarrollo y la producción nacional de inoculantes de alta calidad (Altier *et al.*, 2013). Desde entonces, los inoculantes han tenido amplia adopción por parte del sector productivo, y el éxito de esta biotecnología ha traído aparejados importantes beneficios económicos y ambientales para el país por más de cinco décadas. Los inoculantes formulados en base a rizobios para leguminosas cumplen con exigencias legales, entre ellas la identidad de la/s cepa/s, la concentración de células vivas y la ausencia total de contaminantes. Junto con los inoculantes tradicionales basados en turba estéril finamente molida y las formulaciones líquidas, la legislación incluye a las semillas preinoculadas. En estas, las exigencias para el registro enfatizan el recuento de rizobios vivos sobre la semilla y su capacidad para producir una nodulación satisfactoria en función del tiempo.

FIGURA 1. CRONOLOGÍA Y EVOLUCIÓN DEL SISTEMA NACIONAL DE REGISTRO Y CONTROL DE CALIDAD DE INOCULANTES

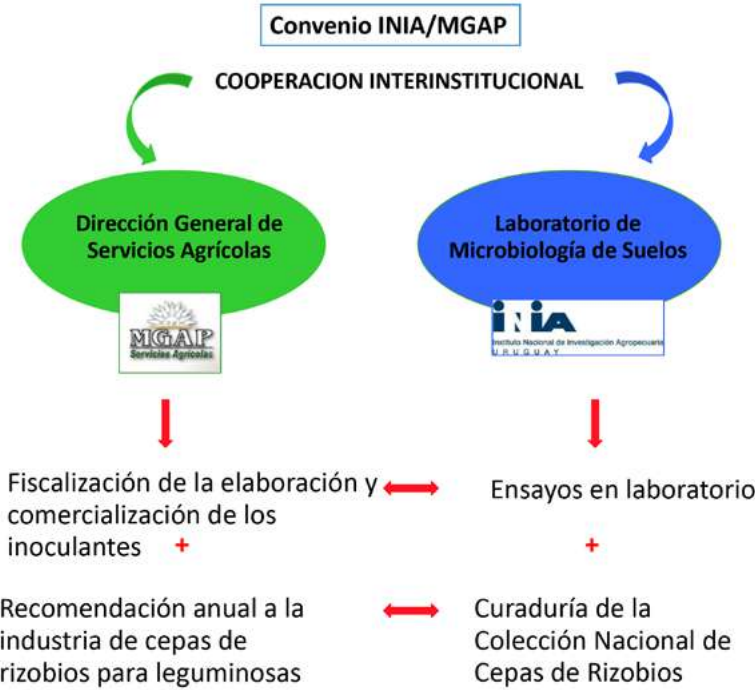


Fuente: Elaboración propia.

A partir del convenio firmado en el año 2012, el INIA y el MGAP acordaron combinar capacidades para dar continuidad al Sistema Nacional de Registro y Control de Calidad de Inoculantes (Figura 2). Mediante este acuerdo, el MGAP continúa con la recomendación oficial de cepas, la fiscalización de la elaboración y la comercialización de los inoculantes, y el INIA proporciona los servicios de análisis de los mismos y realiza la curaduría de la Colección Nacional de Cepas de Rizobios –ingresada en la base de datos de la World Federation for Culture Collections (WFCC)–, destacándose que es la primera colección de Uruguay en ser indexada. El INIA, a su vez, suministra cada año las cepas a las empresas fabricantes de inoculantes (Barlocco *et al.*, 2014; Barlocco *et al.*, 2015) y cumple con el cometido de valorizar y ampliar la colección, así como contribuir a la identificación de cepas eficientes para nuevas leguminosas de interés agronómico y llevar adelante investigación científica sobre FBN. Mediante una plataforma web compartida por ambas instituciones y las empresas registradas, los resultados de los análisis quedan rápidamente disponibles para las partes interesadas. Asimismo, allí se accede al listado de bioinsumos registrados y de los lotes autorizados para la venta, así como

a protocolos, formularios y comunicados oficiales. En la Tabla 1 se listan las cepas recomendadas oficialmente para la formulación de inoculantes comerciales de las leguminosas de interés agronómico.

FIGURA 2. ESQUEMA DE COOPERACIÓN INTERINSTITUCIONAL INIA-MGAP (INICIALMENTE MAP)



Fuente: Elaboración propia.

TABLA 1. CEPAS DE RIZOBIOS RECOMENDADAS OFICIALMENTE POR EL MGAP PARA LA FORMULACIÓN DE INOCULANTES

Huésped	Código	Especie de rizobio	Otras designaciones
<i>Medicago sativa</i>	U-143	<i>Sinorhizobium meliloti</i>	MCH3
<i>Trifolium pratense</i> , <i>T. repens</i> , <i>T. subterraneum</i> , <i>T. incarnatum</i>	U-204	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. trifolii</i>	U-28
<i>Trifolium alexandrinum</i>	U-206	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. trifolii</i>	NA 120
<i>Trifolium vesiculosum</i>	U-276	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. trifolii</i>	TAC 8
<i>Trifolium fragiferum</i>	U-262	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. trifolii</i>	SEMIA 235
<i>Trifolium balansae</i>	U-2082	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. trifolii</i>	TBal
<i>Ornithopus compressus</i> , <i>O. sativus</i>	U-612 + U-620	<i>Bradyrhizobium</i> <i>sp.</i>	OR 1 + CAL 22
<i>Vicia sativa</i> , <i>V. villosa</i>	U-344	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. viceae</i>	WSM 1131
<i>Lotononis bainesii</i>	U-1205	<i>Methylobacterium</i> <i>sp.</i>	XCT 16
<i>Lotus corniculatus</i> , <i>L. glaber</i>	U-510	<i>Mesorhizobium huakuii</i>	U-226
<i>Lotus subbiflorus</i>	U-531	<i>Mesorhizobium loti</i>	NC3
<i>Lotus uliginosus</i>	U-1401	<i>Bradyrhizobium loti</i>	NZP 2309
<i>Pisum sativum</i>	U-315	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. viceae</i>	SEMIA 335
<i>Phaseolus vulgaris</i>	U-808 + U-809	<i>Rhizobium tropici</i>	SEMIA 4077 + SEMIA 4080
<i>Glycine max</i>	U-1301 + U-1302	<i>Bradyrhizobium elkanii</i>	SEMIA 587 + SEMIA 5019
<i>Trifolium resupinatum</i>	U-223	<i>Rhizobium leguminosarum</i> <i>bv. trifolii</i>	NA 146

Fuente: Elaboración propia.

3. Tecnologías de inoculación, fijación de nitrógeno y estrategia de investigación

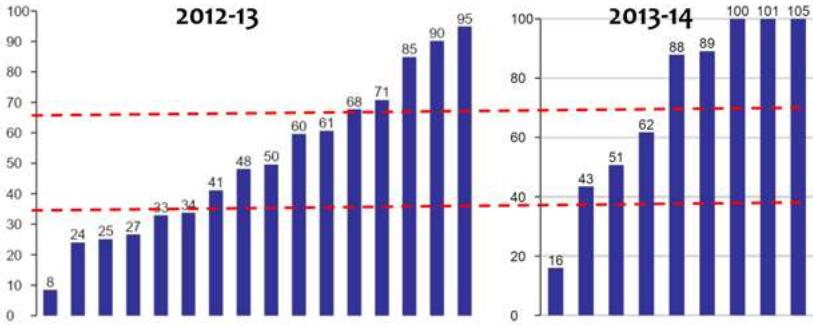
La plataforma de bioinsumos del INIA lleva adelante una línea de investigación que tiene como objetivo la maximización de la FBN en el cultivo de soja. Las preguntas de investigación son:

1. ¿La expresión agronómica de la FBN en chacras comerciales es la máxima alcanzable?
2. ¿Es posible seleccionar cepas más eficientes, competitivas y persistentes que las que se recomiendan actualmente?
3. ¿Los agroquímicos aplicados sobre las semillas (curasemillas) son compatibles con los rizobios o tienen efectos deletéreos significativos sobre estos?
4. ¿Existe variabilidad genética respecto de la habilidad para la FBN en las líneas avanzadas del programa de mejoramiento de soja del INIA, y es posible encontrar marcadores moleculares para esta característica?

Respondiendo a la primera pregunta sobre la expresión agronómica de la simbiosis en predios comerciales, la Figura 3 muestra que la propor-

ción de N que el cultivo de soja obtiene de la atmósfera –una estimación de la eficiencia de la simbiosis– se distribuye en un amplio rango en los distintos sitios estudiados durante los años 2012-2014 (Beyhaut *et al.*, 2015). Se observó una asociación negativa entre la proporción de N derivado de la atmósfera y el N potencialmente mineralizable de los suelos, y se puso en evidencia la necesidad de estudios en mayor profundidad –los promedios no son suficientemente informativos– para generar nuevas hipótesis en relación con las tecnologías de aplicación de los inoculantes, incluidas preinoculación e inoculación por encargo (o a pedido).

FIGURA 3. ESTIMACIONES DE NITRÓGENO DERIVADO DE LA ATMÓSFERA (%) EN SITIOS COMERCIALES INOCULADOS CON *BRADYRHIZOBIUM ELKANII* CEPAS U1301 Y U1302



Nota: Izquierda = 25 sitios en la zafra 2012-2013; derecha = 9 sitios comerciales en la zafra 2013-2014.

Fuente: Elaboración propia.

Con relación a la eficiencia y competitividad de las cepas para soja y la posibilidad de obtener cepas con mejor desempeño, la evaluación en condiciones estériles de parámetros de nodulación –número de nódulos (NN) y peso seco de nódulos (PSN)– mostró que el PSN de plantas inoculadas con la recomendación oficial de las cepas U1301 y U1302 fue estadísticamente igual al PSN de plantas inoculadas con cada una de las cinco cepas naturalizadas CL2, SO1, CA1, CA2 y CL1. En el mismo experimento se evaluaron parámetros de biomasa de planta, entre ellos el peso seco de la parte aérea (PSPA). De manera similar a lo ocurrido con los parámetros de nodulación, el PSPA del tratamiento inoculado con la

mezcla de U1301 y U1302 estuvo entre los más altos, y fue estadísticamente igual al PSPA de las plantas inoculadas con cada una de las cuatro cepas naturalizadas de *B. elkanii* CA1, SO1, CL1 y CL2 (Lagurara, 2018, Rodríguez, 2020). A partir de esa evaluación en condiciones estériles, se corroboró el buen desempeño de la actual recomendación de cepas y se seleccionaron preliminarmente cepas altamente eficientes que habían sido aisladas de suelos de Uruguay. Con posterioridad, con las cepas promisorias se realizó un experimento similar en macetas con suelo con alta carga de rizobios capaces de nodular soja, para estudiar la capacidad de competir de las cepas y su adaptación a condiciones más parecidas al ambiente edáfico natural. La Tabla 2 presenta los valores indicativos de la eficiencia simbiótica de las cepas mediante la diferencia de contenido del isótopo ^{15}N en la planta respecto del contenido de ^{15}N en la atmósfera ($\delta^{15}\text{N}_{\text{aire}}$). Los $\delta^{15}\text{N}_{\text{aire}}$ de mayor valor absoluto y signo negativo indican mayor eficiencia simbiótica. Los tratamientos inoculados que mostraron mayor proporción de N proveniente de la atmósfera en relación con los controles sin inocular (con y sin N agregado, CN y SN) fueron: U1301 + U1302, las cepas naturalizadas CL1, CA1 y CL2 de *B. elkanii*, la cepa *Bradyrhizobium* sp. CA2 y la cepa *B. japonicum* SJ1.

TABLA 2. DIFERENCIA DE ^{15}N RESPECTO DEL AIRE ($\delta^{15}\text{N}_{\text{AIRE}}$) Y NITRÓGENO TOTAL EN PARTE AÉREA (NTPA), DE PLANTAS DE SOJA CRECIDAS EN INVERNÁCULO CON SUELO: ARENA (1:2) INOCULADAS CON CEPAS DE RIZOBIOS NATURALIZADAS Y DE REFERENCIA Y CONTROL SIN INOCULAR, COSECHADAS A LOS 40 DÍAS

TRATAMIENTO	$\delta^{15}\text{N}_{\text{AIRE}}$ (‰)	NTPA (MG)
SN	-1,46 ^{de}	2.863 ^{abc}
CN	-1,37 ^e	3.193 ^{bcd}
<i>B. elkanii</i> U1301+U1302	-1,60 ^{abc}	3.226 ^{cd}
<i>B. elkanii</i> SO1*	-1,57 ^{abcd}	2.900 ^{abc}
<i>B. elkanii</i> CL1*	-1,59 ^{abc}	2.833 ^{ab}
<i>B. elkanii</i> CA1*	-1,58 ^{abc}	2.830 ^{ab}
<i>B. elkanii</i> CO1*	-1,51 ^{bcd}	2.895 ^{abc}
<i>B. elkanii</i> CL2*	-1,60 ^{ab}	2.971 ^{abcd}
<i>Bradyrhizobium</i> sp. CA2*	-1,63 ^a	2.666 ^a
<i>B. japonicum</i> E109	-1,48 ^{cd}	3.335 ^d

(Continúa en página siguiente)

<i>B. japonicum</i> CL3*	-1,50 ^{bcd}	2.899 ^{abc}
<i>B. japonicum</i> CO2*	-1,51 ^{bcd}	3.121 ^{bcd}
<i>B. japonicum</i> SJ1*	-1,59 ^{abc}	3.103 ^{bcd}
<i>B. japonicum</i> SO2*	-1,52 ^{abcd}	3.183 ^{bcd}
<i>B. diazoefficiens</i> SEMIA5080	-1,52 ^{abcd}	2.971 ^{abcd}












Nota: Los valores representan la media ($n = 5$). Letras distintas en cada columna indican diferencias significativas (LSD-Fisher $p < 0,05$). Los tratamientos incluyen: control sin inocular y sin nitrógeno (SN); control con nitrógeno (CN); cepas de referencia: *B. elkanii* U1301 + U1302, *B. japonicum* E109 y *B. diazoefficiens* SEMIA5080 y cepas naturalizadas (*).

Fuente: Rodríguez (2020).

La información disponible permite afirmar que la eficiencia simbiótica y la competitividad de la mezcla recomendada oficialmente de *B. elkanii* U1301 y U1302 son altas, al mismo tiempo que se confirma la existencia en suelos de Uruguay de cepas naturalizadas para soja con desempeño similar para estas características. Estas cepas naturalizadas representan recursos genéticos microbianos valiosos adaptados a las condiciones locales con importante potencial de uso a futuro.

Los ensayos para investigar si la aplicación de curasemillas puede causar efectos negativos sobre la viabilidad de los rizobios del inoculante mostraron efectos de intensidad variable, según la molécula en cuestión y la formulación (Olivera, 2014; Olivera *et al.*, 2016). Estos resultados promovieron una estrategia de manejo del riesgo, considerando la inoculación y el uso de curasemillas como prácticas agronómicas centrales en la implantación del cultivo (Figura 4). Por un lado, la inoculación con rizobios debe garantizar la nutrición nitrogenada del cultivo. Por otro, el uso de curasemillas es una herramienta muy generalizada para el manejo de enfermedades, insectos o aves plaga que afectan la implantación. En el momento de decidir las intervenciones agronómicas, es necesario tener información referente a: la calidad de la semilla (germinación, vigor, sanidad), el potencial de patogenicidad de la chacra, el pronóstico de tiempo para el período siembra-implantación, los patógenos e insectos presentes y la compatibilidad de los curasemillas con el inoculante (Beyhaut *et al.*, 2020).

FIGURA 4. GUÍA PARA EL MANEJO DEL RIESGO EN LA TOMA DE DECISIONES DE USO DE CURASEMILLAS EN SOJA (FAVORABLE/ADVERSO RESPECTO DE LA IMPLANTACIÓN EXITOSA DEL CULTIVO)

Calidad de semilla	Índice de patogenicidad del suelo	Época de siembra/Pronóstico climático ⁽¹⁾	Riesgo de fallas de implantación
Alta	Bajo	Favorable	
		Adverso	
	Alto	Favorable	
		Adverso	
Media	Bajo	Favorable	
		Adverso	
	Alto	Favorable	
		Adverso	
Baja	Bajo	Favorable	
		Adverso	
	Alto	Favorable	
		Adverso	

* Favorable/adverso para el desarrollo del cultivo.

Fuente: Elaboración propia.

Para responder a la cuarta pregunta de investigación, se está realizando un mapeo asociativo –*genome-wide association mapping* (GWAS)– para FBN en las líneas de germoplasma avanzado del programa de mejoramiento genético de soja del INIA, con el objetivo de determinar si existen QTL (*Quantitative Trait Locus*, o locus de rasgo cuantitativo) asociados a alta eficiencia de FBN y qué porcentaje de la varianza fenotípica es explicada a través de estos QTL. La selección de genotipos de la planta huésped se presenta como una estrategia más para aumentar la eficiencia de la FBN y mejorar la nutrición nitrogenada del cultivo (Sinclair y Nogueira, 2018).

4. Contribuciones de la fijación biológica de nitrógeno a las transiciones agroecológicas: consideraciones finales

Después de la fotosíntesis, la FBN es el segundo proceso bioquímico de mayor importancia en el planeta Tierra. En Uruguay, la decisión de establecer la FBN como política de Estado en la década de 1960 permitió desarrollar la tecnología de los inoculantes rizobianos para leguminosas y, mediante el trabajo conjunto de los sectores público y privado, hizo posible una producción nacional de alta calidad. El convenio INIA-MGAP firmado en 2012 reforzó el compromiso interinstitucional, fortaleciendo las funciones del Sistema Nacional de Inoculantes.

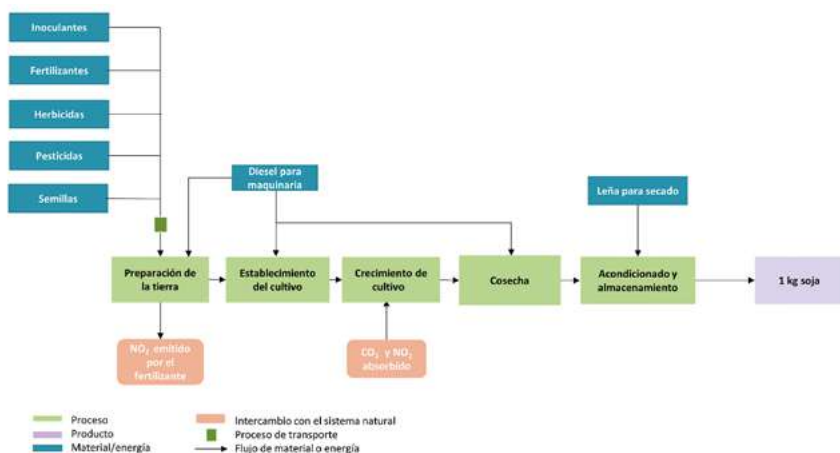
El uso de inoculantes ha sido ampliamente adoptado por el sector productivo uruguayo, con significativos beneficios económicos, ambientales y sociales para el país. Considerando su aplicación en el cultivo de soja y en las leguminosas forrajeras, el aporte de nitrógeno obtenido por la FBN se ha valorizado cercano a los 400 millones de dólares anuales en equivalente urea, por lo que aporta un elemento central a la bioeconomía del país.

Además del beneficio económico antes mencionado, la FBN evita la contaminación de las aguas, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y contribuye a la conservación de la biodiversidad. Por tanto, el uso de la tecnología de inoculantes en la producción de leguminosas cultivadas contribuye a una reducción relevante en el impacto ambiental de los agroecosistemas. Araujo *et al.* (2020) demostraron que la sustitución del fertilizante nitrogenado por el inoculante rizobiano en cultivos de leguminosas de grano (*Phaseolus vulgaris* y *Cajanus cajan*) resultó en una reducción del impacto ambiental en cinco categorías de impacto, incluido el calentamiento global (emisiones de GEI).

Recientemente, para cuantificar la reducción en el impacto ambiental asociada a los cultivos de soja y leguminosas forrajeras producidos con inoculantes rizobianos, el INIA y la Facultad de Ingeniería (UDELAR) comenzaron a trabajar con la metodología de análisis de ciclo de vida (ACV). El ACV es una herramienta para cuantificar el efecto ambiental del uso de recursos naturales y de las emisiones generadas, reuniendo información asociada a las entradas y salidas de materia y energía de todos los procesos involucrados en el ciclo de vida de un producto. Es la herramienta más utilizada para la evaluación ambiental de procesos y productos, por estar estandarizada en las normas de la Organización Internacional de Normalización (ISO, por sus siglas en inglés, International Organization

for Standardization [ISO-14040], 2006a; International Organization for Standardization [ISO-14044], 2006b). De acuerdo con estas normas, el ACV es definido como una técnica para evaluar aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto, mediante la recopilación de un inventario de entradas y salidas del sistema de estudio. En la Figura 5 se muestra como ejemplo el sistema a estudiar para el cultivo de soja.

FIGURA 5. SISTEMA PLANTEADO PARA EL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) EN EL CULTIVO DE SOJA



Fuente: Elaboración propia.

Conocer y entender la ecología de la simbiosis leguminosas-rizobios es una herramienta clave para mantener la FBN como principal fuente de nitrógeno en los sistemas de producción. En la Plataforma de Bioinsumos del INIA se han desarrollado capacidades de infraestructura y recursos humanos calificados para profundizar en esta línea de investigación, la cual es tema de agenda en el plan estratégico institucional y está dando respuestas a las preguntas de investigación planteadas. El antecedente histórico de la tecnología de inoculantes rizobianos para leguminosas sostenida en la FBN y el modelo de gestión interinstitucional para el re-

gistro y control de calidad sientan fundamentos sólidos para el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en el uso de microorganismos para la agricultura que promuevan las transiciones agroecológicas.

Bibliografía

Altier, N., Beyhaut, E. y Pérez, C.

(2013), “Root nodule and rhizosphere bacteria for forage legume growth promotion and disease management”, en Maheshwari, D. K., Saraf, M. y Aeron, A. (eds.), *Bacteria in agrobiolgy: crop productivity*, Springer, Dordrecht (Países Bajos), pp.167-184.

Araujo, J., Urbano, B. y González-Andrés, F.

(2020), “Comparative environmental life cycle and agronomic performance assessments of nitrogen fixing rhizobia and mineral nitrogen fertiliser applications for pulses in the Caribbean region”, *Journal of Cleaner Production*, 267, p. 122065.

Barlocco, C., Cerecetto, V., Mattos, N., Mortalena, M., Mayans, M., Beyhaut, E. y Altier, N.

(2015), *Caracterización de la colección nacional de cepas de rizobios: multifuncionalidad*, Serie Actividades de Difusión 755, INIA, Montevideo, pp. 4 -7.

Barlocco, C., Mayans, M., Mattos, N., Altier, N. y Beyhaut, E.

(2014), “Colección nacional de cepas de rizobios en Uruguay: caracterización y puesta en valor”, en *Boletín FELACC*, 14, pp. 6-12. Disponible en: <<http://felacc.cinvestav.mx/boletin/14.pdf>>.

Beyhaut, E.

(2015), “Both rhizobial inoculation technologies and soil properties affect N₂-fixation efficiency of commercial soybeans in Uruguay”, 23rd North American Conference on Symbiotic Nitrogen Fixation, Ixtapa, México.

Beyhaut, E., Abreo, E., Vaz, P., Pérez, C. y Altier, N.

(2020), “Prácticas agronómicas centrales en la implantación de soja: inoculación y uso de curasemillas”, en *Revista INIA Uruguay*, 62, pp. 101-102.

Danso, S. A. y Curbelo, S.

(1991), “Herbage yield and nitrogen-fixation in a triple-species mixed sward of white clover, lotus and fescue”, en *Soil Biology and Biochemistry*, 23(1), pp. 65-70.

Danso, S. A., Labandera, C., Pastorini, D. y Curbelo, S.

(1988), “Nitrogen fixation in a two-year old white clover-fescue pasture: influence of nitrogen fertilization”, en *Soil Biology and Biochemistry*, 20(2), pp. 261-262.

Dobermann, A. y Cassman, K. G.

(2005), “Cereal area and nitrogen use efficiency are drivers of future nitrogen fertilizer consumption”, en *Science in China Series C: Life Sciences*, 48(2), pp. 745-758.

Hungria, M., Franchini, J. C., Campo, R. J., Crispino, C. C., Moraes, J. Z., Sibaldelli, R. N., Mendes, I. C. y Arihara, J.

(2006), "Nitrogen nutrition of soybean in Brazil: contributions of biological N₂ fixation and N fertilizer to grain yield", en *Canadian Journal of Plant Science*, 86(4), pp. 927-939.

International Organization for Standardization

(2006a), *Environmental management-Life cycle assessment-principles and framework* (ISO/DIS Standard No. 14040)

International Organization for Standardization

(2006b), *Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines* (ISO/DIS Standard No. 14044).

Lagurara, P. F.

(2018), *Eficiencia simbiótica y capacidad competitiva de cepas de rizobios que nodulan soja en suelos con y sin historia del cultivo*, Tesis Mag. Cs. Agr., Facultad de Agronomía, Montevideo, 117 pp.

Olivera, L. M.

(2014), *Repelentes de aves aplicados a la semilla para plántulas de soja: penetración hacia los cotiledones, efectos sobre la germinación y compatibilidad con inoculantes*, Tesis Mag. Cs. Agr., Facultad de Agronomía, Montevideo, 69 pp.

Olivera, L., Rodríguez, E., Ceretta, S. y Beyhaut, E.

(2016), "Repelentes de aves aplicados a la semilla de soja: compatibilidad con el inoculante y residualidad en cotiledones", en *Agrociencia Uruguay*, 20(2), pp. 51-60.

Paul, E. A.

(1988), "Towards the year 2000: directions for future nitrogen research", en Wilson, J. R. (ed.), *Advances in Nitrogen Cycling in Agricultural Ecosystems*, C A B International, Wallingford (Reino Unido), pp. 417-425.

Peoples, M. B. y Craswell, E. T.

(1992), "Biological nitrogen fixation: investments, expectations, and actual contributions to agriculture", en *Plant and Soil*, 141, pp. 13-39.

Rodriguez, N. E.

(2020), *Diversidad y eficiencia simbiótica de rizobios naturalizados que nodulan soja en Uruguay*, Tesis Mag. Cs. Agr., Facultad de Agronomía, Montevideo, 111 pp.

Salvagiotti, F., Cassman, K. G., Specht, J. E., Walters, D. T., Weiss, A. y Dobermann, A.

(2008), "Nitrogen uptake, fixation and response to fertilizer N in soybeans: a review", en *Field Crops Research*, 108(1), pp. 1-13. doi: 10.1016/j.fcr.2008.03.001.

Sinclair, T. R. y Nogueira, M. A.

(2018), "The next step to increase grain legume N₂ fixation activity: selection of host-plant genotype", en *Journal of Experimental Botany*.

Unkovich, M., Herridge, D., Peoples, M., Cadish, G., Boddey, B., Giller, K., Alves, B. y Chalk, P.

(2008), *Measuring plant-associated nitrogen fixation in agricultural systems*, ACIAR (Australian Center for International Agricultural Research), Canberra.

Capítulo 8

Almacenaje y secuestro de carbono en suelos del Uruguay

Virginia Pravia, Andrés Quincke, Valentina Rubio, Raquel Barro, Ignacio Macedo, Jorge Sawchik, José Terra y Verónica Ciganda

1. Importancia del carbono orgánico del suelo a nivel local y global

El carbono orgánico del suelo representa un pilar fundamental para el desarrollo de la agricultura sostenible a nivel local, siendo el principal indicador de la calidad del suelo y de su potencial productivo. Adicionalmente, los suelos contienen la mayor reserva terrestre de carbono (C) a nivel global; por lo tanto, su secuestro tiene el potencial de reducir los gases de efecto invernadero y contribuir a la lucha contra el cambio climático. El contenido de C orgánico del suelo está directamente relacionado con el contenido de materia orgánica, la cual se compone de, aproximadamente, un 58% de carbono. De la materia orgánica dependen múltiples propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y, a través de la “salud del suelo”, esta contribuye a aumentar la oferta de servicios ecosistémicos. Por lo tanto, el contenido de C del suelo y la observación de sus cambios resultan clave en trayectorias agroecológicas.

Típicamente, el contenido de materia orgánica de los suelos varía entre 1% y 6%. Estas variaciones se explican por la variabilidad natural de los suelos y la variabilidad antropogénica generada por los diferentes sistemas productivos y las prácticas de manejo dominantes. En este sentido, a nivel global se ha reportado que las prácticas agrícolas han ocasionado pérdidas en los niveles de C que varían entre el 25% y el 75% de los valores iniciales de C (Lal, 2008). Los cambios en el contenido de C del suelo son en general lentos, pero aditivos, por lo que los experimentos de largo plazo son cruciales para evaluar cómo diferentes prácticas de

manejo pueden afectar los contenidos de C del suelo y sus efectos en la salud y capacidad productiva de los suelos.

1.1. Agricultura sustentable y carbono orgánico en el suelo: calidad de suelos, productividad y seguridad alimentaria

La disponibilidad de agua y nutrientes, la porosidad, la agregación, la resistencia a la erosión y la actividad microbiana se encuentran altamente relacionadas con el contenido de materia orgánica del suelo. Estas relaciones determinadas por la comunidad científica a nivel global se han constatado también a lo largo de varias décadas en experimentos de largo plazo en el INIA, en los que el deterioro de propiedades físicas y químicas del suelo debido a usos más intensivos de este se ha visto asociado a pérdidas de carbono (Grahmann *et al.*, 2020; Rubio *et al.*, 2019, 2018).

Calidad física del suelo

Suelos con menores contenidos de materia orgánica, asociados a un uso agrícola más intensivo, presentan mayores niveles de compactación registrados como aumentos en la densidad aparente y resistencia a la penetración (Terra y García Prechac, 2001; Rubio *et al.*, 2018). Este deterioro se explica principalmente por una reducción en el volumen de poros de mayor tamaño, los cuales tienen un rol fundamental en la infiltración y el drenaje del agua del suelo (Rubio *et al.*, 2018). Las consecuencias de estos cambios son tanto ambientales como productivas. Por un lado, una menor infiltración se vincula directamente a un aumento del escurrimiento superficial, lo que incrementa los riesgos de erosión de los suelos y con ello el movimiento de nutrientes y químicos hacia aguas superficiales. Por otro lado, suelos degradados presentan mayores niveles de saturación hídrica, a igual contenido de agua, que suelos no degradados, lo cual aumenta el riesgo de anoxia para los cultivos (Rubio *et al.*, 2018).

El contenido de C del suelo es también el principal determinante de la estabilidad de agregados para molisoles en la región (Rubio *et al.*, 2019). Esta propiedad está relacionada con la capacidad del suelo de resistir cualquier estrés, sea tráfico de maquinaria o lluvias, sin que esto cause la ruptura de sus agregados y, por tanto, pérdidas de su estructura. Agregados débiles, asociados a un bajo contenido de carbono, se rompen más fácilmente debido al impacto de las gotas de lluvia, lo cual agrava aún

más los problemas de erosión, facilitando además el encostramiento de los suelos y su compactación.

Calidad química del suelo

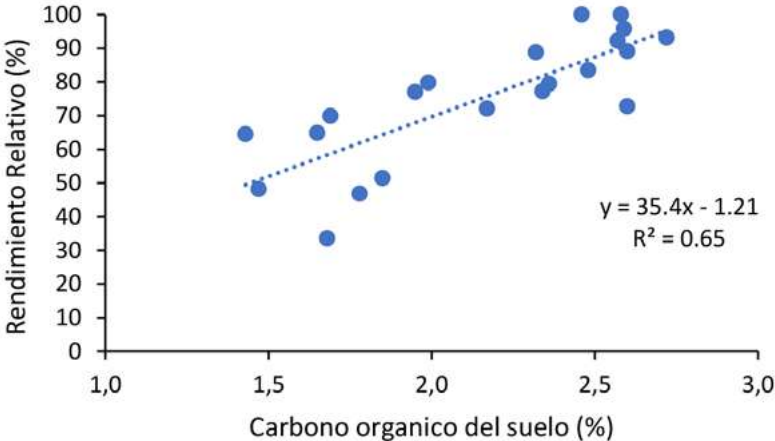
El contenido de carbono está altamente relacionado con el contenido de distintos elementos a través del ciclo de la materia orgánica que funciona como reservorio de nutrientes. Especialmente, el contenido de nitrógeno (N) del suelo mantiene una estrecha relación con el contenido de carbono, que en términos globales se estima en 10:1 (C:N). En suelos con bajos contenidos de carbono, asociados a usos más intensivos del suelo, se ha constatado una limitación en el contenido de nitrógeno total y en la capacidad de suministro de nitrógeno como nutriente para las plantas. Esta limitación se ha observado a través del potencial de mineralización de nitrógeno determinado en incubaciones de suelo (Díaz-Roselló, 1992a y 1992b; Morón, 2003; García y Quincke, 2011) y en estimaciones del balance de nitrógeno de rotaciones de diferente intensidad (Pravia *et al.*, 2019). Además de la provisión de nutrientes al agroecosistema, el contenido de materia orgánica del suelo se asocia a otras propiedades químicas y biológicas del suelo.

Capacidad productiva

Estas propiedades del suelo asociadas al contenido de materia orgánica determinan que suelos con un mayor contenido de carbono orgánico representen ambientes de mayor productividad potencial. Cuando un suelo pierde parte del carbono, se reduce el rendimiento potencial de los cultivos implantados. La relación entre el contenido de carbono del suelo y el rendimiento de los cultivos está condicionada, entre otros factores, por los niveles de fertilización nitrogenada y las condiciones climáticas del año. Las pérdidas del potencial de producción asociadas a pérdidas de carbono en el suelo se estimaron en el experimento de largo plazo del INIA La Estanzuela durante 44 años de evaluación para cultivos de trigo, cebada, girasol y sorgo (Díaz *et al.*, 2009). Estas pérdidas de rendimiento comenzaron a observarse en forma significativa luego de que el suelo perdió el 20% de su contenido de carbono original; considerándose una zona de resiliencia hasta ese punto donde aún no se observan reducciones significativas en rendimiento. Cuando el carbono orgánico en el sue-

lo reduce su contenido del 80% al 30% respecto de los valores originales, los rendimientos caen desde el 100% al 30% del potencial productivo para trigo. Siendo poco frecuente que la degradación del suelo lleve el contenido de carbono a valores inferiores al 30% del original, se considera este como un valor mínimo en el modelo de Díaz *et al.* (2009). Este modelo de valores relativos permite aplicar estas estimaciones a agroecosistemas similares a los evaluados. Como valor de referencia para estos suelos, un contenido de carbono orgánico de 2,35% en los primeros 15 cm de suelo representó el valor que permitió obtener al menos el 95% del rendimiento alcanzado en 495 casos de estudio en cultivos de trigo y cebada en estos experimentos; mientras que para el maíz este valor sería de 2,72 % (Figura 1). A nivel de chacras, relevamientos realizados por Ernst *et al.* (2018) en la zona litoral del país han constatado pérdidas de rendimiento asociadas a la degradación del suelo como resultado de la intensificación de los sistemas de producción que no se compensan totalmente con el agregado de nitrógeno como fertilizante.

FIGURA 1. RENDIMIENTO DE MAÍZ EXPRESADO COMO RELATIVO AL RENDIMIENTO MÁXIMO DEL AÑO DE EVALUACIÓN EN FUNCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO DEL SUELO (0-15 CM, EN %).



Nota: Evaluaciones realizadas durante las zafras 2014-2015 y 2015-2016 ante idénticas condiciones de manejo.

Fuente: Rubio (2018).

Suelos con un mayor contenido de carbono constituyen, por lo tanto, suelos más fértiles y representan una mayor oportunidad de satisfacer las demandas crecientes, a nivel global, de alimentos, fibra y energía que acompañan el incremento exponencial de la población mundial.

1.2. Dimensión ambiental y social: el rol del carbono del suelo ante el calentamiento global y los compromisos asumidos en acuerdos internacionales

A nivel global, los suelos contienen la mayor reserva terrestre de carbono que, estimada en 1.500×10^{15} g de carbono a un metro de profundidad, representa aproximadamente el doble del contenido en la atmósfera. El aumento del contenido de carbono en la atmósfera, en la forma de dióxido de carbono, contribuye al calentamiento global. Por lo tanto, pequeños cambios en el contenido de carbono del suelo y en sus flujos desde y hacia la atmósfera podrían implicar considerables cambios en la regulación de procesos biogeoquímicos de alcance global, aumentando o mitigando el efecto invernadero y el cambio climático, según el flujo neto sea hacia o desde la atmósfera.

La idea de que los suelos y la agricultura puedan representar al mismo tiempo soluciones para problemas globales como el cambio climático, la seguridad alimentaria y la polución ambiental ha dado lugar a varias iniciativas internacionales que atienden la conservación y el incremento del carbono orgánico del suelo. En particular, el Acuerdo de París (COP21), dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) de 2015, promueve la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el aumento de los sumideros para la mitigación del cambio climático, la adaptación a sus efectos negativos y la construcción de resiliencia. Existen iniciativas en similar sentido como la Alianza sobre evaluación ambiental y desempeño ecológico de la ganadería (LEAP) entre otras desde la FAO, la Alianza Global de Investigación en Gases de Efecto Invernadero en la Agricultura y “4 x 1000, Suelos para la Seguridad Alimentaria y el Clima”,¹ entre otras.

¹ La 4 x 1000 es una iniciativa internacional “Soils for Food Security and Climate”, que se lanzó como propuesta del gobierno francés en la UNFCCC COP21 como parte del plan de acción Lima-París. Se trata de secuestrar carbono en el suelo a una tasa de 0,4% (4 por mil) del stock de carbono contenido en el suelo a 30 cm (es una tasa biológica). Véase: <<https://4p1000.org/>>.

La cuantificación del secuestro de carbono de los agroecosistemas es un gran desafío global que comienza a reflejarse en el mercado económico mundial, constatándose las primeras ventas de bonos de carbono del suelo en el mercado internacional. En algunos países como Estados Unidos, los incentivos económicos se trasladan de forma explícita desde los gobiernos a través de planes de créditos impositivos para productores que apliquen medidas de promoción de la captura de carbono. En otros casos, este desafío llega de forma menos visible para los productores, pero no menos importante. A través de los acuerdos internacionales entre los gobiernos, este desafío se convierte en un compromiso a nivel nacional, cuyo cumplimiento es tenido en cuenta al realizar acuerdos comerciales entre los países y sus bloques económicos. Un ejemplo claro es la polémica generada por la exigencia del cumplimiento de los compromisos ambientales del Acuerdo de París para la entrada en vigor del acuerdo entre los bloques económicos Mercosur-Unión Europea.

El Acuerdo de París compromete a los países firmantes como Uruguay a realizar esfuerzos voluntarios para limitar el incremento de la temperatura global por debajo de los 2 °C respecto de la era preindustrial y continuar sus esfuerzos para limitarlo a 1.5 °C. Para esto, se deben presentar en forma bianual informes nacionales que dan cuenta del avance en las metas comprometidas de realizar acciones locales para limitar las emisiones, y para conservar y aumentar los sumideros y reservorios de los GEI. De acuerdo con el último inventario nacional de gases de efecto invernadero (INGEI, 2017, 2019), las emisiones del sector que comprende la agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) representan el 75,4% de las emisiones totales del Uruguay, con una contribución importante de la ganadería. El sector AFOLU es a su vez responsable por el 100% de las remociones, que se dividen entre carbono en la biomasa vegetal, la materia orgánica muerta y el carbono orgánico en el suelo. Por lo tanto, los cambios en el manejo de suelos que contribuyan al secuestro de carbono pueden significar un aporte muy importante.

2. ¿Cómo se retiene carbono en el suelo?

2.1. Concepto de balance y secuestro de carbono

El secuestro de carbono en el suelo se basa en el proceso de fotosíntesis para remover dióxido de carbono (CO₂) de la atmósfera, que es luego

aportado en forma de residuos al suelo y mediante descomposición microbiana es posteriormente almacenado en forma de materia orgánica por un largo período de tiempo. El contenido de carbono orgánico del suelo resulta del balance entre el carbono agregado por los residuos, incluyendo las raíces y enmiendas orgánicas como el abono o compost, y de las pérdidas de carbono al ambiente por procesos de respiración y descomposición. Los procesos de erosión significan una pérdida local de carbono y se traducen en la degradación y pérdida de productividad del suelo, pudiendo ocurrir una redistribución a otras áreas.

Por otro lado, para secuestrar carbono de manera efectiva en los agroecosistemas se debe tener en cuenta que, además del flujo de CO_2 , existen pérdidas de otros gases de efecto invernadero como parte de los procesos de producción. El metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O), que se producen como resultado de distintos procesos microbianos naturales en el sistema, tienen un poder de calentamiento global sensiblemente mayor al del CO_2 . El CH_4 es producido durante el proceso de digestión de los rumiantes; por lo tanto, su cuantificación es de suma importancia en agroecosistemas ganaderos. A nivel del suelo, también se produce CH_4 en la descomposición de materia orgánica en condiciones de inundación, por lo que es un proceso de suma importancia en la producción de arroz. Las emisiones de N_2O son promovidas en condiciones de bajo contenido de oxígeno y altos niveles de nitrógeno en el suelo, como sucede en sistemas agrícolas luego de una lluvia en cultivos fertilizados y en deposiciones de orina en sistemas ganaderos. Las pérdidas de estos GEI deben ser compensadas a través de un aumento del contenido de carbono en el suelo para lograr un balance neutro o positivo en términos globales del sistema de producción, que permita secuestrar carbono de manera efectiva en los agroecosistemas.

2.2. Mecanismos de retención de carbono en el suelo y capacidad de retención

Para un determinado clima, suelo y manejo, se asume que existe una condición de equilibrio en la concentración de materia orgánica del suelo a la que se llega luego de un tiempo prolongado durante el cual las entradas de carbono al suelo igualan a las salidas. El aumento del stock de carbono orgánico requiere de la implementación de prácticas de manejo que aumenten las entradas de carbono al suelo y/o reduzcan las pérdidas.

Las entradas de carbono al sistema están en gran medida determinadas por la productividad primaria neta del sistema, ya que esta determina el aporte de residuos al suelo.

Para lograr un aumento en el stock de carbono, el suelo debe tener además suficiente nitrógeno y la capacidad de retener carbono orgánico en forma adicional. Esta capacidad está determinada por mecanismos químicos y físicos, como la asociación con las partículas finas de limo y arcilla y la agregación, ya que existe un límite superior en el almacenamiento de C orgánico en el suelo en forma estable (Six *et al.*, 2002, Stewart *et al.*, 2007, 2008). El concepto de saturación de C propuesto por Hassink y Whitmore (1997) establece que existe un nivel de equilibrio máximo en el contenido de C que podría alcanzarse cuando se maximiza el aporte de C al suelo (Hassink y Whitmore, 1997; Six *et al.*, 2002; Stewart *et al.*, 2007). El potencial de secuestro de C estaría limitado por la capacidad de estabilización de C en el suelo, ya que la fracción de la materia orgánica del suelo (MOS) que no es estabilizada se encuentra expuesta a sufrir descomposición microbiana.

La MOS puede ser estabilizada mediante diferentes mecanismos que la protegen de la descomposición microbiana. La formación de microagregados provee protección física a la materia orgánica asociada a partículas de arcilla y limo en su interior, mientras que la protección química puede ocurrir de acuerdo con la naturaleza de las moléculas que limiten el proceso de degradación de materia orgánica. La capacidad máxima del suelo de ofrecer protección física a la materia orgánica en el suelo es lo que se considera el contenido de “saturación de carbono” y puede ser calculada en forma teórica en función de la textura y de la relación existente entre contenido de carbono y el de las fracciones minerales (Hassink y Whitmore, 1997; Six *et al.*, 2002; Stewart *et al.*, 2008). En algunos países como Francia, Alemania y Nueva Zelanda, se han utilizado estimaciones de la capacidad de estabilización de C en el suelo como una aproximación al potencial de secuestro de carbono (Angers *et al.*, 2011; Wiesmeier *et al.*, 2014; McNally *et al.*, 2017). Sin embargo, hay que considerar que puede existir una brecha entre el potencial teórico y el nivel de secuestro alcanzable o potencial realizable de acuerdo con el clima y manejo que determinan la productividad del sistema, y, por lo tanto, las entradas de carbono al suelo.

Estudios de la dinámica de C y N realizados en brunosoles y argisoles indicaron que la dinámica de saturación de C es un fenómeno observable en suelos del Uruguay (Pravia y Kemanian, 2017). El seguimiento

del C agregado en residuos marcados con ^{13}C en suelos bajo diferentes rotaciones de los experimentos de largo plazo en el INIA La Estanzuela y en el INIA Palo a Pique mostró que la tasa de retención de C es afectada por la saturación de C del suelo. Suelos con contenidos de C próximos al contenido teórico de saturación estabilizaron menos C en las fracciones finas (materia orgánica asociada a los minerales [MAOM, por sus siglas en inglés] $< 53 \mu\text{m}$) que suelos con menor contenido de C cuando se incorporaron cantidades de residuos equivalentes a un rastrojo de sorgo o maíz (Pravia y Kemanian, 2017). En otras palabras, la eficiencia de retención se reduce al acercarse al contenido de saturación; por lo tanto, para obtener una misma cantidad de carbono retenido es necesario realizar mayores aportes. Lo contrario ocurre cuando el suelo se encuentra lejos de su contenido máximo. En suelos degradados que han perdido carbono y se encuentran con contenidos de carbono sensiblemente menores al contenido de saturación, la eficiencia de retención de carbono en los residuos aportados es mayor, por lo que representan oportunidades para el secuestro de carbono.

2.3. Capacidad de retención y dinámica de nutrientes

Además de afectar la retención de C en el suelo, la dinámica de saturación de carbono tiene consecuencias en la descomposición de materia orgánica y la provisión de nitrógeno. A través del estudio de mecanismos biofísicos en modelos de simulación de agroecosistemas aplicados y contrastados con sistemas reales, se puede observar que sistemas que mantienen un suelo cerca de su capacidad de saturación de carbono tendrían mayores flujos de nitrógeno mediante los procesos de mineralización y de inmovilización, lo que les permitiría realizar un aporte de nitrógeno mejor sincronizado con las demandas de los cultivos y, a la vez, amortiguar las pérdidas al ambiente (Pravia *et al.*, 2019). Por lo tanto, mantener los sistemas de producción con altos contenidos de carbono en el suelo operando en el entorno del contenido de saturación podría considerarse una estrategia de intensificación ecológica que tiende a maximizar la eficiencia en el uso de nutrientes, promoviendo el reciclaje interno de nutrientes y minimizando las necesidades de fertilizantes externos.

3. Herramientas para el secuestro de carbono: uso del suelo, su manejo y conservación

En Uruguay, aproximadamente el 70% del área aún se encuentra como campo natural (DIEA, 2019), a pesar de que en las últimas décadas se ha constatado una reducción en el área de pastizales naturales asociada a un proceso de intensificación de los sistemas agrícolas y ganaderos, al igual que en otras partes de la región y del mundo. Estos procesos de intensificación del uso del suelo afectan la provisión de servicios ecosistémicos como el secuestro de carbono. En términos de los componentes del balance de carbono del suelo, los ecosistemas de pasturas naturales y bosques nativos tienen en general un balance más favorable al secuestro de carbono, debido a mayores entradas de carbono por aporte de biomasa de raíces y menores pérdidas vinculadas a menores disturbios al suelo y menor erosión, comparados con los suelos cultivados. En términos generales, ecosistemas naturales que combinan una alta productividad con suelos de alto contenido de arcillas se espera que tengan mayores contenidos de materia orgánica que aquellos que presentan una baja productividad o texturas de suelo más gruesas. Por lo tanto, las medidas que tienden a aumentar la productividad de los ecosistemas naturales estarían favoreciendo el balance de carbono a través de un aumento de las entradas de carbono al sistema. Si bien estos cambios son lentos y, en consecuencia, las variaciones en el stock de carbono se deben medir en el largo plazo, las fracciones más gruesas del suelo, que representan las fracciones más lábiles de la materia orgánica, pueden tener una tendencia observable en el mediano plazo.

Cuando las pasturas, los bosques y las plantaciones forestales son sustituidos por cultivos, se observa una pérdida respecto de las condiciones iniciales, ya que los agregados del suelo se rompen y una fracción del carbono previamente protegido en esos agregados puede ser utilizada por los microorganismos. A través del uso del suelo como recurso productivo, la mayoría de los suelos agrícolas en el mundo han perdido 30-50% del carbono en los primeros horizontes (0-30 cm). Dependiendo del manejo agronómico que se realice y de la capacidad de retención de los suelos, las pasturas y los suelos agrícolas tienen el potencial de actuar como sumideros de carbono orgánico, recuperando por lo menos parte del carbono perdido.

3.1. Prácticas de manejo para conservar y aumentar el almacenaje de C en el suelo

Siembra directa

La siembra directa de pasturas y cultivos es una de las medidas de manejo de suelos que permite reducir las pérdidas de carbono por erosión y descomposición, ya que las pérdidas de carbono en los primeros centímetros de suelo se relacionan con la intensidad de las operaciones realizadas.

Al evaluar el contenido de carbono del suelo y de sus fracciones físicas bajo tres intensidades de laboreo mantenidas durante 11 años en una rotación de cultivos forrajeros anuales en suelos de la Unidad Alférez, se observó que el stock de carbono orgánico en los primeros 15 cm del suelo fue mayor en 20% cuando se utilizó siembra directa respecto del promedio en los tratamientos de laboreo (Tabla 1) (Terra *et al.*, 2009). Estas diferencias en el stock de carbono se observaron también al analizar las diferentes fracciones, siendo de 32% y 18% en promedio para la fracción más lábil (materia orgánica particulada [POM, por sus siglas en inglés]) y en la fracción fina (MAOM), respectivamente. Estas pérdidas se explican en parte por la suma de los procesos de erosión y descomposición.

TABLA 1. STOCK DE CARBONO EN DISTINTAS FRACCIONES DEL SUELO (0-15 CM) PARA TRES SISTEMAS DE LABOREO IMPLEMENTADOS DURANTE 11 AÑOS EN UNA ROTACIÓN FORRAJERA DE DOBLE CULTIVO ANUAL SOBRE SUELOS DE LA UNIDAD ALFÉREZ

Stock de carbono orgánico en el suelo [†]	Sistema de laboreo		
	Laboreo convencional	Laboreo reducido	Siembra directa
	————— Mg C ha ⁻¹ —————		
C Total (< 2.000 μm)	27,5 b	28,5 b	33,7 a
C-POM (2.000 - 200 μm)	3,1 ab	2,6 b	3,6 a
C-POM (200 - 53 μm)	2,1 b	1,9 b	2,8 a
C-MAOM (< 53 μm)	22,4 b	23,9 b	27,3 a

[†] Los valores seguidos de una misma letra dentro de la fila no difieren significativamente, con $p \leq 0,05$.

C-POM: carbono en la materia orgánica particulada; C-MAOM: carbono asociado a la fracción mineral.

Fuente: Terra et al. (2009).

Secuencias de cultivos y rotaciones

Cultivos de cobertura, abonos verdes y enmiendas orgánicas

La inclusión de cultivos de cobertura como especies de leguminosas, gramíneas anuales y nabos forrajeros en secuencias puramente agrícolas mejora las propiedades físicas y biológicas del suelo, reduce la erosión y la pérdida de nutrientes por escurrimiento superficial y subsuperficial.

Experimentación nacional, localizada en el INIA La Estanzuela, muestra que la incorporación de un cultivo de cobertura (avena o raigrás) en una rotación de soja continua permite reducir la erosión del suelo de $7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ a 2 o $1 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ cuando la cobertura es terminada 60 o 30 días antes de la siembra de soja, respectivamente (Pérez Bidegain y Sawchik, sin publicar). En el largo plazo, además, el uso de cultivos de cobertura genera un aumento significativo en la estabilidad de los agregados del suelo (Filippi *et al.*, 2019). Esto mejora la resistencia del suelo a la erosión y aumenta la infiltración del agua y, por lo tanto, los beneficios de la incorporación de coberturas. En ausencia de coberturas invernales, se observan con el paso del tiempo, síntomas de erosión severa y encausada. Este daño puede evitarse mediante el uso de coberturas.

Por otro lado, los cultivos de cobertura generan un aporte adicional de carbono al suelo. En un promedio de 13 años de evaluación, se observó que las coberturas generaron un aporte de $3 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ de biomasa aérea de residuos al suelo en quemas tempranas, y de $6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en quemas tardías con herbicida, sin comprometer el rendimiento del cultivo de soja (Filippi *et al.*, 2019). Mayores diferencias son esperadas si se considera la producción de raíces de estas coberturas, ya que este componente es el que más contribuye a la formación de materia orgánica del suelo (Pinto, 2018).

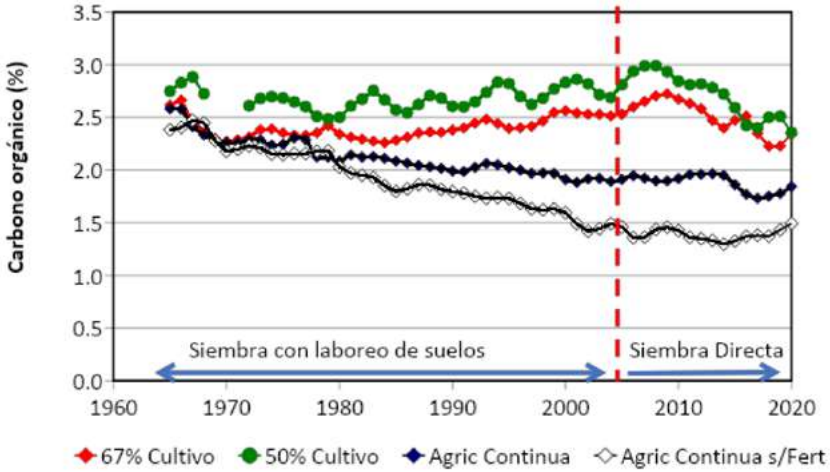
En suelos degradados por el uso hortícola intensivo, las rotaciones que incluyen abonos verdes con incorporaciones anuales de enmiendas animales y vegetales mayores a 7 Mg/ha de materia seca, combinadas con medidas de conservación de suelo, permiten aumentar el contenido de carbono orgánico (Arboleya *et al.*, 2010; Alliaume *et al.*, 2013). Así, prácticas agroecológicas como la utilización de cultivos de cobertura mejoran el balance de carbono reduciendo sus pérdidas y aumentando sus ingresos al suelo.

Siembra de pasturas perennes e importancia de las capas profundas del suelo

Las especies perennes producen mayor biomasa de raíces que las especies anuales, aportando más carbono y nitrógeno al suelo. Por otra parte, al sembrar especies perennes en rotación con cultivos se disminuye la frecuencia de las operaciones de laboreo, reduciendo las pérdidas por erosión, resultando en un balance más favorable al secuestro de carbono que las secuencias de cultivos anuales continuos.

La evolución del contenido de carbono orgánico en rotaciones integradas cultivo-pasturas ha sido estudiada en diferentes experimentos de larga duración en el INIA y en la Facultad de Agronomía (UDELAR). Luego de 28 años de evaluación en rotaciones realizadas con laboreo convencional en el INIA La Estanzuela, la integración de pasturas en rotación con cultivos anuales mostró un aumento promedio de 0,5% de la materia orgánica en el estrato superficial del suelo al culminar el cuarto año de la fase de pasturas (Díaz-Roselló, 1992b). Estas ganancias de carbono en la fase de pasturas permitieron compensar en buena medida las pérdidas de la fase agrícola, mientras que los sistemas de agricultura continua con laboreo perdieron ocho veces más carbono que aquellos en donde la agricultura se integró con pasturas perennes (Figura 2). Si bien estas diferencias se atenuaron en los años subsiguientes del experimento, en la última década las rotaciones integradas cultivo-pastura mostraron un aumento del contenido de carbono del 11%, mientras que las secuencias de cultivos continuos perdieron el 22% en los primeros 15 cm de suelo (Grahmann *et al.*, 2020).

FIGURA 2. EVOLUCIÓN DEL CONTENIDO DE CARBONO ORGÁNICO EN LOS PRIMEROS 15 CM DE PROFUNDIDAD DEL SUELO PARA DIFERENTES ROTACIONES DE CULTIVOS Y PASTURAS EN EL EXPERIMENTO DE LARGO PLAZO DE “ROTACIONES VIEJAS” EN EL INIA LA ESTANZUELA, ING. LAVALLEJA-CASTRO.



Nota: La leyenda indica la proporción del tiempo dedicado a cultivos anuales en cada rotación. La línea punteada indica el momento en que se incorporó la siembra directa, dejando atrás las prácticas de laboreo de suelos. Los datos se encuentran expresados según análisis por combustión seca.

Fuente: Elaboración propia.

Otro de los resultados interesantes que se puede observar en el experimento de rotaciones de largo plazo del INIA La Estanzuela es que el mayor contenido de carbono de las rotaciones que incluyen pasturas perennes también se presenta en las capas profundas del suelo. Por lo tanto, al incluir pasturas perennes, el secuestro de carbono puede darse de manera más eficiente, ya que en las capas profundas del suelo la capacidad de retención es por lo general mayor, mientras que la exposición a sufrir pérdidas es menor (Figura 3).

FIGURA 3. VISTA DE LOS PERFILES DE SUELOS EXHIBIDOS EN EL INIA LA ESTANZUELA, TOMADOS DEL EXPERIMENTO DE LARGO PLAZO DE ROTACIONES EN SUS 50 AÑOS



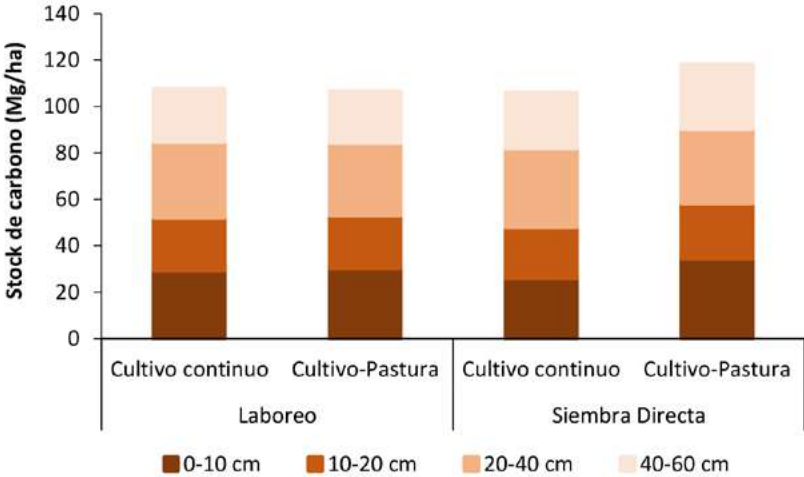
De izquierda a derecha: Sistema 1: agricultura continua sin fertilizante, Sistema 2: agricultura continua con fertilizante, y Sistema 5: rotación de 3 años de cultivos y 3 años de pasturas en el INIA La Estanzuela.

Fuente: Elaboración propia.

Cuando la aplicación de estas prácticas que tienden a aumentar y conservar el contenido de carbono de los suelos se realiza en forma combinada, se observan mayores niveles de carbono en el suelo en el largo plazo que cuando se aplica cada tecnología en forma individual. Este es el caso de las evaluaciones realizadas en el INIA La Estanzuela, donde se comparan en forma individual y combinada la siembra directa junto con la integración de pasturas en las rotaciones, en el experimento descrito por Rubio *et al.* (2014). Luego de 22 años, la combinación de una rotación integrada de cultivos y pasturas en siembra directa fue la única que se diferenció con un mayor stock de carbono sobre los manejos alternativos de agricultura continua con o sin laboreo, y rotación de cultivos

y pasturas con laboreo (Barro *et al.*, sin publicar). Las diferencias en el stock de C acumulado en el suelo fueron significativas hasta los 60 cm de profundidad, donde la rotación integrada de cultivos y pasturas bajo siembra directa presentó un stock de C orgánico en el suelo 10,7% mayor (Figura 4).

FIGURA 4. STOCK DE CARBONO EN EL SUELO POR ESTRATO DE PROFUNDIDAD HASTA LOS 60 CM DE PROFUNDIDAD LUEGO DE 22 AÑOS DE MANEJOS ALTERNATIVOS DE SUELO Y ROTACIÓN SOBRE UN ÁRGIUDOL TÍPICO VÉRTICO EN EL INIA LA ESTANZUELA EN EL EXPERIMENTO DE LARGO PLAZO DE ROTACIONES Y LABOREO (“CHACRA 43”), INICIADO EN 1996



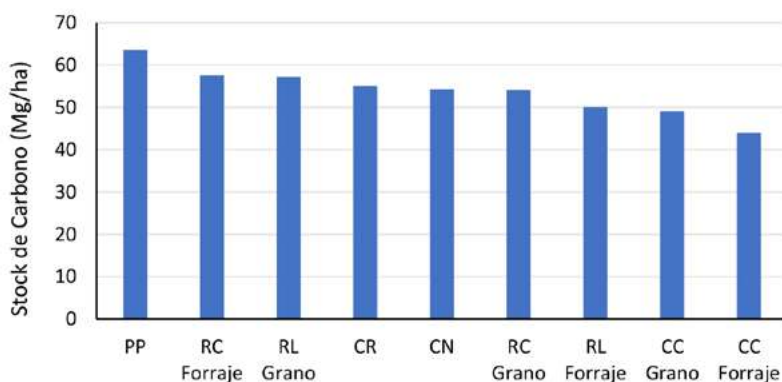
Nota: Los manejos alternativos corresponden a una rotación de cultivos continuos bajo laboreo, rotación de cultivos y pasturas bajo laboreo, y las mismas alternativas de rotaciones de cultivos continuos y de rotaciones de cultivos y pasturas evaluadas bajo un esquema de siembra directa.

Fuente: Barro et al. (sin publicar).

La inclusión de pasturas perennes en sistemas de siembra directa puede aumentar los contenidos de carbono. Los niveles observados de recuperación en el stock de carbono pueden superar incluso los del campo regenerado cuando se realiza como una pastura permanente (Figura 5). Luego de 20 años de implementar diferentes rotaciones en siembra

directa sobre argisoles y planosoles de la Unidad Alférez en la Unidad Experimental de Palo a Pique, se observaron valores de stock de carbono en los primeros 30 cm de una pastura permanente que superaron en 17% los del campo natural regenerado en su condición de manejo inicial al experimento. Al mismo tiempo, la agricultura continua forrajera, que implica una alta extracción de la biomasa producida, mostró una reducción en el contenido de carbono, con un stock a 30 cm inferior en 19% al de su par de campo natural.

FIGURA 5. STOCK DE CARBONO EN EL SUELO HASTA 30 CM DE PROFUNDIDAD LUEGO DE 20 AÑOS DE MANEJOS ALTERNATIVOS DE SUELO Y ROTACIÓN SOBRE UN ARGUUDOL OXIÁQUICO VÉRTICO EN EL INIA TREINTA Y TRES EN EL EXPERIMENTO DE LARGO PLAZO DE LA UNIDAD EXPERIMENTAL PALO A PIQUE, EN EL PERIODO 1996-2016



Referencias: PP: pastura permanente; RC forraje: rotación corta de dos años de pasturas y dos de verdeos anuales para producción de forraje; RL grano: rotación larga de cuatro años de pasturas u dos de verdeos anuales para la producción de forraje; CR: campo regenerado; CN: campo natural; RC grano: rotación corta de dos años de pasturas y dos de cultivos anuales para producción de grano; CC grano: rotación de cultivos para la producción de grano; CC forraje: rotación de verdeos y cultivos para la producción de forraje.

Fuente: Elaboración propia.

Los sistemas pastoriles de producción lechera de Uruguay se pueden tomar como un claro ejemplo en cuanto a la aplicación de sistemas de agricultura forrajera intensiva y sus efectos en el suelo. Los cambios fuer-

tes en el manejo de suelos a lo largo de un marcado proceso de intensificación en las últimas décadas han sido estudiados en sistemas lecheros implementados en el INIA La Estanzuela entre 1974 y 2010, donde los sistemas de producción siguieron la misma tendencia que los establecimientos comerciales (Díaz y Durán, 2011). A lo largo de estas casi cuatro décadas, se presentaron dos períodos contrastantes en la dinámica del C en el suelo, debido a modificaciones extremas en el laboreo, la carga animal y la importación de forrajes. Los primeros 17 años, presentaron fuertes pérdidas de C orgánico con tasas anuales promedio estimadas de $0,89 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Esta tendencia se revirtió en los siguientes 18 años con ganancias de C orgánico de $0,94 \text{ Mg ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. Tres factores principales de manejo determinaron un balance positivo de carbono, resultando en el rápido incremento en el C orgánico del suelo: la progresiva reducción de laboreos, mejoras de la productividad de las pasturas y los cultivos, y la importación de alimentos al sistema. Si bien la agricultura forrajera intensiva puede ser muy exigente para el recurso suelo, tomando medidas de manejo tendientes a reducir las pérdidas y aumentar las entradas de carbono al sistema fue posible revertir el proceso de degradación y secuestrar carbono de manera efectiva.

Cuando se intensifican las rotaciones reduciendo la participación de las pasturas perennes, a través de los años se espera observar un gradiente en el contenido de carbono total de acuerdo con el nivel de intensificación. En los sistemas que rotan arroz con otros cultivos (soja y sorgo), respecto de la rotación de arroz pasturas, el contenido de carbono y nitrógeno en la POM mostró una reducción aproximada del 16% en los primeros 15 cm de profundidad del suelo. Sin embargo, no se observaron cambios en los contenidos totales de C y N del suelo luego de cinco años de implementados estos manejos alternativos de intensificación de una rotación arroz pasturas (2 años arroz-3 años pastura), reduciendo la participación de la pastura perenne por sustitución con pasturas más cortas y/o los cultivos de soja y sorgo (Macedo *et al.*, 2021).

Manejo de pasturas

El carbono orgánico del suelo tiende a aumentar en sistemas pastoriles donde se adoptan prácticas de manejo que aumentan la productividad de las pasturas implantadas y los pastizales naturales. El sobrepastoreo se presenta como una causa de degradación importante del suelo, mientras que con pasturas bien manejadas los suelos pueden tener un contenido

de carbono similar al original. En términos generales, la implementación de prácticas como el ajuste de la dotación animal, el manejo de pastoreo, la recuperación de pasturas degradadas, la inclusión de leguminosas y la fertilización ha mostrado resultados positivos en distintas partes del mundo (Conant *et al.*, 2017).

Por un lado, el pastoreo podría limitar la acumulación de carbono en el suelo en el largo plazo, a través de su efecto en las diferentes vías de pérdida del ciclo del nitrógeno. Estos cambios podrían resultar de diferente magnitud e incluso dirección contraria de acuerdo con la escala temporal considerada (Piñeiro *et al.*, 2006). En el otro extremo, la exclusión del pastoreo reduce los aportes de biomasa subterránea producida como raíces y otros órganos subterráneos, que constituyen entradas de carbono al suelo. Sin embargo, su efecto en el stock de carbono en el suelo puede ser variable en función de propiedades del suelo como profundidad, elevación, textura, pH y composición de la comunidad vegetal, que definen las entradas de nitrógeno (Piñeiro *et al.*, 2009).

A escala nacional, estudios a nivel predial han mostrado un aumento del contenido de carbono en la POM luego de apenas dos años de cambios en el manejo. Estos cambios fueron observados en dos de los siete sistemas de producción familiar basados en campo natural donde se pasó a trabajar con una mayor disponibilidad de forraje (Aguerre y Albicette, 2018). Los resultados son más claros cuando se parte de una situación de campo degradado, donde los suelos han perdido carbono. Al recuperarse la producción de forraje de los campos a través de la gestión de variables de manejo del pastoreo y de la dotación animal, los mayores aportes de carbono al suelo permiten aumentar así su contenido de carbono, más que cuando se parte de una condición menos perturbada.

Sin embargo, cuando los suelos han sido bien conservados y están más cerca de su capacidad máxima de retención hay que considerar que es más difícil lograr un aumento del contenido de carbono. Por ejemplo, la introducción de leguminosas y fertilización fosfatada no mostró un aumento en el carbono total del suelo en los primeros 15 cm de profundidad luego de 9 años de la instalación de un mejoramiento de campo de trébol blanco y *lotus corniculatus* en argisoles y planosoles de la Unidad Alférez (Salvo *et al.*, 2008). Si bien se registraron cambios en la distribución del carbono en las diferentes fracciones físicas del suelo, el aumento del contenido de carbono que había sido constatado en los primeros 5 cm fue luego compensado por pérdidas en el siguiente estrato (5-15cm).

TABLA 2. CARBONO ORGÁNICO EN EL SUELO A 0-15 CM DE PROFUNDIDAD Y EN SUS FRACCIONES FÍSICAS (POM > 53 μm Y MAOM < 53 μm), EN CAMPO NATURAL Y EN MEJORAMIENTOS DE CAMPO LUEGO DE 9 AÑOS DE INTRODUCCIÓN DE LEGUMINOSAS Y DOS NIVELES DE FERTILIZACIÓN FOSFATADA (30 Y 60 KG DE P₂O₅)

Profundidad del suelo (cm)	Fracción	TRATAMIENTO		
		Campo natural	Mejoramiento 30	Mejoramiento 60
		(g.kg ⁻¹ suelo)		
0-5	C-POM	11,51 b	16,59 a	15,68 a
	C-MAOM	21,16	19,43	19,05
	C-Total	32,67 b	36,02 a	34,73 a
5-15	C-POM	2,11 b	3,08 a	2,85 a
	C-MAOM	13,69	10,88	11,26
	C-Total	15,80 a	13,96 b	14,11 b
Total 0-15	C-POM	13,62	19,67	18,53
	C-MAOM	34,85	30,31	30,31
	C-Total	48,47	49,98	48,84

[†] Los valores seguidos de una misma letra dentro de la fila no difieren significativamente con $p \leq 0,05$.

C-POM: carbono en la materia orgánica particulada; C-MAOM: carbono asociado a la fracción mineral.

Fuente: adaptada de Salvo et al. (2008).

Resultados similares de estratificación del contenido de carbono se han observado al evaluar mejoramientos de campo en predios particulares, donde en algunos casos el resultado global ha mostrado secuestro de carbono, mientras que en otros casos no, e incluso se han observado casos de pérdidas de carbono (Bondaruk *et al.*, 2020), ya que esta práctica también interacciona con otros factores ya mencionados, como el manejo del pastoreo. Estas relaciones son complejas, y son muchos los factores y las prácticas de manejo que inciden en forma combinada, afectando al stock de carbono del suelo. Por lo tanto, se continúa trabajando para conocer en mayor profundidad cuáles son los factores que podrían estar generando esas diferencias en los resultados, considerando que, en Uruguay, debido al área que ocupan los sistemas pastoriles, una mejora en el stock de carbono debido a la implementación de buenas prácticas

de manejo podría impactar de manera muy significativa en el balance nacional de emisiones de GEI.

4. Herramientas de modelación para estimar cambios en el carbono del suelo

La dinámica de carbono y nitrógeno en el suelo ha sido estudiada en Uruguay utilizando modelos de simulación de diferente nivel de complejidad y estructura. Estas herramientas resumen esquemáticamente el funcionamiento de los sistemas por medio de ecuaciones que representan de manera cuantitativa el estado del arte del conocimiento científico, mejorando la comprensión de procesos que se dan en los suelos y en el crecimiento y desarrollo de cultivos y pasturas. Los modelos basados en procesos se complementan con modelos empíricos que se parametrizan sobre la base de observaciones experimentales. Una vez calibrados y validados, los modelos pueden ser utilizados con diferentes objetivos específicos, para anticipar resultados en el mediano y largo plazo, que de otra manera llevarían años de investigación.

Los modelos Century, AMG y Cycles son modelos basados en procesos que han sido calibrados y validados a partir de experimentos de largo plazo del INIA y de la Facultad de Agronomía, permitiendo estudiar en mayor detalle los mecanismos detrás del balance de carbono en suelos del Uruguay (Baethgen, 2003; Baethgen *et al.*, 2021; Rubio *et al.*, 2014; Pravia *et al.*, 2019). Estos modelos operan a diversas escalas temporales y presentan diferentes niveles de complejidad, permitiendo obtener resultados de acuerdo con distintos intereses específicos.

4.1. Modelación del balance de carbono en el largo plazo

El modelo Century (Parton *et al.*, 1987) ha sido calibrado y validado en Uruguay fundamentalmente sobre la base de los resultados del experimento de rotaciones de largo plazo del INIA La Estanzuela, en distintas etapas y en trabajos con diferentes objetivos, resumidos por Baethgen (2003). Este es uno de los modelos de simulación de C orgánico del suelo más ampliamente usados a nivel mundial, su comportamiento ha sido probado en distintos tipos de suelos y climas. Se trata de un modelo mecanístico que fue desarrollado para simular la dinámica en el largo plazo de carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S) en diferentes sistemas suelo-planta (cultivos,

pasturas, bosques y sabanas). Los estudios realizados en nuestro país se centraron en la capacidad del modelo de simular en el largo plazo las variables más importantes de la dinámica del carbono y nitrógeno total, y los cambios en las fracciones de suelo que ciclan de forma lenta y activa.

La dinámica de carbono fue simulada exitosamente con el modelo Century en cuatro sistemas de producción a lo largo de los más de 50 años del experimento de largo plazo del INIA La Estanzuela (Baethgen *et al.*, 2021). Además de la evolución del carbono total, este modelo de paso mensual mostró buenas estimaciones para varios parámetros observados: masa microbiana, mineralización de carbono y nitrógeno, productividad de pasturas y cultivos. Los resultados de estos trabajos demostraron que el modelo simuló adecuadamente la dinámica del carbono, incluyendo los impactos de la inclusión de pasturas en las rotaciones, así como los efectos de diferentes sistemas de labranza.

El AMG es un modelo simple, de paso anual, que requiere una mínima cantidad de información para su funcionamiento. Su estructura considera tres compartimientos de COS: restos de cultivos, materia orgánica humificada estable y lábil. Los resultados de su calibración para diferentes situaciones edafo-climáticas han sido exitosos, y considerando el escaso número de parámetros necesarios para su calibración, se posiciona como un modelo interesante para ser considerado en la simulación del C orgánico del suelo en el largo plazo (Milesi *et al.*, 2013; Saffi-Hdadi y Mary, 2008). El modelo AMG ha sido calibrado y validado en Uruguay, utilizando información de tres experimentos de largo plazo, ubicados en Colonia y Paysandú. El modelo mostró simular adecuadamente la evolución del COS, siendo la raíz cuadrada media del error promedio de las estimaciones de 0 a 15 cm de $2,43 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Rubio *et al.*, 2014). El modelo AMG constituye por tanto una herramienta prometedora para la modelación de las tendencias a largo plazo del contenido de COS, bajo diferentes manejos, en las condiciones de Uruguay, que podría ser fácilmente utilizada por productores y asesores para el diseño de sistemas de producción que apunten a la conservación del C del suelo.

4.2. Modelación del balance de carbono en el mediano y corto plazo

El modelo Cycles es un modelo basado en procesos, que simula múltiples cultivos y capas de suelo a lo largo de los años, que funciona a paso diario y con paso subdiario para el componente hidrológico. Esto significa que

simula todos los componentes y flujos del sistema para cada día o en intervalos de tiempo incluso menores para algunas variables relevantes como la infiltración de agua en el suelo. Puede simular rotaciones de monocultivos, cultivos de cobertura y forrajeros, asociaciones de cultivos y pasturas multiespecíficas. Varios de sus módulos han sido incorporados de CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003) y C-Farm (Kemanian y Stöckle, 2010), integrando el concepto de saturación de C (Hassink y Whitmore, 1997). Este modelo permite simular todos los componentes del ciclo de N, incluyendo los flujos de gases como el óxido nitroso, por lo que su aplicación en estudios de balance de C hace posible el estudio de emisiones de GEI.

El modelo Cycles obtuvo buenos resultados de validación al simular la evolución de C orgánico del suelo en tres sistemas de rotaciones de largo plazo de la Unidad Experimental del INIA Palo a Pique (Pravia *et al.*, 2019). Para un periodo de 20 años, el modelo obtuvo un error en las estimaciones en los primeros 15 cm de suelo de 4.7 Mg C ha⁻¹, similar al error observado en la información de campo, de acuerdo con el modelo estadístico. Este trabajo incluyó la calibración de parámetros para el crecimiento de 13 especies entre forrajeras y cultivos, por lo que la información de base generada en este trabajo permite proyectar el balance de carbono de diversos sistemas productivos en el país.

4.3. Implementación de modelos de simulación como herramientas de soporte a la toma de decisiones

Estos modelos mecanísticos se complementan con la aplicación de modelos empíricos que pueden ser de suma utilidad para la planificación y toma de decisiones. A partir de la utilización de estos, Uruguay es un ejemplo en la región y en el mundo en cuanto a la implementación de prácticas de prevención y control de la erosión.

La calibración local de la ecuación universal de pérdida de suelo USLE/RUSLE (Wischmeier y Smith, 1978) permite estimar las pérdidas de suelo por erosión en suelos del Uruguay. El ajuste de parámetros realizado por diversos autores nacionales se basa en información generada en las parcelas de escurrimiento ubicadas en Aguas Blancas, en el INIA La Estanzuela y en el INIA Palo a Pique (Figura 6); sumando diversos esfuerzos nacionales a lo largo de varias décadas resumidos y documentados en el manual de la aplicación EROSION 6.0 (García Préchac *et al.*, 2016) y sus actualizaciones disponibles a través del sitio web del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP).

FIGURA 6. VISTA DE LA EROSIÓN HÍDRICA OCURRIDA EN PARCELAS EXPERIMENTALES DEL INIA LA ESTANZUELA



Foto: INIA por Filippi (2019).

La comparación objetiva de alternativas de uso y manejo de suelos y su efecto estimado en términos de pérdidas de suelo por erosión resumidas en la aplicación EROSION 6.0 ayuda a tomar decisiones prácticas para diferentes opciones de conservación a nivel productivo. Esta aplicación permite el diseño de planes de uso y manejo de suelo responsable a nivel nacional, contribuyendo así a la conservación del recurso suelo. Por lo tanto, esta herramienta es útil a la aplicación de políticas públicas de conservación de recursos naturales implementadas desde el MGAP.

Hemos visto que la rotación de cultivos, los sistemas que integran pasturas y la siembra directa reducen el impacto de las pérdidas de carbono por erosión con relación a la utilización de cultivos continuos o el laboreo convencional. Esto ha sido demostrado en Experimentos de Largo Plazo (ELP) establecidos en el país en 1963, 1993 y 1995, en el INIA y en la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República (Fagro-UEDELAR) (Díaz-Rossello, 1992b; Terra y García Préchac, 2001, García Préchac *et al.*, 2004). Esfuerzos interinstitucionales sobre ELP han promovido el desarrollo de herramientas como las actualmente utilizadas para establecer los planes de uso y manejo responsable de suelos bajo agricultura, y podrían complementarse con los avances progresivos sobre modelos mecanísticos.

Contar con una más amplia aplicación y validación de estos modelos ajustados a nivel nacional permitiría proyectar escenarios a escala predial de acuerdo con las decisiones de manejo y uso de suelo de manera integral, contribuyendo a la toma de decisiones informadas por parte de los productores. A escala nacional, favorecerá que el país se enfoque en políticas públicas más acertadas para la conservación del recurso suelo y se acerque hacia un nivel más refinado en el reporte internacional del secuestro de carbono en el suelo para los inventarios nacionales.

5. Consideraciones finales

El secuestro de carbono se puede promover a través de la aplicación de diferentes prácticas aquí presentadas. Estas tecnologías permiten no solamente realizar una contribución al ambiente por la remoción de dióxido de carbono de la atmósfera, sino que, a su vez, tienden a restaurar la salud del suelo cuando se han sufrido condiciones de degradación y a mantener dicha salud en áreas naturales o seminaturales. Un suelo con mayor contenido de carbono representa un mayor reservorio de agua y una fuente de nutrientes, lo que brinda mayores niveles de producción con una menor aplicación de productos sintéticos. Mantener los sistemas de producción operando en el entorno del contenido de saturación de carbono del suelo constituye una estrategia clave para las trayectorias agroecológicas, promoviendo el reciclaje interno de nutrientes y minimizando las necesidades de fertilizantes externos. Maximizando así las sinergias en los procesos biológicos que operan en el sistema, la utilización de prácticas de manejo que tienden a secuestrar carbono contribuye a preservar la salud del suelo y realizar un uso más eficiente de los recursos naturales.

Referencias

Aguerre, V. y Albicette, M. M. (ed.)

(2018), *Co-innovando para el desarrollo sostenible de sistemas ganaderos familiares de Rocha - Uruguay*, Serie Técnica 243, INIA, Montevideo.

Alliaume, F., Rossing, W., García de Souza, M., Giller, K. E. y Dogliotti, S. (2013), "Changes in soil quality and plant available water capacity following systems re-design on commercial vegetable farms", en *European Journal of Agronomy*, 46, pp. 0-19.

Angers, D. A., Arrouays, D., Saby, N. P. A. y Walter, C.

(2011), “Estimating and mapping the carbon saturation deficit of French agricultural topsoils”, en *Soil Use and Management*, 27(4), pp. 448-452.

Arboleya, J., Gilsanz, J. C., Alliaume, F., Leoni, C., Falero, M. y Guerra, S.

(2010), “Manejo sustentable en la producción hortícola intensiva”, en Docampo, R. (ed.), *Manejo de suelos para producción hortícola sustentable*, Serie Actividades de Difusión 624, INIA Las Brujas, Canelones (Uruguay), pp. 9-19.

Baethgen, W.

(2003), “Utilización del modelo Century para estudiar la dinámica de carbono y nitrógeno”, en Moron, A. y Díaz, R. (eds.). *Simposio 40 años de rotaciones agrícolas - ganaderas, 2003*, Serie Técnica 134, INIA, Montevideo, pp. 9-18.

Baethgen, W. E., Parton, W. J., Rubio, V., Kelly, R. H. y Lutz, S.

(2021), “Ecosystem dynamics of crop pasture rotations in a fifty year field experiment in Southern South America: Century model and field results”, en *Soil Science Society of America Journal*. DOI: 10.1002/saj2.20204

Bondaruk, V., Lezama, F., del Pino, A., Piñeiro, G.

(2020), “Overseeding legumes in natural grasslands: Impacts on root biomass and soil organic matter of commercial farms”, en *Science of the Total Environment*, 743 (2020) 140771. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140771>>.

Conant, R. T., Cerri, C. E., Osborne, B. B. y Paustian, K.

(2017), “Grassland management impacts on soil carbon stocks: a new synthesis”, en *Ecological Applications*, 27(2), pp. 662-668.

Díaz, R. y Durán, H.

(2011), “Secuestro de carbono en suelos de sistemas agrícola-lecheros mixtos en Uruguay”, en *Agrociencia Uruguay*, v. 15, 2, pp.109-119.

Díaz, R., Quincke, A., Morón, A., Sawchik, J., Ibáñez, V. y Balzarini, M.

(2009), “Efecto de la degradación del carbono orgánico del suelo en la productividad potencial de los cultivos”, en Morón, A. (coord.), *Efectos de la agricultura, la lechería y la ganadería en el recurso natural suelo: impactos y propuestas: resúmenes expandidos*, Serie Actividades de Difusión 587, INIA, Montevideo.

Díaz-Roselló, R.

(1992a), “Evolución del nitrógeno total en rotaciones con pasturas”, *Rev. INIA Inv. Agr.*, 1, tomo I, pp. 27-35.

Díaz-Roselló, R.

(1992b), “Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos y pasturas”, en *Rev. INIA Inv. Agr.*, Nº 1, tomo I, pp. 103-110.

DIEA

(2019), *Anuario Estadístico Agropecuario 2019*. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca.

Ernst, O. R., Dogliotti, S., Cadenazzi, M. y Kemanian, A. R.

(2018), “Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield”, en *Field Crops Research*, 217, pp. 180-187.

Filippi, D., Sawchik, J., Tiecher, T. y Rubio, V.

(2019), “Efecto de los cultivos de cobertura de invierno y su época de quema sobre estabilidad de agregados, stock de carbono y productividad de la soja. Resumen: 661”, en Congreso Latinoamericano de Ciencias de Suelo, 22.; 2º Congreso Uruguayo de Suelos, 2; Encuentro de la SUCS, 10. Diversidad Productiva: pilar del manejo sostenible de los suelos, SUCS-CLACS-SLSC, Montevideo.

García, A. y Quincke, A.

(2011), “El análisis de potencial de mineralización de nitrógeno: su significado y desarrollo de su aplicación agronómica”, en *INIA La Estanzuela. Jornada de Divulgación: aportes a la zafra de cultivos de invierno*. Serie Actividades de Difusión N° 646, INIA, Durazno (Uruguay), pp. 43-46.

García-Préchac, F., Clérici, C., Hill, M. y Hill, E.

(2016), *EROSION versión 6.0.20: Programa de computación para usar USLE/RUSLE en la Región Sur de la Cuenca del Plata*. Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/programa-erosion-6o-usle-rusle>>.

García-Préchac, F., Ernst, O., Siri-Prieto, G. y Terra, J. A.

(2004), “Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay: review”, en *Soil & Tillage Research*, v. 77, pp. 1-13. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2003.12.002>>.

Grahmann, K., Rubio, V., Terra, J. A. y Quincke, A.

(2020), “Long-term observations in contrasting crop-pasture rotations over half a century: Statistical analysis of chemical soil properties and implications for soil sampling frequency”, en *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 1 enero de 2020, v. 287, artículo N° 106710. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106710>.

Hassink, J. y Whitmore, A. P.

(1997), “A Model of the Physical Protection of Organic Matter in Soils”, en *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61, pp. 131-139.

INGEI

(2017, 2019), *Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. Uruguay, 2019*, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático (MVOTMA, SNRCC), Montevideo.

Kemanian, A. R. y Stöckle, C. O.

(2010), “C-Farm: A simple model to evaluate the carbon balance of soil profiles”, en *Eur. J. Agron.*, 32, pp. 22-29.

Lal, R.

(2008), “Soil carbon stocks under present and future climate with specific reference to European ecoregions”, en *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 81(2), pp. 113-127.

Macedo, I., Pravia, M. V., Castillo, J. y Terra, J. A.

(2021), “Soil organic matter in physical fractions after intensification of irrigated

- rice-pasture rotation systems”, en *Soil and Tillage Research*, 213, p. 105160.
- McNally, S. R., Beare, M. H., Curtin, D., Meenken, E. D., Kelliher, F. M., Calvelo Pereira, R., Shen, Q. y Baldock, J.**
(2017), “Soil carbon sequestration potential of permanent pasture and continuous cropping soils in New Zealand”, en *Global Change Biology*, 23(11), pp. 4544-4555.
- Milesi, L. A., Irizar, A. B., Andriulo, A. E. y Mary, B.**
(2013), “Effect of continuous agriculture of grassland soils of the argentine rolling pampa on soil organic carbon and nitrogen. Applied and Environ”, *SoilSci.*, Volumen 2013, p. 17.
- Morón, A.**
(2003), “Efecto de las rotaciones Cultivos-Pasturas sobre la fertilidad de los suelos en ensayos de larga duración del INIA La Estanzuela (1963-2003)”, en *Informaciones Agronómicas*, 20, diciembre de 2003.
- Parton, W. J., Schimel, D. S., Cole, C. V. y Dojima, D. S.**
(1987), “Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands”, en *Soil Scie. Soc. Am. J.*, 51, pp. 1173-1179.
- Pinto, P.**
(2018), *Evaluación de la fijación biológica de nitrógeno y la producción de raíces en distintos cultivos de servicios y sus efectos sobre las reservas de C y N orgánico del suelo*. Tesis de doctorado de la Universidad de Buenos Aires en el área de Ciencias Agropecuarias otorgado por la Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. Escuela para Graduados. Disponible en: <<http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2018pintopriscila.pdf>>.
- Piñeiro, G., Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Jackson, R. y Oesterheld, M.**
(2009), “Grazing effects on belowground C and N stocks along a network of cattle enclosures in temperate and subtropical grasslands of South America”, en *Global Biogeochemical Cycles* 23, doi:10.1029/2007GB003168.
- Piñeiro, G., Paruelo, J. M. y Oesterheld, M.**
(2006), “Potential long-term impacts of livestock introduction on carbon and nitrogen cycling in grasslands of Southern South America”, en *Global Change Biology*, 12, pp. 1267-1284.
- Pravia, M. V. y Kemanian, A. R.**
(2017), *Soil Carbon and Nitrogen Saturation in Crop-Pasture Agricultural Systems* (PhD Dissertation), Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania.
- Pravia, M. V., Kemanian, A. R., Terra, J. A., Shi, Y., Macedo, I. y Goslee, S.**
(2019), “Soil carbon saturation, productivity, and carbon and nitrogen cycling in crop-pasture rotations”, en *Agricultural Systems*, 171, pp. 13-22. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.11.001>>.

Rubio, V.

(2018), *Diagnóstico de la calidad física del suelo: impacto en el cultivo de maíz, efecto del parapló como medida correctiva*. Tesis de Maestría, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo.

Rubio, V., Díaz, R. y Quincke, A.

(2018), “Crop production systems and soil organic carbon: what are the effects on crop production?”, en Conference, 21-23 May 2018, Rothamsted (Reino Unido), *The future of long-term experiments in agricultural science*. Conference Programme, p. 47.

Rubio, V., Pérez-Bidegain, M., Beretta, A., Barolin, E. y Quincke, A.

(2019), “Impacto de propiedades físico-químicas en la estabilidad estructural de molisoles”, en *Ciencia del suelo*, 37, pp. 367-371.

Rubio, V., Sawchik, J., Ernst, O., Quincke, A. y Siri, G.

(2014), “Calibración/validación del modelo AMG para simular la evolución del stock de carbono orgánico en suelos del Uruguay” [Documento en línea], Sociedad Uruguaya de Ciencia del Suelo y Rama Uruguaya de la Organización Internacional de Investigación en Laboreo del Suelo (ISRRO). En: 1 Congreso Uruguayo de Suelos 2014-VI. Encuentro de la sucs, “Intensificando el conocimiento del suelo y medio ambiente para producir más y mejor”, Colonia del Sacramento (Uruguay), ISBN 978-9974-99-587-1.

Saffih-Hdadi, K. y Mary, B.

(2008), “Modeling consequences of straw residues export on soil organic carbon”, en *Soil Biology and Biochemistry*, v. 40(3), pp. 594-607.

Salvo, L., Terra, J., Ayala, W., Bermúdez, R., Correa, J., Avila, P. y Hernández, J.

(2008), Impacts of long-term phosphorous fertilization and addition of perennial legumes on a temperate natural grassland: II. Total and particulate soil organic carbon. *Multifunctional Grasslands in a Changing World*. Volume II. Editado por Organizing Committee of 2008 IGC/IRC Conference, p. 382 (ISBN 978-7-218-058554-2).

Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A., y Paustian, K.

(2002), “Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils”, en *Plant Soil*, N° 241, pp. 155-176.

Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F., y Six, J.

(2007), *Soil carbon saturation: concept, evidence and evaluation*. *Biogeochemistry*, 86(1), 19-31. doi.org/10.1007/s10533-007-9140-0

Stewart, C. E., Paustian, K., Conant, R. T., Plante, A. F. y Six, J.

(2008), “Soil carbon saturation: evaluation and corroboration by long-term incubations”, en *Soil Biology and Biochemistry*, 40(7), pp. 1741-1750. DOI: 10.1016/j.soilbio.2008.02.014.

Stöckle, C. O., Donatelli, M. y Nelson, R.

(2003), “CropSyst, a cropping systems simulation model”, en *Eur. J. Agron.*, 18, pp. 289-307.

Terra, J. A. y García-Préchac, F.

(2001), “Efecto de la intensidad de uso y laboreo sobre el recurso suelo y su calidad”, en Terra, J. A. y García-Préchac, F. (eds.), *Siembra directa y rotaciones forrajeras en las Lomadas del Este: síntesis 1995-2000*, Serie Técnica 125, INIA, Montevideo, pp. 8-33.

Terra, J. A., Pravia, V., Salvo, L., Carbone, A. M. y García-Préchac, F.

(2009), “Desde la viabilización de la siembra directa en suelos marginales hasta la oportunidad del manejo sitio específico de los mismos”, en [Actas], Hoffman, E., Ribeiro, A., Ernst, O. y García, F. O. (eds.), *Simposio Nacional de Agricultura de Secano*, 1, Facultad de Agronomía, UDELAR, IPNI Cono Sur, Paysandú, pp. 91-110.

Wiesmeier, M., Hübner, R., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., von Lützow, M. y Kögel Knabner, I.

(2014), “Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation”, en *Global change biology*, 20(2), pp. 653-665.

Wischmeier, W. H. y Smith, D. D.

(1978), *Predicting erosion losses, a guide to conservation planning*, USDA (Agriculture Handbook, 537), Washington.

Capítulo 9

Coberturas vegetales y manejo del suelo en la citricultura de Uruguay

Carmen Goñi y Álvaro Otero

1. Introducción

La citricultura en Uruguay se ha caracterizado por una larga trayectoria de comercialización de fruta cítrica en fresco en los mercados europeo y asiático y, en los últimos años, en el mercado americano.

Actualmente, la citricultura de Uruguay se enfrenta a cambios relevantes en los consumidores y en la sociedad en su conjunto. El concepto de calidad de los consumidores ha evolucionado y plantea mayores exigencias, no solo en la calidad externa (cosmética) o interna (sabor, nutracéuticos y ausencia de semillas) de la fruta en fresco, sino también en los niveles de residuos, que deben ser nulos o tender al mínimo. El sector productivo busca responder a estas demandas evolucionado hacia sistemas más sostenibles, eficientes en cuanto a su producción en relación con los recursos naturales y la biodiversidad.

La innovación en sistemas de producción más sostenibles y eficientes pasa por la identificación de puntos clave de mejora en el uso de los recursos naturales involucrados en todo el proceso de producción. Proceso de producción en el cual es mandatorio el cuidado de los recursos naturales como base de la sostenibilidad. Al mismo tiempo, los consumidores son cada vez más conscientes de la necesidad de cuidar el uso de estos recursos (huellas del agua y del carbono), así como de reducir los niveles de los residuos y prevenir sus efectos en los ecosistemas.

En el sistema productivo de Uruguay, el suelo es uno de los reservorios más importantes de biodiversidad y muchas veces su rol no es tenido en cuenta en los sistemas intensivos de producción. En este sentido, se ha observado un cambio progresivo en lo que se entiende por calidad de un suelo. Arshad y Coen (1992) lo definen como la capacidad para acep-

tar, almacenar y reciclar agua, minerales y energía para la producción de cultivos, preservando un ambiente sano. Para Gregory *et al.*, (1994), la calidad de un suelo es la medida de su capacidad para funcionar adecuadamente con relación a un uso específico productivo. Más recientemente se han incorporado conceptos basados en la multifuncionalidad del suelo y no tanto en su uso específico, pero estos conceptos siguen evolucionando (Singer y Erwing, 2000). La Soil Science Society of America (Karlen *et al.*, 1997) define la salud de un suelo como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, sostener la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat.

En una visión más amplia, Larkin (2015) resumió recientemente la salud del suelo como su capacidad continua para funcionar como un sistema vital para sostener la productividad biológica, mantener la calidad del medio ambiente y promover la salud de las plantas, los animales y los humanos (Doran *et al.*, 1996). Como lo refiere Larkin (2015), los términos calidad del suelo y salud del suelo a menudo se usan indistintamente, y ciertamente fueron desarrollados a partir de los mismos conceptos generales. La calidad del suelo se refiere a la aptitud de un suelo en particular para un uso específico, mientras que la salud del suelo alude por lo general a aspectos más amplios de sus múltiples funciones y hace hincapié en el suelo como un sistema integrado, dinámico y vivo.

2. La línea de base en citricultura. Manejo clásico de suelos en la citricultura en Uruguay

El diseño general de las plantaciones comerciales cítricas en Uruguay se realiza en fracciones de la superficie del predio de 2 ha (Otero y Zefferino, 2007), llamadas “cuadros de producción”. Cada cuadro de producción está habitualmente compuesto por una variedad comercial, asociada a un determinado portainjerto y a una fecha de plantación, lo que facilita la operación del manejo general, nutricional, sanitario y del riego. Los cuadros de producción se encuentran rodeados de cortinas vegetales rompeviento que mejoran enormemente el control sanitario y la calidad externa de la fruta. Si bien en el diseño de la plantación se busca asociar los cuadros de producción a un solo tipo de suelo en particular, la variabilidad de las diferentes fases de los suelos en el área cítrica hace muy difícil esta tarea, teniendo dentro del mismo cuadro de producción diferentes suelos o distintas fases del mismo.

El manejo del suelo en la entrefila de las plantaciones ha sufrido una evolución importante desde los comienzos de la citricultura de exportación en los años 70, con la constante de dejar crecer la vegetación espontánea en la entrefila y controlar su crecimiento con cortes mecánicos (“pasteras”). Esta práctica, en conjunto con las aplicaciones sanitarias y de cosecha, ocasiona una compactación importante en el suelo, especialmente por el peso de las máquinas al transitar cuando las condiciones del suelo no son adecuadas.

Con frecuencia se mantiene en la fila de plantación el suelo desnudo, sin malezas, por medio del uso de herbicidas selectivos o de amplio espectro, en función de las necesidades y de acuerdo con la población de malezas presente. Esta práctica suele realizarse tanto en plantaciones nuevas como adultas, donde la copa de los árboles, al tocarse entre sí, suelen mantener cubierto el suelo. En los últimos años, algunas modificaciones de esta práctica se han introducido en los diferentes predios, especialmente por motivos sanitarios, como ser la incorporación de biomasa vegetal a la fila bajo los árboles para mejorar el control de mancha negra (Pérez y Alves, 2015), dejando “empastar” ligeramente la fila de los árboles para un control posterior con herbicidas o simplemente a través del corte manual o por medios mecánicos de las malezas.

Esta forma de manejar el suelo está directamente asociada a las condiciones climáticas de Uruguay, donde el empastado espontáneo de la entrefila frena la velocidad del agua de la lluvia, disminuyendo la erosión hídrica y mejorando la transitabilidad de la maquinaria.

El litoral norte del río Uruguay presenta condiciones muy adecuadas para la producción de fruta fresca cítrica de calidad, por su alta heliofanía invernal y por su mayor radiación global. Estas condiciones de mayor temperatura del aire en los meses estivales y consecuente reducción del riesgo de heladas, en comparación con otras regiones del país, en conjunto con el tipo de suelo hacen que esta región sea preferida para este tipo de cultivo. Sin embargo, los suelos predominantes tienen texturas francas y franco-arenosas en el horizonte A, con relativa baja cantidad de MO (0,5-2,5%) y con un horizonte B textural, haciendo que estos suelos tengan un mayor riesgo de erosión. En conjunto con la mayor frecuencia de altas intensidades de precipitación de la región, se han constatado situaciones donde la erosión del primer horizonte del suelo deja sistemáticamente expuesta parte del sistema radicular (Figura 1), con una mayor reducción del sistema radicular en las capas de suelo más apropiadas para su crecimiento y desarrollo.

FIGURA 1. PORTAINJERTO (*PONCIRUS TRIFOLIATA*) EXPUESTO EN PLANTACIÓN DE LA VARIEDAD AFOURER. SE PUEDE VER LA PÉRDIDA DEL HORIZONTE A. A LA DERECHA, SUELO DESCUBIERTO EN LA FILA, CON ALTO RIESGO DE EROSIÓN, EFECTO DEL GOLPE DE LAS GOTAS DE LLUVIA SOBRE EL SUELO



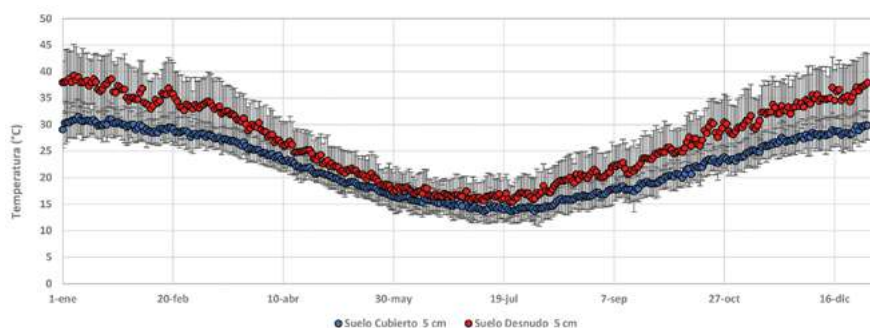
Fuente: Elaboración propia.

La temperatura es uno de los principales factores que afectan los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo y, en consecuencia, influencia el ambiente donde crecen las plantas (Scott, 2000). En el área citrícola de Salto, durante los meses de diciembre y enero los suelos desnudos pueden llegar a tener una temperatura máxima diaria de hasta 10 °C por encima de la temperatura de un suelo cubierto por pastura, llegando a tener valores máximos mayores a 45 °C a los 5 cm de profundidad (Figura 2). Esta variación térmica del suelo muchas veces ocasiona un menor crecimiento y desarrollo de las raíces en las capas superiores del suelo, especialmente en condiciones de sequo.

A diferencia de otras zonas citrícolas donde la precipitación es más escasa, en Uruguay la variabilidad de la frecuencia e intensidad de la precipitación hace muy poco apropiado el sistema actual de producción para la conservación de la calidad del suelo, especialmente por dejar zonas del suelo expuestas por largo tiempo sin cobertura vegetal alguna, facili-

tando enormemente el deterioro del mismo. En consecuencia, los suelos predominantes de la región citrícola del litoral norte tienen propiedades térmicas e hídricas que los hacen muy apropiados para el cultivo de los cítricos, pero que, para mantener su potencial productivo en el mediano y largo plazo, deben ser cuidados en forma adecuada dada su fragilidad y consecuente propensión a la erosión y a la pérdida de carbono orgánico.

FIGURA 2. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DIARIA MÁXIMA PROMEDIO DEL SUELO A LOS 5 CM DE PROFUNDIDAD EN SUELO DESNUDO (HERBICIDA) Y CUBIERTO POR PASTURA (5-10 CM)



Nota: Las barras representan el desvío estándar de la media diaria. Suelo Argisol Eutríco con horizonte A franco arenoso. Período 1985-2015. Estación INIA Salto Grande. Fuente: Elaboración propia.

Dado que la región del litoral norte fue la zona pionera en el desarrollo de la citricultura de exportación, se encuentra una diversidad importante de situaciones de manejo del suelo que coexisten, de acuerdo con la edad de las plantaciones y la historia de manejo del predio. Teniendo en cuenta esta diversidad, se identifican algunos de los puntos débiles que afectan la calidad de los suelos y, en consecuencia, su sostenibilidad biológica y física (Tabla 1).

TABLA 1. DEBILIDADES EN EL MANEJO DE SUELOS EN LA CITRICULTURA ACTUAL

- Mayor fragilidad de los suelos con horizonte A franco y franco-arenoso.
- Excesivo uso de herbicidas en la fila de plantación.
- Erosión evidente en los camellones de la fila de plantación.
- Formación de flujos preferenciales de agua sobre la superficie del suelo.
- Sistema radicular expuesto sobre la superficie del suelo.
- Evidencias de compactación de suelos.
- Generación de resistencia a ciertos herbicidas en las malezas.
- Reducción de la infiltración.

Fuente: *Elaboración propia.*

La fragilidad de los suelos de la región, en combinación con manejos previos inadecuados muchas veces asociados a una mala sistematización y planteo de los cuadros, ha llevado a una pérdida progresiva en la calidad del suelo, entre otras cosas por las pérdidas de carbono y nutrientes del mismo, con descensos de los rendimientos y aumento de los costos de producción.

3. Herramienta propuesta

El manejo del suelo con diferentes cubiertas (*mulch*) es una técnica conocida y utilizada desde hace tiempo en los cultivos hortifrutícolas a nivel mundial (Sirrinc *et al.*, 2008), con gran éxito en la mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo (Merwin y Stiles, 1994; Sánchez *et al.*, 2007; St. Laurent *et al.*, 2008), así como en las sanitarias y productivas, por efecto directo en el ambiente del crecimiento del sistema radicular de las plantas y en las comunidades de la microflora del suelo (Yao *et al.*, 2005; Morlat y Jacquet, 2003). Estas coberturas mejoran la productividad de mandarinas y arándanos (Abouzienda *et al.*, 2008; Burkhard *et al.*, 2009), generando mejores condiciones para la planta (Teravest *et al.*, 2011). La cobertura de la superficie del suelo con residuos vegetales es una técnica adecuada para modificar la temperatura del suelo (Van Doren y Allmaras, 1978), a pesar de que el uso de estas coberturas podría coexistir con la inmovilización de nutrientes (Teasdale y Mohler, 2000).

Dos tecnologías desarrolladas a través de la experimentación nacional han demostrado un enorme beneficio en el manejo de suelos en la citricultura:

- i) la incorporación de *mulches* en la fila de plantación y,
- ii) el manejo de la entrefila con pasturas sembradas.

Ambas técnicas pueden ser implementadas en conjunto o por separado, en función de las metas en cada sistema de producción.

3.1. La incorporación de mulches en la fila de plantación

Esta técnica consiste en la incorporación de materiales vegetales en la línea de plantación de los árboles. Con un ancho variable, de acuerdo con el tamaño de la planta, pero siempre tratando de que el ancho de la faja con la cobertura sea mayor que la proyección de la copa sobre el suelo. Se probaron principalmente dos materiales de cobertura (*mulching*): chip de *Eucalyptus* compostado (52 kg m^{-2}) con una relación C/N = 1,5 y compost vegetal (30 kg m^{-2}) con una relación C/N = 10. Estos volúmenes de aplicación permitieron generar una capa de unos 15-20 cm de espesor. En una segunda instancia, también se evaluaron otros materiales para la formación del *mulch*: cáscara de arroz, paja, plástico negro y se los comparó con el compost, con el chip de *Eucalyptus* y con el testigo con aplicación de herbicida en toda la fila (Figura 3).

El compost es el producto fabricado mediante la descomposición biológica aeróbica controlada de materiales biodegradables. Estos materiales, durante el proceso de compostado, alcanzan temperaturas que reducen significativamente la viabilidad de patógenos y semillas de malezas (de acuerdo con los estándares EPA 40 CFR 503) y estabilizan el carbono de tal manera que es beneficioso para el crecimiento de las plantas. El compost se usa generalmente como enmienda del suelo, pero también puede contribuir con nutrientes para las plantas. El compost terminado generalmente se tamiza para reducir el tamaño de las partículas y mejorar la incorporación al suelo (US Composting Council, 2021).

El producto obtenido del proceso de compostaje va a depender en consecuencia del material vegetal que se use como materia prima biodegradable. En este sentido, el compostaje de chip de *Eucalyptus* es un proceso que mejora sustancialmente las características del producto final, a tal punto de no recomendarse la incorporación de chips de *Eucalyptus* en la plantación sin ser compostados previamente. Se ha observado, con la utilización de chips sobre la fila de plantación sin este proceso, que redu-

ce el desarrollo radicular de los cítricos, posiblemente por la percolación de sustancias de origen vegetal (compuestos fenólicos) dentro del suelo de la plantación. En el caso particular de estos experimentos, se usaron chips que estuvieron compostándose a la intemperie por más de 6 años, lo que llevó no solo a un cambio en la degradación de los compuestos de carbono, sino también al aumento de la microflora y, en consecuencia, a un leve aumento del nitrógeno en el compost generado.

Posiblemente el efecto ambiental más importante en el suelo sea la reducción de la amplitud térmica en sus primeros 10 cm y el aumento de la disponibilidad de agua en su misma capa, al comparar el uso de mulch con el de herbicida total en la plantación de los árboles. Estas dos variables físicas permiten un mejor ambiente para el crecimiento y desarrollo de las raíces; y, por consiguiente, de la producción. Sin dejar de lado la eliminación de la fuerza cinética del golpeteo de las gotas de agua de lluvia en la superficie del suelo, reduciendo potencialmente la erosión del mismo.

FIGURA 3. MANEJO DE LA FILA CON CHIPS DE *EUCALYPTUS* COMPOSTADOS Y CON SUELO DESNUDO CON HERBICIDA EN LA FILA. PLANTAS JÓVENES DE VALENCIA DELTA.



Fuente: Elaboración propia.

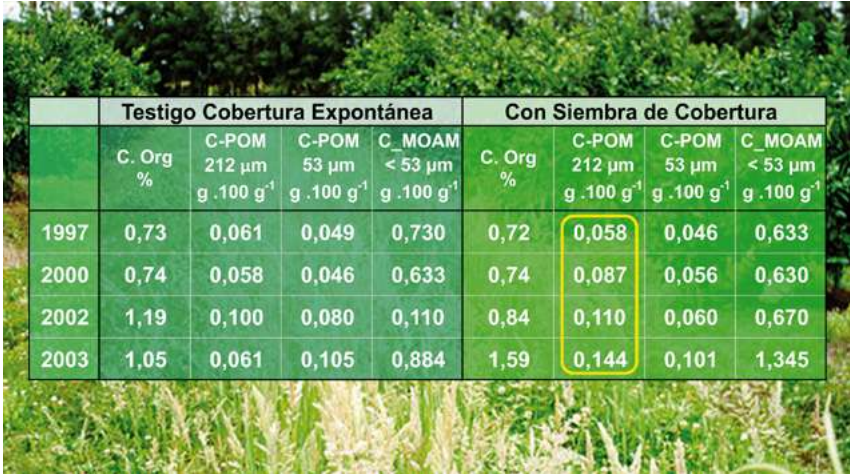
3.2. El manejo de la entrefila con pasturas sembradas

La siembra de coberturas vegetales en la entrefila de las plantaciones cítricas en Uruguay no ha sido fuertemente explorada, a pesar del potencial que presenta para mejorar la productividad y la biodiversidad del suelo en nuestra citricultura (Goñi, 2007). La cobertura vegetal viva y

permanente permite controlar mejor la erosión del suelo, reduciendo el impacto de las gotas de la lluvia y aumentando la rugosidad de la superficie del suelo, disminuyendo la velocidad de escurrimiento del agua y, en definitiva, de la erosión hídrica superficial. También ayuda a controlar la compactación, principalmente ocasionada por el pasaje reiterado de la maquinaria en la misma huella. La cobertura vegetal compite por espacio con las malezas persistentes, pudiendo además mejorar la calidad del suelo y el ciclo de los nutrientes, a través de la especie seleccionada y de su sistema radicular.

El empastado con vegetación espontánea es actualmente la técnica de manejo de la entrefila más utilizada en la citricultura de Uruguay. Esta técnica requiere de un mantenimiento con cortes frecuentes y tiene el riesgo de que, con el correr del tiempo, la gramilla (*Cynodon dactylon*) sea la especie predominante. La alternativa propuesta por Goñi (2007) hace ya unos años fue la siembra directa en la entrefila de especies o mezclas de especies que favorecieran la mejora de la materia orgánica del suelo desplazando la instalación de la gramilla como cobertura principal de la entrefila. Brevemente, la técnica busca la sustitución del empastado, o cobertura vegetal espontánea, por un tapiz vegetal de especies o mezcla de especies en la superficie de la entrefila de la plantación. Se pretende evitar la competencia por los nutrientes o el agua del cultivo, y que se minimice el efecto de la compactación por la maquinaria agrícola y la erosión hídrica. Para un correcto desarrollo de la nueva cobertura sembrada, a los efectos de mantener un tapiz vegetal denso, y de acuerdo con la especie seleccionada, se debe hacer una resiembra anual de la misma durante el mes de marzo. La práctica de hacer cortes periódicos de la cobertura, dejando el corte sobre el mismo tapiz, favorece el reciclado de los nutrientes en el suelo. Algunas de las especies evaluadas en la entrefila fueron: *Holcus* (5 kg semilla ha⁻¹), trébol blanco (5 kg ha⁻¹), trébol rojo (12 kg ha⁻¹), trébol alejandrino (12 kg ha⁻¹), *Ornithopus* (4 kg ha⁻¹), cebadilla (30 kg ha⁻¹), Festuca (12 kg ha⁻¹) y raigrás (18 kg ha⁻¹) (Figura 4).

FIGURA 4. ESTADO DE DESARROLLO DE DIFERENTES ESPECIES Y MEZCLAS USADAS EN LA COBERTURA DE ENTREFILA



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al manejo de la materia orgánica en el suelo de los ecosistemas, especialmente en los agrícolas, es de primer interés la estabilidad de los agregados del suelo y de la materia orgánica del suelo, debido a su papel central en la disponibilidad de agua y nutrientes a mediano plazo y en la estabilidad estructural del suelo (Gosling *et al.*, 2013). Con este enfoque, se midió la evolución de la materia orgánica y sus componentes particulados del suelo en la entrefila de plantas cítricas con dos situaciones de manejo de la entrefila: a) en una situación clásica de vegetación espontánea como cobertura del suelo; y b) en una situación con un manejo de siembra directa de cobertura vegetal; en este caso, una mezcla de *Holcus lanatus* y *Trifolium repens* (trébol blanco).

La evolución de la materia orgánica (expresada como carbono orgánico) se monitoreó desde la plantación; se partió con un nivel bajo de materia orgánica del suelo (1,27% = 0,74% C org x 1,72). El contenido de la materia orgánica del suelo fue aumentando lentamente en ambas situaciones de manejo de la entrefila, con una mayor tendencia en la cobertura de la mezcla. El contenido de la materia orgánica proveniente de las partículas de suelo más grandes (212 µm) aumentó casi al doble en el suelo con la cobertura sembrada (0,144 g .100 g⁻¹), respecto del suelo de la entrefila con cobertura espontánea (0,061 g .100 g⁻¹) (Figura 5).

La fracción más liviana ($<53 \mu\text{m}$) de la materia orgánica del suelo y la fracción de 212 y $> 53 \mu\text{m}$ están estrechamente asociadas al crecimiento de la microflora y el suministro de nutrientes (Haynes, 1999; Alvarez *et al.*, 1998) y representan también las fracciones de la materia orgánica del suelo que más rápidamente responden al manejo del suelo (Carter, 2002), tanto para su incremento como para su degradación.

FIGURA 5. EVOLUCIÓN DEL CARBONO ORGÁNICO ($C_{\text{ORG}} \% * 1,72 = \text{MO}\%$) DEL SUELO Y DE LOS COMPONENTES DE LA MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA DEL SUELO EN EL TESTIGO CON COBERTURA ESPONTÁNEA (EMPASTADO NATURAL) Y EL TRATAMIENTO CON SIEMBRA DE COBERTURA VEGETAL EN LA ENTREFILA



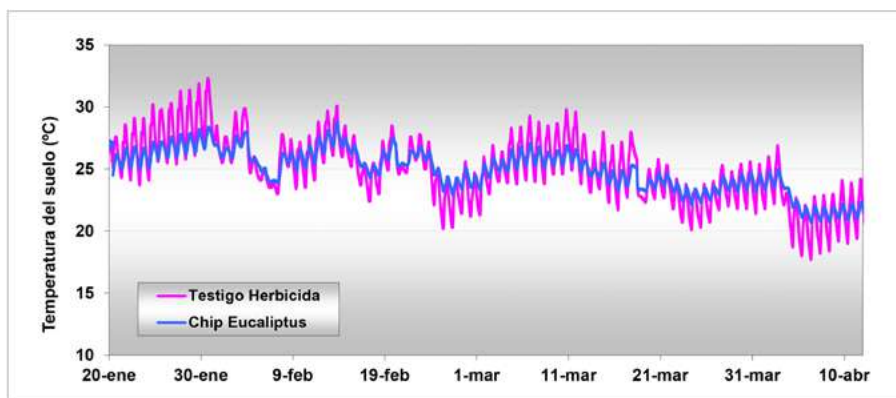
Referencias: C-POM: carbono-materia orgánica particulada, $212 \mu\text{m}$ y $53 \mu\text{m}$. C-MOAM: carbono-materia orgánica asociada a la fracción mineral $< 53 \mu\text{m}$. Profundidad de $0-15 \text{ cm}$. Cobertura vegetal en la entrefila (siembra directa) de Holcus y trébol blanco.
Fuente: Elaboración propia.

3.3. Resultados de la incorporación de mulches en la fila de plantación

En comparación con la técnica tradicional de dejar desnudo el suelo bajo la fila de plantación de los cítricos y de aplicar herbicidas selectivos o de amplio espectro, la incorporación de coberturas orgánicas como el chip o la paja ha mostrado ventajas significativas en la producción.

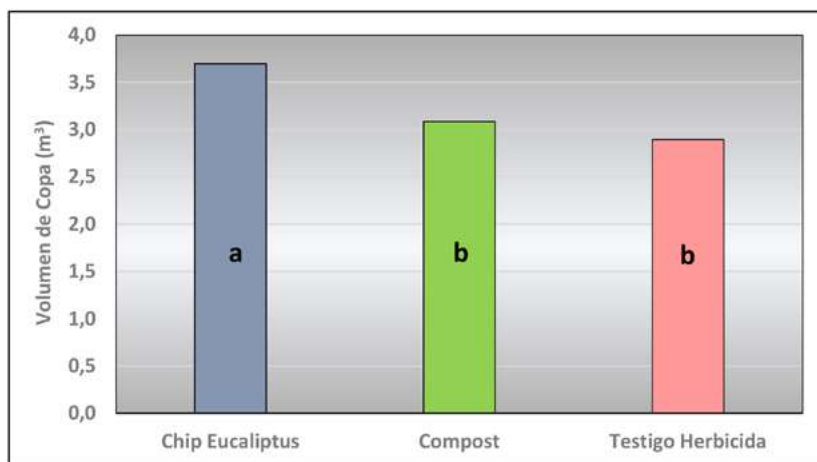
En este sentido, el principal efecto físico está relacionado con la disminución de la amplitud térmica de los primeros 10 cm de profundidad del suelo y también con el mantenimiento más alto del contenido de agua en el suelo en condiciones de secano. Ambos efectos han tenido un gran impacto en el aumento del crecimiento de las plantas, su fisiología, el rendimiento de los frutos, así como en la reducción del enmalezamiento (Figura 6, Figura 7, Tabla 2). Más allá de la notoria ventaja de evitar el uso reiterado de herbicidas totales en la fila de plantación, por el alto riesgo de incremento de la erosión hídrica del suelo, con la utilización de chips de *Eucalyptus* compostados se logró aumentar el rendimiento acumulado en 25% durante los cinco períodos de crecimiento, con respecto a las plantas que tenían herbicida en la entrefila (Tabla 2).

FIGURA 6. EVOLUCIÓN DE LA TEMPERATURA DEL SUELO A 10 CM DE PROFUNDIDAD, CON SUELO DESCUBIERTO (TESTIGO) Y CON COBERTURA DE CHIPS DE *EUCALYPTUS* COMPOSTADOS (VERANO)



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 7. VOLUMEN DE COPA AL TERCER AÑO DE INSTALACIÓN DEL ENSAYO



Nota: Las letras en las diferentes medias de los manejos del suelo corresponden a diferencias significativas por el test de Duncan ($p < 0,05$).

Fuente: Elaboración propia.

TABLA 2. RENDIMIENTO DE FRUTOS EN LA COSECHA A PARTIR DEL SEGUNDO AÑO DESDE LA PLANTACIÓN, EN SECANO Y BAJO LOS TRES MANEJOS DEL SUELO EN LA FILA

	RENDIMIENTO (T HA ⁻¹)					
	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013*	2009-2013
Años desde plantación	2 años	3 años	4 años	5 años	6 años	Acumulado
Chips <i>Eucalyptus</i>	3,9 a	10,7 a	13,5 a	22,4 a	17,7 b	68,2 a
Compost	2,7 ab	7,6 b	9,8 b	19,3 b	21,5 a	60,9 ab
Testigo herbicida	1,5 b	7,1 b	10,5 b	18,3 b	17,3 b	54,7 b

** Año de fuerte helada en julio de 2012, afectando el desarrollo de las plantas.*

Las medias en las columnas con diferente letra son significativamente distintas por TRM Duncan ($p < 0,5$).

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Resultados del manejo de la entrefila con pasturas sembradas

El manejo de la entrefila de las plantaciones con la siembra de pasturas tiene ventajas y desventajas.

Entre las ventajas, la cobertura vegetal, al mejorar la estructura del suelo, aumenta los macroporos que, sinérgicamente con la mejora en el potencial de disponibilidad de agua del suelo, ocasionan que el ambiente de crecimiento de las raíces les sea más favorable y generan mayor actividad microbiana. Adicionalmente, reducen el efecto de la compactación del suelo provocado por el pasaje de maquinaria pesada en la entrefila de las filas de plantación. Al tener el suelo cubierto, se frena enormemente el impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie, disminuyendo el efecto de la erosión hídrica.

Como desventajas podríamos citar el aumento de los costos adicionales al cultivo, que en realidad pasan a ser una inversión en el largo plazo del predio, con fertilización adicional a la entrefila y una correcta selección de las especies cultivadas, con su propio manejo de corte y resiembra.

FIGURA 8. TRÉBOL SEMBRADO EN LA ENTREFILA DE PLANTACIONES JÓVENES DE CÍTRICOS, SAN MIGUEL GLOBAL SA



Fuente: Elaboración propia.

4. Conclusiones

La meta de mantener sistemas productivos sostenibles y productivamente más adecuados al medio ambiente de Uruguay nos lleva a mejorar los actuales conceptos y técnicas utilizados en el manejo de las plantaciones cítricas.

Los conceptos de calidad y salud del suelo están en continua evolución en el ámbito profesional, académico y en la sociedad en su conjunto.

Las técnicas convencionales de manejo del suelo en Uruguay han ocasionado –muchas veces– un incremento y/o una mala utilización de insumos agropecuarios, que han llevado a un aumento en la compactación del suelo (especialmente en la entrefila), y en la erosión hídrica en la fila de plantación, y, con frecuencia, a un importante descontrol en el manejo de las malezas.

La propuesta de uso de técnicas de cobertura sobre la fila de plantación permite no solo un incremento en el rendimiento, sino una mejor eficiencia de uso del agua, mayor estabilidad en la temperatura del suelo y, en consecuencia, un sistema radicular más superficial y sano.

La propuesta de uso de coberturas vegetales vivas en la entrefila de plantación permite incorporar más y mejor materia orgánica al suelo, reduciendo la compactación y mejorando posiblemente las condiciones para el desarrollo de la microflora y microfauna del suelo.

Bibliografía

- Abouzienna, H. F., El-Metwally, I. M., Sharma, S. D. y Sing, M.** (2008), “Comparison of weed suppression and mandarin fruit yield and quality obtained with organic mulches, synthetic mulches, cultivation and glyphosate”, en *HortScience*, 43(3), pp. 795-799.
- Álvarez, C. R., Álvarez, R., Grigera, S. y Lavado, R. S.** (1998), “Associations between organic matter fractions and the active soil microbial biomass”, en *Soil Biol Biochem*, 30 pp. 767-773.
- Arshad, M. A. y Coen, G. M.** (1992), “Characterization of soil quality. Physical and chemical criteria”, en *Amer. J. of Alternative Agriculture*, 7, pp. 25-31.
- Burkhard, N., Lynch, D., Percival, D. y Sharifi, M.** (2009), “Organic mulch impact on vegetation dynamic and productivity of highbush blueberry under organic production”, en *HortScience*, 44(3), pp. 688-693.

Carter, M. R.

(2002), "Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions", en *Agron J.*, 94, pp. 38-47.

Doran, J. W., Sarrantonio, M. y Leibig, M.

(1996), *Soil health and sustainability. In Advances in Agronomy* (Sparks, D. L., ed.), Academic, San Diego (California), pp. 1-54.

Goñi, C.

(2007), "Oportunidades para el manejo de suelo en cítricos, con una óptica de conservación y mejora", INIA, *SAD*, N° 517, pp. 26-33.

Gosling, P., Parsons, N. y Bending, G. D.

(2013), "What are the primary factors controlling the light fraction and particulate soil organic matter content of agricultural soils?", en *Biol Fertil Soils*, 49, pp. 1001-1014.

Gregory, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, C. M. y Ellert, B. H.

(1994), "Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils", en *Canadian J. of Soil Sci.*

Haynes, R. J.

(1999), "Labile organic matter fractions and aggregate stability under short-term, grass-based leys", en *Soil Biol Biochem*, 31, pp. 1821-1830.

Hutchinson, J. J., Campbell, C. A. y Desjardins, R. L.

(2007), "Some perspectives on carbon sequestration in agriculture", en *Agricult Forest Meteorol*, 142, pp. 288-302.

Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F. y Schuman, G. E.

(1997), "Soil quality: a concept, definition and framework for evaluation", en *Soil Science Society of America Journal*, 61, pp. 4-10.

Larkin, R. P.

(2015), "Soil Health Paradigms and Implications for Disease Management", en *Annu. Rev. Phytopathol.*, 53, pp. 199-221.

Merwin, L. A. y Stiles, W. C.

(1994), "Orchard groundcover management impacts on apple tree growth and yield and nutrient availability and uptake", en *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 119, pp. 209-215.

Morlat, R. y Jacques, A.

(2003), "Grapevine root system and soil characteristics in a vineyard maintained long term with or without interrow sward", en *Amer. J. Enol. Viticul.*, 54, pp. 1-7.

Otero, A. y Zefferino, E.

(2007), *Algunos aspectos a tener en cuenta para el muestreo de árboles y frutas con síntomas de Xanthomonas axonopodis pv. citri en montes cítricos*, Serie Técnica 171, INIA, Montevideo, 26 pp.

Pérez, E. y Alves, P.

(2015), *Validación de una estrategia de manejo integrado para el control de mancha negra de los cítricos*, Serie de actividades de difusión 752, INIA, pp. 118-120.

Sánchez, E. E., Giagetto, A., Cichon, L., Fernandez, D., Aruani, M. C. y Curetti, M.

(2007), "Cover crops influence soil properties and tree performance in an organic apple (*Malus domestica* Borkh) orchard in northern Patagonia", en *Plant Soil*, 292, pp. 193-205.

Scott, H. D.

(2000), *Soil physics: agricultural and environmental applications*, Iowa State University Press, Ames (EE. UU.), 421 pp.

Singer, M. y Erwin, S.

(2000), "Soil quality", en Sumner, M. E. (ed.), *Handbook of Soil Science*, CRC Press, Boca Raton, Florida (EE. UU.), pp. G-271-G-298.

Sirrinc, Jr., Letourneau, D. K., Shennan, C., Sirrinc, D., Fouch, R., Jackson, L. y Mages, A.

(2008), "Impacts of groundcover management systems on yield, leaf nutrients, weeds, and arthropods of tart cherry in Michigan, USA", en *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 125, 1-4, pp. 239-245.

St Laurent A., Merwin, L. A. y Thies, J. E.

(2008), "Long term orchard ground cover management system affect soil microbial communities and apple replant disease severity", en *Plant Soil*, 304, pp. 209-225.

Teasdale, J. y Mohler, C.

(2000), "The quantitative relationship between weed emergence and the physical properties of mulches", en *Weed Science*, 48(3), pp. 385-392.

Teravest, D., Smith, J., Carpenter-Boggs, L., Granatstein, D., Hoagland L. y Reganold, J. P.

(2011), "Soil carbon pools, nitrogen supply, and tree performance under several groundcovers and compost rates in a newly planted apple orchard", en *HortScience*, 46, pp. 1687-1694.

US Composting Council®

(2021), STA Certified Compost, "Compost Definition". Disponible en: <<https://www.compostingcouncil.org/page/CompostDefinition#>>. [Consulta: 21 de mayo de 2021].

Van Doren, D. M. Jr. y Allmaras, M. R.

(1978), "Effect of residue management practices on the soil physical environment, microclimate, and plant growth", en Oschwald, W. R. (ed.), *In crop residue management system*, ASA. Spec. Pub., 31, Amer. Soc. of Agron., Madison (Wisconsin).

Yao, S. R., Merwin, L. A., Bird, G. W., Abawi, G. S. y Thies, J. E.

(2005), "Orchard floor management practices that maintain vegetative or bio-

mass groundcover stimulate soil microbial community composition”, en *Plant Soil*, N° 271, pp. 377-389.

Capítulo 10

Eficiencia en el uso del agua: estrategias de manejo del agua de riego

Álvaro Otero y Claudio García

1. Introducción

La demanda futura de agua dulce –a escala mundial– posiblemente aumente para satisfacer las necesidades de diferentes sectores de la sociedad: urbano, industrial, agropecuario y medioambiental (Ferreres y Soriano, 2007). Algunas de las causas que contribuyen a este incremento están relacionadas con el mismo desarrollo de la sociedad, ya que aún hay millones de personas con acceso restringido al agua. También contribuye al incremento de esta demanda el aumento de la necesidad de alimentos y la competencia por una extensión de las urbanizaciones (Van Ittersum *et al.*, 2013).

Posiblemente, el mayor problema del agua dulce en el mundo sea su escasez (Jury y Vaux, 2005) y existe una gran incertidumbre sobre la calidad y cantidad del suministro de agua a las futuras generaciones. Simultáneamente, el aumento de la velocidad en el cambio climático global afecta la variabilidad de las precipitaciones y la temperatura, y, en definitiva, también la incertidumbre respecto de la disponibilidad y el almacenaje del agua (Mastrandrea *et al.*, 2010).

Globalmente, el uso del agua extraída (superficial y subterránea) se distribuye, en promedio, en el 70% para el sector agropecuario, el 19% para el sector industrial y el 11% para el sector doméstico. Particularmente en Uruguay, y en línea con la matriz productiva del país, el sector agropecuario concentra casi el 87% del uso del agua, mientras que el sector industrial solo significa el 2% y el doméstico, el 11% (Ciganda *et al.*, 2021; FAO-Aquastat, 2021).

Uruguay no escapa a este proceso global, aunque nuestra región pueda tener características climáticas propias de diferente intensidad. La distribución del uso del agua en Uruguay destaca la importancia y la responsabilidad del sector agropecuario respecto del cuidado del recurso hídrico. En este sentido, todo esfuerzo para mejorar e incorporar tecnologías que mejoren la eficiencia del uso del agua en cantidad y calidad es un esfuerzo que será no solo ampliamente valorado por esta generación, sino también por las futuras.

Las tecnologías de riego en Uruguay han sido una herramienta fundamental para el desarrollo de cadenas productivas de alto valor, como ser la producción de arroz, frutales, vid y cítricos, así como en la horticultura. En las últimas décadas ha comenzado a introducirse con éxito en cadenas de valor como la ganadería (pasturas) y cada vez con más frecuencia en las producciones agrícolas estivales.

El potencial de rendimiento (expresado por unidad de superficie) es el rendimiento logrado por un cultivo manejado sin limitantes de agua y nutrientes y con un control efectivo de los estreses bióticos y abióticos (Evans, 1993; Van Ittersum y Rabbinge, 1997). Sin embargo, en un escenario de escasez de agua es necesario maximizar el rendimiento en función del agua utilizada por el cultivo. Esta propuesta nos lleva al concepto de eficiencia en el uso del agua o, de manera quizás más específica, en la productividad del agua, que tiene una fuerte base agrícola y especialmente relacionada con tecnologías de riego (Kijne *et al.*, 2003; Zwart y Bastiaansen, 2004; Fan *et al.*, 2005), donde la productividad del agua (eficiencia) es definida como el rendimiento o ingreso neto por unidad de agua utilizada –evapotranspiración (ET)– por el cultivo (Kijne *et al.*, 2003).

Uruguay cuenta con una extensa red hidrográfica que, asociada al almacenaje y escurrimiento superficial de nuestros suelos, regula la cantidad del agua precipitada que termina en el mar (casi el 40%) (DINAGUAMVOTMA, citado por Failde *et al.*, 2013). Desde el punto de vista agrícola, los cultivos y pasturas regados se han desarrollado en las proximidades de importantes fuentes de agua. Sin embargo, en Uruguay no son muchas las fuentes de agua que están disponibles actualmente para la agricultura, ya sea por el bajo caudal de algunas corrientes superficiales, por estar limitados los permisos de extracción de agua para riego, o por una baja disponibilidad de agua en acuíferos subsuperficiales (Failde *et al.*, 2013).

La maximización de la eficiencia del uso del agua es de importancia central, desde la gestión del agua superficial en una cuenca y sus subsidiarias, pasando por el predio agropecuario, hasta la misma chacra de

cultivo. Las decisiones que llevan a un mayor aprovechamiento del agua comienzan con la cuantificación de la disponibilidad de agua para riego, siguen por la superficie de cultivo/pastura a regar y los volúmenes a aplicar, y llegan hasta el manejo de los excedentes hídricos.

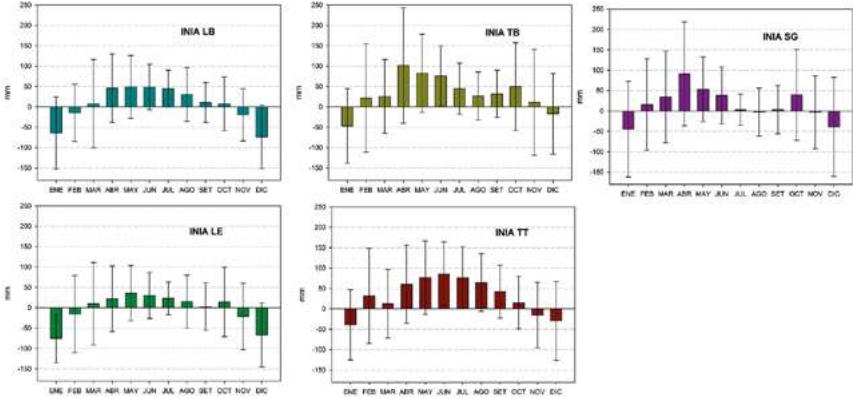
Dada una determinada priorización del uso del agua de las fuentes disponibles en el predio, la eficiencia del uso del agua se maximiza operando sobre el manejo agronómico del cultivo, de manera de alcanzar los rendimientos potenciales aprovechando al máximo la precipitación incidente y el agua aplicada.

En nuestras condiciones, la eficiencia del uso del agua está asociada también al costo de la energía: cada milímetro de agua aplicada al cultivo exige un consumo energético, cuya eficiencia está relacionada con el manejo del agua en el cultivo y el método de riego en uso.

2. Línea de base

La precipitación, la evapotranspiración y la fuente de agua para el riego son determinantes del método de riego, así como en el manejo del agua en el cultivo. En distintas áreas productivas de Uruguay es posible observar diferencias en las variables climáticas, sin embargo, estas diferencias no son de magnitud suficiente como para distinguir distintos tipos de clima dentro del territorio uruguayo. De acuerdo con la clasificación clásica de Köppen-Geiger (Peel *et al.*, 2007), Uruguay puede ser clasificado “Cfa”: subtropical húmedo con verano cálido y precipitación irregular (Bidegain y Caffera, 1997). Las precipitaciones totales medias anuales tienen su valor mínimo hacia el sur sobre las costas del Río de la Plata, con casi 1.000 mm, y su valor máximo hacia el noreste, en la frontera con Brasil, con 1.400 mm. Con estos valores medios de lluvia, no parecería necesaria *a priori* la aplicación de riego, pero su dispersión en el tiempo y en la intensidad hacen de la variabilidad un elemento meteorológico de primer orden en la agricultura. Se han determinado períodos frecuentes de déficit hídrico climático en todo el territorio nacional durante los meses de diciembre, enero y febrero (Otero *et al.*, 2017) (Figura 1). Estos períodos limitan el potencial de rendimiento de los cultivos y pasturas. La limitación que impone el recurso hídrico afecta la eficiencia de uso de otros recursos (nutrientes) y la sostenibilidad económica y social de distintas producciones.

FIGURA 1. DIFERENCIA ENTRE PRECIPITACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN (PM-FAO56) ACUMULADA MENSUAL (MM). ESTACIONES EXPERIMENTALES DEL INIA, PERÍODO 1990-2017



Fuente: Otero et al. (2017).

Dado el grado de incertidumbre en la pluviometría, el uso de agua para riego parecería una alternativa atractiva e imprescindible. Sin embargo, la adopción de técnicas de riego solo se ha incrementado en los últimos años, excepto por el cultivo de arroz y de caña de azúcar en donde el riego se utiliza en el 100% de la superficie plantada (MGAP-DIEA, 2011, 2016). Esta aparente falta de adopción tecnológica podría explicarse por la baja capacitación en tecnologías de riego de los técnicos agropecuarios y productores, así como por la relativa escasez de fuentes primarias de agua y la falta de criterios precisos –provenientes de la investigación– respecto de cuánta agua aplicar a los diferentes cultivos y cuándo (García y Otero, 2020).

La maximización de la eficiencia en el uso del agua (de riego y de la precipitación) está directamente relacionada con una correcta planificación del riego: la minimización del suplemento de agua de riego debe llegar hasta el punto de alcanzar los máximos rendimientos. Para llevar a cabo esta tarea se requiere: a) un diseño del sistema de riego adaptado a las condiciones agroecológicas y energéticas de Uruguay, b) una medición del consumo de agua del cultivo y/o del contenido de agua del suelo, y c) una aplicación del riego basada en la etapa fenológica del cultivo (período crítico) y en umbrales de contenido en agua del suelo.

Si bien ha habido durante los últimos 15 años una evolución favorable en el diseño de los sistemas de riego por gravedad y presurizados, aún se cuenta con sistemas muy poco apropiados, en su diseño, para las condiciones locales (Morales *et al.*, 2014). Las características físicas de nuestros suelos, en cuanto a plasticidad e infiltración, asociadas a la intensidad y frecuencia de las lluvias, requieren un mayor ajuste de los equipos de riego, especialmente los presurizados. De esta forma, se lograría minimizar el deterioro de los suelos por compactación, formación de huellas, aumento de la erosión superficial en los extremos del equipo de riego, entre otros inconvenientes, además de obtener un efecto directo en la eficiencia de uso del agua.

Los métodos o equipos de medición del contenido de agua del suelo son muy poco frecuentes en los predios regados, especialmente en aquellos cultivos que usan grandes volúmenes de agua. Ante la ausencia de evaluaciones cuantitativas, es habitual que en estos predios se utilice la experiencia personal, basada en observaciones visuales del cultivo y tacto del contenido de agua en el suelo por personal entrenado.

El riego suplementario basado en umbrales de agua en el suelo de acuerdo con la fenología del cultivo (período crítico) en general se encuentra ausente en las decisiones diarias de riego, lo que dificulta enormemente no solo la correcta gestión del riego, sino también la mejora en la utilización del agua de riego, ya sea por déficit o por excesos.

3. Balance hídrico como información clave para la toma de decisiones

La propuesta tecnológica para mejorar la eficiencia en el uso del agua en los cultivos y pasturas regados en Uruguay, maximizando la utilización del agua de lluvia y minimizando el mal uso de las tecnologías de riego, consta de dos etapas.

- a) La correcta implementación del riego suplementario está basada en la elección del mejor período a regar con relación a la etapa fenológica del cultivo-pastura (período crítico) y en la determinación de umbrales precisos del contenido de agua del suelo, a los efectos de maximizar el rendimiento potencial y mejorar o aumentar la eficiencia del recurso hídrico (con el menor uso de agua de riego posible) (Capurro *et al.*, 2017; Montoya *et al.*, 2017; Montoya y Otero, 2019; García, 2017; Carracelas *et al.*, 2019; Bourdin *et al.*, 2015).

- b) La utilización del balance hídrico del suelo (BHS), como herramienta de monitoreo, planificación y pronóstico de la evolución del contenido de agua del suelo en los cultivos y pasturas a nivel de la operación de riego. Concretamente, para esta etapa es posible usar la aplicación “GESIR” (Gestor inteligente del riego), disponible en la página web del INIA. Esta aplicación es de uso público y posibilita a productores y técnicos la planificación del riego respecto de cuándo y cuánto regar, según las características propias de cada operación de riego, localización en Uruguay, tipo de suelo y cultivo o pastura a regar. GESIR cuenta con la incorporación de un pronóstico climático nacional de los siete días futuros, basado en el *Global Forecast System*, de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos.

4. Aportes de la tecnología a las trayectorias agroecológicas

Como fue mencionado anteriormente, el régimen pluviométrico en Uruguay posibilita la obtención de rendimientos medios aceptables y altos en algunas zonas agrícolas, pero con una muy elevada variabilidad interanual. El riego es clave para estabilizar rendimientos, un aspecto central de la sostenibilidad social y económica. El logro de rendimientos potenciales sostenidos en el tiempo en cada ambiente agroecológico, a través de mejorar la eficiencia de uso del agua de riego, es un aspecto central en una transición agroecológica de sistemas intensificados. La mayor eficiencia en el uso del agua permite, a su vez, un mejor uso de los insumos y una reducción en la aplicación de productos sintéticos por unidad de producto agrícola o pecuario alcanzado. La mejora en la estabilidad y el volumen de producción, si está acompañada de un aumento en la eficiencia en el uso del agua (precipitación o riego), suele minimizar la escorrentía y el movimiento de nutrientes y sedimentos hacia los cursos y cuerpos de agua. El aumento en la productividad *per se* no debería ir en detrimento de la calidad del agua u otras externalidades indeseables en los ecosistemas agropecuarios. En el camino de la transición agroecológica existe un delicado balance en los sistemas agrícolas donde, el aumento sostenido de la productividad está basado en la mejora de la eficiencia del uso de recursos naturales (productividad del agua, nutrientes, etc.) y no en el aumento de la productividad física alcanzado por un exceso

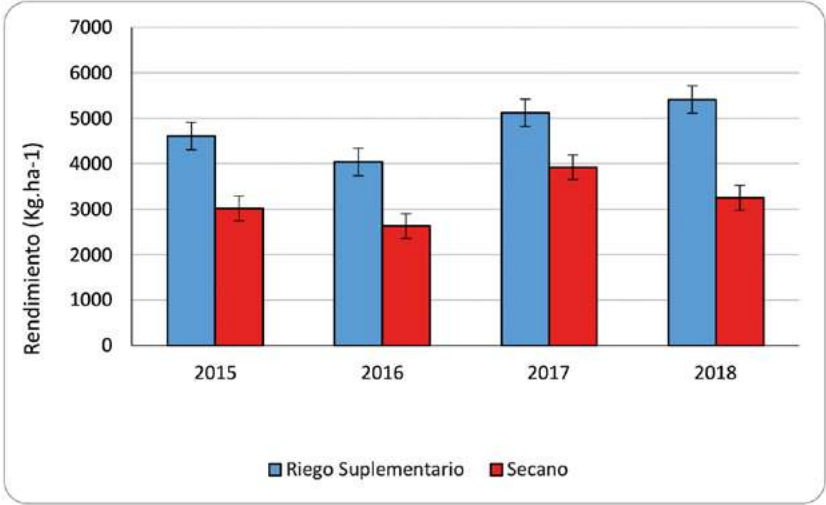
de recursos como el agua y nutrientes en forma poco eficiente. Este delicado balance –cuando se conoce– permite a los sistemas de alta producción (biomasa extraída) mantener contenidos altos de carbono en el suelo, logrando un mayor secuestro de carbono, lo que también promueve una mayor biodiversidad del suelo.

5. Efectos de las láminas de riego aplicadas en los rendimientos entre años en cultivos y pasturas de largo plazo: curvas de respuesta

La variabilidad climática en los meses estivales, asociada al bajo almacenaje de agua en la mayoría de los suelos del país, hace que se incremente la variabilidad del rendimiento obtenido en los cultivos en secano, reduciendo la sostenibilidad económica y aumentando la vulnerabilidad de los sistemas agropecuarios. Esto es particularmente agudo en suelos de menor capacidad de almacenaje de agua y multiplica las probabilidades de estrés hídrico de los cultivos (Methol *et al.*, 2021).

El aspecto más importante, para mejorar la relación entre la productividad del cultivo/pastura y la cantidad de agua utilizada en el riego, es la determinación de umbrales críticos del contenido de agua en el suelo. Estos umbrales marcan el mínimo contenido de agua en el suelo que podemos alcanzar sin que se vean afectados el crecimiento y/o el rendimiento del cultivo según cuál sea el umbral utilizado. Permiten identificar la ocurrencia de estrés hídrico en cada fase fenológica y definir sobre bases objetivas la oportunidad y cantidad de riego suplementario que maximice el uso del agua de lluvia. El manejo de estos criterios de aplicación de agua de riego, en conjunto con métodos de BHS, permitió obtener consecutivamente rendimientos comerciales altos en soja, en situaciones de suelo con limitantes en la exploración radicular en el área de Salto (Figura 2). Como la relación entre la evapotranspiración y la pluviometría no es la misma en las diferentes etapas fenológicas del cultivo y entre años, el consumo de agua de riego también va a ser diferente.

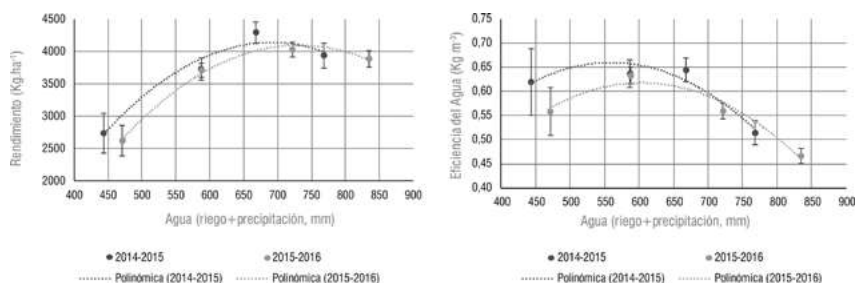
FIGURA 2. EFECTO DEL RIEGO SUPLEMENTARIO EN EL RENDIMIENTO DE SOJA ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), EN UN AMBIENTE CON SUELOS CON LIMITANTES FÍSICAS DE EXPLORACIÓN RADICULAR EN URUGUAY



Fuente: *Elaboración propia.*

En estas condiciones agroecológicas de producción, cantidades de agua (precipitación + riego) superiores a los 650 mm, utilizadas durante todo el ciclo productivo de la soja, no mejoran el rendimiento obtenido y, en consecuencia, la eficiencia en el uso del agua cae significativamente, con volúmenes de agua superiores a 650 mm, en el área de Salto (Figura 3). También se puede apreciar que la eficiencia de utilización del agua (precipitación + riego suplementario) mejora o permanece similar con relación a la productividad del agua alcanzada solo con el agua de lluvia (450 mm) (Figura 3, derecha).

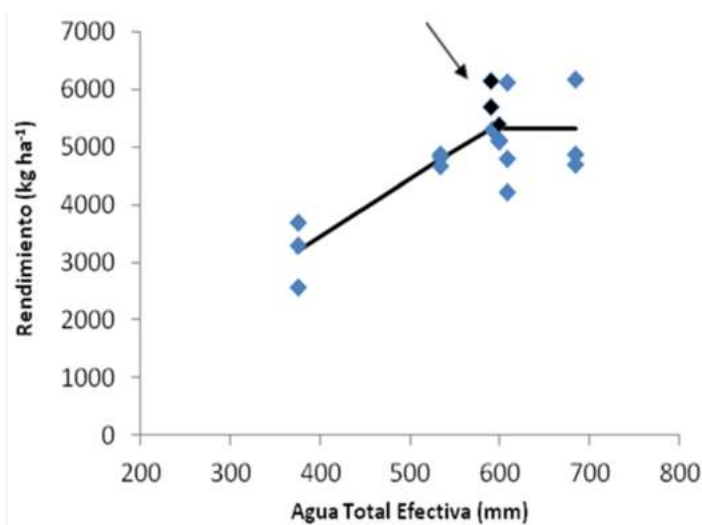
FIGURA 3. RESPUESTA DEL RENDIMIENTO DE SOJA A LA LÁMINA DE AGUA (IZQUIERDA) Y EFICIENCIA DEL AGUA POR EL CULTIVO (DERECHA)



Fuente: Montoya et al. (2017).

Relaciones similares se obtuvieron en ensayos en INIA La Estanzuela en Colonia (Capurro *et al.*, 2017), en suelos con mayor capacidad de exploración radicular y mayor almacenaje de agua en el perfil, donde se alcanzó un *plateau* de rendimiento a los 600 mm de agua efectiva total en el cultivo de soja (Figura 4).

FIGURA 4. RELACIÓN DEL RENDIMIENTO DE SOJA CON LA LÁMINA EFECTIVA DE AGUA DURANTE TODO EL CICLO (COLONIA, URUGUAY)



Fuente: Capurro et al. (2017).

El rendimiento potencial de los cultivos (ejemplo soja) en condiciones experimentales, con un manejo detallado del riego, permitió alcanzar niveles de hasta 7.000 kg ha⁻¹ en Paysandú (Giménez, 2014), 6.000 kg ha⁻¹ en Salto con suelos limitantes (Montoya *et al.*, 2017) y 7.500 kg ha⁻¹ en Colonia (Ceretta y Sawchik, 2006; Capurro *et al.*, 2017). Sin embargo, el rendimiento promedio comercial alcanzable está por debajo de estos valores. Los buenos resultados obtenidos se explican, no solo por el efecto directo del riego suplementario, sino también por la correcta elección del cultivar, el manejo previo del cultivo, de la densidad y sanidad, entre otros factores. Las experiencias productivas bajo riego manejadas con criterios de BHS o similares han permitido un mejor uso del agua de riego y, por sobre todo, aproximarse mucho a los valores potenciales de producción.

En el caso del maíz para grano bajo riego en condiciones comerciales, con criterios de riego suplementario semejantes entre años, vemos el efecto directo de la variación de la demanda atmosférica, del aporte de la precipitación y de las necesidades de riego entre los diferentes años. El coeficiente de variación (cv) del rendimiento de grano entre años es de 13% en el período 2007-2010. La variación del volumen de riego aplicado entre años es bastante mayor (cv: 40%), asociada a la variabilidad de la precipitación, lo que produce una importante variación en la eficiencia del agua de riego entre años (Tabla 1) (García, 2010), como expresión directa de la eficiencia de uso del agua por el cultivo.

Tabla 1. VARIACIÓN ENTRE AÑOS DEL RENDIMIENTO DE GRANO Y DE LA PRODUCTIVIDAD DEL AGUA EN PREDIOS COMERCIALES, EN EL CULTIVO DE MAÍZ BAJO RIEGO (2007-2010)

Nº sitio	Periodo de cultivo	Rendimiento de grano de maíz	Lámina de riego aplicada (mm)	Precipitaciones registradas (mm)	Evapotranspiración del cultivo (Penman Monteith)	Eficiencia del uso del agua
		(kg ha ⁻¹)			(mm)	(kg . ha ⁻¹ . mm ⁻¹)
1	08-10-2006 al 24-01-2007	10190	172	456	352	16,2
2	04-11-2007 al 28-02-2008	8500	439	280	540	11,8
3	14-11-2007 al 01-03-2008	10300	306	156	396	22,3
4	04-11-2007 al 02-03-2008	9200	380	171	423	16,7
5	15-09-2008 al 01-03-2009	10500	600	292	572	11,8
6	24-09-2008 al 23-01-2009	13100	420	100	408	25,2
7	19-09-2008 al 01-02-2009	9400	512	119	517	14,9
8	18-12-2009 al 30-03-2010	10636	154	728	391	12,1
9	4-12-2009 al 29-03-2010	11000	194	728	434	11,9

Fuente: García (2010).

Los resultados en manejo del riego en pasturas a lo largo de 6 años de investigación muestran un promedio de producción de materia seca de 13.656 kg ha⁻¹, con un coeficiente de variación del orden del 13% (Tabla 2). La producción de carne en esas mismas áreas regadas presenta un promedio de 833 kg ha⁻¹, con un coeficiente de variación del 28%. Sin embargo, si bien todos los años se debió suplementar con riego, la lámina promedio aplicada fue de 313 mm y con una variación entre años del 65% (Formoso y García, 2017). En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos en los últimos 6 ejercicios de producción de carne y materia seca en pasturas regadas por riego por melgas (superficie) y la cantidad de agua aplicada en los diferentes años durante la zafra de riego entre los meses de octubre y marzo.

TABLA 2. RESPUESTAS PRODUCTIVAS DEL MANEJO DEL RIEGO EN PASTURAS DURANTE UN PERÍODO DE 6 AÑOS (2014 A 2020)

Año	Producción de materia seca	Producción de carne	Lámina de riego	Eficiencia del uso del agua
	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	mm	kg ha ⁻¹ .mm ⁻¹
14-15	10632	432	s/d	
15-16	13501	755	273	49,5
16-17	12788	1087	170	75,2
17-18	15724	784	737	21,3
18-19	15293	911	118	129,6
19-20	14031	1031	357	39,3
promedio	13656	833	313	43,6

*s/d: sin dato.

Fuente: Elaboración propia.

6. Conclusiones

En el marco de la construcción de sistemas agroecológicos, la eficiencia del uso de los recursos hídricos es un concepto importante para tener en cuenta en el diseño de los sistemas productivos actuales y futuros, para que estos sean sostenibles en el largo plazo.

El manejo del riego suplementario en Uruguay requiere de herramientas y criterios que faciliten su gestión y que mejoren el camino hacia sistemas agroecológicos. En este sentido, simultáneamente a la búsqueda del aumento de la producción (vegetal o animal), se busca la sostenibilidad productiva interanual, a través de un uso más eficiente de los recursos hídricos disponibles.

La brecha entre el potencial de rendimiento de los cultivos y pasturas bajo riego y los resultados obtenidos a nivel comercial en secano es muy grande. Es por esta razón que el uso eficiente del agua a nivel predial y la posibilidad de expansión de áreas de riego en el país tienen un potencial muy importante para conseguir altas producciones y aumentar la sostenibilidad de los sistemas productivos, minimizando los impactos sociales adversos.

Esta brecha puede ser reducida en forma significativa, mediante una mejor gestión y planificación del riego, con herramientas como el GESIR o similares, permitiendo el ahorro de agua en el riego y de energía en su aplicación, maximizando el rendimiento y minimizando los posibles impactos negativos en el ambiente por un mal uso de diferentes tecnologías del riego.

Bibliografía

Bidegain, M. y Caffera, R.M.

(1997), *Clima del Uruguay*. Red Académica Uruguaya. Universidad de la República. Disponible en: < https://www.rau.edu.uy/uruguay/geografia/Uy_c-info.htm>. Último acceso abril 2020.

Bourdin Medici, A., Franco Fraguas Souto, J., Burgos y Valiente, M.

(2015), *Respuesta física al riego suplementario y desarrollo de tecnologías de riego por melgas en pasturas artificiales*. Tesis de grado, Universidad de la República (Uruguay), Facultad de Agronomía.

Capurro, M. C., Beretta, A., García, C., Sawchik, J. y Puppo L.

(2017), “Rendimiento de la soja en respuesta a distintas dosis y momentos de riego”, en *Agrociencia Uruguay*, 21(2), pp. 65-76 [Internet] [citado el 24 de julio de 2019].

Carracelas, G., Hornbuckle, J., Rosasa, J. y Roel, A.

(2019), “Irrigation management strategies to increase water productivity in *Oryza sativa* (rice) in Uruguay”, en *Agricultural Water Management*, 222, pp. 161-172.

Ceretta, S. y Vilario, D.

(2002), *Adaptación de cultivares de soja en Uruguay*, Serie de Difusión 297, INIA, pp. 44-52.

Ceretta, S. y Sawchik, J.

(2006), *Soja: Grupos de madurez y ambientes productivos del litoral oeste: Análisis preliminar de los resultados experimentales de tres años de funcionamiento del Convenio AUSID-CALMER-INIA*. Serie Actividades de Difusión, INIA, 472 pp.

Ciganda, V., García, C. y Otero, A.

(2021), “Intensificación del uso del agua: el riego suplementario y las oportunidades de contribuir al medio ambiente”, en *Revista INIA*, 65, junio, pp. 80-84.

Evans, L. T.

(1993), *Crop Evolution, Adaptation, and Yield*, Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido).

Failde, A., Peixoto, C. y Estol, E.

(2013), *Estudio sobre riego agropecuario en Uruguay. Informe final*, FAO-Red Mercosur en apoyo a OPYPA-MGAP.

Fan, T., Stewart, B. A., Payne, W. A., Wang, Y., Song, S., Luo, J. y Robinson, C. A.

(2005), “Supplemental irrigation and water: yield relationships for plasticulture crops in the loess plateau of China”, en *Agronomy Journal*, 97, pp. 177-188.

FAO

(2021), *Núcleo de Base de Datos principal de AQUASTAT*, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [Consulta: 18 de mayo de 2021].

Fereres, E. y Soriano, M. A.

(2007), “Deficit irrigation for reducing agricultural water use”, en *Journal of Experimental Botany*, v. 58, 2, pp. 147-159.

Formoso, D. y García, C.

(2017), *Producción intensiva de carne en pasturas regadas con pivot central*, Serie Técnica 231, INIA, ISBN 978-9974-38-374-6.

García, C.

(2010), “Estrategias para la incorporación del riego en sistemas de producción extensivos”, en I Seminario Internacional de riego: Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas, Montevideo (Uruguay), INIA, 2010, 207 pp. INIA, PROCISUR-IICA, UDELAR, Facultad de Agronomía, Grupo de Desarrollo del Riego.

García, C.

(2017), “Balance hídrico: control y programación del riego en pasturas”, en Formoso, D. y García, C. (eds.), *Producción intensiva de carne en pasturas regadas con pivot central*, Serie Técnica 231, INIA, Montevideo, pp. 23-30.

García, C. y Otero, A.

(2020), “¿Es una alternativa la utilización de riego en el sistema agropecuario de Uruguay?”, en Lineu Neiva Rodrigues y Daniele Zaccaria (eds.), *Agricultura irrigada. Um breve olh*, INOVAGRI, Fortaleza (Brasil), pp. 132-137.

Giménez, L.

(2014), “Efecto de las deficiencias hídricas en diferentes etapas de desarrollo sobre el rendimiento de soja”, en *Agrociencia Uruguaya*, v. 18, 1, pp. 53-64.

Giménez, L., Paredes, P. y Pereira, L. S.

(2017), “Water use and yield of soybean under various irrigation regimes and

severe water stress. Application of AquaCrop and SIMDualKc models”, en *Water* (Switzerland), 9(6).

Jury, W. A. y Vaux, Jr. H.

(2005), “The role of science in solving the world’s emerging water problems”, en *Proceedings of the National Academy of Sciences* (EE.UU.), 102, 15715-15720.

Kijne, J. W., Barker, R. y Molden, D. J.

(2003), *Water productivity in agriculture: limits and opportunities for improvement*, CABI_IWMI, Wallingford (Reino Unido).

Mastrandrea, M. D., Field, C. B., Stocker, T. F., Edenhofer, O., Ebi, K. L., Frame, D. J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K. J., Matschoss, P.R., Plattner, G. K., Yohe, G.W. y Zwiers, F. W.

(2010), *Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment of Uncertainties*, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Disponible en: <<http://www.ipcc.ch>>.

Methol, M., Cortelezzi, A., Tiscornia, G. y Petraglia, C.

(2021). Estimación de la probabilidad de ocurrencia de diferentes niveles de déficit hídrico en cultivos de verano (soja, maíz y sorgo. MGAP-INIA. pp 6. Montevideo, Uruguay. Disponible en: <<http://www.inia.uy/Documentos/Públicos/INIA%20Las%20Brujas/GRAS/RiesgoHidricoCultivos-Metodologia.pdf>>.

MGAP-DIEA. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias

(2011), *Censo General Agropecuario*. pp. 142. Montevideo. Uruguay.

MGAP-DIEA. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Dirección de Investigaciones Estadísticas Agropecuarias

(2016), *Anuario OPYPA*. pp. 580. Montevideo. Uruguay.

Montoya, F., García, C., Pintos, F. y Otero, A.

(2017), “Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of irrigated soybean in temperate humid climatic conditions”, en *Agric. Water Manag.* N° 193, pp. 30-45.

Montoya, F. y Otero, A.

(2019), *Is Irrigating Soybean Profitable In Uruguay? A Modeling Approach.* *Agronomy Journal.* 111 (2), p. 749.

Morales, P., García, M., García, C., Beretta, A., Moreno, G. y Gamio, G.

(2014), “Pivotes en Uruguay: evaluación de su funcionamiento”, en Giménez, L., Puppo, L., Bentancor, L., Hayashi, R., Sawchik, J. y García, C. (eds.), *Riego en cultivos y pasturas*. III Seminario Internacional, 2014, Paysandú (Uruguay), INIA, Montevideo, pp. 67-76.

Otero, A., Montoya, F. y García, C.

(2017), *Programación del riego*, Serie Técnica 232, INIA, p. 68.

Peel, M. C., Finlayson, B. L. y McMahon, T. A.

(2007), “Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification”, en *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, N° 11, pp. 1633-1644. Disponible en: <<https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>>.

Terra, J., Cantou, G., Oxley, M., Furtado, I., Bordagarri, A. y Sawchik, J. (2012), *Potencial productivo del cultivo de soja sin limitantes de agua*, Serie de Actividades de Difusión 713, INIA, pp. 19-21.

Van Ittersum, M. K. y Rabbinge, R.

(1997), "Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations", en *Field Crops Research*, v. 52, 3, pp. 197-208.

Van Ittersum, M. K., Kennedy, G., Cassman, P., Grassini, J. W., Tittonell, P. y Hochman, Z.

(2013), "Yield gap analysis with local to global relevance—A review", en *Field Crops Research*, v. 143, pp. 4-17.

Zwart, S. J. y Bastiaansen, W. G. M.

(2004), "Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize", en *Agric. Water Manag. J.*, 69, pp. 115-33.

Capítulo 11

Cultivos de servicios para aumentar la oferta de servicios ecosistémicos en sistemas agrícolas

Priscila Pinto, José María Paruelo, Jorge Sawchik y Gervasio Piñeiro

1. Los impactos ambientales de esquemas agrícolas simplificados

La agricultura continua y el monocultivo muestran, en el siglo XXI, un aumento muy importante en los sistemas agrícolas del sur de Sudamérica (Volante *et al.*, 2015). Los sistemas de producción agropecuaria dominantes en el siglo XX se basaban en rotaciones de cultivos anuales con pasturas perennes (Soriano *et al.*, 1991; Hall *et al.*, 1992). Sin embargo, una serie de factores sociales, económicos y tecnológicos condujo a una agricultura especializada y desacoplada de la ganadería, particularmente en los pastizales del Río de la Plata. Los esquemas de agricultura continua, más simplificados que las rotaciones agrícola-ganaderas, cuentan con menor diversidad de cultivos y dan lugar a periodos sin cultivos (barbechos) durante gran parte del año (Rubio, 2011; Pinto *et al.*, 2017). Los cambios en los sistemas agrícolas tuvieron consecuencias tanto a escala global como local. A escala global se puede mencionar la disminución de la regulación del ciclo del agua y de los nutrientes, y la emisión de gases de efecto invernadero. A escala local, las principales consecuencias fueron pérdidas de materia orgánica del suelo (MOS), compactación y reducción de la capacidad de almacenaje de agua en el suelo, erosión y desertificación y degradación biológica del suelo (Coutinho *et al.*, 2015).

En Uruguay, la Ley de Conservación de Suelos modificada en 2009 ha contribuido a morigerar las consecuencias negativas de esta tendencia al monocultivo. Esta ley fue originalmente pensada para reducir las

pérdidas de suelo por erosión. Más allá del éxito asociado a este objetivo, brinda la oportunidad de aumentar la oferta de otros servicios ecosistémicos, además de la conservación del suelo.

En los sistemas agrícolas, la mayor parte de la energía absorbida se asigna a la producción de granos; como consecuencia, se destina muy poca energía a otros servicios, como el de regulación de los ciclos de la materia. En los pastizales del Río de la Plata, la apropiación humana de la productividad primaria neta (AHPPN), o sea, el carbono (C) fijado que los humanos retiramos del sistema vía exportaciones o desechos (Vitousek *et al.*, 1986), cambió en el siglo XXI. La apropiación humana media fue del 42% en 2001-2002 y aumentó en el 4,5% en los últimos diez años, debido a los intensos cambios en el uso de la tierra. La mayor parte de la apropiación humana se explicó por el aumento del rendimiento de los cultivos y la expansión del sistema de doble cultivo de renta como práctica agronómica común. La apropiación humana en los sistemas ganaderos fue sensiblemente menor a la observada en sistemas agrícolas (Baeza y Paruelo, 2018).

2. Los cultivos de servicio: una tecnología para aumentar la oferta de servicios ecosistémicos

El aumento de la AHPPN determina que menos energía queda disponible para que se lleven a cabo funciones del ecosistema clave para determinar la oferta de servicios ecosistémicos. Para aumentar la energía disponible para la generación de servicios ecosistémicos de regulación, es necesario disminuir la exportación de granos y/o biomasa, o aumentar la fijación de C (energía) del ecosistema. Por ello, diversos autores proponen aumentar la absorción de energía proveniente del sol mediante la siembra de cultivos que no sean de renta en los períodos de barbecho (Power, 2010; Tittonell, 2014). Esto permitiría aumentar y diversificar la oferta de distintos servicios ecosistémicos en el tiempo (Schipanski *et al.*, 2014; Tittonell, 2014; Gaba *et al.*, 2015; Frasier *et al.*, 2016; Pinto *et al.*, 2017). Estos cultivos que se siembran en los periodos de barbechos y no se cosechan comenzaron a ser denominados “cultivos de servicios”, pero esta práctica fue desarrollada con mucha anterioridad (Piñeiro *et al.*, 2014; Pinto *et al.*, 2017; García *et al.*, 2018). La siembra de abonos verdes para aumentar la materia orgánica y el nitrógeno (N) del suelo se remonta a 300 años a. C. (Pieters y McKee, 1938). Desde principios del siglo xx se siembran cultivos de cobertura para evitar la erosión del suelo y la lixi-

viación de los nutrientes. En sus inicios eran incorporados al suelo como abonos verdes (Pieters y McKee, 1938), pero a partir de la adopción de la siembra directa se comenzaron a utilizar herbicidas para interrumpir su ciclo (Mitchell y Tell, 1976; Kemper y Derpsch, 1980). Debido a que el término cultivos de cobertura solo hace referencia a mantener el suelo cubierto para disminuir la erosión, en las últimas décadas se propusieron otras denominaciones para resaltar los diferentes beneficios que brindan: “cultivos trampa”, porque pueden disminuir las pérdidas de nutrientes por lixiviación, volatilización o desnitrificación (Thorup-Kristensen, 1994); o “cultivos multipropósitos”, debido a los diversos objetivos por los que pueden ser sembrados (Weil *et al.*, 2009). Sin embargo, el uso de estas denominaciones es menos frecuente y en la comunidad se reconoce la multifuncionalidad de los cultivos de cobertura, más allá de lo que su nombre sugiere. Existe un interés creciente en adoptar el término “cultivos de servicios” (CS) porque, más allá de resaltar la multifuncionalidad, proporciona un marco ecológico que puede ayudar a mejorar el manejo de los agroecosistemas.

Los cultivos de servicios pueden restaurar la provisión de algunos servicios ecosistémicos que se pierden bajo agricultura continua y tienen impacto a distintas escalas. Por un lado, pueden reducir el impacto a escala global mediante el secuestro de C en la MOS (Liu *et al.*, 2005; Ding *et al.*, 2006; Olson *et al.*, 2010) o la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero que ocurren durante los períodos de barbecho (*i.e.* óxido nitroso) (Wagner-Riddle y Thurtell, 1998); o, a escala regional, por mantener el nivel de las napas (Nosetto *et al.*, 2012) o evitar su contaminación reduciendo la lixiviación de nutrientes (Rosecrance *et al.*, 2000; Kramer *et al.*, 2002; Venkateswarlu *et al.*, 2007; Bergkvist *et al.*, 2011; Restovich *et al.*, 2012).

Por otro lado, pueden tener impactos a escala local (infiltración, control de malezas, estructuración del suelo) que, a diferencia de los anteriores, son directamente percibidos por los productores y pueden estimular su adopción. Los cultivos de servicios permiten absorber una gran parte de la radiación del sol que generalmente se pierde durante los períodos de barbechos (Caviglia, 2004). A partir de esta energía se puede disminuir, por ejemplo, el subsidio de la fertilización nitrogenada, que permite aumentar la proporción de la radiación incidente que es transformada en productividad primaria neta.

Cada CS brinda una variedad de servicios de regulación y, eventualmente, estos cultivos podrían ser utilizados para brindar también algún servicio de abastecimiento (*e.g.*, pastoreo, producción de semillas), cui-

dando los compromisos en la asignación de energía y recursos. Diversos trabajos científicos, ensayos de productores y experiencias a campo muestran la diversidad de beneficios que estos cultivos brindan, pero, como se dijo anteriormente, es muy importante evaluar de modo detallado los riesgos de la existencia de posibles compromisos entre los cs y los cultivos de renta. La mayoría de estos compromisos se evitan con un buen diseño de las rotaciones y manejos acordes, que potencien las interacciones positivas entre especies y minimicen las negativas.

3. Rasgos de las especies de cs que favorecen la provisión de distintos servicios ecosistémicos

La construcción equilibrada de mezclas de especies, priorizando distintos servicios, debe ser un aspecto clave del uso de cs. En la confección de la mezcla de especies deberá considerarse la complementariedad entre grupos funcionales, tanto a nivel espacial como temporal (*i.e.*, ciclos de crecimientos distintos). La confección de mezclas que proveen distintas calidades de residuos es una herramienta clave para lograr sincronizar la oferta de nutrientes del cs y la demanda del cultivo de renta, y al mismo tiempo dejar el periodo de tiempo necesario para la recarga del perfil. A su vez, con el balance de especies en la mezcla también deberá buscarse cortar el ciclo de transmisión de enfermedades o plagas de los cs al cultivo de renta. Es decir, mediante el manejo y la selección de proporciones y especies en la mezcla podrá encontrarse un equilibrio entre los servicios ecosistémicos priorizados y los riesgos de disminuir excesivamente la provisión de otros.

Según la función ecosistémica a maximizar, las especies deberán presentar distintas características. Se plantean a continuación algunas funciones y algunos aspectos que deberían considerarse en la selección de las especies a usar como cs.

3.1. Formación de materia orgánica

Para aumentar la materia orgánica del suelo es necesario sembrar cultivos que aporten biomasa de diferentes calidades y que tengan una alta producción de raíces finas y exudados radicales, ya que cerca del 50% de la biomasa de raíces pasa a formar materia orgánica del suelo, pero solo el 5% de la biomasa aérea (Jackson *et al.*, 2017). Para aumentar la materia orgánica particulada, clave para la formación y el reciclaje de

los agregados del suelo, es necesario que los cultivos aporten residuos de biomasa de lenta descomposición (alta C/N) y una gran cantidad de raíces finas. Estos residuos promueven la formación de macroagregados porque incrementan el crecimiento de hongos y microorganismos que producen mucílagos, especialmente los residuos de las raíces, por su íntimo contacto con la matriz del suelo (Six *et al.*, 2002). Para aumentar la materia orgánica asociada a los minerales es necesario que los cultivos aporten residuos de biomasa de rápida descomposición (baja C/N y altas cantidades de N) y reducir los periodos de barbechos, para contar con aportes de exudados radicales durante la mayor parte del año. Estos compuestos promueven el crecimiento y el reciclado de microorganismos que, junto con las sustancias simples excretadas por las raíces, dan origen a esta fracción. Es por ello que la siembra de una mezcla de cultivos de servicios que aporten distintas calidades de biomasa (gramíneas, leguminosas, crucíferas, etc.) resulta fundamental para contribuir a la formación de ambas fracciones en simultáneo. Un aspecto clave es que los aportes de biomasa (aérea, pero principalmente subterránea) ocurran durante la mayor parte del año. Por eso es crucial sembrarlos (al voleo o con siembras aéreas) antes de la recolección del cultivo de renta. La maximización de este servicio trae aparejados compromisos que podrían afectar el rendimiento del cultivo de renta siguiente. Por un lado, la eliminación del periodo de barbecho compromete la recarga de agua en el perfil del suelo por el consumo que realiza el cs y aumenta el riesgo de déficit hídrico para el cultivo siguiente. Por otro lado, la supresión tardía de los cs podría provocar una inmovilización de N en el suelo, principalmente con cs de alta C/N y suprimidos tarde o con sembrado en verde del cultivo de renta. Finalmente, en el caso de sembrar cs con especies puras se podrían transmitir algunas plagas y enfermedades, sobre todo en el caso de que se siembren cultivos de renta de las mismas familias.

3.2. Control de malezas

Para controlar malezas y reducir las aplicaciones de herbicidas es necesario sembrar cultivos que presenten una alta tasa de crecimiento, que aporten rastrojo de lenta descomposición y que produzcan compuestos alelopáticos (sustancias químicas que impiden el crecimiento de otras especies) (Véase el Capítulo 6 de esta obra). En este caso hay que priorizar que los cs presenten una rápida captura de los recursos para que compitan con las malezas y que produzcan cambios en el ambiente por

medio de sus raíces, por el rastrojo que dejen en superficie o por las sustancias que liberen al suelo. Está documentado que las raíces de algunas especies como el centeno pueden producir compuestos alelopáticos que reducen la emergencia de malezas (Jabran *et al.*, 2015). Por otro lado, el aporte de rastrojo de lenta descomposición provoca en el ambiente cambios que reducen la emergencia y el crecimiento de las malezas. A su vez, permite que el control de malezas sea más efectivo porque concentra la emergencia en el tiempo y provoca uniformidad en el desarrollo de las plantas. Por eso, la provisión de este servicio no solo aporta beneficios a escala local, sino que también provee un servicio a escala regional porque disminuye la presión de selección de los herbicidas. En este sentido, cambiar el mecanismo de control sobre las malezas resulta muy prometedor para disminuir la aparición de resistencias (Vila-Aiub *et al.*, 2009). Para maximizar este servicio se recomienda la siembra temprana de cultivos de servicios de gramíneas o mezclas. Si bien las leguminosas también pueden lograr un buen control de malezas, principalmente *Vicia villosa*, las gramíneas tienen un efecto residual debido a la lenta descomposición de su rastrojo. Esta residualidad permite contar con un breve periodo de barbecho previo al cultivo de renta y aumentar las reservas de agua. Sin embargo, la lenta descomposición del rastrojo compromete la disponibilidad de nitrógeno para el cultivo siguiente. Estos residuos favorecen la inmovilización microbiana porque presentan una alta concentración de compuestos recalcitrantes, como la lignina, y una alta relación carbono/nitrógeno. Como consecuencia, pueden disminuir los rendimientos del cultivo de renta siguiente o incrementarse los costos, ya que será necesario aumentar el uso de fertilizantes nitrogenados.

3.3. Descompactación y mejora de propiedades físicas

Para descompactar y mejorar las propiedades físicas del suelo es necesario sembrar cultivos que presenten una alta producción de raíces finas y gruesas. Por un lado, los cultivos de servicios con sistemas radicales más finos pueden aumentar la agregación del suelo, lo cual determina la tasa de infiltración del agua en el suelo y en la porosidad total (Álvarez, 2013; Villamil *et al.*, 2006). Estas propiedades son muy importantes en los agroecosistemas porque evitan el anegamiento y determinan la capacidad de almacenaje del agua en el suelo (Banwart *et al.*, 2016). Por otra parte, cuando el suelo presenta impedancias mecánicas que dificultan la penetración y exploración del suelo por las raíces, la siembra de cultivos

de servicios con raíces más gruesas puede reducir la resistencia a la penetración para el cultivo de renta. Las raíces de mayor diámetro logran atravesar las capas endurecidas del suelo y crean bioporos que favorecen la exploración del suelo del cultivo de renta siguiente (Chen y Weil, 2010; Clark *et al.*, 2003). Por eso la siembra de una mezcla de cultivos de servicios de gramíneas que producen raíces finas con crucíferas de raíces gruesas resulta fundamental para favorecer las distintas propiedades físicas del suelo.

En este caso, es posible que los cultivos de servicios sean de ciclo corto y permitan contar con un breve periodo de barbecho previo al cultivo de renta. Estos cultivos podrían sembrarse precosecha o poscosecha, con siembra terrestre en línea o al voleo. La prioridad es maximizar la producción de raíces, lo cual es posible lograr en periodos cortos de tiempo con cultivos que sean de rápido crecimiento. Si bien esto permite reducir el compromiso con la disponibilidad de agua para el cultivo siguiente, la elección de cultivos de ciclo corto trae aparejados otros compromisos. Por un lado, favorecen el crecimiento de malezas previo al cultivo de renta siguiente. Como consecuencia, aumentan las aplicaciones de herbicidas en el año, porque se desacopla el control de malezas de la interrupción del cs. Por otro lado, si los cs son de ciclos muy cortos pueden producir semillas y construir un banco de semillas en el suelo. Si la posterior emergencia del cs al año siguiente ocurre en ausencia de cultivos de renta, esto resulta en un beneficio porque se puede contar con un nuevo cs sin la necesidad de volver a sembrarlo. Sin embargo, el crecimiento no planificado de los cultivos de servicios es susceptible de generar problemas en los años en que siembren cultivos de renta durante el periodo que generalmente se encuentra con barbechos (*e.g.*, cultivos de invierno en zonas con predominio de cultivos de verano).

3.4. Control de la erosión

Al igual que para controlar malezas, para controlar la erosión también es necesario sembrar cultivos que presenten una alta tasa de crecimiento y que aporten rastrojo de lenta descomposición; por lo tanto, estos dos servicios se encuentran correlacionados. En este caso es importante garantizar la presencia de cobertura en los momentos de mayor riesgo de erosión. Por un lado, estos servicios ayudan a reducir la erosión hídrica porque la cobertura que generan impide el impacto directo de la gota de lluvia sobre el suelo, frenando la destrucción de los agregados y disminuyendo la ve-

locidad de escurrimiento superficial del agua (Sawchik *et al.*, 2012). Pero, además, como la cobertura vegetal queda anclada al suelo por medio de las raíces, reducen el transporte de sedimentos que se puede dar, tanto por erosión hídrica como eólica. Para maximizar este servicio se recomienda la siembra temprana de cultivos de servicios de gramíneas. De igual modo que para el control de malezas, esto brinda un efecto residual luego de la interrupción del cultivo de servicios, con sus beneficios y compromisos asociados (Véase el apartado 3.2. Control de malezas).

3.5. Abundancia de enemigos naturales

Para aumentar la biodiversidad y favorecer la abundancia de enemigos naturales es fundamental contar con una alta diversidad de plantas que les provean refugio y alimentos. Esto determina que, para maximizar la provisión de este servicio, sea recomendable implementar corredores biológicos que presenten una alta conexión con el área destinada a la agricultura. Diversos trabajos muestran que los corredores biológicos, o “elementos lineales en el paisaje”, como bordes de caminos o alambrados, pueden contener vegetación perenne que provea estos servicios. Por lo tanto, la maximización de este servicio tiene como compromiso la pérdida del área destinada a la producción, aunque pueden utilizarse áreas marginales. Los corredores biológicos, o áreas de refugio de biodiversidad, pueden complementarse con la siembra de una mezcla muy diversa de cultivos de servicios en los periodos de barbechos, disminuyendo el compromiso de la pérdida de área productiva.

3.6. Reposición de N cosechado

Para reponer el nitrógeno cosechado con los cultivos de renta es conveniente sembrar cs de leguminosas que incorporan al suelo nitrógeno del aire por medio de la fijación biológica. Las leguminosas aportan residuos de rápida descomposición, que favorecen el crecimiento y el reciclado de microorganismos que luego dan origen a la fracción de materia orgánica asociada a los minerales. Dado que esta fracción es la principal fuente de nitrógeno para los cultivos (Jilling *et al.*, 2018), su aumento provee dos grandes beneficios. A escala local, reduce la dosis de fertilizante nitrogenado que puede requerir el cultivo de renta siguiente (*e.g.*, maíz, girasol, sorgo) (Pinto *et al.*, 2021). A escala regional y global, disminuye las

pérdidas asociadas a la fertilización nitrogenada (lixiviación y emisión de óxido nitroso), porque el nitrógeno de la materia orgánica se libera gradualmente, mientras que los fertilizantes producen un pulso de liberación luego de su aplicación.

Para maximizar este servicio se debe garantizar una buena implantación e inoculación de las leguminosas, con el fin de acumular biomasa y de contar con altos porcentajes de fijación biológica de nitrógeno (Véase el Capítulo 7 de esta obra). Para lograrlo, puede ser necesario que las leguminosas se siembren en línea, luego de la cosecha del cultivo de renta. Sobre todo cuando requieren un íntimo contacto con el suelo para que se obtenga una buena implantación. A su vez, cuando no exista historia previa de la especie en el lote será fundamental contar con una buena inoculación, incluso utilizando el doble de inoculantes de la dosis recomendada. Por otra parte, la cantidad de nitrógeno fijado biológicamente que aporten las leguminosas también depende de la biomasa acumulada. Las especies que permitan una siembra temprana podrán acumular rápidamente biomasa y ser interrumpidas en forma temprana, dando lugar a periodos de barbechos breves previamente al cultivo siguiente. De este modo, se relativiza el riesgo de disminuir las reservas de agua para el cultivo siguiente, pero podría favorecerse el crecimiento de malezas tardías o las pérdidas de nitrógeno (lixiviación o emisiones de óxido nitroso). Esto último, dado que la liberación de nitrógeno durante la descomposición de las leguminosas es muy rápida –en ciertas condiciones ambientales se puede liberar cerca del 80% del nitrógeno en la biomasa en solo un mes–, y se daría durante el periodo de barbecho, sin poder ser absorbida por el cultivo de renta subsiguiente. Por ello la sincronización de la oferta y demanda de nitrógeno resulta un aspecto central del manejo de todos los cs. Por otro lado, aquellas especies de cs de leguminosas que deban sembrarse en línea comenzarán su ciclo más tarde y será necesario extenderlo para alcanzar una buena acumulación de biomasa, lo cual genera un compromiso con las reservas de agua del suelo.

3.7. Disminución de las emisiones de óxido nitroso, o gei

En este caso, el servicio a priorizar tiene un impacto global, como es la disminución de las emisiones de óxido nitroso. Las emisiones de este gas de efecto invernadero suelen ser altas en los agroecosistemas y, por lo tanto, contribuyen al cambio climático global. Para proveer el servicio de su mitigación se debe priorizar la sincronización entre la disponibilidad

de nitrógeno del suelo y la demanda de los cultivos. Para ello sería recomendable sembrar gramíneas capaces de lograr una rápida captura de los recursos y que aporten rastrojo de lenta descomposición. Pero, por otro lado, la siembra de leguminosas promueve el aumento de la materia orgánica del suelo y la reducción de las emisiones asociadas al uso de los fertilizantes nitrogenados. Por eso, para maximizar la provisión de este servicio resultan muy útiles las mezclas de gramíneas y leguminosas. Finalmente, extender la duración de su ciclo mediante siembras tempranas e interrupciones tardías es crucial para la sincronización, pero presenta compromisos con la disponibilidad de agua y el riesgo de transmitir plagas y enfermedades, como se detalló previamente para el servicio de materia orgánica del suelo.

4. Evidencias empíricas de la contribución de los CS

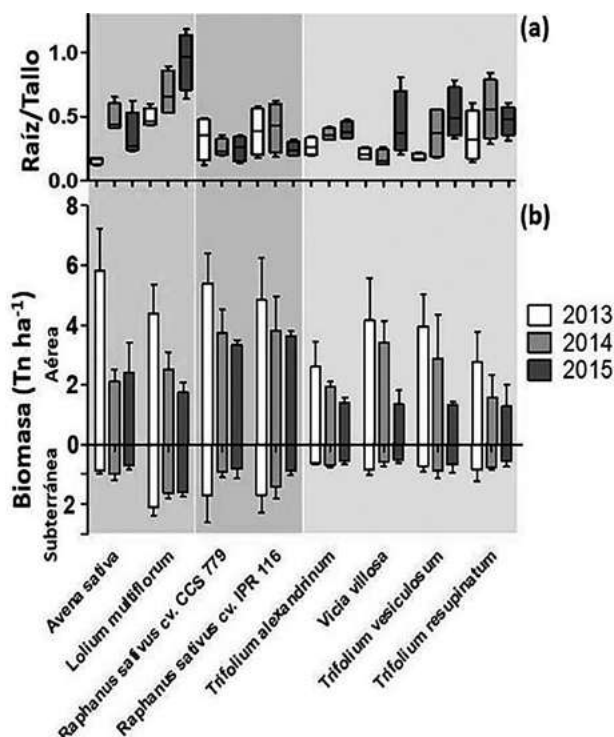
Para evaluar la potencial contribución de los cultivos de servicios se realizaron en el INIA La Estanzuela y el INIA 33 distintos experimentos orientados a explorar las características que presentan distintas especies y los servicios que estas pueden brindar.

1. En el INIA La Estanzuela se evaluó la producción de biomasa aérea y subterránea de ocho especies candidatas a ser empleadas como cultivos de servicios, durante tres años. Las especies sembradas fueron dos gramíneas (*Avena sativa* L. cv. LE 1095a y *Lolium multiflorum* cv. INIA Camaro), dos crucíferas (*Raphanus sativus* cv. IPR 116 y *Raphanus sativus* cv. CCS 779) y cuatro leguminosas (*Vicia villosa* Roth cv. Amoreiras, *Trifolium alexandrinum* cv. INIA calipso, *Trifolium vesiculosum* cv. Sagit y *Trifolium resupinatum* cv. Sirius). La siembra de las especies fue al voleo, sobre el cultivo de soja en pie durante el mes de abril. En todos los años, luego de la evaluación de biomasa se aplicaron herbicidas para terminar el ciclo de los cultivos de servicios y sembrar la soja siguiente.

Los resultados obtenidos en este experimento mostraron que tanto la producción de biomasa subterránea como su relación con la biomasa aérea fueron variables entre las distintas especies, incluso dentro de la misma familia (Figura 1). Las mayores producciones de biomasa subterránea las presentaron *L. multiflorum* y los dos cultivares de *R. sativus* (entre 1,3 y 1,8 t ha⁻¹). La biomasa subterránea de las distintas especies de leguminosas y gramíneas fue variable, pero en todas ellas se mantuvo relativamente constante entre años, resultando en una disminución

en la partición raíz/tallo en los años de mayor producción de biomasa aérea. En cambio, los dos cultivares de crucíferas (*R. Sativus*) presentaron una partición estable entre años y, por lo tanto, la biomasa aérea y la subterránea aumentaron en los años buenos. Las diferencias que presentaron las especies de las diferentes familias probablemente se deban a los rasgos que fueron considerados durante su mejoramiento genético, la biomasa aérea en las gramíneas y leguminosas, y la biomasa subterránea en las especies de crucíferas evaluadas.

FIGURA 1. PARTICIÓN RAÍZ/TALLO Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA Y SUBTERRÁNEA DE OCHO ESPECIES PERTENECIENTES A LAS FAMILIAS DE GRAMÍNEAS, CRUCÍFERAS O LEGUMINOSAS, EN LOS AÑOS 2013, 2014 Y 2015



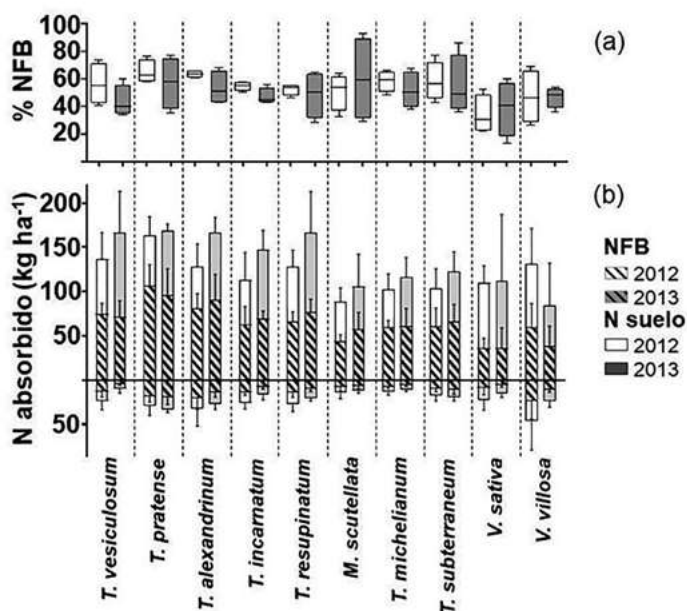
Nota: En el panel superior, las cajas y bigotes muestran las particiones raíz/tallo, la caja contiene al 50% de los datos y la línea indica el valor de la mediana (a). En el panel inferior, las columnas muestran la biomasa aérea (en valores positivos) y la subterránea (en valores negativos) que produjeron en promedio las distintas especies en cada año y su error estándar ($n = 4$) (b). En ambos paneles, las especies se encuentran agrupadas por familia.

Fuente: Elaboración propia.

2. En el INIA La Estanzuela se evaluó la producción de biomasa aérea y subterránea y el aporte de N fijado biológicamente (NFB) en diez especies de cultivos de servicio de leguminosas de invierno, durante dos años consecutivos. Para estimar el NFB se utilizó el método de abundancia natural ^{15}N , que consiste en comparar la señal isotópica que presentan las leguminosas –que absorben N tanto del suelo como del aire– con los valores estimados para cada una de estas fuentes nitrogenadas.

Las especies de leguminosas mostraron diferencias en la producción de biomasa aérea y también en la subterránea, aunque exploraron un rango menor en esta última (3,4 a 9,1 *versus* 0,8 a 1,3 t ha⁻¹, respectivamente). El porcentaje de NFB varió entre 36 y 61%, y los aportes de NFB al suelo fueron de 43 a 121 kg de N ha⁻¹ (Figura 2). Mientras que la biomasa aérea varió entre años, la biomasa subterránea y los aportes de NFB fueron bastante constantes, lo que determinó una baja correlación entre las variables. Entre las especies evaluadas, *Trifolium pratense* y *T. alexandrinum* fueron las mejor clasificadas para las condiciones evaluadas, mostrando la mayor cantidad de biomasa de raíces (~ 1,3 t ha⁻¹) y aportes de NFB (~ 112 kg de N ha⁻¹).

FIGURA 2. PROPORCIÓN DE NITRÓGENO FIJADO BIOLÓGICAMENTE (% NFB) Y CANTIDAD DE N ABSORBIDO (N TOTAL, NFB Y N ABSORBIDO DEL SUELO) DE DIEZ ESPECIES DE LEGUMINOSAS PERTENECIENTES A LOS GÉNEROS MEDICAGO, TRIFOLIUM Y VICIA, EN LOS AÑOS 2012 Y 2013



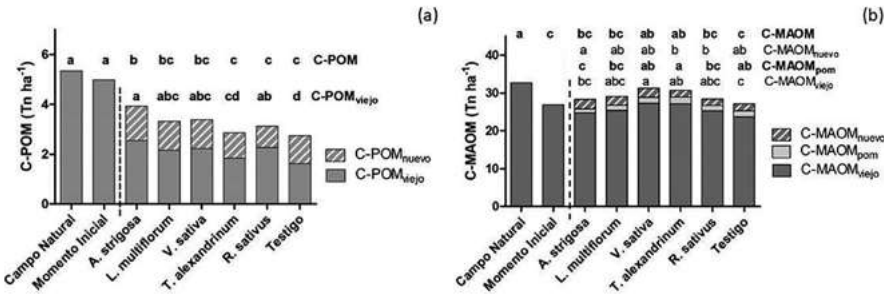
Nota: En el panel (a), las cajas y bigotes muestran los % nfb, la caja contiene al 50% de los datos y la línea indica el valor de la mediana. En el panel (b), las columnas muestran el promedio y el error standard del NFB y el N absorbido del suelo que presenta la biomasa aérea y subterránea en las distintas leguminosas. Las leguminosas se encuentran ordenadas de mayor a menor producción de biomasa aérea en el año 2013.

Fuente: Elaboración propia.

- En el INIA 33 se estudió el efecto acumulado de rotaciones agrícolas con y sin cultivos de servicios en la formación y descomposición de la materia orgánica del suelo. Para ello se estimaron los contenidos de materia orgánica particulada (POM) y asociada a los minerales (MOAM) al inicio del experimento y luego de tres años de mantener la misma rotación. El uso de isótopos de ¹³C permitió diferenciar el “C nuevo” (proveniente de los cultivos sembrados en el experimento) del “C viejo” (formado previamente al experimento) y, por lo tanto, la formación de POM y MOAM y la descomposición de cada fracción.

El contenido de C-POM del tratamiento testigo (2,74 t C ha⁻¹) fue menor que en las rotaciones con cs, pero en ninguna de estas se alcanzó el C-POM que presentaba el campo natural (5,34 t C/ha⁻¹). Los menores contenidos de C-POM se explican por el aumento en la descomposición del C_{viejo}, ya que todas las rotaciones formaron la misma cantidad de C_{nuevo}. El testigo también presentó los menores contenidos de C-MOAM (27,17 t C ha⁻¹). Todos los cs tendieron a aumentar el C-MAOM y las leguminosas alcanzaron los niveles que presentaba el campo natural (30,98 y 32,68 t C ha⁻¹, respectivamente), debido a una menor descomposición y a que formaron más MAOM a partir de la POM que el resto de las rotaciones. Entre los cs evaluados, avena, raigrás y vicia presentaron los mayores contenidos de C-POM y, vicia y trébol alejandrino los mayores contenidos de C-MOAM. Esto sugiere que, para aumentar ambas fracciones, deberíamos aportar en simultáneo biomasa con calidades diferentes, mediante mezclas de cs de leguminosas y gramíneas (Figura 3).

FIGURA 3. CARBONO EN LA FRACCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA (A) Y ASOCIADA A LOS MINERALES (B) ACUMULADO EN LOS PRIMEROS 15 CM DE PROFUNDIDAD DEL SUELO (T C HA⁻¹)



Nota: En el panel (a), las barras lisas muestran el C-POM_{viejo} (C formado previamente a la instalación del experimento) y las barras rayadas, el C-POM_{nuevo} (C formado a partir de los cultivos presentes en la rotación). En el panel (b), las barras oscuras y lisas muestran el C-MAOM_{viejo}, las barras claras y lisas muestran el C-MAOM_{pom} (C formado a partir de la descomposición de la POM) y las barras rayadas el C-MAOM_{nuevo} (C formado a partir de los cultivos presentes en la rotación). Las letras distintas muestran diferencias significativas en los contenidos de C presentes en el campo natural, en el momento inicial y en las distintas rotaciones de soja con cultivos de servicios o barbecho invernal (testigo) luego de tres años ($p < 0,05$ en **negrita**; $p < 0,10$ en automático).

Fuente: Elaboración propia.

5. Consideraciones finales

El uso de cultivos de servicios (cs) reseñado en este capítulo y en otros es una pieza clave en el diseño de transiciones agroecológicas en sistemas agrícolas de escala. El desarrollo de una agenda de investigación para hacer disponibles tecnologías de este tipo en sistemas agropecuarios extensivos es de enorme importancia para lograr efectos cuantitativamente relevantes sobre la oferta de SE (Tiftonell *et al.*, 2020). Los cs impactan no solo sobre los SE de regulación sino también sobre los de producción, a través de la mejora en la disponibilidad de recursos o la sanidad de los cultivos de renta. Los efectos de los cs se verifican a escala local, con beneficios apropiables por los productores y las comunidades, así como a nivel regional o global. Los cs pueden contribuir de manera directa a varias de las distintas dimensiones que caracterizan a una transición agroecológica. Unos aspectos clave en los que impacta un cs en una rotación agrícola son el aumento de la entrada de C, es decir, energía al sistema, y la reducción de la estacionalidad de las ganancias de C y de la interceptación de radiación. Al ser C lo que queda disponible en el agroecosistema, la inclusión de cs disminuirá la apropiación humana de la productividad primaria e incrementará la energía disponible para mantener las funciones básicas, o el “metabolismo”, del ecosistema. Paruelo *et al.* (2016) y Staiano *et al.* (2021) muestran que la combinación de la cantidad total de C fijado y de su estacionalidad es un buen *proxy* de la oferta de “paquetes” de SE de regulación. Dentro de estos “paquetes”, el balance de emisiones de gases con efecto invernadero (GEI) es uno de los más importantes. La mejora en la eficiencia en el uso de los recursos (particularmente agua y nutrientes) es otro. Finalmente, los cs permiten una reducción sustancial en la aplicación de productos sintéticos, en especial fertilizantes y herbicidas, disminuyendo la dependencia de insumos externos de los sistemas agrícolas y favoreciendo la actividad microbiana y, en definitiva, la salud del suelo y del sistema.

Referencias

Álvarez, C. R.

(2013), “Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: caracterización, génesis y manejo”, en *IAH*, 10, pp. 2-9.

Baeza, S., Baldassini, P., Bagnato, C., Pinto, P. y Paruelo, J.

(2014), *Caracterización del uso/cobertura del suelo en Uruguay a partir de series temporales de imágenes MODIS*, *Agrociencia* 18, pp. 95-105.

Baeza, S. y Paruelo, J. M.

(2018), "Spatial and temporal variation of human appropriation of net primary production in the Rio de la Plata grasslands", en *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.014.

Banwart, S. A., Black, H., Cai, Z., Gicheru, P. T., Joosten, H., Victoria, R. L., Milne, E., Noellemeyer, E. y Pascual, U.

(2016), "The Global Challenge for Soil Carbon", en *Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits*, 71, pp. 1-9.

Bergkvist, G., Stenberg, M., Wetterlind, J., Båth, B. y Elfstrand, S.

(2011), "Clover cover crops under-sown in winter wheat increase yield of subsequent spring barley—Effect of N dose and companion grass", en *Field Crops Research*, 120, pp. 292-298.

Caviglia, O.

(2004), "Intensification of agriculture in the south-eastern Pampas I. Capture and efficiency in the use of water and radiation in double-cropped wheat-soybean", en *Field Crops Research*, 87, pp. 117-129.

Chen, G. y Weil, R. R.

(2010), "Penetration of cover crop roots through compacted soils", en *Plant and Soil*, N° 331, pp. 31-43.

Clark, L. J., Whalley, W. R. y Barraclough, P. B.

(2003), "How do roots penetrate strong soil?", en *Plant and Soil*, 255, pp. 93-104.

Coutinho, H. L., Noellemeyer, E., de Carvalho-Balheiro, F., Piñeiro, G., Fidalgo, E. C. C., Martius, C. y Figueira da Silva, C.

(2015), "Impacts of Land Use Change on Carbon Stocks and Dynamics in Central-Southern South American Biomes: Cerrado, Atlantic Forest and Southern Grasslands. Land Use Change and Carbon Dynamics in South America", en *Soil Carbon: Science, Management and Policy for Multiple Benefits*, pp. 224-234.

Ding, G., Liu, X., Herber, S., Novak, J., Amarasiriwardena, D. y Xing, B.

(2006), "Effect of cover crop management on soil organic matter", en *Geoderma*, 130, pp. 229-239.

Frasier, I., Quiroga, A. y Noellemeyer, E.

(2016), "Effect of different cover crops on C and N cycling in sorghum NT systems", en *Science of the Total Environment*, 562, pp. 628-639.

Gaba, S., Lescourret, F., Boudsocq, S., Enjalbert, J., Hinsinger, P., Journet, E. P., Navas, M. L., Wery, J., Louarn, G., Malézieux, E., Pelzer, E., Prudent, M. y Ozier-Lafontaine, H.

(2015), "Multiple cropping systems as drivers for providing multiple ecosystem services : from concepts to design", en *Agronomy for Sustainable Development*, 35, pp. 607-623.

García, L., Celette, F., Gary, C., Ripoche, A., Valdés-Gómez, H. y Metay, A.

(2018), "Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review", en *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 251, pp. 158-170.

Hall, A. J.

(1992), "Field-Crop systems of the Pampas", en Elsevier (ed.), *Ecosystems of the World*, pp. 413-450.

Jabran, K., Mahajan, G., Sardana, V. y Chauhan, B. S.

(2015), "Allelopathy for weed control in agricultural systems", en *Crop Protec*, 72, pp. 57-65.

Jackson, R. B., Lajtha, K., Crow, S. E., Hugelius, G., Kramer, M. G. y Piñeiro, G.

(2017), "The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls", en *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 48, pp. 419-445.

Jilling, A., Keiluweit, M., Contosta, A. R., Frey, S., Schimel, J., Schnecker, J., Smith, R. G., Tiemann, L. y Grandy, A. S.

(2018), "Minerals in the rhizosphere: overlooked mediators of soil nitrogen availability to plants and microbes", en *Biogeochemistry*, 139, pp. 103-122.

Kemper, B. y Derpsch, R.

(1980), "Results of studies made in 1978 and 1979 to control erosion by cover crops and no-tillage techniques in Paraña, Brazil", en *Soil & Tillage Research*, 1, pp. 253-267.

Kramer, A. W., Doane, T. A., Horwath, W. R. y van Kessel, C.

(2002), "Combining fertilizer and organic inputs to synchronize N supply in alternative cropping systems in California", en *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 91, pp. 233-243.

Liu, A., Ma, B. L. y Bomke, A. A.

(2005), "Effects of Cover Crops on Soil Aggregate Stability, Total Organic Carbon, and Polysaccharides", en *Soil Science Society of America Journal*, 69, p. 2041.

Mitchell, W. H. y Tell, M. R.

(1976), "Winter-Annual Cover Crops for No-Tillage Corn Production", en *American Society of Agronomy*, 69, pp. 569-573.

Nosetto, M. D., Jobbágy, E. G., Brizuela, A. B. y Jackson, R. B.

(2012), "The hydrologic consequences of land cover change in central Argentina", en *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 154, pp. 2-11.

Olson, K. R., Ebelhar, S. A. y Lang, J. M.

(2010), "Cover Crop Effects on Crop Yields and Soil Organic Carbon Content", en *Soil Science*, 175, pp. 89-98.

Paruelo, J. M., Texeira, M., Staiano, L., Mastrángelo, M., Amdan, L. y Gallego, F.,

(2016), "An integrative index of Ecosystem Services provision based on remotely sensed data", en *Ecological Indicators*, 71, pp 145-154.

Pieters, A. y McKee, R.

(1938), "The use of cover and green-manure crops", en Knight, H. (ed.), *Soils and*

Men: Yearbook of Agriculture 1938, United States Department of Agriculture, Washington, pp. 431-444.

Pinto, P.

(2018), *Evaluación de la fijación biológica de nitrógeno y la producción de raíces en distintos cultivos de servicios y sus efectos sobre las reservas de C y N orgánico del suelo*, Tesis de doctorado, Escuela para graduados de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.

Pinto, P., Fernández-Long, M. E. y Piñeiro, G.

(2017), Including Cover Crops during fallow periods for increasing ecosystem services: is it possible in croplands of South.

Pinto, P., Rubio, G., Gutiérrez, F., Sawchik, J., Arana, S. y Piñeiro, G.

(2021), "Variable root:shoot ratios and plant nitrogen concentrations discourage using just aboveground biomass to select legume service crops", en *Plant and Soils*, 463, pp. 347-358.

Piñeiro, G., Pinto, P., Arana, S., Sawchik, J., Díaz, J. I., Gutiérrez, F., y Zarza, R.

(2014), "Cultivos de servicio: integrando la ecología con la producción agrícola", en XXVI Reunión Argentina de Ecología, Comodoro Rivadavia, Chubut (Argentina).

Power, A. G.

(2010), "Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies", en *Philosophical transactions of the Royal Society B*, 365, pp. 2959-2971.

Restovich, S. B., Andriulo, A. E. y Portela, S. I.

(2012), "Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics", en *Field Crops Research*, 128, pp. 62-70.

Rosecrance, R. C., McCarty, G. W., Shelton, D. R. y Teasdale, J. R.

(2000), "Denitrification and N mineralization from hairy vetch (*Vicia villosa* Roth) and rye (*Secale cereale* L.) cover crop monocultures and bicultures", en *Plant and Soil*, 227, pp. 283-290.

Rubio, G.

(2011), "Los sistemas de producción actuales en la Región Pampeana. Una visión científica", Simposio Fertilizar 2011. IPNI Fertilizar, pp. 143-149.

Sawchik, J., Pérez-Bidegain, M. y García, C.

(2012), "Impact of Winter Cover Crops on Soil Properties Under Soybean Cropping Systems", en *Agrociencia Uruguay*, 16, pp. 288-293.

Schipanski, M.E., Barbercheck, M., Douglas, M. R., Finney, D. M., Haider, K., Kaye, J. P., Kemanian, A. R., Mortensen D. A., Ryan, M. R., Tooker, J. y White, C.

(2014), "A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems", en *Agricultural Systems*, 5, pp. 12-22.

Six, J., Conant, R. T., Paul, E. A. y Paustian, K.

(2002), "Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils", en *Plant and Soil*, 241, pp. 155-176.

Soriano, A.

(1991), "Río de la Plata Grasslands", en *Ecosystems of the World*, Elsevier (ed.), Ámsterdam, pp. 367-407.

Staiano L., Camba Sans, G. H., Baldassini, P., Gallego, F., Texeira, M. A. y Paruelo, J. M.

(2021), "Putting the Ecosystem Services idea at work: Applications on impact assessment and territorial planning", en *Environmental Development*, 38, pp. 100570.

Thorup-Kristensen, K.

(1994), "The effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops", en *Fertilizer research*, 37, pp. 227-234.

Tittonell, P.

(2014), "Ecological intensification of agriculture-sustainable by nature", en *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, pp. 53-61.

Venkateswarlu, B., Srinivasarao, Ch., Ramesh, G., Venkateswarlu, S. y Katyal, J. C.

(2007), "Effects of long-term legume cover crop incorporation on soil organic carbon, microbial biomass, nutrient build-up and grain yields of sorghum/sunflower under rain-fed conditions", en *Soil Use and Management*, 23, pp. 100-107.

Vila-Aiub, M. M., Vidal, R. A., Balbi, M. C., Gundel, P. E., Trucco, F. y Ghera, C. M.

(2008), "Glyphosate-resistant weeds of South American cropping systems: An overview", en *Pest Management Science*, 64, pp. 366-371.

Villamil, M. B., Bollero, G. A., Darmody, R. G., Simmons, F. W. y Bullock, D. G.

(2006), "No-Till Corn/Soybean Systems Including Winter Cover Crops", en *Soil Science Society of America Journal*, 70, p. 1936.

Vitousek, P. M., Ehrlich, P. R., Ehrlich, A. H. y Matson, P. A.

(1986), "Human appropriation of the products of photosynthesis", en *BioScience*, 36, pp. 368-373.

Volante, J., Mosciaro, J.; Morales Poclava, M., Vale, L., Castrillo, S., Sawchik, J., Tiscornia, G., Fuente, M., Maldonado, I., Vega, A., Trujillo, R., Cortéz, L. y Paruelo, J. M.

(2015), "Expansión agrícola 2000-2010 en Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Chile. Caracterización espacial mediante series temporales de índices de vegetación", en *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 41, pp. 179-191.

Wagner-Riddle, C. y Thurtell, G. W.

(1998), "Nitrous oxide emissions from agricultural fields during winter and

spring thaw as affected by management practices”, en *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 52, pp. 151-163.

Weil, R., White, C. y Lawley, Y.

(2009), “Forage radish: A new multi-purpose cover crop for the Mid-Atlantic”, en *Fact Sheet*, 824, pp. 1-8.

Capítulo 12

Evaluación de la heterogeneidad estructural y funcional de los pastizales naturales para su manejo

José María Paruelo y Alice Altesor

1. Los pastizales naturales como base de la ganadería extensiva: desafíos desde la perspectiva agronómica, ambiental, social y económica

Los pastizales del Río de la Plata son una de las áreas más extensas de pastizales templados del planeta (Soriano *et al.*, 1992; Paruelo *et al.*, 2007; Oyarzabal *et al.*, 2019). Uruguay está totalmente incluido en este bioma y aproximadamente el 60% de su superficie está actualmente cubierto por pastizales (Baeza y Paruelo, 2020). El “campo natural”, como se lo nombra habitualmente, es la base de la ganadería y un activo ambiental clave para diferenciar la producción de carne uruguaya a partir de la preservación de la biodiversidad y la oferta de servicios ecosistémicos (SE). Si bien la historia y la cultura de la sociedad uruguaya tienen sus bases en el “campo natural”, su importancia es, paradójicamente, subvalorada y sus características son desconocidas para la mayor parte de la población, fundamentalmente la urbana. En forma tradicional, se han descrito las características de nuestra vegetación por la negativa: “el Uruguay es un país sin árboles” (invisibilizando, a su vez, el bosque nativo). La “civilización ganadera” es un aspecto identitario clave y la ganadería ha sido la actividad humana más duradera y de mayor extensión en el territorio de Uruguay (De Torres, 2015).

El área ocupada por pastizales naturales está dedicada en su totalidad a la producción ganadera extensiva. Este sistema productivo se basa,

fundamentalmente, en recursos forrajeros perennes y en el pastoreo mixto de ganado vacuno y ovino. En el sistema se reconoce la existencia de varios subsistemas, de acuerdo con la orientación productiva de cada predio (criadores, recriadores, ciclo incompleto, ciclo completo), y este se caracteriza por un uso mínimo de insumos (Modernel *et al.*, 2016). La mayoría de las explotaciones son sistemas pastoriles basados en campo natural, mejoramientos extensivos y pasturas mejoradas. El 80,6% del área explotada corresponde a pastizales naturales, seguido por 6,1% de praderas permanentes y 4,4% de intersembras sobre el tapiz natural (“mejoramientos”) (MGAP-DIEA, 2019). La producción ganadera da cuenta del 29% de las exportaciones de Uruguay (Uruguay XXI, 2021) e involucra aproximadamente 35.000 establecimientos, muchos de ellos familiares (Tommasino *et al.*, 2014). La productividad de esas explotaciones limita seriamente su sostenibilidad económica. Gutierrez *et al.* (2020) calcularon la productividad secundaria neta (PSN) de los herbívoros domésticos a partir de un exhaustivo estudio de los flujos de entradas (nacimiento, compras), salidas (ventas de animales y productos) y cambios en la existencia a partir de los datos de registro único de ganado en el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca adjudicado a una Razón Social que es tenedor de ganado, con o sin tenencia de la tierra (N° DICOSE). Todos los productos (carne, lana y leche) se expresaron en unidades comunes de energía ($\text{MJ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Para las regiones de Uruguay en donde la mayoría de la producción ganadera se basa en pastizales naturales, la PSN fue de alrededor de $760 \text{ MJ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, o, en equivalentes de carne, de $77 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Esto se asocia a una eficiencia de conversión del pasto a carne del 1,17% (Gutierrez *et al.*, 2020). Un ejercicio prospectivo indica que la productividad de la carne puede aumentarse por lo menos en 25% en 15 años aplicando objetivos de producción alcanzables con las tecnologías ya existentes y validadas (Kanter *et al.*, 2016). De hecho, ese aumento representaría trabajar con los valores de eficiencia de conversión de forraje en carne en el decil superior de las secciones policiales de la región de Cuesta Basáltica y las Sierras del Este, según el estudio de Gutierrez *et al.* (2020).

Dada la resiliencia de los pastizales frente a fluctuaciones climáticas y a la baja disponibilidad de capital para su explotación, este recurso tiene un rol preponderante en los sistemas ganaderos familiares. Los pastizales naturales son un hábitat natural amenazado, tanto por la expansión de la agricultura y la forestación como por la degradación. En la parte meridional de América del Sur, la superficie de los cultivos de verano

(principalmente de soja) y de los “cultivos dobles” (trigo-soja dentro de la misma parcela) aumentó en 62% y 52%, respectivamente (Volante *et al.*, 2015). La mayoría de estos cambios se produjeron a expensas de los cultivos perennes (en especial, pasturas perennes) y de los hábitats naturales. En Uruguay, el cambio más frecuente en la cobertura fue el fenómeno de “agriculturización”, es decir, la sustitución de los pastizales por cultivos anuales. Esto incluye la expansión de las tierras de cultivo en los pastizales nativos, o el aumento de la fase de cultivo anual de las rotaciones de cultivos y pastos. Esta transformación se produjo en el 14,2% de los pastizales del Río de la Plata (Baeza y Paruelo, 2020). En Uruguay, específicamente, la superficie ocupada por pastizales nativos y pasturas perennes disminuyó del 84% al 66% entre 2000 y 2012 (Baeza *et al.*, 2014). Debido a la expansión de la agricultura y la forestación, la ganadería en el Uruguay experimentó un incremento de la densidad de ganado vacuno y ovino por unidad de área de pastizales (2,65% para el período 1990-2000) (Paruelo *et al.*, 2006).

Los pastizales naturales juegan un papel central en la preservación de la oferta de servicios ecosistémicos (Sala y Paruelo, 1997), incluyendo la conservación de la biodiversidad, el secuestro de C y la regulación hídrica, entre otros. La preservación de la oferta de SE reviste importancia *per se* dada su conexión con el bienestar humano (Paruelo y Lateral, 2019). El registro de la oferta de SE y de su cambio frente a distintas estrategias de manejo es clave para evaluar la dimensión ambiental de estrategias de intensificación (Paruelo y Sierra, 2022). La preservación de los hábitats naturales, ya sea en términos de superficie como de su grado de conservación, y de ciertos SE finales (reducción de emisiones de gases con efecto invernadero, preservación de la biodiversidad, calidad del agua, etc.) ha sido asumida como compromiso político, o incluso de Estado. Más aún, se discute la posibilidad de diferenciar la carne y/o la lana uruguaya en el mercado interno y de exportación a partir de documentar el uso de hábitats naturales y/o el nivel de preservación de SE en los predios en donde se produjo.

2. La situación actual

La producción ganadera uruguaya tiene un gran potencial de avanzar hacia una transición agroecológica. De hecho, la naturaleza extensiva de bajo nivel de insumos de la ganadería determina que la caracterización de “agroecológica” esté asociada a documentar el proceso de producción

y sus consecuencias sobre la oferta de SE y a preservar y/o restaurar los hábitats naturales que constituyen la base forrajera. Para avanzar en esta dirección aparece como necesario, ante todo, caracterizar y mapear las áreas ocupadas por pastizales naturales. Estas áreas representan el hábitat con el menor nivel de intervención antrópica. En tal sentido, se debe contar con una descripción documentada de los distintos tipos de pastizales, basada en sus atributos intrínsecos y no en *proxies* como el tipo de suelos o su material geológico original. Estas aproximaciones representan un recurso válido en ausencia de verdaderas descripciones, pero su confiabilidad es limitada. De hecho, mapear pastizales naturales a partir de los suelos no permite discriminar áreas que fueron transformadas a agricultura o en donde el tapiz vegetal resultó alterado. Como en toda descripción científica, los atributos que definen una clase deben ser registrables y debe documentarse la capacidad de discriminar, es decir, indicar con qué nivel de confianza el registro de una dada característica permite identificar una clase.

Más allá de la importancia de mejorar el conocimiento del principal ecosistema de Uruguay, la descripción de las comunidades de pastizal tiene aplicaciones prácticas muy relevantes. Por un lado, permite extrapolar los resultados de la experiencia de manejo o de experimentos. Describir la comunidad en donde se probaron, por ejemplo, técnicas de suplementación de vacunos elimina una fuente de variabilidad en la generalización de los resultados. Estos no serán los mismos en pastizales ralos que en pastizales densos, o en poteros con distinta proporción de estas comunidades. La respuesta de las comunidades a distintas alternativas de manejo del pastizal (carga ganadera, relación lanar-vacuno, frecuencia de pastoreo y descansos) diferirá entre ellas. Diferenciar las comunidades brinda nuevos criterios para la realización de subdivisiones y, como consecuencia, para realizar manejos más precisos, donde situaciones diversas sean manejadas en forma distinta y de acuerdo con su potencial. Por otro lado, algunas comunidades podrán ser usadas mejor que otras de manera diferida en el invierno o en condiciones de déficit hídrico. La respuesta a sistemas de pastoreo también podrá diferir entre comunidades. La reacción a fenómenos adversos también puede ser variada. En el caso de sequías, existe claramente un gradiente en el impacto y en la recuperación entre comunidades. Por lo tanto, conocer la distribución de las comunidades vegetales en un predio permite prospectar la respuesta específica a manejos que combinen, por ejemplo, suplementación, tipo de pastoreo y manejo de adversidades climáticas. Los procesos

de deterioro asociados a un tipo particular de perturbación (por ejemplo, una combinación de altas cargas ganaderas y sequía) no ocurrirán de igual manera en las distintas comunidades. Los cambios vinculados al deterioro del pastizal y a la proporción del área en estado de mayor degradación son distintos para cada tipo de pastizal.

La descripción y la cartografía de las comunidades de pastizal tienen una importancia potencial en la diferenciación de la producción ganadera y, por lo tanto, en su resultado económico. La combinación de los sistemas de trazabilidad del ganado con la cartografía de las comunidades favorecería el desarrollo de sistemas de tipificación de la carne en cuanto a la preservación de hábitats naturales, servicios ecosistémicos y biodiversidad. Cada animal faenado puede vincularse a uno o más padrones, lo cual posibilita saber si esa carne se produjo sobre campo natural y en cuál de las comunidades. La caracterización de las comunidades abre la oportunidad de ofrecer un producto diferente, tanto en cuanto a cualidades nutraceuticas como a su huella ambiental.

3. Conocimiento y herramientas generados

El trabajo de investigadores de la UDELAR (Facultad de Ciencias y de Agronomía), del Instituto del Plan Agropecuario y del INIA, financiado mediante proyectos del Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA) (Altesor *et al.*, 2010, 2019b), permitió avanzar en una caracterización de los pastizales naturales que incluyó:

- La descripción de las comunidades y subcomunidades de los pastizales de Uruguay (Lezama *et al.*, 2019).
- La generación de protocolos de evaluación a campo del estado de cada comunidad (Altesor *et al.*, 2019b).
- La definición de estados y fases para cada comunidad (Altesor *et al.*, 2019).
- La generación de hipótesis de las transiciones mediante procesos de coinnovación (Altesor *et al.*, 2019b).

3.1. Descripción de las comunidades y subcomunidades de los pastizales naturales de Uruguay

Un nivel de heterogeneidad particularmente importante para la toma de decisiones en sistemas ganaderos es el de la comunidad vegetal (Véase

Caja 1 en Anexo). La comunidad se manifiesta, en general, a una escala similar a la cual se toman decisiones por parte de los productores: el potrero. Si bien la escala puede ser similar, un *stand* de una comunidad dada puede abarcar más de un potrero y/o un potrero incluir *stands* de varias comunidades.

Las especies presentes en un parche, o *stand* de campo natural, no ocurren al azar. Como señalábamos antes, una serie de factores asociados a la disponibilidad de recursos, las perturbaciones e interacciones entre especies vegetales determinan que algunas plantas coocuran con mayor frecuencia. En última instancia, se conforman “sociedades” de especies. La fitosociología estudia y provee los métodos para describir estas sociedades, o comunidades vegetales.

Este método parte de la realización de censos de vegetación en *stands* seleccionados de manera de cubrir la mayor parte de la variación fisionómica de los pastizales. El censo consiste en registrar, de manera exhaustiva, todas las especies presentes en el área de muestreo, un área de 25 a 100 m² ubicada en la parte central de un *stand* homogéneo. Adicionalmente, para cada una de las especies se define un valor de abundancia-cobertura. Muchas veces, a la información florística se le agrega información adicional como la macro y microtopografía, la fisonomía (estratificación y altura) y su georreferenciación. A través de este procedimiento se realizaron, en el marco de proyectos financiados por el MGAP y el FPTA, un total de 308 censos distribuidos en las zonas en donde dominan los pastizales naturales (Lezama *et al.*, 2019).

Con toda esta información se construyeron matrices en donde las filas corresponden a los censos individuales y las columnas, a las especies registradas. Cada celda de la matriz incluyó los valores de cobertura. La matriz se analiza mediante técnicas de análisis multivariados de clasificación y ordenación. Esto permite, por un lado, agrupar los censos con base en el parecido en cuanto a especies presentes (“sociedades de especies”) y, por otro, identificar las especies indicadoras de cada “sociedad”. Estas especies indicadoras son aquellas que con muy alta frecuencia forman parte de la “sociedad”, no necesariamente son las más comunes ni las más abundantes.

Los análisis de los censos permitieron identificar cinco comunidades principales de pastizal en Uruguay. Dos de las comunidades están restringidas a la Cuesta Basáltica, presentando una de ellas una fisonomía de pastizal ralo (comunidad I) y la otra, de pastizal denso (comunidad III). Las restantes tres comunidades se distribuyen entre las regiones de Sierras del Este, Cuenca Sedimentaria del Noreste y Centro Sur, presen-

tando cada una una fisonomía distintiva: pastizal ralo (comunidad II), denso (comunidad IV) y denso alto (comunidad V) (Figura 1). La proporción relativa de tipos funcionales de plantas varía entre las comunidades. Cada una de esas comunidades se caracteriza a partir de un conjunto de especies indicadoras (Tabla 1). Estas especies pueden ser muy poco abundantes y, en ocasiones, difíciles de encontrar en el campo. Sin embargo, son muy “fieles” a la “sociedad” de plantas que constituye cada una de esas cinco comunidades. Reconocer las especies indicadoras permite identificar la comunidad a la cual pertenece un *stand* dado de campo natural. Las cinco comunidades descritas en muchos casos describen una heterogeneidad obvia: por ejemplo, la asociada a suelos superficiales y profundos en la región de la Cuesta Basáltica. Es por ello por lo que algunas de esas comunidades han sido divididas en subcomunidades. En total se identificaron 14 subcomunidades. En algunos casos, justamente en áreas de pastizales densos en la región Basáltica, la diferenciación de subcomunidades puede ser crítica en términos del manejo ganadero (Véase Caja 2 en Anexo).

FIGURA 1. PERFILES FISONÓMICOS DE LAS 5 COMUNIDADES DEFINIDAS POR LEZAMA ET AL. 2019

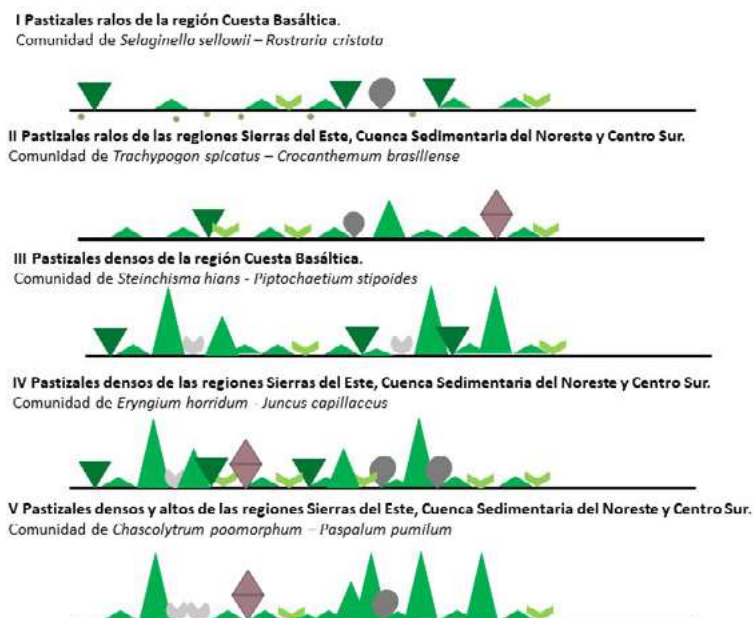


TABLA 1. CARACTERIZACIÓN DE LAS COMUNIDADES PRINCIPALES A PARTIR DE LOS VALORES INDICADORES DE CONJUNTOS DE ESPECIES

COMUNIDAD	I	II	III	IV	V
# Censos	24	76	53	139	16
<i>Selaginella sellowii</i>	87				
<i>Rostraria cristata</i>	83		1		
<i>Chloris grandiflora</i>	79				
<i>Paronychia brasiliana</i>	66				
<i>Eragrostis Lugens</i>	65	1	14	1	
<i>Microchloa indica</i>	65	1			
<i>Tripogon spicatus</i>	58				
<i>Perezia multiflora</i>	55				
<i>Euphorbia serpens</i>	52		1		
<i>Wahlenbergia linarioides</i>	51	5	1	2	
<i>Trachypogon montufarii</i>		69			
<i>Crocantemum brasiliense</i>	3	56			
<i>Galactia marginalis</i>	1	51	3	6	
<i>Aira elegantissima</i>		50		1	
<i>Piptochaetium montevidense</i>	10	46	15	17	1
<i>Richardia humistrat</i>	1	46		15	21
<i>Danthonia cirrata</i>	2	46	1	2	
<i>Facelis retusa</i>	1	43		3	
<i>Axonopus argentinus</i>		35		6	2
<i>Eragrostis neesii</i>	29	31		8	
<i>Steinchisma hians</i>			82	1	7
<i>Piptochaetium stipoides</i>	5		75	8	
<i>Mnesithea selloana</i>		1	63	11	18
<i>Nassella neesiana</i>	5		57	9	
<i>Ruellia morongii</i>			55		
<i>Phalaris platensis</i>			52		
<i>Mecardonia procumbens</i>			50		
<i>Sporobolus indicus</i>			49	8	1
<i>Chascolytrum subaristatum</i>	24	1	47	4	
<i>Eryngium horridum</i>	5	8	1	44	1
<i>Juncus capillaceus</i>	1	8	3	38	5

(Continúa en página siguiente)

<i>Bothriochloa laguroides</i>	7	6	20	37	5
<i>Nassella charruana</i>			17	37	
<i>Gaudinia fragilis</i>		4		35	1
<i>Paspalum dilatatum</i>			30	32	18
<i>Baccharis trimera</i>		10	2	30	25
<i>Lolium multiflorum</i>			9	30	
<i>Chevreulia sarmentosa</i>	23	9	8	29	5
<i>Cynodon dactylon</i>		4		29	8
<i>Chascolytrum poomorphum</i>				1	77
<i>Paspalum pumilum</i>					76
<i>Dichantherium sabulorum</i>		1		13	64
<i>Axonopus affinis</i>		2	17	16	56
<i>Glandularia selloi</i>				14	48
<i>Gratiola peruviana</i>			2	2	47
<i>Eragrostis bahiensis</i>					47
<i>Chascolytrum lamarckianum</i>		2		6	44
<i>Centella asiática</i>					43

Nota: Se presentan solo las taxas con valores significativos ($p < 0.05$). En la fila superior de la tabla se indica el número de censos contenidos en cada comunidad.

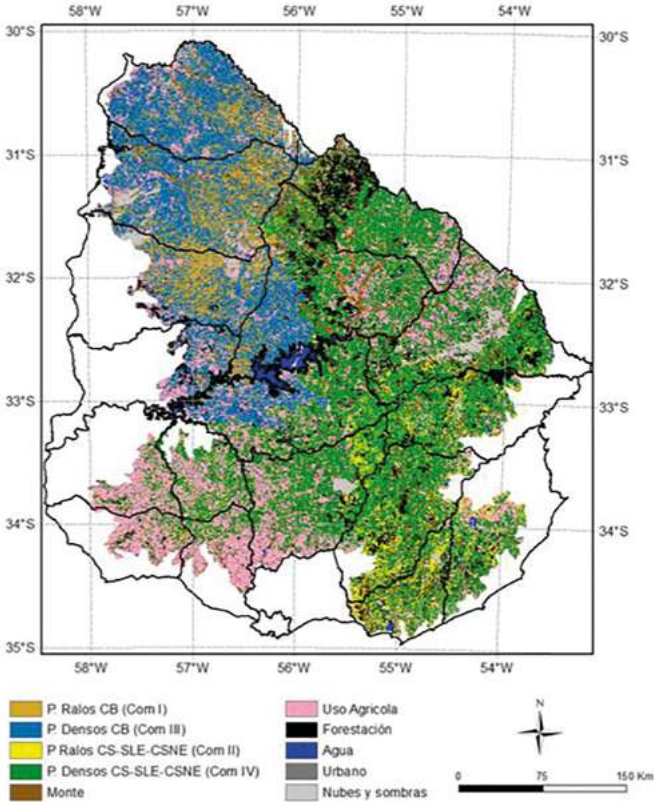
Fuente: Elaboración propia.

Las comunidades identificadas no solo difieren en su estructura, es decir en la proporción de tipos funcionales de plantas o en la composición florística, sino también en la productividad primaria neta anual, o sea, la cantidad total de materia seca (MS) producida en un año (kg MS/ha año). Mediante el uso de técnicas de teledetección es posible estimar esa productividad (Altesor *et al.*, 2019b). La estimación de la productividad primaria neta aérea, basada en sensores remotos, es la base de los sistemas de seguimiento forrajero actualmente operativos en la Cooperativa Nacional de Productores de Leche (CONAPROLE) y el Instituto del Plan Agropecuario. Mediante estas técnicas es posible describir tanto los valores medios de productividad de cada comunidad como su variación entre potreros, a lo largo del año entre estaciones, o entre años (véase ejemplos en Altesor *et al.*, 2019b).

Usando técnicas de clasificación de datos satelitales, Baeza y colaboradores (citados en Altesor *et al.*, 2019b) cartografiaron la distribución en el espacio de las comunidades de pastizales naturales y otros usos/

coberturas de las áreas ganaderas de Uruguay (Figura 2). El área total cartografiada cubre aproximadamente 13,3 millones de hectáreas, algo más del 75% del territorio nacional (MGAP, 2020).

FIGURA 2. MAPA DE TIPOS DE COBERTURA DEL SUELO Y COMUNIDADES VEGETALES DE PASTIZAL NATURAL DE LAS PRINCIPALES ÁREAS GANADERAS DE URUGUAY



Fuente: Altesor et al. (2019b).

En resumen, este trabajo generó dos herramientas clave a la hora de reconocer y manejar los distintos tipos de pastizales naturales del Uruguay: la tabla de especies indicadoras de las distintas comunidades y subcomunidades, y el mapa de distribución de esas comunidades.

3.2. Protocolos de evaluación a campo del estado de cada comunidad

La evaluación del grado de degradación, entendido como la diferencia entre un estado dado respecto de una situación definida como de referencia), es un paso crucial en la definición del manejo de un área de pastizal natural. Según el diagnóstico y los objetivos perseguidos, las acciones de manejo pueden ser muy distintas en cuanto a carga ganadera, método de pastoreo, momento de ocupación, necesidad de clausurar, acciones de restauración, etcétera.

El abandono del paradigma del equilibrio (Dyksterhuis, 1949) y la incorporación de las perturbaciones y de los eventos estocásticos como determinantes de la dinámica de la vegetación se materializaron, a finales de la década de 1980, en modelos conceptuales aplicables al manejo de los pastizales (Westoby *et al.*, 1989). Estos modelos incorporaron la idea de que las comunidades vegetales de una región pueden alcanzar múltiples equilibrios estables y plantearon los modelos de estados y transiciones (MET). Los MET representan la dinámica de la vegetación como un conjunto de “estados” discretos que ocurren en determinada porción del territorio y las “transiciones” entre dichos estados.

La construcción de los MET involucra la identificación y caracterización de estos diferentes “estados”, o “fases”, de la vegetación. Las “variables de estado” corresponden a los atributos de la vegetación utilizados para definir los “estados” (Westoby *et al.*, 1989; Knapp *et al.*, 2011). Los atributos de la vegetación pueden ser estructurales (por ejemplo, riqueza de especies, cobertura total y, por tipos funcionales de plantas, altura de la vegetación, composición florística, entre otros), o funcionales (productividad primaria neta aérea, evapotranspiración, etc.). En la literatura se han reportado distintas aproximaciones para la construcción de estos modelos, siendo el “método deductivo” el más frecuente. Según este, los estados se definen a partir de la experiencia y del conocimiento de expertos (Bestelmeyer *et al.*, 2003; Briske *et al.*, 2003). De manera alternativa, los estados pueden definirse a través de un proceso inductivo. En este caso, se parte de relevamientos a campo de un elevado número de situaciones y de su posterior análisis para definir agrupamientos de sitios sobre la base de su similitud. Estos agrupamientos representarán los “estados”, o las “fases”, dentro de un estado. Altesor *et al.* (2019a y 2019b) siguieron esta aproximación inductiva.

La selección de los atributos estructurales de la vegetación se apoyó en una serie de criterios que incluyeron la sencillez, la correlación con

cambios en la estructura y los procesos ecosistémicos promovidos por el pastoreo, la sensibilidad al cambio y la capacidad y el tiempo de respuesta, así como una baja relación costo-efectividad. La lista de indicadores se presenta en la Tabla 2. Las especies dominantes del estrato basal y de los estratos superiores de la vegetación fueron agrupadas en 14 tipos funcionales de plantas: gramíneas estivales erectas, gramíneas estivales postradas, gramíneas estivales formadoras de maciegas, gramíneas invernales, gramíneas invernales formadoras de maciegas, graminoides, hierbas perennes en roseta, otros (algas y musgos), leguminosas, arbustos, subarbustos, hierbas perennes erectas, hierbas anuales y *Selaginella sellowii*. La planilla presentada en la Tabla 2 constituye una herramienta clave para sistematizar la caracterización del estado de conservación de los hábitats naturales. Este protocolo permite, a partir del registro de varias parcelas dentro de un potrero, la caracterización rápida, objetiva y repetible del estado del pastizal.

TABLA 2. INDICADORES ESTRUCTURALES DE LA VEGETACIÓN UTILIZADOS EN EL RELEVAMIENTO A CAMPO

Nº	Indicador estructural	Abreviatura
1	Número de estratos de la vegetación	Nº estr
2	Altura del estrato 1, o basal	Alt E1
3	Altura del estrato 2	Alt E2
4	Altura del estrato 3	Alt E3
5	Cobertura del estrato basal (%)	Cob E1
6	Cobertura del estrato 2 (%)	Cob E2
7	Cobertura del estrato 3 (%)	Cob E3
8	Suelo desnudo	% SD
9	Cobertura de gramíneas en el estrato basal	% G
10	Cobertura de especies anuales	% An
11	Cobertura de especies invasoras (<i>Lolium multiflorum</i> , <i>Cynodon dactylon</i> , <i>Eragrostis plana</i> , <i>Senecio madagascariensis</i> , <i>Ulex europaeus</i>)	% Inv
12	Número e identidad de las especies dominantes del estrato basal (especies cuyas coberturas sumadas superan el 50% de la cobertura total)	Nº dom1
13	Número e identidad de las especies dominantes del estrato 2	Nº dom2
14	Número e identidad de las especies decrecientes frente al pastoreo (especies de plantas de pastizal cuya frecuencia disminuye de manera significativa en régimen de pastoreo por ganado doméstico) <i>Bromus auleticus</i> , <i>Deyeuxia viridiflavescens</i> , <i>Paspalum plicatulum</i> , <i>Mnesithea selleana</i> , <i>Melica brasiliana</i> , <i>Poa lanigera</i> , <i>Nassella neesiana</i> (Cayssials, 2010)	Nº dec

3.3. Definición de estados y fases para cada comunidad

Un muestreo cuidadosamente planificado permitió caracterizar el estado de conservación de los pastizales de todo el Uruguay (Altesor *et al.*, 2019a y 2019b). A la cartografía de comunidades (Figura 2) se le superpuso una grilla de 10 x 10 km (cuadros) y se sortearon 20 cuadros en cada región. Dentro de cada uno de los cuadros se sortearon 5 celdas de 1 x 1 km. Dentro de cada una de las celdas fueron sorteadas dos áreas coincidentes con píxeles MODIS (*moderate resolution imaging spectroradiometer*, espectrorradiómetro de imágenes de media resolución) (250 x 250 m) que incluyeran al menos 90% de una misma comunidad de pastizal (píxeles “puros”). En tres áreas de 25 m² se relevaron una serie de indicadores (véase Tabla 2). A través de análisis multivariados se caracterizaron agrupaciones de parcelas, de acuerdo con su semejanza en términos estructurales, lo cual permitió identificar distintos “estados” y “fases” de la vegetación. La distinción entre fases y estados se realizó a partir de evaluar la magnitud de los cambios ocurridos en los indicadores estructurales. Las fases dentro de un estado estable presentan diferencias moderadas en los indicadores. Todas las comunidades de pastizal del territorio uruguayo presentaron una heterogeneidad interna asociada a los indicadores considerados. Se destacan los pastizales de la Cuesta Basáltica como los más conservados, de acuerdo con los valores de estos atributos.

La Tabla 3 muestra los valores promedio y la dispersión para los indicadores seleccionados para esta región geomorfológica. En Altesor *et al.* (2019a) se presenta el detalle para el resto del país. La aproximación inductiva minimizó los sesgos asociados a la experiencia personal y a las diferencias derivadas de protocolos de observación diversos al registrar los mismos atributos en sitios seleccionados aleatoriamente. La figura 3 muestra la proporción de las distintas fases y/o estados para las diferentes comunidades de pastizales del Uruguay. Esta figura ofrece un estado de situación del grado de conservación del principal hábitat natural del país. El uso de un protocolo común de observación permite la repetibilidad del análisis en el espacio y el tiempo.

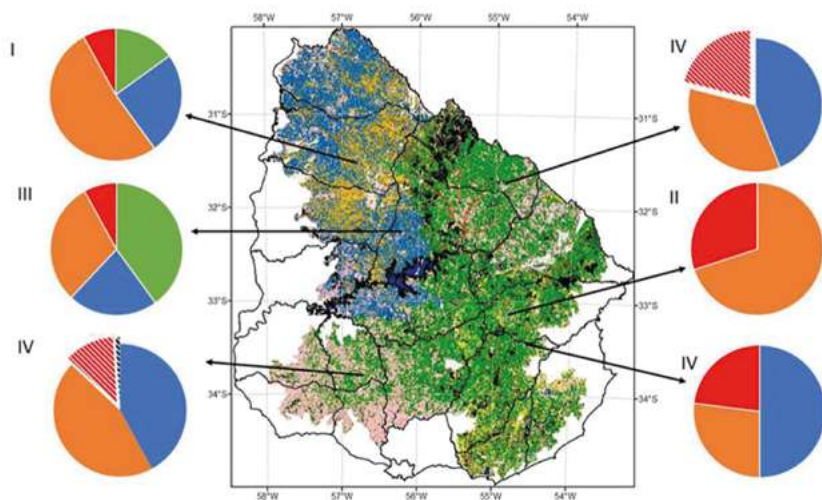
TABLA 3. VALORES PROMEDIO Y DESVÍO ESTÁNDAR (DE) DE LOS INDICADORES ESTRUCTURALES DE LA VEGETACIÓN CORRESPONDIENTE A LAS CUATRO FASES (A, B, C Y D) DE UN SOLO ESTADO EN LOS PASTIZALES DENSOS DE LA CUESTA BASÁLTICA

	FASE A		FASE B		FASE C		FASE D	
	Media/Moda	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE
Nº Estr	2,00		1,00		2,00		1,00	
Alt E1 (cm)	9,71	4,41	10,75	5,51	5,43	2,16	4,75	0,97
Alt E2 (cm)	38,75	19,76			33,00	27,15		
Cob E1	72,88	18,87	98,61	1,87	89,24	7,60	83,75	10,31
% SD	1,28	0,89	1,18	1,06	3,80	3,44	10,29	6,43
% G	90,60	6,94	95,91	4,11	76,11	8,25	66,67	14,14
% An	0,53	1,00	0,35	0,42	0,81	0,97	0,63	0,95
Nº dom1	3,90	0,92	3,64	1,22	5,49	1,16	4,25	1,00
Nº dom2	2,45	0,99	0,30	0,41	2,04	0,63	0,42	0,32
Nº dec	2,45	1,47	1,45	1,22	1,22	1,05	0,17	0,19

Nota: En la primera columna los indicadores son: Número de estratos de la vegetación (Nº Estr), Altura del estrato basal (Alt E1), Altura del estrato 2 (Alt E2), Cobertura del estrato basal (Cob E1), Porcentaje de suelo desnudo (% SD), Porcentaje de cobertura de gramíneas (% G), Porcentaje de cobertura de especies anuales (% An), Número de especies dominantes del estrato basal (Nº dom1), Número de especies dominantes del segundo estrato (Nº dom2) y Número de especies decrecientes frente al pastoreo (Nº dec).

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3. MAPA DE LAS CUATRO COMUNIDADES DE PASTIZAL MÁS REPRESENTADAS EN URUGUAY: I PASTIZALES RALOS DE LA CUESTA BASÁLTICA; III PASTIZALES DENSOS DE LA CUESTA BASÁLTICA; II PASTIZALES RALOS DE SIERRAS DEL ESTE, CUENCA SEDIMENTARIA DEL NORESTE Y REGIÓN CENTRO-SUR; IV PASTIZALES DENSOS DE SIERRAS DEL ESTE, CUENCA SEDIMENTARIA DEL NORESTE Y REGIÓN CENTRO-SUR



Nota: Los diagramas circulares representan las proporciones de las fases y los estados presentes en cada comunidad. Los colores indican una valoración de la condición de la vegetación descrita en el texto: Fase A (verde), Fase B (azul), Fase C (naranja), Fase D (rojo), en rayado se presentan fases correspondientes a otros estados. Los colores representan un gradiente desde pastizales conservados a pastizales degradados.

Fuente: Elaboración propia.

3.4. Generación de hipótesis de las transiciones mediante procesos de coinnovación

Los modelos de estados y transiciones (MET) permiten organizar e interpretar la heterogeneidad derivada del manejo ganadero en los pastizales (Westoby *et al.*, 1989). También promueven la incorporación de una visión dinámica mediante el análisis de las respuestas del sistema y la mo-

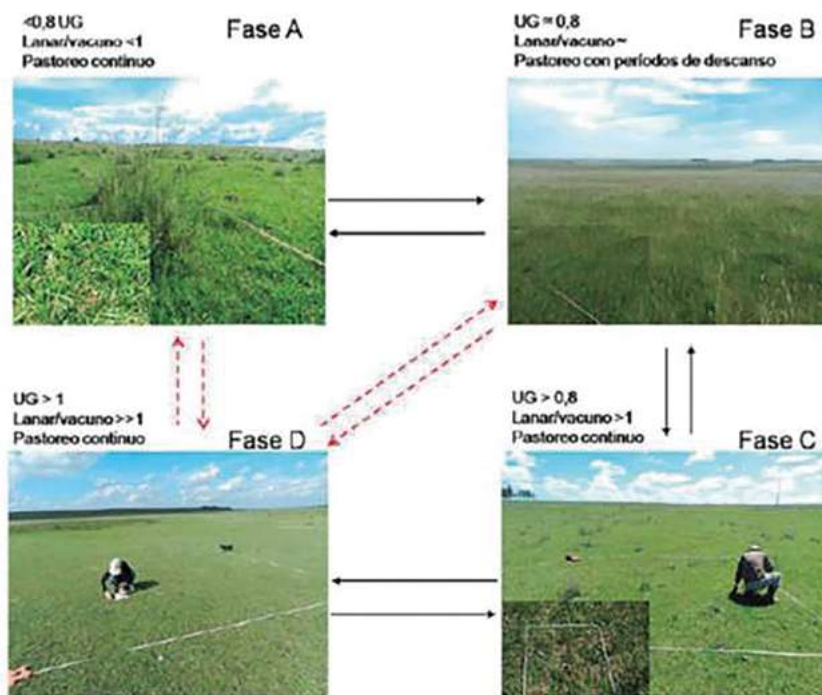
dificación de las acciones de manejo, en un proceso interactivo e iterativo a partir del cual se obtendrá mayor conocimiento acerca del comportamiento del sistema (“comprendo mientras hago”). Como se mostraba en el apartado anterior, la heterogeneidad de la vegetación derivada del manejo ganadero puede ser organizada e interpretada en términos de estados o de fases dentro de un mismo estado, que representan distintas etapas de la dinámica de una comunidad. Las transiciones entre dichas etapas pueden ser continuas y reversibles, manteniendo al sistema dentro del mismo dominio de atracción; en este caso, se reconocen distintas fases dentro de un mismo estado (Stringham *et al.*, 2003). Cuando un estado estable es reemplazado por otro, se traspasa un umbral y la transición puede ser discontinua y, eventualmente, no reversible. El potencial para la reversibilidad a través de un umbral depende de la extensión y de la duración de la modificación del ecosistema (Briske *et al.*, 2005).

Existen distintas aproximaciones metodológicas para caracterizar las transiciones. Una alternativa es el análisis prospectivo, o manejo adaptativo (Berkes *et al.*, 2000; Rumpff *et al.*, 2011; Knapp *et al.*, 2011), que radica en el análisis de las respuestas del sistema al manejo y la modificación de las acciones en un proceso iterativo a partir del cual se obtendrá mayor conocimiento acerca del comportamiento del sistema (Knapp *et al.*, 2011). El sistema de manejo se constituye así en un experimento, en el cual se evalúan las predicciones de las hipótesis acerca de los factores que determinan las transiciones. Para establecer las transiciones entre fases/estados, en el caso de los pastizales uruguayos, se partió de la caracterización de la heterogeneidad de la vegetación derivada del manejo ganadero presentada en el apartado anterior. Se realizaron talleres con los actores involucrados, productores ganaderos y técnicos, en los cuales se valoraron en forma participativa las fases/los estados descriptos y se generaron hipótesis acerca de las medidas de manejo que podrían promover las transiciones entre ellos (Altesor *et al.*, 2019a).

A cada grupo se le proporcionó un protocolo con preguntas guía (véase Caja 3 en Anexo) y fotos representativas de las fases/los estados de cada comunidad. Finalmente, se realizó una puesta en común en sesión plenaria durante la cual cada grupo expuso y fundamentó las hipótesis acerca de las medidas de manejo ganadero para promover las transiciones entre fases/estados. En los talleres, los productores y técnicos reconocieron las fases identificadas a partir del relevamiento a campo. En el caso de los pastizales densos de la Cuesta Basáltica, coincidieron en proponer la fase B como la más deseada. En cuanto a las hipótesis acerca de las medidas de manejo ganadero que conducirían a cada una de

las fases, se propuso que los factores responsables de las transiciones se asociarían, fundamentalmente con la dotación ganadera, la relación lanar/vacuno y el manejo de los descansos. En la Figura 4 se muestra el modelo de estados y transiciones (MET) de la comunidad de pastizales densos de la Cuesta Basáltica, con fotos representativas de las cuatro fases descritas. Las flechas negras indican las transiciones más sencillas a partir de cambios en medidas de manejo ganadero. Esquemas similares se desarrollaron para el resto de las comunidades (Altesor *et al.*, 2019a).

FIGURA 4. MODELO DE ESTADOS Y TRANSICIONES (MET) DE LA COMUNIDAD DE PASTIZALES DENSOS DE LA CUESTA BASÁLTICA CON FOTOS REPRESENTATIVAS DE CUATRO FASES



Nota: Las flechas negras indican las transiciones más sencillas a partir de cambios en manejo ganadero. Con línea punteada se indican transiciones con mayor nivel de incertidumbre. Se indica además la dotación en unidades ganaderas (UG), la relación lanar/vacuno (L/V) y el método de pastoreo (continuo o con descansos). Las transiciones y medidas de manejo constituyen hipótesis surgidas en talleres con productores y técnicos.
Fuente: Elaboración propia.

Disponer de una descripción objetiva de la heterogeneidad de los pastizales (por un lado, las comunidades fitosociológicas y, por otro, los estados y fases asociados al uso) permitió consensuar con los actores una valoración de dichos estados. Esta valoración, subjetiva como todas ellas, pudo ser justificada sobre la base de una cantidad de atributos explícitos. La preferencia expresada por los productores y técnicos por las fases A y B de los modelos para la Cuesta Basáltica tuvo como argumento central el nivel de oferta de servicios ecosistémicos de provisión. Ellos valoran fundamentalmente la cantidad y la calidad en la producción de forraje, la baja demanda de insumos y la estabilidad frente a eventos climáticos extremos y contingencias del manejo.

Estas instancias participativas no solo permiten avanzar hacia un modelo dinámico que se constituya en un instrumento para el manejo adaptativo en los pastizales, sino que también contribuyen a identificar los estados o fases que los distintos actores perciben como aquellos a promover y alertar frente a situaciones de degradación del pastizal. Esta experiencia de trabajo participativo demostró la utilidad de los modelos de estados y transiciones como una herramienta para la toma de decisiones por parte de productores y de técnicos, y también para mejorar la comunicación y contribuir a desarrollar la percepción de quienes manejan los pastizales acerca de la heterogeneidad de la vegetación.

4. Impacto sobre transiciones agroecológicas

Los conocimientos, las herramientas diseñadas pueden contribuir, en caso de usarse efectivamente, a una transición ecológica de los sistemas ganaderos extensivos. Cada uno de los productos generados impactará de manera diferencial en los distintos aspectos que definen una transición ecológica (véase la Introducción). Conocer la heterogeneidad de los recursos forrajeros nativos es un prerrequisito para su manejo y, por lo tanto, para *mantener o restaurar áreas naturales o seminaturales*, para *proteger y usar eficientemente los recursos naturales* y para *promover la diversidad de hábitats*. La posibilidad de *integrar prácticas a nivel del paisaje* requiere de una caracterización de las unidades que conforman ese paisaje y en particular de su distribución espacial. La cartografía de las comunidades es, en tal sentido, un aspecto básico para operar a nivel de paisaje. Disponer de una descripción documentada de las comunidades de pastizal que permita su identificación a campo a partir de especies indicadoras facilita *la participación y el entrenamiento de los*

productores en cuanto a la caracterización de los hábitats naturales y su potencial de uso. El reconocimiento de comunidades y subcomunidades juega un papel central a la hora de extrapolar experiencia e intervenciones y *potencia el intercambio de saberes*.

Referencias

Altesor, A., Ayala, W. y Paruelo, J. M.

(2010), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales*, Serie FPTA 26, INIA, Montevideo, pp. 55-68.

Altesor, A., Gallego, F., Ferrón, M., Pezzani, F., López-Mársico, L., Lezama, F., Baeza, S., Pereira, M., Costa, B. y Paruelo, J. M.

(2019a), “An inductive approach to build State-and-Transition Models for Uruguayan grasslands”, en *Rangeland Ecology and Management*, 72, pp. 1005-1016. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.06.004>>.

Altesor, A., López Másico, L. y Paruelo, J. M.

(2019b), *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales II*, Serie FPTA 69, INIA, Montevideo, pp. 27-50.

Baeza, S., Baldassini, P., Bagnato, C., Pinto, P. y Paruelo, J. M.

(2014), “Caracterización del uso/cobertura del suelo en Uruguay a partir de series temporales de imágenes MODIS”, en *Agrociencia*, 18, pp. 95-105.

Baeza, S. y Paruelo, J. M.

(2020), “Land use/land cover change (2000–2014) in the Rio de la Plata grasslands: an analysis based on MODIS NDVI time series”, en *Remote Sens.*, 12, p. 381. Disponible en: <<https://doi.org/10.3390/rs12030381>>.

Berkes, F., Colding, J. y Folke, C.

(2000), “Rediscovery of traditional ecological knowledge as adaptive management”, en *Ecol. Appl.*, 10, pp. 1251-1262.

Bestelmeyer, B. T., Brown, J. R., Havstad, K. M., Alexander, R., Chávez, G. y Herrick, J. E.

(2003), “Development and use of state-and-transition models for rangelands”, en *J. Range Manage.*, 56, pp. 114-126.

Briske, D. D., Fuhlendorf, S. D. y Smeins, F. E.

(2003), “Vegetation dynamics on rangelands: a critique of the current paradigms”, en *J. Appl. Ecol.*, 40, pp. 601-614.

Briske, D. D., Fuhlendorf, S. D. y Smeins, F. E.

(2005), “State-and-Transition Models, Thresholds, and Rangeland Health: A Synthesis of Ecological Concepts and Perspectives”, en *Rangeland Ecol. Manage.*, 58, pp. 1-10.

De Torres, M. F.

(2015), *Campos. Breve historia de una discusión tecnológica*, Ediciones Trilce, Montevideo, 114 pp.

Dyksterhuis, E. J.

(1949), "Condition and management of rangeland based on quantitative ecology", en *J. Range Manage.*, 2, pp. 104-115.

Gutiérrez, F., Gallego, F., Paruelo, J.M. y Rodríguez, C.

(2020), "Buffer and lag effects of precipitation variability across trophic levels in Uruguayan rangelands", en *Agricultural Systems*, 185, pp. 102956

Kanter, D. R., Schwoob, M. H., Baethgen, W. E., Bervejillo, J. E., Carriquiry, M., Dobermann, A., Ferraro, B., Lanfranco, B., Mondelli, M., Penengo, C., Saldias, R., Silva, M. E. y Soares de Lima, J. M.

(2016), "Translating the sustainable development goals into action: a participatory backcasting approach for developing national agricultural transformation pathways", en *Glob. Food Secur.*, 10, pp. 71-79. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.gfs.2016.08.002>>.

Knapp, C. N., Fernández-Gimenez, M., Kachergis, E. y Rudeen, A.

(2011), "Using participatory workshops to integrate State-and-Transition Models created with local knowledge and ecological data", en *Rangeland Ecol. Manage.*, 64, pp. 158-170.

Lezama, F., Altesor, A., Pereira, M. y Paruelo, J. M.

(2019), "Grasslands of Uruguay: classification based on vegetation plots", en *Phytocoenology*. DOI: 10.1127/phyto/2019/0215.

MGAP

(2020), "Nueva cartografía de pastizales del Uruguay". Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/politicas-y-gestion/nueva-cartografia-pastizales-del-uruguay>>

MGAP/DIEA

(2019), *Anuario Estadístico Agropecuario*. Disponible en: <<https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2019/Anuario2019.pdf>>.

Modernel, P., Rossing, W. A., Corbeels, M., Dogliotti, S., Picasso, V. y Tiftonell, P.

(2016), "Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America", en *Environ. Res. Lett.*, 11, 113002 (*online*).

Oyarzabal, M., Andrade, B., Pillar, V. D. y Paruelo, J. M.

(2019), "Temperate Subhumid Grasslands of Southern South America", en Goldstein, M. I. y Della Sala, D. A. (eds.), *Encyclopedia of the World's Biomes*, Elsevier, Montevideo, v. 3, pp. 577-593. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12132-3>>.

Paruelo, J. M., Guerschman, J. P., Piñeiro, G., Jobbágy, E. G., Verón, S. R., Baldi, G. y Baeza, S.

(2006), "Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis", en *Agrociencias*, X, pp. 47-61.

Paruelo, J. M., Jobbágy, E. G., Oesterheld, M., Golluscio, R. A. y Aguiar, M. R.

(2007), "The grasslands and steppes of Patagonia and the Rio de la Plata

plains”, en Veblen, T., Young, K. y Orme, A. (eds.), *The Physical Geography of South America*, The Oxford Regional Environments Series, Oxford University Press, Oxford, cap. 14, pp. 232-248.

Paruelo, J. M. y Lateralra, P. (eds.)

(2019), *El lugar de la naturaleza en la toma de decisiones*, Ediciones CICCUS, Buenos Aires, p. 567.

Paruelo, J. M. y Sierra, M.

(2022), “Sustainable Intensification and Ecosystem Services: how to actually connect them in agricultural systems of southern South America”, en *Journal of Environmental Studies and Sciences*. <https://doi.org/10.1007/s13412-022-00791-9>

Rumpff, L., Duncan, D. H., Vesk, P. A., Keith, D. A. y Wintle, B. A.

(2011), “State-and-transition modelling for Adaptive Management of native woodlands”, en *Biol. Conserv.*, 144, pp. 1244-1235.

Sala, O. E. y Paruelo, J. M.

(1997), “Ecosystem services in grasslands”, en Daily, G. (ed.), *Nature’s services: Societal dependence on natural ecosystems*, Island Press, Washington, pp. 237-252.

Soriano, A., León, R. J. C., Sala, O. E., Lavado, R. S., Deregibus, V. A., Cauhépe, M. A., Scaglia, O. A., Velázquez, C. A y Lemcoff, J. H.

(1992), “Río de la Plata grasslands”, en Coupland, R. (ed), *Natural grasslands: introduction and western hemisphere*, Elsevier, Ámsterdam-Londres-Nueva York-Tokyo, pp. 367-407.

Stringham, T. K., Krueger, W. C. y Shaver, P. L.

(2003), “State-and-transition modeling: an ecological process approach”, en *J. Range Manage.*, 56, pp. 106-113.

Tommasino, H., Cortelezzi, A., Mondelli, M., Bervejillo, J. E. y Carrazzone, M. E.

(2014), “Tipología de productores agropecuarios: caracterización a partir del Censo Agropecuario 2011”, en *Anuario OPYPA 2014*, Montevideo, pp. 491-508.

Uruguay XXI

(2021), *Informe: Exportaciones incluyendo Zonas Francas*. Disponible en: <<https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/exportaciones-incluyendo-zonas-francas/>> [Consulta: 1 de febrero de 2021].

Volante, J., Mosciaro, J., Morales Poclava, M., Vale, L., Castrillo, S., Sawchik, J., Tiscornia, G., Fuente, M., Maldonado, I., Vega, A., Trujillo, R., Cortéz, L. y Paruelo, J. M.

(2015), “Expansión agrícola en Argentina, Bolivia, Paraguay, Uruguay y Chile entre 2000-2010. Caracterización espacial mediante series temporales de índices de vegetación”, en *RIA. Rev. Inv. Agrop.*, 41, pp. 179-191.

Westoby, M., Walker, B. y Noy-Meir, I.

(1989), “Opportunistic management for rangelands not at equilibrium”, en *J. Range Manage.*, 42, pp. 266-274.

Anexo

Caja 1. Acerca del término “comunidad” y *stand*

El término comunidad, en ecología, se emplea usualmente en un sentido operativo para denominar un conjunto de plantas coexistentes en un área, pero también reciben el nombre de comunidad vegetal los tipos abstractos que resultan de la clasificación de la vegetación. Según esta acepción, utilizada especialmente en fitosociología, las comunidades son combinaciones de especies que coinciden en su ocurrencia en ambientes semejantes. Los *stands* son parches de vegetación tratados como unidades con fines descriptivos y que reúnen el requisito de homogeneidad estructural y ambiental.

Caja 2. Ejemplo de subcomunidades de la comunidad III de pastizales densos del Basalto

En la región de la Cuesta Basáltica es posible diferenciar dos subcomunidades dentro de los pastizales densos. Una de ellas (IIIa) tiene como especies indicadoras a *Mecardonia procumbens* y *Eleocharis dunensis*, dos especies con una amplia distribución en ambientes húmedos. En esta unidad, las gramíneas estivales, las invernales y las graminoides son codominantes y se observan dos estratos de pastos: uno de 5-10 cm y otro de 30 cm de alto, aproximadamente. Esta subcomunidad ocupa áreas planas, ligeramente cóncavas, ubicadas en interfluvios y valles. La cobertura total del suelo es alta. La subcomunidad IIIb, de *Ruellia morongii* y *Steinchisma hians*, es fisonómica similar a la otra subcomunidad, pero está dominada claramente por gramíneas estivales. Se la encuentra en planos interfluviales y pendientes suaves. En esta subcomunidad, algunos de los *stands* pueden presentar bajos porcentajes de pedregosidad.

Caja 3. Preguntas guía para la discusión en los equipos de trabajo

1. ¿Reconocen ustedes los estados/fases identificados para la comunidad de pastizales densos/ralos de las regiones Sierras del Este/Cuesta Basáltica?
2. ¿Conocen ustedes otros “estados/fases” de la comunidad que no hayan sido identificados en este estudio? ¿Cómo los describirían?
3. ¿Cuál de las fases/los estados identificados sería deseable promover?
4. ¿Qué dotación ganadera (alta o baja) y relación lanar/vacuno (alta ≥ 1 o baja < 1) creen ustedes que darían lugar a los distintos estados/fases?

Capítulo 13

Uso y manejo del microbioma para el desarrollo de bioinsumos de uso agrícola

Nora Altier, Eduardo Abreo, Elena Beyhaut, Federico Rivas,
Claudia Barlocco y Silvia Garaycochea

1. La sostenibilidad de los agroecosistemas bajo el concepto de una sola salud

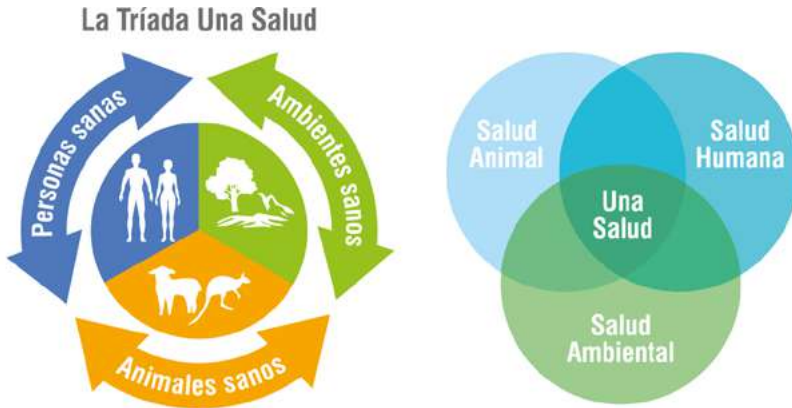
El uso intensivo del recurso suelo en la producción agropecuaria y la utilización creciente de agroquímicos plantean una amenaza a la sostenibilidad de los agroecosistemas. Existe un conocimiento cada vez más relevante del efecto adverso que estos factores tienen en la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, en particular sobre los microorganismos y sus funciones en el ciclado de nutrientes, la salud del suelo, la salud de los cultivos y el consecuente mantenimiento de la productividad de los sistemas agrícolas (Aktar *et al.*, 2009; Brühl y Zaller, 2019; FAO, 2018).

La demanda de productos agrícolas saludables, alimentos inocuos y la preocupación de la sociedad por los efectos negativos de la producción agropecuaria sobre el ecosistema (ejemplos: agroquímicos, fósforo y eutrofización de los cursos de agua, nitrógeno y contaminación de las napas freáticas) requieren la generación de tecnologías más amigables con el ambiente, que aseguren productos de mayor calidad total. La importancia de este problema excede las preocupaciones productivas y del manejo del agroecosistema, involucrando a la sociedad en su conjunto y en particular a los responsables de la toma de decisiones en políticas públicas.

En tiempos de la pandemia por COVID-19, a nivel mundial toma fuerza el concepto de “una sola salud” (*One health*), que resume una noción conocida desde hace más de un siglo: la salud humana y la salud animal son interdependientes y están vinculadas a los ecosistemas en los cua-

les coexisten (Altier y Abreo, 2020; OIE, 2020; FAO, 2011). La iniciativa *One health*, representada por la tríada “*healthy people, healthy animals, healthy environments*”, es un enfoque en el que múltiples sectores trabajan juntos para lograr mejores resultados en la salud pública (Figura 1) (Thompson, 2013). El año 2020 fue declarado Año Internacional de la Salud Vegetal por las Naciones Unidas; en este contexto, desde las ciencias agrarias es fundamental señalar la necesidad de incluir la salud de las plantas y su microbioma dentro del concepto *One health*, por cuanto está íntimamente ligada a la salud del ambiente, del suelo, de los animales y las personas (Altier y Abreo, 2020).

FIGURA 1. CONCEPTO “UNA SALUD” (*ONE HEALTH*), REPRESENTADO POR LA TRÍADA “PERSONAS SANAS, ANIMALES SANOS, AMBIENTES SANOS” (*HEALTHY PEOPLE, HEALTHY ANIMALS, HEALTHY ENVIRONMENTS*)



Fuente: Thompson (2013).

Las plantas y su microbioma son la base de la vida en la Tierra. El microbioma comprende la comunidad de microorganismos asociados a la planta y a su ambiente, que en forma conjunta definen la salud de las plantas y su productividad (Leach *et al.*, 2017). El microbioma no solo es parte fundamental del funcionamiento de las plantas en su estado natural o en cultivos, sino que, además, puede ser manejado por el hombre para mejorar los sistemas productivos y ser usado como recurso a par-

tir del cual obtener microorganismos benéficos, con funciones deseables para la nutrición y protección de las plantas (Trivedi *et al.*, 2021).

Las plantas producen el 98% del oxígeno que respiramos y proporcionan más del 80% de los alimentos que consumimos; son fuente primaria de ingresos y desarrollo económico. Asimismo, los hábitats naturales son recursos esenciales para el sustento de los servicios ecosistémicos. En otras palabras, las plantas y su microbioma son “custodias” de nuestro aire, nuestro alimento y nuestro ambiente. Una amenaza para la salud de las plantas es también una amenaza para la salud, el bienestar y la prosperidad de la sociedad y de las personas que la componen. Ejemplos históricos son: la epidemia del tizón tardío de la papa (causada por *Phytophthora infestans*), que desencadenó la hambruna irlandesa de 1845, matando millones de personas (Schumann y D’Arcy, 2017); la devastación de cultivos y pasturas causada por las langostas, plagas bíblicas que resurgen cada vez con mayor frecuencia y voracidad (Le Gall *et al.*, 2019); la ocurrencia de micotoxinas en alimentos de origen vegetal y animal, que desafían la inocuidad alimentaria (Reddy *et al.*, 2010, Cea, 2006). Cada año, las enfermedades y plagas son responsables de pérdidas promedio de hasta 40% en la producción mundial de alimentos, costando a la economía más de US\$ 220 billones (APS, 2020). La salud de los hábitats naturales también debe ser especialmente atendida, ya que estos son recursos que proporcionan diversos servicios al ecosistema. De la salud de las plantas y los cultivos depende el sustento mundial de la producción de alimentos; protegerla es garantizar la seguridad y la inocuidad alimentarias, esenciales para promover el bienestar y la salud humana (FAO, 2017).

Por otro lado, las prácticas agrícolas que basan el manejo sanitario de los cultivos en el uso exclusivo de agroquímicos implican un riesgo para la salud humana, por exposición directa o indirecta a la presencia de residuos químicos en los alimentos consumidos (Aktar *et al.*, 2009). Además, tienen un impacto negativo para el ambiente, cuando afectan organismos-no-blanco o comprometen la calidad de los cursos de agua y el suelo, y, como consecuencia, “enferman a los agroecosistemas” (Brühl y Zaller, 2019; Pérez-Parada *et al.*, 2018).

En el contexto de una producción agroecológica basada en la gestión sostenible de los recursos naturales, se ha promovido el Manejo Integrado de Plagas (MIP) para reducir el uso de plaguicidas y mitigar los efectos negativos sobre la salud humana y ambiental (Ehler, 2006; Radcliffe *et al.*, 2009). La resistencia genética, el control cultural y el control biológico

gico han contribuido a alcanzar esa meta, racionalizando el uso de agroquímicos. Sin embargo, uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la investigación en salud vegetal es demostrar la efectividad y confiabilidad de estrategias alternativas al uso exclusivo de agroquímicos, con la finalidad de incrementar la calidad y la cantidad de alimentos producidos, asegurando simultáneamente la sostenibilidad de los ecosistemas y un ingreso rentable para los productores. Recientemente se ha fortalecido el concepto de *Agroecological Crop Protection* (ACP, Protección agroecológica de cultivos), que favorece el desarrollo de tecnologías para la promoción de transiciones agroecológicas con abordaje ecosistémico a escala de paisaje y regional (Deguine *et al.*, 2017).

La noción de intensificación sostenible de los sistemas productivos requiere gestionar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, mediante la promoción de estrategias para el manejo sanitario y nutricional de los cultivos que mitiguen los riesgos asociados al uso de plaguicidas y fertilizantes de síntesis química. Esto implica aumentar la inversión en capacidades de investigación y difusión con foco en la salud de las plantas y el cuidado de la salud del suelo como fuente de nutrientes. Asimismo, se requiere fortalecer la formación de recursos humanos en el área de la salud de las plantas, incorporando el concepto de una sola salud a las currícula de las carreras universitarias.

Queenan *et al.* (2017) sostienen que el desarrollo de la humanidad y las intervenciones antrópicas han generado externalidades negativas para los ecosistemas, en tanto la pérdida de biodiversidad y de los servicios ecosistémicos, la polución del aire y del agua y el cambio climático amenazan con revertir las ganancias obtenidas en la salud pública. Se plantea la necesidad de un cambio de paradigma, en el que es fundamental considerar un abordaje integrado para el estudio de la salud humana, animal, vegetal y del ecosistema, desde un enfoque socioecológico. Los autores proponen que los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible planteados por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2015) ofrecen una oportunidad única para trabajar el concepto de una sola salud, analizando y reordenando su integración e interdependencia (Figura 2).

FIGURA 2. PROPUESTA DE AGRUPAMIENTO DE LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE, BASADOS EN EL CONCEPTO “UNA SOLA SALUD” (ONE HEALTH)



Fuente: Queenan et al. (2017).

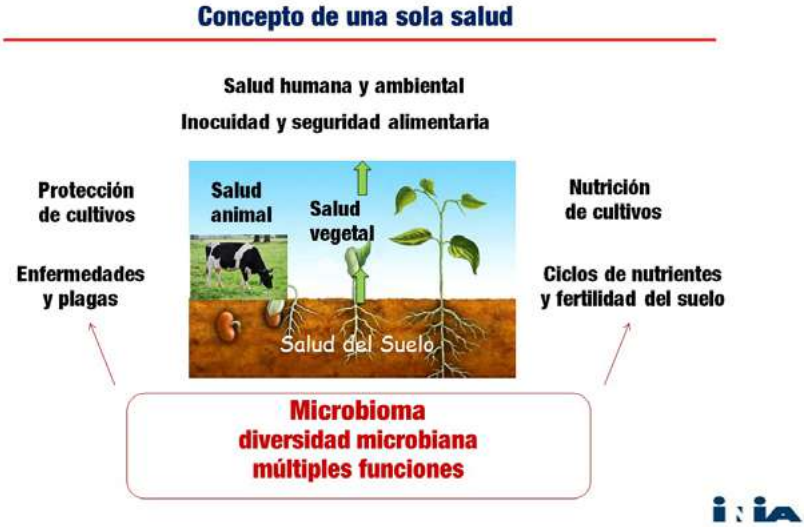
Rattan Lal, recipiente del *2020 World Food Prize*, sostiene que “la salud del suelo, de las plantas, de los animales, de las personas y de los ecosistemas es una e indivisible”. Comprender este concepto es clave para promover el bienestar humano y contribuir al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible del Programa de Desarrollo de las Naciones Unidas (Lal, 2018).

2. El microbioma y las funciones ecosistémicas con foco en la protección y nutrición vegetal

Las comunidades microbianas de la rizosfera y del suelo y los microorganismos endófitos y simbiotes, llamados en su conjunto *microbioma*, juegan un rol esencial en el mantenimiento de la salud del suelo y, por tanto, de la salud del ecosistema global (Figura 3) (Altier y Abreo, 2020;

Altier *et al.*, 2020a). Intervienen en diversos procesos ecosistémicos importantes, incluidos el ciclado y la absorción de nutrientes (carbono, fósforo y nitrógeno), la formación y la fertilidad del suelo (Van der Heijden *et al.*, 2008), y la supresión y control de patógenos y plagas de los cultivos (Garbeva *et al.*, 2004; Kinkel *et al.*, 2011; Stenberg *et al.*, 2021). Están estrechamente asociados a los ciclos biogeoquímicos, los flujos de energía y la degradación de contaminantes. A través de las funciones que cumple, el microbioma es determinante de la salud y la productividad de los cultivos.

FIGURA 3. EL CONCEPTO DE “UNA SOLA SALUD” DA MARCO AL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN BIOINSUMOS



Fuente: Elaboración propia.

Los organismos del microbioma forman redes complejas que están reguladas por medio del ciclado de nutrientes, la competencia, el antagonismo y la comunicación química mediada por un espectro diverso de moléculas de señalización (Leach *et al.*, 2017). A su vez, la diversidad microbiana está influenciada por factores bióticos y abióticos como las propiedades edáficas, la temperatura, la humedad y el tipo de vegetación (Garbeva *et al.*, 2004). El pH del suelo, el contenido de C orgánico, de N

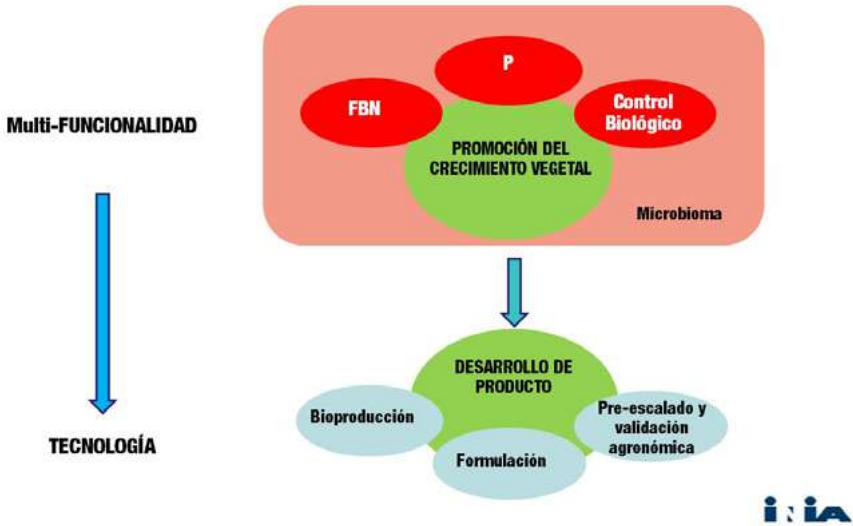
y de P son algunos de los factores que determinan el ensamblaje microbiano, las interacciones y las funciones resultantes (Garaycochea *et al.*, 2020).

Comprender la estructura y las funciones del microbioma favorece intervenciones agronómicas basadas en una visión ecológica de los sistemas productivos y puede conducir a nuevas estrategias biológicas, químicas y fitogenéticas para mejorar la salud y la productividad de los cultivos. Genera una oportunidad para la investigación y el desarrollo de tecnologías que buscan potenciar a los microorganismos como un recurso genético de múltiples aplicaciones en la nutrición y la sanidad de las plantas (Altier *et al.*, 2013b; Trivedi *et al.*, 2021). Si bien los microorganismos están en la base del funcionamiento sostenible de los agroecosistemas, existen limitaciones tecnológicas al desarrollo de productos microbianos debidamente formulados que puedan ser usados en los diversos sistemas productivos, o frente a condiciones climáticas no favorables para su desarrollo (Berg, 2009; Glare *et al.*, 2012; Köhl *et al.*, 2011).

En Uruguay y en el INIA, las disciplinas asociadas a la protección vegetal (fitopatología, entomología, malherbología), a las ciencias del suelo y la nutrición de cultivos (microbiología y biología del suelo) y a la biotecnología han contribuido significativamente a preservar la salud de las plantas, generando conocimientos y brindando estrategias, tecnologías innovadoras e integradas, que promueven un manejo fitosanitario y nutricional seguro para la salud humana y animal, en forma amigable con el ambiente (Allegrí, 2014; Altier *et al.*, 2013a, Mondino *et al.*, 2014).

Asimismo, desde la creación del Programa de Producción y Sustentabilidad Ambiental del INIA, en 2006, se han promovido las capacidades y los recursos del Laboratorio de Bioproducción, del Laboratorio de Microbiología de Suelos y de la Unidad de Biotecnología para conformar la Plataforma de Bioinsumos, cuyo objetivo es la generación de conocimiento sobre el microbioma y el desarrollo de productos y herramientas basados en microorganismos benéficos (Figura 4).

FIGURA 4. FUNCIONES DEL MICROBIOMA QUE ESTUDIA LA PLATAFORMA DE BIOINSUMOS PARA EL DESARROLLO DE PRODUCTOS



Fuente: *Elaboración propia.*

El principal objetivo de la plataforma es la identificación, la caracterización, la bioproducción y la formulación de cepas de microorganismos para su desarrollo comercial como bioinsumos agrícolas, con uso en la protección y nutrición vegetal (Altier *et al.*, 2020a). El conocimiento generado promueve tecnologías más amigables para el ambiente, que contribuyen a cumplir las exigencias de los mercados mundiales por alimentos de alta calidad, inocuos, y con uso restringido de agroquímicos. Asimismo, favorece intervenciones basadas en procesos biológicos que naturalmente ocurren en los agroecosistemas. Los desarrollos biotecnológicos obtenidos contribuyen a los programas de control biológico de insectos plaga y de enfermedades, así como a los programas de manejo nutricional de cultivos de interés agrícola y forestal.

Como antecedente, en el Uruguay se dispone de la tecnología para la elaboración de inoculantes de calidad sobre la base de rizobios, llevada adelante con éxito por el sector público y privado en forma conjunta. Desde 1960, el uso de inoculantes ha sido ampliamente adoptado por el sector productivo, con significativos beneficios económicos, ambientales y sociales (Altier *et al.*, 2013a, Beyhaut *et al.*, 2020a).

3. Estrategia de investigación en el desarrollo de tecnologías y productos basados en microorganismos benéficos

La Plataforma de Bioinsumos del INIA trabaja en el marco del concepto de “una sola salud”, poniendo énfasis en el rol de los microorganismos en la disponibilidad de fósforo y nitrógeno para los cultivos y en el control biológico de plagas y enfermedades (Altier *et al.*, 2020a). La estrategia propuesta parte del reconocimiento de la diversidad y la multifuncionalidad presentes en el microbioma, investigando las características asociadas a la promoción del crecimiento vegetal. El desafío es identificar cepas de microorganismos con la función deseada que puedan ser utilizadas para desarrollar un producto tecnológico. Esto se logra a través de los procesos de bioproducción y formulación, con factibilidad para ser escaladas a nivel industrial con fines de comercialización (Figura 4). El uso de herramientas bioinformáticas y el abordaje de metagenómica microbiana complementan el análisis conjunto de información genómica, fenotípica y ambiental sobre las cepas de interés (Abreo y Altier, 2019).

¿Qué son bioinsumos microbianos? Los bioinsumos microbianos son productos de origen biológico, formulados con cepas de microorganismos con una identidad precisa, utilizados para mejorar la producción, la calidad y la salud de las plantas, o las características biológicas del suelo y el ambiente. Incluyen a los biofertilizantes y bioplaguicidas, encontrándose también denominaciones alternativas como inoculantes, biocontroladores, biopesticidas, biofungicidas y bioinsecticidas. Cabe destacar que muchas veces una misma cepa microbiana posee mecanismos múltiples que permiten explotar su capacidad para formularla como biofertilizante o bioplaguicida. A continuación, se presenta la definición de algunos términos.

Biofertilizante: bioinsumo elaborado sobre la base de una cepa de un microorganismo benéfico conocido que, al aplicarse al suelo o a las semillas, promueve el crecimiento vegetal o favorece el aprovechamiento de los nutrientes en asociación con la planta o su rizosfera. Incluye los *inoculantes* elaborados con rizobios, micorrizas y rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal.

Bioplaguicida: bioinsumo elaborado a partir de una cepa de un microorganismo benéfico conocido que ejerce una acción de protección de la planta mediante la supresión de patógenos (*biofungicida*) o insectos plaga (*bioinsecticida*) por mecanismos directos (parasitismo, antibiosis, competencia) o indirectos (inducción de la resistencia sistémica vegetal).

Cepa microbiana: cultivo puro debidamente identificado, genotipado y caracterizado, al cual se le atribuye una acción biológica definida.

Formulación: proceso de preparación de la cepa microbiana con otros ingredientes o técnicas que garantizan la estabilidad y viabilidad del bioinsumo.

La estrategia de investigación en el desarrollo de tecnologías y productos basados en microorganismos benéficos es un camino que se recorre paso a paso (Figura 5). La investigación y el desarrollo de un insumo basado en microorganismos implica un desafío a varios niveles. En el aspecto científico, deben responderse varias preguntas que abarcan cuestiones moleculares y ecológicas del microorganismo y conocimiento agronómico del sistema: ¿cómo actúa y en qué condiciones es capaz de expresar las características deseadas? ¿Es posible mejorar el desempeño de un microorganismo mediante cambios en las condiciones en que es producido? ¿Afectarán la formulación del producto la sobrevivencia y la actividad del microorganismo en el campo? ¿Es necesario modificar el manejo de los cultivos para hacerlos más receptivos a la nueva tecnología? ¿La nueva tecnología es segura?

Para responder estas preguntas, la estrategia de trabajo sigue una pauta de etapas sucesivas de *screening* (Altier *et al.*, 2020a, Glare *et al.*, 2012, Köhl *et al.*, 2011). Se aplica a la resolución de problemas identificados a partir de una demanda tecnológica del sector productivo o del gobierno. Se elabora una propuesta con los socios identificados, basada en el modelo de alianzas estratégicas público-privadas, el cual involucra actores del sector productivo, la industria, la academia, la cooperación internacional y la incorporación de estudiantes (Figura 6). El desarrollo de la investigación abarca diversas etapas, desde la prospección, la identificación, la evaluación de actividad biológica, hasta la selección y multiplicación de un microorganismo benéfico, formulado en condiciones que garanticen la estabilidad y la viabilidad del prototipo de producto (Altier *et al.*, 2020a).

FIGURA 5. ESTRATEGIA DE TRABAJO EN EL DESARROLLO DE UN BIOINSUMO



Fuente: Elaboración propia.

A partir del prototipo formulado a escala experimental, se inicia una etapa de generación de conocimiento sobre eficacia agronómica y análisis de toxicidad para la salud humana y ambiental, ambos requisitos necesarios para su registro. En general, en esta etapa adquiere más protagonismo el socio industrial, ya que determina las condiciones de producción a escala comercial y la formulación final a ser registrada. Cuando un bioinsumo se produce y formula a escala comercial como biofertilizante, bioinsecticida o biofungicida, debe ser registrado ante la autoridad competente, la cual debe asegurar las pautas de identidad, eficacia agronómica, seguridad para el ambiente y la salud humana, y el control de calidad. Se entiende por control de calidad el conjunto de acciones destinadas a garantizar la producción uniforme de lotes que cumplan, entre otros, los parámetros de identidad, actividad y pureza establecidos (Altier *et al.*, 2020a, Beyhaut *et al.*, 2020a). En Uruguay, la autoridad competente es la Dirección General de Servicios Agrícolas del MGAP.

FIGURA 6. LA PLATAFORMA DE BIOINSUMOS PROMUEVE UN MODELO DE ALIANZAS CON SOCIOS ESTRATÉGICOS

Socios & alianzas estratégicas

Modelo de alianzas: sector productivo, industria, academia, cooperación internacional



Fuente: Elaboración propia.

La transferencia al sistema productivo y la adopción de la tecnología están condicionadas a un fuerte compromiso de políticas de Estado para la armonización del marco normativo y la instrumentación de acciones de promoción y extensión para el uso de bioinsumos. La ejecución de

FPTA 344 DIGEGRA/MGAP/FAGRO “Producción e introducción de agentes de Control Biológico en el manejo regional integrado de insectos y enfermedades de hortalizas” es un ejemplo de plataforma de validación a tales efectos, que promueve roles activos y coordinados del sector público, el sector industrial y el sector productivo (Campelo *et al.*, 2019).

3.1. Colección de cepas microbianas de la Plataforma de Bioinsumos del INIA

Los microorganismos que tienen el potencial para desarrollarse como un bioinsumo y otros microorganismos de interés se encuentran conservados en la Colección INIA de Recursos Genéticos Microbianos de la Plataforma de Bioinsumos (Tabla 1). La colección cuenta con cepas de hongos (ILB) y bacterias (ILBB) para el control biológico de enfermedades e insectos, la promoción del crecimiento vegetal y la nutrición de cultivos, así como con aislamientos de patógenos vegetales. Las cepas son caracterizadas a nivel molecular y bioquímico y evaluadas por su funcionalidad. Además, se destaca especialmente que el INIA realiza la curaduría de la Colección Nacional de Cepas de Rizobios (CNCR) de Uruguay: anualmente, se entregan a la industria las cepas de rizobios con las que se producen los inoculantes comerciales de leguminosas forrajeras y de soja (Barlocco *et al.*, 2014, 2015; Beyhaut *et al.*, 2020a).

TABLA 1. COLECCIÓN DE RECURSOS GENÉTICOS MICROBIANOS DE LA PLATAFORMA DE BIOINSUMOS DEL INIA, CARACTERIZADOS POR FUNCIÓN PRINCIPAL DE INTERÉS

GRUPO	FUNCIÓN	GÉNERO	REFERENCIA
Hongos	Control biológico Promoción de crecimiento	<i>Lecanicillium</i> <i>Beauveria</i> <i>Metarhizium</i> <i>Isaria</i> <i>Trichoderma</i>	Abreo <i>et al.</i> , 2019 Corallo <i>et al.</i> , 2019 Rivas <i>et al.</i> , 2014
Bacterias	Control biológico Promoción de crecimiento	<i>Bacillus</i> <i>Serratia</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Streptomyces</i>	Abreo <i>et al.</i> , 2018 Abreo <i>et al.</i> , 2021 Altier <i>et al.</i> , 2013
Bacterias	Solubilización y mineralización de fósforo Promoción de crecimiento	<i>Bacillus</i> <i>Streptomyces</i> <i>Pseudomonas</i> <i>Rizobios</i>	Barlocco <i>et al.</i> , 2015 Cerecetto, 2018 Martin, 2019

(Continúa en página siguiente)

Bacterias	Fijación de nitrógeno (CNCR)*	<i>Rhizobium</i> <i>Bradyrhizobium</i> <i>Mesorhizobium</i> <i>Sinorhizobium</i>	Barlocco <i>et al.</i> , 2014 Beyhaut <i>et al.</i> , 2020a
Hongos y Oomycota	Fitopatógeno	<i>Pythium</i> <i>Claviceps</i> <i>Fusarium</i>	Abreo <i>et al.</i> , 2017 Oberti <i>et al.</i> , 2020

*CNCR: Colección Nacional de Cepas de Rizobios (Uruguay).

Fuente: Elaboración propia.

3.2. Programa activo de selección de cepas de elite

La caracterización de las cepas que conforman las colecciones ha permitido identificar aquellas con actividad biológica destacada y habilidad industrial para ser escaladas a nivel experimental, mediante la optimización del proceso de producción microbiana. Estas cepas conforman la colección de *elite* y han sido avanzadas a la etapa de caracterización genómica y formulación de un prototipo experimental (Tabla 2).

TABLA 2. CEPAS DE *ELITE* DE LA PLATAFORMA DE BIOINSUMOS DEL INIA

Cepa*	Especie	Enfermedad/plaga que controla/función	Cultivo objetivo	Grado de desarrollo
ILB 205 ¹	<i>Beauveria bassiana</i>	Chinche del <i>Eucalyptus</i>	Eucalyptus	Formulación nivel prototipo
ILBB 145 ²	<i>Serratia ureilytica</i>	Damping-off de tomate producido por <i>Pythium cryptoirregularare</i>	Tomate (almácigo)	Formulación pendiente
ILBB 210 ³	<i>Lysinibacillus xylanilyticus</i>	<i>Argyrotaenia spheropera</i>	Manzano	Formulación pendiente
ILB 255 (= ILB 3) ⁴	<i>Lecanicillium muscarium</i>	<i>Trialeurodes vaporariorum</i>	Tomate	Formulación pendiente
ILB 256 (= IILB 9) ⁴	<i>Lecanicillium longisporum</i>	<i>Trialeurodes vaporariorum</i>	Tomate	Formulación pendiente
ILBB 5925, ⁵	<i>Bacillus megaterium</i>	Promoción de crecimiento/ Nutrición	Soja	Formulado y evaluado en campo. En proceso de registro
ILBB 95 ⁶	<i>Bacillus aryabhatai</i>	Promoción de crecimiento/ Nutrición	Soja	Formulado y evaluado en campo. En proceso de registro

(Continúa en página siguiente)

ILBB 44 ⁶	<i>Bacillus pumilus</i>	Promoción de crecimiento/ Nutrición	Soja	Formulado y evaluado en campo. En proceso de registro
----------------------	-------------------------	--	------	---

Referencias: ^{*1} Abreo et al., 2019; ² Abreo et al., 2021; ³ Abreo et al., 2018; ⁴ Rivas et al., 2014, ⁵ Cerecetto, 2018; ⁶ Martin, 2019.

Fuente: Elaboración propia.

Entre las líneas de investigación de la plataforma, se ha priorizado la generación de conocimiento sobre: 1) la óptima expresión agronómica de la fijación biológica de nitrógeno en soja y otras leguminosas, mediante la simbiosis con cepas selectas de rizobios (Altier *et al.*, 2013; Beyhaut *et al.*, 2020a, 2020b, Cerecetto *et al.*, 2021); 2) el desarrollo de biofertilizantes basados en microorganismos que aumentan la fitodisponibilidad de fósforo (George *et al.*, 2018; Altier *et al.*, 2020b; Torres *et al.*, 2020); 3) el desarrollo de biofungicidas y bioinsecticidas para el control biológico de enfermedades e insectos plaga, a partir de cepas con capacidad de antagonismo y promoción del crecimiento vegetal (Rivas *et al.*, 2014, 2019, 2020; Abreo *et al.*, 2018, 2019, 2021, Corallo *et al.*, 2019). Asimismo, se ha generado conocimiento sobre las prácticas culturales que moldean el microbioma edáfico (Vaz *et al.*, 2018; Villar *et al.*, 2019; Garaycochea *et al.*, 2020).

4. Principales contribuciones del manejo del microbioma y los bioinsumos a las transiciones agroecológicas

El conocimiento y manejo del microbioma resulta esencial en el abordaje de transiciones agroecológicas. Contribuye directamente a la gestión de los recursos naturales y a la reducción del impacto ambiental. La gran variedad de funciones que cumplen los microorganismos favorece la salud del suelo y del sistema productivo. Dentro de las funciones mediadas por los microorganismos, la Plataforma de Bioinsumos del INIA ha puesto énfasis en la nutrición vegetal (nitrógeno y fósforo) y el control biológico de enfermedades y plagas, considerando las características asociadas a la promoción del crecimiento vegetal.

Sobre esta base, las tecnologías asociadas al desarrollo y uso de bioinsumos promueven las funciones ecosistémicas, mejoran la calidad del suelo, y reducen –al menos parcialmente– las aplicaciones de agroquí-

micos. Se proponen optimizar los procesos de escalado y formulación de productos microbianos, contribuyendo al concepto de “semillas inteligentes”, asociado a la genética INIA. Esto permite: 1) mantener la fijación biológica de nitrógeno (FBN) como principal fuente de nitrógeno en los sistemas de producción, de acuerdo con la política pública establecida; 2) disminuir la dependencia de fertilizantes fosfatados y reducir costos e impacto ambiental, atendiendo especialmente la calidad de los cursos de agua; 3) contribuir al manejo integrado mediante el control biológico de plagas y la promoción de crecimiento vegetal, disminuyendo la dependencia de agroquímicos y aumentando el valor del producto; 4) integrar la metagenómica microbiana y las herramientas bioinformáticas para el análisis conjunto de información genómica, fenotípica y ambiental.

En la Plataforma de Bioinsumos del INIA se han desarrollado capacidades de infraestructura y recursos humanos calificados. Se dispone de una colección de cepas caracterizadas y de *elite* que representan una base sólida desde la cual continuar investigando para responder a las demandas del sector productivo. A su vez, el establecimiento de alianzas estratégicas entre el sector público y privado, la academia y la cooperación internacional son clave para el desarrollo industrial y la innovación en bioinsumos de uso agrícola.

Teniendo en cuenta el modelo de la tecnología de inoculantes basados en rizobios que se implementó con éxito desde hace varias décadas en el Uruguay, se debe continuar con la promoción de una estrategia nacional en torno de normativas de registro y control de calidad de insumos biológicos, y de la protección de la propiedad intelectual. Debido a sus características particulares, se requiere también de políticas específicas de promoción y extensión dirigidas a fomentar su adopción exitosa.

Las tecnologías derivadas del manejo del microbioma y los bioinsumos han realizado contribuciones históricas en los sistemas productivos (por ejemplo, los inoculantes rizobianos para leguminosas y el control biológico como estrategia para el manejo integrado de plagas). En la actualidad, son temas de agenda ineludibles para una producción agropecuaria sostenible que promueva transiciones agroecológicas, contribuyendo a la mejora de la calidad, la inocuidad y la diversificación de productos y procesos (INIA, 2017). El INIA, mediante su plan estratégico con visión de largo plazo, puede jugar un rol esencial en la generación de conocimiento y tecnologías para la producción agroecológica, basando sus acciones en el enfoque de una sola salud.

Referencias

Abreo, E. y Altier, N.

(2019), “Pangenome of *Serratia marcescens* strains from nosocomial and environmental origins reveals different populations and the links between them”, en *Sci Rep.*, 9, p.46. Disponible en: <<https://doi.org/10.1038/s41598-018-37118-0>>.

Abreo, E., Simeto, S., Corallo, B., Martínez, G., Lupo, S. y Altier, N.

(2019), “Dual selection of *Beauveria bassiana* strains and complex substrate media for the massive production of submerged spores with activity against the eucalyptus bronze bug *Thaumastocoris peregrinus*”, en *Biocontrol Sci Technol.*, 29(6), pp. 533-546.

Abreo, E., Valle, D., González, A. y Altier, N.

(2021), “Control of damping-off in tomato seedlings exerted by *Serratia* spp. strains and identification of inhibitory bacterial volatiles in vitro”, en *Syst Appl Microbiol.*, 44(2). DOI: 10.1016/j.syapm.2020.126177.

Abreo, E., Valle, D., Mujica, V. y Altier, N.

(2018), “Pathogenicity and virulence factors of *Lysinibacillus xylanilyticus* and *Bacillus* spp. towards *Argyrotaenia sphaleropa* larvae (Lepidoptera)”, en *J. Appl. Entomol.*, 142(9), pp. 882-892.

Abreo, E., Vaz-Jauri, P., Nuñez, L. et al.

(2017), “Pathogenicity of *Pythium* spp. obtained from agricultural soils and symptomatic legume seedlings in Uruguay”, en *Australasian Plant Dis. Notes.*, 12, p. 35. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s13314-017-0258-1>>.

Aktar, M. W., Sengupta, D. y Chowdhury, A.

(2009), “Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards”, en *Interdiscip Toxicol.*, 2(1), pp. 1-12.

Allegri, M. (ed.)

(2014), *Un siglo de investigación agropecuaria 1914-2014: INIA de cara al futuro*, INIA, Montevideo, 370 pp.

Altier, N. y Abreo, E.

(2020), “One health: considerations in the International Year of Plant Health”, en *Agrociencia Uruguay*, 24(NE2), p. 422. Disponible en: <<http://agrocienciauruguay.uy/ojs/index.php/agrociencia/article/view/422>> [Consulta: 12 de mayo de 2021].

Altier, N., Abreo, E., Beyhaut, E., Rivas, F., Barlocco, C., Garaycochea, S., Dini, B., López, V., Mattos, N. y Mortalena, M.

(2020a), “Plataforma de Bioinsumos de uso agrícola: desarrollo de tecnologías y productos basados en microorganismos benéficos”, en *Revista INIA Uruguay*, 61, pp. 85-90.

Altier, N., Abreo, E., Beyhaut, E., Garaycochea, S., Torres, P., Cerecetto, V., Martín, N., Cuitiño, M. J., Crispo, M., Arévalo, A. P., Rego, N., Arrospide, G., Lage, M. y Sundberg, G.

(2020b), “Desarrollo de un biofertilizante microbiano para aumentar la disponibilidad de fósforo en el cultivo de soja”, en *Revista INIA Uruguay*, 62, pp. 95-100.

Altier, N., Beyhaut, E. y Pérez, C.

(2013a), “Root nodule and rhizosphere bacteria for forage legume growth promotion and disease management”, en Maheshwari, D. K., Saraf, M. y Aeron, A. (eds.), *Bacteria in agrobiology: crop productivity*, Springer, Dordrecht (Países Bajos), pp.167-184.

Altier, N., France, A., Correa de Mello, S., Peticari, A. y Rodríguez, P.

(2013b), *Documento Base: Recursos Microbianos*, Procisur, IICA, 35 pp. Disponible en: <http://www.procisur.org.uy/adjuntos/procisur_libro-microbianos_e3b.pdf>.

American Phytopathological Society (APS)

(2020), *International Year of Plant Health, IYPH 2020* Disponible en: <<https://www.apsnet.org/members/engagement/IYPH2020/Pages/default.aspx>> [Consulta: 22 de julio de 2022].

Barlocco, C., Cerecetto, V., Mattos, N., Mortalena, M., Mayans, M., Beyhaut, E. y Altier, N.

(2015), *Caracterización de la colección nacional de cepas de rizobios: multifuncionalidad*, Serie Actividades de Difusión, INIA, 755, pp. 4-7.

Barlocco, C., Mayans, M., Mattos, N., Altier, N. y Beyhaut, E.

(2014), “Colección nacional de cepas de rizobios en Uruguay: caracterización y puesta en valor”, en *Boletín FELACC*, 14, pp. 6-12. Disponible en: <<http://felacc.cinvestav.mx/boletin/14.pdf>>.

Berg, G.

(2009), “Plant–microbe interactions promoting plant growth and health: perspectives for controlled use of microorganisms in agriculture”, en *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 84, pp. 11-18.

Beyhaut, E., Barlocco, C., Mortalena, M., Mattos, N., López, V. y Altier, N.

(2020a), “Convenio INIA-MGAP: sistema de control de calidad de inoculantes”, en *Revista INIA Uruguay*, 61, pp. 91-93.

Beyhaut, E., Abreo, E., Vaz, P., Pérez, C. y Altier, N.

(2020b), “Prácticas agronómicas centrales en la implantación de soja: inoculación y uso de curasemillas”, en *Revista INIA Uruguay*, 62, pp. 101-102.

Brühl, C. A. y Zaller, J. G.

(2019), “Biodiversity Decline as a Consequence of an Inappropriate Environmental Risk Assessment of Pesticides”, en *Front Environ Sci*, 7, p. 177. Disponible en: <<https://bit.ly/3erLf56.47>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

Campelo, E., Banchemo, L., Vieta, A., Godín, A., Iurato, A., Peirano, Z., Curbelo, Y., Galván, G., Bao, L., González, P. y Fasiolo, C.

(2019), “Control biológico de plagas y enfermedades en horticultura”, en *Revista INIA Uruguay*, 56, pp. 84-87.

Cea, J.

(2006), “Update on worldwide regulations for mycotoxins. The Mercosur harmonization of limits on mycotoxins with the international regulations”, en *Revista LATU INNOTEC*, 1.

Cerectto, V.

(2018), *Evaluación de bacterias pertenecientes a colecciones nacionales por su capacidad de actuar sobre la fitodisponibilidad del fósforo: selección, mecanismos involucrados y potencial uso como biofertilizante en plantas de soja (Glycine max)*, Tesis de maestría en biotecnología, UDELAR, Montevideo.

Cerectto, V., Beyhaut, E., Amenc, L., Trives, C., Altier, N. y Drevon, J.-J.

(2021), “Contrasting Expression of Rhizobial Phytase in Nodules of Two Soybean Cultivars Grown Under Low Phosphorus Availability”, en *Front Sustain Food Syst.*, 4, 607678. doi: 10.3389/fsufs.2020.607678.

Corallo, B., Simeto, S., Martínez, G., Gómez, D., Abreo, E., Altier, N. y Lupo, S.

(2019), “Entomopathogenic fungi naturally infecting the eucalypt bronze bug, *Thaumastocoris peregrinus* (Heteroptera: Thaumastocoridae), in Uruguay”, en *J. Appl. Entomol.*, 143(5), pp. 542-255.

Deguine, J. P., Gloanec, C., Laurent, P., Ratnadass, A., Aubertot, J. N. (eds.)

(2017), *Agroecological Crop Protection*, Springer, Versailles, 249 pp.

Ehler, L. E.

(2006), “Integrated pest management (IPM) definition, historical development and implementation, and the other IPM”, en *Pest. Manag. Sci.*, 62, pp. 787-789.

FAO

(2011), *One Health: Food and Agriculture Organization of the United Nations Strategic Action Plan* [Internet], Roma. Disponible en: <<https://bit.ly/3laxhqR>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

FAO

(2017), Plant health and food security [Internet], IPPC Disponible en: <<http://www.fao.org/3/i7829e/i7829e.pdf>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

FAO

(2018), *Agricultura sostenible y biodiversidad: un vínculo indisociable* [Internet]. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/i6602s/i6602s.pdf>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

Garaycochea, S., Romero, H., Beyhaut, E., Andrew, L. y Altier, N.

(2020), “Soil structure, nutrient status and water holding capacity shape uruguayan grassland prokaryotic communities”, en *FEMS Microbiol Ecol.*, 96(12):faa207. Disponible en: <<https://doi.org/10.1093/femsec/faa207>>.

Garbeva, P., Van Veen, J. A. y Van Elsas, J. D.

(2004), "Microbial diversity in soil: selection of microbial populations by plant and soil type and implications for disease suppressiveness", en *Annu. Rev. Phytopathol.*, 42, pp. 243-270.

George, T. S., Giles, C. D., Menezes-Blackburn, D. et al.

(2018), "Organic phosphorus in the terrestrial environment: a perspective on the state of the art and future priorities", en *Plant Soil*, 427, pp. 191-208.

Glare, T., Caradus, J., Gelernter, W., Jackson, T., Keyhani, N., Kohl, J., Marrone, P., Morin, L. y Stewart, A.

(2012), "Have biopesticides come of age?", en *Trends Biotechnol.*, 30, pp. 250-258.

INIA

(2017), Plan Estratégico INIA 2016-2020 Visión 2030, *Temas Institucionales*, 15, 60 pp.

Kinkel, L. L., Bakker, M. G. y Schlatter, D. C.

(2011), "A coevolutionary framework for managing disease suppressive soils", en *Annu. Rev. Phytopathol.*, 49, pp. 47-67.

Köhl, J., Postma, J., Nicot, P., Ruocco, M. y Blum, B.

(2011), "Stepwise screening of microorganisms for commercial use in biological control of plant pathogenic fungi and bacteria", en *Biol Control*, 57, pp. 1-12.

Lal, R.

(2018), "Sustainable Development Goals and the International Union of Soil Sciences", en Lal, R., Horn, R. y Kosaki, T. (eds.), *Soil and Sustainable Development Goals*, Catena, Stuttgart, pp. 189-196.

Leach, J. E., Triplett, L. R., Argueso, C. T. y Trivedi, P.

(2017), "Communication in the Phytobiome", en *Cell*, 169(4), pp. 587-596.

Le Gall, M., Overson, R., y Cease, A.

(2019), "A Global Review on Locusts (Orthoptera: Acrididae) and Their Interactions with Livestock Grazing Practices", en *Front Ecol Evol*, 7, p. 263 [Internet]. Disponible en: <<https://bit.ly/3oVWnff>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

Martin, N.

(2019), *Prospección, caracterización y bioproducción de Bacillus sensu lato movilizadores de fósforo del suelo*, Tesis de maestría en biotecnología, UDELAR, Montevideo.

Mondino, P., Altier, N., Vero, S., Pereyra, S. y Folch, C.

(2014), "Control biológico de enfermedades de plantas en Uruguay", en Bettiol, W., Rivera, M., Mondino, P., Montealegre, J. y Colmenárez, Y. (eds.), *Control biológico de enfermedades de plantas en América Latina y el Caribe*, Facultad de Agronomía, Montevideo, pp. 339-368.

Oberti, H., Dalla Rizza, M., Reyno, R., Murchio, S., Altier, N. y Abreo, E.

(2020), "Diversity of *Claviceps paspali* reveals unknown lineages and unique alkaloid genotypes", en *Mycologia.*, 112(2), pp. 230-243. DOI: 10.1080/00275514.2019.1694827. Disponible en: <<https://www.tandfonline.com/toc/umyc20/current>>.

Organización Mundial de Sanidad Animal (OIE)

(2020), *One Health “at a glance”* [Internet]. Disponible en: <<https://bit.ly/3e01cJk>> [Consulta: 21 de mayo de 2021].

Pérez-Parada, A., Goyenola, G., Teixeira de Mello, F. y Heinzen, H.

(2018), “Recent advances and open questions around pesticide dynamics and effects on freshwater fishes”, en *Curr Opin Environ Sci Health*, 4, pp. 38-44.

Queenan, K., Garnier, J., Nielsen, L. R., Buttigieg, S., De Meneghi, D., Holmberg, M., Zinsstag, J., Rüegg, S., Häsler, B. y Kock, R.

“Roadmap to a One Health Agenda 2030”, en *CAB Reviews*, 12, p. 14 [Internet]. Disponible en: <<https://bit.ly/32iyHId>>.

Radcliffe, E. B., Hutchinson, W. D. y Cancelado, R. E. (eds.)

(2009), *Integrated pest management: concepts, tactics, strategies and case studies*, Cambridge University Press, Cambridge, 529 pp.

Reddy, K. R. N., Salleh, B., Saad, B., Abbas, H. K., Abel, C. A. y Shier, W. T.

(2010), “An overview of mycotoxin contamination in foods and its implications for human health”, en *Toxin Rev*, 29(1), pp. 3-26.

Rivas, F., Nuñez, P., Jackson, T. y Altier, N.

(2014), “Effect of temperature and water activity on mycelia radial growth, conidial production and germination of *Lecanicillium* spp. isolates and their virulence against *Trialeurodes vaporariorum* on tomato plants”, en *BioControl*, 59, pp. 99-109.

Rivas, F., Hampton, J. G., Altier, N., Swaminathan, J., Rostás, M., Wessman, P., Saville, D. J., Jackson, T. A., Jackson, M. A. y Glare, T. R.

(2020), “Production of Microsclerotia From Entomopathogenic Fungi and Use in Maize Seed Coating as Delivery for Biocontrol Against *Fusarium graminearum*”, en *Front Sustain Food Syst*, 4:606828. doi: 10.3389/fsu-2020.606828.

Rivas-Franco, F., Hampton, J., Morán-Diez, M., Narciso, J., Rostás, M., Wessman, P., Jackson, T. y Glare, T.

(2019), “Effect of coating maize seed with entomopathogenic fungi on plant growth and resistance against *Fusarium graminearum* and *Costelytra giveni*”, en *Biocontrol Sci Technol*, 29(9), pp. 877-900.

Schumann, G. L. y D’Arcy, C. J.

(2017), “The Irish Potato Famine: the birth of plant pathology”, en Schumann, G. L. y D’Arcy, C. J. (eds.), *Hungry planet: stories of plant diseases*, APS Press, St. Paul (MN), pp. 1-19.

Stenberg, J. A., Sundh, I., Becher, P. G. et al.

(2021), “When is it biological control? A framework of definitions, mechanisms, and classifications”, en *J Pest Sci*, 94, pp. 665-676. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s10340-021-01354-7>>.

Thompson, R. C. A.

(2013), “Parasite zoonoses and wildlife: one health, spillover and human activity”, en *Int. J. Parasitol.*, 43(12), pp. 1079-1088.

Torres, P., Beyhaut, E., Abreo, E., Cuitiño, M. J., Ceretta, S., Arrospide, G. y Altier, N.

(2020), “Semillas inteligentes: genética vegetal y genética microbiana se combinan para mejorar la eficiencia de la fertilización fosfatada en soja y reducir el impacto ambiental”, en *Revista INIA Uruguay*, 63, pp. 63-67.

Trivedi, P., Mattupalli, C., Eversole, K. y Leach, J. E.

(2021), “Enabling sustainable agriculture through understanding and enhancement of microbiomes”, en *New Phytol*, 230, pp. 2129-2147. Disponible en: <<https://doi.org/10.1111/nph.17319>>.

United Nations Development Programme (PNUD)

(2015), *Sustainable Development Goals* [Internet]. Disponible en: <<https://bit.ly/3erjVDO>>.

Van der Heijden, M. G. A., Bardgett, R. D., Van Straalen, N. M.

(2008), “The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems”, en *Ecol. Letts.*, 11, p. 651.

Vaz Jauri, P., Altier, N., Pérez, C. A. y Kinkel, L.

(2018), “Cropping history effects on pathogen suppressive and signaling dynamics in *Streptomyces* communities”, en *Phytobiomes*, 2(1), pp. 14-23. Disponible en: <<https://doi.org/10.1094/PBIOMES-05-17-0024-R>>.

Villar, A., Ernst, O., Cadenazzi, M., Vero, S., Pereyra, S., Altier, N., Chouhy, D., Langone, F. y Pérez, C.

(2019), “Crop Sequence Effects on Native Populations of *Trichoderma* spp. in No-till Agriculture”, en *Agrociencia Uruguay*, 23(1):e55 [Internet]. Disponible en: <<http://agrocienciauruguay.uy/ojs/index.php/agrociencia/article/view/55>>.

Capítulo 14

Índice de Integridad Ecosistémica: hacia un análisis multidimensional de la integridad ecológica en sistemas productivos

Oscar Blumetto

1. Introducción

La evaluación ambiental de los sistemas de producción es una preocupación creciente a nivel internacional y esta cobra especial relevancia en la producción agroecológica. Cuestiones como las emisiones de gases de efecto invernadero, el ciclo de nutrientes o el consumo de energía fósil preocupan a muchos actores de las cadenas productivas y a la sociedad en general (FAO, 2017). Los aspectos relacionados con las emisiones y el consumo de energía fósil, más allá del gran valor de generar factores de emisión propios para actividades como la ganadería y el desarrollo de investigación al respecto, poseen una metodología de base que tiene un acuerdo internacional extendido.

Sin embargo, en otros aspectos, como la capacidad del sistema para sustentar la biodiversidad o ciertos servicios ecosistémicos, la posibilidad de estandarizar métodos es más compleja y la interpretación de los resultados, mucho más. La sitio-especificidad de la biodiversidad, sobre todo en sus niveles de especies y ecosistemas, reduce la posibilidad de universalizar referencias para contemplar las complejas interacciones. Como ejemplo, el análisis del ciclo de vida (ACV) de los sistemas de producción ganadera, en la literatura internacional, presenta principalmente ejemplos basados en el uso de la tierra o cambios en el uso de la tierra como un mecanismo de evaluación. Este enfoque es muy útil para comparar sistemas muy contrastantes, pero no distingue situaciones en las que distintas estrategias de gestión puedan tener diferentes efectos en el mismo uso de la tierra.

Por otro lado, la evaluación de indicadores de biodiversidad como riqueza o diversidad en muchos grupos taxonómicos (por ejemplo, aves, mamíferos, insectos, arañas, peces, lombrices, microorganismos, etc.) y de sus roles en las cadenas alimentarias o los ciclos biogeoquímicos de los nutrientes solo es posible con la participación de especialistas en estos grupos. Requiere la capacidad de identificar, clasificar e interpretar la diversidad a nivel de especies, comunidades, ecosistemas o, incluso, a nivel genético. Esto dificulta la generalización de estas evaluaciones y su uso a nivel de formulación y evaluación de políticas, estrategias de gestión o una tecnología específica.

En síntesis, la evaluación del estado y funcionamiento de los ecosistemas es esencial para asegurar la sostenibilidad del uso del territorio en cualquier actividad productiva. Con el objetivo de aplicarlo a la gestión, evaluar la integridad requiere de la integración de indicadores cuya determinación sea aplicable en plazos y con costos razonables, asegurando a su vez información válida para interpretar el estado y la funcionalidad. Por esta razón, hemos desarrollado una herramienta de evaluación multidimensional (Índice de Integridad Ecosistémica, IIE) cuyo fundamento es captar dichos indicadores y realizar una evaluación en función de un estado de referencia considerado óptimo para una ecorregión.

En un proceso de transición hacia la agroecología, disponer de referencias cuantificables del estado de los ecosistemas bajo uso productivo aparece como una estrategia esencial para planificar la gestión a mediano y largo plazo.

2. Índice de Integridad Ecosistémica

Para evaluar el estado general de los ecosistemas bajo uso agropecuario se requiere de herramientas que permitan contemplar múltiples dimensiones de manera práctica y accesible. El Índice de Integridad Ecosistémica (IIE) (Blumetto *et al.*, 2019) integra diferentes dimensiones bajo un sistema cuali-cuantitativo de evaluación, rápido y económico, que puede ser utilizado para evaluación y para gestión. Es una herramienta que ha demostrado ser útil para evaluar varios aspectos de la funcionalidad del ecosistema. Además, el IIE proporciona valores numéricos que son útiles para comparar diferentes establecimientos o potreros y que también pueden ser mapeados, con el fin de ayudar en las decisiones de gestión.

El IIE es un índice de escala de 0 a 5, que incluye cuatro dimensiones: 1) estructura de vegetación, 2) especies de la comunidad florística, 3) evi-

dencia o potencial de erosión de suelos, y 4) estado de zonas riparias de cursos de agua (cañadas, arroyos y ríos), evaluando el estado del ecosistema en relación con una condición de referencia considerada óptima (alta naturalidad) para ese ambiente bajo uso. El valor de cada componente, para cada campo, es el resultado de una escala de puntos de descuento a partir de 5, que es la mejor situación, y asignando una proporción de descuento relativa a la distancia entre la situación real y la referencia.

El valor global del índice se obtiene por la integración de estos cuatro componentes mediante la siguiente fórmula:

$$\sum_{i=1}^n \frac{(Et_i + Esp_i + Su_i + ZR_i) AP_i}{4AE}$$

Donde, Et_i = puntuación de la estructura de vegetación para el potrero i , Esp_i = puntuación de la presencia de especies para el potrero i , Su_i = puntuación del suelo para el *paddock* i , ZR_i = puntuación de la zona ribereña para el potrero i , $AP_i = I$ y AE = área total del establecimiento.

Más allá del valor global, se obtiene un valor de integridad para cada potrero, o unidad territorial utilizada para el estudio. En el análisis de resultados, ese valor es además divisible en las cuatro dimensiones que lo componen, para tomar medidas de mejora apropiadas en los casos que se requieran.

Las dimensiones propuestas están basadas en las evidencias científicas de su influencia en la funcionalidad del ecosistema, incluyendo el uso por la vida silvestre, e integran un cierto número de indicadores cuya constatación es viable por una observación calificada. Estos indicadores tienen un protocolo de evaluación estructurado para sistematizar su evaluación. En los siguientes apartados se presentará una síntesis de los argumentos científicos que respaldan el rol estratégico de las dimensiones y las variables medidas en cada una.

2.1. Estructura de la vegetación

El funcionamiento de los ecosistemas depende de interacciones muy complejas en las que la producción primaria neta juega un papel fundamental, pero también un número incontable de mecanismos reguladores que involucran consumidores primarios, secundarios y superiores. La fauna, por ejemplo, depende de la estructura de la vegetación para encontrar hábitat. La diversidad estructural genera heterogeneidad de hábitats, considerados clave para promover la diversidad de especies

animales (Tews *et al.*, 2004). La estructura afecta a la mayoría de los niveles tróficos y grupos taxonómicos como los insectos (Di Giulio *et al.*, 2001; Van Klink *et al.*, 2015), arácnidos (Whitmore *et al.*, 2002, Hore y Uniyal, 2008), aves (Fuhlendorf *et al.*, 2006; Dias *et al.*, 2017), mamíferos (Garden *et al.*, 2007), reptiles (Fischer *et al.*, 2004; Garden *et al.*, 2007) y anfibios (Wilgers y Horne, 2006; Purrenhage y Boone, 2009).

En este componente, el valor depende de tres características: el número de estratos en relación con el número de estratos potenciales, la densidad de distribución de cada estrato y el efecto de intervenciones humanas como quemas, aplicación de herbicidas o corte de vegetación.

2.2. Especies en la comunidad florística

La diversidad de especies es uno de los determinantes más importantes de estabilidad del ecosistema, productividad, riesgo de invasión de especies y dinámica de nutrientes (Tilman *et al.*, 2014). Además de sus efectos sobre el funcionamiento actual de ecosistemas, la diversidad de especies influye en la resiliencia y resistencia de ecosistemas al cambio ambiental (Chapin *et al.*, 2000). Para ecosistemas donde predominan los pastizales, la sustitución por cultivos o el pastoreo excesivo son los principales impulsores de la pérdida de biodiversidad (Risser, 1988), pero el pastoreo moderado tiende a incrementar esta diversidad (De Bello *et al.*, 2006; Altesor *et al.*, 2006; Wrage *et al.*, 2011; Lezama *et al.*, 2014). Esto significa que no solo los cambios en el uso de la tierra, sino también las estrategias de manejo afectan la diversidad dentro de parcelas o establecimientos. Otros impulsores de pérdida de diversidad incluyen incendios, plantas invasoras agresivas (Risser, 1988) o enriquecimiento de nutrientes (Isbell *et al.*, 2013).

Teniendo esto en cuenta, se consideró importante incluir la diversidad vegetal como componente del índice. Sin embargo, una exhaustiva descripción de la comunidad puede limitar la aplicación de este, debido a la necesidad de capacidades avanzadas de identificación de especies, lo cual es complejo y restringe las personas capaces de hacer la evaluación. A partir de esto, el protocolo de evaluación incluye: rangos de número de especies sin necesidad de identificación total, dominancia de algunas especies y especies exóticas ponderadas por su riesgo de invasión.

2.3. Erosión y potencial de erosión del suelo

El suelo suministra otros servicios ecosistémicos valiosos como componente del ciclo del agua, control de inundaciones, filtrado de contaminantes, descomposición de materia orgánica y reciclaje de nutrientes esenciales para plantas, secuestro de carbono, etc. (Karlen *et al.*, 2003; Dominati *et al.*, 2014). La evaluación de la calidad del suelo puede ser compleja si se consideran todos los indicadores significativos, incluso con índices que integren una gran cantidad de información (Karlen *et al.*, 2003). La pérdida de calidad de suelo puede deberse principalmente a cambios en uso de la tierra, por ejemplo, la conversión de pastizales nativos a cultivos, pero también a efectos de manejo que no implican sustitución, como es el caso del sobrepastoreo (Raisei, 2017; Altesor *et al.*, 2019). Tanto la conversión a cultivos como el pastoreo excesivo pueden causar erosión. Aunque no es el único aspecto para evaluar, la evidencia o el riesgo de erosión parece ser un indicador relevante y reduce la complejidad. Para incorporar este indicador en la implementación del IIE, se describe la erosión pasada y se evalúa la actividad erosiva actual. Además, en este componente el potencial de erosión también es evaluado por condiciones predisponentes como falta de cobertura vegetal o de restos vegetales cubriendo el suelo, presencia de trillos, quema de vegetación, pisoteo, etcétera.

2.4. Arroyos y zona ribereña

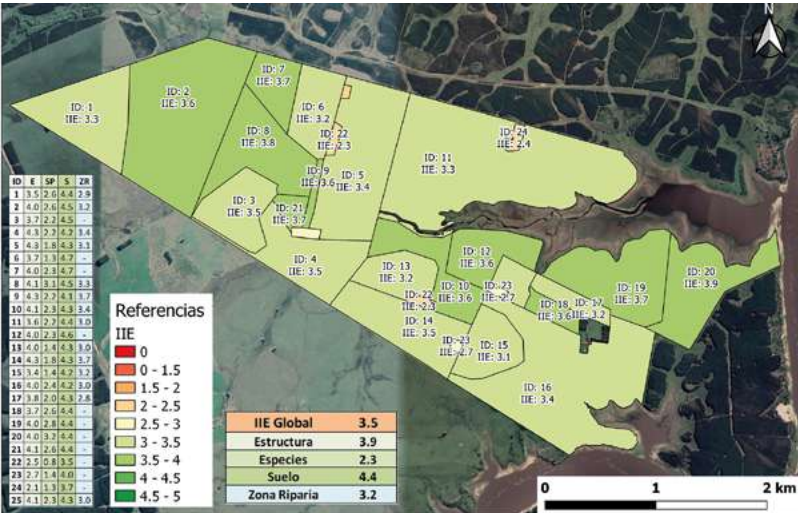
Los ecosistemas acuáticos son una preocupación central en las propuestas de medidas de manejo y usos de la tierra, debido, entre otras cosas, a su relación con la calidad del agua de ríos y arroyos, considerada un servicio ecosistémico central (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Las zonas ribereñas mantienen muchas funciones ecológicas consideradas cruciales para la preservación de las condiciones ecológicas de los ríos (Naiman y Décamps, 1997). Atrapan sedimentos de la escorrentía, reducen la erosión del canal, eliminan nutrientes y otros contaminantes, almacenan aguas de inundación, mantienen el hábitat para los peces y otros animales acuáticos moderando la temperatura del agua o proporcionando hábitat para organismos terrestres (Wenger, 1999). La estructura de la vegetación ribereña puede influir procesos ecológicos, como los flujos de energía y nutrientes, y da pistas esenciales para la gestión ribereña y su evaluación a través del paisaje (Fernandes *et al.*, 2011). Los sedimentos en el arroyo son una evidencia de erosión en el área de capta-

ción, perturban el flujo de agua y permiten la resuspensión de partículas y nutrientes. Además, Marshalonis y Larson (2018) encontraron que los sedimentos finos degradan las comunidades de macroinvertebrados de los arroyos. La evaluación del IIE incluye: el ancho de la franja de amortiguamiento, la continuidad de la vegetación, la densidad de comunidad y su distribución. Se definieron dos anchos de tiras para evaluación: 0-10 m del arroyo y 10-50 m. Otro factor evaluado visualmente en este componente es el estado del cauce del arroyo: presencia de bancos de sedimentos, erosión del cauce y evidencia de intrusión de ganado en el cauce.

2.5. Expresión de resultados

Los resultados finales se presentan de dos formas (Figura 1), una tabla con el valor de cada potrero (cuadro o subdivisión elegida) y el valor general del predio, pudiéndose representar mapas de cada establecimiento que muestren la distribución espacial de los diferentes valores para cada unidad de manejo a través de una escala de color que simplifica el análisis y ayuda a la toma de decisiones de gestión.

FIGURA 1. EJEMPLO DE PRESENTACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS Y VISUALES DE UN ESTABLECIMIENTO



Fuente: Elaboración propia.

3. Correlaciones con otros aspectos ambientales

Hoy en día, el IIE ha sido aplicado en decenas de establecimientos distribuidos por todo el país, en algunos de los cuales se ha podido correlacionar los valores obtenidos con otras variables ambientales.

Además de la asociación teórica de los cuatro componentes evaluados con los servicios ecosistémicos, con base en evidencia científica, el estudio de casos reveló una correlación significativa entre los valores del índice y otras variables ambientales independientes estudiadas. Entre 2012 y 2015 se realizó un proyecto de investigación de coinnovación en el este de Uruguay. Este estudio involucró a siete establecimientos ganaderos familiares cuyas características, localización y metodología son descritas por Albicette *et al.* (2017) y Aguerre *et al.* (2018). En estos establecimientos se aplicó el IIE al inicio y al final del proyecto, y también se midieron algunas otras variables ambientales durante ese período, como diversidad de plantas herbáceas, diversidad de aves y contenido de carbono orgánico en los suelos.

Para comenzar a visualizar la relación de los valores del índice con dichas variables se realizaron análisis de correlaciones que se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON ENTRE EL ÍNDICE DE INTEGRIDAD DEL ECOSISTEMA Y OTRAS VARIABLES

Variable	Aves Índice de Shannon	Aves Riqueza	Plantas herbáceas Índice de Shannon	Plantas herbáceas Riqueza	Carbono orgánico 0-3 cm prof.	Carbono orgánico 3-6 cm prof.
Coefficiente correlación de Pearson con IIE	0,77	0,81	0,82	0,76	0,74	0,57
p	1.8E ⁻⁰⁹	0.03	0.05	0.02	1.7E ⁻⁰³	0.03

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de correlación de Pearson muestra la asociación que existe entre los valores del índice y otras variables ambientales que no están directamente medidas en el protocolo del IIE. Esto significa que, ante valores más altos del IIE, se constatan valores más altos en riqueza y

diversidad de plantas y aves, así como en los contenidos de carbono del suelo.

4. Análisis de resultados para la gestión

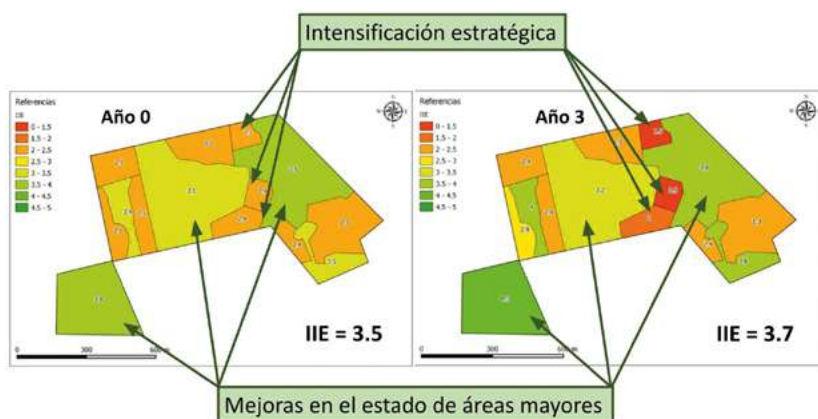
El IIE fue creado para la evaluación del estatus de la integridad ecosistémica en un establecimiento dado, de modo que se pueda verificar su estado y, si se poseen referencias, discernir si este es bueno o necesita mejorarse. Adicionalmente, es posible hacer ese análisis a nivel de cada subdivisión del establecimiento (potrero, chacra o cuadro), lo cual nos permite actuar sobre partes del sistema que se detecten como críticas. Esto es importante en la medida en que, dependiendo del sistema, estos cuadros o potreros son las unidades mínimas sobre las que se decide un manejo, por ejemplo, carga ganadera, una siembra determinada o un manejo cultural.

Pero, además, puede existir un tercer nivel de análisis correspondiente a cada una de las dimensiones, ya que estas también siguen la escala de evaluación de 0 a 5. Por lo tanto, es posible determinar cuál se encuentra más lejos del valor óptimo. A modo de ejemplo, se plantea el caso de un potrero determinado que posee un valor de IIE de 3,75. A su vez, este valor del índice corresponde a valores de 4 en especies, 4 en estructura, 4 en zonas riparias y 3 en suelo. Podemos percibir claramente que la dimensión suelo es la más débil y allí es donde tenemos oportunidades de mejora. En este caso, recurriendo a las variables originales evaluadas en dicha dimensión, podemos verificar cuales están contribuyendo a reducir la calificación. A modo de ejemplo, si el factor que más afecta son las condiciones predisponentes a la erosión, podremos tomar decisiones de manejo para tratar de mitigar esos efectos, por ejemplo, una reducción de carga, un cambio en el marco de plantación, etcétera.

Por último, existe un modo más integral de utilización del IIE como herramienta de gestión ambiental, que refleja la verdadera complejidad que tienen en general los sistemas de producción. En esta oportunidad, se utiliza como ejemplo un caso real reportado por Aguerre *et al.* (2018), de un establecimiento cuya actividad principal es la ganadería. El objetivo del propietario del predio era mejorar su productividad a la vez que gestionar los recursos de manera de mejorar o mantener la integridad ecosistémica. Este productor parte de la situación inicial (año 0) y, luego del trabajo de rediseño de su predio, llega a una situación final (año 3) (Figura 2). El diagnóstico del establecimiento reveló que era necesario

mejorar la gestión del campo natural que ocupaba la mayoría de la superficie y era la base forrajera, y para ello se debía, entre otros manejos, mejorar la productividad de pasturas anuales. Esta operaría como fuente de alimento estratégica para aliviar el pastoreo en los potreros de campo natural en momentos clave para permitir su incremento de productividad y, paralelamente, su integridad ecosistémica.

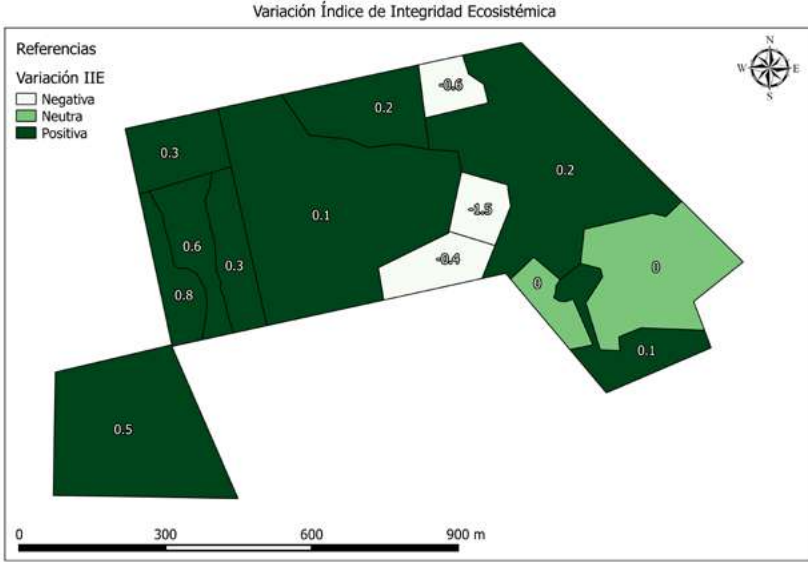
FIGURA 2. ÍNDICE DE INTEGRIDAD ECOSISTÉMICA INICIAL Y FINAL DEL ESTABLECIMIENTO Y VARIACIONES MÁS RELEVANTES EN EL MANEJO



Fuente: Elaboración propia.

En síntesis, el plan consistió en intensificar pequeñas áreas ya sustituidas de campo natural (lo que redujo el valor del IIE para esos potreros) y, gracias a esa alta oferta de forraje, mejorar el manejo de los potreros de campo natural (lo cual aumentó el valor del IIE para esos potreros). El establecimiento incrementó en 160% su productividad primaria y pasó de un IIE inicial de 3,5 a 3,7 (Aguerre *et al.*, 2018). En la Figura 3 puede observarse las variaciones del IIE a nivel de cada potrero para ese período.

FIGURA 3. VARIACIONES DEL ÍNDICE DE INTEGRIDAD ECOSISTÉMICA ENTRE SITUACIÓN INICIAL Y FINAL



Fuente: *Elaboración propia.*

En conclusión, no siempre es relevante mejorar la integridad en cada unidad particular, sino que la consideración integral del sistema y la planificación estratégica implican que pueda eventualmente “sacrificarse” la integridad de algún área o sector para mejorar la globalidad.

5. Consideraciones finales

El Índice de Integridad Ecosistémica es una herramienta robusta pero simple, para evaluar y monitorear la integridad de los agroecosistemas. La validación primaria demuestra una buena correlación con otras variables ambientales como la diversidad de vida silvestre y el contenido de materia orgánica del suelo.

Este índice fue desarrollado con la colaboración multidisciplinaria e interinstitucional de muchos investigadores, especialistas y agrónomos de campo de diferentes regiones, lo que lo convierte en una herramienta

de amplio consenso y utilizable. Cada componente fue cuidadosamente pensado y científicamente respaldado para incluir los aspectos relevantes, pero, al mismo tiempo, facilitar su implementación en condiciones de campo. Por tratarse de una herramienta que califica sobre la base de una referencia de contexto biogeográfico, el índice podría ser utilizado para usos de suelo muy diferentes, ayudando a la comparación entre distintas actividades.

El IIE es un instrumento útil para identificar puntos críticos de manejo o diseñar estrategias de mejora dentro de un establecimiento. Permite la separación de diferentes unidades espaciales de análisis (potrero, parcelas, etc.) y, a su vez, rastrear la influencia de cada componente, de modo de identificar las áreas de mejora.

En trabajos de investigación en curso se cuantificarán otros procesos y servicios de los ecosistemas, lo que permitirá verificar la correlación de valores del IIE con estos atributos de los agroecosistemas. Por ejemplo, la reducción de las pérdidas de nutrientes por escorrentía y el suministro de agua de calidad.

Resulta relevante en una transición hacia la agroecología, contar con referencias cuantificables que nos permitan evaluar el estado de los sistemas y el progreso de la trayectoria tecnológica.

Referencias

- Aguerre, V., Albicette, M. M., Albín, A., Bortagaray, I., Benvenuto, M., Blumetto, O., Cardozo, G., Castagna, A., Clara, P., Del Pino, L., Dogliotti, S., García, F., Gilzans, J. C., Leoni, C., Montaldo, S., Quintans, G., Ruggia, A., Scarlato, M., Scarlato, S., Silvera, M. y Tiscornia, G.** (2018), *Co-innovando para el desarrollo sostenible de sistemas ganaderos familiares de Rocha-Uruguay*, Serie Técnica 243, INIA, Montevideo, 132 pp.
- Albicette, M. M., Leoni, C., Ruggia, A., Scarlato, S., Blumetto, O., Albín, A. y Aguerre, V.** (2017), "Co-innovation in family-farming livestock systems in Rocha, Uruguay: a 3-year learning process", en *Outlook Agric.*, 46 (2), pp. 92-98. Disponible en: <<https://doi.org/10.1177/0030727017707407>>.
- Altesor, A. I., Piñeiro, G., Lezama, F., Jackson, R. D., Sarasola, M. y Paruelo, J. M.** (2006), "Ecosystem changes associated with grazing removal in sub-humid grasslands of South America", en *Journal of Vegetation Science*, 17, pp. 323-332.

Altesor, A., Gallego, F., Ferrón, M., Pezzani, F., López-Mársico, L., Lezama, F., Baeza, S., Pereira, M., Costa, B. y Paruelo, J. M.

(2019) “An inductive approach to build State-and-Transition Models for Uruguayan grasslands”, en *Rangeland Ecology & Management*, 72, pp. 1005-1016. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.rama.2019.06.004>>.

Blumetto, O., Castagna, A., Cardozo, G., García, F., Tiscornia, G., Ruggia, A., Scarlato, S., Albicette, M., Aguerre, V. y Albin, A.

(2019), “Ecosystem Integrity Index, an innovative environmental evaluation tool for agricultural production systems”, en *Ecological Indicators*, v. 101, pp. 725-733.

Chapin, F., Zavaleta, E., Eviner, V., Naylor, R., Vitousek, P., Reynolds, H., Hooper, D., Lavorel, S., Sala, O., Hobbie, S., Mack, M. y Díaz, S.

(2000), “Consequences of changing biodiversity”, en *Nature*, 405(6783), pp. 234-242. Disponible en: <<https://doi.org/10.1038/35012241>>.

De Bello, F., Lepš, J. y Sebastià, M.-T.

(2006), “Variations in species and functional plant diversity along climatic and grazing gradients”, en *Ecography*, 29, 801810. Disponible en: <<https://doi.org/10.1111/j.2006.0906-7590.04683.x>>.

Di Giulio, M., Edwards, P. J. y Meister, E.

(2001), “Enhancing insect diversity in agricultural grasslands: the roles of management and landscape structure”, en *J. Appl. Ecol.*, 38(2), pp. 310-319. Disponible en: <<https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2001.00605.x>>.

Dias, R. A., Gianuca, A. T., Vizentin-Bugoni, J., Gonçalves, M. S. S., Bencke, G. A. y Bastazini, V. A.

(2017), “Livestock disturbance in Brazilian grasslands influences avian species diversity via turnover”, en *Biodiv. Conserv.*, 26, pp. 2473-2490. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s10531-017-1370-4>>.

Dominati, E., Mackay, A., Green, S. y Patterson, M.

(2014), “A soil change based methodology for the quantification and valuation of ecosystem services from agro- ecosystems: a case study of pastoral agriculture in New Zealand”, en *Ecol. Econ.*, 100, pp. 119-129.

FAO

(2017), *Leap at a glance*, Roma, 28 pp. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/a-i7804e.pdf>> [Consulta: 15 de septiembre de 2020].

Fernandes, M. R., Aguiar, F. C. y Ferreira, M. T.

(2011), “Assessing riparian vegetation structure and the influence of land use using landscape metrics and geostatistical tools”, en *Landsc. Urban Plan.*, 99, pp. 166-177. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.11.001>>.

Fischer, J., Lindenmayer, D. B. y Cowling, A.

(2004), “The challenge of managing multiple species at multiple scales: reptiles in an Australian grazing landscape”, en *J. Appl. Ecol.*, 41(1), pp. 32-44. Disponible en: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2004.00869.x>>.

Fuhlendorf, S. D., Harrell, W. C., Engle, D. M., Hamilton, R. G., Davis, C. A. y Leslie, D. M.

(2006), "Should heterogeneity be the basis for conservation? Grassland bird response to fire and grazing", en *Ecol. Appl.*, 16(5), pp. 1706-1716.

Garden, J. G., Mcalpine, C. A., Possingham, H. P. y Jones, D. N.

(2007), "Habitat structure is more important than vegetation composition for local-level management of native terrestrial reptile and small mammal species living in urban remnants: a case study from Brisbane, Australia", en *Austral Ecol.*, 32(6), pp. 669-685. Disponible en: <<https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.2007.01750.x>>.

Hore, U. y Uniyal, V. P.

(2008), "Diversity and composition of spider assemblages in five vegetation types of the Terai Conservation Area, India", en *J. Arachnol.*, 36(2), pp. 251-258. Disponible en: <<https://doi.org/10.1636/CT07-53.1>>.

Isbell, F., Reich, P. B., Tilman, D., Hobbie, S. E., Polasky, S. y Binder, S.

(2013), "Nutrient enrichment, biodiversity loss, and consequent declines in ecosystem productivity", en *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 110, pp. 11911-11916. Disponible en: <<https://doi.org/10.1073/pnas.1310880110>>.

Karlen, D. L., Ditzler, C. A. y Andrews, S. S.

(2003), "Soil quality: why and how?", en *Geoderma*, 114, pp. 145-156. Disponible en: <[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00039-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00039-9)>.

Lezama, F., Baeza, S., Altesor, A., Cesa, A., Chaneton, E. J. y Paruelo, J. M.

(2014), "Variation of grazing-induced vegetation changes across a large-scale productivity gradient", en *Journal of Vegetation Science*, 25, pp. 8-21.

Marshallonis, D. y Larson, C.

(2018), "Flow pulses and fine sediments degrade stream macroinvertebrate communities in King County, Washington, USA", en *Ecol. Indic.*, 93, pp. 365-378. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.060>>.

Millennium Ecosystem Assessment

(2005), *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, Island Press, Washington, pp. 137.

Naiman, R. J. y Décamps, H.

(1997), "The ecology of interfaces: riparian zones", en *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 28, pp. 621-658. Disponible en: <<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621>>.

Purrenhage, J. L. y Boone, M. D.

(2009), "Amphibian community response to variation in habitat structure and competitor density", en *Herpetologica*, 65(1), pp. 14-30. Disponible en: <<https://doi.org/10.1655/08-017R1.1>>.

Raiesi, F.

(2017), "A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland

arid and semiarid regions”, en *Ecol. Indic.*, 75, pp. 307-320. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049>>.

Risser, P. G.

(1988), “Diversity in and among grasslands”, en Wilson, E. O. (ed.), *Biodiversity*, National Academic Press, Washington, pp. 538.

Tews, J., Brose, U., Grimm, V., Tielbörger, K., Wichmann, M.C., Schwager, M. y Jeltsch, F.,

(2004), “Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures”, en *J. Biogeogr.*, 31 (1), pp. 79-92. Disponible en: <<https://doi.org/10.1046/j.0305-0270.2003.00994.x>>.

Tilman, D., Isbell, F. y Cowles, J.

(2014), “Biodiversity and ecosystem functioning”, en *Ann. Rev. Ecol., Evol. Syst.*, 45, pp. 471-493. Disponible en: <<https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-120213-091917>>.

Van Klink, R., Van der Plas, F., Van Noordwijk, C. G. E., Wallis de Vries, M. F. y Olf, H.

(2015), “Effects of large herbivores on grassland arthropod diversity”, en *Biol. Rev.*, 90(2), pp. 347-366. Disponible en: <<https://doi.org/10.1111/brv.12113>>.

Wenger, S.

(1999), *A review of the scientific literature on riparian buffer width, extent and vegetation*, University of Georgia, Institute of Ecology, Office of Public Service and Outreach, Athens, GA.

Whitmore, C., Slotow, R., Crouch, T. E. y Dippenaar-Schoeman, A. S.

(2002), “Diversity of spiders (Araneae) in a Savanna Reserve, Northern Province, South Africa”, en *J. Arachnol.*, 30(2), pp. 344-356. Disponible en: <[https://doi.org/10.1636/0161-8202\(2002\)030\[0344:DOSAIA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1636/0161-8202(2002)030[0344:DOSAIA]2.0.CO;2)>.

Wilgers, D. J. y Horne, E. A.

(2006), “Effects of different burn regimes on tallgrass prairie herpetofaunal species diversity and community composition in the Flint Hills, Kansas”, en *J. Herpetol.*, 40(1), pp. 73-84. Disponible en: <<https://doi.org/10.1670/162-05A.1>>.

Wrage, N., Strodthoff, J., Cuchillo, H. M., Isselstein, J. y Kayser, M.

(2011), “Phytodiversity of temperate permanent grasslands: ecosystem services for agriculture and livestock management for diversity conservation”, en *Biodivers. Conserv.*, 20, pp. 3317-3339. Disponible en <<https://doi.org/10.1007/s10531-011-0145-6>>.

Tercera sección
Tecnologías con enfoque en la
productividad y la calidad

Editores: Roberto Zoppolo y Gabriel Ciappesoni

Introducción

Tecnologías con enfoque en la productividad y la calidad

Roberto Zoppolo y Gabriel Ciappesoni

La productividad y la calidad de lo producido son variables que condicionan la viabilidad de cualquier emprendimiento productivo y, ante la ausencia de valores adecuados, suelen limitar su sostenibilidad. Es claro que en la medida en que no logramos alcanzar las cantidades necesarias por unidad de superficie o de cualquier otro insumo aplicado al proceso de producción, no es posible darle continuidad a un emprendimiento productivo. Y si la producción alcanza lo esperado, pero no cumple con las características deseadas por el mercado y los consumidores, tampoco parece que sea posible mantener ciclos sucesivos de producción, salvo mediante un apalancamiento externo que inyecte recursos.

Estas dos variables (productividad y calidad) son necesarias, por lo tanto, para caracterizar al sistema productivo, si bien no son suficientes para describir un sistema agroecológico de producción. La sostenibilidad del sistema está condicionada por factores tanto ambientales y productivos como sociales y culturales, o económicos y financieros. Por ello, la agroecología nos plantea desarrollar un sistema complejo que atienda a todos estos factores y sus interacciones, operando a lo largo y ancho de todo el proceso agropecuario para la producción de alimentos y fibras. Su conceptualización y contenido debe rescatar el saber popular, buscar la integración de dicho saber con el conocimiento científico y apoyarse en la cooperación e integración de estas dos fuentes principales, pero no necesariamente las únicas, para complementarse y generar sinergias en un proceso de coinnovación.

Más allá de este ideal, sin duda hay tecnologías, prácticas, insumos que, si bien su conceptualización inicial o diseño no fue en este marco agroecológico del sistema productivo, perfectamente pueden aportar, directamente o adaptaciones mediante, al diseño y funcionamiento de un sistema agroecológico. Este sería el caso de la gran mayoría de los aportes que hoy presentamos en esta sección. Somos conscientes de que este tipo de desarrollo tiene sus limitantes y lejos está de nuestra posición llamar a algo por un nombre que no le corresponde. Por ello es por lo que, con las observaciones del caso, se presentan estos capítulos en el entendido de su aporte positivo a las trayectorias agroecológicas y su compatibilidad con el enfoque agroecológico que esperamos, de aquí en más, esté presente desde el análisis y la definición de los temas a investigar.

No es casualidad que tres capítulos traten sobre los recursos genéticos y su mejoramiento. A nivel de la producción, tanto vegetal como animal, la base genética determina la capacidad productiva y las características del producto condicionadas por el ambiente.

En lo relativo a la producción vegetal, los programas de mejoramiento a nivel mundial han redirigido sus esfuerzos, durante las últimas décadas, desde la búsqueda de perfección en las características fundamentalmente estéticas, a priorizar cualidades nutricionales y alimenticias de frutas y hortalizas. La exigencia de los consumidores en cuanto a valorizar el aporte de la comida a la salud, así como de apostar a que el consumo de un alimento sea una experiencia gratificante, tiene su reflejo en lineamientos de la agroecología. La salud, en cuanto bien común del sistema, está condicionada por la globalidad y las particularidades de este y arranca por un suelo saludable. También la valorización de la experiencia *gourmet* tiene una fuerte base en el desarrollo de lo local, en la recuperación de tradiciones y el saber ancestral, todas cualidades de lo agroecológico.

Esta reorientación de los programas de mejora también se ha observado en los rumiantes, ya que en ellos tienen cada vez más peso aspectos de salud, adaptación a la variabilidad climática y emisiones de gases de efecto invernadero, entre otros.

Es clave tener presente que la demanda del mercado pone hoy casi tanto énfasis en las características del producto como en el proceso productivo para obtenerlo. La preocupación creciente por la conservación de los recursos naturales y la concientización de los impactos que la actividad agropecuaria tiene sobre ellos están generando mercados y consumidores exigentes comprometidos con el ambiente.

Los programas del INIA de mejoramiento genético de frutas y hortalizas han respondido también con la reorientación mencionada de objetivos cuya prioridad está puesta en las cualidades organolépticas y nutricionales y en la adaptación a las condiciones locales de cultivo, con énfasis en la incorporación de resistencias a enfermedades y plagas comunes en nuestro país.

Un pilar fundamental y puntapié inicial del proceso productivo está en la selección de los recursos genéticos que utilizaremos. Las características demandadas actualmente en los productos y en los procesos para obtenerlos nos obligan a priorizar la selección de materiales que, además de aportar las características organolépticas y nutricionales requeridas, viabilicen un sistema productivo de mínimo impacto ambiental. Para ello es clave la identificación de los materiales adaptados a las condiciones agroecológicas en que se llevará adelante la producción y por ello, el énfasis que ponemos en el mejoramiento genético local. Esto permite llevar adelante el proceso de mejoramiento en las condiciones reales en que se producirá, a la vez que facilita la incorporación de los materiales locales que ya tienen un grado de evolución conjunta con el ambiente en casos de hablar de especies acriolladas, y mucho más si nos referimos a especies nativas. La identificación, el mejoramiento y la selección de materiales resistentes a enfermedades y plagas que afectan al cultivo son parte de la clave del éxito productivo y de la sostenibilidad del sistema, y por ello son objetivos prioritarios en nuestros programas de mejoramiento genético.

Cuando empleamos material genético adaptado a la condición agroecológica del cultivo y que cuenta con resistencia a las principales enfermedades y plagas, el proceso productivo se puede aproximar mucho a los procesos naturales y, generalmente, permite alcanzar una producción con mínimas intervenciones. Varios de los programas de mejoramiento han arrancado con una base genética de colectas locales, a la que se sumó materiales importados, que aportan características deseables, tanto en cuanto a comportamiento como en cuanto al tipo de producto final.

Una mención aparte se llevan los frutales nativos, ya que siendo Uruguay parte del centro de origen de esas especies, la variabilidad y disponibilidad de materiales es casi o totalmente local. Tal es el caso de guayabo del país, pitanga, guabiyú, arazá, cerezo de monte, ubajay y otros. Entendemos la incorporación de estas especies al sistema productivo como un aporte a la biodiversidad, así como un elemento de rescate cultural y puesta en valor de recursos propios locales. Quedan aún infinidad

de desafíos en este sentido, apuntando a la utilidad y las bondades de numerosas especies integrantes de nuestra flora, no solo en especies leñosas sino también en herbáceas, y que hoy son consideradas en muchos casos como malezas. Es de destacar el aporte realizado en este sentido por otra serie de individuos y organizaciones preocupados y ocupados en estos temas, que rescatan y valorizan especies por su aporte nutricional e incluso, en varios casos, por su valor como especie ornamental.

En el mejoramiento genético en rumiantes (bovinos y ovinos) se está transitando un proceso similar. A nivel internacional, ya se ha planteado la terminología “Objetivos de selección agroecológicos” (Phocas *et al.*, 2016) en la que a la clásica selección por cantidad y calidad de los productos se incorporan otros aspectos como son: sanidad, robustez, reproducción, eficiencia, disminución del impacto ambiental, valorización de la genética adaptada y adaptación. Muchos de estos aspectos han sido incluidos en las evaluaciones genéticas que realiza el INIA en las diferentes razas, sea en bovinos para carne o leche o en ovinos, aunque todavía no se cuenta con un enfoque global y una ponderación formal de estos diferentes rasgos. Los trabajos de largo plazo realizados acerca de resistencia a nematodos en ovinos, conformación lineal y fertilidad en hembras en bovinos para leche, o, más recientemente, eficiencia y emisiones de metano en ovinos y bovinos para carne, son claro ejemplo de ello. A esto se suma el enfoque participativo de la mejora en estas especies, realizado siempre en conjunto con las sociedades de criadores y otras instituciones agropecuarias.

Otro aporte que se presenta en esta sección es el estudio realizado por un equipo conjunto de INIA y Facultad de Agronomía que analiza distintos componentes del proceso productivo en el cultivo de tomate, para determinar la incidencia de cada uno de ellos en el resultado final del predio y evaluar su sostenibilidad. El enfoque aplicado en este caso coincide claramente con una visión agroecológica y es parte de un trabajo más amplio que incorpora variables ambientales, sociales y económicas. Estamos convencidos de que este abordaje sistémico brinda una información clave y de alto valor para que productores y técnicos identifiquen en forma conjunta los puntos críticos y las soluciones a aplicar. La estrategia y metodología es perfectamente extrapolable a otros cultivos, combinaciones y situaciones, y confiamos en que su aplicación se lleve adelante para seguir identificando los elementos a mejorar, cambiar, descartar o incorporar para aumentar la sostenibilidad de nuestros sistemas productivos, mediante el ajuste de su manejo, y, entre otras cosas,

logrando mejores producciones y de mayor calidad a la vez de recorrer el camino hacia producciones agroecológicas.

Distintos aspectos que hacen al manejo de los cultivos como ser el suelo, el agua, la protección contra plagas y enfermedades, que sin duda inciden sobre la producción y la calidad, están considerados en las secciones “Transitando hacia la protección agroecológica de los cultivos” y “La agroecología y el manejo sustentable de los recursos naturales en los sistemas agropecuarios”.

El manejo en la producción animal también ha tomado una gran relevancia. Aspectos referidos al bienestar animal y a la calidad de las pasturas y la alimentación son clave para la sostenibilidad y hacen al enfoque agroecológico. Se incluye en esta sección un aporte respecto del manejo del pastoreo y del rodeo, como una herramienta para la trayectoria agroecológica. Las herramientas planteadas permitirían acortar la brecha productiva y disminuir los insumos necesarios importados desde fuera del sistema. Se presentan, a su vez, las contribuciones de esta tecnología (sistema de manejo de pastoreo 3 R) a las dimensiones productiva, económica, ambiental y social.

Sin duda, la biodiversidad es un aspecto clave, tanto para el diseño a nivel predial, regional, como del paisaje. La consideración de esta variable agrega complejidad al sistema, a la vez que mejora su sostenibilidad. Identificar las interacciones entre distintos cultivos, sea en el marco temporal o territorial, es parte del desafío creciente que implica desarrollar los sistemas agroecológicos. No cabe duda de la necesidad que existe de incorporar también el análisis desde la integración de sistemas productivos vegetales y animales.

Son muchos los desafíos presentes y es fundamental incorporar la visión agroecológica y su aporte al rediseño de los sistemas de producción de alimentos y fibras. Esto nos permitirá incorporar nuevas opciones de mejoras en la productividad y la calidad, en un proceso en el cual es de gran ayuda la aplicación de herramientas como las que luego se presentan en la cuarta sección relativa a coinnovación/agricultura familiar/TIC/sistemas. La complejidad del sistema, necesaria para su sostenibilidad, demanda que nos esforcemos en aplicar estrategias coordinadas multidisciplinarias e integradas, llevadas adelante por equipos diversos y pluri-institucionales para el desarrollo sostenible, que hoy identifica a las trayectorias agroecológicas como el camino a recorrer para alcanzar la mejor opción.

Referencia

Phocas, F., Belloc, C., Bidanel, J. y Delaby, L.

(2016), “Review: Towards the agroecological management of ruminants, pigs and poultry through the development of sustainable breeding programmes: I-selection goals and criteria”, en *Animal*, 10(11), pp. 1749-1759. doi: 10.1017/S1751731116000926.

Capítulo 15

Cultivares locales y mejoramiento hortícola en procesos de trayectoria agroecológica

Gustavo Giménez

1. Introducción

En términos de salud y bienestar de la población, las hortalizas frescas o procesadas tienen un lugar cada vez más importante en la dieta de los uruguayos por su aporte de nutrientes y componentes bioactivos con propiedades nutracéuticas. A pesar de ello, el promedio actual de consumo de frutas y hortalizas en el país se encuentra en 230 g/día/habitante, muy por debajo de la recomendación de la Organización Mundial de la Salud, que es de 400-500 g (OMS, 2003; Ackermann, 2014 b). Esto representa un problema de accesibilidad a una nutrición correcta que tiene consecuencias en la seguridad alimentaria nacional (MSP, 2016).

La horticultura uruguaya, concentrada en Canelones, San José, Montevideo y Salto, tuvo un doble proceso de intensificación y especialización que ha desplazado familias y aumentado la presión sobre los suelos ya degradados. Entre los dos últimos Censos Agropecuarios (CGA) se perdieron 3.795 explotaciones y 19.646 hectáreas de horticultura a campo (DIEA-MGAP, 2014). En la horticultura protegida hubo una disminución menor de explotaciones (14,5%) y un incremento del área (Gazzano *et al.*, 2020).

Los sistemas productivos predominantes en la horticultura en general están basados en el uso intensivo de insumos, desde las semillas o mudas de cultivares extranjeros, los fertilizantes, los biocidas y la energía, así como también de los recursos naturales de los suelos y el agua. Durante las últimas décadas, este modelo dominante de intensificación y especia-

lización ha afectado negativamente la biodiversidad e incrementado la degradación y contaminación de los suelos y fuentes de agua (Dogliotti *et al.*, 2012, Plan Nacional Para el Fomento de la Producción con Bases Agroecológicas, 2021).

Otra consecuencia de esa intensificación es que las poblaciones y/o los cultivares hortícolas locales o criollos han ido disminuyendo o desapareciendo, debido a su sustitución por cultivares más modernos, así como a un menor número de productores familiares, quienes históricamente los han mantenido y utilizado (Gazzano *et al.*, 2020). Algunas de esas poblaciones o cultivares locales fueron colectadas y caracterizadas por la Facultad de Agronomía y por el INIA. Los materiales más destacados posteriormente fueron utilizados para generar poblaciones de mejoramiento, de las cuales derivaron algunos cultivares actualmente utilizados en la producción hortícola. Es muy notable el aporte de las poblaciones locales de cebolla y de ajo en esta generación de cultivares adaptados a nuestro país.

Las condiciones agroclimáticas de nuestro territorio permiten producir un gran número de especies hortícolas, pero nuestro ambiente es variable en términos de precipitaciones y suelos y presenta gran diversidad de patógenos y plagas, que muchas veces resultan limitantes con respecto a la adaptación productiva de cultivares extranjeros.

La decisión de elegir un cultivar es fundamental para el productor hortícola, porque en esa acción se está determinando gran parte del resultado de su cultivo. Las características agronómicas relacionadas con ciclo, precocidad, rendimiento, calidad, resistencia o tolerancia a enfermedades y plagas son de gran relevancia y están determinadas por la interacción de la constitución genética del cultivar, el ambiente y el sistema de producción en donde se utilice.

Los cultivares extranjeros, que provienen de distintos centros de mejoramiento genético, normalmente son obtenidos y desarrollados en condiciones climáticas y productivas muy diferentes a las de Uruguay. Cuando se los utiliza en sistemas de nuestro país suelen presentar varios síntomas de falta de adaptación, entre ellos menor productividad que en el país de origen, calidades que no se corresponden con los estándares de nuestro mercado y alta susceptibilidad a plagas y enfermedades que están presentes en nuestro ambiente. Los manejos productivos requeridos al utilizar cultivares no adaptados a nuestras condiciones tienen consecuencias desde el punto de vista económico, de la salud ambiental y humana. La mayor utilización de insumos normalmente importados

umenta los costos de producción y reduce los márgenes de ganancia, afectando la competitividad en el mercado. El mayor uso de fertilizantes determina niveles superiores de contaminación de suelo y fuentes de agua. Por su parte, la mayor utilización de pesticidas tiene su impacto en especies beneficiosas y contaminación ambiental más elevada, y un potencial efecto en la salud de los aplicadores, del productor y su familia y del consumidor.

La importación de semillas o plantas de cultivares extranjeros genera, por otra parte, una dependencia varietal, problemas con la discontinuación de cultivares o híbridos, el riesgo de introducción de plagas y enfermedades, un aumento de los costos debido a la importación, y tiene efectos sobre la autonomía, seguridad y soberanía alimentaria.

El desarrollo de cultivares locales adaptados, la producción de material de plantación (semilla y/o plantas) y los sistemas de certificación nacionales son algunas herramientas que el sector y el país poseen para disminuir la dependencia de cultivares extranjeros y los efectos asociados mencionados. En la trayectoria hacia una producción con principios agroecológicos, con menor uso de insumos y menores impactos en el ambiente y en la salud, tener cultivares nacionales adaptados, con buenas características agronómicas y estabilidad productiva, es un tema central.

2. Situación actual de la horticultura y del uso de cultivares

En nuestro país, la producción hortícola es realizada por 2.430 productores, distribuidos entre el sur (1.934) y el norte (496) del territorio, y ocupa alrededor de 9.774 hectáreas (7.473 ha en el sur, 2.301 ha en el norte), de las cuales el 92% se realiza a campo y el 8% en cultivo protegido. La producción anual total de hortalizas frescas es de 194.431 toneladas, de las cuales alrededor de 55 mil toneladas (casi 39 mil t del norte y aproximadamente 16 mil t del sur) se producen en cultivo bajo cubierta, lo cual es muy significativo con relación a la superficie ocupada.

A la superficie y producción mencionadas hay que agregarles 4.000 hectáreas de papa, que se realiza en dos ciclos anuales, uno en otoño y otro en primavera, con una producción de entre 90 y 100 mil toneladas (DIEA-DIGEGRA-MGAP, 2017; DIEA-MGAP, 2020). El valor bruto de producción de la horticultura para 2014 fue de 200 millones de dólares. Ocupa unos 15 mil puestos de trabajo directo, de los cuales el 27% son mujeres, uno de los mayores porcentajes de participación en el sector agropecuario (Ackermann, 2014 a).

La situación en los diferentes rubros hortícolas en los que se trabaja en mejoramiento genético en el INIA es variable según la aceptación y la adopción de los cultivares liberados a través de los años. Se han generado cultivares de boniato, cebolla, frutilla, papa y tomate, cultivos en los cuales se sigue trabajando intensamente. Otros rubros en los que se generaron cultivares son ajo y maní, para los cuales se ha discontinuado el trabajo de mejoramiento, pero se tiene semilla de reserva y se mantienen los materiales liberados. También se han realizado acciones importantes en especies como morrón y poroto. Por su parte, la Facultad de Agronomía también ha desarrollado trabajos de mejoramiento en zanahoria, cucurbitáceas, morrón, y se compartieron actividades en cebolla. Todas estas especies fueron elegidas por la importancia económica en el mercado y su valor social por la ocupación de mano de obra. Representan entre el 50 y el 60% del consumo de productos frescos, más del 50% del valor de mercado, e involucran el mayor número de productores hortícolas en nuestro país. Los niveles de adopción, en términos de superficie nacional del material genético generado por el INIA, van del 10% al 95%, dependiendo del cultivo y de la zona de producción.

- **En el cultivo de papa**, las estadísticas marcan que el rendimiento nacional es de 23 t/ha, con predominancia de cultivares extranjeros como Chieftain, Red Magic, Rudolph y otros 10-12 cultivares con menor área. El cultivar INIA Arequita ocupa entre 7 y 8% de la superficie total de alrededor de 4.000 ha entre los dos ciclos de otoño y primavera. La mayor área se encuentra en el sur (85-90%), pero hay zonas de producción en el este (7-15%) y el norte (2%) para diferentes ciclos (DIEA-MGAP, 2020). Se puede estimar que otros cultivares como INIA Guaviyú e INIA Daymán, que son mejor adaptados para productores familiares de baja superficie, ocupan el 2% del área total. Se tiene una proyección del área de INIA Arequita para 2022-2023, estimada en el 20% de la superficie como consecuencia de una mayor producción de semilla nacional a través de un acuerdo con una empresa uruguaya.
- En cebolla, el área es de 1.187 ha en el sur, cuyo rendimiento promedio es de 20,8 t/ha, y de 405 ha en el norte, con una producción de 17 t/ha (diea-mgap, 2020). Los cultivares que predominan en el sur son de día medio y día largo, con predominancia de Pantanoso del Sauce y Canarita de Facultad de Agronomía, INIA Naqué, INIA Santina e INIA Simona. En el norte se cultivan los de día corto y la mayor superficie es ocupada por INIA Casera, INIA Rocío e INIA Rocío 10. El área

plantada con semilla certificada de cultivares nacionales es de unas 785 ha y hay otras 530 ha donde se utiliza semilla producida por los productores. De acuerdo con los registros de importación de semillas, se puede deducir que se cultivan entre 280 y 300 ha con cultivares extranjeros como Valcatorce, H9, Cavalier, Andrómeda, Furia, Texas Grano 502, Pirate, Rubino, Admiral, Primavera, Virgilio y otros, que van variando anualmente, según el acceso a nuevos híbridos de cebolla. Estos números destacan la adopción de los cultivares nacionales de cebolla, tanto de Fagro como del INIA, y el uso de semillas propias o criollas de los productores, que en su conjunto ocupan el 70-80% de la superficie.

- **Para el caso de boniato**, la superficie en el sur del país es de 844 ha y en el norte, de 590 ha, con rendimientos promedios de 15,5 t/ha y 13 t/ha, respectivamente (DIEA-MGAP, 2020). En este cultivo, el 95% de la superficie del país es plantada con cultivares nacionales. El cultivar con mayor superficie cultivada, tanto en el norte como en el sur, es INIA Cuarí, que es un cultivar tipo criollo de piel morada y pulpa amarilla. INIA Cambará, que tiene también estas características, se planta solo en el norte e INIA Arapey continúa teniendo un espacio de plantación en el sur. Hay buenas expectativas respecto de los nuevos cultivares de boniato tipo criollo INIA Rubí 59 e INIA Rubí 63, por su calidad y buena conservación. A su vez, también en el norte se cultivan las áreas mayores de boniato tipo zanahoria con piel y pulpa anaranjada, como INIA Cuabé, INIA Chapicuy y Beauregard, de origen extranjero, que además se adapta muy bien en el sur y que ha permanecido como un estándar de calidad en este tipo de boniato.
- **En frutilla**, el área total en el país es de 130 ha, con 84 ha en el sur y 46 ha en el norte. Los rendimientos promedios son de casi 20 t/ha en el sur y 35 t/ha en el norte (DIEA-MGAP, 2020). La producción del cultivo en el sur es en su mayoría a campo y predominan los materiales de día neutro, principalmente los cultivares extranjeros San Andreas y algo de Camino Real (día corto), ocupando el 90% de la superficie. En el restante 10% se utilizan los cultivares INIA Mayte (día neutro) e INIA Guapa (día corto). Hay buenas proyecciones de aumento de este porcentaje para 2022 con el último cultivar de día neutro liberado INIA Valentina. En el norte, la producción se realiza, básicamente, bajo invernadero o túneles altos, y los cultivares nacionales de día corto INIA Ágata e INIA Yrupé ocupan el 95-98% de la superficie. El resto se completa con pequeñas áreas de cultivares extranjeros de día

corto como Sabrina, Marisol, Festival, Camino Real y van variando a medida que se introducen nuevos materiales al país.

- **El cultivo de ajo** está localizado en el sur, con una superficie de 155 ha y un rendimiento de casi 5 t/ha. Los cultivares que se plantan son INIA Ruso e INIA Valenciano en mayor superficie y hay alguna producción realizada con semilla propia de poblaciones o clones locales de los productores.
- **La producción de tomate** en invernadero ocupa 178 ha en el norte y 80 ha en el sur, con rendimientos promedios de 130 t/ha y 100 t/ha, respectivamente (Observatorio Granjero, 2020). La totalidad del área se planta con híbridos extranjeros, siendo los de mayor uso Elpida, Ichiban, Torry, Lapataia, Valouro, SVTH 2900, Etereí, Alamina y Barteza. En esta especie, el programa de mejoramiento es más reciente y su primer resultado, el híbrido INIA Frontera, fue liberado en 2020 y se encuentra en etapa de desarrollo a nivel comercial, teniendo buenas perspectivas para ciclos de otoño en el norte y de primavera en el sur.

En todos estos cultivos, los rendimientos promedios registrados en las Encuestas Hortícolas de DIEA-DIGEGRA se encuentran por debajo de la productividad obtenida con los cultivares INIA en las evaluaciones que se realizan, tanto a nivel experimental como en las validaciones con productores. En este sentido, la intensidad de aplicación de insumos externos, los manejos de los cultivos, la calidad del suelo y del agua y la gestión de los predios en los diferentes sistemas productivos utilizados por los productores a través del territorio, afectan el rendimiento alcanzable y el potencial de producción de los cultivares locales.

3. Programa de mejoramiento genético hortícola

La línea de investigación en mejoramiento genético fue iniciada en la década de 1970 por el Centro de Investigaciones Agrícolas Alberto Boerger (CIAAB), dependencia del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). En esa etapa se comenzaron trabajos principalmente en papa, cebolla, ajo, boniato y leguminosas de grano. Luego, al pasar del CIAAB a la creación del INIA, en la década de 1990, el Programa Nacional de Investigación en Producción Hortícola continuó con esa línea y ha aplicado recursos al mejoramiento genético, para generar y desarrollar cultivares que se adapten a nuestras condiciones agroclimáticas y a los diferentes

sistemas de producción, así como de multiplicación de semillas. Los cultivares locales, que poseen buena productividad y calidad, pueden aportar a la competitividad del sector, ya sea para el abastecimiento nacional de productos frescos o de la agroindustria o para posibilidades de exportación.

Para los cultivos priorizados de papa, tomate, cebolla, boniato, frutilla y ajo se ha determinado la necesidad de contar con cultivares nacionales, con productividad adecuada y estable a lo largo de los años y con calidad del producto superior desde el punto de vista organoléptico, nutricional y del contenido de compuestos bioactivos. La incorporación de niveles útiles de resistencia a enfermedades y plagas que permitan disminuir el uso de plaguicidas es otra característica esencial en nuestros cultivares locales.

Con la obtención de los cultivares, fue necesario generar un sistema de producción y abastecimiento de semillas de alta calidad genética y sanitaria. Para eso se trabajó en conjunto con la Unidad de Semillas del INIA en la aplicación de un esquema productivo controlado, basado en productores especializados que realizan la multiplicación y la comercialización del material de semilla básica generada por la institución. En esta línea de trabajo se ajustaron técnicas de saneamiento y multiplicación *in vitro* en las especies de multiplicación vegetativa (papa, boniato, frutilla, ajo). Actualmente, hay multiplicadores de los cultivares INIA en las cinco especies de mejoramiento. Por otra parte, se ha trabajado con el Instituto Nacional de Semillas (INASE) para sistemas de certificación en la producción de semilla, los cuales están establecidos y funcionando en papa, cebolla, boniato y ajo.

Las semillas o mudas para plantación son un insumo básico y de alto costo que influye en el resultado productivo y la calidad de los productos. El fortalecimiento y el desarrollo de producciones diferenciadas como las orgánica, agroecológica, familiar e integrada precisan del abastecimiento de los cultivares adaptados y del material de plantación correspondiente, adecuado para las mismas.

En todos estos trabajos de mejoramiento ha habido relacionamiento con muchas instituciones nacionales e internacionales a través de proyectos, acuerdos, cooperaciones. Para mencionar los más relevantes, se ha colaborado con la Agencia Japonesa de Cooperación Internacional (JICA, por sus siglas en inglés) y el Centro Internacional de la Papa (CIP) en los años 80; la Universidad de Carolina del Norte (EE. UU.), el INIA España, la FAO y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

de Mendoza (Argentina), en los años 90; el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) y la Universidade Federal de Santa María (Brasil) en los 2000; y, más recientemente, con la Empresa Brasileña de Investigación Agropecuaria (EMBRAPA). Esos vínculos permitieron enriquecer el conocimiento y realizar intercambios de materiales, semillas de cruzamientos, cultivares y germoplasma que han alimentado la diversidad genética de los programas de mejoramiento en las diferentes especies. Muchos de estos vínculos aún perduran y favorecen la actualización en información e investigación. A nivel nacional ha existido desde los años 90 un trabajo conjunto y complementario con la Facultad de Agronomía, que continúa actualmente.

3.1. Objetivos del mejoramiento

Los objetivos generales del mejoramiento genético son el incremento de la productividad, el aumento de la calidad del producto, la resistencia a las principales enfermedades y plagas incidentes y la adaptación a las condiciones ambientales y a los sistemas de producción de nuestro país.

A partir de eso, en cada cultivo se desarrollan objetivos específicos que ponen énfasis en la selección por las características que debe reunir el material, para ir avanzando en las diferentes etapas de evaluación.

Papa

La precocidad y dormancia, la resistencia a virus, tizones y sarna, la calidad del tubérculo y su aptitud culinaria son las principales características de selección en el cultivo de papa. La selección de clones se realiza en los diferentes ciclos productivos, de otoño y primavera. La selección es fenotípica, se hace en forma visual en los campos de selección, midiendo rendimiento y días a la cosecha. Con relación a la resistencia a enfermedades, se evalúa la incidencia de tizones (*Phytophthora infestans*, *Alternaria solani*), virus Y (PVY), virus del enrollamiento (PLRV) y sarna común (*Streptomyces scabies*). En cuanto a calidad de tubérculo, se tiene en cuenta la uniformidad, el color de piel y de la pulpa, las deformaciones. Luego de la cosecha, en conservación se mide la dormición, la intensidad de brotación y la incidencia de pudriciones.

La calidad culinaria se determina mediante parámetros fisicoquímicos en laboratorio y en pruebas de cocina, donde se observa la aptitud para papa frita en bastones o chips, o para papa hervida y para el hor-

no. En general, estas pruebas culinarias se hacen con los materiales más avanzados, casi prontos para liberar al mercado.

Boniato

La selección de clones en boniato se enfoca principalmente en alta calidad, larga conservación y resistencia a insectos de suelo e incidencia de algunos virus. Los materiales se plantan en INIA Las Brujas e INIA Salto Grande. Las evaluaciones se realizan en forma visual en el momento de la cosecha, cuando se ven el rendimiento y la precocidad, así como la incidencia de daños por insectos de suelo. Los parámetros de calidad que se tienen en cuenta son color de piel y de pulpa, forma, tamaño y uniformidad de los boniatos producidos. Luego se colocan en conservación y se evalúa el período (meses) durante el cual se mantienen en buenas condiciones, con una calidad adecuada, sin pérdida de peso considerable, sin brotación y sin pudriciones. En cuanto a aptitud de uso, se realizan pruebas para chips o bastones, para hervido y horno.

Frutilla

La calidad organoléptica de los frutos y la resistencia a enfermedades y plagas son los principales criterios de selección de los clones de frutilla, la que se realiza en los campos experimentales del INIA. Los clones de día corto se seleccionan en cultivo protegido en la zona norte (INIA Salto Grande), mientras que los clones de día neutro se seleccionan a campo y en cultivo protegido en la región sur (INIA Las Brujas). Con respecto a calidad, se tiene en cuenta la forma, el tamaño, el color, la firmeza de piel y de pulpa, el sabor y el aroma. En cuanto a resistencia a enfermedades, se observa la incidencia de antracnosis (*Colletotrichum* spp.), oídio (*Podosphaeria aphanis*), manchas foliares como viruela (*Ramularia tulasnei*), quemado (*Diplocarpon earliana*), tizón (*Phomopsis obscurans*), gnomonia (*Gnomonia comari*) y mancha angular (*Xanthomonas fragariae*), y los problemas de corona y raíz causados por un complejo de hongos compuesto por *Neopestalotiopsis clavispora*, *Macrophoma phaseolina*, *Cylindrocarpon* spp., *Rhizoctonia* spp., *Verticillium* spp., *Fusarium* spp., *Phytophthora cactorum* y *Pythium* spp. En relación con las plagas, se da atención a los daños producidos por arañuela (*Tetranychus urticae*), trips (*Frankliniella occidentalis*, *F. schultzei*, *Thrips tabaci*) y pulgones (*Chaetosiphon fragaefolii* y otras especies).

Cebolla

El énfasis en la selección de cebolla se pone en el ciclo, la resistencia a enfermedades y plagas, la calidad de bulbo y la conservación poscosecha. En cuanto a los ciclos, se consideran materiales de día corto, día medio y día largo, que se adaptan a las diferentes zonas productivas del país. Para la región norte (INIA Salto Grande) se priorizan principalmente líneas de día corto y algunas de día medio. En la zona sur (INIA Las Brujas) se enfocan líneas de día medio y largo. Durante el cultivo se evalúa la incidencia de *Botrytis squamosa*, *Peronospora destructor*, *Fusarium oxysporum* f.sp *cepae* y bacteriosis foliares. En cuanto a plagas, se observa la incidencia de trips (*Thrips tabaci*) en cultivo y en conservación.

En la cosecha se mide el rendimiento por número y peso de los bulbos y se evalúa su calidad con respecto a tamaño, forma, firmeza, número de catáfilas protectoras y el cerrado de cuello. En la poscosecha se determina el período de conservación de los bulbos en buenas condiciones, los porcentajes de brotación y de pudriciones.

Tomate

En este cultivo se prioriza la calidad organoléptica para fresco y la resistencia a enfermedades y plagas. Se realiza una selección fenotípica en los campos experimentales de INIA Salto Grande e INIA Las Brujas. En las cosechas se determina el rendimiento por número y peso de frutos en las diferentes categorías comerciales. Se analiza la calidad de fruto en cuanto a tamaño, forma, color, firmeza y homogeneidad. Se mide también la conservación del fruto en estante, registrando el tiempo durante el cual los frutos mantienen las características comerciales. Con relación a la resistencia a enfermedades en el campo se determina la incidencia y la severidad de problemas foliares provocadas por hongos como oídio (*Leveillula taurica*), *Fulvia fulva* (ex *Cladosporium fulvum*), *Stemphylium* spp., por bacterias como *Xanthomonas* spp. y *Pseudomonas syringae*, de enfermedades de suelo (*Fusarium*, *Verticillium*, *Clavibacter*, *Meloydogine*) y de virosis como las de mosaico del tabaco (TMV), peste negra (TSWV) y virus de la cuchara (TYLCV). En cuanto a plagas, se analiza la incidencia de mosca blanca, trips, pulgones y polilla.

Ajo

La calidad del bulbo y la incidencia de enfermedades en ajo son factores de selección importantes. La selección fenotípica se hace en las estacio-

nes experimentales del INIA Las Brujas y Salto Grande. Durante el ciclo se cuantifica la incidencia y la severidad de virosis que causan amarillamientos (GYSV, OYSV, LYSV), nemátodos (*Ditylenchus dipsaci*) y enfermedades a hongos (roya, *Sclerotium rolfsii*, *S. cepivorum*, *Fusarium oxysporum* f.sp. *cepae*) y bacterias como el quemado bacteriano causado por *Pseudomonas fluorescens*. En la cosecha se establece el rendimiento basado en el número y el peso de los bulbos y se analiza la calidad de bulbo en cuanto a diámetro y cantidad de dientes. Durante el período de conservación se determina el tiempo durante el cual los bulbos mantienen buena calidad comercial y se registra la incidencia de rebrotado.

3.2. Evaluaciones fisicoquímicas y de compuestos funcionales

Las determinaciones fisicoquímicas de laboratorio complementan las observaciones de campo para completar la información de ciertos parámetros relacionados con la calidad de los productos. Los análisis más comunes son de sólidos solubles (grados Brix), acidez, firmeza y color.

Por su parte, la determinación de compuestos bioactivos o funcionales y los análisis sensoriales se han promovido e integrado al mejoramiento genético hortícola. Esto ha permitido una mejor caracterización de clones, líneas, selecciones y cultivares de los cultivos que se trabajan. También ha significado un valor agregado en los cultivares que se liberan al mercado al contar con más información en relación con las propiedades nutricionales y nutraceuticas de los mismos.

- **En los clones avanzados y cultivares de boniato** se mide el contenido de betacaroteno en los de pulpa anaranjada. En estos y también en los de pulpa amarilla se determinan los sólidos solubles.
- **En las selecciones más avanzadas y los cultivares de frutilla** se caracteriza la calidad de fruto sobre la base de color, sólidos solubles (grados Brix), acidez y firmeza. En compuestos bioactivos se realizan determinaciones de vitamina C, antocianinas, ácido elálgico, ácido fólico y fenoles totales, así como del poder antioxidante.
- **En las líneas avanzadas y cultivares de cebolla** se cuantifican los sólidos solubles y totales y se mide el contenido de ácido pirúvico. Este valor está asociado a la característica de pungencia, que da el sabor suave o pungente de la cebolla. En componentes funcionales se determina el contenido de quercetina y en los cultivares de catáfilas rojas se cuantifica el de antocianinas. Tanto la quercetina como las antocianinas poseen un alto poder antioxidante.

- **En las líneas avanzadas y en híbridos de tomate** se miden los parámetros de color, firmeza, acidez y grados brix. En cuanto a compuestos bioactivos, se mide la vitamina C y el contenido de licopeno.
- **En los clones avanzados de papa** se determina el contenido de carotenoides totales y la capacidad antioxidante.

Análisis sensoriales

Pensando en las preferencias del consumidor es importante determinar las características de los productos para cumplir con la demanda, cada vez más exigente. En este contexto, se utilizan análisis sensoriales con consumidores, en los que se adaptan diferentes metodologías según el objetivo, como el método *Chek All That Apply* (CATA, marcar todo lo que corresponda) y el mapeo proyectivo (Lado *et al.*, 2019). Estas metodologías aportan al conocimiento de los criterios de elección de los consumidores, identificando los atributos considerados a la hora de tomar la decisión de compra en cuanto a apariencia, sabores, aromas y texturas. Estas pruebas sensoriales se han realizado principalmente en boniato en diferentes preparaciones, ya sea hervido, al horno o frito, y también en frutilla, y se están ajustando para tomate.

Marcadores moleculares

Las técnicas moleculares permiten mejorar y acelerar los procesos de selección cuando se realiza mejoramiento genético, facilitando la identificación de genotipos de interés y, muchas veces, disminuyendo el tiempo de obtención del producto final. En nuestro programa de mejoramiento hortícola se han incorporado técnicas que permiten realizar selección asistida con marcadores moleculares para resistencia a varios patógenos.

En papa se posee un marcador molecular para detectar la presencia del gen de resistencia al virus Y (PVY). Esto permite seleccionar parentales y clones con esta resistencia para ser usados en cruzamientos o para caracterizar los cultivares por este gen (Dallarizza *et al.*, 2006).

Para tomate se tienen marcadores moleculares para virus, hongos, nemátodos y bacterias. Se cuenta con la metodología para caracterizar parentales, las líneas avanzadas o los cultivares por los genes de resistencia a virus del mosaico del tabaco (TMV), la peste negra (TSWV), el virus de la cuchara (TYLCV), *Fusarium oxysporum* razas 1, 2 y 3, *Verticillium*

spp., *Meloidogyne incognita* y *Pseudomonas syringae* (Arruabarrena *et al.*, 2015).

3.3. Estrategia del programa de mejoramiento

Las actividades de cruzamientos y selección, así como las evaluaciones de parcelas y los ensayos comparativos, se realizan en las estaciones experimentales del INIA Las Brujas y Salto Grande. Las validaciones se llevan a cabo en diferentes zonas productivas del norte y del sur, en predios de productores referentes que colaboran con nuestros trabajos. Los análisis sensoriales se hacen con evaluadores entrenados en las estaciones o con consumidores en centros de venta. Luego de todas estas etapas, los cultivares que se van a liberar al mercado se registran y se protegen en el INASE y a continuación se hace la licitación para asignar licencias de multiplicación.

Todos estos procesos, desde la realización de un cruzamiento, la primera selección y las evaluaciones siguientes hasta la liberación de un cultivar adaptado a nuestras condiciones, llevan un horizonte temporal de entre seis y diez años, dependiendo del cultivo. De ahí la importancia de mantener los programas locales de mejoramiento en el tiempo, pues son procesos de mediano y largo alcance. Cuando hay continuidad en los recursos aplicados y los trabajos, se pueden mantener las poblaciones de mejoramiento y los tiempos de liberación entre cultivares se acortan. Es lo que ha sucedido en nuestro caso que se van teniendo nuevos cultivares en períodos promedio de 3-4 años según la especie.

Cuando se considera que el cultivar puede ser liberado como un nuevo producto tecnológico, la Unidad de Semillas del INIA realiza el registro y la protección en el Instituto Nacional de Semillas del MGAP. En colaboración con los programas de mejoramiento, también realiza la producción de semilla básica y la manutención del cultivar. Para comercializar los cultivares INIA, en general, se realizan licitaciones abiertas a multiplicadores y se generan acuerdos con productores, sociedades, cooperativas o empresas, otorgándose licencias no exclusivas para asegurar su propagación y venta a los interesados.

El INIA ha generado más de 45 cultivares locales en las diversas especies: los materiales liberados en el período 2018 a 2021 corresponden a frutilla (INIA Yrupé, INIA Valentina), tomate (INIA Frontera, INIA Cimarón), boniato (INIA Rubí 59, INIA Rubí 63) y cebolla (INIA Rocío 10). Es posible acceder a información detallada sobre las características produc-

tivas, los atributos de calidad y resistencia a enfermedades y plagas en el Catálogo de Cultivares Hortícolas del INIA (González y Giménez, 2017), en la *Revista INIA* y hojas de divulgación.¹

A continuación, presentamos algunas imágenes de cultivares de papa (Figura 1), boniato (Figura 2), frutilla (Figura 3), cebolla (Figura 4), tomate (Figura 5).

FIGURA 1. CULTIVARES DE PAPA INIA DAYMÁN (A), INIA GUAVIYÚ (B), INIA AREQUITA (C).



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2. CULTIVARES DE BONIATO INIA CUARÍ (A), INIA CUABÉ (B), INIA CAMBARÁ (C).



Fuente: Elaboración propia.

¹ www.inia.uy.

FIGURA 3. CULTIVARES DE FRUTILLA INIA ÁGATA (A), INIA MAYTE (B), INIA VALENTINA (C).



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4. CULTIVARES DE CEBOLLA INIA NAQUÉ (A), INIA SANTINA (B).



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 5. CULTIVARES DE TOMATE INIA FRONTERA (A), INIA CIMARRÓN (B).



Fuente: Elaboración propia.

4. Aportes de los cultivares locales a la trayectoria hacia sistemas productivos agroecológicos

El mejoramiento genético de cultivares hortícolas puede contribuir a la trayectoria hacia sistemas agroecológicos en nuestro país a través de varios de sus principios y lineamientos.

4.1. Aporte a la oferta de alimentos

Uno de los lineamientos planteados en la Ley de Agroecología es “Impulsar la oferta accesible de alimentos inocuos y de calidad” (Plan Nacional Para el Fomento de la Producción con Bases Agroecológicas, 2021). En nuestro país, la producción anual de hortalizas destinada al consumo interno es de alrededor de 294 mil toneladas (DIEA-MGAP, 2020). Considerando una población de 3,5 millones, significa una disponibilidad de 84 kg por habitante, es decir, un promedio de 230 g/persona/día. Este valor está muy por debajo de los 450 g recomendados como mínimos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para una alimentación considerada como saludable.

Es decir, existe la necesidad de aumentar la producción para cubrir el acceso al mínimo de la ingesta diaria de hortalizas para favorecer una salud adecuada en la población uruguaya.

En este sentido, los estudios nacionales sobre brechas de rendimiento muestran que hay posibilidad de aumentar productividad en varios cultivos, sin el uso de recursos adicionales (Tabla 1). De acuerdo con Dogliotti *et al.* (2021), si estimamos las brechas actuales de rendimiento como $(1 - R. \text{promedio}/R. \text{alcanzable}) * 100$, obtenemos que la magnitud de esta es de 66%, 60% y 54% para cebolla, boniato y tomate bajo invernáculo, respectivamente, en la zona sur. Mientras que en la zona norte las brechas de rendimiento serían de 27%, 56% y 29% para los mismos cultivos y en el mismo orden. Estos valores se calcularon tomando como criterio el 80% del rendimiento experimental en ensayos de evaluación de cultivares en ambas zonas.

En papa, los promedios de los ensayos de evaluación nacional de cultivares (ENC) que realiza el INASE se encuentran en 30-35 toneladas/ha, según los ciclos y los años (INASE, 2011-2020).² Esto significa una

² www.inase.uy.

brecha de rendimiento con respecto al promedio nacional del orden del 24 al 34%.

Por su parte, en frutilla, el promedio nacional está entre 20 y 30 t/ha según las zonas. Los datos de los resultados experimentales y de las validaciones de los cultivares permiten señalar brechas de rendimiento respecto del promedio de 45-50% (Scarlatto *et al.*, 2017; Giménez y Vicente, 2017; Vicente *et al.*, 2019; Giménez *et al.*, 2020).

Para el cultivo de ajo, cuyo promedio nacional está en las 5 t/ha, las evaluaciones han registrado rendimientos que también marcan una brecha respecto del alcanzable del 40-50%.

TABLA 1. VALORES DE BRECHAS DE RENDIMIENTO DE DIFERENTES CULTIVOS EN URUGUAY

Cebolla (norte)	Boniato (norte)	Tomate (norte)	Boniato (sur)	Cebolla (sur)	Tomate (sur)	Papa	Frutilla (sur)	Ajo
27%	56%	29%	66%	60%	54%	24-34%	45-50%	40-50%

Los cultivares locales adaptados liberados por el INIA poseen una alta y estable productividad a lo largo de los años y en varios ambientes, lo que permitiría disminuir las brechas, contribuyendo al incremento de los promedios de rendimiento nacionales y al abastecimiento del mercado.

Algunos de los cultivares que marcaron un cambio de productividad fueron el boniato INIA Arapey y los cultivares de frutilla INIA Arazá e INIA Yvahé. Los promedios de rendimiento de boniato hasta el año 2000 eran de 7-8 toneladas/ha y luego de la liberación de INIA Arapey pasaron a 15-17 t/ha (Rodríguez *et al.*, 2017). Actualmente, los cultivares de boniato INIA Cuarí, INIA Cuabé, INIA Cambará y los recientemente liberados INIA Rubí 59 e INIA Rubí 63 logran productividades de 30-40 toneladas/ha (Rodríguez *et al.*, 2017; Vicente *et al.*, 2020).

En el caso de la frutilla, con la aparición de los cultivares INIA en 2002 y en 2004, los rendimientos pasaron de 20 a 40 t/ha. Con los cultivares más recientes como INIA Guapa, INIA Ágata, INIA Yrupé, INIA Mayte e INIA Valentina, hay productores que alcanzan rendimientos de entre 40 y 50 t/ha (Giménez y Vicente, 2017; Vicente *et al.*, 2019; Giménez *et al.*, 2020).

En el cultivo de papa, los cultivares INIA Iporá, INIA Guaviyú e INIA Arequita han tenido rendimientos entre 30 y 40 t/ha en las ENC del

INASE y también a nivel de los productores (Vilaró y González, 2017, INASE, 2011-2020).

Para cebolla, con los cultivares INIA Casera, INIA Rocío, INIA Rocío 10, INIA Naqué, INIA Simona e INIA Santina se logran producciones entre 25 y 40 t/ha (Vicente *et al.*, 2017).

En tomate, el híbrido INIA Frontera de reciente liberación ha alcanzado producciones de 200 t/ha en las evaluaciones experimentales y validaciones en los invernaderos comerciales (González *et al.*, 2020).

En ajo, con los cultivares INIA Ruso e INIA Valenciano se han obtenido rendimientos de entre 8 y 10 t/ha en los experimentos y en las pruebas en predios con productores (Vicente *et al.*, 2017).

4.2. Acceso a alimentos y abastecimiento del mercado

Otro aspecto importante para considerar en el acceso a alimentos y el abastecimiento del mercado es la distribución de los productos durante el año. Se ha tratado de combinar sistemas de producción, ciclos, precocidad y conservación en las diferentes zonas para las distintas especies, de forma de tener oferta con buen volumen y calidad de los productos hortícolas la mayor parte del año. Los diferentes cultivares locales adaptados que presentan diversidad en ciclos y fecha de cosecha permiten lograr este objetivo.

En boniato se ha trabajado para seleccionar cultivares que se adapten a ciclos cortos y largos en el norte y en el sur, que promuevan diferentes fechas de plantación entre noviembre y febrero y que posean buena conservación. Esta combinación permite obtener boniatos de buena calidad para el consumidor y a lo largo del año. Con INIA Cuarí, INIA Arapey, INIA Cambará, INIA Rubí 59 e INIA Rubí 63 se ha logrado complementar las producciones y la conservación de boniatos criollos. En forma similar, con INIA Cuabé, INIA Chapicuy y Beauregard se tiene acceso a boniatos tipo zanahoria.

En cebolla, los cultivares de día corto, medio y largo han permitido también complementar fechas de cosecha y períodos de conservación entre las diferentes zonas de producción para abastecer el mercado durante todo el año. Así, con INIA Casera, INIA Rocío e INIA Rocío 10 de día corto, Pantanoso CRS de Fagro, INIA Naqué e INIA Simona de día medio y con INIA Santina de día largo, se tiene opciones de ciclos para el norte y el sur y con diferente conservación poscosecha, como para disponer de cebollas de calidad a lo largo del año.

Los cultivares de frutilla de INIA se han seleccionado para los sistemas productivos del norte y del sur. Con INIA Guapa, INIA Ágata e INIA Yrupé de día corto y con INIA Mayte e INIA Valentina de día neutro, combinando producción en cultivo protegido y a campo, se ha alcanzado la disponibilidad de este fruto en las cuatro estaciones del año.

En el caso de la papa, los cultivares Arequita, Daymán y Guaviyú se pueden producir en los ciclos de otoño y primavera en las diferentes zonas, tienen una dormancia que se adapta a estos ciclos y poseen conservación aceptable como para llegar a abastecer el mercado durante el año.

4.3. Calidad de los alimentos

Los cultivares locales han sido seleccionados por atributos superiores en función de la adecuación a los requerimientos de mercado considerando las propiedades organolépticas y los estándares comerciales. También se han tenido en cuenta las preferencias de los consumidores mediante análisis y pruebas sensoriales con diferentes métodos. Y en aspectos de salud, se han caracterizado por contenido de componentes bioactivos o nutraceuticos.

Respecto de los estándares comerciales, los reportes del Observatorio Granjero de la ex Comisión Administradora del Mercado Modelo (Camm), ahora Unidad Agroalimentaria Metropolitana (UAM), destacan el abastecimiento y la calidad de productos hortícolas obtenidos con el uso de cultivares INIA. De hecho, algunos de estos son los que han conducido a esos estándares de calidad comercial, por ejemplo, por tamaño, uniformidad, color de piel, como en boniato tipo criollo con INIA Cuarí e INIA Cambará y boniato tipo zanahoria como INIA Cuabé. También en frutilla, como ha sido el caso con INIA Yuri, INIA Guapa, INIA Mayte e INIA Valentina, estas tres últimas bien conocidas y particularmente buscadas por los consumidores de productos orgánicos. En estos frutos se destacan características visuales por tamaño, uniformidad, color, brillo, y aspectos sensoriales como aromas y sabores.

En las evaluaciones que se realizan del contenido de compuestos nutraceuticos que tienen efecto sobre la salud se ha determinado una buena variabilidad, lo que posibilita seleccionar genotipos superiores para estas características. Se ha encontrado que la prevención del desarrollo de enfermedades crónicas relacionadas con el síndrome metabólico depende de una dieta saludable, que incluya frutas y hortalizas por sus aportes en nutrientes, antioxidantes, vitaminas y polifenoles. Para contribuir al co-

nocimiento y promover el consumo, desde el INIA se comenzó a trabajar en ver los efectos de la selección, el mejoramiento genético y el manejo sobre las cualidades de los productos, las preferencias del consumidor (Lado *et al.*, 2019) y el potencial nutricional de los principales materiales hortifrutícolas generados. En varias especies hortícolas se caracterizó el contenido de micronutrientes y actividad antioxidante en cultivares y selecciones de cebolla, papa, frutilla, boniato y tomate. Se encontraron altos niveles de quercetina en los cultivares de cebolla y en selecciones avanzadas. En tomates, papas, boniatos y frutillas se destaca que compuestos fenólicos, vitamina C, antocianinas, carotenoides totales y capacidad antioxidante tienen una gran variabilidad, por lo que pueden incluirse en el desarrollo de cultivares diferenciados por atributos nutracéuticos (Ferrari *et al.*, 2021).

4.4. Inocuidad e impacto ambiental

Con respecto a la producción de alimentos limpios e inocuos, es muy destacable considerar los niveles de resistencia a plagas y enfermedades que poseen los cultivares INIA. Esta característica es realmente importante y se tiene en cuenta durante la selección de los diferentes materiales. En los campos de selección no se realizan aplicaciones de insecticidas ni fungicidas, de esa forma se puede observar la infección natural y seleccionar las plantas libres de enfermedades y plagas. En las sucesivas evaluaciones se siguen seleccionando los clones y líneas que continúan manteniendo la resistencia o la tolerancia a las plagas y enfermedades. El hecho de incorporar resistencia genética y/o tolerancia a las principales plagas y patógenos que tienen incidencia en nuestras condiciones está relacionado con la disminución o eliminación del uso de principios activos de plaguicidas en los cultivos. Esto se vincula con la inocuidad de los productos obtenidos y, por lo tanto, con un menor impacto en la salud de los aplicadores, el productor y su familia y de los consumidores. También tiene efecto directo sobre la disminución del impacto ambiental por una menor contaminación del aire, de los suelos y las fuentes de agua. Todo esto está alineado en general con las mayores exigencias del consumidor por alimentos libres de productos químicos y con la mayor conciencia que tiene la sociedad con respecto al problema de contaminación del ambiente, principios básicos que deben contemplarse en la producción agroecológica.

4.5. Eficiencia productiva

La resistencia o la tolerancia a plagas y enfermedades que poseen los cultivares INIA además se relacionan con la eficiencia productiva, un concepto que tiene en cuenta los rendimientos obtenidos por unidad de insumo aplicado o de mano de obra. Los problemas causados por insectos, virus, bacterias y hongos son un factor limitante de los rendimientos, por las pérdidas que ocasionan. Para disminuir estos daños se realizan aplicaciones de plaguicidas de diferente tipo que tienen altos costos en el cultivo. Poder contar con cultivares que no se afectan, o que se enferman con menor intensidad, permite reducir drásticamente esas intervenciones con fungicidas, insecticidas o antibióticos. De esta forma, se aumenta la productividad de la mano de obra y se disminuyen los costos del control químico, manteniendo o aumentando la producción. A su vez, al no usar estos productos, o en menor cantidad, se facilita la implementación de manejos alternativos como los agentes de control biológico y la restauración o el establecimiento de nuevos equilibrios biológicos en los cultivos, promoviendo la biodiversidad.

Como ejemplos de las resistencias genéticas y tolerancias a enfermedades que se tienen en los cultivares INIA se pueden mencionar: resistencia a *Botrytis squamosa* y tolerancia a *Peronospora destructor* en las cebollas INIA Naqué, INIA Rocío e INIA Rocío 10, y a virus PVY, tizones (*Alternaria solani* y *Phytophthora infestans*) y sarna (*Streptomyces* spp.) en las papas INIA Iporá, INIA Guaviyú, INIA Daymán e INIA Arequita. Por su parte, en frutilla se tienen buenos niveles de resistencia a oídio, al complejo de hongos causante de enfermedades de corona y raíz y a enfermedades foliares en INIA Ágata, INIA Yrupé, INIA Mayte e INIA Valentina. Estas últimas, además, poseen alta resistencia a antracnosis de fruto. En tomate, el híbrido INIA Frontera posee los genes de resistencia a *Fusarium oxysporum* razas 1 y 2, *Verticillium* spp., virus mosaico del tabaco TMV, virus de peste negra (TSWV), virus de la cuchara (TYLCV), nemátodo de las agallas (*Meloidogine incógnita*). El híbrido INIA Cimarrón agrega a todas estas la resistencia a la raza 3 de *Fusarium*.

4.6. Uso y conservación de los recursos genéticos

Con relación a uso y conservación de los recursos genéticos locales y a asegurar su disponibilidad, en nuestro proyecto de mejoramiento se ha colectado, utilizado y se conservan recursos genéticos nacionales en las especies donde había poblaciones locales mantenidas por productores.

Esto fue posible en cebolla, ajo, Morrón, maní y poroto. La Facultad de Agronomía, además, ha realizado colectas de poblaciones locales de zanahoria, zapallo criollo, tomate, Morrón y poroto.

Los cultivares generados constituyen un recurso genético con adaptación local. Para su conservación y mantenimiento, hay bancos de germoplasma en cámaras de frío, bancos activos con los que se trabajan las poblaciones de mejoramiento y bancos *in vitro*.

Para la propagación de los cultivares se han desarrollado y ajustado diferentes técnicas de producción de material básico, que aseguran la identidad y la calidad genética y sanitaria de los diferentes cultivares. El saneamiento y la propagación *in vitro* de especies de reproducción vegetativa son fundamentales para garantizar la clonación y la sanidad de los cultivares, siendo la base de la producción de plantas que luego se multiplican a campo o en invernaderos para ser utilizadas comercialmente. Esto ocurre con papa, boniato, frutilla y ajo.

Para esa multiplicación del material básico también se han ajustado manejos que permiten mantener la calidad del material de plantación. Estas técnicas han sido difundidas para los productores en general y los licenciarios de los cultivares INIA en particular, que son quienes aseguran la disponibilidad de materiales para la producción nacional. Y a manera de respaldo a todo este proceso de reproducción de material de plantación se han ajustado los protocolos de la certificación llevada a cabo por el INASE. Actualmente, se tiene certificación de semilla de cebolla, papa, boniato y ajo, mediante la inspección de los cultivos semilleros durante el ciclo de producción y de la semilla obtenida para garantizar la identidad y la sanidad del material de plantación.

5. Reflexión final

El modelo de producción intensivista, extractivo de recursos naturales y con alta aplicación de insumos externos parece haber llegado a un punto de inflexión. El agotamiento de la fertilidad de los suelos, las altas tasas de erosión, los problemas ambientales y los bajos rendimientos que obtienen muchos productores hortícolas han puesto en riesgo la sostenibilidad de los predios. Según Dogliotti *et al.* (2012), los bajos rendimientos son la causa principal de los bajos ingresos familiares, de la baja productividad de la mano de obra, de la baja eficiencia en el uso de los recursos productivos y de los altos costos de producción por unidad de producto.

Es necesario un cambio de modelo productivo y la trayectoria hacia la agroecología parece un camino adecuado para ir revirtiendo alguno de los efectos negativos de la intensificación no sostenible. Es claro que esta trayectoria debe ser realizada con un abordaje integral que considere los lineamientos y principios de la agroecología. En los cultivos considerados se han generado cultivares con altos rendimientos, estabilidad de producción y con grados variables de resistencia o tolerancia a las principales enfermedades y plagas, lo cual contribuye a la competitividad en la fase de producción y a la sostenibilidad de los sistemas. El ajuste de técnicas de multiplicación y la cooperación con productores y asociaciones locales han permitido al sector productivo generar oportunidades y acceder a un material genético de plantación adaptado, con alta calidad y sanidad, y con mayor valor comercial. Su adopción es significativa en áreas productivas del territorio nacional, lo que ha mejorado el acceso y la disponibilidad de productos de calidad para el consumidor y favorecido el abastecimiento del mercado a lo largo del año.

Como se mencionó previamente en este capítulo, los cultivares locales adaptados pueden aportar en varios de los lineamientos y principios para la transición agroecológica. Aunque en mejoramiento siempre falta generar cultivares más completos, en particular ampliando el rango de resistencia o tolerancia a plagas y enfermedades y a estreses fisiológicos, así como en características de uso más eficiente del agua y nutrientes, la genética de los cultivares hortícolas del INIA puede considerarse como un patrimonio que facilita, al menos en parte, esta trayectoria en los aspectos ecológico-productivos, del mismo modo que los cultivares generados por la Facultad de Agronomía, y las poblaciones locales y variedades criollas mantenidas por productores. El desarrollo mediante mejoramiento participativo y la conservación *in situ* de estos materiales, así como la vinculación a sistemas de producción de semilla o mudas con calidad genética y sanitaria certificadas, es esencial en la trayectoria hacia sistemas agroecológicos. Esto, en conjunto con las tecnologías de manejo de suelo y agua, de los cultivos y del ambiente, aplicadas siguiendo los fundamentos de la producción agroecológica.

Considerando en su integralidad este enfoque se podrá contribuir a la producción de alimentos hortícolas en cantidad y calidad suficientes para asegurar una alimentación saludable, mientras que se mejorarán los ingresos económicos de los productores y su resiliencia, y se disminuye el impacto ambiental, todo lo cual, a su vez, significa un aporte a la so-

beranía y seguridad alimentaria y nutricional de la población uruguaya. Estos aspectos son fundamentales en los principios de la agroecología.

Para finalizar, es importante mencionar que el mejoramiento genético para la generación de los cultivares y de la información de las evaluaciones que se realizan en INIA Las Brujas, Salto Grande y Tacuarembó es producto del trabajo a mediano y largo plazo de un grupo interdisciplinario de mejoramiento genético, protección vegetal, poscosecha, fitoquímica y biotecnología. Va nuestro reconocimiento al trabajo realizado durante muchos años por investigadores y colaboradores que nos precedieron como César Maeso, Francisco Vilaró, Carlos Crisci, Diego Maeso, Gustavo Pereira, Carlos Picos, Walter Spina, Wilma Walaseck, Mario Cabot. Actualmente, el equipo está conformado por los investigadores Matías González, Esteban Vicente, Gustavo Rodríguez, Joanna Lado, Facundo Ibañez, Marco Dalla Rizza, Alicia Castillo, Ana Arruabarrena, Leticia Rubio y Gustavo Giménez, y los asistentes Alberto Lenzi, Ariel Manzoni, Mario Giambiassi, Brian Ghelfi, Johan Ghelfi, Ignacio Laxague, Néstor Pereira y Adriana Reggio, cada uno aportando con dedicación, compromiso y entusiasmo desde su especialización y experiencia en diferentes áreas del conocimiento y de trabajo.

Bibliografía

Ackermann, M. N.

(2014a), "Sector hortifrutícola. Análisis de estructura y coyuntura con énfasis en el mercado laboral", 13^o Congreso Nacional de Hortifruticultura, OPYP-MGAP.

Ackermann, M. N.

(2014b), "Horticultura: situación y perspectivas", en MGAP-OPYP, *Anuario Opya 2014* MGAP, Montevideo, pp. 193-208.

Altieri, M.

(1999), *Agroecología. Bases científicas para una agricultura sustentable*.

Arruabarrena, A., González-Arcos, M., Rubio, L. y Giménez, G.

(2015), "Selección asistida por marcadores en el mejoramiento genético de tomate: biotecnología para el sector productivo", en *Revista INIA*, v. 40, pp. 46-49.

DIEA-DIGEGRA, MGAP

(2017), *Encuestas hortícolas 2015-2016. Zonas sur y litoral norte*, Serie Encuestas N^o 344, marzo de 2017.

DIEA-MGAP

(2014), *Censo General Agropecuario 2011. Resultados definitivos*.

DIEA-MGAP

(2020), *Anuario Estadístico Agropecuario*.

Dallarizza, M., Vilaró, F., Torres, D. y Maeso, D.

(2006), "Detection of PVY extreme resistance genes in potato germplasm from the Uruguayan breeding program", en *American Journal of Potato Research*, 83(4), pp. 297-304.

Dogliotti, S., C. Abedala, V. Aguerre, A. Albín, F. Alliaume, J. Álvarez, G. F. Bacigalupe, M. Barreto, M. Chiappe, J. Corral, J. P. Dieste, M. C. García de Souza, S. Guerra, C. Leoni, I. Malán, V. Mancassola, A. Pedemonte, S. Peluffo, C. Pombo, G. Salvo y M. Scarlato.

(2012), *Desarrollo sostenible de sistemas de producción hortícolas y horticola-ganaderos familiares: una experiencia de co-innovación*. Proyecto FPTA 209. Diseño, implementación y evaluación de sistemas de producción intensivos sostenibles en la zona sur del Uruguay, Serie FPTA 33, INIA.

Dogliotti, S., Scarlato, M., Berrueta, C., Barros, C., Reherrmann, F., Rieppi, M., Inetti, C., Soust, G. y Borges, A.

(2021) *Análisis y jerarquización de factores determinantes de las brechas de rendimiento y calidad en los principales cultivos hortícolas del Uruguay*. Proyecto FPTA 288, Serie FPTA 91, INIA.

Ferrari, V., Rodríguez, G., González, M., Vicente, E., Giménez, G., Cabrera, D. e Ibañez, F.

(2021), "Nutritional quality and nutraceutical potential of fruits and vegetables from the INIA genetic breeding programs", en *Agrociencia*, Número especial.

Gazzano, I., Apezteguía, E., Gómez, A., Galeano, P., González, L. y Sierra, F. (2020), *Plan Nacional para el fomento de la producción con bases agroecológicas*, Ley 19.717, Documento preliminar.

Giménez, G. y Vicente, E.

(2017), "Frutillas INIA (*Fragaria x ananassa*)", en *Catálogo de Cultivares Hortícolas*, 2ª ed., Boletín de Divulgación 113, pp. 29-39.

Giménez, G., Lenzi, A., Ibañez, F., Castillo, A., González, M. y Trujillo, M.

(2020), "INIA LBR 96.1: Sabor, aroma y sanidad en un nuevo cultivar de frutilla de día neutro", en *Revista INIA*, 62, septiembre, pp. 77-81.

González-Arcos, M., Manzioni, A., Arruabarrena, A., Lado, J., Laxague, J. I., Vicente, E., Giambiasi, M., Moltini, A. I., Lenzi, A. y Giménez, G.

(2019), CULTIVAR HÍBRIDO DE TOMATE 'INIA FRONTERA' (HT72). Hoja de Divulgación N° 110. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/13764/1/HD-110-Tomate-octubre-2019.pdf>>.

González, M. y Giménez, G.

(2017), "Tomates INIA (*Solanum lycopersicum*)", en *Catálogo de Cultivares Hortícolas*, 2ª ed., Boletín de Divulgación 113, pp. 46-49.

González, M. y Giménez, G. (eds.)

(2017), *Catálogo de Cultivares Hortícolas*, 2ª ed., Boletín de Divulgación 113.

Instituto Nacional de Semillas (INASE)

(2011-2020), *Resultados históricos de evaluación nacional de cultivares de papa*.

Lado, J., Moltini, A., Vicente, E., Rodríguez G., Arcia, P., Rodríguez, M., López, M., Billiris A. y Ares, G.

(2019), “Integration of Sensory Analysis into Plant Breeding: A Review”, en *Agrociencia Uruguay*, 23(1), pp. 1-15. ISSN electrónico 2301-1548.

Ministerio de Salud Pública (MSP)

(2016), *Guía alimentar para la población uruguaya. Para una alimentación saludable, compartida y placentera*. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-salud-publica/sites/ministeriosaludpublica/files/documentos/campanas/guia_%20alimentaci%C3%B3n_saludable.pdf>.

Observatorio Granjero. MGAP-UAM

(2020), *Mercado Modelo. Comercialización de productos hortifrutícolas*, UCU, abril.

Organización Mundial de la Salud (OMS)

(2003), “La FAO y la OMS anuncian un enfoque unificado para la promoción del consumo”. Ginebra. Disponible en: <<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2003/pr84/es/>>.

Paruelo, J. M.

(2021), “Las múltiples miradas de la Agroecología”, en *Aportes científicos y tecnológicos a las trayectorias agroecológicas*, Jornada Destacada, INIA Las Brujas, 24 y 25 de noviembre de 2021.

Plan Nacional Para el Fomento de la Producción con Bases Agroecológicas

(2021). *Documento Final*.

Rodríguez, G., Vicente, E. y Vilaró, F.

(2017), “Boniatos INIA (*Ipomoea batatas*)”, en *Catálogo de Cultivares Hortícolas*, 2ª ed., Boletín de Divulgación 113, pp. 8-19.

Scarlatto, M., Giménez, G., Lenzi, A., Borges, A., Bentancur, O. y Dogliotti, S.

(2017), “Análisis y jerarquización de factores determinantes de las brechas de rendimiento del cultivo de frutilla en el sur del Uruguay”, en *Agrociencia* (Uruguay), v. 21, 1, pp. 43-57.

Vicente, E., Lado, J., Manzzioni, A., Arruabarrena, A., Giambiasi, M., Varela, P., Giménez, G., Silvera, E., Machín, A. y González, M.

(2019), *El cultivar de frutilla ‘INIA Yrupé’* (SGS73.1). Hoja de Divulgación 109. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/13697/1/HD-109-Frutilla-octubre-2019.pdf>>.

Vicente, E., Rodríguez, G., Ghelfi, B., Lado, J., Giambiasi, M., Arruabarrena, A. y González, M.

(2020), *CULTIVAR DE BONIATO ‘INIA RUBÍ 63’* (W1363.4). Hoja de Divulgación N° 111. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14449/1/Hoja-de-Divulgacion-N111-Boniato-29-5.pdf>>.

Vicente, E., Rodríguez, G., Ghelfi, B., Ibáñez, F., Ghelfi, J. y González, M. (2021), EL CULTIVAR DE CEBOLLA 'INIA ROCÍO 10' (SG10). Hoja de Divulgación N° 112. Disponible en: <<http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/Hoja-Divulgacion-112.pdf>>.

Vicente, E., Rodríguez, G. y Vilaró, F. (2017), “Cebollas INIA (*Allium cepa*)”, en *Catálogo de Cultivares Hortícolas*, 2ª ed., Boletín de Divulgación N° 113, pp. 20-28.

Vicente, E., Vilaró, F. y González, M. (2017), “Ajo (*Allium sativum*)”, en *Catálogo de Cultivares Hortícolas*, 2ª ed., Boletín de Divulgación N° 113, pp. 51-53.

Vilaró, F. y González, M. (2017), “Papas INIA (*Solanum tuberosum*)”, en *Catálogo de Cultivares Hortícolas*, 2ª ed., Boletín de Divulgación N° 113, pp. 40-45.

Capítulo 16

Oportunidades para la transición agroecológica en tomate bajo invernáculo en el sur de Uruguay: una metodología para evaluar el avance hacia sistemas más sostenibles

Paloma Bertoni, Mariana Scarlato, Cecilia Berrueta
y Santiago Dogliotti

1. Introducción

A partir de la Revolución Verde, una parte importante de la agricultura a nivel mundial adoptó un modelo de producción altamente dependiente del combustible fósil y de insumos de origen químico industrial. Este modelo fue exitoso en incrementar la producción, pero ello ocurrió a costa de impactos negativos en el ambiente y también económicos y sociales (UNCTAD, 2017). Estos impactos y la alta dependencia de recursos no renovables hacen que este modelo sea insostenible (Tittonell *et al.*, 2016).

Desde finales del siglo pasado, la sostenibilidad y la búsqueda de una producción más sostenible se han convertido en temas clave. Se definió entonces, que el proceso hacia la sostenibilidad debía ser capaz de generar un desarrollo que fuera equilibrado en términos ecológicos, económicos y sociales. Según Reiche y Carls (1996, 30), esto implicaba que para alcanzar la sostenibilidad se debía cumplir, en líneas generales, con que “todas las acciones y los resultados sean social y culturalmente aceptables, económicamente viables, ambientalmente compatibles y con un alto grado de participación y equidad por parte de la sociedad en general”. En este sentido, la sostenibilidad y la producción sostenible, hoy, constituyen ejes centrales de la agenda política de muchos países y organizaciones. Además de la

investigación dirigida a generar alternativas, uno de los mayores retos es diseñar marcos metodológicos y operativos para evaluar la sostenibilidad a nivel de los agroecosistemas, proyectos o tecnologías.

2. Línea de base de la producción de tomate bajo cubierta en Uruguay

La horticultura en Uruguay ocupa 9.774 de los 16 millones de hectáreas utilizadas para la actividad agropecuaria. A pesar de la baja superficie, involucra a 2.900 predios, la mayor parte familiares, concentrados principalmente en la zona sur. Si bien el número de productores y la superficie hortícola han disminuido desde finales del siglo pasado, la superficie de cultivos protegidos ha crecido en los últimos años. Desde 2003 a 2015, el número de productores de tomate en invernadero se incrementó en 67% y la superficie, en 70% (DIEA-DIGEGRA, 2007, 2017).

La sostenibilidad de la mayor parte de estos predios está amenazada por los bajos ingresos familiares y por el deterioro de los recursos naturales. La principal causa de los bajos ingresos es que la mayoría de estos productores obtiene el 50% o menos del rendimiento alcanzable de los cultivos en la región con similares recursos productivos y buen manejo (Dogliotti *et al.*, 2014). En particular, en los sistemas que tienen al cultivo de tomate de mesa en invernáculo como actividad principal, son varios los factores que inciden en el resultado económico, pero el rendimiento es uno de los más importantes (Berrueta *et al.*, 2020). En el cultivo de tomate de mesa, no se observan mejoras en los rendimientos en la última década, con un promedio de 98 Mg ha⁻¹ en los cultivos protegidos para la temporada 2014-2015 (DIEA-DIGEGRA, 2017).

Por otro lado, la sostenibilidad de los sistemas hortícolas se ve amenazada por el deterioro de los recursos naturales, especialmente el suelo. Este deterioro del suelo, acentuado por el manejo actual, responde a una larga e histórica trayectoria de uso agrícola, caracterizada por alta intensidad de uso, baja incorporación de carbono al suelo, y elevadas tasas de erosión (Dogliotti *et al.*, 2014). También en este sentido, si bien existe una percepción general de que la producción hortícola se realiza sobre la base de un alto uso de insumos, en particular pesticidas y fertilizantes, y que esto genera una degradación de los recursos naturales, existe poca información cuantitativa al respecto y que haya sido construida sostenida en una muestra amplia y representativa de la realidad (Maeso *et al.*, 2007; Blum *et al.*, 2006). Para evaluar la sostenibilidad de los agroecosistemas y

medir el impacto de la aplicación de prácticas y tecnologías recomendadas sobre los mismos, es necesario generar criterios y metodologías que permitan obtener información cuantitativa, tanto a nivel de los predios como de una región determinada. Esto requiere la transformación del concepto abstracto de sostenibilidad a términos operativos que permitan la evaluación y la planificación, por lo menos a mediano plazo, de las actividades productivas (Sarandón, 2002; Tilman *et al.*, 2002).

En este trabajo se desarrolló y aplicó una metodología para evaluar el desempeño desde el punto de vista ambiental de los sistemas de producción hortícolas. La evaluación consideró las prácticas y tecnologías utilizadas respecto del uso de pesticidas, manejo y conservación del suelo, y productividad. La metodología se utilizó para analizar la sostenibilidad del manejo del cultivo de tomate en invernáculo en una muestra representativa de 23 predios del sur del Uruguay, que involucró 109 cultivos comerciales.

3. Detalle de la tecnología propuesta y metodología para su evaluación

En este trabajo se propone una metodología que permite evaluar y caracterizar los predios hortícolas en cuanto a su sostenibilidad desde el punto de vista ambiental. Esta metodología se basa en la evaluación de la utilización de prácticas de manejo y tecnologías ampliamente reportadas como positivas para la disminución del impacto ambiental de la producción, y la conservación de los recursos naturales en los predios analizados.

Se trabajó con una base de datos generada en un proyecto anterior (Berrueta *et al.*, 2019), de 109 cultivos de tomate evaluados durante 2014-2015 y 2015-2016 en 23 predios representativos de la zona sur del Uruguay. La muestra de predios fue definida en función de una tipología de predios de la región, considerando el área de tomate, el nivel de rendimiento y la ubicación. El tamaño de la muestra fue del 10% del total de productores de tomate en invernáculo del sur. En este trabajo se evaluaron dos áreas relacionadas con la sostenibilidad ambiental: el uso de pesticidas, y el estado y manejo del suelo. Para ello se construyeron tres índices, y un índice integrador de dichas áreas (Bertoni, 2019). Uno de los índices refirió al uso de pesticidas en los cultivos. Para el manejo de suelos se definieron dos índices, uno con énfasis en la materia orgánica y otro, en la sanidad del suelo, aunque se entiende que todas las prácticas contribuyen a ambos. El índice integrador se calculó como la suma de los

tres índices mencionados anteriormente. El análisis predial consideró todos los cultivos evaluados en cada predio. La construcción de los índices se describe en la Tabla 1. Además de los indicadores que compusieron el índice de sostenibilidad, se analizó la relación entre el contenido de carbono (C) orgánico mineralizable actual de los suelos respecto del contenido original, y los balances de fertilización de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) de los cultivos, y su relación con el contenido de estos nutrientes en el suelo.

Finalmente, se seleccionaron los tres predios con mayor valor del índice integrador, todos los cuales además tuvieron buenos resultados productivos, y se realizó una visita y entrevista para analizar en qué medida el índice construido a partir del cultivo de tomate reflejaba el manejo general del predio, e indagar las razones detrás del manejo realizado. Las entrevistas fueron realizadas en 2019, lo que permitió corroborar el estado y avance del predio posteriormente a la colección de los datos utilizados para el análisis.

TABLA 1. CONSTRUCCIÓN DE ÍNDICES PARA LA EVALUACIÓN DE LA SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DE LOS PREDIOS

Índice	Aspectos considerados para el cálculo	Categorías	Valor final del índice a nivel de predio
Uso de pesticidas	Grupos definidos estadísticamente, considerando: cantidad de pesticidas aplicados, número de aplicaciones, y cantidad de pesticida de categorías toxicológicas altas, I y II	Cultivos agrupados en: bueno, medio y malo	(Proporción de cultivos categoría bueno x3) + (proporción de cultivos categoría medio x2) + (proporción de cultivos categoría malo x1)
Suelo. Énfasis en la materia orgánica	Realización de abonos verdes: Sí = 1, No = 0. Incorporación de enmiendas orgánicas: Sí = 1, No = 0	Cultivos con puntaje 2: bueno 1: medio 0: malo	
Suelo. Énfasis en la sanidad	Realización de solarización: Sí = 1, No = 0. Secuencia de cultivos: tomate anterior en el mismo año = 0, tomate anterior 1,5 o más años antes = 1 Frecuencia de tomate: tomate todos los años = 0, frecuencias de menos de 1, tomate menos de una vez por año = 1	Cultivos con puntaje 2 o 3: bueno 1: medio 0: malo	

(Continúa en página siguiente)

Índice integrador	Se compone de la suma de los tres índices anteriores por predio		Valor máximo: 9, mínimo: 3
-------------------	---	--	----------------------------

Fuente: *Elaboración propia.*

3.1. Resultados de la implementación de la metodología propuesta

La aplicación de la metodología propuesta permitió caracterizar los predios hortícolas productores de tomate de mesa en invernáculo del sur del Uruguay en cuanto a la sostenibilidad ambiental, de acuerdo con los indicadores considerados. Además, se obtuvo información cuantitativa sobre el uso de pesticidas y el manejo de suelo y su relación con la productividad del cultivo.

3.1.1 Uso de pesticidas para el manejo sanitario

Los pesticidas fueron la principal herramienta para el manejo sanitario. El 52% de los predios se basó únicamente en el uso de pesticidas de síntesis química para el control de plagas y enfermedades. Tanto para los fungicidas como para los insecticidas utilizados, la cantidad mínima aplicada por cultivo fue cero y las cantidades máximas se alejaron en gran medida de la media, constituyendo un indicador que presentó mucha dispersión y variabilidad (Tabla 2). La mayoría de los predios utilizaron principalmente productos de categoría toxicológica baja (III y IV), aunque en el 26% de los predios se utilizó más cantidad de pesticidas de categorías toxicológicas altas (I y II). Solo en el 22% de los cultivos se combinó el uso de pesticidas de síntesis con productos “alternativos” (como hongos entomopatógenos, insecticidas botánicos, leche, bicarbonato de sodio y jabón). Este porcentaje incluyó cultivos orgánicos y convencionales. En el caso de los cultivos orgánicos, los valores de uso de fungicida registrados correspondieron principalmente al uso de azufre (S).

TABLA 2. CANTIDADES PROMEDIO DE FUNGICIDAS E INSECTICIDAS APLICADAS POR SUPERFICIE DE CULTIVO

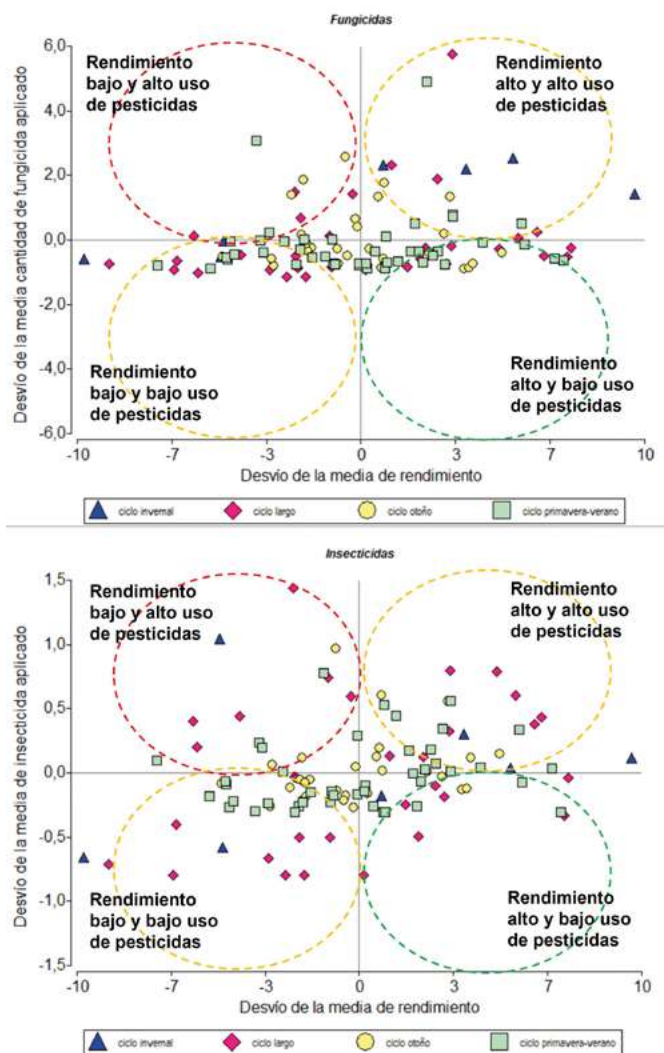
	Cantidad promedio aplicada (g IA/m ²)	Mínimo (g IA/m ²)	Máximo (g IA/m ²)
Fungicidas	1,0	0	6,9
Insecticidas	0,5	0	2,2

Nota: IA: ingrediente activo.

Fuente: Elaboración propia.

No se encontró relación entre el uso de pesticidas y los rendimientos del cultivo. El 38% de los cultivos tuvo un rendimiento mayor a la media con un uso de fungicidas menor a la media, y el 24% en el caso de los insecticidas (Figura 1). Es interesante destacar que la mayoría de los cultivos con esta relación favorable fueron de ciclo de primavera-verano (trasplante entre julio y diciembre) y largos (trasplante entre agosto y diciembre). Esto sugiere que acompañar el ciclo con condiciones ambientales favorables para la especie determina un rendimiento potencial mayor (Berrueta *et al.*, 2019) y menores problemas de enfermedades y plagas, reduciendo la necesidad de insumos externos y mejorando su eficiencia de uso, lo cual disminuye entonces el riesgo de impacto ambiental de la producción.

FIGURA 1. RELACIÓN ENTRE EL USO DE FUNGICIDAS E INSECTICIDAS Y EL RENDIMIENTO SEGÚN EL TIPO DE CICLO



Nota: Rendimientos en kg de tomate/m², expresados como desvío de la media de rendimiento para cada tipo de ciclo: largo y corto. Cantidad de pesticida en g IA/m², expresada como desvío de la media. Cero equivale a la cantidad de rendimiento o aplicaciones promedio.

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la eficiencia de las aplicaciones para el control de los problemas sanitarios, no se encontró relación entre las cantidades o el número de aplicaciones de insecticida realizadas por ciclo y la incidencia de mosca blanca, una de las plagas principales del cultivo. Para todos los niveles de incidencia se encontraron casos con distinto nivel de uso de control químico. Como fue discutido por Berrueta *et al.* (2019), la incidencia de esta plaga puede ser determinante de la brecha entre rendimiento real y potencial para el cultivo de tomate. Sin embargo, el nivel de incidencia y, por lo tanto, el control de esta plaga parecen estar determinados por un conjunto de factores más complejos que el solo uso del control químico, involucrando también medidas de manejo culturales y aspectos de la estructura del predio en general. Berrueta *et al.* (2021) sugieren que la mejora en el control de esta plaga en tomate en invernáculo requiere la consideración de todo el predio y todos los cultivos hospederos. Esto implica diseñar adecuadamente las secuencias de cultivos, y el manejo de los cultivos cercanos y de la vegetación espontánea, ya que también afectan la dinámica de la plaga. El uso de hongos entomopatógenos (*Beauveria bassiana* e *Isaria javanica*) y enemigos naturales (*Tuipiocoris cucurbitaceus*), junto con el monitoreo de la plaga, demostró resultados promisorios (Programa FPTA 344: Producción e introducción de agentes de control biológico en el manejo regional integrado de insectos y enfermedades de hortalizas).

3.1.2 Manejo y estado del suelo

Prácticas de manejo

En cuanto a las prácticas de manejo del suelo, los cultivos se clasificaron de acuerdo con la implementación de un grupo de prácticas ampliamente citadas como favorables para la conservación del suelo. En primer lugar, se consideró el uso de abonos verdes y el aporte de enmiendas orgánicas. En el 39% de los cultivos solo se realizaba aporte de enmienda orgánica (principalmente cama de pollo y, en menor medida, compost, estiércol de gallina, cerdo u oveja), y en el 14% solo se realizaba abono verde. Únicamente en el 3% de los cultivos se realizaron abonos verdes y aporte de enmienda orgánica en forma simultánea. El mayor uso de enmiendas orgánicas puede explicarse por la facilidad de implementación, ya que

requiere menor planificación y no ocupa el invernáculo por un período, como sí ocurre con los abonos verdes.

En segundo lugar, se evaluaron las prácticas de manejo de suelos de rotación de cultivos (secuencia de cultivos y frecuencia de tomate en la rotación) y el uso de solarización. Solo en el 3% de los cultivos se realizó rotación de cultivos (baja frecuencia de tomate y secuencias diversas) y solarización. Las secuencias de cultivos incluyeron principalmente morrón, lechuga y, en menor medida, otros cultivos como chaucha, acelga, pepino, repollo o coliflor. En el 37% de los cultivos no se implementó ni solarización, ni rotación. La mayoría de los predios eran altamente especializados, por lo que realizaban tomate todos los años. Por lo tanto, la rotación de cultivos representa un gran desafío para estos sistemas.

Balance de nutrientes

Se analizaron también los balances de fósforo, nitrógeno y potasio por predio (calculados como la diferencia entre los aportes por fertilización química y orgánica y la absorción teórica del cultivo según el rendimiento alcanzado), y pudo constatarse que en el caso del fósforo las medias fueron mayores a cero en casi todos los predios, a excepción del 17% de los casos. En algunos predios se observaron balances excesivamente positivos que superaban los 250 kg/ha. Para el potasio, los balances fueron mayoritariamente negativos. El nitrógeno fue el nutriente que presentó balances más equilibrados. Para este nutriente fueron más los predios que tuvieron balances cercanos a cero, si bien se constataron algunos casos con valores muy excesivos, y mínimos y máximos muy distantes entre los diferentes cultivos de un mismo predio.

Además, se observaron en conjunto los balances y el contenido de los tres nutrientes en el suelo para cada cultivo. No se encontró relación entre la fertilización y el contenido del nutriente en el suelo para el caso del potasio. Se observó una correlación positiva en el caso de nitrógeno y fósforo. Se evidenció que los cultivos con mayor fertilización con fósforo también tenían mayor contenido de fósforo fácilmente disponible para las plantas en el suelo (P-Bray, medido por método Bray-Kurtz), probablemente como resultado de la acumulación de muchos ciclos de balances positivos de este nutriente. Esto puede atribuirse a la dinámica de acumulación de este nutriente en suelo, sugiriendo que existen predios donde se realizan fertilizaciones elevadas que se repiten habitualmente, sin considerar la disponibilidad en el suelo. En el caso del nitrógeno, se observó gran variabilidad, con situaciones en las que se cubren los re-

querimientos del cultivo, otras en las que los mismos no son cumplidos y algunas en las que estos se sobrepasan, generando excesos. El déficit de nitrógeno es negativo por su efecto en el rendimiento del cultivo y porque puede afectar el stock de C del suelo. El exceso de nitrógeno conlleva el riesgo de lavado y volatilización, además de afectar la eficiencia económica.

Estado del suelo

El estado del suelo fue evaluado a partir de la relación entre la cantidad de carbono orgánico mineralizable (COM) original según el tipo de suelo, y el COM actual estimado a través del análisis de suelo. Se encontró que el 56% de los cultivos tenía entre 30 y 70% del COM original, mientras que el 23% tenía menos de 30%, evidenciando un severo deterioro del suelo. Solo el 21% poseía 70% o más del COM original. En algunos casos, la relación fue mayor al 100%. Si bien es un valor estimado, estos casos tenían una larga trayectoria de implementación de prácticas de mejora de la materia orgánica y correspondían a cultivos de sistemas orgánicos.

3.1.3 Índice integrador

Para integrar todas las áreas evaluadas se construyeron índices por predio (Tabla 3) vinculados al uso de pesticidas y al manejo de los suelos, y finalmente se integraron estos resultados en un único índice por predio que permitió ordenar a los mismos según este valor, que refleja el desempeño en cuanto a la sostenibilidad ambiental de las prácticas utilizadas.

Existió gran variabilidad del índice integrador entre los predios (Tabla 3). El 26% de los predios alcanzó un valor del índice de 7/9 o superior. Estos casos con valores más altos del índice tuvieron valores altos en las tres áreas consideradas. El 26% de los predios tuvo los valores más bajos del índice, con niveles menores a 5/9. Generalmente, estos predios tuvieron resultados pobres en las tres áreas. Sin embargo, el peso de las diferentes áreas evaluadas fue distinto en cada uno, lo que implica que sus fortalezas y debilidades son diferentes y que lo que los separa de una mayor sostenibilidad es distinto en cada caso. Esto define que la trayectoria de mejora es particular para cada predio y no hay una única recomendación válida para todos los casos.

TABLA 3. PREDIOS SEGÚN EL VALOR DEL ÍNDICE INTEGRADOR Y LOS TRES ÍNDICES QUE LOS COMPONEN

Predio	Índice uso de pesticidas (escala 1 a 3)	Índice de abonos verdes y enmiendas orgánicas (escala 1 a 3)	Índice de rotación y solarización (escala 1 a 3)	Índice integrador (escala 3 a 9)	Desvío promedio de la media de rendimiento
1	3,00	2,00	2,50	7,50	0,11
2	2,50	2,50	2,50	7,50	-0,13
3	2,25	2,00	3,00	7,25	0,13
4	3,00	2,00	2,25	7,25	-0,04
5	3,00	2,00	2,00	7,00	-0,36
6	2,00	2,00	3,00	7,00	-0,35
7	2,25	1,25	2,75	6,25	-0,15
8	2,75	1,75	1,50	6,00	-0,36
9	2,75	1,25	2,00	6,00	-0,06
10	2,00	1,40	2,20	5,60	0,40
11	1,50	1,00	3,00	5,50	0,16
12	1,67	1,33	2,33	5,33	-0,16
13	2,25	1,25	1,75	5,25	0,11
14	2,00	2,11	1,11	5,22	-0,19
15	2,00	2,00	1,00	5,00	-0,16
16	2,50	1,25	1,25	5,00	0,45
17	2,00	2,00	1,00	5,00	-0,17
18	1,67	1,00	2,00	4,67	0,13
19	2,00	1,50	1,00	4,50	-0,16
20	1,00	1,60	1,80	4,40	-0,04
21	1,60	1,20	1,60	4,40	0,31
22	1,00	2,00	1,00	4,00	-0,09
23	1,67	1,00	1,00	3,67	0,20

Fuente: Elaboración propia.

Es interesante observar que no hubo relación entre el valor del índice integrador y los rendimientos. Como discuten Berrueta *et al.* (2019), los factores que explicaron las brechas de rendimiento no estuvieron directamente vinculados a los aspectos evaluados en este estudio. Por lo tanto, es posible trabajar de forma simultánea en mejorar el rendimiento y reducir el impacto ambiental.

Posteriormente al cálculo de los índices, se realizó una visita a los tres predios que obtuvieron los mayores valores del índice integrador. Se constató que en dos de los tres casos los resultados del índice eran el reflejo de una gestión de la producción consciente de los posibles impactos que los diferentes manejos podían generar en el ambiente y los recursos naturales. Uno de estos predios realizaba un manejo orgánico de la producción y el otro, un manejo integrado en el que se combinaba la utilización de insumos de origen sintético con productos y herramientas alternativas. El tercer predio se encontraba en una etapa más temprana e inestable respecto de la introducción de cambios y modificación de prácticas, ya que la incorporación de algunos manejos había sido abandonada o sustituida por diversas causas. Los dos primeros casos tuvieron un rendimiento promedio por encima de la media y en el tercer caso, fue en 13% menor a la media. En estos casos, el manejo consciente de los recursos está acompañado también de buenos rendimientos productivos, aspectos que, combinados, configuran un escenario ideal para la sostenibilidad en términos generales, no solo desde el punto de vista ambiental.

Desde el momento en que se recabaron los datos (2014-2016) hasta las visitas realizadas (2019), algunas prácticas antes consideradas positivas para la producción orgánica y que actualmente son discutidas, como el uso de cobre para el control sanitario y el uso excesivo de cama de pollo para la fertilización, ya habían sido puestas en tela de juicio y modificadas (mejoradas) por los propios productores. Estos fueron entrevistados acerca de su percepción de su forma de producir, la presencia de medidas de manejo que promovieran la biodiversidad y las dificultades presentes para avanzar hacia un sistema más sostenible. En particular, mencionaron dificultades o inquietudes asociadas a aspectos no relevados en este trabajo, como el manejo y la reutilización del nylon, el compostaje de los restos de cultivo y el acceso a productos alternativos para el manejo sanitario. Esto evidenció una clara actitud de cuestionamiento a las medidas utilizadas, autocrítica para reconocer lo que se ha mejorado y lo que falta por hacer, cualidades que parecen ser esenciales en la búsqueda de un cambio en las formas de pensar la producción hortícola.

Por otro lado, el tercer predio, que se encontraba en una etapa más temprana de incorporación de cambios, da cuenta de la dificultad que enfrentan los productores que deciden transitar hacia sistemas ambientalmente más sostenibles. Muchas veces las prácticas de manejo recomendadas y necesarias no pueden mantenerse, porque están acompañadas de pérdidas transitorias de productividad, calidad, o requieren otra infraestructura. Para fomentar los cambios y apoyar los procesos de transición, es necesario contar con políticas públicas que atiendan los inconvenientes inherentes al proceso. La ausencia o muy baja presencia de políticas agrícolas enfocadas en la agroecología, o que favorezcan este tipo de transformación en los sistemas de producción, conduce a que este tipo de alternativas queden marginalizadas (Rosset y Altieri, 2018). Esto se suma a que no existen mercados que reconozcan diferencialmente los productos que provienen de sistemas en transición, por lo que tampoco existe un incentivo en los precios de venta.

4. Mejoras a partir del uso o de la implementación de las tecnologías

La caracterización de los predios que se desprende de este análisis permite trabajar sobre la base de indicadores construidos con información directamente medida y evaluada en una muestra amplia y representativa de los sistemas de producción del sur del Uruguay. Además, la posibilidad de definir diferentes grupos o “franjas” de predios en función del índice integrador construido, pero manteniendo transparencia en la evaluación de cada componente del índice, implica que los productores puedan aprender de la experiencia de sus pares, fijar un objetivo hacia el que avanzar, o constatar el avance ya realizado hacia un escenario de mayor sostenibilidad.

A partir de estos resultados pudo constatararse también cuáles eran las prácticas más adoptadas en este tipo de sistemas y en cuáles había mayor dificultad para su adopción. La implementación de enmiendas orgánicas fue una práctica más generalizada que la instalación de abonos verdes. La planificación de una rotación en la cual la instalación de abonos verdes se encuentre contemplada es necesaria para viabilizar su uso, especialmente en predios especializados. En el caso de las prácticas con énfasis en la conservación de la sanidad del suelo, vuelve a repetirse la necesidad de planificar rotaciones que impliquen secuencias de culti-

vo diversas y baja frecuencia de tomate. La adopción de estas prácticas se vincula también con la reducción en el uso de pesticidas, al bajar la presión de enfermedades y plagas problemáticas para este cultivo a través de la diversificación del agroecosistema en el tiempo y el espacio. La adopción de herramientas de control sanitario “alternativas” configura un escenario positivo para la reducción en el uso de pesticidas de síntesis química, pero, como fue relevado en las entrevistas, el acceso a este tipo de productos y el conocimiento asociado a su correcta utilización aún requieren de mayores esfuerzos para poder generalizarse.

De los resultados del trabajo se desprende que es posible y deseable que, en vías de generar alternativas hacia una producción más sostenible, se tengan en cuenta aspectos que influyen sobre la capacidad de los recursos utilizados en la producción de perdurar y sostenerse en el tiempo. Simultáneamente, no puede perderse de vista que las familias productoras deben obtener rendimientos que aseguren ingresos aceptables y estables, que viabilicen una permanencia digna en la producción. La mejora del rendimiento es parcialmente independiente de la mejora en la eficiencia de uso de insumos y recursos, según evidencia empírica (Van Noordwijk y Brussaard, 2014). Una trayectoria particular para avanzar hacia mayor sostenibilidad de los predios, teniendo en cuenta estos aspectos, implica la mejora simultánea del rendimiento y de la eficiencia del uso de insumos y recursos. Este camino, que podemos denominar intensificación ecológica, se basa en que la productividad de los agroecosistemas se sostenga y sea regulada por los procesos ecológicos (Tittone, 2014). En este sentido, es posible diseñar estrategias para, en forma simultánea, mejorar los rendimientos y reducir el impacto ambiental.

Si bien se supone que la horticultura, y en particular la horticultura protegida, implica un alto uso de insumos, los resultados de este trabajo muestran que la realidad no es bien reflejada por esta generalización y existe una gran diversidad de situaciones. Puede afirmarse que es posible alcanzar buenos niveles de producción de tomate de forma más sostenible desde el punto de vista ambiental. Aunque queden aún muchos aspectos para seguir pensando y generar alternativas, hoy contamos con una metodología que nos permite cuantificar y analizar las variables del sistema de producción, e identificar los puntos críticos sobre los que es prioritario intervenir. Existen ejemplos de cómo reestructurar los predios para avanzar hacia este objetivo. En este estudio se encontraron predios que, a través del uso cuidadoso de los insumos externos y los recursos naturales, obtienen simultáneamente buenos resultados productivos

y ambientales. Dentro de este grupo, se encontraron predios orgánicos y otros comúnmente llamados “convencionales”. Estos últimos, si bien utilizan algunos insumos de origen sintético, logran manejar el cultivo y el ambiente de una manera que disminuye la necesidad de emplearlos. La utilización de las prácticas que mejoran la sanidad del suelo y el contenido de materia orgánica podría ser uno de los aspectos que permiten tener plantas más equilibradas, que desarrollen mecanismos de resistencia a plagas y enfermedades, y menor presión inicial de estas en los sistemas, lo que conduciría a una menor necesidad de utilizar pesticidas, de cualquier origen. Pensando en una trayectoria agroecológica hacia sistemas más sostenibles, estos predios podrían ser ejemplos para seguir para aquellos productores que aún manejan sistemas más convencionales y buscan transitar hacia modelos menos dependientes de insumos externos de origen sintético que, además, generen menor impacto sobre el ambiente y la salud humana.

Los resultados obtenidos reafirman que no existe una única trayectoria de cambio posible para llegar a una agricultura sostenible. Debe pensarse al agroecosistema “coevolucionando” con su entorno, y a los productores que lo gestionan, tomando decisiones de manejo y de rumbo dependiendo de sus necesidades particulares, además de detectar los aspectos que lo alejan de una producción más sostenible. Los principios de la agroecología y la intensificación ecológica (Tittone, 2013; Sarandón y Flores, 2014) traducidos a la realidad local y particular de cada predio permitirían avanzar en pos de este objetivo. Este proceso requiere la promoción del diálogo constante y la sinergia entre la comunidad científica, los productores, los técnicos, los saberes locales y la sociedad en general.

Bibliografía

Berrueta, C., Borges, A., Giménez, G. y Dogliotti, S.

(2019), “On-farm diagnosis for greenhouse tomato in south Uruguay: explaining yield variability and ranking of determining factors”, en *European Journal of Agronomy*, 110, s. p.

Berrueta, C., Dogliotti, S. y Giménez, G.

(2020), “Horticultural systems based on greenhouse tomato in south Uruguay: characterization and analysis of economic efficiencies”, en *Agrociencia Uruguay*, 24(2), p. 87.

Berrueta, C., Giménez, G. y Dogliotti, S.

(2021), “Scaling up from crop to farm level: Co-innovation framework to improve vegetable farm systems sustainability”, en *Agricultural Systems*, 189, 103055.

Bertoni, P.

(2019), *Comparación de sistemas de producción de tomate en invernadero en el sur del Uruguay a través de indicadores de sostenibilidad, con énfasis en la dimensión ambiental*, Tesis Ing. Agr. Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Montevideo. 134 pp.

Blum, A., Chiappe, M., Elola, S., Alliaume, F., Alvarez, M., Bounos, C. y Delgado, S.

(2006), *Estudio sobre mejora de la calidad ambiental de la producción agropecuaria en Montevideo rural*, Montevideo.

DIEA-DIGEGRA

(2007), *Encuestas hortícolas 2006: zona Sur y litoral Norte*, Serie Encuestas 251, 39 pp.

DIEA-DIGEGRA

(2017), *Encuestas hortícolas 2015-2016: zona Sur y litoral Norte*, Serie Encuestas 344, 15 pp.

Dogliotti, S., García, M.C., Peluffo, S., Dieste, J. P., Pedemonte, A. J., Bacigalupe, G. F., Scarlato, M., Alliaume, F., Álvarez, J., Chiappe, M. y Rossing, W. A. H.

(2014), "Co-innovation of family farm systems: A systems approach to sustainable agriculture", en *Agricultural Systems*, 126, pp. 76-86.

Maeso, D., Nuñez, S., Nuñez, P., Mieres, I., Conde, P., Duarte, F. y Bruno, A.

(2007), "Evaluación del impacto ambiental de los plaguicidas en la producción hortifrutícola", en *Revista INIA*, 13, pp. 20-26.

Reiche, C. y Carls, J.

(1996), "Modelos para el desarrollo de una agricultura sostenible", en *Comunicación*, 1(3), pp. 29-33.

Rosset, P. y Altieri, M.

(2018), *Agroecología. Ciencia y Política. Sociedad Latinoamericana de Agroecología (SOCLA)*, Serie ICAS, Riobamba, Ecuador. 208 pp.

Sarandón, S.

(2002), "El desarrollo y uso de indicadores para evaluar la sostenibilidad de los agroecosistemas", en Sarandón, S. (ed.), *Agroecología: el camino hacia una agricultura sostenible*, Ediciones Científicas Americanas, La Plata, cap. 20, pp. 393-414.

Sarandón, S. y Flores, C.

(2014), *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de agroecosistemas sostenibles*, Universidad de La Plata, La Plata, 466 pp.

Tilman, D., Cassman, K., Matson, P., Naylor, R. y Polasky, S.

(2002), "Agricultural sustainability and intensive production practices", en *Nature*, 418, pp. 671-677.

Tittonell, P.

(2013), *Farming Systems Ecology: towards ecological intensification of world agriculture*, Wageningen University, Wageningen, 39 pp.

Tittonell, P.

(2014), “Ecological intensification of agriculture – sustainable by nature”, en *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, pp. 53-61.

Tittonell, P., Klerkx, L., Baudron, F., Félix, G. F., Ruggia, A., Van Apeldoorn, D., Dogliotti, S., Mapfumo, P. y Rossing, W. A. H.

(2016), “Ecological Intensification: local innovation to address global challenges”, en Lichtfouse, E. (ed.), *Sustainable Agriculture Reviews*, Springer, Basel, pp. 1-34 (Sustainable Agriculture Reviews 19).

UNCTAD

(2017), *A/HRC/34/48*. Report of the Special Rapporteur on the right to food. FAO. Disponible en: <<https://doi.org/10.1017/S0020818300025613>>.

Van Noordwijk, M. y Brussaard, L.

(2014), “Minimizing the ecological footprint of food: closing yield and efficiency gaps simultaneously?”, en *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 8, pp. 62-70.

Capítulo 17

Cultivares locales, portainjertos y mejoramiento frutícola

Maximiliano Dini, Danilo Cabrera y Roberto Zoppolo

1. Introducción

La producción frutícola de hoja caduca está concentrada en los departamentos del sur del país, principalmente en Montevideo y Canelones, aunque también han crecido en su importancia San José y Colonia. Además, existe una segunda zona de producción que es el litoral norte, en especial los departamentos de Salto y Artigas, donde existen plantaciones básicamente de durazneros. Para la zafra 2018-2019, considerando a los cultivos de manzanos, durazneros, perales, ciruelos, membrillos y nectarinos, se totalizan 4.634 hectáreas, lo que comprende a un total de 633 productores (DIEA-MGAP, 2020a). La mayoría de los productores frutícolas son empresas familiares y de superficies pequeñas: el 82,5% ocupa menos de 10 hectáreas y de estos, 62% producen en menos de 5 hectáreas (DIEA-MGAP, 2016). Si a esto le sumamos que el sector frutícola, mayoritariamente, tiene como destino abastecer el mercado interno (más del 95% del total de la producción), se desprende la importancia del sector, netamente productor de alimentos para el país.

Desde los inicios de la fruticultura en Uruguay y hasta el presente las principales especies cultivadas provienen de otras partes del mundo y por ello siempre hubo una fuerte dependencia de materiales de origen extranjero. Las introducciones realizadas han provenido principalmente de programas de mejoramiento genético de regiones tradicionalmente frutícolas del hemisferio norte, en especial de Estados Unidos (estados de California, Texas, Georgia, entre otros) y de Europa (países como

Francia, Inglaterra, Italia, entre otros). Esas regiones frutícolas de donde se trajeron la gran mayoría de los cultivares y portainjertos presentes en Uruguay tienen condiciones edafoclimáticas muy diferentes a las nacionales, destacándose alta acumulación de frío invernal, ausencia de lluvias en la temporada primavera-verano y suelos profundos y/o bien drenados. La gran problemática que eso aparejó, y apareja, es la falta de adaptación de la mayoría de los materiales introducidos a nuestras condiciones de cultivo. La acumulación de frío en Uruguay es media, teniendo promedios de 570 horas de frío menores a 7,2 °C y 950 unidades de frío según el modelo de Richardson (GRAS-INIA, 2021), y muchas veces los cultivares provenientes del exterior tienen una exigencia de frío superior a los promedios nacionales para obtener correcta brotación, floración y posterior producción. Otra de las grandes problemáticas, ligada también a lo climático, es que Uruguay se caracteriza por tener un régimen isohigro de las precipitaciones y alta incidencia de vientos, lo que genera condiciones predisponentes para muchas enfermedades fúngicas y bacterianas. Esto último, sumado a que en las condiciones donde se generaron y evaluaron estos cultivares no tienen lluvias ni vientos durante la zafra productiva, resulta en que muchos de estos cultivares se presentan con alta susceptibilidad a las principales enfermedades que se dan en nuestras condiciones de cultivo. El régimen de precipitaciones, a su vez, junto con las características de nuestros suelos de poca profundidad y relativamente baja velocidad de infiltración suponen un desafío para el desarrollo de las raíces. Los portainjertos deben ser capaces de prosperar en condiciones muchas veces adversas, como las generadas por estar el suelo saturado, o por la compactación y poca estructura, o por tener que enfrentar la afectación por parte de hongos del suelo que prosperan en la mayoría de nuestros sitios de plantación.

La superación de muchas de las limitantes agroclimáticas se ha resuelto tradicionalmente mediante el uso de insumos, la aplicación de agroquímicos o intervenciones, generando en muchos casos dificultades, costos, impactos y consecuencias no deseadas. Entre estas se destaca la afectación del ambiente, de lo cual se ha generado mucha más información y conciencia en las últimas décadas, obligando a repensar el rol del material plantado y las estrategias para su selección.

Otra de las grandes problemáticas de depender de materiales de origen extranjero, más reciente en el tiempo, es la de la propiedad intelectual. Hace dos o tres décadas, el material genético tomó, además de su valor *per se*, un valor extra por integrarse como pieza clave dentro de un

sistema comercial. Esto hizo que el esfuerzo y la inversión del mejorador pasaran a valorarse estratégicamente, aumentando su valor económico y siendo protegido y restringido su uso a los “socios comerciales”. Los cultivares y portainjertos, además de estar inscriptos en los registros nacionales y/o internacionales de cultivares, están siendo protegidos, y se abonan regalías en diferentes modalidades para poder acceder a su utilización y cultivo, estando muchas veces el uso de germoplasma ligado a las etapas comerciales (por medio de consorcios, clubes, entre otros). Siendo que la gran mayoría de los programas de mejoramiento genético del mundo son privados o semiprivados, el acceso a los materiales genéticos está tornándose muy costoso y difícil de lograr. Adicionalmente, existen restricciones sanitarias y legales a las importaciones de materiales vegetales desde otros países, por lo que muchas veces se hace más difícil aún llegar a concretarlas.

Toda esta situación descripta es la que lleva al INIA a promover la identificación y creación de cultivares locales, elaborando programas de mejoramiento propios. La generación de nuevos cultivares se inició a finales del siglo xx, aplicándose principalmente los métodos tradicionales de mejoramiento genético como son los cruzamientos libres, cruzamientos dirigidos, identificación de mutaciones naturales, relevamiento en plantaciones y predios para la identificación de individuos destacados. Los principales objetivos planteados son: adaptación a condiciones agroclimáticas con bajo requerimiento de frío invernal, resistencia a plagas y enfermedades, calidad organoléptica y nutricional, tamaño y atractividad del fruto, diversidad en fechas de cosecha.

El portainjerto es un componente muy importante y determinante en la planta frutal. Tiene una influencia directa y decisiva en muchas de las características vegetativas y reproductivas del cultivar que sobre él se injerta, como el vigor y el tamaño final del árbol, el calibre y la calidad de sus frutos, la precocidad de producción y productividad, el momento de cosecha y la resistencia a estreses bióticos y abióticos, entre otras. Por ello la introducción de portainjertos, su evaluación y su selección constituyen una línea de trabajo que siempre se priorizó dentro del Programa Nacional de Investigación en Producción Frutícola del INIA. Los objetivos planteados en esta línea de trabajo han ido por mayor adaptación a las condiciones edafoclimáticas, buena compatibilidad, fácil propagación, con resistencia a plagas y enfermedades y dar a la combinación pie/copa, una eficiencia productiva alta.

La producción de materiales difiere de acuerdo con la especie, habiendo emprendimientos conjuntos del INIA con otros agentes, tanto privados como públicos. Esto está permitiendo avanzar en la identificación de cultivares y portainjertos de gran adaptación a las condiciones de cultivo locales, capitalizando los esfuerzos propios conjugados con los ajenos.

Otro gran cambio que se dio al inicio del siglo XXI para el Programa Nacional de Investigación en Producción Frutícola del INIA fue tomar a los frutos nativos como una alternativa comercial válida para desarrollar. En un esfuerzo conjunto con la Facultad de Agronomía y la Dirección Forestal se lanzó, a nivel nacional, una campaña de prospección y colecta de guayabo del país, arazá, pitanga, guabiyú, ubajay, cerezo de monte y otras. Esto permitió recuperar y valorizar recursos naturales de nuestro país y, a la vez, generar una nueva opción de consumo de fruta de alto valor nutricional que de a poco se va haciendo más conocida y se generaliza en el circuito comercial. Las especies de frutales nativos son elementos de gran valor para el diseño de sistemas bajo el enfoque agroecológico.

2. Frutales del Uruguay

2.1. Frutales de carozo

Los frutales de carozo son aquellos que producen frutos tipo drupa, que tienen una semilla encerrada en un endocarpio duro llamado, justamente, carozo o hueso. Las especies más importantes en términos económicos pertenecen al género *Prunus* que en Uruguay son: duraznero (*P. persica*), ciruelo japonés (*P. salicina*) y nectarino (*P. persica* var. *nucipersica*). Este grupo de frutales alcanzaba en la zafra 2018-2019 un total de 1.542 ha, siendo el duraznero el más importante con 1.127 ha, seguido por 246 ha de ciruelo y 169 ha de nectarinos (DIEA-MGAP, 2020a). Son un grupo de frutales típico de las plantaciones familiares, principalmente por características propias de sus frutos, que son delicados para su manipulación y de corta conservación poscosecha (entre 10 y 30 días). Esta condición, asimismo, ha llevado a la existencia de una gran variedad de cultivares con diferentes momentos de cosecha, para lograr un amplio período de disponibilidad de fruta fresca. Estas particularidades hacen que sea un rubro fácil de adaptarse a pequeños productores familiares; tal es así que el 92% de los productores de duraznero posee menos de 5.000 plantas en producción y prácticamente la totalidad de los produc-

tores de nectarinos y ciruelos tienen menos de 5.000 plantas en producción (DIEA-MGAP, 2016).

Desde los inicios de la fruticultura y de la creación del INIA se introdujeron y evaluaron decenas de cultivares de carozo, con diferentes grados de efectividad. Muchos de estos presentaron problemas de adaptación, siendo que en zafra luego de inviernos de baja o media acumulación de frío, las brotaciones y floraciones fueron irregulares, desencadenando deficientes producciones. El ejemplo más reciente fue la zafra 2015-2016 (Zoppolo *et al.*, 2015). Otros cultivares presentan buenas producciones, pero con graves problemas frente a las principales enfermedades como lo son bacteriosis (*Xanthomonas arboricola* pv. *pruni*) y podredumbre morena (*Monilinia fructicola*), como por ejemplos los durazneros ‘Flor-dagem’, ‘Elegant Lady’, ‘Opedepe’ y ‘O’Henry’, los nectarinos ‘Carolina’, ‘Fantasía’ y ‘Zaitabo’ (Big Top®), y los ciruelos ‘Golden Japan’ y ‘Tricerri’ (Soria *et al.*, 2003; Soria y Pisano, 2014). Este último problema se podía mitigar, en parte, con manejos culturales, pero la principal estrategia utilizada para mitigar las pérdidas de estos cultivares muy susceptibles son los tratamientos químicos (Mondino *et al.*, 2010). Esto lleva a los productores a la dependencia de productos de síntesis y al aumento de los costos productivos, además de traer aparejados posibles efectos nocivos en la salud de productores y trabajadores, en el ambiente, e incluso en consumidores finales por posibles residuos que pueden quedar en la fruta. Por ello, el INIA prioriza actualmente la búsqueda de resistencia o baja susceptibilidad a las enfermedades (principalmente, bacteriosis y podredumbre morena).

En este grupo de frutales surgieron de forma espontánea, y fueron seleccionados por productores y técnicos, materiales que podrían ser llamados “cultivares criollos”. Entre ellos tenemos a ‘Pavía Moscatel’, el cual, por su muy buena adaptación a los suelos pesados y mal drenados de Uruguay, se tornó primero en uno de los principales durazneros de cosecha tardía para consumo en fresco e industria (Soria y Pisano, 2014) y después, y hasta la actualidad, en el principal portainjerto utilizado por los viveristas nacionales para todos los frutales de carozo (Cabrera y Rodríguez, 2014). Otros ejemplos fueron los durazneros del subgrupo de los “pavías”, llamados de esta manera porque el carozo se encontraba adherido a la pulpa, a diferencia de los “priscos” que presentaban el carozo libre de la pulpa y eran en su mayoría cultivares introducidos desde fuera del país, entre los cuales, además del ‘Pavía Moscatel’, se encuentran el ‘Pavía Manteca’, ‘Pavía Ruby’, ‘Pavía Canario’, entre otros (Soria y Pisa-

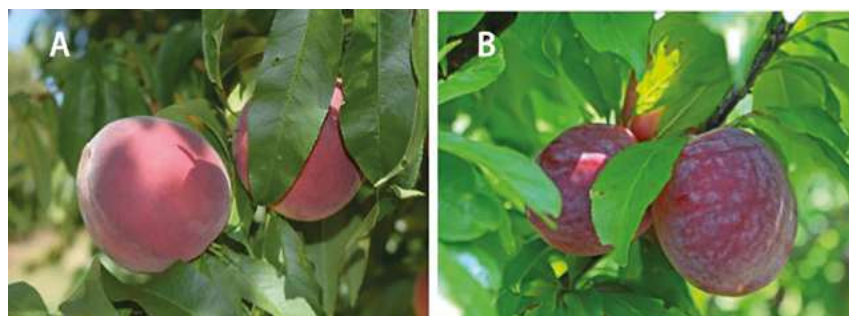
no, 2014). También existen algunos ejemplos entre los ciruelos, como es el caso de ‘Rosa Nativa’, descubierta y propagada por el viverista Gerardo Bruzzone (Dini *et al.*, 2020).

El mejoramiento propiamente dicho se inició en el año 1994, mediante un acuerdo de trabajo entre DIGEGRA-MGAP y el INIA. El primer producto de este acuerdo fue el cultivar Pavía Sauce que fue lanzado en el año 2004. Este surgió de una selección masal de plantas de una población local de durazneros tardíos (‘Pavía Manteca’ y ‘Pavía Ruby’), destacándose el anterior principalmente por su menor susceptibilidad a bacteriosis, superior calidad de frutos y productividad (Soria *et al.*, 2004). De este mismo acuerdo de trabajo surgió una serie de cultivares de durazneros que fueron llamados “Serie Moscato”, contando con seis cultivares de diferentes características y fechas de cosecha, pero todos muy bien adaptados a las condiciones nacionales de cultivo. Estos cultivares provienen de cruzamientos dirigidos que utilizaron como parentales femeninos a clones preseleccionados y de origen local de ‘Pavía Manteca’ y ‘Pavía Moscatel’, mientras que los parentales masculinos fueron los cultivares Earli Grande y Flordaking (ambos de origen extranjero, pero bien adaptados a las condiciones nacionales). Estos cultivares fueron lanzados y recomendados en el siguiente orden: Moscato Blanco (2008), Moscato Delicia y Moscato Tardío (2009), Moscato del Sur (2010), Moscato del Monte (2011) y Moscato Largo (2012) (Soria *et al.*, 2012). Luego de que finalizara este acuerdo de trabajo, el INIA siguió con las obras de mejoramiento genético en duraznero, introduciendo nuevos cultivares del extranjero, desde lugares priorizados con condiciones climáticas más similares a las nuestras, como Brasil. Así surgió la validación y recomendación del cultivar BRS Rubimel, en el año 2018. Este duraznero proveniente de EMBRAPA Clima Temperado (Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil) tiene potencial para substituir a uno de los cultivares de durazneros más plantados en Uruguay, que es el ‘June Gold’, presentando mejor adaptación climática y mejor calidad de fruto que este (Pisano *et al.*, 2018). Las actividades de mejoramiento genético con duraznero continuaron, por un lado, la introducción y evaluación, y, por el otro, las hibridaciones, selección y evaluación de materiales propios del INIA, llegando al primer duraznero 100% creación de la institución lanzado y recomendado en el año 2021. Este fue el cultivar INIA Santa Lucía, de pulpa amarilla y cosecha de estación (10 al 20 de enero), que cuenta entre sus principales atributos: excelente productividad y calidad organoléptica (Figura 1A). El ‘INIA Santa Lucía’ resulta ser una buena opción para substituir al cultivar Elegant Lady, de

características productivas y calidad similar, pero superándolo en cuanto a sanidad, menor susceptibilidad a bacteriosis y podredumbre morena (Dini y Pisano, 2021). Comparando ambos cultivares, con la utilización del cultivar creado por el INIA se logra disminuir notoriamente las aplicaciones de agroquímicos necesarias para obtener una producción de calidad.

Para el caso de ciruelos, el INIA continuó introduciendo nuevos cultivares desde el extranjero, priorizando materiales de baja necesidad de frío invernal y con baja susceptibilidad a bacteriosis. Así, para el año 2016 se recomendaron dos cultivares de ciruelo japonés, los cultivares Gulfbeauty y Gulfblaze, tanto para su cultivo en la región frutícola del norte del país (Salto y Artigas) como para el sur del país, por su muy buena adaptación y cosecha precoz. Estos cultivares son provenientes de la Universidad de Florida (Florida, Estados Unidos), y se destacan por su baja necesidad de frío, constante y buena producción, y baja susceptibilidad a bacteriosis (Pisano *et al.*, 2016). En paralelo, y con un acuerdo de trabajo con el Vivero Gerardo Bruzzone, desde el año 2014 se comenzó a evaluar una población proveniente de una polinización libre del cultivar Rosa Nativa, donde se seleccionaron varios *seedlings* que se destacaban por adaptación, producción y calidad de frutos, y eran escalonados según su fecha de cosecha (INIA, 2020a). Los mismos fueron recomendados entre 2018 y 2020, culminando con el lanzamiento de cinco cultivares de la serie INIA GB, con diversidad de características en cuanto a color, forma y sabor, y cubriendo un amplio período de cosecha desde fin de noviembre a mediados de enero: INIA GB Aldeana, INIA GB Monarca, INIA GB Promesa, INIA GB Serrana e INIA GB Canora (Dini *et al.*, 2020). Otro producto 100% del Programa de Mejoramiento en Fruticultura del INIA, fue el cultivar INIA Reyna Mary (Figura 1B). Este fue seleccionado, evaluado y presentado por primera vez como Selección 04.01.14 (Soria y Pisano, 2011); los estudios continuaron, principalmente ajustando los cultivares polinizadores y evaluando la susceptibilidad a bacteriosis (Pisano *et al.*, 2014; Pisano y Dini, 2019), culminando con su recomendación y lanzamiento en 2020 (INIA, 2020b; Dini *et al.*, 2020).

FIGURA 1. DURAZNERO ‘INIA SANTA LUCÍA’ (A) Y CIRUELO ‘INIA REYNA MARY’ (B)



Fuente: Elaboración propia.

Todos estos ejemplos de cultivares de origen nacional, sean seleccionados desde individuos que surgieron de forma espontánea o creados a partir de hibridaciones, tienen la gran ventaja de estar muy bien adaptados a las condiciones climáticas nacionales, así como de exhibir un buen desempeño frente a las principales enfermedades que atacan a los frutales de carozo.

El portainjerto es otro de los componentes importantes en el resultado final de una planta frutal, siendo de suma relevancia para el cultivo del duraznero, por la susceptibilidad de la especie a la falta de oxígeno en el suelo (anoxia). Dado el tipo de suelo de la zona frutícola del país, arcilloso, poco profundo y de pobre drenaje interno, este proporciona condiciones de anegamiento y alta posibilidad de anoxia para las raíces. Además de las prácticas de sistematización y manejo de suelo que se realizan para mejorar las condiciones de suelo en la plantación, los portainjertos juegan un rol importante, por lo que el INIA ha puesto a disposición del sector materiales tolerantes a la asfixia radicular tales como el Cadaman® Avimag y el Penta, y otros, resistentes a nemátodos (*Meloidogyne* spp.) como el INIA Tsukuba N° 1 y Nemaguard. Además, estos portainjertos son compatibles, productivos y tienen buena multiplicación. También es de destacar que estos portainjertos citados para duraznero pueden ser utilizados para injertar sobre ellos cultivares de ciruelos, tanto japoneses como europeos (Cabrera y Rodríguez, 2014). Otro portainjerto evaluado por el INIA y disponible para el sector, en este caso exclusivo para ciruelo, es el Mariana 2624, resistente a nemátodos, tolerante a la asfixia radicular y de fácil multiplicación.

La disponibilidad de materiales de muy buen potencial en nuestras condiciones agroedafoclimáticas se suma a que estos frutales de carozo se adaptan muy bien a los productores familiares y la baja escala por ser exigentes en un manejo detallado, haciéndolos muy aptos para incluir en plantaciones de transición agroecológica y con buena independencia de los productos de síntesis. En particular, el cultivo del ciruelo requiere bajo uso de insumos, ya que generalmente no se dan grandes ataques ni de insectos, ni de enfermedades, siendo posible y promisoría la alternativa de instalación del cultivo de ciruelo bajo producción orgánica u otros sistemas con bases agroecológicas.

2.2. Frutales de pepita

Los frutales de pepita son aquellos que producen frutos derivados de un receptáculo engrosado, que no poseen un endocarpio duro sino, en su lugar, un conjunto de semillas en el interior de los carpelos (“pepitas”). Las especies más importantes en Uruguay son: manzano (*Malus x domestica*), peral europeo (*Pyrus communis*) y membrillero (*Cydonia oblonga*). Estos frutales, para la zafra 2018-2019, totalizaban 3.092 ha, siendo el manzano el más importante con 2.275 ha, seguido por 637 ha de peral y 180 ha de membrilleros (DIEA-MGAP, 2020a). Como los demás cultivos frutícolas, son predominantemente familiares, principalmente por la alta necesidad de mano de obra por unidad de superficie. El 72% y el 94% de los productores de manzanos y perales poseen menos de 5.000 plantas en producción, respectivamente, y la totalidad de los productores de membrilleros también tienen menos de 5.000 plantas en producción (DIEA-MGAP, 2016).

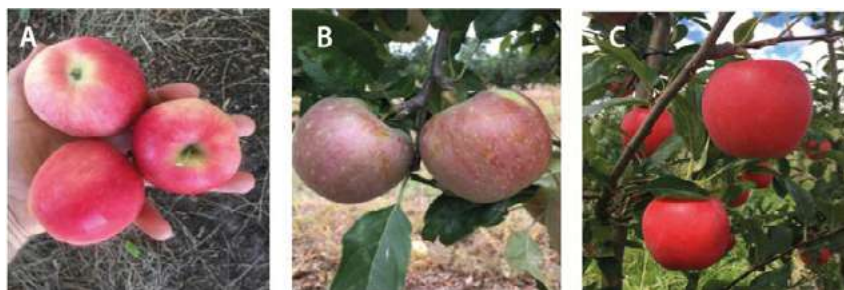
Son un grupo de frutales de mucha tradición de cultivo en Uruguay, desde los inicios de la fruticultura de hoja caduca. Se han introducido y evaluado decenas de cultivares en las condiciones de cultivo nacionales, principalmente de manzanos y perales. Muchos de estos cultivares que fueron introducidos y plantados en Uruguay, en particular los manzanos del tipo ‘Red Delicious’ y los perales ‘Williams’, presentaron y aún presentan problemas de adaptación. Luego de inviernos de media a baja acumulación de frío, las brotaciones y floraciones pueden presentarse de forma irregular, desencadenando deficientes producciones. Esta condición, sumada a otros factores climáticos adversos (déficits hídricos y temperaturas más altas o bajas que lo normal de la época), llevó a que en las zafras 2012-2013, 2015-2016 y 2017-2018 las producciones nacio-

nales fueran drásticamente disminuidas. El cultivar de peral Williams fue uno de los más afectados, con cosechas que rondaron entre el 0 y el 50% de lo normal (Zoppolo *et al.*, 2015, Cabrera *et al.*, 2016). Además, la climatología nacional es muy favorable a la incidencia de enfermedades fúngicas, principalmente sarna del manzano (*Venturia inaequalis*) y sarna del peral (*Venturia pyrina*). Estas condiciones predisponentes, sumadas a la susceptibilidad de los cultivares, llevan a la dependencia de fungicidas de síntesis para obtener producciones de calidad, aunque los costos productivos sean aumentados. Otro problema es el riesgo de generación de resistencia en los patógenos frente a las moléculas de fungicidas más específicos, lo que lleva a más y menos eficientes aplicaciones para poder controlar las infecciones (Mondino, 2003; Mondino *et al.*, 2012). Todo esto lleva a que sean necesarias hasta 15 aplicaciones de fungicidas para mitigar la incidencia de las enfermedades como la sarna del manzano en cultivos que no presenten resistencia, aumentando así la probabilidad de que queden trazas de estos productos sobre la fruta, llegando al consumidor final, además de todos los efectos sobre la salud de los productores, trabajadores y el ambiente.

Entre los manzanos, los cultivares del tipo Red Delicious conforman el grupo más importante, ocupando el 66,5% (1.512 ha) de la superficie destinada a este cultivo. Lo siguen en importancia el grupo de cultivares del tipo Gala y el grupo Pink Lady® (Cripp's Pink, Rosy Glow y Lady in Red); luego, el cultivar Granny Smith; y, por último, el grupo de cultivares tipo Fuji (DIEA-MGAP, 2020a). La mayoría de los cultivares de manzanos plantados en Uruguay fueron evaluados en el INIA, destacándose el cultivar Red Chief, que es el más plantado de todos (592 ha) (DIEA-MGAP, 2020a). Del cultivar original surgió una mutación espontánea nacional que fue identificada en la empresa frutícola Migranja SA en el año 2002, y que el INIA evaluó y recomienda desde el año 2006. Este clon se destaca por estar libre de virus (AMV y CLSV) y presentar plantas vigorosas y muy productivas, con producciones más estables entre los años, y frutos de mejor sobrecolor que los otros clones y cultivares del tipo Red Delicious (Soria y Pisano, 2009). El primer cultivar de manzanos uruguayo fue Gala Fult, perteneciente al Vivero Los Sauces, del ingeniero agrónomo Fernando Rocca. En este caso, el INIA estuvo involucrado en su evaluación en diferentes portainjertos, en desarrollo internacional y en difusión en la comunidad científica (Cabrera *et al.*, 2012; Cabrera y Rodríguez, 2013; Dini *et al.*, 2019). Uno de los grandes avances en el área de agroecología fue la evaluación desde 1999, por parte del INIA, de una colección de cultivares y selecciones provenientes en su gran mayoría de

Epagri Estação Experimental Caçador (Caçador, Santa Catarina, Brasil). Esas evaluaciones culminaron con la recomendación en 2007 del cultivar de manzano Condessa, que presentó un muy buen comportamiento productivo y buena adaptación climática a las condiciones nacionales (Figura 2A). 'Condessa' presenta bajos requerimientos de frío (entre 350 y 400 horas de frío menores a 7,2 °C). Además, posee resistencia horizontal a sarna del manzano y baja susceptibilidad a oídio (*Podosphaera leucotricha*), siendo validado bajo módulos de producción integrada y orgánica (Soria y Pisano, 2005, 2007). Siguiendo en esta línea de investigación y apuntando a tener más cultivares con resistencia genética, principalmente a sarna del manzano, el INIA continuó introduciendo y evaluando otros materiales (selecciones y cultivares) desde Epagri y desde el Consorzio Italiano Vivaisti (civ) de Ferrara, Italia. Estos materiales aún siguen en evaluación, aunque se puede destacar a los cultivares Fujion (Figura 2B), del civ, y Monalisa (Figura 2C), de Epagri. El primero es un cultivar del grupo tipo Fuji, pero con resistencia vertical a sarna del manzano; se presenta como una planta productiva que produce frutos similares a otros clones del grupo Fuji en sobrecoloración y calidad organoléptica. En el caso del cultivar Monalisa, es un cultivar bicolor que se cosecha en la época del grupo Gala, pero se diferencia de todos los clones de este grupo por presentar resistencia vertical a sarna del manzano, siendo de buena adaptación climática, productivo y con frutos de buena calidad organoléptica y sobrecoloración roja.

FIGURA 2. CULTIVARES DE MANZANOS CON RESISTENCIA A SARNA: CONDESSA (A), FUJION (B) Y MONALISA (C)



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a los portainjertos para manzano, del uso de semilla se pasó mayoritariamente a la utilización de portainjertos clonales, destacándose el caso de la serie East Malling (EM), así como los de uso más frecuente actualmente en el país, M9 y M7. Estos portainjertos son fáciles de propagar, compatibles con los cultivares, enanizantes, precoces, muy productivos y resistentes a la podredumbre de cuello (*Phytophthora* spp.), pero no así al pulgón lanígero (*Eriosoma lanigerum*), lo que ha representado una limitante (Cabrera y Rodríguez, 2020).

En los últimos años, el INIA ha evaluado y liberado para su propagación comercial portainjertos de la serie Geneva®. Estos portainjertos son resistentes a la podredumbre de cuello, al pulgón lanígero y a la bacteria causante del fuego bacteriano (*Erwinia amylovora*). Esta última no se encuentra en nuestro país, siendo una enfermedad cuarentenaria. Estos portainjertos tienen la capacidad, entre otras cosas, de ser enanizantes en diferente grado, no producir rebrotes, ni “burknots” (Cabrera y Rodríguez, 2020). Muchos de los portainjertos de la serie Geneva® vienen siendo utilizados en diferentes regiones productoras de manzana del mundo. Entre los de la serie, los más plantados son: Geneva® 41, en Estados Unidos; Geneva® 202, en Nueva Zelanda; y Geneva® 213, en Brasil. En el año 2001, el INIA firmó un acuerdo de evaluación con la Universidad de Cornell (EE. UU.) y se introdujeron al país los portainjertos Geneva® 16, 41 y 935. De estos fueron evaluados el Geneva® 41 y el Geneva® 16. En el año 2017 fueron introducidos los Geneva® 202, 210, 213, 214 y 814. En 2019 se comenzó una nueva etapa de evaluación a campo de estos portainjertos, con diferentes cultivares y sistemas de conducción, para caracterizar en diferentes zonas del país la interacción genotipo-ambiente y continuar seleccionando combinaciones cultivar/portainjerto que optimicen la sustentabilidad y la rentabilidad del cultivo de manzana. A nivel comercial, actualmente se encuentran disponibles, en nuestro país, los portainjertos Geneva® 41, Geneva® 202 y Geneva® 213.

En el caso de los perales, el cultivar Williams ocupa el 87,8% (559 ha) de la superficie total dedicada a la producción de esta especie (DIEA-MGAP, 2020a). Esta concentración de la producción de pera en un solo cultivar, sumado a la variabilidad climática, hace que la producción de este frutal en Uruguay presente grandes variabilidades, sin que se pueda obtener una producción eficiente con alta calidad, ni aceptabilidad del consumidor en el mercado interno, y solo una baja oportunidad en un mercado externo. Siendo así, en las últimas ocho zafras, los productores nacionales de pera vieron en tres de ellas (2012-2013,

2015-2016 y 2017-2018) sus producciones gravemente afectadas (Zoppolo *et al.*, 2015, 2021; Cabrera *et al.*, 2016). El cultivar Williams fue descubierto en 1765 en Inglaterra y desde ese entonces se difundió por todo el mundo, siendo hoy uno de los más plantados. En Uruguay, la calidad de los frutos y la homogeneidad de las producciones entre años son diferentes entre los montes comerciales. Eso motivó al INIA a instalar en 2017 un ensayo en el que se reunieron 17 orígenes diferentes de ‘Williams’ (montes nacionales antiguos, introducciones de otros países, entre otros). Ese ensayo culminó en 2018, con la recomendación de ‘Williams clon N°13’, que se destaca por presentar mejor calidad de frutos (piel y forma) y producciones más homogéneas entre años, incluidas las zafas posteriores a inviernos de baja acumulación de frío (Dini *et al.*, 2015, 2018, 2021).

En cuanto al portainjerto de perales, a diferencia de lo que pasa en manzano, es frecuente utilizar otra especie, como es el caso del membrillo (*Cydonia oblonga*), para reducir el tamaño final del árbol y mejorar la precocidad. En nuestro país, esto ha generado algunos problemas porque el cultivar Williams, que es el principal en nuestras plantaciones, presenta problemas de incompatibilidad con algunos portainjertos. Por ello, en las últimas dos décadas se ha trabajado en la identificación de nuevos portainjertos. Los principales portainjertos evaluados y disponibles son el membrillero BA29 y los de la serie OHxF, 333 y 40 (Cabrera *et al.*, 2021a, 2021b). Estos portainjertos OHxF, por ser de la misma especie que el peral (*Pyrus communis*), tienen la particularidad de ser compatibles con todos los cultivares, lograr muy buena precocidad en la entrada en producción, siendo muy eficientes en productividad. Si bien hoy no está presente en nuestro país la enfermedad llamada fuego bacteriano, es destacable que estos portainjertos, además, sean resistentes a *Erwinia amylovora*, la bacteria que la causa, permitiendo su uso prevenir problemas a futuro.

Considerando la variabilidad existente en cuanto a la adaptación climática en los cultivares (Cabrera *et al.*, 2016) y portainjertos (Zoppolo *et al.*, 2021) de peral que se encuentran plantados en Uruguay o dentro del Banco Activo de Germoplasma del INIA Las Brujas, y con el objetivo de mejorar la adaptación climática, a partir del año 2012 se comenzaron las actividades de mejoramiento propiamente dicho en esta especie (Pisano *et al.*, 2018), contando hoy con varias selecciones propias del INIA, en diferentes fases de evaluación.

Actualmente, enmarcado en el nuevo proyecto de mejoramiento en fruticultura del INIA (2021-2025), uno de los componentes es dedicado exclusivamente al cultivo del peral, donde los dos principales objetivos están asociados a la resistencia genética a la sarna del peral y a la adaptación climática (reducir requerimientos de frío). Con esto se resalta la importancia y el enfoque que están teniendo, no solo el programa de mejoramiento, sino todo el Programa Nacional de Investigación en Producción Frutícola del INIA, en lo que respecta a la transición de la fruticultura nacional hacia sistemas con bases agroecológicas. Por otro lado, el programa de mejoramiento en fruticultura del INIA comenzó, muy recientemente, a realizar cruzamientos dirigidos, con el objetivo de obtener cultivares propios con resistencia genética a sarna del manzano, adaptados a las condiciones de cultivo nacionales, productivos y con buena calidad organoléptica.

2.3. Frutales nativos

En Uruguay, existen especies vegetales nativas (árboles y arbustos) que producen frutas comestibles, muy conocidas y apreciadas por los pobladores locales, aunque estas frutas participan escasamente de la cadena de alimentos del país (Vignale *et al.*, 2016). Paulatinamente se van difundiendo y eso ha llevado a algunos productores a iniciar su cultivo, y a más consumidores, a utilizarlos y consumirlos. Esto promueve la comercialización en los mercados locales; por ejemplo, en el año 2021 se concretaron las primeras ventas en la Unidad Agroalimentaria Metropolitana (UAM). Las razones que explican el interés por parte de los productores y la demanda por parte de los consumidores pueden ser varias: valorar nuestros frutos, querer reivindicar nuestras raíces, ampliar las opciones alimenticias con diferentes frutas, sabores y aromas distintos, valor nutricional y nutraceutico, entre otras (Ibáñez y Ferrari, 2020). Incluir estos frutales en el esquema productivo también genera más diversidad, permitiendo desconcentrar o diversificar los momentos en que deben realizarse las tareas sobre los cultivos, así como ampliar las fechas de cosecha y oferta de fruta fresca.

Aprovechando el potencial identificado en los frutos nativos, y el hecho de que Uruguay es parte del centro de origen primario de ellos, el INIA priorizó esta línea de trabajo. Sumando esfuerzos con la Facultad de Agronomía (Universidad de la República) y el Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP) a través de la Dirección General Forestal

(DGF), se planteó desarrollar un programa de selección de frutas nativas. Las acciones iniciadas en el año 2000 se basaron en la prospección y colecta de materiales frutícolas, su instalación en Jardines de Introducción y en predios de productores, para su caracterización y evaluación. Se destacan cinco de las diez especies estudiadas: guayabo del país (*Acca sellowiana*), pitanga (*Eugenia uniflora*), arazá (*Psidium cattleianum*), guaviyú (*Myrcianthes pungens*) y cereza de monte (*Eugenia involucrata*) (Vignale *et al.*, 2016; Cabrera *et al.*, 2018). Desde ese programa, se han obtenido importantes avances en la caracterización y evaluación de numerosos genotipos de frutales nativos, destacándose guayabo del país y arazá, de los que se cuenta con materiales seleccionados y propagados. Por otra parte, se han desarrollado protocolos de industrialización, talleres de formación y promoción del cultivo, proyectos agroecológicos, huertas familiares y escolares y proyectos regionales (Vignale *et al.*, 2016). Entre todas las especies de frutales nativos, los mayores logros se han obtenido con guayabo del país, siendo que en 2018 se inscribieron en el Registro Nacional de Cultivares (RNC) del Instituto Nacional de Semillas (INASE) las tres primeras selecciones nacionales de esta especie (Cabrera *et al.*, 2018). Estas selecciones, hoy cultivares, son registradas bajo los nombres de INIA Fagro Isleña, INIA Fagro Cerrillana e INIA Fagro Artillera (Figura 3). Se destacan por su calidad y el tamaño de frutos, una productividad homogénea entre años, capacidad de propagación vegetativa, y con una ventana de cosecha que entre las tres comprende desde fines de febrero hasta inicios de mayo (INIA-UDELAR/Fagro-MGAP/DGF, 2021).

FIGURA 3. PRIMEROS TRES CULTIVARES NACIONALES DE GUAYABO DEL PAÍS: INIA FAGRO ISLEÑA, INIA FAGRO CERRILLANA E INIA FAGRO ARTILLERA



Fuente: Elaboración propia.

De forma paralela al programa de prospección y selección, se llevó a cabo por parte del mismo grupo de trabajo liderado por la Fagro, el INIA y la DGF un programa de hibridaciones dirigidas, con el objetivo de mejorar y combinar características deseables en las especies pitanga, guayabo del país y arazá (Vignale *et al.*, 2016). Más recientemente, en el nuevo proyecto de mejoramiento en fruticultura del INIA (2021-2025), uno de los componentes es dedicado exclusivamente a los frutales nativos, priorizándose el guayabo del país y el arazá.

Profundizar en la investigación y en la valorización de los frutales nativos favorecerá su desarrollo, conservación y utilización en forma sustentable (Vignale *et al.*, 2016). Además, todas estas especies de frutales nativos son de gran valor y pasibles de incluir en el diseño de sistemas agroecológicos frutícolas, ya que están muy bien adaptadas a las condiciones nacionales de cultivo y presentan resistencia a la mayoría de las enfermedades que están presentes en el sistema frutícola, no siendo necesaria la aplicación de insumos especiales para su cultivo. La principal limitante son las moscas de la fruta (*Anastrepha fraterculus* y *Ceratitis capitata*), para cuyo control es necesario utilizar diferentes estrategias, como puede ser el trapeo masivo y otras (véase el Capítulo 2), compatibles con un marco productivo agroecológico.

3. Otras especies

Contar con material genético desarrollado localmente tiene sus ventajas, a pesar de los desafíos que ello implica. Los avances logrados en el INIA con los programas de mejoramiento genético así lo demuestran (Pareja *et al.*, 2011). Por ello resulta clave considerar las nuevas oportunidades existentes en las que el INIA ha encaminado esfuerzos y empiezan a generarse resultados.

El cultivo de la vid es un rubro muy asociado a la fruticultura nacional y con mucha historia en el país. Es una actividad de gran importancia para el desarrollo económico, social y cultural. Además de ser generadora de renta, la vitivinicultura aporta un valor histórico e identitario. En Uruguay existe una rica historia de producción de vinos, que comenzó hace más de 200 años. Actualmente se cuenta con un total de 5.991 ha, distribuidas en 1.213 viñedos (INAVI, 2020). El cultivar Tannat, introducido al país a fines del siglo XIX, ha sido el preferido por gran parte del sector (Disegna *et al.*, 2014), ocupando en la actualidad el 35% (1.610 ha) de la superficie total de viñedos destinados a la producción de vinos

(INAVI, 2020) y posicionando al vino Tannat como producto de identidad uruguaya a nivel mundial. Trabajos del grupo de investigación del INIA Las Brujas se han enfocado en el estudio del comportamiento de diferentes clones de 'Tannat' bajo las condiciones del país. Colectas en antiguos viñedos permitieron identificar 14 clones uruguayos con mejor potencial que los franceses originales y que permiten conciliar altos niveles de producción de azúcares y color con altos rendimientos (Disegna *et al.*, 2014). Sin embargo, al igual que los clones franceses (comercialmente disponibles), todos ellos son susceptibles a las principales enfermedades del cultivo.

El mercado mundial de alimentos y en particular el del vino atraviesan un proceso de cambio estructural con importantes modificaciones en los hábitos de consumo, orientados a mayores exigencias en la inocuidad de los productos y sustentabilidad de los sistemas productivos. Legislaciones más restrictivas y consumidores más exigentes vienen presionando para que los sistemas productivos agropecuarios minimicen las aplicaciones de agroquímicos (Disegna *et al.*, 2009). El mildiu (*Plasmopora viticola*) es, junto con la podredumbre gris de los racimos (*Botrytis cinerea*), una de las principales enfermedades de la vid en Uruguay y en todas las regiones del mundo con altos índices de pluviosidad y humedad relativa alta, siendo su control el objetivo de la mayoría de las aplicaciones de fungicidas a lo largo del ciclo vegetativo. A diferencia de lo que ocurre con la podredumbre gris de los racimos, donde la investigación nacional ha demostrado que mediante el manejo cultural es posible reducir significativamente la incidencia de la enfermedad (Coniberti *et al.*, 2013, 2015, 2017), en el caso del mildiu eso no ocurre.

Una de las estrategias más efectivas adoptadas para dar respuesta a estas exigencias es la resistencia genética. Para el mildiu han sido mapeados 20 loci de resistencia, identificados con las siglas *Rpv* (VIVC, 2017). En este sentido, uno de los principales componentes del actual proyecto de mejoramiento genético en fruticultura es el mejoramiento genético de la vid, con énfasis en la resistencia genética a mildiu. Para eso se introdujeron cultivares PIWI (por la palabra en alemán *pilzwiderstandsfähige* que quiere decir "resistente a hongos") (PIWI, 2017), de Rauscedo (Italia) que poseen genes *Rpv* de resistencia y están siendo evaluados en las condiciones agroclimáticas nacionales. Además de evaluar directamente estos cultivares y su posible recomendación para cultivo en Uruguay, se comenzó a usar estos genotipos dentro de un programa de mejoramiento con el que se busca incorporar esta resistencia al 'Tannat'. Para eso se

iniciaron hibridaciones dirigidas y con el empleo de marcadores moleculares y fenotipado, se detecta en las progenies los individuos que poseen esos genes de resistencia.

El cultivo del olivo, una especie originaria del Cáucaso y del área del mar Mediterráneo, viene realizándose en el mundo desde hace milenios. Esta es otra de las alternativas que tiene un lugar importante en la producción frutícola actual de nuestro país. En las últimas décadas, su principal producto, el aceite de oliva, ha tenido un marcado crecimiento de demanda y consumo a nivel mundial. En Uruguay, actualmente, hay cerca de 8.000 ha en producción a partir de un nuevo impulso de plantación que se inició en el año 2001 (DIEA-MGAP, 2020b). Sin embargo, producto de viejas plantaciones y gracias a un relevamiento realizado por la FagrouDELAR y el INIA en todo el país, se ha identificado un número importante de árboles que tienen características destacadas, ya sea por su excelente estado sanitario, por su desarrollo o por la calidad de su fruta (Pereira *et al.*, 2018). Muchos de estos materiales, que se han sumado al banco activo de germoplasma en INIA Las Brujas, no pueden identificarse con ninguno de los cultivares comerciales conocidos en el mundo. Esto representa un patrimonio y una ventaja que deben capitalizarse, para nuestros productores en particular y para toda la sociedad, en general. En esa línea van importantes esfuerzos que se realizan de modo articulado entre el INIA y la Fagro.

Un tercer cultivo que se destaca es el de los pecanes. Es una especie originaria de América del Norte y cuya domesticación se inició, a diferencia del olivo o de la vid, no hace más de 200 años. La nuez pecán es uno de los frutos secos con mayor crecimiento de consumo y demanda en el mercado internacional, dadas sus características y cualidades nutricionales. La adaptación de este cultivo a nuestras condiciones se ha podido constatar gracias a las primeras plantaciones realizadas en el país en la década de 1960 por visionarios emprendedores, así como en recientes estudios (Fasiolo y Zoppolo, 2014; Varela *et al.*, 2015). Aquel esfuerzo inicial dio lugar a la plantación de varias hectáreas a partir de semillas, configurando una importante fuente de variabilidad. Dentro de esa población, se han identificado 14 individuos destacados por su calidad de fruta y por su condición de no verse afectados por la sarna del pecán (*Cladosporium caryigenum*). Esta es la principal enfermedad que en nuestras condiciones de cultivo puede requerir intervención para su control. Disponer de materiales tolerantes o resistentes será una pieza clave para el diseño de cultivos en sistemas agroecológicos. La identificación

de esos materiales y el rescate de los conocimientos locales son una nueva oportunidad y una gran responsabilidad que el INIA viene encarando en los últimos años.

4. Perspectivas futuras

La importancia del material vegetal utilizado para plantar es clara en cuanto al condicionamiento de lo que se cosecha. Pero también es determinante con respecto a qué proceso productivo es factible implementar y qué prácticas se podrán o no, y deberán o no aplicarse.

Con el uso de cultivares locales y/o adaptados, es claro el beneficio agronómico que se logra obteniendo mejores rendimientos y calidad. Los cultivares que se van liberando desde el programa de mejoramiento genético constituyen una pieza clave para un sistema más resiliente, que logre una mejor estabilidad productiva en la variabilidad de situaciones climáticas por las que atraviesa nuestro país. Esto tiene un efecto favorable en la dimensión productiva que implica mejorar el potencial de kilos producidos por hectárea y su estabilidad a lo largo de los años.

A su vez, el proceso productivo que puede implementarse contando con cultivares locales resistentes a enfermedades y plagas es de un impacto ambiental mucho menor, con menos necesidad de intervenciones basadas en insumos externos. Este enfoque, con el uso de material local, potencia la expresión de los procesos biológicos, llegando a un equilibrio del sistema que muchas veces termina generando una reducción de los costos productivos por reducir la necesidad de insumos y los requerimientos de mano de obra para las intervenciones. Es claro que el aprendizaje y el seguimiento de los procesos del sistema agroecológico requieren de un observador calificado, y productores y técnicos se encuentran ante un desafío de mayor profundidad que ante la implementación de un sistema convencional.

Sin duda, el resultado final que se busca es alcanzar un sistema más sano, siendo el uso de los materiales evaluados y desarrollados localmente una pieza clave que facilita su implementación y funcionamiento. Este sistema genera un ámbito de trabajo más saludable para el productor y los trabajadores, y cuyo producto será más saludable para los que lo consuman, generando a nivel social un impacto más que deseable.

La producción orgánica, o bajo un sistema basado en los principios agroecológicos, es una de las alternativas más sostenibles, sino la más, de producción a largo plazo, siendo de gran importancia actual y proyección

futura. Sin embargo, la investigación nacional en producción frutícola es escasa, ya que años atrás no existía una fuerte demanda por parte de los consumidores y del sector productivo, y no se logró en aquel momento, desde la investigación, proyectarse y adelantarse institucionalmente a los tiempos que venían (Zoppolo, 2014). En la actualidad, el panorama ha cambiado, los consumidores comienzan a estar más informados y a demandar productos más inocuos, producidos bajo sistemas más sustentables, trazables y con el menor uso posible de agroquímicos. En esta situación, e intentando apoyar y aportar para esa transición agroecológica, el INIA está priorizando esta área de investigación. En este sentido, el mejoramiento genético es fundamental para lograrlo, obteniendo genotipos mejor adaptados y con resistencia genética a las principales plagas y enfermedades, requiriendo así menos insumos externos para obtener buenas producciones y que sea una alternativa viable para los productores uruguayos, permitiéndoles continuar con su vocación productiva, generando por lo tanto un favorable impacto social. Finalmente, no es menor la ventaja que significa contar con material propio para el país, asegurando la disponibilidad de plantas para los productores y proporcionando un elemento más en la construcción de soberanía alimentaria y un aporte en la economía del país.

Referencias

Cabrera, D., Pisano, J., Rodríguez, P. y Zoppolo, R.

(2016), “Los cultivares de peral de esta zafra: Williams Precoz, Packham’s Triumph y Abate Fetel”, en *Revista INIA Uruguay*, 44, pp. 25-28. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5575/1/Rev.INIA-2016-No44-p.25-28.pdf>>.

Cabrera, D. y Rodríguez, P.

(2013), “Evaluación de la primera variedad de manzana uruguaya ‘Gala Fult’: roja, crocante, jugosa y temprana”, en *Revista INIA Uruguay*, 33, pp. 55-58. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1849/1/128221120713141828.pdf>>.

Cabrera, C. y Rodríguez, P.

(2014), “Portainjertos para duraznero”, en Soria, J. (ed.), *Manual del duraznero. La planta y la cosecha*, Boletín de Divulgación 108, INIA, Montevideo, pp. 61-83. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8747/1/bd-108-p.61-83.pdf>>.

Cabrera, D. y Rodríguez, P.

(2020), “Evaluación de portainjertos para manzano - Portainjertos de la serie Geneva®: mayor eficiencia y sostenibilidad en la producción de manza-

na”, en *Revista INIA Uruguay*, 61, pp. 73-76. Disponible en: <<http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/Rev-INIA-61-Junio-2020-p-73-76.pdf>>.

Cabrera, D., Rodríguez, P. y Rocca, F.

(2012), “Resultados experimentales. Evaluación de manzana ‘Gala Fult’ sobre diferentes portainjertos”, en *Programa Nacional Producción Frutícola. Frutales de pepita*. Seminario de actualización técnica, Serie Actividades de Difusión 687), INIA Las Brujas, Canelones (Uruguay), pp. 99-105. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11481/1/sad-687-p.99-105.pdf>>.

Cabrera, D., Rodríguez, P., Uberti, A. y Zoppolo, R.

(2021a). “Productive behavior of ‘Williams’ pear (*Pyrus communis* L.) grafted onto different rootstocks” [Conference paper], en *Acta Horticulturae*, 1303, pp. 145-150. DOI: <<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1303.22>>. En: Acta Horticulturae (ISHS) 1303: XIII International Pear Symposium, Montevideo.

Cabrera, D., Rodríguez, P., Uberti, A. y Zoppolo, R.

(2021b), “‘Williams’ pear (*Pyrus communis* L.) productivity and fruit quality when grafted onto different rootstocks” [Conference paper], en *Acta Horticulturae*, 1303, pp. 523-528. DOI: <<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1303.71>>. En: Acta Horticulturae (ISHS) 1303: XIII International Pear Symposium, Montevideo.

Cabrera, D., Vignale, B., Machado, G., Rodríguez, P., Zoppolo, R. y Nebel, J. P.

(2018), “Primeras selecciones registradas de guayabo del país en Uruguay”, en *Revista INIA Uruguay*, Nº 52, pp. 29-32. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8964/1/Revista-inia-52-7.pdf>>.

Coniberti, A., Ferrari, V., Dellacassa, E., Boido, E., Carrau, F., Gepp, V. y Disegna, E.

(2013), “Kaolin over sun-exposed fruit affects berry temperature, must composition and wine sensory attributes of Sauvignon blanc”, en *European Journal of Agronomy*, v. 50, pp. 75-81.

Coniberti, A., Ferrari, V., Disegna, E., Dellacassa, E., García Petillo, M. y Lakso, A. N.

(2017), “Under-trellis cover crop and planting density to achieve vine balance in a humid climate”, en *Scientia Horticulturae*, v. 227, pp. 65-74.

Coniberti, A., Ferrari, V., Lakso, A. N., García Petillo, M. y Disegna, E.
(2015), “Under-trellis cover crop and deficit irrigation to control vegetative vine growth in a humid climate”, en *Group of international experts of vitivinicultural systems for cooperation*, Gruissan (Francia).

DIEA-MGAP

(2016), *Encuesta frutícola de hoja caduca, Zafra 2016*, Serie Encuestas, 338, INIA, 22 pp. Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia->

agricultura-pesca/datos-y-estadisticas/estadisticas/encuesta-fruticola-hoja-caduca-zafra-2016-nro-338>.

DIEA-MGAP

(2020a), *Anuario estadístico agropecuario 2020*, 23^a ed., Anuario Estadístico Agropecuario del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, realizado por la Oficina de Estadísticas Agropecuarias (DIEA), 270 pp. Disponible en: <<https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2020/ANUARIO2020.pdf>>.

DIEA-MGAP

(2020b), *Resultados del “Primer censo de productores de Olivos”*, Estadísticas Agropecuarias. Disponible en: <<https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/noticias/diea-presenta-resultados-del-primer-censo-productores-olivos>>.

Dini, M., Cabrera, D., Rodríguez, P. y Zoppolo, R.

(2019), “Gala Fult: The first Uruguayan apple cultivar”, en *Crop Breeding and Applied Biotechnology*, 19(1), pp. 135-140. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12658/1/190406-Gala-Fult-The-first-Uruguayan-apple-cultivar-CBAB.pdf>>.

Dini, M. y Pisano, J.

(2021), “INIA Santa Lucía’: nuevo cultivar de duraznero creado por INIA”. *Hortifruticultura. Revista INIA Uruguay*, 64, pp. 63-67. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/15416/1/Revista-INIA-64-Marzo-2021-p-63-67.pdf>>.

Dini, M., Pisano, J., Cruz, J. y Soria, J.

(2015), “Seleção clonal em pereira cv ‘Williams’ no Uruguai” [Resumo], en *América Latina e Caribe*, 10. Bento Gonçalves. Anais... Sociedade Brasileira de Recursos Genéticos, [s.l.]: p. 61. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14211/1/Dini-M.-Anais-X-Sirgealc-2015.pdf>>.

Dini, M., Pisano, J. y Soria, J.

(2021), “Clonal selections of ‘Williams’ pear in Uruguay” [Conference paper], en *Acta Horticulturae*, febrero, 1303, pp. 131-138. DOI: <<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1303.20>>. En: *Acta Horticulturae* (ISHS) 1303: XIII International Pear Symposium, Montevideo.

Dini, M., Pisano, J. y Soria, J.

(2018), “Clonal selection of ‘Williams’ pear in Uruguay” [abstract of poster], en: Zoppolo, R. Cabrera, D. (eds.), *Growing in diversity. Proceedings of the International Pear Symposium*, 13, 4-7 de dic., Montevideo, p. 66. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12518/1/P1-Dini-M.-Abst.-Pear-Symp.-13.-2018.pdf>>.

Dini, M., Pisano, J. y Zoppolo, R.

(2020), “Nuevos cultivares de ciruelo japonés disponibles para la fruticultura uruguaya”, en *Revista INIA Uruguay*, 60, pp. 66-70. Disponible en: <<http://inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/Rev-INIA-60-Marzo>>.

2020-p-66-70.pdf?fbclid=IwAR2lJrctVz7CZCcwZFawM7dc_ouzhbsU41crQ
Ai6v119NvUsoleqrUttJR0>.

Disegna, E., Coniberti, A., Boido, E., Fariña, L., Ferrari, V., Varela, P., Casco, N. y Dellacassa, E.

(2009), “Vino ‘Tannat’ del Uruguay: un alimento sano y saludable para quien lo consume”, en *Revista INIA*, v. 20, pp. 38-40.

Disegna, E., Coniberti, A. y Ferrari, V.

(2014), “Clones de Tannat en Uruguay”, INIA Las Brujas, *Boletín de Divulgación INIA*, 109, 12 pp.

Fasiolo, A. y Zoppolo, R.

(2014), “Alternativa para la producción frutícola: nuez pecán”, en *Revista INIA Uruguay*, N° 38, pp. 37-42. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/3552/1/Rev.INIA-2014-No38-p.37-42.pdf>>.

GRAS-INIA

(2021), *Banco datos agroclimático*. Disponible en: <<http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>>.

Ibáñez, F. y Ferrari, V.

(2020), “Las ‘superfrutas’ nativas del Uruguay y por qué tenemos que avanzar en el desarrollo de su cadena de producción-comercialización”, en *Revista INIA Uruguay*, 61, pp. 69-72. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14497/1/Rev-INIA-61-Junio-2020-p-69-72.pdf>>.

INAVI

(2020), *Estadísticas de viñedos 2020., Datos nacionales*. Disponible en: <<http://www.inavi.com.uy/uploads/vinedo/0e7b891cadeaa92c8fe1290c6e60449ab31cea23.pdf>>.

INIA

(2020a), *Folleto ciruelos serie INIA GB*. Disponible en: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/Folleto_ciruelas_INIA_2020.pdf>.

INIA

(2020b), *Folleto ciruelo japonés INIA Reyna Mary*. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14600/1/Folleto-ciruelas-INIA-Reyna-Mary-2020.pdf>>.

INIA-UDELAR- Facultad de Agronomía-MGAP/DGF

(2021), *Guayabo del país (Acca sellowiana (Berg.) Burret). Primeras selecciones registradas en Uruguay* [folleto], INIA, Montevideo. Disponible en: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/Guayabo_del_pais_triptico_2021.pdf>.

Mondino, P.

(2003), “Enfermedades fúngicas del manzano”, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo. Disponible en: <http://www.pv.fagro.edu.uy/fitopato/enfermedades/Sarna_del_manzano.htm>.

Mondino, P., Alaniz, S. y Leoni, C.

(2010), “Manejo integrado de las enfermedades del duraznero en Uruguay”, en

Soria, J. (ed), *Manual del duraznero: manejo integrado de plagas y enfermedades*, INIA Boletín de Divulgación N° 99, INIA, Montevideo, pp. 45-76. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8742/1/Bd-99-p.45-76.pdf>>.

Mondino, P., Casanova, L., Celio, A., Leoni, C. y Alaniz, S.

(2012), “Situación de la resistencia a trifloxystrobin y difenoconazole de poblaciones de *venturia inaequalis* en Uruguay, estrategias de manejo”, en *Programa Nacional Producción Frutícola. Frutales de pepita. Seminario de actualización técnica*, INIA Las Brujas, Canelones, pp. 35-44. (INIA Serie Actividades de Difusión; 687). Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/11477/1/sad-687-p.35-44.pdf>>.

Pareja, M., Bervejillo, J., Bianco, M., Ruiz, A. y Torres, A.

(2011), *Evaluación de los impactos económicos, sociales, ambientales e institucionales de 20 años de inversión en investigación e innovación agropecuaria por parte del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) - Uruguay*, Resumen ejecutivo, INIA, Montevideo, 41 pp. (INIA Ediciones Especiales). Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/1252/1/18429151211092410.pdf>>.

Pereira, J., Bernal, J., Martinelli, L., Villamil, J. J. y Conde, P.

(2018), “Original olive genotypes found in Uruguay identified by morphological and molecular markers”, *Acta Horticulturae*, mayo de 2018, 1199, pp. 7-13. DOI: <<https://10.17660/ActaHortic.2018.1199.2>>. en *Acta Horticulturae* (ISHS) 1199: VIII International Olive Symposium.

Pisano, J. y Dini, M.

(2019), INIA 04.01-14: Ciruelo de estación para el sur de Uruguay. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/13910/1/SAD-793-Prunus-PP-P30M4.pdf>>.

Pisano, J., Dini, M. y Soria, J.

(2018), “European pear selections adapted to mild winters in Uruguay” [abstract of poster], en Zoppolo, R. y Cabrera, D. (eds.), *Growing in diversity. Proceedings of the International Pear Symposium*, 13, 4-7 de dic. de 2018, Montevideo, p. 92. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12524/1/P27-Pisano-J.-Abst.-Pear-Symp.-13.-2018.pdf>>.

Pisano, J., Dini, M. y Zoppolo, R.

(2018), “BRS Rubimel’: nuevo cultivar de duraznero temprano de pulpa amarilla para consumo en fresco”. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12385/1/Revista-INIA-55-diciembre-2018-p.24-30.pdf>>.

Pisano, J., Soria, J., Dávila, J. y Zoppolo, R.

(2016), “Resultados en cultivares de ciruelo japonés para la zona norte de Uruguay”. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5576/1/Rev.INIA-2016-No44-p.29-33.pdf>>.

Pisano, J., Soria, J. y Dini, M.

(2014), “Polinizadoras para el ciruelo japonés INIA 04.01-14”. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/266895875_Polinizadoras_para_el_ciruelo_japones_INIA_0401-14>.

PIWI

(2017), *PIWI International 2017*. Disponible en: <<http://www.piwi-international.de>>.

Soria, J., Maeso, D., De Lucca, R. y Zeballos, R.

(2004), “Serie Moscato: variedades de durazneros creadas en Uruguay por la Digegra y el INIA”. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7008/1/18429190412171137.pdf>>.

Soria, J. y Pisano, J.

(2005), *Avances en evaluación de nuevas manzanas en INIA Las Brujas: variedad Condessa*, Serie Actividades de Difusión 395, INIA Las Brujas, Canelones (Uruguay), pp. 7-8. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/421/1/111219220807104108.pdf>>.

Soria, J. y Pisano, J.

(2007), “Condessa: Nueva variedad de manzana temprana y tolerante a sarna”, en *Revista INIA*, 12, pp. 23-25. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/902/1/18429270508145540.pdf>>.

Soria, J. y Pisano, J.

(2009), Comportamiento de algunas variedades de manzano y polinizadoras ornamentales (crabs) en INIA Las Brujas, Serie Actividades de Difusión 561, INIA Las Brujas, Canelones (Uruguay), 17 pp. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2404/1/18429250309155548.pdf>>.

Soria, J. y Pisano, J.

(2011), “Selección 04.01.14 ciruelo japonés creado en INIA Las Brujas”. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2345/1/18429280111150543.pdf>>.

Soria, J. y Pisano, J.

(2014), “Variedades de duraznero y nectarina para el Uruguay”, en Soria, J. (ed.), *Manual del duraznero. La planta y la cosecha.*, Boletín de divulgación INIA, N° 108, pp. 85-163. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8748/1/bd-108-p.85-163.pdf>>.

Soria, J., Pisano, J. y Carrau, F.

(2003), “Variedades de ciruelo em Uruguay”, en *INIA; Programa Fruticultura. Actualización Técnica en el Cultivo del Ciruelo. Seminario Regional*, 27 de mayo de 2003, Serie Actividades de Difusión N° 315, INIA Las Brujas, Canelones (Uruguay), pp. 99-114. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/7377/1/sad-315-LB-2003.pdf#page=101>>.

Soria, J., Pisano, J., De Lucca, R. y Zeballos, R.

(2012), “Pavía Sauce: nueva variedad seleccionada a partir de una población local de durazneros tardíos en Uruguay”. Disponible en: <<http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219230807163921.pdf>>.

Varela, V., Takata, V., Camussi, G. y Zoppolo, R.

(2015), “Pecan: viability of a new crop in Uruguay”, en *Acta Horticulturae*, 1070, pp. 245-251, DOI: <<https://10.17660/ActaHortic.2015.1070.28>>.

Vignale, B., Cabrera, D., Machado, G. y Rodríguez, P.

(2019), “Avances en los estudios de frutas nativas”, en *INIA; Programa Nacional Producción Frutícola. Encuentro Nacional sobre Frutos Nativos*, 9°. Fiesta Nacional del Guayabo del País, Paso Severino, Florida; 28-29 de marzo de 2019, Serie Actividades de Difusión N° 789, INIA, Canelones (Uruguay), pp. 3-6. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/14354/1/SAD-789-Vignale-B.-et-al..pdf>>.

Vignale, B., Cabrera, D., Rodríguez, P. y Machado, G.

(2016), “Selección de frutales nativos en Uruguay”, en *Horticultura Argentina*, v. 35, 87, pp. 19-29. Disponible en: <<https://www.horticulturaar.com.ar/es/articulos/seleccion-de-frutales-nativos-en-uruguay.html>>.

VIVC

(2017), “Table of loci for traits in grapevine relevant for breeding and genetics”, en *Sieboldingen: Vitis International Variety Catalogue, 2017*. Disponible en: <http://www.vivc.de/docs/dataonbreeding/20170904_Table%20of%20Loci%20for%20Traits%20in%20Grapevine.pdf>.

Zoppolo, R.

(2014), “Producción orgánica en el cultivo del duraznero”, en Soria, J. (ed.), *Manual del duraznero. La planta y la cosecha*, INIA Boletín de Divulgación 108, INIA, Montevideo, pp. 255-279. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/8752/1/bd-108-p.255-279.pdf>>.

Zoppolo, R., Leoni, C., Cabrera, D. y Fasiolo, A.

(2015), “Zafra particular para los frutales de hoja caduca. Varios factores han afectado la producción”, en *Revista INIA Uruguay*, N° 43, pp. 31-36. Disponible en: <<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/5393/1/Rev.INIA-2015-No43-p.31-36.pdf>>.

Zoppolo, R., Rodríguez, P., Uberti, A., Santana, A. S., Coniberti, A. y Cabrera, D.

(2021), “Influence of climatic factors on productivity of ‘Williams’ pear trees on different rootstocks”, en *Acta Horticulturae*, febrero de 2021, 1303, pp. 251-258. DOI: <<https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1303.36>>. Article history: Published 5 February 2021. In: *Acta Horticulturae (ISHS) 1303: XIII International Pear Symposium*, Montevideo, Uruguay.

Capítulo 18

Investigación y aplicación de la mejora genética animal para una producción ganadera más sostenible

Olga Ravagnolo, Ignacio Aguilar, Gabriel Ciappesoni
y Elly Ana Navajas

1. Introducción

Las herramientas tecnológicas disponibles actualmente para el mejoramiento genético animal permiten modificar las características de las distintas poblaciones (vacunos, ovinos y otras especies) con el fin de obtener un mayor beneficio. La modificación genética de las principales características productivas posibilita mejorar la eficiencia de los procesos productivos y aumentar la rentabilidad de las empresas pecuarias, en cuyo proceso es indispensable asegurar sostenibilidad ambiental y social.

La mejora continua de las condiciones de producción (nutrición, sanidad y manejo) orientada a aumentar la productividad de los distintos rubros somete a los animales a cambios ambientales a los que deben adaptarse y responder en forma cada vez más acelerada. Este proceso de adaptación a las condiciones de producción incluye cambios en el *pool* genético de la población. Por medio de las herramientas disponibles, la mejora genética puede orientar este proceso de adaptación al ambiente productivo a favor de los intereses de los productores, instituciones o del propio país.

A partir de lo anterior, es necesario y relevante definir cuáles son esos intereses. Esta definición no es estática y ha cambiado a lo largo de la historia. Lo que se buscaba en los animales años atrás puede ser diferente a los intereses o necesidades actuales o futuras para con los mismos. Esta definición debe contemplar el retorno económico del productor agrope-

cuario y/o del país y, además, contemplar rasgos que hacen a la sostenibilidad ambiental y social de los sistemas de producción, incluyendo al bienestar animal.

A modo de ejemplo, en Uruguay se dispone de índices de selección para bovinos y ovinos que indican el direccionamiento desde un punto de vista económico con las herramientas de selección disponibles a la fecha. Existe además evaluación genética poblacional para eficiencia de conversión (Efc) en bovinos y ovinos. Adicionalmente, en ovinos, se evalúa la resistencia genética a parásitos (nematodos) gastrointestinales a través del recuento de huevos por gramo (HPG) de materia fecal. Estas características de gran relevancia económica no han sido aún incorporadas a los índices económicos de selección, pero pueden ser utilizadas para complementar las decisiones de selección. Su valor económico reside en la reducción de gastos (alimento y antihelmínticos, respectivamente) además de en su efecto ambiental, que debería ser incorporado en el momento de cuantificarlos económicamente. Recientemente se publicó un trabajo con el enfoque puesto en las ganancias deseadas para estas características (Sánchez *et al.*, 2021), que propone una incorporación de la evaluación de HPG a los índices de selección.

La predicción de todos los rasgos económicamente relevantes se realiza a partir de registros del desempeño de animales recolectados en sistemas de producción nacionales, es decir, en situaciones cercanas a las condiciones ambientales bajo las cuales la próxima generación deberá producir. De esta manera, se favorecerá el desempeño de la descendencia en la situación productiva a la que será expuesta. Esto no siempre ocurre: ejemplos de ello se dan cuando la selección se basa en forma indiscriminada en información genética de animales produciendo en ambientes muy diferentes a los nacionales.

En el Uruguay, los programas de mejoramiento genético en bovinos para carne y para leche y en ovinos se realizan desde hace más de 25 años mediante acuerdos de trabajo entre las instituciones relacionadas con la mejora genética animal. Con respecto a las diferentes especies y razas, participan, junto con el INIA, las Sociedades de Criadores, la Asociación Rural de Uruguay (ARU), el Instituto Mejoramiento y Control Lechero Uruguayo (MU), el Instituto Nacional de la Leche, el Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL), la Facultad de Agronomía (FA) y la Facultad de Veterinaria (FV). Estos convenios tienen como objetivos principales:

- Desarrollar un esquema operativo para la ejecución de evaluaciones genéticas.

- Desarrollar investigaciones tendientes a identificar objetivos y criterios de selección de animales.
- Consolidar un sistema de registros que permita, a nivel del productor, una captura de información efectiva y eficiente para todas las razas.
- En ovinos se incluye adicionalmente la producción de reproductores, con el objetivo de facilitar el acceso de determinadas razas o cruza a establecimientos comerciales, la mayoría a través de convenios como ser Merilín Plus, Corriedale Pro, TexPro y Merino australiano.

Este proceso conjunto ha llevado a que, desde hace muchos años, las evaluaciones genéticas estén establecidas, afianzadas, y funcionando en forma fiable. La información generada es pública y está disponible para criadores, productores comerciales, empresas y público en general, siendo asiduamente utilizada como herramienta de selección y promoción de reproductores.¹

En años recientes se incorporaron al proceso de las evaluaciones genéticas aspectos que implican una modificación relevante de la rutina de las evaluaciones genéticas, así como de la información a usar para la selección de reproductores. Estos se refieren a la incorporación de la información genómica, que provee predicciones de valores de cría de mayor precisión (a edades más tempranas), así como a la determinación del nivel de parentesco real entre dos individuos, y abren la posibilidad de seleccionar por características de difícil medición (como la resistencia a parásitos y emisiones de metano). A su vez, potencian las evaluaciones genéticas internacionales (Interbull en Holando y Panamericana en Hereford) en las que Uruguay participa. Por otra parte, el establecimiento de una conexión genética entre las evaluaciones genéticas y determinados rodeos/majadas experimentales del INIA es actualmente (en el caso de Efc, emisiones de metano y HPG) y será fuente de información relevante para características que no son posibles de medir en los predios no experimentales o que están en desarrollo, por tener potencial futuro de selección.

¹ Véase: <www.geneticabovina.com.uy>, <www.geneticalechera.com.uy>, <www.geneticaovina.com.uy>.

2. Mejoramiento genético en Uruguay

Los programas de mejoramiento genético de una raza tienen como objetivo identificar y promocionar los animales que mejor se adaptan a las condiciones de producción existentes y que, al mismo tiempo, mejoren el beneficio económico de las explotaciones. Para esto es necesario valerse de información objetiva y precisa sobre los reproductores, que permita tomar decisiones de selección y hacer un uso diferencial de los mismos. La herramienta recomendada para tomar estas decisiones consiste en las diferencias esperadas en la progenie (DEP o EPD, según su sigla en inglés), que surgen como resultado de las evaluaciones genéticas poblacionales. Ellas proveen la predicción del potencial genético futuro de la progenie de un individuo y proporcionan a partir de la información disponible la mejor descripción genética de un animal, permitiendo compararlo con animales de otros rodeos, de otras edades, e incluso con antepasados. Los índices de selección, que son una combinación de dichas DEP, permiten identificar los animales que maximizarán el retorno económico para el sistema de producción definido. Más recientemente, como se verá más adelante, se está planteando la definición de objetivos agroecológicos de selección (Phocas *et al.*, 2016), los cuales incorporan otras características que no tienen directamente un valor económico en el mercado.

2.1. Mejoramiento genético en bovinos para carne en Uruguay

Uruguay dispone de evaluaciones genéticas poblacionales desde el inicio de los años 90, gracias al trabajo de la Facultad de Agronomía, el INIA, la Sociedad de Criadores Aberdeen Angus y la Sociedad de Criadores Hereford de Uruguay. Para esto fue necesario establecer sistemas de registros y de aporte de mediciones e información por parte de las cabañas y de ARU. Los registros de todas las razas de bovinos son llevados adelante en el Sistema de Registros Genéticos (SRGen),² un sistema desarrollado por el INIA que permite recolectar la información completa de cada animal desde que nace hasta que sale del rodeo. En la actualidad, los programas de evaluación genética en las diferentes razas se realizan en colaboración con varias instituciones nacionales (ARU, Sociedades de Criadores, FA, FV) e internacionales (*Animal Genetics and Breeding Unit*, Theta

² <<http://srgen.inia.uy/>>.

Solutions, Programa de evaluación de reproductores del Brangus Latinoamericano). Se dispone de evaluación genética para características asociadas al crecimiento de los animales como peso al nacer, destete, habilidad lechera y peso a los 18 meses, que fueron las primeras en implementarse. Posteriormente fueron incorporadas características vinculadas a la calidad del producto (área del ojo del bife, espesor de grasa subcutánea medidas por ultrasonido) y circunferencia escrotal. A estas se les agregó peso adulto de la vaca al destete, contenido de grasa intramuscular (por ultrasonido), facilidad al parto directo y materno. En el caso de la raza Hereford, se dispone además de índices de selección para sistemas productivos criadores y de ciclo completo, y DEP para eficiencia de conversión de alimento (Efc). En algunas razas se han implementado evaluaciones genómicas y en otras se está en proceso de construcción de la población de referencia para su implementación. Se han realizado estimaciones preliminares de parámetros genéticos nacionales para características reproductivas, a partir de los registros recolectados a través del SRGen, que concluirán con la implementación de DEP reproductivas.

Tras casi tres décadas desde la publicación del primer catálogo de padres, en el año 1992, las evaluaciones genéticas son un proceso consolidado, con un crecimiento sostenido en el tiempo. Se incorpora anualmente la información de más de 25 mil animales pertenecientes a más de 350 cabañas. Las DEP son una herramienta conocida y utilizada por los productores en el momento de realizar la compra de reproductores.

2.2. Mejoramiento genético en ovinos en Uruguay

En la actualidad son numerosas las evaluaciones genéticas que se llevan a cabo en Uruguay, siendo un sitio de privilegio a nivel mundial. A mediados de los años 90, varias razas comenzaron con la evaluación de carneros provenientes de diferentes cabañas, a través del desempeño de su progenie en las denominadas centrales de prueba de progenie (CPP). Muchas de estas CPP sirvieron como semilla para el desarrollo de las evaluaciones genéticas poblacionales (EGP) que hoy se publican en forma rutinaria. Desde el año 2005, las EGP se realizan bajo el marco del convenio "Sistema Nacional de Mejoramiento Genético Ovino" firmado entre la ARU, la FA de la Universidad de la República, el SUL y el INIA. Estas dos últimas instituciones son las responsables de su ejecución anual. En la actualidad, se dispone de EGP para las razas: Corriedale, Highlander,

Ideal, Ile de France, Merilín, Merilin PLUS, Merino Australiano, Merino Dohne, Poll Dorset, Romney Marsh y Texel.

En la última década, y muy especialmente en los últimos años, se ha observado un crecimiento exponencial del número de cabañas participantes en las evaluaciones genéticas y del número de animales registrados. Esta situación permitirá sin dudas, a través de una base genética más amplia y usando tecnología de avanzada, un mayor progreso genético en caracteres de importancia económica en los sistemas de producción ovina del país que utilizan las razas evaluadas. Actualmente se está desarrollando la población de entrenamiento en varias razas, lo que permitió realizar la primera evaluación genómica en la raza Merino australiano en 2021 y a futuro, la de otras razas como Corriedale y Texel.

Como en otros países de referencia (*e.g.* Australia, Francia, Nueva Zelanda), en Uruguay se incluye la resistencia genética a nematodos gastrointestinales (NGI) en las evaluaciones poblacionales y se utiliza el HPG como criterio de selección (Goldberg *et al.*, 2012). Cuando se consulta a los cabañeros y productores respecto de las principales características a mejorar, la resistencia a NGI siempre aparece como una prioridad. Sin embargo, en el momento de tomar los registros son menos las cabañas que se suman, dado que su registro es laborioso y requiere la expresión de la enfermedad en los animales, con la consecuente pérdida económica. Es por esta razón que es una característica opcional dentro de los programas de mejora. Esta evaluación se realiza en las razas Merino y Corriedale desde el año 1994. En los últimos años ha incrementado, tanto en número de cabañas como de animales registrados, y se incluyeron recientemente cabañas de las razas Merino Dohne y Merilín.

2.3. Mejoramiento genético en bovinos para leche en Uruguay

El sistema nacional de evaluación genética de razas lecheras está integrado por la ARU, el Instituto Nacional de la Leche, Mejoramiento y Control Lechero de Uruguay, la Sociedad de Criadores de Holando, la Sociedad de Criadores de Jersey, la FA de la Universidad de la República y el INIA, y provee de estimaciones de méritos genéticos para animales de las razas Holando y Jersey. Las evaluaciones genéticas poblacionales nacionales comenzaron durante los años 90 con la evaluación genética para producción de leche en la raza Holando. En el transcurso de los años se han incorporado otros rasgos de relevancia económica, como la producción de sólidos de la leche (proteína y grasa), rasgos de conformación lineal,

fertilidad en hembras y, más recientemente, rasgos de salud de la ubre (medida por el recuento de células somáticas). Por otro lado, varios de estos rasgos han sido combinados en un índice de selección, el índice económico productivo (IEP), que inicialmente ponderaba rasgos de producción y se actualiza en conjunto con la incorporación de nuevos rasgos en la evaluación genética. Recientemente se ha incorporado la raza Jersey al sistema de evaluación genética nacional y dispone de estimaciones de méritos genéticos para los rasgos ya mencionados, a excepción de conformación lineal e IEP. En la actualidad se está implementando la evaluación genética para rasgos de longevidad en ganado lechero, que permitirá la predicción de méritos genéticos en el corto plazo para estos rasgos de relevancia económica.

El Uruguay participa, desde el año 2012, de la evaluación genética internacional de la raza Holando (Interbull). Esto permite disponer de méritos genéticos de toros importados o para importar que aún no han tenido hijas en Uruguay, expresados en la misma escala de la evaluación genética nacional. La información de méritos genéticos de la evaluación nacional e internacional se publica tres veces al año (abril, agosto, y diciembre), siguiendo el calendario de publicación de Interbull. La misma involucra a más de 160 mil toros y se encuentra disponible para su consulta pública.³ Al igual que en el caso de bovinos para carne, se encuentra en desarrollo la población de entrenamiento que permitirá la inclusión de la información genómica en las evaluaciones genéticas nacionales.

3. Alternativas genéticas para mejorar la sostenibilidad agropecuaria

3.1. Alternativas para reducir el uso de fármacos en la producción agropecuaria

Los NGI representan una de las principales limitantes sanitario-económicas para la producción ovina en el Uruguay y en el mundo (Castells *et al.*, 1995). Si bien esta enfermedad provoca cierto porcentaje de mortalidad, lo más frecuente es la enfermedad subclínica, con una reducción en la tasa de crecimiento, en la fertilidad, en la producción de leche y de

³ En el sitio web <geneticalechera.com.uy>.

lana, y en la condición corporal, resultando en grandes pérdidas para los productores (Castells *et al.*, 1995). Históricamente, se han utilizado las drogas antihelmínticas (ATH) como el principal método de control de los parasitismos gastrointestinales. Su uso incorrecto y continuo ha generado a nivel mundial graves problemas de resistencia de los parásitos a las mismas.

La selección por animales más resistentes a NGI repercute en la mitigación de los efectos productivos adversos de las parasitosis (producción, mortalidad) y en la reducción de aplicaciones de productos sintéticos (ATH), disminuyendo a su vez la contaminación de las pasturas. Uno de los primeros pasos de la investigación en la línea de resistencia a NGI ha sido evaluar la posibilidad de selección por HPG –dicho en términos genéticos, si existe varianza aditiva, cuál es la magnitud de la heredabilidad– y qué relación tiene con otros rasgos productivos de interés económico (estimación de correlaciones genéticas). Se entiende por heredabilidad la proporción de la variación fenotípica que es debida a la variación genética total. La misma indica el grado en que un carácter fenotípico está determinado genéticamente. Cuanto menor es esta, mayor es la influencia ambiental. Las correlaciones genéticas expresan el grado de asociación por efectos genéticos comunes entre dos características.

Las estimaciones de heredabilidad, en Uruguay, fueron de una magnitud media-baja, siendo $0,15 \pm 0,01$ para Merino (Ciappesoni *et al.*, 2013) y $0,21 \pm 0,02$ para Corriedale (Castells, 2009), demostrándose la posibilidad de realizar mejora genética en estos caracteres. A su vez, gracias a las moderadas o nulas correlaciones genéticas entre el HPG y los rasgos productivos para las razas Merino y Corriedale en Uruguay, se pudo determinar que es posible progresar genéticamente en forma simultánea. Las correlaciones genéticas con los pesos de vellón son neutras (cercasas al cero) o de baja magnitud, moderadamente favorables con peso de cuerpo a la esquila y levemente desfavorables con el diámetro de la fibra (Ciappesoni *et al.*, 2013 y Castells, 2009, respectivamente).

Adicionalmente, se estudió la relación del criterio clásico de selección (HPG en corderos/borregos) con la resistencia a NGI de las ovejas durante el fenómeno denominado alza de lactación. Para este estudio se realizaron al menos tres mediciones de HPG en las ovejas durante el periparto. Estos estudios estimaron una alta correlación genética entre ambas características y concluyeron que es más eficiente seleccionar los corderos para mejorar la resistencia de las ovejas que medir directamente a

estas madres (Goldberg *et al.*, 2012). Como estrategia complementaria, desde el año 2020 se comenzó a estudiar una majada de ovinos criollos en el INIA Las Brujas, en condiciones comerciales. Se está evaluando la resistencia a NGI, tanto en corderos como durante el alza de lactación en comparación con razas comerciales, como una primera etapa para la potencial valorización de estos recursos zoogenéticos locales.

3.2. Alternativas para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero por unidad de producto

La mejora genética de características relevantes de los sistemas de producción pecuaria puede contribuir a la reducción de emisiones por unidad de producto (intensidad de emisiones, IE) a través de una mayor productividad. En primer lugar, una mayor productividad permite mantener la producción, reduciendo el stock y, con él, la IE. Estudios internacionales indican que la selección genética tendiente a la reducción de pérdidas e ineficiencias contribuye tanto a menores IE en la cría y en la invernada como a la sustentabilidad económica. La mejora por selección de los índices reproductivos y reducción de la mortalidad participa en forma favorable de la disminución de las IE en bovinos (Quinton *et al.*, 2018) y ovinos (Wall *et al.*, 2010). Más allá de esto, otro desafío es cómo incrementar la producción de proteína animal que demanda el mundo, pero reduciendo las emisiones de metano (EM). En este sentido, se ha determinado que tasas de crecimiento eficientes pueden aportar a la mitigación de las EM al ser posible alcanzar edades de servicios más tempranas e invernadas que permitan la faena de animales jóvenes, en la medida en que estas mejoras no estén asociadas con incrementos de consumo de alimento (Barwick *et al.*, 2019).

Un aspecto importante para considerar es que las EM tienen una asociación positiva con el consumo de alimento. Es decir que la reducción de consumo reducirá las EM, pero en desmedro del desempeño productivo. Sin embargo, con la mejora en la eficiencia de conversión del alimento (Efc) es posible reducir el consumo sin afectar la producción. Además de la importancia económica de la Efc por la reducción de los costos de alimentación, la mayor Efc podría contribuir a la disminución de la IE. Desde 2014 se han realizado mediciones de consumo individual de alimento y Efc en novillos y toritos Hereford en la central de prueba de Kiyú (Navajas *et al.*, 2014), contando con estimaciones de

mérito genético para esta característica (Ravagnolo *et al.*, 2018) (proyecto RTS_1_2012_3489, con financiamiento de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII)). Las estimaciones de DEP genómicas para Efc se realizaron en colaboración con la Canadian Hereford Association y su base de datos, constituyendo una población de referencia binacional para selección genómica. Actualmente, se están llevando adelante estas mediciones, también en corderos de las razas Merino australiano, Merino Dohne, Corriedale y Texel de los núcleos de selección y majadas experimentales de estas razas.

En forma complementaria a la reducción de las emisiones que se pueda lograr a través de los programas de mejoramiento actuales y el aporte de FFC, también es posible la reducción de las EM a partir de la selección directa por esta característica. Recientemente se han desarrollado equipamientos para la medición de las EM, la cual además es heredable ($\sim 0,23$) (Brito *et al.*, 2018; Lassen y Difford, 2020). Actualmente se están llevando adelante mediciones de metano en los ovinos con evaluación de Efc. Para ello, se utilizan cámaras de acumulación portátiles (PAC, por sus siglas en inglés) y la información relevada permitirá investigar la genética de EM, su asociación con Efc y demás características incluidas en los programas ovinos de mejora genética. Este conocimiento contribuirá a optimizar la mejora genética teniendo en cuenta las dimensiones económica y ambiental. Dado que los fenotipos de Efc y EM son de compleja medición, la mejora genética se verá beneficiada por la implementación y el uso de la selección genómica.

Los estudios nacionales en Efc y EM en ovinos son posibles gracias a proyectos nacionales (CL38, RUMIAR INIA) e internacionales, como SMARTER⁴ y GrassToGas⁵ (Figura 1).

4 <<https://www.smarterproject.eu/>>, financiado por el programa Horizon 2020 de la Unión Europea Grant Agreement N° 772787.

5 Proyecto financiado por el INIA bajo el llamado en conjunto 2018 (proyecto con financiación INIA, bajo la Convocatoria Conjunta 2018 de las tres ERA-NETS (SusAn, FACCE ERA-GAS e ICTAGRI 2, <<https://www.eragas.eu/en/eragas/Research-projects/GrassToGas.htm>>).

FIGURA 1. LOGOS DE PROYECTOS SMARTER, GRASSTOGAS Y RUMIAR



Fuente: *Elaboración propia.*

La iniciativa GrassToGas busca generar conocimiento y soluciones para la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector ovino a través del trabajo conjunto de expertos del Reino Unido, de Francia, Noruega, Turquía, Nueva Zelanda y Uruguay.

3.3. Uso de índices de selección

A lo largo de los años, se ha demostrado que los animales responden en forma muy significativa a las decisiones de selección, logrando modificar la mayoría de los rasgos de las diferentes poblaciones productivas. Es, por lo tanto, sumamente importante la dirección de esas modificaciones y los índices de selección son la herramienta más recomendada para establecerla. Si bien hay varias metodologías para generar estos índices, la más utilizada actualmente es la presentada por Hazel (1943) y explicada por Ponzoni y Newman (1989), en donde se debe definir un sistema de producción que se considera será representativo para las próximas generaciones. En este sistema se identifican y cuantifican económicamente las variables biológicas (animales) que afectan la rentabilidad del sistema, y se genera un índice que optimiza este retorno económico. Posteriormente se predice de la forma más precisa posible estos rasgos en los animales a través de la evaluación genética poblacional. Esto permite computar el o los índices de selección para cada animal y así seleccionar aquellos que generan el mayor retorno económico al sistema de producción. El Uruguay dispone de índices de selección de datos genéticos para las razas Merino desde el 2000 (en 2011, actualización), Corriedale (2003 y 2015, actualización), Hereford (2012), Holando (2012), Merilin (2012), Ideal (2016) y Merino Dohne (2021). Estos desarrollos fueron posibles gracias a las evaluaciones genéticas poblacionales establecidas y a los trabajos de

investigación orientados a objetivos de selección nacionales (Urioste *et al.*, 1998; Rivero Viera, 2004; Rovere *et al.*, 2010, Soares de Lima, 2009; Pravia *et al.*, 2014, De los Campos *et al.*, 2000, Gimeno y Ciappesoni, 2016), de instituciones nacionales (INIA, SUL, FA) y a la interacción con las sociedades de criadores.

El éxito del uso de estos índices en generar un mayor retorno económico a través del mejoramiento genético dependerá de que se cumplan varias condicionantes. La primera es la construcción correcta de los índices, por lo que es relevante disponer de una definición adecuada del sistema de producción en términos de promedios productivos y económicos de cada componente biológico de alcance económico, sumado a una definición adecuada de los parámetros genéticos de la población a seleccionar (heredabilidad y correlaciones genéticas de los rasgos relevantes). La segunda es un sistema de evaluación genética que permita predecir con la mayor precisión posible cada rasgo relevante de forma de tener índices de selección precisos para la mayoría de los candidatos a seleccionar. Por último, es indispensable que estos índices sean utilizados por quienes toman las decisiones de selección, por lo que es necesario construirlos en conjunto con los agentes trascendentes en la cadena de mejora genética de cada raza, disponer de adecuadas estrategias de transferencia, así como asegurarse la publicación en tiempo y forma de toda la información generada. Aquí se destaca el proceso realizado en conjunto con las sociedades de criadores, compartiendo saberes para diseñar los índices más adaptados a nuestros sistemas de producción.

En los últimos años se ha incorporado una visión agroecológica a los objetivos de selección (Phocas *et al.*, 2016), en la cual se incluyen rasgos relacionados con sanidad, robustez, reproducción, producción y eficiencia, impacto ambiental, genética original, calidad de producto y adaptación. Varias de estas características se evalúan en forma aislada, pero todavía no se cuenta con un índice agroecológico formal que pondere estos diferentes aspectos.

3.4. Uso de cruzamientos bovinos para carne

Los cruzamientos son apareamientos de animales de diferentes poblaciones (razas o líneas) y se utilizan para explotar las diferencias raciales, la heterosis o vigor híbrido y la complementariedad entre las razas. Ninguna raza es superior en todos los rasgos que afectan los sistemas de producción, por lo que el uso inteligente de las fortalezas de cada una

de ellas en diferentes caracteres permite complementar rasgos de los animales en beneficio del sistema. De esta forma, se pueden combinar dos o más razas permitiendo que el potencial genético coincida con los recursos alimenticios, con el ambiente climático o con las preferencias del mercado.

Los sistemas de cruzamientos demandan la definición de objetivos claros y una planificación para llevarlos adelante. Es necesario determinar cuáles son las características que se quieren mejorar, evaluar las razas disponibles, planificar el diseño y analizar la forma de lograr su implementación. Se recomienda utilizar razas que permitan solucionar las limitantes y que estén disponibles en el país. Se deben utilizar reproductores evaluados genéticamente, de manera de asegurar que sean superiores para esas características dentro de cada raza. En nuestro país hay poco más de una decena de razas de bovinos para carne disponibles, existiendo evaluaciones genéticas para varias características en las razas mayoritarias.

Los resultados nacionales (Gimeno, 2002a; Lema *et al.*, 2011) coinciden en destacar la superioridad de las hembras cruza frente a las puras en características hasta el destete, así como en características reproductivas (Pereyra *et al.*, 2015; Martínez-Boggio *et al.*, 2021). La utilización de hembras cruza permite obtener mayores pesos al destete y el aumento oscila entre 6 y 15% en cruza británicas y entre 3 y 32% para vacas cruza entre razas británica y cebuínas. Novillos de cruza simple de hembras británicas, con toros de otra raza británica o una raza continental o toros cebuínos, superan el desempeño de novillos de raza pura, lo que se refleja en mayor ganancia diaria y en una tasa de crecimiento relativa superior en el período destete-peso al año y entre el peso a los 15 meses y el peso a los tres años (Gimeno *et al.*, 2002b).

En otras situaciones, el uso de toros de razas de alto crecimiento (continentales) sobre vacas de tamaño moderado (*e.g.* británicas) permite generar productos de alto crecimiento (sobre madres de tamaño menor y, por tanto, con menores requerimientos de mantenimiento). El uso de cruzamiento con proporción de razas cebuínas o de razas sintéticas (o compuestas) como Braford y Brangus incorpora parte del vigor híbrido sin perder completamente los beneficios de las británicas en calidad de canal y carne, y pudiendo incorporar mayores niveles de resistencia a ectoparásitos (Cardoso *et al.*, 2015).

Los sistemas de cruzamientos estabilizados no constituyen una tecnología ampliamente adoptada en la producción ganadera nacional, siendo

prevalente el uso de sistemas productivos con razas puras. En momentos en que se incorpora alguna raza al sistema de producción (por ejemplo, el uso de toros Angus sobre rodeos de otra raza), en forma mayoritaria evolucionan hacia el descarte de la raza nueva o hacia la absorción completa del rodeo por la misma.

Este contexto resulta en una menor explotación o una explotación parcial de los beneficios generados por los cruzamientos. Esto abre una gran oportunidad para que la adopción efectiva de los cruzamientos sea una forma rápida de mejorar el retorno económico, logrando efectos positivos sobre la sostenibilidad ambiental, dada la mayor productividad obtenida.

3.5. Uso de información genómica

La disponibilidad de plataformas de genotipado masivo en conjunto con el desarrollo de metodologías bioinformáticas han permitido disponer de herramientas de selección utilizando miles de marcadores moleculares distribuidos en todo el genoma, conociéndose en la actualidad como “selección genómica” (Meuwissen *et al.*, 2001). Paneles con miles de marcadores (del tipo polimorfismos de un solo nucleótido, o SNP, por sus siglas en inglés) se encuentran disponibles y han sido utilizados en varias poblaciones de animales a nivel nacional, tanto en rodeos y majadas experimentales como a nivel comercial. Las predicciones de méritos genómicos se pueden desarrollar una vez que existen poblaciones de entrenamiento o calibración compuestas por animales con registros de fenotipos y con información genómica.

En Uruguay, la construcción inicial de diferentes poblaciones de entrenamiento ha sido llevada a cabo a través de varios proyectos de investigación y desarrollo. Gracias a estos, el material genético se almacena y procesa a través del Banco de ADN del INIA Las Brujas (Navajas *et al.*, 2012) y la información genómica en una base de datos genómica (db-SNP) administrada por el INIA. Muchas de estas actividades se realizan en el marco del convenio con la ARU, donde son establecidas en conjunto con las sociedades de criadores parte de las actividades a realizar. La implementación de evaluaciones genéticas con información genómica depende de la disponibilidad de poblaciones de entrenamiento o referencia constituidas por la información fenotípica, genética y genómica. Las precisiones de las DEP genómicas aumentan al incrementar el tamaño de las

poblaciones, promoviendo la adopción de la herramienta por el sector productivo (Berry *et al.*, 2016) y, por ende, favoreciendo los procesos de selección.

Varias razas a nivel nacional se encuentran estableciendo dichas poblaciones de entrenamiento, lo cual ha posibilitado la publicación de méritos genéticos utilizando información genómica para la raza Hereford (Ravagnolo *et al.*, 2018) y las primeras evaluaciones genómicas, en 2021, de Angus y, a nivel experimental, de Merino australiano. En otras razas (*e.g.* Holando, Corriedale), estas evaluaciones genómicas estarán disponibles en los próximos años. Esta incorporación se hará mediante la metodología conocida como Single-Step (Aguilar *et al.*, 2010), la cual permite adicionar la información genómica a las evaluaciones genéticas tradicionales, para disponer de un método simple de predicción de méritos genéticos con información molecular o genómica.

4. Posible impacto de las alternativas

4.1. Ovinos más resistentes a nemátodos gastrointestinales

En la raza Merino se ha observado una tendencia genética importante para HPG y se han identificado animales muy resistentes genéticamente. Se ha demostrado que la tendencia corresponde principalmente al material generado en Uruguay y menos a la contribución australiana, contrariamente a lo que pasó con el diámetro de la fibra (Ciappesoni y Gimeno, 2018), como se podía esperar dada la mayor dependencia que tiene esta característica de los efectos ambientales y la epidemiología local. Asimismo, se han desarrollado, por parte del SUL, líneas divergentes (resistente y susceptible) dentro de la raza Corriedale (Castells y Gimeno, 2011), y en la FA, un núcleo de selección por HPG para la raza Merino. Entre los impactos observados de contar con animales más resistentes, más allá del efecto beneficioso en el propio animal y la epidemiología de la majada, se cuenta el de reducir las aplicaciones de drogas, así como su potencial colarario en la biodiversidad de coprófagos o poblaciones no blanco.

4.2. Mejora de eficiencia de conversión y reducción de emisiones

La mejora genética por Efc es posible en la raza Hereford a partir de las estimaciones de las DEP para esta característica. Estas DEP se basan en los fenotipos para consumo de alimento residual (RFI, por sus siglas en inglés) que se han medido en la recría de toritos y novillos a partir del consumo individual de alimento medido en pruebas de 70 días (Figura 2), el peso metabólico promedio, la tasa de crecimiento en ese período y el espesor de grasa medido por ultrasonido al final de la prueba.

La selección en esta característica busca reducir el consumo de alimento sin afectar el desempeño, con un impacto favorable en la reducción de los costos de producción que son explicados en más del 75% por la alimentación.

FIGURA 2. MEDICIÓN DE EFICIENCIA DE CONVERSIÓN Y DE METANO EN LA RAZA HEREFORD EN LA CENTRAL DE PRUEBA DE KIYÚ



Fuente: Elaboración propia.

A solo tres años de iniciada la publicación de las DEP de Efc,⁶ se cuenta con información de una proporción aún reducida de la población como base para la selección. Al disponer de una población de referencia para la estimación de DEP genómicas, en la medida en que aumente la utilización de información genómica por parte del sector productivo es esperable

⁶ <www.geneticabovina.com.uy>.

contar con una mayor cantidad de animales evaluados y potenciar así el progreso genético. Actualmente se cuenta con DEP de consumo y Efc para la raza Merino australiano, y están en desarrollo para otras razas ovinas (Corriedale, Merino Dohne y Texel). Asimismo, en todas estas razas ovinas (Figura 3) y en Hereford se están realizando mediciones individuales de metano, permitiendo seleccionar directamente por esta característica en un futuro cercano (herramienta ya disponible en Merino australiano, a nivel experimental).

FIGURA 3. PLATAFORMA DE FENOTIPADO INTENSIVO PARA OVINOS EN EL INIA LA MAGNOLIA: MEDICIÓN DE CONSUMO INDIVIDUAL Y PESOS CORPORALES (IZQUIERDA), Y DE EMISIONES DE GASES EFECTO INVERNADERO (DERECHA)



Fuente: Elaboración propia.

La mejora en la Efc aumenta a su vez la oferta de servicios ecosistémicos de provisión (carne y lana) y de regulación (atmosférica, en este caso por las menores emisiones de metano).

4.3. Incremento del retorno económicos: índices y cruzamientos

Un ejemplo para mencionar es la raza Hereford, que dispone de índices de selección desde el año 2012 y que incorporó en el año 2019 el índice de ciclo completo, el cual contempla la cría y el engorde en un solo siste-

ma de producción y refleja en forma más cercana el proceso productivo nacional. Las tendencias genéticas indican una mejora, en dicho índice, de unas 530 unidades por año, lo que traducido a unidades monetarias implicaría un incremento anual promedio de entre US\$ 65 y 70, generado por el uso de cada uno de los toros Hereford en el rodeo nacional. Se estima que se incorporan anualmente entre 4.000 y 5.000 toros Hereford al rodeo nacional, lo que significa un beneficio económico nacional relevante.

Los resultados de las evaluaciones genéticas en el país presentan tendencias favorables para las diferentes características, que también son observables en índices de selección en todas las razas. Esta información es pública y puede ser verificada en las páginas donde se publican las evaluaciones genéticas poblacionales ya mencionadas.

Es de destacar que el uso de índices de selección o de los cruzamientos, al aumentar el desempeño animal, no solo impacta en el resultado económico sino también en las emisiones por kg de producto (carne, lana, leche).

El país tiene a futuro un desafío importante que consiste en continuar con la incorporación a las evaluaciones genéticas de las diferentes razas características que permitan el desarrollo de un objetivo de selección agroecológico. Es necesario contemplar en este desarrollo aspectos de sostenibilidad ambiental y social a través de potenciar el intercambio de saberes entre los diferentes actores de las cadenas productivas.

4.5. La era genómica y fenómica

La selección genómica y el registro intensivo de nuevas características (fenómica) permitirán acelerar los procesos de mejora genética, no solo en los rasgos que se registran a nivel comercial (cabañas) sino también en las estaciones experimentales o los núcleos informativos vinculados a las evaluaciones genéticas. De esta forma se podrá acelerar la incorporación de reproductores mejor posicionados en los objetivos de selección agroecológicos definidos.

Asimismo, la genómica brindará un excelente potencial para caracterizar los animales de predios comerciales en cuanto a las principales características definidas y diseñar un programa de mejora que permita trazar transiciones agroecológicas desde el punto de vista genético, dentro de un enfoque general que tenga por objetivo desarrollar un agroecosistema sostenible.

Referencias

Aguilar, I., Misztal, I., Johnson, D. L., Legarra, A., Tsuruta, S. y Lawlor, T. J.

(2010), "Hot topic: A unified approach to utilize phenotypic, full pedigree, and genomic information for genetic evaluation of Holstein final score", en *Journal of dairy science*, 93(2), pp. 743-752.

Barwick, S. A., Henzell, A. L. y Herd, R. M.

(2019), "Methods and consequences of including reduction in greenhouse gas emission in beef cattle multiple-trait selection", en *Genet Sel Evol*, 51, p. 18. Disponible en: <<https://doi.org/10.1186/s12711-019-0459-5>>.

Berry, D. P., Garcia, J. F. y Garrick, D. J.

(2016), "Development and implementation of genomic predictions in beef cattle", en *Animal Frontiers*, pp. 32-38.

Brito, L. F., Schenkel, F. S., Oliveira, H. R., Cánovas, A. y Miglior, F.

(2018), Meta-analysis of heritability estimates for methane emission indicator traits in cattle and sheep. *Proceedings of the World Congress on Genetics Applied to Livestock Production*.

Cardoso, F. F., Gomes, C. C. G., Sollero, B. P., Oliveira, M. M., Roso, V. M., Piccoli, M. L., Higa, R. H., Yokoo, M. J., Caetano, A. R. y Aguilar, I.

(2015), "Genomic prediction for tick resistance in Braford and Hereford cattle", en *J. Anim. Sci.*, 93, pp. 2693-2705.

Castells, D.

(2009), *Evaluación de resistencia genética de ovinos Corriedale a los nematodos gastrointestinales en Uruguay. Heredabilidad y correlaciones genéticas entre el recuento de huevos de nematodos y características productivas*, Tesis de Maestría, Universidad de la República, Montevideo.

Castells, D. y Gimeno, D.

(2011), "Selection of Corriedale sheep for resistance or susceptibility to nematode infection in Uruguay", 23 International Conference of the World Association for the Advancement of Veterinary Parasitology, Buenos Aires.

Castells, D., Nari, A., Rizzo, E., Marmol, E. y Acosta, D.

(1995), Efecto de los nematodos gastrointestinales sobre diversos parámetros productivos del ovino en la etapa de reería. Año II 1991. *Producción ovina* 8, pp. 17-32.

Ciappesoni, G. y Gimeno, D.

(2018), "Innovaciones, logros y desafíos del programa de mejora genética de la raza Merino en el Uruguay", en 10° Conferencia mundial Merino, 12 de abril 2018, Montevideo.

Ciappesoni, G., Goldberg, V. y Gimeno, D.

(2013), "Estimates of genetic parameters for worm resistance, wool and growth traits in Merino sheep of Uruguay", en *Livestock Science*, 157(1), pp. 65-74.

De los Campos, G., De Mattos, D., Montossi, F., San Julián, R. y Frugoni, J. (2000), *Incorporación de las señales de mercado a la toma de decisiones en mejora genética*, Serie de Actividades de Difusión N° 246, INIA Tacuarembó.

Gimeno, D., Aguilar, I., Avendaño, S. y Navajas, E. (2002b), “La ventaja del novillo cruza en sistemas extensivos de producción: períodos de crecimiento: destete - tres años de edad”, en Seminario de Actualización Técnica: Cruzamientos en Bovinos para Carne, Serie Actividades de Difusión N° 295, INIA Tacuarembó, pp. 21-30.

Gimeno D., Avendaño S., Navajas E. y Lamas A. (2002a), “Utilización de cruzamientos como herramienta para el aumento del beneficio económico”, en Seminario de Actualización Técnica: Cruzamientos en Bovinos para Carne, Serie Actividades de Difusión N° 295, INIA Tacuarembó, pp. 5-9.

Gimeno, D. y Ciappesoni, G. (2016), “Mejoramiento genético ovino en Uruguay: conquistas y desafíos”, en Seminario Internacional de Producción Ovina, 50 años del SUL, 1-2 de agosto, Montevideo.

Goldberg, V., Ciappesoni, G. y Aguilar, I. (2012), “Genetic parameters for nematode resistance in periparturient ewes and post-weaning lambs in Uruguayan Merino sheep”, en *Livestock Science*, 147(1-3), pp. 181-187.

Hazel, L. N. (1943), “The genetic basis for constructing selection indexes”, en *Genetics*, 28(6), pp. 476-490.

Lassen, J. y Difford, G. F., (2020), “Review: Genetic and genomic selection as a methane mitigation strategy in dairy cattle”, en *Animal*, 14(3), s473-s483.

Lema, O. M., Gimeno D., Dionello N. J. y Navajas E. A. (2011), “Pre-weaning performance of Hereford, Angus, Salers and Nellore crossbred calves: Individual and maternal additive and non-additive effects”, en *Livestock Science*, 142 (1-3), pp. 288-297.

Martinez Boggio, G., Lema, M., Aguilar, I., Gimeno, D. y Ravagnolo, O. (2021), “Reproductive performance of Angus, Hereford, Salers and Nellore crossbred females: Additive and nonadditive effects”, en *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 138(6), pp. 688-697.

Meuwissen, T. H., Hayes, B. J. y Goddard, M. E. (2001), “Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps”, en *Genetics*, 157(4), pp. 1819-1829.

Navajas, E. A., Pravia, M. I., Lema, M., Clariget, J., Aguilar, I., Ravagnolo, O., Brito, G., Peraza, P., Dalla Rizza, M. y Montossi, F. (2014), “Genetic improvement of feed efficiency and carcass and meat quality of Hereford cattle by genomics”, *Proceedings of the 60th International Congress Meat Science Technology*, pp. 17-22.

Navajas, E. A., Ravagnolo, O., Aguilar, I., Ciappesoni, G., Peraza, P., Dalla-Rizza, M. y Montossi, F.

(2012), *Desarrollo de una plataforma en selección genómica enfocada en el progreso genético animal*, Serie Actividades de Difusión 698, INIA, Montevideo.

Pereyra, F., Urioste, J., Gimeno, D., Peñaricano, F., Bentancur, D. y Espasandín A.

(2015), “Parámetros genéticos en la etapa de cría para el cruzamiento entre Hereford y Angus en campo natural”, en *Agrociencia Uruguay*, 19(1), pp. 140-149.

Phocas, F. et al.

(2016), “Review: Towards the agroecological management of ruminants, pigs and poultry through the development of sustainable breeding programmes: I-selection goals and criteria”, en *Animal*, vol. 10, 11, pp. 1749-1759.

Ponzoni, R. y Newman, S.

(1989), “Developing breeding objectives for Australian beef cattle production”, en *Anim. Prod.*, N° 49, pp. 35-47.

Pravia, M. I., Ravagnolo, O., Urioste, J. I. y Garrick, D. J.

(2014), “Identification of breeding objectives using a bioeconomic model for a beef cattle production system in Uruguay”, en *Livestock Science*, 160, pp. 21-28.

Quinton, C. D., Hely, F. S., Amer, P. R., Byrne, T. J. y Cromie A. R.

(2018), “Prediction of effects of beef selection indexes on greenhouse gas emissions”, en *Animal*, 12, pp. 889-897.

Ravagnolo, O., Aguilar, I., Crowley, J. J., Pravia, M. I., Lema, M., Macedo, F. L. y Navajas, E. A.

(2018), “Accuracy of genomic predictions of residual feed intake in Hereford with Uruguayan and Canadian training populations”, en *Proceedings of the World Congress on Genetics Applied to Livestock Production*, Volume Electronic Poster Session—Species—Bovine (beef) (p. 723).

Rivero Viera, M.

(2004), *Objetivos de selección para un sistema de producción lechero con remisión a planta*, Tesis de grado, Facultad de Agronomía, Universidad de la República, Montevideo.

Rovere, G., Astigarraga, L. y Urioste, J. I.

(2010), “Economic Values For Production And Reproduction Traits In Uruguayan Pasture Based Dairy Systems”, en *Proceedings of the World Congress on Genetics Applied to Livestock Production*.

Sánchez A. L., Bell, W. y Ponzoni R. W.

(2021), “A desired gains approach for the prediction of genetic gain in resistance to gastrointestinal nematodes in a multi-trait breeding objective in Uruguayan Merino sheep”, en *J. Anim. Breed. Genet.*, 00, pp. 1-10.

Soares de Lima, J. M.

(2009), *Modelo bio-económico para la evaluación del impacto de la genética y otras variables sobre la cadena cárnica vacuna en Uruguay*, Tesis de Doctorado, Universidad Politécnica de Valencia, 240 pp.

Urioste, J. I., Ponzoni, R. W., Aguirrezabala, M., Rovere, G. y Saavedra, D.

(1998). “Breeding objectives for pasture fed Uruguayan beef cattle”, en *Journal of Animal Breeding and Genetics*, 115(1-6), pp. 357-373.

Wall, E., Simm, G. y Moran, D.

(2010). “Developing breeding schemes to assist mitigation of greenhouse gas emissions”, en *Animal*, 4, pp. 366-376.

Capítulo 19

La gestión del pastoreo como herramienta para las trayectorias agroecológicas en sistemas lecheros

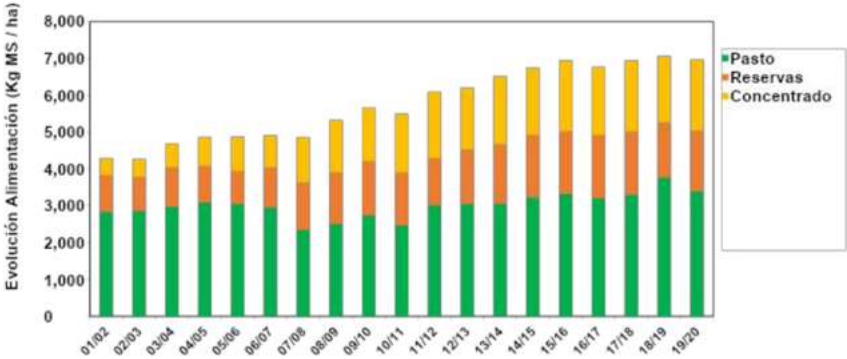
Santiago Fariña

1. Introducción

En los sistemas de producción de leche de Uruguay, el aprovechamiento de forraje en las pasturas es bajo. El potencial de crecimiento de estas pasturas está por encima de las 10 toneladas de materia seca (MS) por ha, tanto a nivel de predios comerciales según lo observado con sistemas de seguimiento forrajero satelital (CONAPROLE, 2021) como en estudios experimentales a escala de tambo completo o *farmlet* (Ortega *et al.*, 2018; Stirling *et al.*, 2021). Sin embargo, los niveles de consumo de pastura por hectárea en los predios comerciales están en torno a las 3 toneladas de MS por pastoreo directo, pudiendo llegar a 5 toneladas si se suman las reservas de forraje generadas en esa superficie.

Esta situación ha determinado que la intensificación de los sistemas productivos en las últimas décadas se haya sostenido en gran medida sobre la base del incremento en el uso de suplementos importados al sistema, en particular el alimento concentrado. Desde 2002 se duplicó la producción de leche en el Uruguay (DIEA, 2017) y, según datos de seguimiento de la Cooperativa Nacional de Productores de Leche (CONAPROLE), en ese período se multiplicaron por cuatro las toneladas por ha de alimento concentrado suministrado a las vacas, mientras que el nivel de pastura consumida por ha solo aumentó el 21% (Battezzore, 2021; *comm. pers.*) (Figura 1).

FIGURA 1. EVOLUCIÓN DE LA ALIMENTACIÓN EN PREDIOS LECHEROS DE PROYECTO COSTOS DE CONAPROLE



Fuente: Battezzore (2021).

Por otra parte, en los sistemas que buscan aumentar su producción de forraje por hectárea existe una clara tendencia a utilizar una proporción creciente de cultivos forrajeros anuales en rotación. Esto responde al mayor potencial de crecimiento en un período corto de tiempo de las especies C4 estivales (e.g. sorgo, maíz,) o especies C3 otoño-invernales (e.g. avena, raigrás) respecto de las praderas plurianuales (Ojeda *et al.*, 2018). Nos referiremos en adelante a esta tendencia utilizando el neologismo “anualización” de las rotaciones forrajeras.

La anualización conlleva cambios importantes en sistemas en los que se produce leche y afectan directamente al ecosistema en su conjunto, con fuertes efectos sobre el sistema suelo-planta. Destacaremos, en este sentido, tres procesos gravitantes: 1) el aumento del tiempo en que el suelo permanece descubierto; 2) los cambios en el tipo y la cantidad de residuos de carbono aportados el suelo; 3) el aumento del tiempo de encierro de los animales.

El aumento en el tiempo con suelo descubierto, o sin cobertura verde, resulta de los períodos de barbecho e implantación necesarios en las rotaciones forrajeras anuales, típicamente cultivos de verano seguidos de cultivos de invierno. Estas “ventanas” de suelo descubierto ocupan aproximadamente 1/3 del año (120 días) y aumentan el riesgo de deterioro ambiental, por al menos tres procesos: más riesgo de erosión durante períodos de lluvias intensas; más riesgo de escurrimiento y/o lavado de

agua y nutrientes; y más aplicaciones de agroquímicos para el control de malezas y plagas durante el barbecho y la implantación.

La anualización también produce un cambio en el tipo de residuos que se depositan o incorporan al suelo y, por ende, la posibilidad de mantener o incrementar la materia orgánica del mismo. Según una reciente revisión (Jackson *et al.*, 2017), los aportes de carbono al suelo a través de las raíces tendrían cinco veces más chances de ser incorporados de forma estable a la materia orgánica que los residuos aéreos. En línea con esto, Ernst y Siri-Prieto (2009) han demostrado localmente que rotaciones de cultivos agrícolas con 2,5 años de pasturas bajo pastoreo aportaban menos carbono total al sistema que los cultivos agrícolas (los animales removían la parte aérea), pero más del doble de biomasa de raíces, resultando en mayor estabilidad de agregados y nitrógeno total en el suelo. Es por esta razón que, por ejemplo, áreas de pasturas templadas permanentes, como lo es el campo natural, tienen un horizonte de materia orgánica más profundo que las de otros cultivos (Jobbágy y Jackson, 2000).

El tercer proceso que agudiza la anualización de las rotaciones forrajeras para producción de leche es el aumento del tiempo de encierro de los animales. Esto surge de que el alto potencial de crecimiento de las especies anuales, especialmente las de verano, se captura mediante cosecha mecánica para ensilaje o henolaje, para luego ser almacenado y suministrado de forma mecánica. Cabe mencionar que muchos productores utilizan cultivos de verano pastoreables: en ese caso, el uso de reservas es usualmente una consecuencia indirecta en el sistema por la alta oferta de forraje en corto tiempo que generan esos cultivos. Si bien no se puede decir que el encierro *per se* conlleva impactos ambientales negativos, aumenta la concentración de N y P en superficie por la excreta de los animales, lo que significa mayor potencial de descarga contaminante en el ambiente (Ciganda y La Manna, 2012) y, por ende, la necesidad de gestionar esos residuos donde fuera factible. Cuando los animales están en pastoreo, la excreta se deposita en suelo con cobertura vegetal que aprovecha los nutrientes excretados.

Según los datos obtenidos de predios comerciales de la CONAPROLE, el costo de un kg de pasto consumido directamente por las vacas es la mitad de lo que cuesta un kg de forraje suministrado como reserva y seis veces menos que un kg de concentrado (49, 97 y 296 US\$/kg MS, respectivamente; Programa de Producción Competitiva 2020-2021). Según el Instituto Nacional de la Leche (INALE), la alimentación representa el 56% de los costos totales de los tambos. Por ende, la participación del pasto en

la dieta de las vacas es lo que permite a los productores mantener costos bajos y adaptarse a precios de leche cambiantes, dado el perfil exportador del país.

Si bien el pasto es esencialmente un alimento barato, su costo depende de la eficiencia en su manejo. Bajas producciones y/o bajos aprovechamientos por hectárea atentan contra el logro de un bajo costo por kilogramo de pasto consumido. Por otro lado, dado que la mayor parte de su costo se produce en la implantación (semilla, fertilizante, labores y agroquímicos), las praderas de corta duración no permiten la “dilución” de los costos de implantación y mantenimiento.

En términos de impacto social, existe creciente evidencia acerca de la percepción de la sociedad en cuanto al rol de las pasturas en la producción. Estudios realizados con ciudadanos en Brasil y Canadá muestran una fuerte asociación por parte de estos entre el acceso al pastoreo al aire libre y el bienestar de las vacas (Hötzel *et al.*, 2017; Schuppli *et al.*, 2014), y un creciente rechazo por sistemas de producción de leche en encierro. En este sentido, existen algunas señales locales respecto de la estrategia comercial de la cadena productiva en torno al pasto. En su página web, el INALE (2021) presenta la producción de leche de Uruguay como a partir de “ganado alimentado en base pastoril a cielo abierto”. La industria láctea que procesa el 70% de la leche de Uruguay, CONAPROLE, participa de una certificación Grass-Fed (*i.e.* alimentado a pasto) mediante la cual garantiza que para el 80% de su leche “la dieta de las vacas en ordeño se compone de 85% o más de pasto, y los alimentos disponibles en el tambo son exclusivamente de origen vegetal” (CONAPROLE, 2021). Si bien los actuales mercados de destino aún no pagan una bonificación por este tipo de leche, la cadena busca un posicionamiento por potenciales beneficios en el largo plazo.

2. Línea de base: ¿cómo se hacen las cosas en el sector lechero?

Trabajos locales recientes han demostrado que los bajos rendimientos anuales de pastura por hectárea responden a deficiencias en el diseño de los sistemas y en la gestión de las pasturas en los mismos (Fariña y Chilibroste, 2019; Méndez *et al.*, 2019).

Respecto del diseño de los sistemas de producción, la primera limitante para el logro de altas cosechas de forraje anual es la carga animal (Baudracco *et al.*, 2010). En Uruguay, la carga promedio de los sistemas de producción de leche está alrededor de una “vaca masa” (suma de vacas

en ordeño y vacas secas) por hectárea destinada a esas categorías, según datos del Programa de Producción Competitiva 2020-2021. Considerando que dichas vacas consumen anualmente cerca de 6 toneladas de MS de alimento total, dentro de las cuales entre 1,5 y 2 toneladas corresponden al concentrado, por más eficiente que sea la gestión del pastoreo, no podrán cosechar anualmente más que su capacidad de consumo (*i.e.* las 4-4,5 toneladas restantes).

En cuanto a la gestión del pastoreo, se evidencia que los productores no ajustan adecuadamente la asignación de forraje y suplemento en función de las variaciones de crecimiento estacionales e intra-estación. En este sentido, en un estudio reciente se ha observado que los sistemas con bajo consumo de pasto, incluso con cargas moderadas a bajas (1,3 vacas/ha), mantenían altos niveles de suplementación con concentrados (7 kg MS/vaca/día) en primavera y verano, cuando contaban con altas disponibilidades de pastura por hectárea (Méndez *et al.*, 2019).

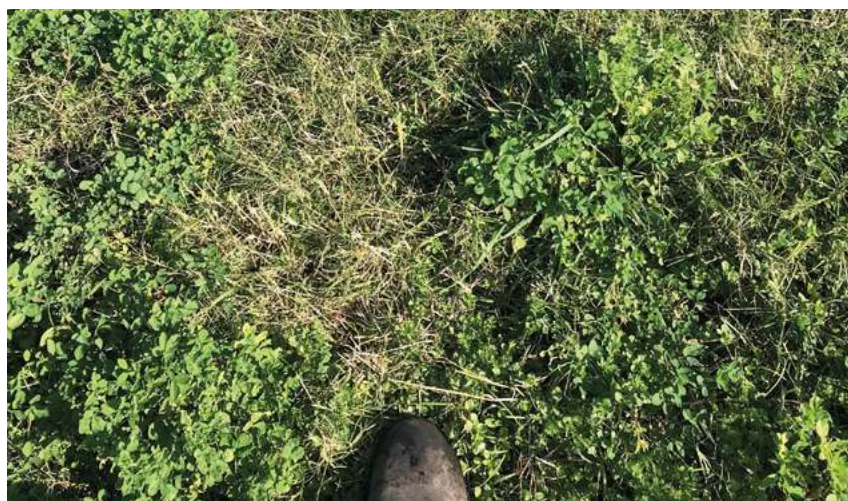
Por otro lado, existen indicios de que las decisiones de “clausura” de superficie para reservas, en los momentos donde el crecimiento excede la capacidad de consumo de los animales, no se realizan a tiempo o en la magnitud necesaria (Waller, 2020). Este desajuste, que sucede generalmente al inicio o a mediados de la primavera, o incluso durante veranos lluviosos, tiene como consecuencia directa el desperdicio de kilogramos de materia seca y fuertes caídas en la calidad del forraje asignado a los animales. Esta pérdida de control en el manejo del pasto se vuelve muy difícil de revertir en un mismo ciclo de crecimiento. En el trabajo de Waller (2020) se observó cómo, en el mes de septiembre, los productores monitoreados aumentaban la carga del área de pastoreo ante la detección de un aumento en el crecimiento, clausurando un área para realizar reservas. Sin embargo, dicha clausura se realizaba siete días más tarde que en el sistema experimental de referencia (Unidad de Lechería de La Estanzuela), ubicado en la misma zona, y en menor magnitud en términos de área (%). Por otra parte, los predios monitoreados denotaban, al final del invierno (agosto), menores niveles de cobertura de pasto promedio y/o remanentes de pastoreo más bajos que el sistema de referencia. Esto último podría ser una indicación de situaciones de sobrepastoreo durante el invierno, condicionando el posterior crecimiento y la persistencia de las plantas.

Según la última encuesta realizada en 2019 por el INALE (*comm. pers.*), el 68% de los productores reconoce tener un problema de deficiencia en el aprovechamiento del pasto. De estos productores, el 80% adjudica esta deficiencia a alguno de los dos extremos del problema de

gestión del pasto que se describían más arriba: a) problemas de alta carga y sobrepastoreo, típicamente otoño-invernales; b) problemas de baja carga y altos desperdicios o sustitución, típicamente primavera-estivales. Cabe destacar que según este relevamiento de 359 productores, que alcanza la totalidad de predios lecheros en función de escala y distribución geográfica, el 99% de ellos realiza pastoreo en franjas. Esto indica que el esquema básico de manejo del pastoreo es igual para todos, pero fallan la gestión y la toma de decisiones.

En cuanto a la perennidad de las pasturas, trabajos que analizan las rotaciones predominantes desde 1966 hasta 2010 muestran que, independientemente de los cambios en las especies y los sistemas de labranzas, las pasturas no se mantienen en producción por más de 3,5 años (Díaz-Rossello y Durán, 2011). Una descripción más reciente de las rotaciones utilizadas en tambo muestra también duraciones de la fase pradera de entre 2 y 3,5 años (Oleggini y Gallego, 2017). En las praderas de sistemas lecheros, el principal signo de deterioro mencionado por Díaz-Rossello y Durán (2011) es el enmalezamiento por “gramilla” (*Cynodon dactylon* L.) (Figura 2). Este género de colonización de espacios desarrollado por esta maleza de tipo perenne responde típicamente a la disminución en la cobertura verde de la pradera implantada.

FIGURA 2. COLONIZACIÓN DE *CYNODON DACTYLON* EN ESPACIOS SIN COBERTURA EN UNA PRADERA DE TERCERAÑO DE ALFALFA Y *DACTYLIS*



Fuente: Imagen obtenida en junio, Unidad de Lechería del INIA La Estanzuela.

3. Manejo del pastoreo sistematizado

3.1. Fundamentación

La gestión del pastoreo en sistemas pastoriles intensivos de leche o carne implica toma de decisiones en las dimensiones tiempo y espacio de manera sincronizada y frecuente (diaria, semanal o quincenal). Esta sincronización debe lograrse respecto de un conjunto de seres vivos comprendidos dentro de una *unidad de manejo*: por un lado, las plantas que componen la pastura de un *potrero*; por otro lado, los animales que componen un *rodeo*. Estos seres tienen una dinámica cambiante, sujeta a su propia fisiología y a los cambios en el ambiente (clima, suelo y manejo). Por otra parte, los diferentes individuos –y, por ende, las unidades de manejo que los comprenden– no responden de la misma manera a los cambios en el ambiente, por lo que es una tarea compleja hacer coincidir los requerimientos de ambos de forma sincronizada y armónica a lo largo del año. Por ejemplo, lograr que cada potrero se consuma en su momento “óptimo” –respecto de la curva de crecimiento de las plantas y de la cantidad y calidad requerida por el animal– y que, al concluir ese potrero, el subsiguiente esté a su vez en ese mismo estado óptimo.

La complejidad de esta sincronización lleva a que los decisores (los productores y su equipo de trabajo) se basen en aproximaciones generales subjetivas, apoyados en su experiencia previa. Por lo tanto, tienden a tomar decisiones sobre el pastoreo (frecuencia, asignación, cierre de área, etc.) de forma reactiva, intentando adecuarse al ambiente. Esta dinámica de decisión conlleva fuertes vaivenes de abundancia y escasez que derivan en los bajos niveles de producción y consumo de forraje por ha antes mencionados. Sin embargo, existe la posibilidad de evitar esos desajustes a través de la *sistematización* de la toma de decisiones.

3.2. Antecedentes

Existen diferentes modelos de manejo del pastoreo, diseñados para sistemas pastoriles intensivos de leche y carne. En todos ellos se plantea una sincronización de componentes, en función de lograr un buen balance entre las necesidades de las pasturas (crecimiento y persistencia) y las de los animales (alimentación en cantidad y calidad), mediada por la intervención del decisor. De forma no exhaustiva podemos mencio-

nar tres sistemas que son implementados a nivel de predios comerciales pastoriles donde se produce leche en el mundo: el manejo basado en número de hojas en, Australia (Fulkerson y Donaghy, 2001); el manejo “rotatino”, en Brasil (Carvalho, 2013); y el manejo por stock de pasto, en Nueva Zelanda (Holmes y Roche, 2007) e Irlanda (Hanrahan *et al.*, 2017). Si bien todos ellos responden a idénticos principios básicos, usan diferentes indicadores y estrategias para cumplir con los mismos.

En Uruguay, se ha avanzado en la descripción de una metodología que resulta de una adaptación local del mencionado manejo por stock de pasto, incluyendo algunos indicadores del manejo por número de hojas. Este sistema fue desarrollado por un equipo de investigación y transferencia del INIA La Estanzuela (Fariña *et al.*, 2017) y es conocido con el nombre de “las 3 R”. Se ha difundido a través de proyectos específicos y se implementa en predios lecheros comerciales, siendo también replicado en Argentina (Berone *et al.*, 2021).

3.3. El manejo por stock de pasto

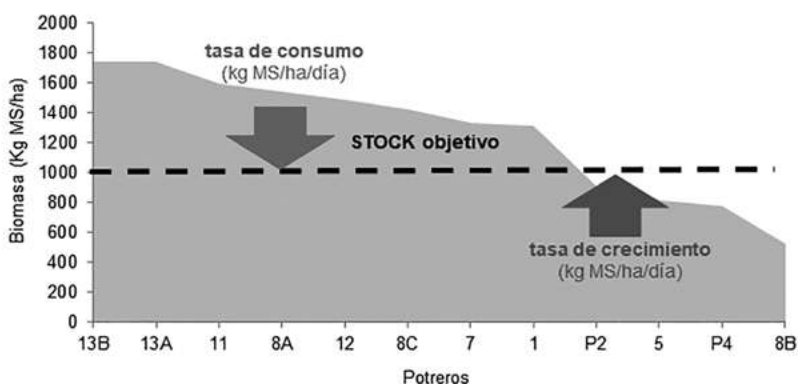
Según su traducción del inglés, *stock* es “la cantidad de productos o materias primas que posee un comercio en su almacén a la espera de su venta”. En un sistema de producción pastoril, este término es *el valor promedio de biomasa por hectárea de toda la superficie bajo pastoreo de un campo en un momento dado*. Representa un valor medio de la cobertura vegetal que está capturando radiación solar.

En un sistema que se encuentra bajo pastoreo, el stock surge del promedio de un gradiente de potreros con valores dispares de biomasa (Figura 3): desde el más recientemente pastoreado (valor de biomasa más bajo) hasta el próximo a pastorear (valor de biomasa más alto, en general). El principio rector de este sistema de manejo consiste en determinar un “stock objetivo” y establecer las decisiones de pastoreo, suplementación y cierre de potreros en función de mantener el stock en ese nivel objetivo.

El stock objetivo es un número que puede variar entre sistemas productivos, pero en todos los casos debe surgir de hacer el promedio entre una biomasa de “entrada” objetivo (prepastoreo) y una biomasa “remanente” objetivo (pospastoreo, residual son otros sinónimos de este término). Todos los potreros de la superficie acumulan biomasa diariamente (“crecen”), por lo tanto, para que ese valor de stock no suba tiene que haber una remoción diaria de biomasa del sistema, en igual cantidad

que ese crecimiento diario. Esa remoción se realiza, en principio, con el pastoreo y/o la confección de reservas. La toma de decisiones del manejo por stock se basa entonces en planificar una *remoción diaria de biomasa del sistema (tasa de consumo/ha/día)* que sea igual al *crecimiento (tasa de crecimiento/ha/día)* en todo el sistema (Figura 3).

FIGURA 3. BIOMASA DISPONIBLE POR POTRERO EN UNA PLATAFORMA DE PASTOREO CON UN STOCK OBJETIVO DE 1.000 KG MS/HA (EJEMPLO DEL ESTABLECIMIENTO SANTA MARÍA, 17 DE SEPTIEMBRE DE 2019)



Fuente: Elaboración propia.

Para esa toma de decisiones, hay que predecir la tasa de crecimiento promedio del sistema. Para predecir esa tasa, nos basamos en la tasa de crecimiento medida en la última semana o los últimos 15 días. Esa tasa de crecimiento se calcula como la diferencia entre dos estimaciones consecutivas de biomasa de un potrero, dividida por los días entre dichas estimaciones, siempre que no haya habido remoción de material en ese intervalo de tiempo (pastoreo, corte mecánico u otro).

3.4. Sistema de manejo de pastoreo “3 R”

Este sistema se basa en los principios de manejo por stock antes descritos. Las pautas específicas de este sistema de manejo están detalla-

das en el *Boletín de Divulgación* N° 115 de INIA Uruguay (Fariña *et al.*, 2017), por lo que daremos aquí una breve descripción de estas.

La denominación “3 R” proviene de los tres pasos secuenciales que son los pilares del sistema: 1) Recorrida; 2) Rotación; 3) Remanentes.

- **Recorrida:** consiste en recorrer todos los potreros del campo atravesando toda la superficie efectiva de pastoreo en el mismo día *obteniendo un valor de biomasa promedio por potrero*. Se establece una transecta fija y se repite este procedimiento todas las semanas o cada 15 días. De forma adicional, se puede registrar en la recorrida el estado fenológico de las plantas (número de hojas en gramíneas o nudos en alfalfa). Pueden usarse diferentes métodos de estimación de biomasa, siempre que se mantenga el mismo entre recorridas.
- **Rotación:** se refiere a la “rotación de pastoreo” (entendida como la velocidad de avance en un circuito de pastoreo) y consiste en *definir el área que asignaremos diariamente a los animales* o a la confección de reservas. El punto de partida para establecer esto es la tasa de crecimiento promedio del sistema (dato predicho en base a la “Recorrida”), lo que representa “cuánto pasto tenemos para comer por día”. Si ese crecimiento diario supera lo que pueden consumir los animales en x%, se cierra el x% del área para reservas. El cálculo básico para calcular el área de pastoreo diario es:

TASA DE CRECIMIENTO PREDICHA (KG MS/HA/DÍA) X SUPERFICIE EFECTIVA DE PASTOREO (HA)

DISPONIBILIDAD PREPASTOREO (KG MS/HA/DÍA)

- **Remanentes:** consiste en establecer un criterio común para el chequeo diario de los remanentes postpastoreo de cada franja. Se busca un balance entre tres factores: 1) el animal (que logre un bocado con buen balance entre calidad y cantidad); 2) la planta (que quede con pseudotallo y área foliar suficiente para rebrotar rápido); 3) el sistema (que se logre una alta cosecha de pasto en el año, *e.g.* 10 pastoreos de ~800 kg MS/ha cada uno). Se establece, entonces, un criterio objetivo para los dos principales componentes del remanente objetivo: el área pastoreada y el área de rechazo. Para el área pastoreada, el objetivo es alcanzar 5 cm de altura (excepto en gramíneas durante el verano, donde se eleva a 7-8 cm para proteger a los ápices del calor). Para el

área de rechazo, el objetivo es que el 15-20% del área total de la franja esté ocupada por “matas” de rechazo, típicamente alrededor de las heces depositadas por las vacas en el pastoreo previo.

4. Aportes de la tecnología generada a las trayectorias agroecológicas de sistemas lecheros

La implementación de este sistema de manejo del pastoreo permitió lograr, a escala de sistema, niveles de cosecha de pasto de 8 toneladas MS/ha/año (pastoreo directo más reservas) en promedio, duplicando la media nacional (Fariña y Chilbroste, 2019). Estos resultados fueron alcanzados tanto en sistemas experimentales como en predios comerciales.

El sistema de manejo por stock y tasa de crecimiento fue implementado en ocho sistemas (módulos experimentales, o *farmlets* en inglés). Cuatro de ellos se condujeron durante cuatro años consecutivos en el tambo experimental del Centro Regional Sur (Ortega *et al.*, 2018). Los otros cuatro se evaluaron durante tres años en el tambo experimental de INIA La Estanzuela (Stirling *et al.*, 2021) en el marco del Proyecto 10-MIL (acrónimo por los objetivos anuales de 10 toneladas de forraje cosechado/ha –pasto + cultivos– y 1.000 kg sólidos de leche/ha).

Por otra parte, se realizó un trabajo de testeo/validación de esta tecnología de procesos en sistemas comerciales. En un predio lechero pastoril se implementó el sistema durante un año completo, estableciendo recorridas y toma de decisiones quincenales y logrando el 27% de mejora en la cosecha total de pasturas (8,5 *versus* 6,7 toneladas MS/h/año), y pudiendo sostener el mismo rodeo y la misma producción de leche total sobre un área menor (72% del área de vacas en ordeño), sin aumentar la dependencia de suplementos importados al sistema.

En el Proyecto 10-MIL, los sistemas que adoptaron una estrategia de maximizar el pastoreo directo a través de la implementación del sistema 3R estuvieron en pastoreo durante 245 de los 365 días del año (67%). Las franjas/parcelas de pastoreo asignadas tenían acceso a agua de bebida y estaban cerradas (sin acceso de los animales a los callejones u otras áreas improductivas). Esto significa que aproximadamente el 67% de la excreta de esos animales (heces y orina) fue depositado directamente sobre las pasturas en crecimiento (White *et al.*, 2001), lo cual implica una reducción del riesgo de pérdidas al ambiente en sectores improductivos y/o en la necesidad de gestión de residuos en sectores de ordeño y suplementación.

En el mismo proyecto, al inicio del experimento se establecieron las rotaciones forrajeras tradicionales que implicaban praderas de 3,5 años seguidas de un ciclo de doble cultivo anual (verano/invierno). Sin embargo, a partir de la implementación del sistema de manejo se encontró que las praderas llegaban con muy buena cobertura hasta el cuarto año e incluso se mantuvieron por más de 5 años, en particular en el caso de gramíneas puras (*festuca* y *dactylis*). Si bien esto es un dato anecdótico, resulta muy beneficioso como factor de reducción de necesidad de uso de herbicidas, la cual se dispara generalmente por las malezas emergentes cuando pierde cobertura la pradera. Al mismo tiempo, la posibilidad de postergación de la implantación del cultivo subsecuente significa también evitar otra “ventana” de baja cobertura, con su correspondiente mayor riesgo de erosión y escurrimiento, sus correspondientes aplicaciones de herbicidas, y muchas veces también insecticidas.

Las mejoras efectivas en el manejo del pastoreo pueden causar un beneficio económico directo, a través de la dilución del costo de implantación y mantenimiento, por dos vías. Por un lado, a través del logro de altos niveles de forraje cosechado por hectárea y, por otra parte, a través del logro de praderas más “longevas” (que puedan mantenerse con buena cobertura y niveles de crecimiento promedio anual).

En términos de resultado global del sistema, un análisis de los resultados del Proyecto 10-MIL realizado por el equipo económico del INALE (2021) mostró que los sistemas que maximizaban el pastoreo directo, implementando el sistema de manejo 3R (sistemas “Manda Pasto”), lograban un ingreso de capital/ha/año cuatro veces mayor al sistema promedio representativo de la encuesta nacional. El resultado de dichos sistemas, por otro lado, era mayor en 31% al de los otros sistemas evaluados en el mismo estudio, los cuales alcanzaban igual productividad en leche por hectárea, pero con pastoreo restringido al 44% de los días del año (sistemas que se denominaron “Manda Dieta”). En términos de costo de producción por kilo de sólidos lácteos, los sistemas “Manda Pasto” lograban incluso un costo 16% menor que el sistema de base promedio.

En la última encuesta del INALE, realizada en 2019 (*comm. pers.*), se consultó sobre los roles de las personas en la gestión del pastoreo. Según este relevamiento de alta representatividad, son los productores mismos o sus familiares quienes deciden dónde pastorean las vacas (83%) y quienes chequean los rechazos o remanentes postpastoreo (70%).

Este tipo de tecnologías intensivas en procesos, como es un sistema de manejo del pastoreo, tienden a fortalecer las capacidades de los acto-

res responsables de la toma de decisiones y a empoderarlos, en contraste con herramientas tecnológicas basadas en algoritmos de resolución automática. Como lo expresaba el decisor en un predio de validación, “el sistema *nos dio confianza* a la hora de tomar una decisión”.

Desde una mirada global, existe un creciente interés de los ciudadanos en general por conocer cómo se producen los alimentos. En el caso de la leche surgen cada vez más evidencias de su inclinación por producciones con animales al aire libre, en entornos “naturales”, que asocian a la presencia de pasturas (Cardoso *et al.*, 2019).

Bibliografía

Baudracco, J., López-Villalobos, N., Holmes, C. W. y Macdonald, K. A. (2010), “Effects of stocking rate, supplementation, genotype and their interactions on grazing dairy systems: a review”, en *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 53(2), pp. 109-133. Disponible en: <<https://doi.org/10.1080/00288231003777665>>.

Berone, G., Cicore, P., Errecart, P., Insúa, J., Jaimes, F., Maglietti, C., Marino, A. y Oriente, S. (2021), *Guía para el manejo de pasturas en función del stock de pasto y la tasa de crecimiento*, Estación Experimental Agropecuaria INTA Balcarce, Argentina, 1-20.

Cardoso, C. S., Von Keyserlingk, M. G. y Hötzel, M. J. (2019), “Views of dairy farmers, agricultural advisors, and lay citizens on the ideal dairy farm”, en *Journal of Dairy Science*, 102(2), pp. 1811-1821. Disponible en: <<https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2018-14688>>.

Carvalho, P. C. F. (2013), “Can grazing behaviour support innovations in grassland management?”, *Proceedings of the 22nd International Grassland Congress*, 1, pp. 1134-1148.

Ciganda, V. y La Manna, A. (2012), “Estudio sobre el potencial de contaminación de los sistemas intensivos de engorde bovino a corral sobre los recursos suelo y agua en el Uruguay”, en *1er. Congreso de la Sociedad Uruguaya de la Ciencia del Suelo*, Montevideo, Uruguay.

Cooperativa Nacional de Productores de Leche (CONAPROLE) (2021), Página institucional. Disponible en: <<https://www.conaprole.uy/institucional/grass-fed/>>.

Díaz-Rossello, R. y Durán, H. (2011), “Secuestro de carbono en suelos de sistemas agrícola-lecheros mixtos en Uruguay [Soil Carbon Sequestration in Mixed Crop-dairy Systems in Uruguay]”, en *Agrociencia*, 15(2), pp. 109-119.

Dirección de Estadísticas Agropecuarias (DIEA)

(2017), *Anuario estadístico agropecuario*, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Montevideo.

Ernst, O. y Siri-Prieto, G.

(2009), "Impact of perennial pasture and tillage systems on carbon input and soil quality indicators", en *Soil and Tillage Research*, 105(2), pp. 260-268. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2009.08.001>>.

Fariña, S. R. y Chilibroste, P.

(2019), "Opportunities and challenges for the growth of milk production from pasture: The case of farm systems in Uruguay", en *Agricultural Systems*, 176, diciembre de 2018, 102631. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.05.001>>.

Fariña, S., Tuñon, G., Pla, M. y Martínez, R.

(2017), "Sistema de manejo de pastoreo la estanzuela. Guía práctica para la implementación de un sistema de pastoreo", *INIA Boletín de Divulgación* 115, Montevideo.

Fulkerson, W. J. y Donaghy, D. J.

(2001), "Plant-soluble carbohydrate reserves and senescence - Key criteria for developing an effective grazing management system for ryegrass-based pastures: A review", en *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41(2), pp. 261-275. Disponible en: <<https://doi.org/10.1071/EA00062>>.

Hanrahan, L., Geoghegan, A., O'Donovan, M., Griffith, V., Ruelle, E., Wallace, M. y Shaloo, L.

(2017), "PastureBase Ireland: A grassland decision support system and national database", en *Computers and Electronics in Agriculture*, N° 136, pp. 193-201. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.01.029>>.

Holmes, C. W. y Roche, J. R.

(2007), "Pastures and supplements in dairy production systems", en Rattray, P. V., Brookes, I. M. y Nicol, A. M. (eds.), *Dairy production systems. Pasture and supplements for grazing animals*, New Zealand Society of Animal Production, pp. 221-242.

Hötzel, M. J., Cardoso, C. S., Roslindo, A. y Von Keyserlingk, M. A. G.

(2017), "Citizens' views on the practices of zero-grazing and cow-calf separation in the dairy industry: Does providing information increase acceptability?", en *Journal of Dairy Science*, 100(5), pp. 4150-4160. Disponible en: <<https://doi.org/https://doi.org/10.3168/jds.2016-11933>>.

Instituto Nacional de la Leche (INALE)

(2021), "Uruguay lechero". Disponible en: <<https://www.inale.org/uruguay-lechero/>>.

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)

(2020), *3R presentación de un año de resultados Santa María*. Disponible en: <<http://www.inia.uy/estaciones-experimentales/direcciones-regionales/inia-la-estanzuela/3R-presentacion-de-un-ano-de-resultados-Santa-Maria->> [Consulta: 13 de julio de 2021].

Jackson, R. B., Lajtha, K., Crow, S. E., Hugelius, G., Kramer, M. G. y Piñeiro, G.

(2017), "The Ecology of Soil Carbon: Pools, Vulnerabilities, and Biotic and Abiotic Controls", en *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 48, pp. 419-445. Disponible en: <<https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054234>>.

Jobbágy, E. G. y Jackson, R. B.

(2000), "The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation", en *Ecological Applications*, 10(2), pp. 423-436. Disponible en: <[https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010\[0423:TVDOSO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010[0423:TVDOSO]2.0.CO;2)>.

Kast, F. E. y Rosenzweig, J. E.

(1981), "General systems theory: Applications for organization and management", en *Journal of Nursing Administration*, 11(7), pp. 32-41. Disponible en: <<https://doi.org/10.5465/255141>>.

Méndez, M. N., Chilibrste, P. y Aguerre, M.

(2019), "Pasture dry matter intake per cow in intensive dairy production systems: Effects of grazing and feeding management", en *Animal*, pp. 1-8. Disponible en: <<https://doi.org/10.1017/S1751731119002349>>.

Ojeda, J. J., Caviglia, O. P., Agnusdei, M. G. y Errecart, P. M.

(2018), "Forage yield, water- and solar radiation-productivities of perennial pastures and annual crops sequences in the south-eastern Pampas of Argentina", en *Field Crops Research*, 221(octubre de 2017), pp. 19-31. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2018.02.010>>.

Oleggini, G., y Gallego, F.

(2017), *El pasto en el tambo*. Ficha Técnica 12, CONAPROLE. Montevideo.

Ortega, G., Nuñez, T., Custodio, D., Mello, R., López, Y. y Chilibrste, P.

(2018), "Effect of stocking rate on pasture production and utilisation on a grazing dairy system during winter and spring", *Abstracts of the 2018 American Dairy Science Association Annual Meeting*, 101(2), p. 257. Disponible en: <https://www.adsa.org/2018/Abstracts/ADSA2018_full_abstracts_book.pdf>.

Schuppli, C. A., Von Keyserlingk, M. A. G. y Weary, D. M.

(2014), "Access to pasture for dairy cows: Responses from an online engagement", en *Journal of Animal Science*, 92(11), pp. 5185-5192. Disponible en: <<https://doi.org/10.2527/jas.2014-7725>>.

Stirling, S., Delaby, L., Mendoza, A., & Fariña, S.

(2021). Intensification strategies for temperate hot-summer grazing dairy systems in South America: Effects of feeding strategy and cow genotype. *Journal of Dairy Science*, 104(12), 12647-12663.

Waller, A. C.

(2020), *Análisis de metodología para el monitoreo de pasturas en predios comerciales*, Tesis presentada para el grado de Maestría en Ciencias Animales, agosto de 2020, Universidad de la República, Montevideo.

White, S. L., Sheffield, R. E., Washburn, S. P., King, L. D. y Green, J. T. (2001), "Spatial and Time Distribution of Dairy Cattle Excreta in an Intensive Pasture System", en *Journal of Environmental Quality*, 30, pp. 2180-2187. Disponible en: <<https://doi.org/10.2134/jeq2001.2180>>.

Cuarta sección
Innovación en agroecología:
intercambios que generan valor

Editores: Alfredo Albín y Miguel Sierra

Introducción

Innovación: procesos interactivos que generan valor

Alfredo Albín y Miguel Sierra

Actualmente, la innovación en los sistemas familiares de producción de alimentos de forma agroecológica tiene más vigencia e importancia que nunca. La misma aumenta la resiliencia del sistema, reduciendo los impactos negativos de la variabilidad climática, y permite encarar eficazmente los riesgos ambientales y sociales.

Para enfrentar el actual escenario de degradación, es fundamental el rediseño de los sistemas, teniendo especial cuidado en que sean sostenibles y que no agraven las inequidades sociales y económicas. Por lo tanto, la innovación deberá abarcar los sistemas complejos de producción de alimentos y de consumo, los recursos naturales involucrados, así como las necesidades y los deseos del ser humano.

En este capítulo en particular se resalta a los procesos de *innovación, coinnovación y las tecnologías de la información y la comunicación (TIC)* como herramientas eficaces para contribuir al rediseño de sistemas familiares en trayectoria agroecológica. Es decir, que contribuyan a hacerlos más resilientes y sostenibles, en términos sociales, económicos y ambientales.

El Uruguay se caracteriza por tener un alto porcentaje de sus predios productivos bajo *sistemas familiares de producción*. En nuestro marco legal, se considera productor o productora familiar agropecuario/a toda persona física que gestiona directamente una explotación agropecuaria y/o realiza una actividad productiva agraria. Esta persona, en conjunto con su familia, debe cumplir los siguientes requisitos en forma simultánea:

- a) Realizar la explotación agropecuaria o actividad productiva agraria con la contratación de mano de obra asalariada de hasta dos asalaria-

dos no familiares permanentes, o su equivalente en jornales zafrales no familiares de acuerdo, con la equivalencia de 250 (doscientos cincuenta) jornales zafrales al año por cada asalariado permanente.

- b) Realizar la explotación agropecuaria de hasta 500 hectáreas, índice CONEAT 100, bajo cualquier forma de tenencia.
- c) Residir en la explotación agropecuaria donde se realice la actividad productiva agraria, o en una localidad ubicada a una distancia no mayor a 50 km.
- d) Que los ingresos nominales familiares no generados por la explotación agropecuaria o actividad productiva agraria declarada sean inferiores o iguales a 14 BPC (“base de prestaciones y contribuciones”, herramienta de gestión financiera) en promedio mensual.

Como primera característica, los productores están ubicados en todo el territorio, sin perjuicio de que hay zonas en que se registra mayor concentración. Por otro lado, cruzan casi todos los rubros y sistemas productivos. Dos de los elementos diferenciadores son la cantidad y la calidad de los recursos con que cuentan, principalmente capital de giro y el recurso tierra. Una amplia mayoría de productores familiares se dedica a la producción de carne, leche y frutas y hortalizas.

La visión agroecológica implica necesariamente un enfoque de sistema con amplia participación de diversos actores (productores y sus familias, actores de la ciencia, de las políticas públicas, empresas) que, más allá de abordar aspectos ambientales, debe tener en cuenta la dimensión social y económica.

A su vez, la agroecología desarrolla un amplio abanico de procesos de innovación.

La *innovación* es un concepto polisémico, como plantea Javier Echeverría (2017): presenta una pluralidad de definiciones posibles y significados que cambian con el tiempo. No existe una definición “verdadera” de innovación. La innovación requiere, además de novedad y de difusión, uso, valoración y apropiación mental.

“[...] las innovaciones son procesos interactivos que generan algo nuevo y valioso (o disvalioso) en entornos y sistemas determinados. Si, además, esos procesos producen transformaciones en los sistemas relacionales del entorno donde surgen, entonces son innovaciones disruptivas, pudiendo serlo en mayor o menor grado. A partir de esta definición hay varias nociones a investigar: procesos, interacciones, generación, novedad, valor, transformación, entorno, sistema” (Echeverría, 2017: 149).

Las innovaciones, afirma Lundvall (1992), están basadas en conocimientos (científicos y generados por la experiencia), implican aprendizaje y, generan nuevo conocimiento (original o una combinación creativa de conocimiento existente). Cuando dicho conocimiento es científico y resulta económicamente útil, surge la innovación basada en ciencia. Existen modelos más lineales o más interactivos para comprender estos procesos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) basados en ciencia (Kline y Rosenberg, 1986),

Las innovaciones dependen y al mismo tiempo determinan un modelo de desarrollo específico, por ejemplo, una trayectoria agrícola intensiva en el uso de agroquímicos e insumos externos al predio, o un horizonte agroecológico (Bonny, 2017). Generalmente, en la realidad se configuran situaciones de convivencia, hibridación, coexistencia o conflicto entre diferentes trayectorias tecnológicas: convencional, intensificación sostenible, producción integrada, producción orgánica, agroecológica, regenerativa, etcétera.

Estas innovaciones se enmarcan en los nuevos desafíos de los sistemas alimentarios, como afirman Bricas *et al.* (2021: 120): “el propósito de los sistemas alimentarios ya no puede ser sólo alimentar a los seres humanos, maximizando con éxito la producción de alimentos. Ahora deben darse al menos otras dos ambiciones: contribuir activamente a la viabilidad de la biosfera y participar en un desarrollo socioeconómico y cultural inclusivo y equitativo”.

A su vez, el enfoque de coinnovación refiere al proceso en que investigadores trabajan junto con diversos actores para generar innovaciones combinadas a nivel tecnológico e institucional (Klerkx *et al.*, 2017; Botha *et al.*, 2014; Dogliotti *et al.*, 2014). Su objetivo es apoyar cambios más amplios que los estrictamente tecnológicos en los sistemas agrícolas, sectores, territorios y cadenas de valor (Botha *et al.*, 2017). Se reconoce la naturaleza colectiva de la innovación y se destaca su carácter coevolutivo, resultado de la alineación de las dimensiones técnicas, sociales, institucionales y organizacionales (Klerkx *et al.*, 2012; Kilelu *et al.*, 2013).

Desde este punto de vista, Rossing *et al.* (2021) plantean que, más que “científicos trabajando con productores”, es necesario combinar tres dominios para implementar procesos de coinnovación: (i) una visión de sistemas adaptativos complejos (CAS, por sus siglas en inglés), (ii) un proceso y entorno de aprendizaje social, y (iii) un contexto intencionalmente diseñado a través de monitoreo y evaluación dinámicos (Rossing *et al.*, 2021; Albicette *et al.*, 2017; Dogliotti *et al.*, 2014). La operacionalización

de estos tres dominios depende de las características de cada proceso y de sus avances (Rossing *et al.*, 2021). Se debe tener en cuenta que la coinnovación es en un contexto específico y no hay recetas: es un proceso flexible y negociable para lograr un entendimiento compartido e involucrar actores relevantes de cada situación (Coutts *et al.*, 2017; Klerkx *et al.*, 2017). En forma complementaria, el enfoque de coinnovación permite la gobernanza y gestión de proyectos de investigación orientados al cambio, con la intención de producir conocimiento que contribuya a promover transiciones sostenibles (Rossing *et al.*, 2021).

Las TIC son tecnologías transversales a muchos sistemas y pueden jugar un papel muy relevante en sistemas familiares promoviendo trayectorias agroecológicas asociadas al uso más eficiente de los recursos, al monitoreo de adversidades bióticas y abióticas y a la automatización de tareas y registros. Las TIC son un elemento clave del proceso de innovación para distintos tipos de productores, pero en especial para productores familiares.

Por último, se pone de relieve el trabajo multidisciplinar y la importancia de trabajar en redes de amplia participación, integrando los actores de la ciencia con los saberes y la experiencia de productores y de integrantes de las organizaciones de agricultores familiares.

Bibliografía

Albicette, M. M., Leoni, C., Ruggia, A., Scarlato, S., Blumetto, O., Albín, A. y Aguerre, V.

(2017), "Co-innovation in family-farming livestock systems in Rocha, Uruguay: A 3-year learning process", en *Outlook Agric.*, 46 (2), pp. 92-98. Disponible en: <<https://doi.org/10.1177%2F0030727017707407>>.

Bonny, S.

(2017), "High-tech agriculture or agroecology for tomorrow's agriculture?", en *Harvard College Review of Environment & Society*, 4(Spring 2017), pp. 28-34.

Botha, N., Klerkx, L., Small, B. y Turner, J.

(2014), "Lessons on transdisciplinary research in a co-innovation programme in the New Zealand agricultural sector", en *Outlook Agric.*, 43 (3), pp. 219-223. Disponible en: <<https://doi.org/10.5367%2F0a.2014.0175>>.

Botha, N., Turner, J., Fielke, S. y Klerkx, L.

(2017), "Using a co-innovation approach to support innovation and learning: Cross-cutting observations from different settings and emergent issues", en *Outlook Agric.*, 46 (2), pp. 87-91. Disponible en: <<https://doi.org/10.1177%2F0030727017707403>>.

Bricas N., Conaré D. y Walser M. (dirs.)

(2021), *Une écologie de l'alimentation*, Éditions Quæ, Versailles, 312 pp.

Coutts, J., White, T., Blackett, P., Rijswijk, K., Bewsell, D., Park, N., Turner, J. A. y Botha, N.

(2017), "Evaluating a space for co-innovation: Practical application of nine principles for co-innovation in five innovation projects", en *Outlook Agric.*, 46 (2), pp. 99-107. Disponible en: <<https://doi.org/10.1177%2F0030727017708453>>.

Dogliotti, S., García, M. C., Peluffo, S., Dieste, J. P., Pedemonte, A., Bacigalupe, G. F., Scarlato, M., Alliaume, F., Álvarez, J., Chiappe, M. y Rossing, W.

(2014), "Co-innovation of family farm systems: A systems approach to sustainable agriculture", en *Agric. Syst.*, 126, pp. 76-86. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.02.009>>.

Echeverría, J.

(2017), *El arte de innovar. Naturalezas, lenguajes, sociedades*, Plaza y Valdés Editores.

Kilelu, C. W., Klerkx, L. y Leeuwis, C.

(2013), *Unravelling the role of innovation platforms in supporting co-evolution of innovation: Contributions and tensions in a smallholder dairy*.

Klerkx, L., Mierlo, B. V., y Leeuwis, C.

(2012), "Evolution of systems approaches to agricultural innovation: concepts, analysis and interventions", en *Farming Systems Research into the 21st century: The new dynamic*, pp. 457-483.

Klerkx, L., Seuneke, P., de Wolf, P., Rossing, W. A. H.

(2017), "Replication and translation of co-innovation: the influence of institutional context in large international participatory research projects", en *Land Use Policy*, 61, pp. 276-292. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.11.027>>.

Kline, S., y Rosenberg, N.

(1986), "An overview of innovation", en Landau, R. y Rosenberg, N. (eds.), *The Positive Sum Strategy. Harnessing Technology for Economic Growth*, National Academy Press, Washington.

Kranzberg, M.

(1986), *Technology and History: Kranzberg's Laws, Technology and Culture* 27/3.

Lundvall, B. A.

(1992), *National Systems of Innovation: Toward a theory of interactive learning*, Pinter, Londres.

Rossing, W. A. H., Albicette, M. M., Aguerre, V., Leoni, C., Ruggia, A. y Dogliotti, S.

(2021), "Crafting actionable knowledge on ecological intensification: lessons from co-innovation approaches in Uruguay and Europe", en *Agricultural*

Cuarta sección. Introducción

Systems, 190, pp. 1-16, [103103]. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103103>>.

Capítulo 20

Coinnovación como enfoque para promover transiciones agroecológicas: avances desde la investigación en Uruguay

Verónica Aguerre, Andrea Ruggia, María Marta Albicette, Carolina Leoni, Oscar Blumetto, Santiago Scarlato, Raúl Gómez Miller y Alfredo Albín

1. Introducción

El sistema agroalimentario actual está influido por un paradigma productivista, que adopta un enfoque industrial para la alimentación y la agricultura, basado en la producción y circulación internacional de grandes cantidades de alimentos estandarizados. Su funcionamiento fortalece las corporaciones vinculadas al agronegocio que, a menudo, determinan qué producen los agricultores y cómo se distribuye el valor agregado. Este paradigma ha resultado en impactos muy negativos alrededor del mundo (Gaitán-Cremaschi *et al.*, 2019; FAO, 2017). A nivel ambiental, se evidencia por los efectos negativos derivados del uso intensivo de insumos químicos en la producción de alimentos, la contribución al cambio climático mediante emisiones de gases efecto invernadero (GEI), la degradación de recursos naturales del planeta como los suelos y los recursos hídricos, y a nivel social, a través de la presión sobre los medios de vida y de la desigualdad en el acceso a los alimentos.

Para lograr una seguridad alimentaria y nutricional sostenible se necesita una transformación del sistema agroalimentario existente a un sistema alternativo (El Bilali, 2018). Las innovaciones deben superar las soluciones tradicionales o históricas a los problemas de sostenibilidad mediante el rediseño de las prácticas alimentarias, no solo desde una perspectiva técnica del sistema agrícola, sino también a través de cam-

bios en las interacciones sociales y los modos de organización de las prácticas de distribución y consumo y, en forma general, en la interacción con la esfera no agrícola (Lamine, 2011). En este sentido, innovaciones como la producción de alimentos basados en la intensificación ecológica (Titto-nell, 2014; Doré *et al.*, 2011), apoyada por múltiples formas de redes alternativas de distribución y acceso a los alimentos, podrían desempeñar un papel radical en la transformación del sistema agroalimentario actual (Gaitán-Cremaschi *et al.*, 2019).

La transición hacia una agricultura sostenible requiere un aprendizaje dirigido a la innovación basado en nuevas formas de percibir a los actores y a los problemas (Brockbank y McGill, 2006), así como un proceso de innovación sistémica que busque cambios estructurales (hacer mejores cosas) y no solo mejorar el sistema actual (hacer las cosas mejor) (Veldkamp *et al.*, 2009; Loorbach y Rotmans, 2006).

La agroecología puede aportar soluciones a través del diseño de sistemas sustentables que sean económicamente productivos y socialmente aceptados. Transitar hacia una producción de alimentos sostenible por medio de los principios de la agroecología puede considerar optimizar prácticas de manejo para aumentar la eficiencia productiva, sustituir insumos, o bien rediseñar el sistema. Esto implica, no una transición, sino varias transiciones simultáneas, a diferentes escalas, niveles y dimensiones; de índole biológica, económica, social, cultural, institucional, política (Wezel *et al.*, 2020; Tiftonell, 2019). Sea cual fuere el modelo utilizado para estudiarla, la transición agroecológica siempre comienza a escala de predio. Idealmente, se inicia con el rediseño de los sistemas, seguido por el cambio en las prácticas de manejo (Tiftonell, 2019). Una transición hacia sistemas agroecológicos requiere innovación. Los agricultores, en su territorio, deben innovar para ser más competitivos, valorizar mejor sus productos, luchar contra el cambio climático, contribuir al desarrollo sustentable. Sin embargo, la innovación es un fenómeno complejo y multidimensional. Es quizás por eso, que innovar no es simple y que la innovación no es ni lineal ni el producto de un actor único: la innovación no se decreta, se construye social y territorialmente (Klerkx *et al.*, 2012).

El enfoque de coinnovación se ajusta a los desafíos de la sostenibilidad antes esbozados, comparte la perspectiva sistémica que caracteriza a la innovación, el rol del aprendizaje y la construcción de capacidades en varios niveles y tiene en cuenta los múltiples actores involucrados (Klerkx *et al.*, 2012). Se define sobre la base de tres dominios: una visión de sistemas adaptativos complejos, el aprendizaje social y el monitoreo dinámico (Rossing *et al.*, 2021).

En los siguientes apartados presentaremos conceptualmente las bases del enfoque de coinnovación y una estrategia para su implementación orientada a promover transiciones agroecológicas en sistemas de producción agropecuaria. En forma complementaria se ofrecerán los resultados de su implementación en sistemas ganaderos familiares.

2. Enfoques para promover la innovación

En el enfoque tradicional de transferencia de tecnología, las nuevas tecnologías se diseñan en forma externa al sistema de producción y se adoptan por los agricultores como resultado de un proceso de “extensión”. En los enfoques participativos, la innovación ya no se concibe como proviniendo de fuentes externas solamente, sino que se desarrolla y diseña en su contexto de aplicación y con la participación de quienes manejan los sistemas y toman las decisiones (Leeuwis y Van den Ban, 2004). En este nuevo paradigma, denominado sistemas de innovación agrícola (AIS, por sus siglas en inglés), los cambios en las prácticas agrícolas y en la organización de los sistemas hacia situaciones de mayor sostenibilidad (socioeconómica y ambiental) son vistos como resultado de un proceso de trabajo en red y de aprendizaje colectivo (Klerkx *et al.*, 2012). En este sentido, en los últimos años la coinnovación se ha destacado como un proceso en el que los investigadores trabajan junto con diversos actores para generar innovaciones de diferentes tipos, combinando la innovación tecnológica e institucional, con el objetivo de apoyar cambios más amplios en los sistemas agrícolas, sectores, territorios y cadenas de valor (Botha *et al.*, 2017). La complejidad de estos cambios necesita ciclos interactivos de ensayo y aprendizaje en el contexto del estudio (Fazey *et al.*, 2018; Dogliotti *et al.*, 2014; Leeuwis *et al.*, 2002). La combinación de actores a nivel predial con los agentes nacionales y/o regionales ha sido importante, no solo para apoyar los ciclos de aprendizaje sino también para que los resultados puedan trascender (Elzen *et al.*, 2012). La coinnovación representa un enfoque estructurado para apoyar el aprendizaje orientado al cambio (Rossing *et al.*, 2021; Albicette *et al.*, 2017).

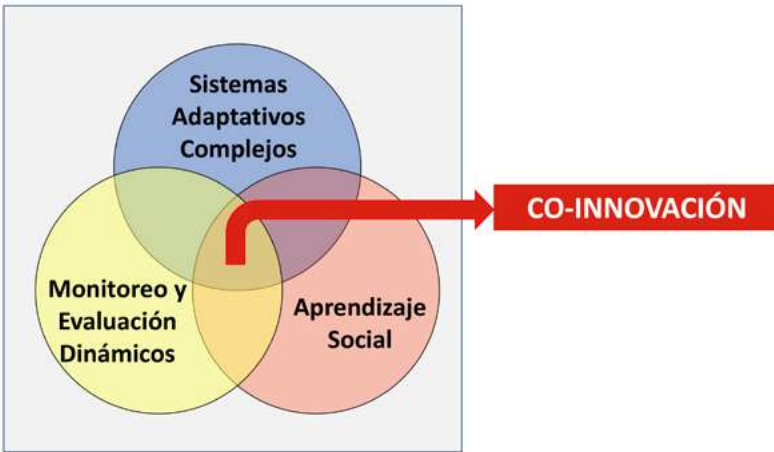
2.1. El enfoque de coinnovación y sus tres dominios

La coinnovación constituye una nueva forma de operativizar el rediseño de los sistemas de producción bajo el paradigma de AIS (Albicette *et al.*,

2017; Botha *et al.*, 2017; Coutts *et al.*, 2017). De modo complementario, este enfoque es presentado como un abordaje que permite la gobernanza y la gestión (organización y ejecución) de proyectos de investigación orientados al cambio, con la intención de producir un conocimiento accionable que contribuya a promover transiciones sostenibles, entendidas como procesos de transformación fundamental a través de los cuales los sistemas sociotécnicos establecidos cambian a modos de producción y consumo más sostenibles (Rossing *et al.*, 2021).

El enfoque de coinovación implica por definición la combinación de tres dominios (Figura 1): una visión de sistemas adaptativos complejos, un proceso y un entorno de aprendizaje colectivo (aprendizaje social), en un contexto intencionalmente diseñado (dinámicas de monitoreo y evaluación) (Rossing *et al.*, 2021).

FIGURA 1. LOS TRES DOMINIOS DEL ENFOQUE DE COINNOVACIÓN



Fuente: Adaptado de Rossing *et al.* (2021) y Aguerre *et al.* (2018).

Rossing *et al.* (2021) desarrollan la importancia de los tres dominios del enfoque:

- a) Enmarcados en una visión dinámica de los AIS, los proyectos con orientación al cambio requieren de una perspectiva de sistemas adaptativos complejos (CAS, por sus siglas en inglés). Un CAS es visto como un conjunto de agentes (entidades que pueden hacer que las cosas sucedan), artefactos (cosas, bases de datos, historias) y estrategias (que

incluyen valores y normas) que interaccionan. La evaluación de los resultados de sus interacciones permite la selección de estrategias o de artefactos que se combinan o copian, o la invención de otros nuevos. Este proceso evolutivo conduce a innovaciones, ya que mediante etapas de selección por aprendizaje se evalúan las variaciones generadas para luego, tomarlas, descartarlas o adaptarlas e incluirlas en la práctica. La perspectiva de CAS sugiere que el diseño y la gestión de un proyecto deberían: (i) fomentar la variedad de agentes, artefactos y estrategias; (ii) estimular la variación en los patrones de interacción para generar novedades a ser consideradas en el proceso de selección por aprendizaje; (iii) apoyar los procesos de selección para permitir una mejor supervivencia y divulgación de sus resultados.

- b) El segundo dominio de la coinnovación se refiere a la creación de un entorno de aprendizaje social, entendido como la forma en que la colaboración entre actores cambia los valores y el comportamiento individual, lo que a su vez afecta la cultura y las normas colectivas. Durante el aprendizaje social se aprende individual y colectivamente mediante la interacción con otras personas para resolver un problema. Durante ese proceso, los mismos actores adquieren nuevas habilidades, tanto técnicas como sociales, producen conocimiento y desarrollan relaciones entre sí. Si bien el término “aprendizaje social” ha sido utilizado con distintos significados en diferentes disciplinas, en el caso de la evolución del enfoque de coinnovación nos referimos a la creación de eventos diseñados con metodologías para fomentar la participación. Los espacios generados deben permitir que todos los actores del proceso puedan compartir sus perspectivas sobre los resultados alcanzados, interaccionar con los demás participantes y reflexionar sobre la dirección de este. Sobre la base de la perspectiva de CAS, se busca estimular el desarrollo de un lenguaje propio y una visión compartida de los problemas y enfoques del proyecto, lo que en forma paralela genera confianza entre los actores.
- c) El tercer dominio de la coinnovación se centra en el monitoreo y la evaluación dinámicos, y en qué y cómo se produjeron los resultados del proceso. A su vez, los resultados se utilizan de manera reflexiva, para averiguar si los actores continúan de acuerdo con su orientación o si es necesario realizar algunos ajustes o modificaciones. Esto se conoce como evaluación formativa y es reconocido como esencial para las transiciones de la sostenibilidad (Rossing *et al.*, 2021). En este sentido, el monitoreo y la evaluación también generan insumos para

la evaluación financiera y técnica requerida por los financiadores del proyecto, a la vez que promueven el aprendizaje social en el contexto de CAS.

La operacionalización de estos tres dominios depende de las características de cada proceso y de sus avances (Rossing *et al.*, 2021). Como lo mencionan Coutts *et al.* (2017), el espacio para la coinovación es contexto específico y no hay receta, es un proceso flexible y negociable.

2.2. Coinnovación para promover transiciones agroecológicas

Con el objetivo de contribuir desde la investigación a la transición agroecológica, el enfoque de coinovación se implementa a partir de proyectos de investigación-acción que trabajan en tres niveles interconectados y simultáneos: predio, región y equipo de investigación (Albicette *et al.*, 2017).

A nivel predial

A nivel predial se seleccionan predios como estudios de caso y se realizan las siguientes etapas de trabajo: (i) caracterización y diagnóstico, (ii) rediseño, (iii) implementación, monitoreo y evaluación de los cambios propuestos en el sistema (Ruggia *et al.*, 2021; Albicette *et al.*, 2017; Dogliotti *et al.*, 2014). La caracterización y el diagnóstico de cada predio son realizados por el técnico extensionista junto con la familia o los gestores del predio, y con el apoyo del equipo de investigadores. En esta etapa se describe el funcionamiento del sistema, se identifican los puntos críticos positivos y negativos y se seleccionan los indicadores para monitorearlos. Durante el rediseño se generan propuestas de cambio basadas en los recursos disponibles de cada predio. Estas propuestas deben ser evaluadas *ex-ante*, cuantificando el resultado productivo, económico, ambiental y social. Luego de un proceso de intercambio entre la familia o los gestores y el equipo técnico (técnico extensionista e investigadores), se acuerda una propuesta que la familia está dispuesta a implementar. Finalmente, se implementa la propuesta, lo que incluye su monitoreo y evaluación continuos. Durante el proceso pueden surgir algunas dificultades inesperadas y la propuesta original se ajustará en ciclos continuos de rediseño e implementación. Entre todos los actores involucrados, el rol del técnico extensionista y el vínculo que este establece con la familia son clave para promover los cambios. Por lo

tanto, es fundamental una asistencia técnica que tenga una mirada global sobre los establecimientos y que promueva un proceso de aprendizaje de los productores y sus familias. Como características relevantes se destaca el desarrollo de un proceso de intercambio en una relación horizontal, con una visión sistémica e integradora, en el marco de un acompañamiento frecuente y regular (Albicette *et al.*, 2016).

A nivel regional

A nivel regional se busca acompasar el trabajo a nivel predial para trascender el proceso y los resultados obtenidos, involucrando a actores relevantes del AIS para planificar, monitorear y evaluar el proyecto durante su ejecución. Se trata de un proceso participativo, para incluir aspectos de mejora durante su ejecución y promover un proceso de aprendizaje.

Este nivel de trabajo se orienta al impacto del proyecto y al propósito de que los participantes mejoren sus conocimientos y habilidades con relación al proceso implementado. Para su implementación se adaptan métodos participativos considerando el contexto de aplicación. Se deben diseñar espacios participativos de reflexión sobre el proceso, sistematizando los resultados de manera de darle continuidad al mismo (Aguerre *et al.*, 2018).

A nivel de equipo de investigación

Para implementar el enfoque de coinnovación se parte de equipos multidisciplinarios, que transitan procesos participativos de investigación-acción (PAR), durante los cuales emerge un funcionamiento interdisciplinario. El PAR es un proceso cíclico de investigación, reflexión y acción en el que los investigadores participan y aprenden (MacDonald, 2012). Teniendo en cuenta que los integrantes del equipo tienen experiencia y conocimiento en diferentes disciplinas, la organización de reuniones específicas es fundamental para: (i) construir una visión común, (ii) definir objetivos comunes, (iii) acordar metodologías, (iv) delinear un plan de actividades, (v) reflexionar sobre el proceso, (vi) discutir los resultados parciales obtenidos, y (vii) diseñar la estrategia de comunicación (Albicette *et al.*, 2017).

3. Implementación del enfoque en sistemas ganaderos familiares

3.1. Contexto

La ganadería vacuna y ovina es el sistema de producción predominante del sector agropecuario nacional. Los sistemas ganaderos criadores familiares en Uruguay, en general, aplican bajos niveles de tecnología y, como consecuencia, presentan baja eficiencia productiva, con importantes fluctuaciones productivas entre años. Existe una gran brecha entre el conocimiento disponible y las prácticas que utilizan los productores ganaderos familiares (Gómez Miller, 2017; Gómez Miller y Saravia, 2016), lo cual abre oportunidades para mejorar la sostenibilidad de la producción familiar. Desde el INIA se implementaron varios proyectos de investigación en torno a esta problemática. En este apartado, se presentan a modo de ejemplo los resultados de dos proyectos: “Co-innovando para el desarrollo sostenible de sistemas de producción familiar de Rocha-Uruguay”, Proyecto Rocha (Aguerre *et al.*, 2018) y “Co-innovación para la promoción de sistemas productivos sustentables”, Proyecto Norte (Gómez Miller, 2018).

3.2. Proyecto Rocha

Aspectos metodológicos

El proyecto “Co-innovando para el desarrollo sostenible de sistemas de producción familiar de Rocha-Uruguay” del Programa Nacional de Investigación en Producción Familiar de INIA es un ejemplo de cómo promover procesos de transición agroecológica desde la investigación. El mismo buscó contribuir, desde la investigación científica y el desarrollo tecnológico, a mejorar la sustentabilidad de los sistemas ganaderos familiares y al desarrollo del medio rural, aportando a la mejora de la calidad de vida de los pobladores de la región este del Uruguay.

El proceso de coinovación fue implementado entre abril de 2012 y diciembre de 2015 en el este de Uruguay (Albicette *et al.*, 2017). La investigación se realizó a tres niveles (Figura 2): (i) a nivel predial, en siete predios representativos de la región y vinculados a la Comisión Nacional de Fomento Rural, todos ganaderos especializados en cría (vacuna y ovina) y presentando como principal recurso forrajero el campo natural. Estos sistemas fueron visitados mensualmente por el técnico extensionista, apo-

yado por el equipo de investigación, siguiendo tres etapas: caracterización y diagnóstico (abril a diciembre de 2012), rediseño (julio a diciembre de 2012) e implementación, monitoreo y evaluación (enero de 2013 a julio de 2015); (ii) a nivel regional, se implementó un enfoque participativo para planificar, monitorear y evaluar el avance del proyecto con actores relevantes. Se consolidó una red interinstitucional, se implementaron seis talleres durante el proceso con el apoyo de facilitadores; (iii) a nivel del equipo de investigación, se consolidó un equipo multidisciplinario, incluyendo manejo de pasturas, producción animal, suelo, impacto ambiental y aspectos sociales. Se organizaron dos talleres por año, de un día de duración, para promover la interacción, la planificación y el seguimiento del equipo.

Para evaluar el proceso a nivel de los predios, se utilizó el Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de recursos naturales incorporando Indicadores de Sustentabilidad (MESMIS) desarrollado por Masera *et al.* (2000), considerando los atributos de sostenibilidad e identificando los puntos críticos. Se seleccionaron y monitorearon indicadores para integrar los resultados obtenidos. A nivel regional, se adaptó el método Análisis Participativo de Senderos de Impacto (PIPA, por sus siglas en inglés) descrito por Álvarez *et al.* (2010) para planificar, monitorear y evaluar el proyecto. El equipo de investigación siguió un proceso de investigación-acción participativa (MacDonald, 2012).

FIGURA 2. PROCESOS SIMULTÁNEOS E INTERCONECTADOS PARA IMPLEMENTAR EL ENFOQUE DE COINNOVACIÓN



Nota: * MESMIS: Marco para la Evaluación de Sistemas de Manejo de Recursos Naturales Incorporando Indicadores de Sustentabilidad (Masera et al., 2000). ** PIPA: Participatory Impact Pathways Analysis (Álvarez et al., 2010). *** PAR: Participatory Action Research (MacDonald, 2012).

Fuente: Elaboración propia.

Este proyecto fue guiado por un concepto de intensificación ecológica (Ruggia *et al.*, 2021; Aguerre *et al.*, 2018) que se basa en potenciar el manejo de procesos ecológicos para incrementar la oferta de servicios ecosistémicos (Tiftonell, 2014), rediseñando sistemas sostenibles que utilicen menos insumos y sean menos perjudiciales para el medio ambiente. En los sistemas ganaderos criadores, la clave es realizar una buena sincronización entre la producción de campo natural y los requerimientos animales en las diferentes estaciones del año. La propuesta se basa en las siguientes medidas estratégicas y tácticas de manejo (Ruggia *et al.*, 2021): ajuste de la carga animal y/o de la relación ovino/vacuno, asignación de diferentes potreros considerando altura del forraje y requerimientos animales a lo largo del año, concentración del período de entore, destete definitivo en otoño temprano, alimentación preferencial a las hembras durante el primer y el segundo invierno de vida, manejo del rodeo de cría considerando la condición corporal de la vaca en diferentes momentos del ciclo, diagnóstico de preñez en otoño, primer entore de las vaquillonas con dos años de edad, diagnóstico de actividad ovárica a mitad de entore, destete temporario y, en caso de ser necesario, destete precoz, chequeo del estatus sanitario del toro dos meses antes del inicio del período de entore.

Resultados

A nivel predial

A partir del análisis de los resultados productivos de 3 años anteriores en los siete predios y del estado inicial de las pasturas y los animales, se identificaron como puntos críticos la baja productividad física y económica, junto con la degradación de los recursos naturales. El problema central para mejorar la sostenibilidad del sistema era el desbalance entre los requerimientos animales y la oferta de alimento, lo cual provocaba baja eficiencia reproductiva, bajos pesos de venta de los animales, baja producción y bajos ingresos económicos a la vez que la degradación del campo natural.

La principal estrategia del rediseño fue la intensificación ecológica. Se desarrollaron varias propuestas para cada predio y se seleccionaron aquellas que preferentemente utilizaban recursos propios del predio y no implicaban costos incrementales ni recursos extra prediales. Luego

de un acuerdo en torno de los objetivos de producción, las propuestas se enfocaron en: (i) ajuste de la carga animal del sistema (carga total y relación lanar/vacuno), (ii) uso y aplicación de tecnologías desarrolladas para el manejo del rodeo de cría y la recría, (iii) manejo del pastoreo, asignando los potreros de acuerdo con la altura del pasto y los requerimientos animales.

Los resultados de la implementación de las propuestas se monitorearon por más de dos años, utilizando indicadores para las tres dimensiones de la sostenibilidad (Figura 3). Con respecto a la dimensión productivo-económica, los siete predios aumentaron la carne equivalente en promedio de 99 a 123 kg/ha/año y el ingreso neto, de 58 a 98 US\$/ha/año. En cuanto a la dimensión ambiental, la biomasa del campo natural en primavera se incrementó de 1.183 a 1.868 kg MS/ha, mientras que la integridad ecosistémica (Blumetto *et al.*, 2019), la diversidad de aves y la fracción del carbono lábil del suelo (760 mg C kg/suelo) se mantuvieron durante el período evaluado. Finalmente, cambios muy significativos fueron observados en la dimensión social, destacándose una reducción en el tiempo de trabajo destinado al manejo de animales y pasturas de 25%, un incremento de 39% a 97% en la utilización de las 11 tecnologías propuestas, y el cambio de “no planificar” a comenzar a “planificar a mediano plazo”. Todos estos avances fueron el resultado de cambios en los conocimientos y las habilidades de los productores con relación a cómo mirar y manejar sus sistemas de producción. Los principales cambios y aprendizajes destacados por los productores se presentan en la Figura 4.

El enfoque de coinnovación y el tipo de vínculo entre el productor y el técnico extensionista logrado en este proyecto jugaron un rol esencial como vehículo de cambio hacia situaciones de mayor sostenibilidad en los predios (Albicette *et al.*, 2016).

FIGURA 3. RESULTADOS A NIVEL PREDIAL



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 4. CAMBIOS Y APRENDIZAJES DESTACADOS POR LOS PRODUCTORES



Fuente: Elaboración propia.

A nivel regional

A nivel regional se consolidó una red interinstitucional, integrada por las siete familias de productores, el equipo de investigación y representantes de organizaciones de productores locales y nacionales (Sociedad de Fomento Rural [SFR] Castillos, SFR Ruta 109 y Comisión Nacional de Fomento Rural [CNFR]), la universidad, los gobiernos local y nacional, y los servicios locales de extensión. Durante el primer taller interinstitucional, los participantes desarrollaron una visión compartida de sus expectativas para el final del proyecto. Asimismo, discutieron el impacto de diferentes líneas de acción, proponiendo estrategias, productos y resultados para lograr esa visión. Durante los siguientes talleres, los miembros del equipo de investigación y los productores participantes, presentaron las actividades implementadas durante el proyecto y sus resultados. Sobre esta base, los participantes reflexionaron sobre los resultados y el progreso obtenidos considerando la estrategia elaborada, usando métodos participativos y sugiriendo cambios para mejorar el impacto del proyecto. Se elaboraron dos planes de comunicación del proyecto, con el objetivo de difundir eficazmente sus resultados y promover el aprendizaje de los diferentes actores involucrados. Varias actividades del plan de comunicación tuvieron lugar durante el transcurso del proyecto. Cinco días de campo fueron organizados e implementados por la red interinstitucional, involucrando a más de 600 participantes. Aproximadamente 200 personas participaron del día de campo final, durante el cual el equipo de investigación, los productores y los miembros de la red interinstitucional intercambiaron con los participantes sobre resultados y lecciones aprendidas.

A nivel del equipo investigación

A nivel de investigación, se consolidó un equipo de 25 miembros con dedicación parcial, integrado por 17 investigadores y 8 asistentes. La metodología PAR permitió avanzar en la comprensión de las diferentes áreas abordadas: económica-productiva, ambiental y social. Se realizaron seis talleres con todo el equipo de investigación, que aportaron para comprender el problema de investigación, así como consensuar el enfoque metodológico. Paralelamente, se realizaron varias reuniones interdisciplinarias para abordar temas específicos y orientar eficazmente el proceso de investigación. A medida que avanzaba el proceso, los talleres se enfocaron en analizar las fortalezas y debilidades de la implementación

del proyecto, lo que permitió incorporar las lecciones aprendidas durante su desarrollo.

La transdisciplinariedad surgió como propiedad emergente del equipo del proyecto, que integraba a investigadores, productores y actores locales (Albicette *et al.*, 2017), mostrando una nueva oportunidad en el INIA para la generación de conocimiento orientado a la práctica.

3.3. Proyecto Norte

Aspectos metodológicos

El proyecto “Co-innovación para la promoción de sistemas productivos sustentables” se planteó como objetivo abordar la problemática de los productores familiares y generar alternativas capaces de contribuir a mejorar su viabilidad. Se trabajó en acuerdo con los productores y sus familias, con una visión integral de las limitantes que pudieran estar operando sobre sus sistemas, aportando herramientas para contribuir a su solución.

Se trabajó con tres predios familiares ubicados sobre suelos de basalto, en el área de influencia del INIA Tacuarembó. Esta es una de las regiones que, por sus características agroecológicas, han sido priorizadas por el MGAP en sus políticas de desarrollo. La metodología aplicada fue la de estudio de caso. Para la selección de predios se consideró que fueran representativos de los sistemas de producción familiar ganaderos de la zona, considerando distintas combinaciones de rubros y dotación de recursos productivos, y se solicitó a las organizaciones de productores de la región su apoyo para definir un listado preliminar de potenciales candidatos. Para la selección definitiva se consideró, entre otros aspectos, el interés y la motivación por participar en el proyecto, la disposición a incorporar cambios en el sistema de producción (previo acuerdo de las partes) y la incorporación de algún tipo de registro de información económico-productiva.

Para evaluar el proceso a nivel de los predios se utilizó, al igual que en el Proyecto Rocha, el MESMIS (Masera *et al.*, 2000), considerando los atributos de sostenibilidad e identificando los puntos críticos, sobre la base de la selección de indicadores productivo-económicos, ambientales y sociales. A lo largo del proyecto se realizaron actividades de intercambio, discusión y reflexión entre los diferentes actores, con el objetivo de

monitorear y evaluar el estado de avance, ajustando y replanificando las actividades durante el transcurso del proyecto.

Resultados

A pesar de que el periodo de ejecución del proyecto fue de tres años (2012-2015), un lapso relativamente breve considerando los ciclos biológicos de sistemas ganaderos y sus características extensivas, fue posible evidenciar una mejora de los resultados productivos, que probablemente se afiance una vez que los productores internalicen plenamente las lógicas de manejo del campo natural en función de las necesidades de las diversas categorías del stock.

En lo que se refiere a la dimensión productivo-económica, en todas las situaciones existieron mejoras, aunque de diversa magnitud. En todos los predios, el énfasis estuvo puesto en el ajuste de carga, considerando que es el punto de partida para realizar un ordenamiento en el manejo, mediante una correcta asignación de forraje a cada categoría de animales en función de sus necesidades (fisiológicas, de crecimiento, etc.). De acuerdo con Paparamborda y Gómez Miller (2015), la eficiencia productiva de la ganadería de cría basada en campo natural se ve fuertemente afectada por las prácticas de manejo, básicamente la presión de pastoreo y la sincronización entre la producción de forraje y los requerimientos animales a lo largo del ciclo productivo. Ruggia *et al.* (2021) afirman que la experiencia de intervención del INIA en sistemas ganaderos criadores confirma que es posible obtener mejoras económico-productivas significativas a partir de medidas de manejo de bajo costo centradas en el aumento de la oferta de forraje y un manejo más eficiente del rodeo vacuno. A partir de estas premisas, se fue acordando con cada productor la implementación de diversas tecnologías para un mejor aprovechamiento de la oferta forrajera, a efectos de mejorar la productividad del predio.

El punto de partida era bastante heterogéneo, pues dos de los productores no aplicaban prácticamente ninguna de las tecnologías sugeridas para el manejo de un rodeo de cría vacuno, en tanto otro de ellos ya tenía al comienzo del proyecto un manejo razonablemente ajustado que le permitía lograr buenos indicadores productivos. El aumento de producción de carne equivalente durante el periodo fue, en promedio, del 18%. En tanto, el uso del conjunto de tecnologías de producción propuestas para el rediseño osciló en los distintos predios entre 58 y 100%. Esta situación se alinea con el concepto de estudio de caso, mostrando la diversidad de criterios de gestión predial que se verifican en la región. Eso da cuen-

ta de que, aun compartiendo un espacio territorial común, con similares recursos y accesibilidad a servicios, la incorporación de cambios es evaluada de manera diferencial y está muy asociada a un componente actitudinal. En el mismo pesa la diversidad de objetivos y estrategias de los productores agropecuarios, que muchas veces aparece mediada por factores tales como su origen, la escala disponible, la aversión al riesgo, la etapa del ciclo de vida por la que están transitando, sus redes de contacto, etc. En este contexto es que se deduce la importancia de aplicar enfoques como los desarrollados en este proyecto para promover cambios efectivos en los ganaderos familiares.

En cuanto a la dimensión ambiental, se evidenció que, en un lapso relativamente breve, no superior a los dos años, en este tipo de suelos se puede mejorar la producción de pastura de aquellos potreros que han estado sometidos a sobrepastoreo, una vez que se ajusta la carga y se realiza un sistema de pastoreo controlado, con criterios para medir la disponibilidad forrajera. Mediante la aplicación del índice de integridad ecosistémica (Blumetto *et al.*, 2019) se concluyó que, en todos los casos, la estrategia de manejo adoptada permitió mantener en buenos niveles este indicador ambiental, observándose mejora en algunos potreros.

En lo que se refiere al componente social, se comprobó una mejora en la capacidad de planificación de los productores, adquiriendo nuevas destrezas, al tiempo que se verificaron cambios personales de autoestima y orgullo, junto al planteo de perspectivas futuras de seguir intensificando los cambios positivos en los predios.

3.4. Emergentes del proceso

La implementación del enfoque de coinnovación en sistemas ganaderos en Uruguay continúa evolucionando. Varios proyectos fueron desarrollados, aplicando el enfoque a otras regiones y otros actores, capitalizando el conocimiento construido a nivel del equipo de investigación. En el momento de escribir este capítulo se está trabajando con 120 predios de productores que abarcan un área de 50 mil hectáreas.

4. Reflexiones finales

El enfoque de coinnovación tiene una potencialidad muy grande para apoyar los procesos de transición agroecológica en el país, más allá del

sistema productivo particular. Su implementación promueve cambios en los sistemas de producción, que abarcan las diferentes dimensiones de la sostenibilidad (véase la Introducción general de este libro), tanto la oferta de servicios ecosistémicos de regulación y soporte como el intercambio de saberes y el aprendizaje de los actores involucrados. Experiencias que logran mejorar los indicadores relacionados con la sostenibilidad (productivo-económica, ambiental y social) como las presentadas en este trabajo pueden inspirar procesos de transformación en otros sectores: lechería, horti-fruticultura, sistemas mixtos agrícola-ganaderos, etcétera.

Para apoyar desde la investigación procesos de transición agroecológica es necesario fomentar y consolidar equipos interdisciplinarios. Solo con el aporte de equipos con sólida formación técnica interactuando con los productores y las organizaciones sociales locales será posible avanzar más eficientemente en el proceso. Implementar el enfoque de coinnovación en los tres niveles, predio, región y equipo de investigación, es clave y permite: (i) trascender los resultados más allá de los predios involucrados directamente en cada proyecto; (ii) lograr una continuidad del proceso a través de nuevos proyectos; (iii) que los problemas que surjan durante el proceso puedan ser analizados sistémicamente y que nuevos trabajos de investigación se orienten a su resolución.

Los cambios a nivel de predio se basan en una estrecha colaboración entre el productor y el equipo de investigación, especialmente el técnico extensionista. Una nueva forma de vincularse entre el productor y el técnico extensionista que permita un proceso de aprendizaje, con una relación horizontal, de confianza, y una visión sistémica e integradora del predio, es clave como vehículo de cambio.

El desafío es escalar esta experiencia a través de un nuevo sistema de extensión basado en el enfoque de coinnovación para contribuir al desarrollo rural en Uruguay, lo cual requiere de la formación de futuros técnicos en aspectos tecnológicos, metodológicos y actitudinales, así como del desarrollo de estrategias de articulación interinstitucional.

Bibliografía

Aguerre, V., Albicette, M. M., Albín, A., Bortagaray, I., Benvenuto, M., Blumetto, O., Cardozo, G., Castagna, A., Clara, P., Del Pino, L., Dogliotti, S., García, F., Gilzans, J. C., Leoni, C., Montaldo, S., Quintans, G., Ruggia, A., Scarlato, M., Scarlato, S., Silvera, M. y Tiscornia, G. (2018), *Co-innovando para el desarrollo sostenible de sistemas ganaderos*

familiares de Rocha-Uruguay, Serie Técnica INIA 243, INIA, Montevideo, 132 pp.

Albicette, M. M., Leoni, C., Ruggia, A., Scarlato, S., Blumetto, O., Albin, A. y Aguerre, V.

(2017), "Co-innovation in family-farming livestock systems in Rocha, Uruguay: A 3-year learning process", en *Outlook on Agriculture*, 46 (2), pp. 92-98. Disponible en: <<https://doi.org/10.1177/0030727017707407>>.

Albicette, M. M., Bortagaray, I., Scarlato, S. y Aguerre, V.

(2016), "Co-innovación para promover sistemas ganaderos familiares más sostenibles en Uruguay. Análisis de tres años de cambios en la dimensión social de la sostenibilidad", en *Revista Latinoamericana de Estudios Rurales*, I (2), pp. 105-136.

Álvarez, S., Douthwaite, B., Thiele, G., Mackay, R., Córdoba, D. y Tehele, K.

(2010), "Participatory Impact Pathways Analysis: a practical method for project planning and evaluation", en *Development in Practice*, 20 (8), pp. 946-958.

Blumetto, O., Castagna, A., Cardozo, G., García, F., Tiscornia, G., Ruggia, A., Scarlato, S., Albicette, M. M., Aguerre, V. y Albin, A.

(2019), "Ecosystem integrity index, an innovative environmental evaluation tool for agricultural production systems", en *Ecol. Indic.*, 101, pp. 725-733. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.077>>.

Botha, N., Turner, J., Fielke, S. y Klerkx, L.

(2017), "Using a co-innovation approach to support innovation and learning: Cross-cutting observations from different settings and emergent issues", en *Outlook on Agriculture*, 46 (2), pp. 87-91.

Brockbank, A. y McGill, I.

(2006), *Facilitating Reflective Learning through Mentoring and Coaching*, Kogan, Londres, 325 pp.

Coutts, J., White, T., Blackett, P., Rijswijk, K., Bewsell, D., Park, N., Turner, J. A. y Botha, N.

(2017), "Evaluating a space for co-innovation: Practical application of nine principles for co-innovation in five innovation projects", en *Outlook on Agriculture*, 46(2), pp. 99-107.

Dogliotti, S., García, M. C., Peluffo, S., Dieste, J. P., Pedemonte, A., Bacigalupe, G. F., Scarlato, M., Alliaume, F., Álvarez, J., Chiappe, M. y Rossing, W.

(2014), "Coinnovation of family farm systems: A systems approach to sustainable agriculture", en *Agricultural Systems*, 126, pp. 76-86.

Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M. y Tittonell, P.

(2011), "Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: revisiting methods, concepts and knowledge", en *European Journal of Agronomy*, 34(4), pp. 197-210.

El Bilali, H.

(2018), *Transition heuristic frameworks in research on agro-food sustainability transitions. Environment, Development and Sustainability*. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s10668-018-0290-0>>.

Elzen, B., Barbier, M., Cerf, M. y Grin, J.

(2012), *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*, pp. 431-455. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2>>.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

(2017), *The future of food and agriculture – Trends and challenges*, FAO, Roma, 163 pp.

Fazey, I., Schapke, N., Caniglia, G., Patterson, J., Hultman, J., Van Mierlo, B., Sawe, F., Wiek, A., Wittmayer, J., Aldunce, P., Al Waer, H., Battacharya, N., Bradbury, H., Carmen, E., Colvin, J., Cvitanovic, C., D'Souza, M., Gopel, M., Goldstein, B., Hamalainen, T., Harper, G., Henfry, T., Hodgson, A., Howden, M. S., Kerr, A., Klaes, M., Lyon, C., Midgley, G., Moser, S., Mukherjee, N., Müller, K., O'Brien, K., O'Connell, D. A., Olsson, P., Page, G., Reed, M. S., Searle, B., Silvestri, G., Spaier, V., Strasser, T., Tschakert, P., Uribe-Calvo, N., Waddell, S., Rao-Williams, J., Wise, R., Wolstenholme, R., Woods, M. y Wyborn, C. (2018), "Ten essentials for action-oriented and second order energy transitions, transformations and climate change research", en *Energy Res. Soc. Sci.*, 40, pp. 54-70. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.11.026>>.

Gaitán-Cremaschi, D., Klerkx, L., Duncan, J., Trienekens, J. H., Huenchuleo, C., Dogliotti, S., Contesse, M. E. y Rossing, W. A. H.

(2019), "Characterizing diversity of food systems in view of sustainability transitions. A review", en *Agronomy for Sustainable Development*, 39 (1). Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s13593-018-0550-2>>.

Gómez Miller, R.

(2017), *Adopción de tecnología en sistemas ganaderos del norte*, Serie Técnica INIA 235, INIA, Montevideo, 101 pp.

Gómez Miller, R. (ed.)

(2018), *La co-innovación como estrategia para promover sistemas de producción más sustentables. Estudios de caso en predios familiares del norte*, Serie Técnica INIA 247, INIA, Montevideo, 90 pp.

Gómez Miller, R. y Saravia, H.

(2016), "Tecnología en sistemas ganaderos criadores de Sierras del Este: oferta disponible y toma de decisiones tecnológicas en el predio", en *Agrociencia*, 20 (1), pp. 113-122.

Klerkx, L., Van Mierlo, B. y Leeuwis, C.

(2012), "Evolution of systems approaches to agricultural innovation: concepts, analysis and interventions", en: Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, B. (eds.), *Farming Systems Research into the 21st Century: The New Dynamic*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 457-483.

Lamine, C.

(2011), “Transition pathways towards a robust ecologization of agriculture and the need for system redesign. Cases from organic farming and IPM”, en *Journal of Rural Studies*, 27, pp. 209-219.

Leeuwis, C., Pyburn, R. y Röling, N.

(2002), *Wheelbarrows full of frogs: social learning in rural resource management: international research and reflections*, Koninklijke Van Gorcum, 479 pp.

Leeuwis, C. y Van den Ban, A.

(2004), *Communication for rural innovation: Rethinking agricultural extension*, Blackwell Science, Oxford, 412 pp.

Loorbach, D. y Rotmans, J.

(2006), “Managing transitions for sustainable development”, en Olshoorn, X. y Wieczorek, A. (eds.), *Understanding Industrial Transformation: Views from Different Disciplines*, Springer, Países Bajos, pp. 187-206.

MacDonald, C.

(2012), “Understanding participatory action research: a qualitative research methodology option”, en *Canadian Journal of Action Research*, 13 (2), pp. 34-50.

Masera, O., Astier, M. y López-Ridaura, S.

(2000), *Sustainability and natural resource management. The MESMIS Evaluation Framework*, Working Document D36, Grupo Interdisciplinario de Tecnología Rural Apropiada, México.

Paparamborda, I. y Gómez Miller, R.

(2015), “Production gaps in livestock grazing systems in Sierras del Este, Uruguay: magnitude, causes and strategies to reduce them”, en *5th International Symposium for Farming Systems Design*, 7-10 sept. 2015, Montpellier (Francia), 3 pp.

Rossing, W. A. H., Albicette, M. M., Aguerre, V., Leoni, C., Ruggia, A. y Dogliotti, S.

(2021), “Crafting actionable knowledge on ecological intensification: Lessons from co-innovation approaches in Uruguay and Europe”, en *Agricultural Systems*, 190, 103103. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103103>>.

Ruggia, A., Dogliotti, S., Aguerre, V., Albicette, M. M., Albin, A., Blumetto, O., Cardozo, G., Leoni, C., Quintans, G., Scarlato, S., Tittonell, P. y Rossing, W. A. H.

(2021), “Systemic redesign of livestock farms on native grasslands based on ecologically intensive principles – a case of co-innovation in Rocha, Uruguay”, en *Agricultural Systems*, 191, 103148. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103148>>.

Tittonell, P.

(2014), “Ecological intensification of agriculture—sustainable by nature”, en

Current Opinion in Environmental Sustainability, 8, pp. 53-61. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.08.006>>.

Tittonell, P.

(2019), “Las transiciones agroecológicas: múltiples escalas, niveles y desafíos”, en *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, Universidad Nacional de Cuyo, 51(1), pp. 231-246. ISSN 1853-8665. Disponible en: <http://revista.fca.uncu.edu.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=654:2019-06-13-17-56-25&catid=35:2019-06-13-17-12-33>.

Veldkamp, A., Altvorst, A. C. V., Eweg, R., Jacobsen, E., Kleef, A. V., Latesteijn, H. V., Mager, S., Mommaas, H., Smeets, P. J. A. M., Spaans, L. y Trijp, J. C. M. V.

(2009), “Triggering transitions towards sustainable development of the Dutch agricultural sector: TransForum’s approach”, en *Agronomy for Sustainable Development*, 29, pp. 87-96.

Wezel, A., Gemmill Herren, B., Bezner Kerr, B., Barrios, E., Rodrigues Gonçalves, A. L. y Sinclair, F.

(2020), “Principios y elementos agroecológicos y sus implicaciones para la transición a sistemas alimentarios sostenibles. Una revisión”, en *Agronomía para el desarrollo sostenible*, 40, p. 40. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s13593-020-00646-z>>.

Capítulo 21

Uso de la sombra como herramienta de mitigación del riesgo de estrés calórico en sistemas de producción animal

Pablo Rovira, Alejandro La Manna y Guadalupe Tiscornia

1. Introducción. Estrés calórico: importancia para el animal (producción ganadera y lechera), el productor, la sociedad y el ambiente

El clima es uno de los factores más importantes en determinar el crecimiento y el desarrollo de animales destinados a la producción de alimentos y fibras. Las condiciones climáticas inciden en la viabilidad productiva y económica de los sistemas de producción animal, incluyendo cambios en la producción y la calidad de forraje, en la disponibilidad de agua, en la alteración de la dinámica de poblaciones de plagas y patógenos, y generando impactos directos en la salud, el bienestar, la conducta y la productividad de los animales (Thornton *et al.*, 2009).

El estrés calórico es uno de los impactos directos más importantes sobre los animales y se estima que lo será aún más en el futuro debido a la proyección de incremento global de la temperatura de la superficie terrestre y mayor frecuencia de olas de calor, y al continuo mejoramiento de la productividad animal asociada a genotipos superiores con mayor actividad metabólica y producción de calor corporal (St-Pierre *et al.*, 2003; IPCC, 2018; Collier *et al.*, 2019). Los animales expuestos a condiciones de estrés calórico ven afectadas su reproducción, ganancia de peso, producción y calidad de leche, entre otros atributos (Roman *et al.*, 2017; Clariget *et al.*, 2018). Dichas consecuencias son producto de alteraciones que ocurren a nivel tisular, metabólico y fisiológico, incluyendo daño oxidativo y necrosis celular, movilización y redireccionamiento de

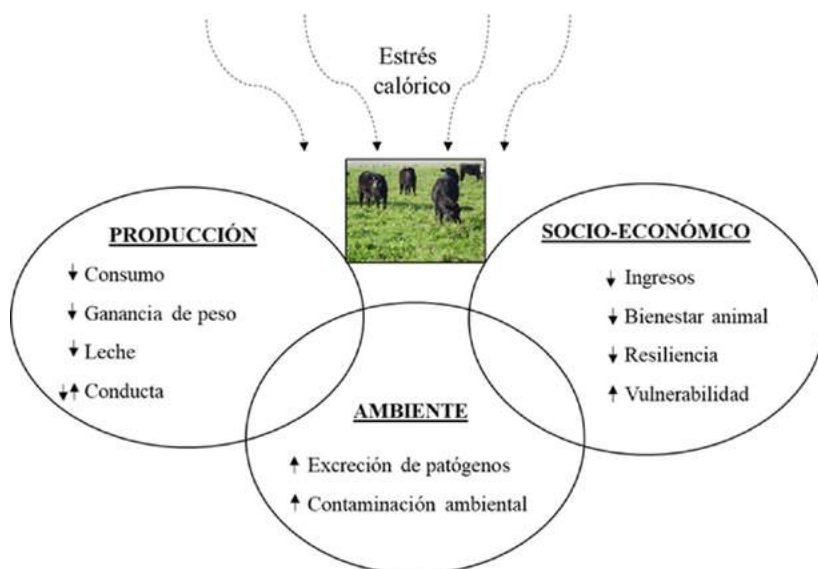
nutrientes, cambios en la concentración de glucosa e insulina en sangre, entre otros mecanismos (Baumgard y Rhoads Jr., 2005; Belhadj Slimen *et al.*, 2015). La menor productividad repercute en el resultado económico de la empresa al disminuir el ingreso debido a pérdidas que pueden ser tangibles (por ejemplo, la mortandad por estrés calórico) o intangibles (por ejemplo, el kg de peso vivo o los litros de leche que se dejan de producir por estrés calórico).

Sistemas ganaderos sin medidas proactivas de prevención y mitigación del estrés calórico animal son menos resilientes y más vulnerables, dos de los principales atributos propuestos por Bacon *et al.* (2012) para evaluar la dimensión social de la sostenibilidad de sistemas ganaderos. El estrés calórico repercute en el bienestar de los animales destinados a la producción de alimentos. Animales expuestos a estrés calórico incrementan la temperatura corporal interna, presentan síntomas de jadeo y reducen el consumo de alimentos, comprometiéndose algunas de las libertades básicas del bienestar animal como ser la ausencia de malestar físico y térmico, o la expresión de patrones de comportamiento normal (FAWC, 1992). El bienestar animal es un atributo del proceso de producción, más allá de las cualidades intrínsecas del producto final, cada vez más importantes para el consumidor final y la sociedad en su conjunto en el momento de definir la compra de alimentos de origen animal.

Los animales bajo estrés calórico cambian su comportamiento, aumentando los riesgos para el ambiente. Estos animales se refrescan ingresando a tajamares y arroyos donde defecan y orinan, contaminando el recurso hídrico. Además, los animales estresados presentan mayor nivel de excreción de bacterias patogénicas (*Escherichia coli* O157:H7 y *Salmonella* spp.) a través de las heces (Edrington *et al.*, 2004; Venegas-Vargas *et al.*, 2016; Hamel *et al.*, 2021). Esto incrementa el riesgo de contaminación, no solo de otros animales sino también de personas y de cultivos destinados a consumo humano.

Entender el efecto del estrés calórico en animales de producción e identificar alternativas para su mitigación tiene implicancias productivas, socioeconómicas y ambientales (Figura 1). Hasta hace poco, se veía como una problemática restringida a regiones tropicales, pero hoy se reconoce que se ha extendido a regiones más templadas en un escenario de cambio climático (Perkins-Kirkpatrick y Lewis, 2020) y que, por lo tanto, los sistemas tradicionales de producción en estas zonas también deben transitar un camino de adaptación a la nueva realidad.

FIGURA 1. IMPACTO DEL ESTRÉS CALÓRICO EN LAS DIMENSIONES PRODUCTIVA, AMBIENTAL Y SOCIOECONÓMICA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN ANIMAL



Fuente: Elaboración propia.

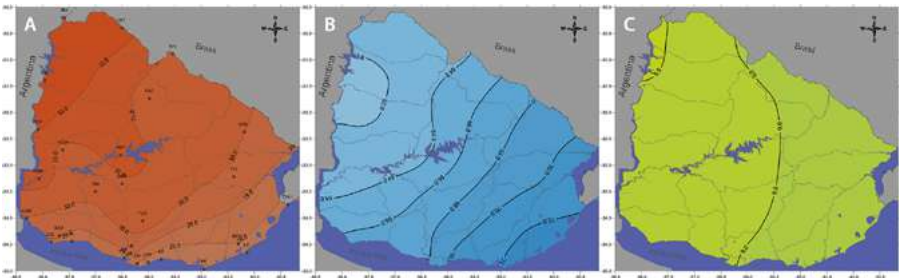
El impacto del estrés calórico en los animales puede ser mitigado mediante modificaciones en el ambiente, cambios en el manejo y en la dieta ofrecida a los animales, y/o mediante la selección de animales o razas más tolerantes a las altas temperaturas (Renaudeau *et al.*, 2012). En una encuesta realizada a productores ganaderos en Uruguay (MGAP-OPYPA, 2018), el 49% de los encuestados menciona la mejora en la disponibilidad de sombra como una medida o acción que puede emplearse para reducir la vulnerabilidad al cambio climático.

Todos estos conceptos son válidos para cualquier sistema de producción, pero son aún más relevantes en sistemas bajo transiciones agroecológicas, en los que las dimensiones productiva, ambiental, económica y social juegan un rol central. En el presente capítulo, abordamos la provisión de sombra a los animales como una modificación del ambiente para favorecer el desarrollo de sistemas de producción animal más sostenibles en un contexto de cambio climático y mayor riesgo de estrés calórico animal.

2. Situación actual

Las principales variables ambientales que intervienen en el estrés térmico son la temperatura media del aire, la humedad relativa, la radiación solar y la velocidad del viento (Thom, 1959). En el caso de Uruguay, y de acuerdo con lo analizado por Castaño *et al.* (2011), la temperatura más alta se presenta en los meses de enero y febrero (temperatura máxima media de 22,6 °C) exhibiendo las temperaturas extremas medias del aire un gradiente creciente de sur a norte (Figura 2A). La humedad relativa promedio del aire sobre el país muestra una tendencia creciente en dirección noroeste-sureste (valores medios anual entre 70 y 78%), registrándose los menores valores durante el verano (65-75%) (Figura 2B). La heliofanía real (insolación) media sobre el país presenta una variación espacial mínima, con una tendencia creciente en dirección sureste-noroeste (insolación media diaria de aproximadamente 7 horas), ocurriendo los mayores valores en enero (9,0-9,5 h/día) (Figura 2C).

FIGURA 2. MAPAS NACIONALES QUE MUESTRAN LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS PRINCIPALES VARIABLES CLIMÁTICAS INVOLUCRADAS EN EL ESTRÉS TÉRMICO EN GANADO BOVINO EN EL MES DE ENERO: TEMPERATURA MÁXIMA MEDIAS EN GRADOS CELSIUS (A), HUMEDAD RELATIVA MEDIA EN PORCENTAJE (B) Y HELIOFANÍA MEDIA EN HORAS AL DÍA (C) EN LOS EJES X E Y SE MUESTRAN LAS COORDENADAS DE LONGITUD Y LATITUD, RESPECTIVAMENTE.



Fuente: Castaño et al. (2011).

Finalmente, los vientos predominantes son del norte al este (N a E), siendo los vientos del sector sureste (SE) importantes en la costa durante el semestre cálido (octubre a abril), mientras que durante el otoño y el invierno se observa un incremento en la frecuencia de vientos sur a oeste (S a O) (Nagy *et al.*, 2018).

Si bien, como se mencionara antes, Uruguay no se encuentra en una zona donde el estrés térmico para bovinos se dé en forma sostenida y peligrosa, los resultados de investigación del INIA (Rovira y Velazco, 2010; Román *et al.*, 2017; Clariget *et al.*, 2018) han demostrado importantes pérdidas, debido a los cambios fisiológicos y metabólicos en los animales por no disponer de mecanismos de mitigación.

El impacto del calor se puede estimar a través de diferentes índices, que se diferencian en el peso que le dan a cada uno de los componentes, principalmente temperatura y/o humedad (Bohmanova *et al.*, 2007). El más utilizado a nivel mundial es el conocido como índice de temperatura y humedad (ITH) (Thom, 1959), que nos permite caracterizar el ambiente y relacionarlo con la respuesta biológica del ganado (St-Pierre *et al.*, 2003; Bernabucci *et al.*, 2010).

Existen dos variantes de este índice ITH, que se utilizan para dos sistemas distintos: lechería y ganadería de carne. Cada uno de ellos tiene umbrales de riesgo característicos:

- ITH ganado lechero (Thom, 1959). Fórmula Valtorta y Gallardo (1996):

$$\text{ITH} = (1,8 \times \text{Ta} + 32) - (0,55 - 0,55 \times \text{HR}/100) \times (1,8 \times \text{Ta} - 26)$$

Siendo los valores mayores a 72 los de condiciones de peligro o emergencia (Zimbelman *et al.*, 2009).

- ITH ganado de carne (Mader *et al.*, 2006):

$$\text{ITH ajustado} = 6,8 + \text{ITH} - (3,075 \times \text{VV}) + (0,0114 \times \text{RAD})$$

Siendo los valores mayores a 75 los de condiciones de peligro o emergencia (Hahn *et al.*, 2009).

Donde:

Ta = temperatura media diaria del aire (°C),

HR = humedad relativa media diaria del aire (%),

VV = velocidad media diaria del viento a 2 m de altura (m/s),

RAD = radiación solar diaria (W/m²).

Cabe destacar que, sobre esta base y para que productores y técnicos puedan disponer del ITH con siete días de anticipación es que des-

de el INIA se desarrolló una herramienta web.¹ Esta previsión de estrés calórico en bovinos, disponible para los dos sistemas productivos antes mencionados,² permite anticiparse y tomar las medidas necesarias para minimizar los efectos del estrés por calor y evitar pérdidas en bienestar y producción animal.

En lo que se refiere al análisis histórico de este índice para las estaciones agroclimáticas del INIA donde estas producciones son más relevantes (INIA La Estanzuela, INIA Treinta y Tres, INIA Salto Grande e INIA Tacuarembó), se determinó el número de días promedio por mes con condiciones de peligro sobre la base de la serie histórica de cada estación (Tabla 1). Para el caso de INIA La Estanzuela, se consideró un período de 56 años; para INIA Treinta y Tres, fueron 34 años; INIA Salto Grande, con 51 años; e INIA Tacuarembó, 35 años. Cabe destacar que los períodos considerados en las series históricas varían en función del índice que se calcula debido a las variables requeridas.

TABLA 1. PROMEDIO DE DÍAS, PARA CADA MES DEL AÑO, CON VALORES MAYORES AL UMBRAL DEL RIESGO “PELIGRO” EN CUATRO ESTACIONES AGROCLIMÁTICAS INIA, SOBRE LA BASE DE LA SERIE HISTÓRICA EXISTENTE PARA CADA ESTACIÓN

Mes	ITH Thom				ITH Mader <i>et al.</i>			
	LE	TT	SG	Tbo	LE	TT	SG	Tbo
1	13,32 (± 4,42)	14,37 (± 5,38)	23,71 (± 4,14)	15,23 (± 4,39)	11,75 (± 4,64)	10,72 (± 4,52)	24,05 (± 3,74)	18,54 (± 4,92)
2	9,09 (± 4,63)	10,76 (± 5,09)	17,68 (± 3,78)	11,24 (± 5,08)	8,38 (± 4,4)	9,42 (± 4,57)	19,72 (± 3,65)	15,09 (± 4,5)
3	4,07 (± 3,46)	5,21 (± 4,14)	12,44 (± 5,32)	6,27 (± 4,55)	3,69 (± 3,49)	5,74 (± 4,92)	15,97 (± 5,22)	10,59 (± 5,34)

(Continúa en página siguiente)

1 Portal INIA, “Previsión de estrés calórico en bovinos”. Disponible en: <<http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Prevision-ITH-Vacunos#:~:text=Las%20condiciones%20predispone%20al%20estr%C3%A9s,m%C3%A1s%20utilizado%20a%20nivel%20mundial>>.

2 Portal INIA, “Previsión ITH lechería”. Disponible en: <<http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Prevision-ITH-Vacunos/Prevision-ITH-lecheria>>; y portal INIA, “Previsión ITH carne”. Disponible en: <<http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Prevision-ITH-Vacunos/Prevision-ITH-carne>>.

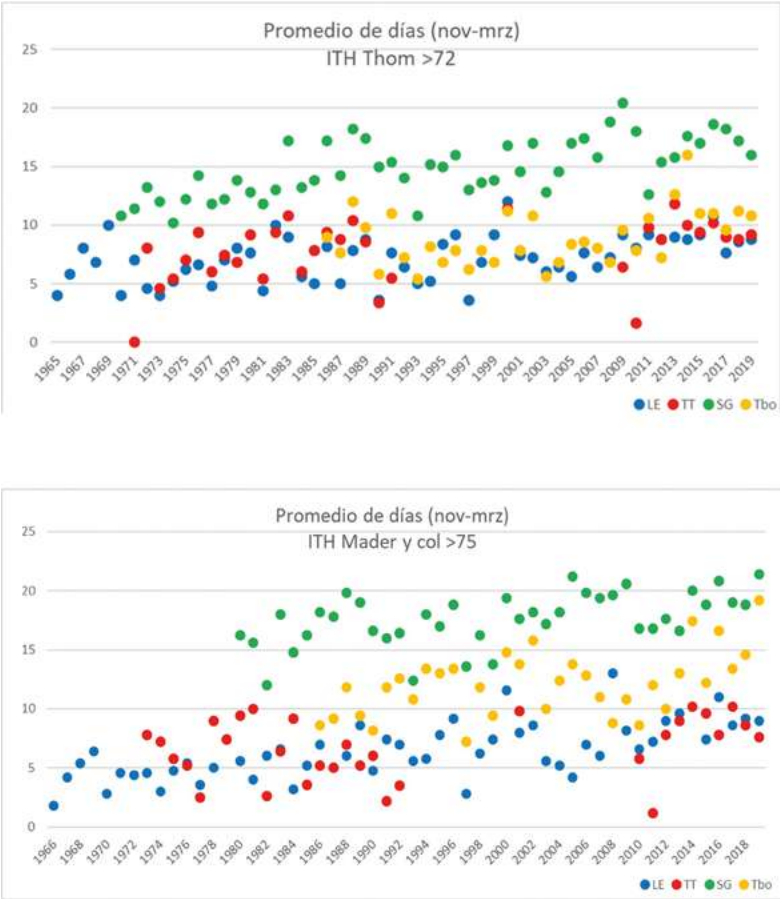
4	0,56 (± 1,45)	0,73 (± 1,49)	3,39 (± 3,2)	1,44 (± 2,03)	0,27 (± 0,65)	1,07 (± 1,88)	4,54 (± 3,73)	2,21 (± 2,43)
5	0,13 (± 0,51)	0,21 (± 0,55)	0,81 (± 1,48)	0,24 (± 0,86)	0	0,13 (± 0,57)	0,8 (± 1,3)	0,21 (± 0,59)
6	0	0	0,22 (± 0,52)	0,03 (± 0,17)	0	0	0,23 (± 0,67)	0,03 (± 0,17)
7	0,04 (± 0,27)	0,09 (± 0,38)	0,15 (± 0,55)	0,03 (± 0,17)	0	0,03 (± 0,18)	0,1 (± 0,38)	0
8	0,07 (± 0,33)	0,12 (± 0,33)	0,73 (± 1,14)	0,21 (± 0,48)	0	0,03 (± 0,178)	0,29 (± 0,6)	0,1 (± 0,29)
9	0,13 (± 0,43)	0,12 (± 0,54)	1,02 (± 1,47)	0,41 (± 0,93)	0,02 (± 0,14)	0,03 (± 0,18)	0,71 (± 1,35)	0,18 (± 0,87)
10	0,27 (± 0,65)	0,21 (± 0,48)	2,85 (± 2,49)	0,71 (± 1,27)	0,18 (± 0,51)	0,18 (± 0,73)	3,22 (± 2,19)	1 (± 1,28)
11	1,68 (± 1,69)	1,88 (± 1,77)	7,15 (± 3,8)	2,88 (± 1,92)	1,69 (± 2,31)	1,81 (± 1,78)	10,02 (± 3,99)	4,82 (± 3,32)
12	7,59 (± 4,08)	7,41 (± 4,43)	16,81 (± 4,94)	9,27 (± 4,34)	6,82 (± 3,79)	6,38 (± 4,17)	18,81 (± 4,91)	12,09 (± 5,36)

Nota: LE: INIA La Estanzuela; TT: INIA Treinta y Tres; SG: INIA Salto Grande; TBO: INIA Tacuarembó.

Fuente: Elaboración propia.

Considerando el período noviembre a marzo, que es cuando se da la mayor cantidad de días con umbrales superiores al nivel de peligro, vemos una diferenciación a nivel nacional dada por las diferencias entre el comportamiento de las variables en cada región del país (Figura 3).

FIGURA 3. PROMEDIO ANUAL (PERÍODO NOVIEMBRE A MARZO) DE DÍAS CON ITH MAYOR AL UMBRAL DE “PELIGRO” PARA CADA SISTEMA PRODUCTIVO (LECHERÍA: THOM; Y GANADERÍA DE CARNE: MADER ET AL.) Y CADA UNA DE LAS CUATRO ESTACIONES AGROCLIMÁTICAS INIA CONSIDERADAS



Nota: LE: INIA La Estanzuela; TT: INIA Treinta y Tres; SG: INIA Salto Grande; Tbo: INIA Tacuarembó. Cada año corresponde al período noviembre de ese año-marzo del año siguiente.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con este análisis, las medidas que son necesarias tomar van a depender, no solo de las condiciones propias del predio sino de la región, siendo, en este caso, INIA Salto Grande donde se registra la mayor cantidad de días con valores sobre el umbral de peligro para ambos sistemas productivos.

De la información climática presentada se puede concluir que en Uruguay existen condiciones para el desarrollo de estrés calórico. Sin embargo, la provisión de sombra para los animales como herramienta práctica de mitigación no es algo generalizado en los sistemas de producción. En un relevamiento realizado en establecimientos lecheros en Uruguay, Huertas *et al.* (2013) encontraron que en el 68% de las visitas realizadas los corrales de espera no disponían de sombra para los animales. En bovinos para carne, en una encuesta tecnológica realizada a productores ganaderos se encontró que solo el 21% de los establecimientos disponía de sombra en todos los potreros, el 41% en más del 50% de los potreros, mientras que el 38% no disponía de sombra en los potreros (Pravia *et al.*, 2013).

A pesar de que en Uruguay existen aproximadamente 752.000 ha de bosque nativo y 689.000 ha forestadas desde el año 1990 (Marrero y Bizzarero, 2017), la distribución heterogénea de la sombra en los potreros de pastoreo y restricciones de acceso de los animales a los montes y plantaciones limitan el beneficio directo del suministro de sombra a estos. En el corto y mediano plazo es de esperar que mejore la disponibilidad de sombra para los animales, estimulada por la evidencia científica que resalta el impacto de la sombra y por la promoción de inversiones en infraestructura (por ejemplo, agua, sombra, subdivisiones) para enfrentar la variabilidad y el cambio climático (MGAP, 2020).

3. Tecnologías propuestas

Existen tres áreas en las que se puede buscar mitigar el estrés calórico en los rumiantes, que son el manejo del ambiente, la dieta y la genética (Beede y Collier, 1986). En Uruguay, la que tiene mayor incidencia y aplicabilidad es el manejo del ambiente, principalmente a través del uso de sombras, ya sean naturales o artificiales.

3.1. Sombra natural

El uso de sombras previene la incidencia de la radiación solar directa e indirecta sobre los animales. La sombra natural es una de las más efectivas (Figura 4), ya que no solo disminuye la incidencia de la radiación solar, sino que también produce una disminución de la temperatura del aire por la evaporación de agua desde las hojas (Saravia *et al.*, 2003).

Sumado a esto, si la implementación se da con especies nativas o si se aprovechan bosques nativos existentes, el beneficio ambiental aumenta. La integración de los montes nativos como sombra y abrigo para el ganado en sistemas ganaderos extensivos puede resultar clave, dado que su papel trasciende este aspecto, brindando además diferentes servicios ecosistémicos (Tiscornia *et al.*, 2022). No solo brindan servicio de sombra y abrigo para el ganado, sino que colaboran en funciones ecosistémicas de soporte (como la productividad primaria y hábitat) y en diferentes servicios de regulación como balance de carbono, control de erosión en suelo o calidad de agua (Brazeiro, 2018; Proyecto REDD+ Uruguay, 2019) (Figura 4). Adicionalmente, hay que destacar los bienes generados por los bosques nativos en la producción de leña o frutos, o, indirectamente, la miel (Brazeiro, 2018; Proyecto REDD+ Uruguay, 2019). Finalmente, el aporte de estos ambientes, desde el punto de vista social (paisaje, recreación), integra todos estos aspectos, sumamente importantes, que deberían tomarse en cuenta como parte estructural de los sistemas productivos con una visión sistémica de la integración de sombra y abrigo en la producción animal, y que cobran mayor relevancia cuando se habla de sistemas productivos que transitan hacia una producción sostenible, a través de los principios de la agroecología. Ello implica transiciones a diferentes escalas, niveles y dimensiones: social, biológica, económica, cultural, institucional y política (Tittonell, 2019).

Un análisis de los distintos aspectos del bosque nativo relacionados con degradación y estado, pero que incluye la interacción con sistemas productivos, fue abordado en el proyecto REDD+ (Programa para la Reducción de Emisiones causadas por la Deforestación y la Degradación forestal) Uruguay en el que el INIA estuvo involucrado. Uno de los objetivos planteados fue el de realizar recomendaciones que permitan integrar al bosque nativo en la gestión productiva del predio, fundado en la generación de una base teórica en torno de beneficios, oportunidades, desafíos y recomendaciones del uso de la cobertura forestal nativa en distintos sistemas de producción ganadera (Serie técnica INIA-REDD+, en prensa).

FIGURA 4. SOMBRA NATURAL GENERADA POR ÁRBOLES



Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, debemos mencionar también algunos aspectos que es necesario tener en cuenta. En el caso de tener que implantar estos árboles (sombra natural), se debe considerar que el desarrollo es lento, incluso cuando se apela a especies de rápido crecimiento como *Eucalyptus* o pino y más aún si se opta por especies nativas como el espinillo (*Scutia buxifolia*), del que se reportan crecimientos de alrededor de 3 mm por año en el diámetro de tronco a la altura del pecho para espinillo (Lucas *et al.*, 2018). Con relación a los costos, la implantación de sombra natural puede implicar mayores inversiones iniciales, sobre todo en la etapa de instalación, costos que seguramente puedan ser compensados con beneficios ecosistémicos en el largo plazo. Además, estos pueden verse afectados de modo adverso en situación de alta densidad de animales y sin la exclusión necesaria, debido a la concentración de heces y orina. Un ejemplo de esto se ha observado a nivel de campo, en montes de *Eucalyptus*, donde se constataba una clara afectación en los árboles debido a las altas cargas de ganado que, sin ningún tipo de exclusión, aprovechaban su sombra en forma permanente.

3.2. Sombra artificial

Las sombras artificiales son una excelente alternativa, sin embargo, hay que tener en cuenta una serie de consideraciones en el momento de pla-

nearlas, como ser ubicación, orientación, área de sombra efectiva, tipo de material, altura y categoría a utilizar. Las mismas pueden ser construidas con metal, malla sombra, nylon, y pueden ser fijas o móviles. Las consideraciones prácticas para contemplar para la realización de estas sombras son las siguientes.

- Ubicación: la ubicación de la sombra debe ser con preferencia en un lugar alto bien drenado y lejos de cortinas de árboles de potreros contiguos, para que circule el viento. La pendiente del piso debe ser de 1,5 a 2,5% para ayudar a mantener el drenaje y menor mantención.
- Orientación de la sombra: cuando el material es tierra, balastro o afín, la orientación norte-sur permite un mejor secado del piso; y la caída del techo hacia el oeste (parte más baja) maximiza la sombra en los horarios de más calor. Cuando el piso es de concreto, la orientación este-oeste es la más adecuada, ya que maximiza la sombra, aunque no es lo más común. Para ganado lechero se recomienda la orientación norte-sur.
- Área efectiva de la sombra: depende de la categoría animal. Para las condiciones de Uruguay, los tamaños mínimos recomendados para vacas lecheras y vacas secas son de 4,5 m² (3-6 m²), dependiendo de la raza y el kilaje; para vaquillonas, 3,5 m²; y terneras, 2,5 m². Para ganado de carne en terminación, 3,5 m² (3-5 m²). A mayor sombra efectiva es mejor, sin embargo, el costo aumenta.
- Altura de la sombra: a mayor altura es mejor, pero alturas de entre 3,7 m y 4,5 m ya son suficientes en la mayoría de los casos. Es muy importante respetar estas dimensiones, ya que de esto depende el grado de ventilación que tendrán los animales y, por lo tanto, la capacidad de alcanzar pérdidas de calor adecuadas. La altura mínima debe ser tal que permita pasar con un tractor para limpieza o reparación del suelo bajo la sombra. Pendiente del techo: alrededor de 15-18%, para evitar que se acumule agua de lluvia y favorecer, a la vez, un efecto chimenea para la remoción del calor. Si la orientación es norte-sur, la caída, o sea, el punto más bajo, debe ser al oeste; mientras que si la sombra es este-oeste, la caída debe ser hacia el norte. En instalaciones a dos aguas se recomienda dejar una abertura central de al menos 30 cm o mayor, dependiendo de su ancho, lo que permite la remoción del aire y evita el embolsamiento en caso de viento.

El tipo de material es importante ya que puede mejorar la efectividad. En la Tabla 2 se detallan diferentes materiales y sus posibles efectividades.

TABLA 2. EFECTIVIDAD RELATIVA AL ALUMINIO NUEVO NO TRATADO DE DIFERENTES MATERIALES PARA SOMBRAS

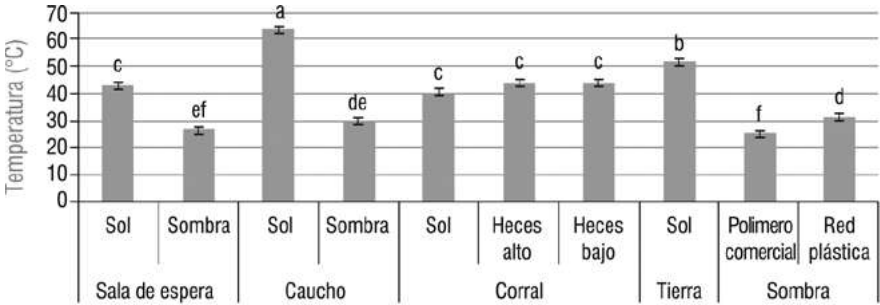
Material	Tratamiento	Efectividad relativa
Aluminio	Arriba blanco, abajo negro	1,103
Hierro galvanizado	Arriba blanco, abajo negro	1,066
Hierro galvanizado	Arriba blanco, abajo natural	1,053
Aluminio	Arriba blanco, abajo natural	1,049
Aluminio	Nuevo, no tratado	1,000
Aluminio	Con un año	0,994
Hierro galvanizado	Nuevo, no tratado	0,992
Hierro galvanizado	Con un año	0,985
Aluminio	Con 10 años	0,969
Malla sombrite	92% sólido	0,926
Malla sombrite	90% sólido	0,839

Fuente: Adaptado de Binns, Petrov y Lott (2002).

Las superficies también varían su temperatura de acuerdo con el tipo de superficie o material de la sombra que se tenga. Roman y La Manna (2015) evaluaron la temperatura de diferentes superficies al sol y a la sombra en diez oportunidades. Las superficies evaluadas fueron: planchada de la sala de espera (sol y sombra, chapa; 4,5 m de altura), caucho negro (Animat Inc., Canadá) (sol y sombra, chapa; 3 m de altura), planchada de corrales (sol, 2 niveles de heces: bajo y alto), tierra (sol), y la temperatura de la cobertura vegetal a nivel del suelo de las sombras (nylon de 240 micrones tricapa, blanco en la parte superior y negro en la inferior, Pacifil SA; 4,5 m de altura), y red plástica (negra, 80% intercepción de la radiación solar; 4,5 m de altura). Las temperaturas fueron registradas utilizando un termómetro manual infrarrojo (CONTROL COMPANY; Traceable, Texas, EE. UU.), a las 13.00 horas. Las variables se analizaron ajustando un modelo lineal generalizado. El nivel de

significancia utilizado fue de 5%. En la Figura 5 se observa la importancia de la sombra y del tipo de material en la temperatura alcanzada en la superficie del mismo.

FIGURA 5. TEMPERATURA (MEDIA \pm EEM, °C) según tipo de superficie al sol o sombra



Notas: EEM: Error Estándar de la Media; Barras con letras distintas muestran diferencias significativas ($p < 0,05$).

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, y a modo ilustrativo, se pueden ver distintos tipos de sombras (Figuras 6 a 10).

FIGURA 6. NYLON TRICAPA DE 240 MICRONES



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 7. NYLON TRICAPA DE 240 MICRONES, NEGRO ABAJO Y BLANCO ARRIBA PARA MEJORAR SU EFECTIVIDAD



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 8. MALLA SOMBRA CON 80% DE INTERCEPCIÓN



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 9. SOMBRA DE CHAPAS Y ESPACIO ENTRE LAS MISMAS PARA LOGRAR SECADO DEL PISO Y ELIMINAR CALOR



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 10. SOMBRA DE PLACAS PLÁSTICAS HECHAS 100% CON PLÁSTICO RECICLADO



Fuente: Elaboración propia.

Es importante también considerar otros aspectos como el de tener sombra en el corral de espera del tambo; evitar movimientos del ganado en situaciones u horarios de mucho calor y tener disponible agua fresca en cantidad y calidad (temperatura ideal de esta entre 16-18 °C). Conviene recordar que en condiciones de calor el animal puede triplicar sus ne-

cesidades de agua. Por esto, hay que calcular que el tamaño del bebedero y la reposición de agua puedan dar abasto a estas necesidades.

Finalmente, es necesario tomar recaudo con las categorías más susceptibles (vacas en lactancia temprana, animales con patologías preexistentes, vacas con alta producción y vacas con baja condición corporal), ya que podrían ocurrir muertes en casos de olas de calor. En ganado de carne, las categorías más susceptibles son los animales más gordos, animales recién llegados al establecimiento (mayor estrés) enfermos, y animales con baja condición corporal. Sin embargo, todos los animales deberían tener alguna forma de mitigar el calor.

Dado todo lo antes mencionado, es importante considerar todos los aspectos relacionados con las ventajas y desventajas de los distintos sistemas (natural y artificial), dependiendo del sistema productivo en el cual se quieran instalar (ganadería extensiva, ganadería intensiva, lechería). Antes de implementar un sistema de sombra y abrigo, es clave evaluar las distintas alternativas y los momentos en los que se podrían instalar las diferentes opciones, en muchos casos, de manera complementaria.

4. Mejoras a partir de la provisión de sombra en sistemas de producción animal

Luego de analizar una base de datos de siete experimentos que abarcaron el efecto del acceso a sombra en el desempeño productivo del ganado de carne en pastoreo en Uruguay, la superioridad en ganancia diaria de peso de los animales con sombra fue de 10% con respecto a los animales sin acceso a sombra (Simeone *et al.*, 2010; Rovira, 2012a, 2012b; Velazco *et al.*, 2012; Velazco y Rovira, 2012; Beretta *et al.*, 2013; Rovira, 2014). La mayor productividad genera más ingresos y la provisión de sombra actúa como un *buffer* amortiguando el efecto del estrés calórico en los animales, especialmente en veranos con condiciones climáticas más desafiantes. En trabajos que compararon distintas estrategias de sombra (natural *versus* artificial, mallas sombras con 35% *versus* 80% de intercepción radiación solar, sombra *ad libitum versus* restringida en horas más calurosas), la diferencia registrada en ganancia de peso asociada al tipo o manejo de la sombra fue nula o marginal, siendo la principal diferencia entre tratamientos con o sin sombra, independientemente del tipo de sombra. A una escala más amplia, sistemas silvopastoriles no solo presentan las ventajas de la sombra como prevención del estrés calórico,

sino que también se favorecen de mayor diversidad productiva, que brinda estabilidad económica ante las fluctuaciones de precios de sus principales productos, carne y madera.

A nivel de sistemas más intensivos bajo las condiciones imperantes en Uruguay, se observan efectos adversos del estrés calórico, principalmente en animales en lactancia temprana, pero también en vacas en lactancia tardía, primíparas y secas. Estos efectos pueden ser mitigados por el uso de sombra. En vacas multíparas de alta producción en lactancia temprana se observaron mejoras, por el acceso a sombra artificial, en la producción de leche corregida por sólidos de 5,4 kg/día, mientras que en vacas en lactancia tardía las mejoras fueron de 1,9 kg/día (Roman *et al.*, 2017). Cuando se incorporó sombra, las vacas primíparas en lactancia temprana presentaron un aumento de 1,5 kg/día de leche corregida por sólidos (La Manna *et al.*, 2014), mientras que en animales secos la mejora fue de 3,3 kg/día de leche corregida por sólidos en los primeros 60 días de lactancia (Roman *et al.*, 2017). En vacas de lactancia tardía no se vieron cambios en producción, pero sí se comprobó que los animales que no tuvieron acceso a ninguna medida de mitigación (tratamiento SOL) presentaron alteraciones en algunos parámetros sanguíneos y expresión diferencial de algunos genes relacionados con la respuesta al estrés térmico en particular (Fernández-Martín *et al.*, 2016). Esto indica que esos animales presentan alteraciones en la partición de los nutrientes –los nutrientes se usan para destinos distintos que la producción de leche–, alteraciones en su bienestar, y tienen el sistema inmune activado (Martínez *et al.*, 2017). En todos los experimentos se vio una reducción de la tasa respiratoria, principalmente en la tarde, en los animales que tenían acceso a sombra.

En ganado de carne, animales en fase de terminación a corral, el acceso a sombra *versus* estar al sol mejoró la ganancia media diaria en 15% y la eficiencia de conversión en 7% (Clariget *et al.*, 2018; Canozzi *et al.* 2021). La sombra también mejoró el bienestar animal al reducir la tasa respiratoria de manera significativa.

Independientemente de la magnitud de la respuesta en producción, el suministro de sombra promueve un mejor bienestar animal asociado a la disminución de la tasa respiratoria y probabilidad de jadeo, en comparación con animales expuestos al sol. En novillos en pastoreo en la región este de Uruguay, con promedio de 2 años, la tasa respiratoria diurna disminuyó 15% en los animales con acceso a sombra respecto de aquellos sin sombra (Rovira y Velazco, 2010, 2011), asociado a la menor

necesidad de disipar calor en los animales con sombra. La imposibilidad para el animal de usar o encontrar sombra en un día caluroso afecta su capacidad de expresar un comportamiento natural, lo que causa malestar y crea un estado afectivo (mental) negativo, afectando el funcionamiento biológico y la productividad animal posterior (Edwards-Callaway *et al.*, 2021). Esto demuestra que la problemática del bienestar animal es multifacética e incluye al menos tres orientaciones: el funcionamiento biológico, estados afectivos y comportamiento natural (Polsky y Von Keyserlingk, 2017). La mejora del bienestar animal en el predio es una forma de acercar los sistemas de producción animal al consumidor final en los centros urbanos, ya que estos últimos perciben positivamente que la carne que consumen provenga de animales que hayan sido tratados de forma ética y responsable en el campo. La importancia de la sombra en el bienestar animal no solo es un fenómeno reconocido, sino también exigido por programas de verificación por parte de terceros que han comenzado a incluir la provisión de sombra dentro de los estándares obligatorios de manejo del ganado (Global Animal Partnership, 2009; Certified Humane, 2019).

A medida que la radiación solar y las condiciones de estrés calórico se incrementan, el ganado también aumenta el tiempo a la sombra (Schütz *et al.*, 2009, 2010; Rovira, 2014), mientras que animales expuestos al sol incrementan el tiempo alrededor de la fuente de agua (Mader *et al.*, 1997; Schütz *et al.*, 2010). Por lo tanto, la sombra disminuye la probabilidad de ingreso de los animales a fuentes de agua, como ríos, arroyos, o tajamares, cuando los mismos no cuentan con la debida protección, evitando así la contaminación de recursos naturales. En general, los parámetros fisiológicos y de comportamiento animal, como la tasa respiratoria y la conducta de pastoreo, son los primeros en ser afectados por la provisión de sombra, anticipándose a los cambios productivos, como la ganancia de peso o la producción de leche, que comienzan a demostrarse a medida que las condiciones climáticas se vuelven más estresantes (Brown-Brandl *et al.*, 2005).

Desde el punto de vista ambiental, la sombra natural generada por montes artificiales, o en especial nativos, promueve la diversidad de ambientes y el mantenimiento de hábitats. En este marco, la conservación del monte y el manejo ganadero son incluidos en una misma matriz productiva, posibilitando la integración de todos los componentes y aprovechando los beneficios que cada uno aporta al sistema general (Borrás *et al.*, 2017). Independientemente de si se trata de plantaciones de montes

a gran escala (forestación), sistemas silvopastoriles, “islas” de árboles dentro de potreros de pastoreo, o montes nativos ribereños, lo importante es lograr una sinergia animales-árboles sin comprometer los servicios ecosistémicos brindados por los montes (refugio de fauna, secuestro de carbono, etc.). Cuando no se dispone de sombra natural, la confección de estructuras de sombra artificial en los potreros de pastoreo o en áreas “sociales” con provisión estratégica de agua y sombra permite disminuir el riesgo de estrés calórico en animales y brinda la posibilidad de reutilizar distintos materiales usados para su confección, como las bolsas plásticas utilizadas para la confección de ensilajes. En cuanto a la conveniencia de utilizar sombra artificial antes que la natural, va a ser función del tiempo (urgencia con la que el productor precise darle bienestar a su ganado), del tipo de suelo –para suelos más productivos sería mejor una sombra artificial ya que se puede removerla y reutilizar parte de su estructura cuando ese campo entra en rotación con cultivos no pastoreables–, de la ubicación geográfica –sería inconveniente cercana a bajos con arroyos y ríos o zonas inundables, ya que el monte permite disminuir la erosión y el escurrimiento superficial si fueron bien planeados), o de una combinación de estas alternativas.

En lo que respecta a la calidad de vida de los productores, varios factores contribuyen. Por un lado, la disponibilidad de una aplicación como INIA Termoestrés,³ que posibilita a los productores y técnicos disponer del ITH con siete días de anticipación. Esto permite prever las medidas necesarias para minimizar los efectos del estrés por calor y evitar pérdidas en bienestar y producción animal. Esto es claro cuando las soluciones estructurales implementadas en el predio no son suficientes y el productor debe elegir cuándo y cómo manejar el ganado para minimizar el impacto del calor. Por otro lado, el hecho de tener sombra incorporada en los sistemas otorga a los productores cierta flexibilidad en el tiempo que dedican al monitoreo, control y movimiento de animales, ya que parte de las medidas de mitigación están accesibles en el sistema.

La Tabla 3 muestra un resumen cualitativo de los principales beneficios de la tecnología propuesta en las dimensiones productiva, ambiental, y socioeconómica, aspectos clave en procesos de transición hacia sistemas productivos más sostenibles.

3 Disponible en: <<http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Prevision-ITH-Vacunos/INIA-Termoestres>>.

TABLA 3. BENEFICIOS PRINCIPALES ESPERADOS EN LAS DIMENSIONES PRODUCTIVA, SOCIOECONÓMICA Y AMBIENTAL ASOCIADOS A LA PROVISIÓN DE SOMBRA EN GANADERÍA

Dimensión	Atributo	Beneficio*
Productiva	Ganancia de peso	++
	Eficiencia de conversión	++
	Producción de leche	++
	Conducta animal	++
Socioeconómica	Bienestar animal	+++
	Ingreso	++
	Resiliencia	++
	Vulnerabilidad	++
	Acerca producción a consumidores	++
	Calidad de vida	++
Ambiental	Protección de hábitats	+
	Contaminación ambiental	+
	Diversidad aérea (árboles)	++
	Servicios ecosistémicos	++
	Reciclaje (materiales sombra)	++

*Nivel de beneficio: + = bajo, ++ = medio, +++ = alto.

Fuente: Elaboración propia.

La transformación hacia sistemas de producción animal con mayor provisión de sombra a los animales basados en principios de bienestar animal repercute a nivel de las diferentes dimensiones y favorece sinergias e interacciones que benefician al sistema en su conjunto.

Bibliografía

- Bacon, C. M., Getz, C. y Montenegro, M.**
(2012), "The Social Dimensions of Sustainability and Change in Diversified Farming Systems", en *Ecology and Society*, 17, p. 41.
- Baumgard, L. H. y Rhoads Jr., R. P.**
(2005), "Effects of Heat Stress on Postabsorptive Metabolism and Energetics", en *Annu. Rev. Anim. Biosci.*, 1, pp. 7.1-7.27.
- Beede, D. K. y Collier, R. J.**
(1986), "Potential nutritional strategies for intensively managed cattle during thermal stress", en *Journal of Animal Science*, 62, pp. 543-554.
- Belhadj Slimen, I., Najar, T., Ghram, A. y Abdrrabba, M.**
(2015), "Heat stress effects on livestock: molecular, cellular and metabolic aspects, a review", en *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 100, pp. 401-412.
- Beretta, V., Simeone, A. y Bentancur, O.**
(2013), "Manejo de la sombra asociado a la restricción del pastoreo: efecto sobre el comportamiento y performance estival de vacuno", en *Agrociencia Uruguay*, 17, pp. 131-140.
- Bernabucci, U., Lacetera N., Baumgard L. H., Rhoads R. P., Ronchi B. y Nardone, A.**
(2010), "Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants", en *Animal*, 4:7, pp. 1167-1183.
- Binns, P., Petrov, R. y Lott, S.**
(2002), *Feedlot shade design – Literature review*, Meat and Livestock Australia, North Sydney.
- Bohmanova, J., Misztal, I. y Cole, J. B.**
(2007), "Temperature-Humidity Indices as Indicators of Milk Production Losses due to Heat Stress", en *J. Dairy Sci.*, 90, pp. 1947-1956.
- Borrás, M., Manghi, E., Miñarro, F., Monaco, M., Navall, M., Peri, P., Periago, M. E. y Preliasco, P.**
(2017), *Acercando el Manejo de Bosques con Ganadería Integrada al monte chaqueño. Una herramienta para lograr una producción compatible con la conservación del bosque. Buenas prácticas para una ganadería sustentable. Kit de extensión para el Gran Chaco*, Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires.
- Brazeiro, A.**
(2018), "Bosques de Uruguay: Necesidades de investigación para la gestión sustentable y conservación", en *Recientes avances en investigación para la gestión y conservación del bosque nativo de Uruguay*, Facultad de Ciencias, MGAP, BMEL, Montevideo, pp. 12-16.

Brown-Brandl, T. M., Eigenberg, R. A., Nienaber, J. A. y Hahn, G. L. (2005), "Dynamic Response Indicators of Heat Stress in Shaded and Non-shaded Feedlot Cattle, Part 1: Analyses of Indicators", en *Biosystems Engineering*, 90, pp. 451-462.

Canozzi, M. E. A. et al.

(2022), *Shade effect on behaviour, physiology, performance, and carcass weight of heat-stressed feedlot steers in humid subtropical area*. *Animal Production Science* <https://doi.org/10.1071/AN22128>.

Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., Aunchayna, R. y Bidegain, M.

(2011), *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-200* (Nº 551.58: 631 CAR).

Certified Humane

(2019), *Humane farm animal care animal care standards*. Disponible en: <<https://2gn8ag2k4ou3ll8b41b7v2qp-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/App20.BeefCattle.4H.pdf>> [Consulta: 24 de mayo de 2021].

Clariget, J. M. et al.

(2018), *Mitigación del estrés calórico en novillos terminados a corral*. [Mitigation of heat stress in feedlot fattening steers]. *Revista Argentina de Producción Animal*, 38, 1.

Collier, R. J., Baumgard, L. H., Zimelman, R. B. y Xiao, Y.

(2019), "Heat stress: physiology of acclimation and adaptation", en *Animal Frontiers*, 9, pp. 12-19.

Edrington, T. S., Schultz, C. L., Genovese, K. J., Callaway, T. R., Looper, M. L., Bischoff, K. M., McReynolds, J. L., Anderson, R. C. y Nisbet, D. J.

(2004), "Examination of heat stress and stage of lactation (early versus late) on fecal shedding of *E. coli* O157:H7 and *Salmonella* in dairy cattle", en *Foodborne Pathogens and Disease*, 1, pp. 114-119.

Edwards-Callaway, L. N., Cramer, M. C., Cadaret, C. N., Bigler, E. J., Engle, T. E. Wagner, J. J. y Clark, D. L.

(2021), "Impacts of shade on cattle well-being in the beef supply chain", en *Journal of Animal Science*, 99, pp. 1-21.

FAWC (Farm Animal Welfare Council)

(1992), "Updates the five freedoms", en *Veterinary Record*, 17, p. 357.

Fernández-Martín, R., Martínez, R., Miccoli, F., Hidalgo, F. S., Roman, L., La Manna, A. y Palladino, A.

(2016), "Expresión génica en hígado de vacas lecheras en lactancia avanzada bajo distintas estrategias de manejo del ambiente térmico", en *Revista Argentina de Producción Animal*, v. 36, 1, p. 189.

Global Animal Partnership (GAP)

(2009), *Global Animal Partnership 5-Step™ Animal Welfare Rating Standards*

for Beef Cattle. Disponible en: <<https://globalanimalpartnership.org/wp-content/uploads/2017/06/5-Step%C2%AE-Animal-Welfare-Rating-Standards-for-Beef-Cattle-v1.0.pdf>> [Consulta: 24 de mayo de 2021].

Hahn, G. L., Gaughan, J. B., Mader, T. L. y Eigenberg, R. A.

(2009), "Thermal indices and their applications for livestock environments", en De Shazer, J. A. (ed.), *Livestock energetics and thermal environment management*, ASABE, St. Joseph, cap. 5, pp. 113-130.

Hamel, J., Zhang, Y., Wenthe, N. y Krömker, V.

(2021), "Heat stress and cow factors affect bacteria shedding pattern from naturally infected mammary gland quarters in dairy cattle", en *Journal of Dairy Science*, 104, pp. 786-794.

Huertas, S., Piaggio, J., Gil, A., César, D. y De Torres, E.

(2013), *Bienestar Animal en Bovinos Lecheros, Proyecto FPTA-244: Evaluación del bienestar animal en la productividad de bovinos lecheros*, Serie FPTA 51, Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Montevideo.

IPCC

(2018), "Summary for Policymakers", en Masson-Delmotte, V., Zhai, P., H.-O. Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. y Waterfield, T. (eds.), *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*.

La Manna, A., Roman, L., Bravo, R. y Aguilar, I.

(2014), "Estrés térmico en vacas lecheras: con sombra y bienestar las vacas producen más", en *Revista INIA*, 39, pp. 34-39.

Lees, A. M., Sejian, V., Wallage, A. L., Steel, C. C., Lees, J. C. y Gaughan, J. B.

(2019), "The impact of heat load on cattle", en *Animals*, 9, p. 322.

Lucas, C., Puchi, P., Profumo, L. y Ferreira, A.

(2018), "Tasa de incremento anual de *Scutia buxifolia* (Coronilla) y *Vachellia caven* (Espinillo) en Uruguay", en *Recientes avances en investigación para la gestión y conservación del bosque nativo de Uruguay*, Facultad de Ciencias, MGAP, BMEL, Montevideo, pp. 18-20.

Mader, T. L., Davis, M. S. y Brown-Brandl, T.

(2006), "Environmental factor influencing heat stress in feedlot cattle", en *Journal of Animal Science*, 84(3), pp. 712-719. Disponible en: <<https://doi.org/10.2527/2006.843712x>>.

Mader, T. L., Fell, L. R. y McPhee, M. J.

(1997), "Behavior response of non-Brahman cattle to shade in commercial feedlots", en *Livestock Environment*, 5, pp. 795-802.

Marrero, L. y Bizzarero, F.

(2017), *Desafíos y oportunidades para avanzar las Contribuciones Nacionales en el sector agropecuario y bosques en América Latina: El caso de Uruguay*, Centro Uruguay de Tecnologías Apropriadas – Plataforma Climática Latinoamericana, 29 pp.

Martínez, R., Palladino, A., Pla, M., Román, L. y La Manna, A.

(2021), “Access to shade during the dry period improves the performance of multiparous Holstein cows”, en *Animal Production Science* V 61(16) 1706-1714 <https://doi.org/10.1071/AN18797>

MGAP

(2020), Proyecto ganadero familiares y cambio climático, en Martínez, M. (ed.), Publicación final, 109 pp.

MGAP-OPYPA

(2018), Resultados de la Encuesta Ganadera Nacional 2016.

Nagy, G., Bidegain, M., Verocai, J. y De los Santos, B.

(2018), Escenarios climáticos futuros sobre Uruguay. Basados en los nuevos escenarios socioeconómicos RCP, Ministerio De Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente (MVOTMA), División de Cambio Climático (DCC), Montevideo.

Perkins-Kirkpatrick, S. E. y Lewis, S. C.

(2020), “Increasing trends in regional heatwaves”, en *Nature Communications*, 11, p. 3357.

Polsky, L., Von Keyserlingk, M. A. G.

(2017), “Invited Review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare”, en *Journal of Dairy Science*, 100, pp. 8645-8657.

Pravia, M. I., Montossi, F., Andregnette, B., Invernizzi, G., Ayala, W., Cuadro, R. y Porcile, V.

(2013), “Resultados y análisis de la encuesta tecnológica realizada a los productores del GIPROCAR II”, en Montossi, F. (ed.), *Invernada de Precisión: pasturas, calidad de carnes, genética, gestión empresarial e impacto ambiental* (GIPROCAR II) Serie Técnica 211, INIA, Montevideo, pp. 7-30.

Proyecto REDD+ Uruguay

(2019), *Informe consolidado de los talleres de participación y consulta sobre causales de deforestación y degradación de bosque, y beneficios múltiples*. Justo, C., Rodríguez, P. y Martino, D. Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca-Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, Montevideo.

Renaudeau, D., Collin, A., Yahav, S., de Basilio, V., Gourdine, J. L. y Collier, R. J.

(2012), “Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production”, en *Animal*, 6, pp. 707-728.

Roman, L. y La Manna, A.

(2015), “Incidencia de la radiación solar directa o de la sombra sobre la tempera-

tura de diferentes superficies”, en *Revista Argentina de Producción Animal*, v. 35, Supl 1, p. 135.

Román, L., Morales Piñeyrúa, J. T., Banchemo, G. y La Manna, A. (en revisión), “Access to shade during the dry period improves the performance of multiparous Holstein cows”, enviado a *Animal Production Science*.

Román, L., Saravia, C., Astigarraga, L., Bentancur, O. y La Manna, A. (2017), “Effect of shade access combined with or without sprinkling and ventilation on performance of Holstein cows in two lactation stages”, en *Animal Production Science*, v. 59, 2, pp. 347-358.

Rovira, P.

(2012a), “Efecto de la disponibilidad de sombra en la ganancia de peso y conducta de novillos sobre sudangrass”, en *Uso de la sombra en la recría de novillos en sistemas pastoriles en la región este del Uruguay*, Serie Técnica INIA 202, INIA, Montevideo, pp. 37-44.

Rovira, P.

(2012b), “Efecto de la sombra artificial en la recría de novillos sobre praderas durante el verano”, en *Uso de la sombra en la recría de novillos en sistemas Pastoriles en la región este del Uruguay*, Serie Técnica INIA 202, INIA, Montevideo, pp. 60-71.

Rovira, P.

(2014), “The effect of type of shade on physiology, behaviour and performance of grazing steers”, en *Animal*, 8, pp. 470-476.

Rovira, P. y Velazco, J.

(2010), “The effect of artificial or natural shade on respiration rate, behavior and performance of grazing steers”, en *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 53, pp. 347-353.

Rovira, P. y Velazco, J.

(2011), “The effect of free or restricted access to artificial shade on respiration rate, behavior and performance of grazing steers”, en *Online Journal of Animal and Feed Research*, 6, pp. 293-298.

Saravia, C., Bentancur, O. y Cruz, G.

(2003), “Caracterización de diferentes situaciones del ambiente utilizando esferas de Vernon”, en 13 Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Santa Maria (Brasil), Anais, Santa Maria, SBA/UFSM/UNIFRA, pp. 651-652.

Schütz, K. E., Rogers, A. R., Cox, N. R. y Tucker, C. B.

(2009), “Dairy cows prefer shade that offers greater protection against solar radiation in summer: Shade use, behaviour, and body temperature”, en *Applied Animal Behavior Science*, 116, pp. 28-34.

Schütz, K. E., Rogers, A. R., Poulouin, Y. A., Cox, N. R. y Tucker, C. B.

(2010), “The amount of shade influences the behavior and physiology of dairy cattle”, en *Journal of Dairy Science*, 93, pp. 125-133.

Serie técnica INIA-REDD+

(en prensa).

Simeone, A., Beretta, V. y Caorsi, J.

(2010), “¿Es importante la sombra que proporcionan los montes de la forestación para la performance del ganado de carne durante el verano?”, en *La forestación y la ganadería en el Uruguay*, UPM Forestal Oriental, pp. 29-41.

St-Pierre, N. R., Cobanov, B. y Schnitkey, G.

(2003), “Economic Losses from Heat Stress by US Livestock Industries”, en *Journal of Dairy Science*, 86 (E. Suppl.), E52-E57.

Thom, E. C.

(1959), “The discomfort index”, *Weatherwise*, 12(2), pp. 57-61. Disponible en: <<https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>>.

Thornton, P. K., Van de Steeg, J., Notenbaert, A. y Herrero, M.

(2009), “The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know”, en *Agricultural Systems*, 101, pp. 113-127.

Tiscornia, G., Montossi, F., La Manna, A., Paruelo, J. y Rovira, P.

(en prensa), *Las restricciones climáticas en los sistemas ganaderos y el papel de los bosques nativos*, Serie técnica INIA-REDD+.

Tittonell, P.

(2019), “Las transiciones agroecológicas: múltiples escalas, niveles y desafíos”, en *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, Universidad Nacional de Cuyo, 51(1), pp. 231-246.

Valtorta, S. E. y Gallardo, M. R.

(1996), “El estrés por calor en producción lechera. En el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimenta Rafaela, Argentina”, en *Miscelánea*, 81, pp. 173-185.

Velazco, J., Ezquivel, J. E. y Rovira, P.

(2012), “Efecto del acceso a sombra artificial en la ganancia de peso, estrés y conducta de novillos pastoreando sudangrass durante el verano”, en *Uso de la sombra en la recría de novillos en sistemas pastoriles en la región este del Uruguay*, Serie Técnica INIA 202, INIA, Montevideo, pp. 45-58.

Velazco, J. y Rovira, P.

(2012), “Efecto del tipo de sombra en la ganancia de peso, tasa respiratoria y conducta de novillos sobre sudangrass”, en *Uso de la sombra en la recría de novillos en sistemas pastoriles en la región este del Uruguay*, Serie Técnica INIA N° 202, inia, Montevideo, pp. 59-70.

Venegas-Vargas, C., Henderson, S., Khare, A., Mosci, R. E., Lehnert, J. D., Singh, P., Ouellette, L. M., Norby, B., Funk, J. A., Rust, S., Bartlett, P. C., Grooms, D. y Manning, S. D.

(2016), “Factors Associated with Shiga Toxin-Producing *Escherichia coli* Shedding by Dairy and Beef Cattle”, en *Applied and Environmental Microbiology*, 82, pp. 5049-5056.

Zimbelman, R. B., Rhoads, R. P., Baumgard, L. H. y Collier, R. J.

(2009), “Revised temperature humidity index (THI) for high producing dairy cows”, en *Journal of Dairy Science*, 92(E-Suppl.), p. 347.

Capítulo 22

Modelo para la optimización en la planificación de usos del suelo (MOPUS) en cuencas lecheras con objetivos productivos y ambientales

Andrés Castagna, Lorena Rodríguez Gallego, Antonio Mauttone, Federico Matonte, Agustín Araujo, Agustina Parrilla, Santiago Mancebo, Valentina Moncalvo y Oscar Blumetto

1. Introducción

1.1. El aumento de la productividad y sus consecuencias ambientales

El uso de suelo para obtener bienes y servicios genera uno de los impactos más importantes producidos por el ser humano sobre los ecosistemas del planeta: el exceso de nutrientes en sistemas acuáticos (Tilman *et al.*, 2002, Steffen *et al.*, 2011). La intensificación de la actividad agropecuaria ocurrida en las últimas décadas ha estado asociada, en gran medida, al incremento en el uso de fertilizantes (Matson *et al.*, 1997; Tilman *et al.*, 2002; Buytaert y Breuer, 2013). La continua aplicación de fertilizantes y el modo de aplicación han derivado en un aumento de la pérdida de nutrientes desde los cultivos agrícolas hacia los cuerpos de agua (Sharpley *et al.*, 1996; Moss, 2010; Withers *et al.*, 2017). Esta situación ha impactado negativamente sobre la calidad del agua de arroyos y ríos en varias zonas del mundo (Foley *et al.*, 2005; De Paula *et al.*, 2019).

El proceso de eutrofización es el enriquecimiento natural o artificial en nutrientes de los cuerpos de agua, principalmente en nitrógeno y fósforo (National Academy of Science, 1969; Quinlan *et al.*, 2021). Los

efectos de la eutrofización son la excesiva proliferación de fitoplancton y de plantas acuáticas, el consumo de oxígeno por la descomposición de la gran cantidad de materia orgánica acumulada, la simplificación de la trama trófica y, en casos extremos, la presencia de especies de cianobacterias tóxicas (Dolman *et al.*, 2012), mortandad de peces (Moss *et al.*, 1996; Moss, 1998) y pérdida de biodiversidad (Moss, 1996).

En Uruguay ha aumentado la preocupación por la calidad del agua, dado que muchos ecosistemas acuáticos superficiales aumentaron la concentración de nutrientes, incumpliendo la normativa de determinados parámetros físico-químicos (Barreto *et al.*, 2017; Alonso *et al.*, 2019), lo cual constituye un problema de calidad de aguas en muchos sistemas lénticos y lóticos del país (Bonilla *et al.*, 2015). Este proceso está ampliamente documentado en las cuencas de los ríos Santa Lucía, Cuareim, Negro y las lagunas como del Sauce, del Cisne y del Diario (Arocena *et al.*, 2008; Steffen e Inda 2010; Bonilla *et al.*, 2015; Goyenola *et al.*, 2015; Chalar *et al.*, 2017, Aubriot *et al.*, 2020). En Uruguay, la actividad agropecuaria explica el principal uso del suelo y tiene una importante influencia en el aporte de nutrientes a los sistemas hidrológicos (Goyenola *et al.*, 2015; Rodríguez-Gallego *et al.*, 2017; Chalar *et al.*, 2017).

El marco actual de búsqueda de la sostenibilidad implica que el diseño del sistema productivo, ya sea agrícola o de alta carga animal, deba pensarse no solo desde el punto de vista del retorno económico, sino también desde la perspectiva ambiental y social (Aristide *et al.*, 2020). El entendimiento del proceso de exportación de nutrientes desde los distintos usos del suelo, junto con la modelación multiobjetivo espacialmente explícita de los usos del suelo, puede constituirse en una herramienta de apoyo fundamental para la planificación de usos del suelo en zonas sensibles.

1.2. La búsqueda de soluciones de compromiso entre objetivos productivos y ambientales

La sociedad actual enfrenta el desafío de desarrollar estrategias que reduzcan los impactos negativos de los usos del suelo, al tiempo que mantengan beneficios sociales y económicos de estos (Foley *et al.*, 2005; Fu *et al.*, 2015; Smith, 2018). El Instituto Nacional de la Leche (INALE) demostró que los productores lecheros, de escala reducida y limitada capacidad de inversión en Uruguay, necesitan incrementar el volumen total

de leche producida a un bajo costo para asegurar la viabilidad económica de la actividad, lo que conlleva aumentar la productividad primaria por intensificación del sistema (INALE, 2015). Esto implica una intensificación en el uso de insumos, por ejemplo, fertilizantes para elevar la productividad de pasturas y cultivos, lo cual incrementa el potencial de pérdidas de nutrientes.

Para reducir la exportación de nutrientes hacia aguas superficiales y atender las necesidades productivas de los sistemas lecheros de pequeña escala, deben buscarse soluciones de compromiso entre productividad y potencial contaminante, lo que requiere soluciones complejas y multidimensionales de objetivos generalmente contrapuestos.

La planificación espacial de usos del suelo es una medida usada a nivel mundial para la gestión de diferentes objetivos (Nha, 2017). Las técnicas de optimización con soluciones espacialmente explícitas son una de las herramientas que aparecen como prometedoras para resolver situaciones de este tipo (Groot *et al.*, 2007; Rodríguez-Gallego *et al.*, 2012; Rong *et al.*, 2017; Rodríguez-Gallego *et al.*, 2019; Mauttone *et al.*, 2019).

En este sentido, la consideración de los problemas ambientales emergentes y socialmente priorizados, contemplando al mismo tiempo las necesidades económicas y sociales de la población residente en los territorios, requiere del desarrollo de herramientas de modelación. Estas, a su vez, deben permitir a los tomadores de decisión y gestores de política pública proyectar distintos escenarios y conocer los recursos necesarios para implementar medidas efectivas.

La herramienta desarrollada, ha incorporado en sus diferentes etapas la posibilidad de trabajar a múltiples escalas, que van desde el potrero de un establecimiento hasta la microcuenca completa, de modo de considerar públicos objetivos diferentes: productores, asesores técnicos, investigadores o gestores de política pública.

2. La producción lechera en la cuenca del río Santa Lucía

2.1. La producción lechera familiar en la cuenca del río Santa Lucía

La producción lechera de la cuenca del río Santa Lucía es de gran importancia, ya que aloja el 38% de los productores lecheros del país (Delgado, 2017), a la vez que se destaca como una de las actividades que

más influye en el aporte de nutrientes a los sistemas acuáticos (Manta *et al.*, 2013, Chalar *et al.*, 2017), siendo uno de los sitios donde la problemática ha tenido mayor relevancia por ser la fuente de agua potable para el 60% de la población de Uruguay. En la cuenca existen múltiples sistemas de producción que resultan en diversos usos del suelo (ganadería, lechería, fruticultura, horticultura, forestación, etc.) (Ackerman *et al.*, 2017), pero la producción lechera se destaca en superficie y relevancia económica.

Según la encuesta lechera 2014 (INALE, 2015), casi un tercio de los productores estaban por debajo de los 154.000 litros de leche anuales y estos productores cuentan en promedio con 31 ha dedicadas a vacas masa y 12 ha a cría, es decir que su escala es pequeña. A su vez, son productores familiares que residen en los predios o a corta distancia de ellos. Por esta razón, este sector de productores tiene una especial vulnerabilidad económica que los obliga a presionar sus recursos para obtener una productividad más alta.

En promedio, solo el 45% de las salas de ordeño cuenta con algún tipo de manejo de efluentes (INALE, 2015), que constituye la fuente de contaminación puntual de este sistema. Las fuentes difusas, que comprenden las pérdidas de nutrientes que se producen directamente por escorrentía en el campo, son también relevantes. En esta zona, las microcuencas con mayor superficie de tambos presentaron mayores niveles de P en agua, coincidiendo con mayores niveles de P lábil del suelo (Arocena *et al.*, 2013). En la producción lechera, la salida de nutrientes con el agua de escurrimiento depende de los tipos de pasturas, fertilizantes, efluentes y prácticas de manejo del ganado (Cornish *et al.*, 2002). Conocer cómo estos factores afectan los procesos de pérdida de nutrientes por escurrimiento superficial es de importancia para mejorar las prácticas de manejo y lograr disminuir sus impactos sobre la calidad del agua en sistemas lóticos y lénticos.

2.2. Las unidades de análisis para la gestión de producción y las políticas públicas

El análisis y la planificación de escenarios pueden presentar distintos requerimientos de escala según el público al que están destinados. Cuando se quiere atender las posibilidades de influir en el sistema productivo de un productor individual, ya sea para la toma de decisiones del propio

productor o de un asesor técnico, el nivel predial o de potrero es, sin dudas, el más útil. Sin embargo, en la planificación de políticas públicas para el desarrollo de un sector, una zona o un conjunto de actores, el nivel adecuado involucra a un conjunto de productores o a una región. En el caso de planificación ambiental, aunque puede realizarse a nivel predial, se utiliza la cuenca hidrográfica como unidad espacial natural. La unidad de cuenca puede ser también muy adecuada para la planificación de acciones de organismos públicos o empresas, sobre todo si involucra, como en este caso, la calidad de agua como un objetivo central.

El área piloto seleccionada para este trabajo es la microcuenca del arroyo El Tala, en el departamento de San José, una subcuenca (114.000 ha) de la gran cuenca del río Santa Lucía. Esta subcuenca está en su mayoría ocupada por pequeños establecimientos lecheros.

3. Modelación para la optimización de usos del suelo

3.1. Las bases conceptuales del modelo

La modelación consiste en transformar en lenguaje matemático los flujos y relaciones entre componentes de sistemas de interés. La programación matemática es un lenguaje formal que permite expresar relaciones entre los parámetros –aspectos que son fijos y están dados por el contexto– y las variables del sistema. En particular, es posible especificar una medida de desempeño del sistema que se busca minimizar o maximizar (en términos generales, optimizar), y un conjunto de restricciones que expresan condiciones que deben cumplir las decisiones para que el sistema se encuentre en un estado coherente. En este contexto, y en particular en el del presente trabajo, el término “programación” hace referencia a la planificación del uso de recursos que se traduce en decisiones de asignación de estos (Hillier y Lieberman, 2009). En general, los elementos que componen un problema de programación matemática son los que siguen.

- Variables de decisión: representan las decisiones a tomar. Sus valores óptimos (que minimizan/maximizan la función objetivo) y factibles (que respetan las restricciones) son determinados por un método computacional de optimización.
- Parámetros: son valores que indican características del sistema que no están bajo control de quien toma decisiones y, en general, quedan determinados *a priori*.

- Restricciones: son expresiones que vinculan a las variables de decisión con los parámetros y determinan condiciones que debe cumplir la solución que buscamos.
- Función objetivo: es la función que se quiere optimizar y que vincula los parámetros con las variables de decisión. En general, se busca maximizar un beneficio o minimizar un costo.

3.2. Descripción general de la herramienta y proceso de desarrollo

El trabajo desarrollado considera a nivel de cuenca la problemática ambiental relacionada con la calidad de agua, al mismo tiempo que se persiguen objetivos de productividad. Esto ha llevado al desarrollo de un modelo que trabaja en niveles mayores (cuenca), pero que desagrega la información a niveles menores (productores y potreros). El objetivo general fue minimizar las externalidades ambientales, estableciendo metas productivas individuales a alcanzar e incluyendo restricciones ambientales, agronómicas y económicas.

El proceso contó con dos etapas. En la primera se desarrolló un modelo cuyo objetivo fue minimizar la exportación de fósforo hacia los recursos hídricos superficiales, manteniendo niveles aceptables de productividad primaria (en kg de materia seca por unidad de superficie, kg MS/ha) por estación del año, en los establecimientos de producción lechera de la microcuenca seleccionada. A través del modelo se determinaron las rotaciones de los cultivos forrajeros de los productores que componían la cuenca que minimizaran la exportación de fósforo. Las rotaciones debían cumplir con restricciones acerca de la sucesión y la diversidad de los cultivos y la productividad mínima en términos de materia seca, para un período de tiempo determinado (cuatro años). Como primera aproximación, el modelo fue resuelto en la instancia computacional de forma aproximada (o “heurística”) (Castagna, 2020; Mauttone *et al.*, 2019), debido a la complejidad, tanto de lograr una formulación matemática del problema como de diseñar un algoritmo que lo resuelva de manera exacta (que garantice soluciones óptimas). En una segunda etapa, se avanzó en la construcción de un modelo exacto de programación lineal entera mixta (Matonte, 2019) y en la incorporación de nuevos elementos al problema (Araújo *et al.*, 2020). Concretamente, se incorporó el modelado de decisiones relativas al almacenamiento y a la conservación de materia seca, el consumo de proteína cruda y energía neta de lactancia, y

la elección de los distintos métodos de consumo. En particular, al modelo original se le agregó una serie de restricciones y nuevos objetivos (Tabla 1), que mejoran las posibilidades de adaptación de los sistemas a las exigencias ambientales y productivas como, por ejemplo:

- Cálculo y tratamiento de costos de cada cultivo y suplemento.
- Reserva y transferencia de materia seca mediante distintos métodos de conservación.
- Adquisición de ración, de forma de contar con un complemento en caso de que no se logre cumplir con la demanda de energía y proteína.
- Consideración de la ocupación de cultivos en las parcelas durante cuatro estaciones previas al período en estudio.
- Reserva de materia seca disponible bajo distintos métodos, al comienzo del período en estudio.
- Balances de proteína y energía.

La Tabla 1 esquematiza los componentes del modelo para sus dos versiones (original, desarrollado en la primera etapa; y extendido, desarrollado en la segunda etapa).

TABLA 1. ESQUEMA DE ENTRADAS, SALIDAS Y OBJETIVOS DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN. LA COLUMNA MODELO EXTENDIDO INDICA LOS ELEMENTOS QUE SE AGREGAN A LOS INDICADOS EN LA COLUMNA MODELO ORIGINAL

ENTRADAS		
	Modelo original	Modelo extendido
Contexto	<p>Unidades espaciales (con atributo de área), agrupadas en productores-potreros.</p> <p>Cultivos (con atributos de exportación de fósforo, productividad de materia seca, ciclo de plantación, sucesores).</p>	<p>Costos de cada cultivo.</p> <p>Productividad de cultivos en términos de proteína y energía, en lugar de materia seca.</p> <p>Modalidad posible de reserva de cada cultivo para consumo posterior.</p> <p>Posibilidad de utilizar ración.</p>
Criterios	<p>Período de planificación.</p> <p>Diversidad de cultivos.</p> <p>Productividad mínima en materia seca.</p>	<p>Mínimos de materia seca a transferir para consumo posterior y de adquisición de ración.</p> <p>Requerimientos de proteína y energía mínimas.</p>

(Continúa en página siguiente)

Salidas	
Modelo original	Modelo extendido
Cultivo en cada unidad espacial para toda unidad temporal.	Conservación de materia seca para uso posterior. Compra de ración. Consumos de materia seca producida o almacenada.

Objetivos	
Modelo original	Modelo extendido
Minimización de exportación de fósforo.	Minimización de costos (cultivo, ración, almacenamiento para uso posterior).

Fuente: *Elaboración propia.*

3.3. Estructura del modelo

La información requerida para la operatividad del modelo puede dividirse en dos grandes componentes: la información geográfica y las bases de datos para cálculos agronómicos, ambientales y nutricionales. La información geográfica requiere de la unidad espacial de trabajo y sus subdivisiones clasificatorias. Esto hace referencia a la cuenca objeto de estudio, los padrones de los productores dentro de la cuenca y el parcelamiento de dichos establecimientos. Esta información debe ser incluida en un sistema de información geográfica, lo que permite que las soluciones del modelo sean espacialmente explícitas, es decir que se traduzcan en mapas. A cualquier polígono dentro de este sistema se le puede asociar otra información georeferenciada: topografía, tipo de suelo, usos, ecosistemas naturales, distancia a cursos de agua, entre otras.

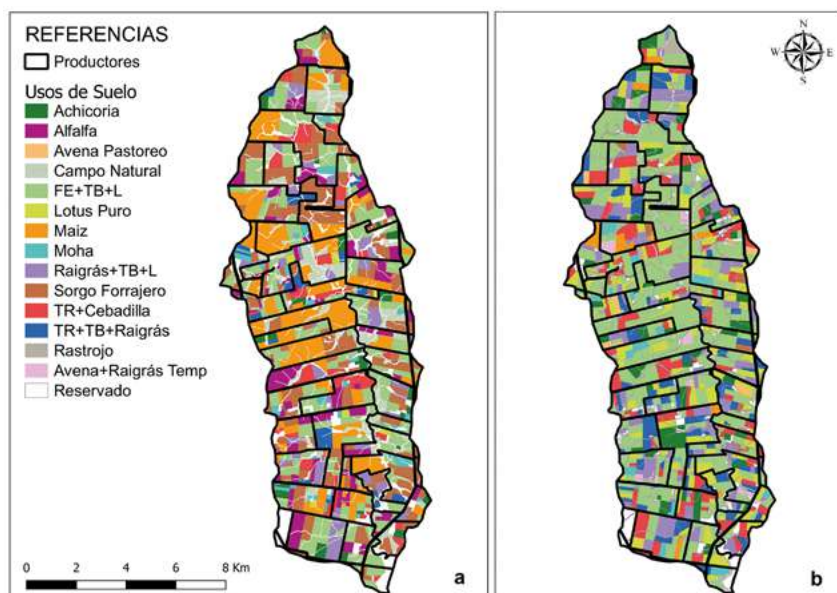
El otro componente de información es el que provee los datos de referencia para los cálculos de los flujos del sistema. Aquí, se consideran tablas que asignan los valores de exportación de nutrientes según uso del suelo, información de productividad de los diferentes cultivos forrajeros, información nutricional de forrajes y suplementos e información de costos. Estas tablas de datos resultan en el menú de opciones de asignación

de usos de suelo disponibles, lo que se complementa con datos sobre las posibles secuencias de cultivos, fechas de siembra y estacionalidad.

3.4 Ejemplo de las salidas del modelo extendido

El resultado del modelo es una solución espacialmente explícita (un mapa) de los usos de suelo en cada parcela, por estación del año durante los años que se analicen, que es posible ajustar entre uno y varios años (Figura 1).

FIGURA 1. MAPA DE PRODUCTORES Y DISTRIBUCIÓN DE LOS USOS DE SUELOS PRESENTES EN LA MICROCUENCA AL INICIO DE LA OPTIMIZACIÓN (A) Y EN EL ÚLTIMO VERANO DE LA PLANIFICACIÓN (B).



Nota: Los márgenes negros indican el predio de cada productor y los colores indican los potreros bajo diferentes cultivos.

FE: festuca, *TB:* trébol blanco, *L:* lotus, *TR:* trébol rojo. *Reservado:* representa coberturas que no pueden ser reemplazadas por cultivos, como bosque nativo, zonas inundables y zonas buffer restringidas por la normativa en la cuenca.

Fuente: Elaboración propia.

El modelo también genera una serie de resultados numéricos importantes en forma de tablas para cada una de las unidades de manejo. Estos indican los valores de producción primaria en forma de materia seca (MS) y también en proteína cruda (PC) y energía neta de lactancia (ENL); cantidades de fósforo exportado por hectárea y eventuales necesidades de compra de raciones. Estos resultados están expresados para toda la cuenca, por productor y por potrero, o parcela.

En las Tablas 2 y 3 se presenta un ejemplo de los resultados de la optimización para toda la cuenca, en la cual el modelo generó 18 secuencias de cultivos posibles para cumplir los objetivos productivos establecidos y la minimización de exportación de fósforo. Las secuencias de cultivos representan la sucesión estacional de cultivos que puede tomar cada potrero, para que cada productor de la cuenca minimice la exportación de P y satisfaga los requerimientos productivos. La sumatoria de los cultivos en el período de estudio obtiene valores para diferentes atributos como carga de P exportada por ha, aporte de proteína por ha y por unidad de P, así como costo por ha.

TABLA 2. FRECUENCIA DE USO Y ÁREA TOTAL OCUPADA POR SECUENCIAS DE CULTIVO A NIVEL DE CUENCA. CADA SECUENCIA IMPLICA UNA SUCESIÓN DE CULTIVOS Y ROTACIONES EN EL TIEMPO EN LA MISMA PARCELA

		Parcelas ocupadas		Área ocupada [ha]	
Secuencia	a	3	0,38%	26,69	0,27%
	b	4	0,51%	39,24	0,39%
	c	11	1,39%	71,15	0,71%
	d	1	0,13%	1,24	0,01%
	e	1	0,13%	4,84	0,05%
	f	495	62,50%	7.314,12	73,20%
	g	2	0,25%	21,34	0,21%
	h	2	0,25%	3,34	0,03%
	i	1	0,13%	22,05	0,22%
	j	40	5,05%	145,73	1,46%
	k	28	3,54%	179,72	1,80%
	l	16	2,02%	82,94	0,83%
	m	1	0,13%	1,92	0,02%
	n	162	20,45%	1.923,02	19,25%
	o	8	1,01%	83,52	0,84%
	p	3	0,38%	5,81	0,06%
	q	12	1,52%	58,02	0,58%
	r	2	0,25%	7,52	0,08%

Fuente: *Elaboración propia.*

TABLA 3. ATRIBUTOS DE LAS SECUENCIAS DE CULTIVOS SELECCIONADAS POR EL MODELO

Secuencia de cultivos	Kg P / ha	Kg prot / ha	Costo US\$ /ha
a	6,20	5.288	530,65
b	6,88	5.942	497,65
c	7,96	6.712	666
d	6,88	5.942	497,65
e	5,94	4.568	556
f	6,20	5.428	492,3
g	6,17	4.571	1.113
h	6,51	4.721	742,65
i	6,85	5.225	1.080
j	6,68	3.516	247,65
k	6,85	5.148	1.071,65
l	6,22	4.011	514,65
m	5,83	4.207	737,3
n	6,17	4.711	1.074,65
o	5,54	3.574	517,65
p	5,85	2.790	759,65
q	6,19	3.294	1.097
r	5,56	2.157	540

Nota: los costos, kg de proteína y fósforo exportado incluyen las reservas forrajeras y ración para cubrir déficits temporales.

Fuente: Elaboración propia.

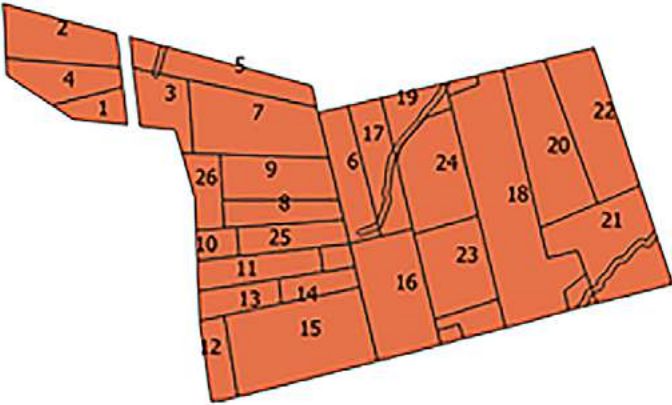
Para ejemplificar, se muestran los resultados tipo para un productor X dentro de la cuenca (Tabla 4 y Figuras 2, 3 y 4).

TABLA 4. CUADRO RESUMEN PARA PRODUCTOR X

Cantidad de parcelas	27
Superficie total	146,14 ha
Exportación total de fósforo	1.216,20 kg
Exportación por unidad de área	8,32 kg/ha
Productividad primaria media (MS)	8181,33 kg ha/año
Costo por unidad de área	1.924,03 US\$/ha

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 2. MAPA PARCELARIO DE PRODUCTOR X. CADA POTRERO ESTÁ IDENTIFICADO POR UN NÚMERO



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 3. ROTACIÓN DE CULTIVOS PRODUCTOR X. LAS FILAS REPRESENTAN CADA PARCELA DEL PRODUCTOR X EN LA FIGURA 2.

		Estaciones															
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Parcelas	1	Avena+Raigrás Temp.			Rastrojo			Moha					Raigrás+TB+L				
	2			TR+TB+Raigrás									Raigrás+TB+L				
	3	Avena+Raigrás Temp.			Rastrojo			Maíz					Raigrás+TB+L				
	4	Avena+Raigrás Temp.			Rastrojo			Maíz					Raigrás+TB+L				
	5				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	6				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	7				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	8	Avena+Raigrás Temp.			Rastrojo			Maíz					Raigrás+TB+L				
	9				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	10				TR+TB+Raigrás							Avena+Raigrás Temp.		Rastrojo			
	11	Avena+Raigrás Temp.			Rastrojo			Maíz					Raigrás+TB+L				
	12				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	13				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	14				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	15				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	16				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	17				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	18				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	19				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	20	Avena+Raigrás Temp.			Rastrojo			Maíz					Raigrás+TB+L				
	21				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	22	Avena+Raigrás Temp.			Rastrojo			Maíz					Raigrás+TB+L				
	23				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	24				TR+TB+Raigrás								Raigrás+TB+L				
	25	Avena pastoreo		Rastrojo								Alfalfa					
	26	Avena+Raigrás Temp.			Rastrojo			Maíz					Raigrás+TB+L				
	27							Raigrás+TB+L								Rastrojo	

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 muestra, para cada parcela o potrero, el uso de suelo (cultivo) presente a medida que transcurre el tiempo desde la primera hasta la decimosexta estación modelada. La Figura 4 complementa la información mostrando la productividad esperada de cada cultivo, sumando toda la superficie que ocupa en el establecimiento, incorporando además los momentos de producción y consumos de otras fuentes de alimentos que no son de pastoreo directo (fardos, silo y ración).

FIGURA 4. PRODUCTIVIDAD PLANIFICADA PARA EL PRODUCTOR X EN KG DE MATERIA SECA (MS) DE LOS CULTIVOS EN CONSUMO DIRECTO Y DIFERENTES FORMAS DE RESERVAS

Estación	Cultivo	Cultivo	X [kg MS]	CD [kg MS]	F [kg MS]	CF [kg MS]	S [kg MS]	CS [kg MS]	CR [kg]
1	4	TR+TB+Raigrás	69.010,92	69.010,92					46.825
	6	Raigrás+TB+L	1.393,38	1.393,38					
	11	Avenas+Raigrás Temp.	38.510,98	38.510,78	0,20				
2	4	TR+TB+Raigrás	131.483,34	131.483,34					
	6	Raigrás+TB+L	3.256,02	2.386,74	869,27				
	11	Avenas+Raigrás Temp.	40.877,48		40.877,48				
3	4	TR+TB+Raigrás	223.973,42	122.243,41	101.730,01				
	6	Raigrás+TB+L	5.679,60		5.679,60	869,27			
	11	Avenas+Raigrás Temp.	50.565,31		50.565,31	40.877,68			
4	4	TR+TB+Raigrás	88.150,90		88.150,90	98.933,21			
	6	Raigrás+TB+L	1.467,09		1.467,09	5.679,60			
	11	Avenas+Raigrás Temp.				50.565,31			
5	4	TR+TB+Raigrás	129.343,46	63.628,99	65.714,47	89.476,07			
	6	Raigrás+TB+L	3.308,15	3.308,15		1.467,09			
6	4	TR+TB+Raigrás	105.804,86	105.804,86		28.887,29			
	6	Raigrás+TB+L	3.144,54	3.144,54					
7	4	TR+TB+Raigrás	207.746,05	119.950,82	87.795,23	38.298,80			
	6	Raigrás+TB+L	6.008,62	6.008,62					
8	4	TR+TB+Raigrás	88.150,90	73.783,64	14.367,25	87.795,23			
	6	Raigrás+TB+L	2.454,15	2.454,15					
	8	Moha	9.791,60	9.791,60					
	12	Maíz	212.938,30				212.938,30		
9	4	TR+TB+Raigrás	3.801,03		3.801,03	14.367,25			
	6	Raigrás+TB+L	58.709,75	41.688,68	17.021,07				
	11	Avenas+Raigrás Temp.	4.079,18	4.079,18					
	12	Maíz						212.938,30	
10	4	TR+TB+Raigrás	7.241,93		7.241,93				
	6	Raigrás+TB+L	133.968,01	133.870,08	97,93				
	11	Avenas+Raigrás Temp.	4.329,85		4.329,85				
11	4	TR+TB+Raigrás	12.336,17		12.336,17	11.042,97			
	6	Raigrás+TB+L	234.185,67	132.217,56	101.968,11	17.119,00			
	11	Avenas+Raigrás Temp.	5.356,01		5.356,01	4.329,85			
12	4	TR+TB+Raigrás	4.855,24		4.855,24	12.336,17			
	6	Raigrás+TB+L	61.116,79	44.954,70	16.162,09	101.968,11			
	11	Avenas+Raigrás Temp.				5.356,01			
13	4	TR+TB+Raigrás	7.124,07	7.124,07		3.817,10			
	6	Raigrás+TB+L	133.762,31	133.762,31		16.162,09			
14	4	TR+TB+Raigrás	5.827,60	5.827,60		1.038,14			
	6	Raigrás+TB+L	127.146,90	127.146,90					
15	4	TR+TB+Raigrás	11.442,39	11.442,39					
	6	Raigrás+TB+L	242.953,07	170.011,71	72.941,37				
16	4	TR+TB+Raigrás	4.855,24	4.855,24					
	6	Raigrás+TB+L	99.231,28	99.231,28		72.941,37			
			2.585.381,56	1.669.115,64	703.327,61	703.327,61	212.938,30	212.938,30	46.825,25

Nota: X = total, CD = consumo directo, F = producción de fardo, CF = consumo de fardo, S = producción de silo, CS = consumo de silo, CR = consumo de ración.

Fuente: Elaboración propia.

4. Alcance y desafíos

4.1. Uso en política pública

A nivel de política pública, la utilidad del modelo para la optimización en la planificación de usos del suelo (MOPUS) consiste en poder simular escenarios con objetivos antagónicos entre necesidades productivas y ambientales, con restricciones y exigencias variables. A modo de ejemplo, podemos pensar en una situación en la que una autoridad o un decisor público pretende asegurar la calidad del agua en una cuenca determinada, pero, a su vez, contemplar las necesidades socioeconómicas de los habitantes de una zona. Para este caso, el modelo deberá asegurarse de que la exportación de fósforo hacia los cursos de agua (principal causa de eutrofización) sea la mínima posible y que garantice niveles de productividad admisibles. Incluso, se puede avanzar aún más y establecer umbrales para la exportación de fósforo en la cuenca. Es decir que la producción que se realice en la cuenca no pueda superar determinado umbral de exportación total de dicho nutriente, que asegure que se mantenga la calidad del agua admitida. Esto podría significar que algunos usos de suelo en promedio en la cuenca (aquellos con mayor exportación de fósforo) no podrán superar determinadas superficies. Esta es una condición que está en proceso de ser incorporada al modelo, la que fue hasta ahora explorada en Rodríguez-Gallego *et al.* (2019) y Mauttone *et al.* (2018) para la cuenca de la laguna de Rocha.

Por otra parte, podemos imaginar que la cuenca está ocupada por productores lecheros de pequeña escala, como sucede en el caso de estudio, los que necesitan alcanzar una productividad mínima para ser económicamente viables, y si es posible que la productividad se alcance optimizando costos y minimizando impactos ambientales. En este planteo, la simulación podría resultar en que todos los objetivos sean alcanzables para cada productor y, por tanto, obtendríamos la planificación de usos del suelo recomendada para toda la cuenca. También puede suceder que para los requerimientos mínimos de productividad no se logre alcanzar los objetivos ambientales, es decir, no hay solución posible con las alternativas con las que se cuenta para algunos productores.

En esta situación, el modelo podrá calcular de cuánto es la diferencia económica entre el mínimo requerido y el alcanzable por cada productor, con las restricciones ambientales. De esta manera, se contará con una base para calcular los costos que requeriría el apoyo a este sector,

para que pueda satisfacer los requerimientos económicos y ambientales. Asimismo, se puede pensar en transacciones de restricciones ambientales, donde un productor pueda “ceder” a otro su “cuota de fósforo” no utilizada, de manera que la exportación total de la cuenca no sobrepase el umbral establecido. También podrían buscarse otras soluciones de compromiso, como la búsqueda de otras alternativas a la lechería que cumplan con las metas económicas y ambientales.

4.2. Uso en gestión predial

El modelo arroja una solución para cada productor, proponiendo una serie de rotaciones forrajeras para alcanzar los objetivos productivos y las respectivas restricciones ambientales. Por esta razón puede ser utilizado en la gestión de la producción, para tener una presupuestación forrajera a largo plazo, estimación de reservas, necesidades de ración y cálculo de costos, además de atenuar los impactos ambientales. Esto podría ser implementado por productores y asesores técnicos, pudiéndose incluso cambiar objetivos y/o restricciones, así como aumentar el menú de opciones y actualizar costos de insumos.

4.3. Accesibilidad a la herramienta

El modelo y las herramientas de *software* para su uso están en continuo proceso de renovación y mejora, por lo cual no existe disponibilidad como plataforma de libre descarga. Para aquellos interesados en su uso o en participar en el desarrollo, los autores acuerdan designar como contacto referente al Dr. Antonio Mauttone, de la Facultad de Ingeniería.¹

5. Aportes a la transición agroecológica

En la producción agroecológica se busca como base conceptual la sostenibilidad de la actividad productiva, lo cual implica la consideración de los aspectos económicos, sociales y ambientales de los predios agropecuarios, pero también del entorno territorial en el cual están inmersos.

¹ Contacto: mauttone@fing.edu.uy.

El MOPUS es una herramienta útil para la visualización de posibles escenarios de uso del suelo en pos de planificar el proceso de transición desde la situación actual (producción convencional) a otra, de producción con objetivos productivos con las salvaguardas ambientales correspondientes. En este sentido, la herramienta permite planificar objetivos productivos de base, a los cuales se le impongan restricciones ambientales en materia de sus exportaciones de nutrientes, y verificar que son alcanzables con las alternativas tecnológicas disponibles. Esto implica tanto los objetivos individuales como los de una cuenca o porción de territorio determinada, lo cual aporta a la sostenibilidad predial y de su entorno.

También permitiría realizar estimaciones de cuánto sería el beneficio ambiental si toda una cuenca o una proporción de productores en ella realizara esta transición a producción agroecológica, lo cual impulsaría incentivos de política pública a esa transformación si los resultados mostrasen que la exportación de nutrientes se reduce de manera significativa en escenarios donde la producción agroecológica ocupa parte del territorio.

En la escala de la planificación predial, permitirá estimar retornos en materia productiva con las restricciones ambientales planificadas, con la posibilidad de analizar la trayectoria con un horizonte de varios años y, por tanto, disponer de un análisis de la factibilidad de la producción agroecológica.

Referencias

Ackerman, M. N., Barboza, N. y Cortelezzi A.

(2017), "Caracterización socioeconómica de la actividad agropecuaria de la cuenca del río Santa Lucía", en Souto, G., Tamber, A. y Bervejillo, J. (eds.), *Anuario 2017*, Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca-OPYPA (Oficina de Programación Y Políticas Agropecuarias), Montevideo, pp. 591-602.

Alonso, J., Quintans, F., Taks, J., Conde, D., Chalar, G., Bonilla, S., Arocena, R., Haakonsson, S., Aubriot, L., Goyenola, G., Muniz, P., Marrero, A., Hutton, M., Venturini, N., Pita, A. L., Iglesias, K., Rios, M., Zaldúa, N., Teixeira de Mello, F., Soutullo, A., Eguren, G., Victoria, M., López Tort, F., Maya, L., Castells, M., Benitez, M. J., Lizasoain, A., Bertoni, E., Bortagaray, V., Salvo, M., Colina, R., Azuriz, K., Casagnet, N., Evia, V., Fernández, A., Lagos, X., Marrero, L., Milans, F., Piaggio, M., Rezzano, N., López, J., Rodríguez, L., Garat, S., Pintos, M., Irburo, A., Brena, B. y Méndez, H.

(2019), "Water Quality in Uruguay: current status and challenges", en Roldán, G., Tundisi, J., Jiménez, B., Vammen, K., Vaux, H., González, E. y Doria, M.

(eds.), *Water quality in the Americas*, Inter-American network of Academies of Sciences (IANAS-IAP), México, pp. 592-631.

Araujo, A., Mancebo, S., Moncalvo, V. y Parrilla, A.

(2020), *Optimización de usos del suelo en el contexto de rotación de cultivos considerando aspectos productivos y medioambientales*, Proyecto de Grado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Montevideo.

Aristide, P., Cittadini, E., Blumetto, O., Giobellina, B., Ledesma, S., Ovale, C., Marchao, R., Caballero, P. J., Osman, A. y Tittone, P.

(2020), *Variables claves para la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios. Hacia un sistema de indicadores de Intensificación Sostenible en el Cono Sur*. PROCISUR. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA).

Arocena, R., Chalar, G., Fabián, D., De León, L., Brugnoli, E., Silva, M., Rodó, E., Machado, I., Pacheco, J. P., Castiglioni, R. y Gabito, L.

(2008), *Evaluación ecológica de cursos de agua y biomonitorio, Informe final*, Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente-Universidad de la República-Facultad de Ciencias, Montevideo.

Arocena, R., Chalar, G., Perdomo, C., Fabián, D., Pacheco, J. P., González, M., Olivero, V., Silva, M., García, P. y Etchebarne, V.

(2013), "Impacto de la producción lechera en la calidad de los cuerpos de agua", *Augm Domus*, 5(I), pp. 42-63.

Barreto, P., Dogliotti, S. y Perdomo, C.

(2017), "Surface Water Quality of Intensive Farming Areas Within the Santa Lucia River Basin of Uruguay", en *Air, Soil and Water Research*, 10, pp. 1-8.

Bonilla, S., Haakonsson, S., Somma, A., Gravier, A., Britos, A., Vidal, L., De León, L., Brena, B., Pérez, M., Piccino, C., Martínez de la Escalera, G., Chalar, G., González-Piana, M., Martigani, F. y Aubriot, L.

(2015), "Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay", en *INNOTEC*, 10, pp. 9-22.

Buytaert, W. y Breuer, L.

(2013), "Water resources in South America: sources and supply, pollutants and perspectives", en *Proceedings of HO4, IAHS-IAPSO-IASPEI Assembly*, IAHS publications, Gothenburg (Suecia), pp. 106-113.

Castagna, A.

(2020), *Modelación del uso de suelo en una cuenca lechera para minimizar la exportación de nutrientes hacia aguas superficiales*, Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias, Universidad de la República, Montevideo.

Chalar, G., García-Pesenti, P., Silva-Pablo, M., Perdomo, C., Olivero, V. y Arocena, R.

(2017), "Weighting the impacts to stream water quality in small basins devoted to forage crops, dairy and beef cow production", en *Limnologica*, 65, pp. 76-84.

Cornish, P. S., Hallissey, R. y Hollinger, E.

(2002), “Is a rainfall simulator useful for estimating phosphorus runoff from pastures—a question of scale-dependency?”, en *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 42(7), pp. 953-959.

Delgado, S.

(2017), *Planes para la Producción Lechera Sostenible. Anuario OPYPA* (Oficina de Programación Y Políticas Agropecuarias), MGAP, Montevideo, pp. 291-296.

De Paula Filho, F. J., de Sá Sampaio, A. D., Menezes, J. M. C., da Costa, C. T. F. y Santiago, M. O.

(2019), “Land uses, Nitrogen and Phosphorus estimated fluxes in a Brazilian semi-arid watershed”, en *Journal of Arid Environments*, 163, pp. 41-49.

Dolman, A. M., Rücker, J., Pick, F. R., Fastner, J., Rohrlack, T., Mischke, U. y Wiedner, C.

(2012), “Cyanobacteria and cyanotoxins: the influence of nitrogen versus phosphorus”, en *PLoS one*, 7(6), e38757.

Foley, J. A., De Fries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., Chapin, F. S., Coe, M. T., Daily, G. C., Gibbs, H. K., Helkowski, J. H., Holloway, T., Howard, E. A., Kucharik, C. J., Monfreda, C., Patz, J. A., Prentic, I. C., Ramankutt, N. y Snyder, P. K.

(2005), “Global consequences of land use”, *Science*, 309 (5734), pp. 570-574.

Fu, B., Zhang, L., Xu, Z., Zhao, Y., Wei, Y. y Skinner, D.

(2015), “Ecosystem services in changing land use”, en *Journal of Soils and Sediments*, 15(4), pp. 833-843.

Goyenola, G., Meerhoff, M., Teixeira de Mello, F., González-Bergonzoni, I., Graeber, D., Fosalba, C., Vidal, N., Mazzeo, N., Ovesen, N. B., Jeppesen, E. y Kronvang, B.

(2015), “Phosphorus dynamics in lowland streams as a response to climatic, hydrological and agricultural land use gradients”, en *Hydrology and Earth System Science Discussion*, 12, pp. 3349-3390.

Groot, J. C., Rossing, W. A., Jellema, A., Stobbelaar, D. J., Renting, H. y Van Ittersum, M. K.

(2007), “Exploring multi-scale trade-offs between nature conservation, agricultural profits and landscape quality—a methodology to support discussions on land-use perspectives”, en *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 120(1), pp. 58-69.

Harper, D.

(1992), *Eutrophication of Freshwaters*, Springer, Países Bajos.

Hillier, F. S. y Lieberman, G. J.

(2009), *Introduction to Operations Research*, McGraw-Hill.

INALE

(2015), *Encuesta Lechera INALE 2014*. Disponible en: <<https://www.inale.org/estadisticas/>>.

Manta, E., Cancela, H., Cristina, J. y García-Prehac, F.

(2013), *Informe sobre la calidad del agua en la cuenca del Río Santa Lucía: estado de situación y recomendaciones*, UDELAR, Montevideo, 29 pp.

Matonte, F.

(2019), *Modelado del problema de Planificación de Rotación de Cultivos utilizando Programación Entera Mixta*, Monografía de Grado de Licenciatura en Computación, Universidad de la República, Montevideo.

Matson, P. A., Parton, W. J., Power, A. G. y Swift, M. J.

(1997), “Agricultural intensification and ecosystem properties”, en *Science*, 277(5325), pp. 504-509.

Mauttone, A., Cairelli, L., Paroli, F., y Rodríguez-Gallego, L.

(2018), “Metaheuristic approach to land use optimization balancing productivity and environmental protection”, en: 19 Latin-Iberoamerican Conference on Operations Research, Lima. *Proceedings*, San Borja, Lima, Sociedad Peruana de Investigación Operativa (SOPIOS), pp. 716-723.

Mauttone, A., Castagna, A., Matonte, F., Rodriguez-Gallego, L. y Blu-metto, O.

(2019), “Heuristic optimization of crop rotation for milk production at small farms”, en: Albornoz, V. M. y Mac Cawley, A. (eds), *Proceedings of the III International Conference on Agro Big Data and Decision Support Systems in Agriculture*, pp. 8-11.

Moss, B.

(1998), “Shallow lakes, biomanipulation and eutrophication”, en *Scope Newsletter*, 29, pp. 1-44.

— (2010), *Ecology of fresh waters: a view for the twenty-first century*, 4^a ed., Wiley-Blackwell, Chichester, 470 pp.

Moss B., Madgewick, J. y Phillips, G.

(1996), *A guide to the restoration of nutrient-enriched shallow lakes*, Environment Agency Broads Authority, Norwich (Reino Unido).

National Academy of Sciences

(1969), *Eutrophication: causes, consequences, correctives*, NAS, Washington D.C.

Nha, D. V.

(2017), “The Role of Land-Use Planning on Socioeconomic Development in Mai Chau District, Vietnam”, en: Thanh, M. V., Vien, T. D., Leisz, S. J. y Shivakoti, G. P. (eds), *Redefining Diversity & Dynamics of Natural Resources Management in Asia*, v. 2, Elsevier, Amsterdam, pp. 87-111.

Quinlan, R., Filazzola, A., Mahdiyan, O., Shuvo, A., Blaggrave, K., Ewins, C., y Sharma, S.

(2021), “Relationships of total phosphorus and chlorophyll in lakes worldwide”, en *Limnology and Oceanography*, 66(2), pp. 392-404.

Rodríguez-Gallego, L., Achkar, M. y Conde, D.

(2012), “Land suitability assessment in the catchment area of four southwestern

Atlantic Coastal Lagoons: multicriteria and optimization modeling”, en *Environmental Management*, 50(1), pp. 140-152.

Rodríguez-Gallego, L., Achkar, M., Defeo, O., Vidal, L., Meerhoff, E. y Conde, D.

(2017), “Effects of land use changes on eutrophication indicators in five coastal lagoons of the Southwestern Atlantic Ocean”, en *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 188, pp 116-126.

Rodríguez-Gallego, L., Cabrera, A. B.C., Kruk, C., Nin, M. y Mauttone, A. (2019), “Establishing limits to agriculture and afforestation: A GIS based multi-objective approach to prevent algal blooms in a coastal lagoon”, en *Journal of Dynamics & Games*, 6(2), pp. 159-178.

Rong, Q., Cai, Y., Chen, B., Yue, W., Yin, X. A. y, Tan, Q.

(2017), “An enhanced export coefficient-based optimization model for supporting agricultural nonpoint source pollution mitigation under uncertainty”, en *Science of the Total Environment*, 580, pp. 1351-1362.

Sharpley, A., Daniel, T. C., Sims, J. T. y Pote, D. H.

(1996), “Determining environmentally sound soil phosphorus levels”, en *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(2), pp. 160-166.

Smith, P.

(2018), “Managing the global land resource”. *Proceedings of the Royal Society B. Biological Sciences*, 285(1874): 20172798.

Steffen, M. e Inda H. (eds)

(2010), *Bases técnicas para el manejo integrado de Laguna del Sauce y cuenca asociada*, Universidad de la República y South American Institute for Resilience and Sustainability Studies (SARAS), Montevideo, 150 pp.

Steffen, W., Persson, Å., Deutsch, L., Zalasiewicz, J., Williams, M., Richardson, K., Molina, M., Ramanathan, V., Rockström, J., Scheffer, M., Schellnhuber, H. J. y Svedin, U.

(2011), “The Anthropocene: From global change to planetary stewardship”, en *Ambio*, 40(7), pp. 739-761.

Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R. y Polasky, S.

(2002), “Agricultural sustainability and intensive production practices”, en *Nature*, 418(6898), pp. 671-677.

Withers, P. J. A., Hodgkinson, R. A., Rollett, A., Dyer, C., Dils, R., Collins, A. L., Bilsborrow, P. E., Bailey, G. y Sylvester-Bradley, R.

(2017), “Reducing soil phosphorus fertility bring potential long-term environmental gains: a UK analysis”, en *Environmental Research Letters*, 12(6): 063001.

Capítulo 23

Mitigación de estrés nutricional y sanitario en colmenas de abejas melíferas mediante estrategias agroecológicas

Belén Branchiccela, Karina Antúnez, Loreley Castelli,
Yamandú Mendoza, Estela Santos y Ciro Invernizzi

1. Introducción

Las abejas *Apis mellifera* son insectos sociales. Esta vida en sociedad y las características de estas sociedades determinan que esta especie de abejas sea muy atractiva, debido a su excelente rol como agente polinizador y a su gran capacidad de acopio de alimentos, los cuales pueden ser extraídos por el hombre con fines comerciales. La polinización consiste en el traslado del polen (gameto masculino de la flor) desde las anteras de la planta hacia su parte femenina (estigma), permitiendo que ocurra la fecundación del óvulo y, consecuentemente, su reproducción sexual. Esta polinización puede ser llevada a cabo por distintos agentes como el viento, el agua y los animales, pero son estos últimos, y en particular los insectos, los principales agentes polinizadores (Klein *et al.*, 2007; Potts *et al.*, 2016; Jankielsohn, 2018). Entre estos insectos, la abeja *A. mellifera* es el principal polinizador (McGregor, 1976), siendo responsable de la polinización del 90% de las plantas dependientes de la polinización animal (Klein *et al.*, 2007; Potts *et al.*, 2016). La alta eficacia como insectos polinizadores radica en la alta densidad de individuos por colonia, que determina una gran cantidad de abejas en el campo, así como en las características de su actividad de pecoreo. Esta actividad se basa en que cada abeja realiza hasta 20 viajes diarios, visitando entre 200 y 600 flores en cada viaje, y visita la misma especie floral en cada viaje, maxi-

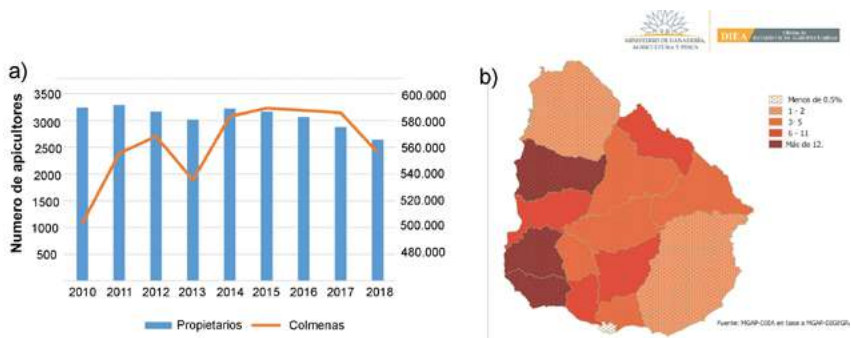
mizando las probabilidades de cruzamiento. De esta forma, la polinización por abejas es un servicio ecosistémico clave que contribuye significativamente a la producción agrícola aumentando los rendimientos y la calidad de los cultivos, pero además promueve el funcionamiento de los ecosistemas naturales (Potts *et al.*, 2016).

En Uruguay, el valor económico de la polinización atribuido a la abeja *A. mellifera* se estimó en 80 millones de dólares anuales, considerando solamente los cultivos de ciruelo, durazno, frutilla, girasol, manzana, membrillo, pera, tomate, zapallo kabutiá, zapallitos y otros zapallos (Santos *et al.*, 2009). En Estados Unidos, este valor fue calculado en 14,6 billones de dólares en el año 2000, considerando la productividad de los principales cultivos de este país (Morse y Calderone, 2000).

Además de su importancia como agente polinizador, su gran capacidad de trabajo y su alta eficacia permiten que las abejas melíferas sean también explotadas comercialmente para obtener una amplia variedad de productos (Crane, 1990). La miel es el principal de estos productos y el más comercializado. Se trata de una sustancia azucarada producida a partir del néctar secretado por las flores con el fin de atraer a los polinizadores y asegurar la fecundación de la planta. Por otro lado, las abejas son utilizadas también para la obtención del polen, el cual es la fuente de proteínas y micronutrientes para las abejas (Haydak, 1970; Brodschneider y Crailsheim, 2010). Además, a partir de las colmenas es posible obtener otros productos como propóleo, jalea real, apitoxina y cera (Crane, 1990).

Pese al rol vital de las abejas en la polinización de cultivos, la contratación de colmenas para polinizar estos cultivos no es una actividad ampliamente difundida en nuestro país y, si bien existen productores apícolas que brindan este servicio, la actividad apícola nacional se basa en la producción de miel. En los últimos cinco años, el número de colmenas se ha mantenido relativamente constante mientras que el número de apicultores ha disminuido (MGAP, 2019) (Figura 1). Actualmente existen en Uruguay unos 2.500 apicultores que manejan unas 561.000 colmenas (SINATPA, 2020). Se producen anualmente unas 11.000 toneladas de miel aproximadamente y el 90% de la miel producida es exportado a granel, principalmente a la Unión Europea (MGAP, 2019). El abandono de la actividad de muchos apicultores responde esencialmente a la baja rentabilidad actual del negocio, debido a bajos precios de comercialización de la miel y altos costos productivos, a lo cual se suman los problemas que padecen las colmenas, que son sanitarios, nutricionales e intoxicación con pesticidas, entre otros (Smith *et al.*, 2013; Steinhauer *et al.*, 2018).

FIGURA 1. VARIACIÓN EN EL NÚMERO DE COLMENAS Y APICULTORES EN URUGUAY ENTRE 2010 Y 2018 (A) Y DISTRIBUCIÓN DEPARTAMENTAL DE LAS COLMENAS COMO PORCENTAJE DEL TOTAL DE COLMENAS REGISTRADAS EN URUGUAY EN 2018 (B)



Fuente: MGAP (2019).

La zona suroeste del país es la zona tradicionalmente apícola, donde se encuentra el mayor número de colmenas y apicultores (MGAP, 2019). Sin embargo, se han dado modificaciones en el uso del suelo que han determinado cambios en la distribución de colmenas en Uruguay y en su forma de manejo. En este sentido, zonas tradicionalmente apícolas han dejado de serlo debido a la extensión de cultivos poco atractivos para las abejas y que no favorecen el desarrollo colonial y la productividad. Asimismo, existen otras zonas, como por ejemplo el norte del país, en las cuales se han extendido las plantaciones de montes de *Eucalyptus* spp., que brindan la posibilidad de producir grandes cantidades de miel en un corto período de tiempo y en épocas en las cuales los recursos nectaríferos en el resto del territorio disminuyen (Branchiccela *et al.*, 2020). Esto ha contribuido al desarrollo de la apicultura en otras regiones y al desarrollo de nuevos manejos productivos.

Durante los últimos años se han reportado altos porcentajes de pérdidas de colonias de abejas melíferas a nivel mundial (Steinhauer *et al.*, 2018; Carreck y Neumann, 2010; Van Engelsdorp y Meixner, 2010; Goulson *et al.*, 2015; Brodschneider *et al.*, 2016). Los porcentajes de pérdidas de colonias varían según el año y el país, llegando a valores de hasta el 45% de pérdidas anuales (Brodschneider *et al.*, 2016; Kulhanek *et al.*, 2017; Gray *et al.*, 2019). Entre los principales problemas vinculados a

dichas pérdidas se encuentra el estrés nutricional y sanitario (Steinhauer *et al.*, 2018; Potts *et al.*, 2010). El estrés nutricional se asocia al aumento de áreas destinadas a monocultivos. Estos monocultivos pueden o no ofrecer néctar y polen a las abejas. La miel es su fuente de carbohidratos mientras que el polen es la fuente de proteínas, lípidos, vitaminas y minerales. De esta forma, la diversidad botánica y las características nutricionales de los pólenes repercuten en la expectativa de vida de las abejas y en su susceptibilidad a la infección con plagas y patógenos, entre otros factores (Alaux *et al.*, 2010; Di Pascuale *et al.*, 2013; DeGrandi-Hoffman y Chen, 2015; Castelli, 2017). Como consecuencia, la intensificación en el uso del suelo ofrece alimentos a las abejas durante un período acotado de tiempo y con baja o nula diversidad nutricional, lo cual limita el suministro de los requerimientos nutricionales básicos que la abeja necesita y genera estrés nutricional (De Groot, 1953; Naug, 2009; Carreck *et al.*, 2010).

Por otro lado, la forma de vida en sociedad y el consecuente confinamiento de miles de individuos emparentados genéticamente permiten a los patógenos reproducirse fácilmente, por lo tanto, las abejas melíferas son blanco para la infección de múltiples plagas y patógenos (Carreck *et al.*, 2010; Chauzat *et al.*, 2014). Entre los principales patógenos que infectan a las abejas se encuentra el ácaro *Varroa destructor*, el cual es la principal amenaza sanitaria de las abejas melíferas (Dainat *et al.*, 2012). Se trata de un ectoparásito que infesta tanto a la cría como a la abeja adulta (Rosenkranz *et al.*, 2010) (Figura 2). Succiona el contenido de la hemolinfa y de los cuerpos grasos, sitio de almacenamiento nutricional y producción de péptidos antimicrobianos (Ramsey *et al.*, 2019). De esta forma, la infestación con el ácaro genera pérdida de peso de las abejas (De Jong *et al.*, 1982; Bowen-Walker y Gunn, 2001), reducción de su longevidad (Bowen-Walker y Gunn, 2001; Yang y Cox Foster, 2007; Alaux *et al.*, 2011) e inmunodepresión (Alaux *et al.*, 2011; Amdam y Omholt, 2002). Además, *V. destructor* es capaz de transmitir virus a las abejas y modificar sus dinámicas poblacionales (Bowen-Walker *et al.*, 1999; Chen *et al.*, 2004; De Miranda *et al.*, 2010; Martin *et al.*, 2012), complejizando aún más el cuadro infectivo. A nivel colonial, estos efectos se traducen en una disminución en la población de abejas, pudiendo causar la muerte de la colonia y, consecuentemente, menores rendimientos productivos (Rosenkranz *et al.*, 2010). Por otro lado, las abejas son también blanco de microsporidios como *Nosema apis* y *Nosema ceranae*, y más de 26 virus, entre otros patógenos (Fries *et al.*, 1996; Higes *et al.*, 2006; Beaurepère *et al.*, 2020).

FIGURA 2. CRÍA DE ABEJAS MELÍFERAS SEVERAMENTE INFESTADA CON ÁCAROS *VARROA DESTRUCTOR*



Foto: Belén Branchiccela.

Resulta evidente, entonces, que dos de los principales problemas asociados a las pérdidas de colmenas están directamente vinculados. En Uruguay, desde el año 2013 se estiman anualmente las pérdidas anuales de colonias y los posibles factores relacionados, a través de encuestas a los apicultores. Desde esa fecha, las pérdidas han oscilado entre el 20% y 30% de las colonias, anualmente (Antúnez *et al.*, 2016; Requier *et al.*, 2018), siendo el estrés nutricional y el estrés sanitario dos de los principales problemas identificados por los productores.

2. Mitigación del estrés nutricional de las abejas melíferas

El estrés nutricional puede surgir por ausencia total de alimentos o porque los alimentos disponibles no suministran los requerimientos nutricionales que las abejas necesitan. En estos casos, los apicultores pueden trasladar sus colmenas hacia otros sitios con disponibilidad de alimentos. Sin embargo, esta posibilidad es la menos frecuente, por lo tanto,

la nutrición de la colmena depende de sus reservas nutricionales finitas o del suministro de sustitutos o suplementos nutricionales de preparación casera o comercial (Haydak, 1970). La mayoría de estos contienen hidrolizados de levaduras y proteínas de origen vegetal, entre otros componentes. Estudios previos han demostrado que las consecuencias de la administración de estos compuestos pueden resultar positivas, negativas o neutras, en comparación con la alimentación basada en polen (Mattila y Ottis, 2006; De Jong *et al.*, 2009; Safari *et al.*, 2010; DeGrandi-Hoffman *et al.*, 2016). Dichas repercusiones pueden deberse a la diversidad de los productos evaluados y a las distintas condiciones ambientales en las que fueron realizados los ensayos, con las consecuentes diferencias en el aporte de nutrientes del ambiente.

En Uruguay, los ambientes no están caracterizados desde el punto de vista nutricional para las abejas, por lo que no existen planes de suplementación de las colmenas. Existen experiencias aisladas de productores que, en ciertas circunstancias, suplementan las colmenas con productos de fabricación casera en épocas puntuales, pero las derivaciones de dicha suplementación no han sido aún evaluadas de forma comparativa. En el mercado se comercializan algunos productos nutricionales, pero su uso tampoco es extendido, debido a sus costos y a la falta de información asociada a los efectos producidos por su administración. Por lo tanto, es posible plantear que no existe actualmente información suficiente que demuestre que la alimentación con polen pueda ser sustituida por una alimentación artificial equivalente, sea de fabricación casera o comercial. De este modo, es necesario maximizar las probabilidades de que el polen sea la fuente de nutrientes de la colmena. En este marco, la suplementación de las colonias con polen resulta una estrategia atractiva.

La práctica de suplementación con polen, sin embargo, presenta algunos desafíos.

El primero de ellos es el tipo de polen a utilizar, el cual puede ser polen ensilado o corbicular. El polen es colectado por las abejas y transportado en unas estructuras llamadas corbículas, ubicadas en la parte trasera de las patas. A este polen se lo llama polen corbicular. Una vez que el polen ingresa a la colmena, es colocado en las celdas junto con enzimas y microorganismos que permiten su conservación por largos períodos de tiempo (Anderson *et al.*, 2014). A ese polen se lo llama polen ensilado. El polen corbicular se obtiene a partir de trampas colocadas en las colmenas. La desventaja de la utilización del polen corbicular reside en las dificultades para su obtención, ya que es necesario visitar a diario

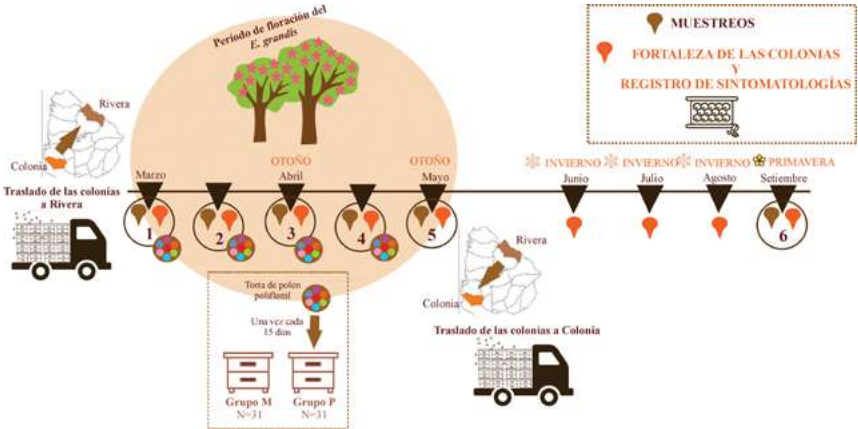
el apiario, y en que las cantidades obtenidas pueden ser escasas. Por otro lado, el polen ensilado se obtiene con una máquina diseñada para tal fin (Spragilas, Wilara, Lituania).¹ En el ensayo que se presenta a continuación, se utilizó polen ensilado.

El segundo desafío para abordar es la posibilidad de transmisión de enfermedades mediante la utilización del polen de otras colmenas, ya que existen microorganismos que sobreviven infectivamente en esta matriz. Para evitar esto, y teniendo en cuenta que los productores intercambian activamente material entre sus colmenas, esta estrategia se propone para productores que utilicen el polen de sus propias colmenas.

Con el objetivo de evaluar la eficacia de la administración de este polen frente al estrés nutricional se escogieron las plantaciones de *E. grandis*. Estos ambientes se consideran como modelo de estrés nutricional, ya que constituyen un monocultivo para las abejas y las características nutricionales de este polen no suministran los requerimientos nutricionales que estas precisan en esta época del año (Somerville, 2001; Branchiccela *et al.*, 2019). El polen ensilado se obtuvo a partir de colmenas sanas pertenecientes a la sección Apicultura de INIA La Estanzuela y fue utilizado para la realización de tortas de medio kilo de polen y jarabe de sacarosa al 50%. Durante la primavera y el verano de 2014 se preparó el apiario experimental que, en marzo de 2015, se trasladó hacia una plantación de *E. grandis* ubicada en el departamento de Rivera. Las colmenas estandarizadas se dividieron en dos grupos experimentales: el grupo control (M) no recibió suplementación durante el transcurso del ensayo, mientras que el segundo grupo (P) de colmenas se suplementó con medio kilo de polen cada 15 días durante el período de floración del monte. En cada visita (cada 15 días) se estimaron la fortaleza de las colonias y la cantidad de abejas adultas y de cría, y se tomaron muestras de abejas para determinar los niveles de infección con *Nosema* spp., entre otros patógenos (Figura 3). Además, con el objetivo de evaluar las consecuencias de esta suplementación a mediano plazo, se monitoreó la fortaleza de las colmenas y su estado sanitario durante el invierno y la primavera siguiente (Figura 3) (Branchiccela *et al.*, 2019).

¹ <https://wilara.lt/pardutuve/biciu-duoneles-pasalinimo-is-koriu-masinele-spragilas/>

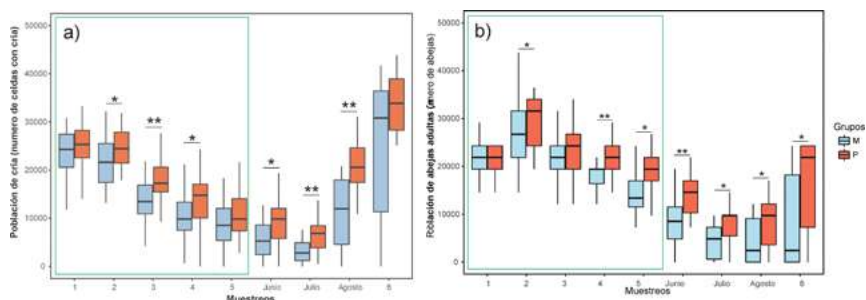
FIGURA 3. DISEÑO EXPERIMENTAL DEL ENSAYO. EFECTO DE LA SUPLEMENTACIÓN CON POLEN POLIFLORAL EN COLONIAS SOMETIDAS A ESTRÉS NUTRICIONAL EN SU FORTALEZA Y ESTADO SANITARIO A CORTO Y MEDIANO PLAZO



Fuente: Elaboración propia.

El polen polifloral ensilado utilizado suministró un buen balance de aminoácidos y un mayor contenido de lípidos, en comparación con el polen monofloral de *E. grandis* disponible en el ambiente. La suplementación con estas tortas de polen polifloral aumentó la población de abejas adultas y de cría durante el período de estrés nutricional (otoño, floración de los montes de *E. grandis*) (Figura 4). Además, cuando las condiciones ambientales fueron favorables, en la primavera siguiente, las colmenas que habían sido suplementadas en el período de estrés nutricional se recuperaron más rápidamente, en comparación con aquellas que no habían sido suplementadas (Figura 4). Asimismo, dicha suplementación disminuyó los niveles de infección con el microsporidio *Nosema* spp., los cuales aumentan sensiblemente en estos ambientes (Figura 5) (Branchiccela *et al.*, 2019).

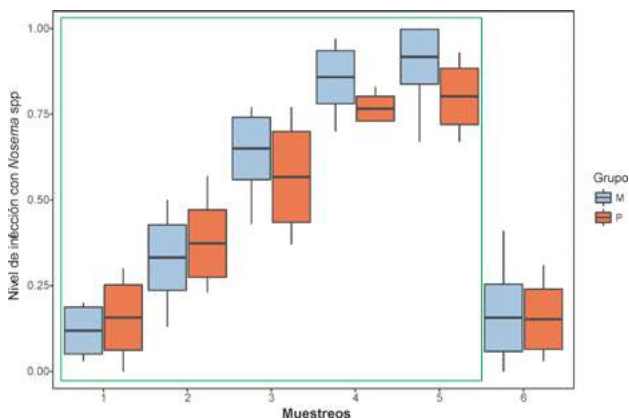
FIGURA 4. POBLACIÓN DE CRÍA (A) Y DE ABEJAS ADULTA (B) DURANTE EL PERÍODO DE ESTRÉS NUTRICIONAL Y A MEDIANO PLAZO



Nota: Se muestran únicamente las diferencias estadísticamente significativas entre el grupo M (control) y P (colmenas suplementadas con polen polifloral) en los distintos muestreos ($p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; *** $p \leq 0.001$). Se resalta con un cuadrado el período de estrés nutricional. Los boxplots indican los datos mínimos, máximos, los percentiles 25 y 75 y la mediana.*

Fuente: Branchiccela et al. (2019).

FIGURA 5. NIVEL DE INFECCIÓN CON *NOSEMA* spp. DE LAS COLONIAS DURANTE EL PERÍODO DE ESTRÉS NUTRICIONAL Y A MEDIANO PLAZO



Nota: Con el objetivo de simplificar la interpretación gráfica, se muestran únicamente las diferencias estadísticamente significativas entre el grupo M (control) y el grupo P (colmenas suplementadas con polen polifloral) en los distintos muestreos ($p \leq 0.05$; ** $p \leq 0.01$; *** $p \leq 0.001$). Se resalta con un cuadrado el período de estrés nutricional. Los boxplots indican los datos mínimos, máximos, la media \pm desvío estándar y la mediana.*

Fuente: Branchiccela et al. (2019).

Estos resultados demuestran que la estrategia propuesta permite, por un lado, mitigar el estrés nutricional generado por el uso intensivo del suelo y la concomitante ausencia de diversidad de recursos nutricionales para las abejas, pero, además, promueve una rápida recuperación de la colonia cuando las condiciones ambientales son favorables para su desarrollo. La estrategia propuesta de utilización del polen colectado y almacenado por las propias abejas implica: i) la optimización del uso de un recurso nutricional natural disponible en exceso en ciertas épocas del año y que bajo ciertas condiciones mitiga deficiencias nutricionales que pueden surgir en otras épocas del año, y ii) la posibilidad de evitar la utilización de productos exógenos a la colmena como pueden ser harinas y levaduras para mitigar un estrés nutricional generado por el uso intensivo del suelo mediante monocultivos.

3. Mitigación del estrés sanitario de las abejas melíferas

El principal problema sanitario para las abejas *A. mellifera* es el ácaro *V. destructor*. Este ácaro se encuentra distribuido en todo el territorio nacional (Anido *et al.*, 2016) y, si bien se han reportado poblaciones de abejas melíferas tolerantes y resistentes a la infección con *V. destructor* (Locke, 2016), la mayoría de las colonias deben recibir tratamientos para el control del ácaro y su propia supervivencia. Existen cuatro productos sintéticos efectivos para el control de *V. destructor*: el organofosforado cumafós, la formamida amitraz y los piretroides tau-fluvalinato y flumetrina (Rosenkranz *et al.*, 2010). La eficacia de estos productos es superior al 95% (Rosenkranz *et al.*, 2010), pero la creciente aparición de poblaciones de ácaros resistentes a estos principios activos limita su uso (Bogdanov *et al.*, 2002). Por otro lado, existen productos orgánicos para el control del ácaro, como el ácido oxálico (entre otros) (Rosenkranz *et al.*, 2010). Estos productos permiten controlar las poblaciones en épocas de ingreso de néctar, ya que no dejan residuos en las colmenas (Bogdanov *et al.*, 2002), pero su eficacia varía debido a diversos factores como ser su modo de aplicación, la presencia de cría y variables ambientales (Rademacher y Hrazar, 2006). En particular en Uruguay, se han reportado poblaciones de ácaros resistentes a cumafós, tau-fluvalinato y flumetrina (Maggi *et al.*, 2011; Mitton *et al.*, 2016), por lo que, por el momento, el único producto sintético confiable es el amitraz. Teniendo en cuenta estos antecedentes, en los últimos años los apicultores han co-

menzado a utilizar un nuevo producto basado en ácido oxálico en tiras de celulosa, con alta eficacia para el control de Varroa (Aluén CAP® o Varroxxan) (Maggi *et al.*, 2016; Cooperativa Apícola Pampero, 2019). Esta formulación supone una gran ventaja respecto de las técnicas tradicionalmente aplicadas (goteo, asperjado sobre las abejas o sublimación), ya que, debido a su presentación en tiras de celulosa, puede permanecer en la colonia por períodos prolongados, abarcando varios ciclos reproductivos de *V. destructor*. Por lo tanto, todos los ácaros en etapa reproductiva son expuestos al producto, lo cual aumenta la estabilidad y la eficacia del control. Además, es una herramienta muy atractiva ya que es fácil de aplicar, tiene bajo costo, no genera problemas de contaminación en la miel pues es un componente natural de esta y tiene bajas probabilidades de generar resistencias.

Teniendo en cuenta las ventajas de este producto, en comparación con un producto sintético, en los últimos años el uso de Varroxxan se ha incrementado en el sector apícola uruguayo. Sin embargo, no existen evaluaciones de su eficacia ni de los factores que la afectan a nivel nacional.

A continuación, se presentarán dos trabajos realizados por el INIA para evaluar la eficacia de la aplicación del ácido oxálico embebido en glicerina en tiras de celulosa (Varroxxan) en dos épocas diferentes del año, y un tercer trabajo orientado a monitorear las consecuencias del tratamiento continuo con este producto durante un año en los niveles de infestación con *V. destructor*, en la dinámica poblacional de las colmenas tratadas y en su productividad. En los tres estudios, el producto fue aplicado según las recomendaciones del fabricante.

El primer ensayo tuvo como objetivo evaluar la eficacia del Varroxxan aplicado en otoño. Para esto, en mayo de 2017 se instaló un apiario de 21 colmenas estandarizadas en cuanto a población y niveles de infestación con *V. destructor* en el INIA La Estanzuela, el cual se dividió en un grupo control de 11 colmenas y un grupo de 10 colmenas al que se le aplicó el tratamiento (4 tiras cada 10 marcos cubiertos por abejas). En forma previa a la aplicación del tratamiento, a los 15 días de su aplicación y a los 41 días (fin del tratamiento), se monitorearon los niveles de infestación con el ácaro sobre las abejas, y durante el transcurso del ensayo se cuantificaron las Varroas caídas muertas en pisos técnicos. Luego de finalizado el tratamiento, se aplicó un *shock* químico (amitraz y flumetrina) para cuantificar el número de ácaros sobrevivientes, colectándolos en los pisos técnicos. Además, con el objetivo de evaluar los efectos agudos del producto sobre las abejas, se cuantificó el número de abejas muertas utilizando trampas de mortalidad (Porrini *et al.*, 2002).

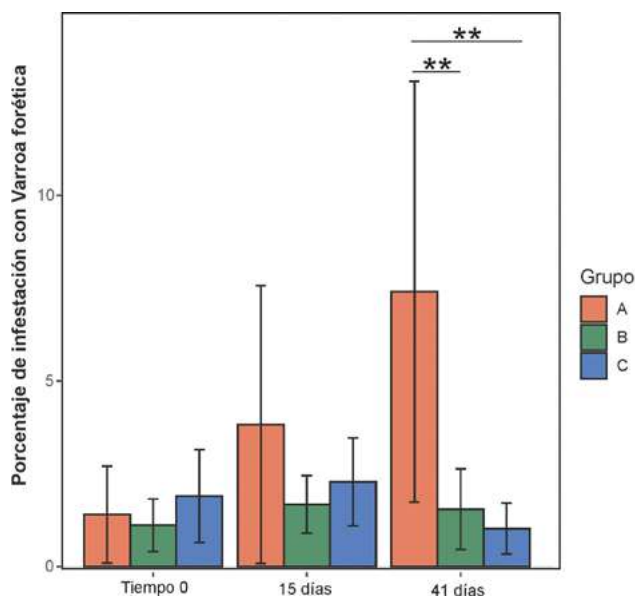
Al inicio del ensayo, las colmenas tenían un porcentaje de infestación de $2,9 \pm 2,2\%$, mientras que a los 41 días de aplicado el Varroxsan, el porcentaje de infestación de las colonias tratadas fue de $0,1 \pm 0,2\%$ y el de las colmenas del grupo control fue de $4,0 \pm 2,1\%$. Teniendo en cuenta la cantidad de Varroas caídas en los pisos técnicos por efecto del Varroxsan y del *shock* químico, se estimó una eficacia del producto en $96,7 \pm 1,6\%$. Por otro lado, el producto no resultó tóxico para las abejas, ya que la mortalidad de estas fue similar para ambos grupos de colmenas. Por lo tanto, la utilización del Varroxsan resultó útil y eficaz en el control de *V. destructor*, aplicado en otoño y bajo las condiciones de este estudio, no observándose toxicidad aguda para las abejas.

El propósito del segundo ensayo fue evaluar la eficacia del Varroxsan aplicado en primavera. Además, teniendo en cuenta que en ocasiones las tiras de cartón son roídas por las abejas, se evaluó la eficacia de recurrar las colmenas a los 20 días de aplicado el tratamiento para el control del ácaro con la mitad de la dosis recomendada. Para esto, en septiembre de 2019 se instaló un apiario de 30 colmenas estandarizadas en cuanto a población y niveles de infestación con *V. destructor* en el INIA La Estanzuela. Dicho apiario se dividió en tres grupos de 10 colmenas cada uno: un grupo control (A) que no recibió tratamiento, un grupo B que se trató al inicio del ensayo según las indicaciones del fabricante (4 tiras cada 10 marcos cubiertos por abejas), y un grupo C tratado de igual manera al inicio del ensayo y al que se le reforzó la cura a los 20 días aplicando 2 tiras por colmena. De igual modo que en el ensayo realizado en otoño, previamente a la aplicación del tratamiento, a los 15 días de su aplicación y a los 41 días (fin del tratamiento) se monitorearon los niveles de infestación con el ácaro sobre las abejas, y durante el transcurso del ensayo se cuantificaron las Varroas caídas muertas en pisos técnicos. Luego de finalizado el tratamiento, se aplicó un *shock* químico (amitraz y flumetrina) para cuantificar el número de ácaros sobrevivientes, colectándolos en los pisos técnicos. Además, con el objetivo de evaluar los efectos agudos del producto sobre las abejas, se cuantificó el número de abejas muertas utilizando trampas de mortalidad (Porrini *et al.*, 2002).

Al inicio del ensayo, el porcentaje de infestación promedio era de $1,5 \pm 1,4\%$. A los 41 días de aplicado el tratamiento, las colmenas del grupo A (control) presentaron un nivel de infestación del $7,4 \pm 5,6\%$, las colmenas del grupo B (tratamiento con Varroxsan al inicio del ensayo) evidenciaron niveles del $1,5 \pm 1\%$, mientras que los niveles de las colmenas del grupo C (tratamiento con Varroxsan al inicio del ensayo + una recura parcial a los 20 días de la primera aplicación) fueron del $1,0 \pm 0,7\%$ (Fi-

gura 6). La eficacia del tratamiento del grupo B fue del 70%, mientras que en las colmenas del grupo C fue del 84%, siendo la eficacia en este último grupo significativamente mayor a la del grupo B. El análisis de la eficacia acumulada del producto a lo largo del tiempo para ambos grupos de colmenas indica que el producto es activo principalmente durante los primeros 25 días, dentro de la colmena, período durante el cual eliminó el 57% de las Varroas de las colmenas del grupo B y el 70% de los ácaros de las colmenas del grupo C (Figura 7). Por otro lado, así como en el ensayo realizado en otoño, la mortalidad de las abejas fue similar en los tres grupos de colmenas al día 1, 8 y 15 posaplicación inicial, demostrando que el producto no resultó tóxico para ellas. Asimismo, no se observaron diferencias estadísticamente significativas en la cantidad de abejas adultas y de cría entre las colmenas de los distintos grupos experimentales (datos no mostrados).

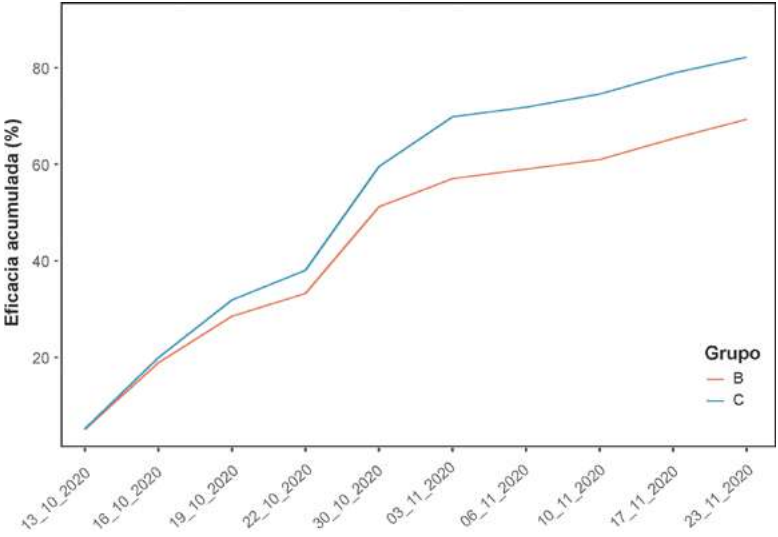
FIGURA 6. PORCENTAJE DE INFESTACIÓN CON VARROA FORÉTICA A TIEMPO 0 (PREVIO A LA APLICACIÓN DEL TRATAMIENTO), A LOS 15 DÍAS Y A LOS 41 DÍAS (FINAL DEL ENSAYO)



Nota: * $p \leq 0.01$; A: grupo control; B: grupo de colmenas tratadas con Varroxsan al inicio del ensayo; C: grupo de colmenas tratadas con Varroxsan al inicio del ensayo + un tratamiento parcial de la dosis recomendada a los 20 días de la primera aplicación.

Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 7. EFICACIA ACUMULADA (EN %) A LO LARGO DEL TIEMPO DE VARROXSAN PARA LAS COLMENAS DE LOS GRUPOS B (TRATADAS CON VARROXSAN AL INICIO DEL ENSAYO) Y C (TRATADAS CON VARROXSAN AL INICIO DEL ENSAYO + UN TRATAMIENTO PARCIAL DE LA DOSIS RECOMENDADA A LOS 20 DÍAS DE LA PRIMERA APLICACIÓN)



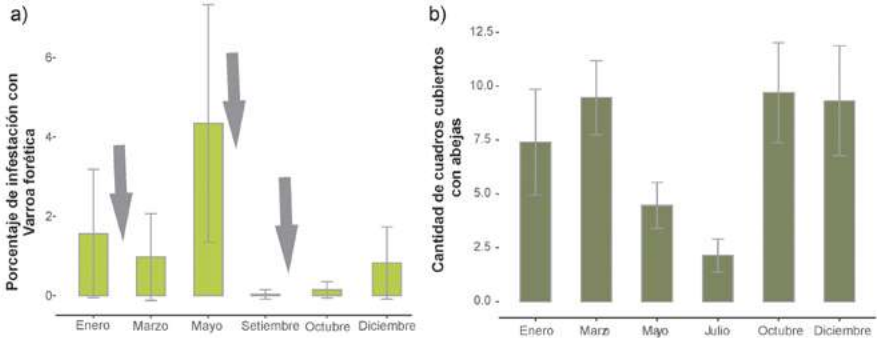
Fuente: Elaboración propia.

Estos resultados indican que, en primavera y en las condiciones evaluadas en estos ensayos, el Varroxxsan es eficiente para el control de *V. destructor*, pero su eficacia no alcanza las reportadas para los productos sintéticos (superior al 95%). Sin embargo, teniendo en cuenta la época del año y el consecuente desarrollo colonial, constituye un producto sumamente útil para limitar el crecimiento de las poblaciones de este ácaro, bajo estricto monitoreo a mediano plazo.

La tercera experiencia llevada a cabo desde el INIA se encuentra aún en transcurso y tiene como objetivo monitorear la fortaleza, la sanidad y la productividad de un apiario tratado en forma exclusiva con Varroxxsan. Para esto, en noviembre de 2019 se instaló en el INIA La Estanzuela un apiario de 30 colmenas con reinas jóvenes y emparentadas genéticamente. En diciembre, estas colmenas recibieron su primera cura con el producto y durante todo el año 2020 se tomaron muestras de abejas nodrizas para determinar los niveles de infestación con el ácaro,

en función de las cuales se fueron aplicando los tratamientos sucesivos. Se registró la población de abejas adultas y durante la temporada siguiente se registró la producción de miel del apiario y de material vivo. En total, las colmenas se trataron con Varroxxsan en diciembre, enero, junio y setiembre, y según la dosis recomendada por el fabricante. Los niveles de infestación variaron ampliamente durante el año: fueron en promedio de 1,3% entre enero y marzo, pese a la aplicación del tratamiento. Si bien este resultado puede dar idea de una baja eficacia, esto puede deberse al crecimiento poblacional de la colonia en esta época del año y al consecuente incremento en la reproducción del ácaro. En estas circunstancias, el tratamiento evitó un crecimiento explosivo de los niveles de infestación con *V. destructor* (Figura 8). Por otro lado, si bien es esperable una disminución natural en la población de abejas hacia el invierno (mayo y junio), los valores encontrados fueron excesivamente bajos, posiblemente debido a los altos niveles de infestación con el ácaro en mayo (Figura 8). Estos resultados demuestran que la aplicación del tratamiento debe realizarse en marzo a más tardar, previamente al descenso poblacional, de forma que la proporción de ácaros/abejas disminuya, o por lo menos se mantenga constante en la época menos favorable para las abejas. Por último, el tratamiento realizado en setiembre permitió mantener las poblaciones del ácaro en niveles bajos en esta época del año. En términos productivos, las colmenas produjeron en promedio 26 kg de miel por colmena en la cosecha 2020-2021 y material vivo para 18 núcleos. Por otro lado, murió el 26% de las colmenas del apiario, valor que se encuentra dentro del rango de pérdidas de colmenas anuales para nuestro país (20-30%) (Antúnez *et al.*, 2016). Las consecuencias de estos manejos y los subsiguientes a realizar serán determinantes para estimar los efectos del uso de este producto de forma continua a nivel comercial.

FIGURA 8. PORCENTAJE DE INFESTACIÓN CON *VARROA DESTRUCTOR* DE ABEJAS NODRIZAS (A) Y DE UNA POBLACIÓN DE ABEJAS ADULTAS ESTIMADA COMO CANTIDAD DE CUADROS CUBIERTOS CON ABEJAS (B) DE UN APIARIO DE OBSERVACIÓN TRATADO TODO EL AÑO CON TRATAMIENTO ORGÁNICO VARROXSAN PARA EL CONTROL DEL ÁCARO (DURANTE EL AÑO 2019)



Nota: Las flechas indican el momento de aplicación del tratamiento.

Fuente: Elaboración propia.

En su conjunto, los resultados obtenidos en los últimos años a partir del uso del ácido oxálico en glicerina (Varroxsan) demuestran que es posible mantener vivas las poblaciones de abejas melíferas mediante el uso continuo de un producto orgánico, obteniendo niveles de infestación dentro de rangos normales en nuestro país. Teniendo en cuenta, además, los costos de los distintos productos, esta estrategia equipara económicamente e incluso se encuentra por debajo de los costos del uso de productos sintéticos. Sin embargo, considerando que se trata de un producto nuevo y cuyo modo de acción aún se desconoce, es necesario continuar con los monitoreos a mediano y largo plazo, así como analizar las variables que pueden afectar la eficacia del producto y las medidas complementarias que contribuyan a optimizarla.

4. Aportes para una transición agroecológica en apicultura

En el presente capítulo se plantean dos estrategias para mitigar el estrés nutricional y sanitario de las abejas melíferas, dos de los principales problemas asociados a las pérdidas de colmenas. El uso adecuado y racional de estas estrategias permite un manejo de las colmenas con perspectiva

agroecológica, ya que disminuyen el uso de químicos en las colmenas y la dependencia de insumos externos para su alimentación. De esta forma, la mitigación del estrés nutricional y sanitario previamente mencionado promueve una reducción de las pérdidas de colmenas y un aumento en la expectativa de vida de los individuos, y favorece el potencial polinizador de esta especie y su consecuente impacto en los ecosistemas.

Bibliografía

Alaux, C., Dantec, C., Parrinello, H. y Le Conte, Y.

(2011), “Nutrigenomics in honey bees: Digital gene expression analysis of pollen’s nutritive effects on healthy and varroa-parasitized bees”, en *BMC Genomics*, 12, p. 496.

Alaux, C., Ducloz, F., Crauser, D. y Le Conte, Y.

(2010), “Diet effects on honeybee immunocompetence”, en *Biol. Lett.*, 6, pp. 562-565.

Amdam, G. V. y Omholt, S. W.

(2002), “The regulatory anatomy of honeybee lifespan”, en *J. Theor. Biol.*, N° 216, pp. 209-228.

Anderson, K. E., Carroll, M. J., Sheehan, T., Mott, B. M., Maes, P. y Corby-Harris, V.

(2014), “Hive-stored pollen of honey bees: Many lines of evidence are consistent with pollen preservation, not nutrient conversion”, en *Mol. Ecol.*, 23, pp. 5904-5917.

Anido, M., Branchiccela, B., Castelli, L., Harriet, J., Campá, J., Zunino, P. y Antúnez, K.

(2016), “Prevalence and distribution of honey bee pathogens in Uruguay”, en *J. Apic. Res.*, 54, pp. 532-540.

Antúnez, K., Invernizzi, C., Mendoza, Y., VanEngelsdorp, D. y Zunino, P.

(2016), “Honeybee colony losses in Uruguay during 2013–2014”, en *Apidologie*, 2014, pp. 1-7.

Beaurepaire, A., Piot, N., Doublet, V., Antunez, K., Campbell, E., Chantawannakul, P., Chejanovsky, N., Gajda, A., Heerman, M., Panziera, D., Smaghe, G., Yañez, O., De Miranda, J. R. y Dalmon, A.

(2020), “Diversity and global distribution of viruses of the western honey bee”, *Apis mellifera. Insects.*, 11, p. 239.

Bogdanov, S., Charrière, J. P., Imdorf, A., Kilchenmann, V. y Fluri, P.

(2002), “Determination of residues in honey after treatments with formic and oxalic acid under field conditions”, en *Apidologie*, 33, pp. 399-409.

Bowen-Walker, P. y Gunn, A.

(2001), “The effect of the ectoparasitic mite, *Varroa destructor* on adult worker

honeybee (*Apis mellifera*) emergence weights, water, protein, carbohydrate, and lipid levels”, en *Entomol. Exp. Appl.*, 101, pp. 207-217.

Bowen-Walker, P., Martin, S. y Gunn, A.

(1999), “The transmission of deformed wing virus between honeybees (*Apis mellifera* L.) by the ectoparasitic mite *Varroa jacobsoni* Oud”, en *J. Invertebr. Pathol.*, 73, pp. 101-6.

Branchiccela, B., Antúnez, K., Invernizzi, C. y Coll, F.

“Apicultura en montes de *Eucalyptus* spp.”, en *Rev. INIA*, 62, pp. 60-72.

Branchiccela, B., Castelli, L., Corona, M., Díaz-Cetti, S., Invernizzi, C., Martínez de la Escalera, G., Mendoza, Y., Santos, E., Silva, C., Zunino, P. y Antúnez, K.

(2019), “Impact of nutritional stress on the honeybee colony health”, en *Sci. Rep.*, 9, 10156.

Brodshneider, R. y Crailsheim, K.

(2010), “Nutrition and health in honey bees”, en *Apidologie*, 41, pp. 278-294.

Brodshneider, R., Gray, A., Van der Zee, R., Adjlane, N., Brusbardis, V., Charrière, J. D., Chlebo, R., Coffey, M. F., Crailsheim, K., Dahle, B., Danihlík, J., Danneels, E., De Graaf, D. C., Dražić, M. M., Fedoriak, M., Forsythe, I., Golubovski, M., Gregorc, A., Grzęda, U., Hubbuck, I., İvgin Tunca, R., Kauko, L., Kilpinen, O., Kretavicius, J., Kristiansen, P., Martikkala, M., Martín-Hernández, R., Mutinelli, F., Peterson, M., Otten, C., Ozkirim, A., Raudmets, A., Simon-Delso, N., Soroker, V., Topolska, G., Vallon, J., Vejsnæs, F. y Woehl, S.

(2016), “Preliminary analysis of loss rates of honey bee colonies during winter 2015/16 from the COLOSS survey”, en *J. Apic. Res.*, 55, pp. 375-378.

Carreck, N., Ball, B. V. y Martin, S.

(2010), “Honey bee colony collapse and changes in viral prevalence associated with *Varroa destructor*”, en *J. Apic. Res.*, 49, pp. 93-94.

Carreck, N. y Neumann, P.

(2010), “Honey bee colony losses”, en *J. Apic. Res.*, 49, p. 1.

Castelli, L.

(2017), *Una aproximación al estudio de la comunidad microbiana de las abejas melíferas*, Tesis de Maestría en Ciencias Biológicas, PEDECIBA, Universidad de la República, Montevideo.

Chauzat, M.-P., Laurent, M., Riviere, M.-P., Saligeon, C., Hendrikx, P. y Ribiere-Chabert, M.

(2014), “A pan European epidemiological study on honeybee colony losses”.

Chen, Y., Pettis, J., Evans, J., Kramer, M. y Feldlaufer, M.

(2004), “Transmission of Kashmir bee virus by the ectoparasitic mite *Varroa destructor*”, en *Apidologie*, 35, pp. 441-448.

Cooperativa Apícola Pampero

(2019), “Dosificación de Aluen Cap®”.

Crane, E.

(1990), *Bees and beekeeping: science, practice and world resources*, Heinemann Newnes, Oxford.

Dainat, B., Evans, J. D., Chen, Y. P., Gauthier, L. y Neumann P.

(2012), "Dead or alive: Deformed wing virus and *Varroa destructor* reduce the life span of winter honeybees", en *Appl. Environ. Microbiol.*, 78, pp. 981-987.

DeGrandi-Hoffman, G. y Chen, Y.

(2015), "Nutrition, immunity and viral infections in honey bees", en *Curr. Opin. Insect Sci.*, 10, pp. 170-176.

DeGrandi-Hoffman, G., Chen, Y., Rivera, R., Carroll, M., Chambers, M., Hidalgo, G. y de Jong, E. W.

(2016), "Honey bee colonies provided with natural forage have lower pathogen loads and higher overwinter survival than those fed protein supplements", en *Apidologie*, 47, pp. 186-196.

De Groot, A. P.

(1953), "Protein and amino acid requirements of the honey bee (*Apis mellifera* L.)", en *Physiol. Comp. oecologia*, 3, pp. 197-285.

De Jong, D., Da Silva, E. J., Kevan, P. G. y Atkinson, J. L.

(2009), "Pollen substitutes increase honey bee haemolymph protein levels as much as or more than does pollen", en *J. Apic. Res.*, 48, pp. 34-37.

De Jong, D., De Jong, P. y Gonçalves, L. S.

(1982), "Weight loss and other damage to developing worker honeybees from infestation with *V. jacobsoni*", en *J. Apic. Res.*, 21, pp. 165-216.

De Miranda, J. R.; y Genersch, E.

(2010), "Deformed wing virus", en *J. Invertebr. Pathol.*, 103, S48-S61.

Di Pasquale, G., Salignon, M., Le Conte, Y., Belzunces, L. P., Decourtye, A., Kretzschmar, A., Suchail, S., Brunet, J. L. y Alaux, C.

(2013), "Influence of pollen nutrition on honey bee health: do pollen quality and diversity matter?", en *PLoS One*, 8, pp. 1-13.

Fries, I., Feng, F., Da Silva, A., Slemenda, S. B. y Pieniazek, N. J.

(1996), "Nosema ceranae n. sp. (Microspora, Nosematidae), morphological and molecular characterization of a microsporidian parasite of the Asian honey bee *Apis cerana* (Hymenoptera, Apidae)", en *Eur. J. Protistol.*, 32, pp. 356-365.

Goulson, D., Nicholls, E., Botías, C. y Rotheray, E. L.

(2015), "Bee declines driven by combined Stress from parasites, pesticides, and lack of flowers", en *Science*, (80), 347, 1255957.

Gray, A., Brodschneider, R., Adjlane, N., Ballis, A., Brusbardis, V., Charrière, J. D., Chlebo, R., Coffey, M. F., Cornelissen, B., Amaro da Costa, C., Csáki, T., Dahle, B., Danihlík, J., Dražić, M. M., Evans, G., Fedoriak, M., Forsythe, I., De Graaf, D., Gregorc, A., Johannsen, J., Kauko, L., Kristiansen, P., Martikkala, M., Martín-Hernández, R., Medina-Flores, C. A., Mutinelli, F., Patalano, S., Petrov, P.,

Raudmets, A., Ryzhikov, V. A., Simon-Delso, N., Stevanovic, J., Topolska, G., Uzunov, A., Vejsnaes, F., Williams, A., Zammit-Mangion, M. y Soroker, V.

(2019), "Loss rates of honey bee colonies during winter 2017/18 in 36 countries participating in the COLOSS survey, including effects of forage sources", en *J. Apic. Res.*, 0, pp. 1-7.

Haydak, M. H.

(1970), "Honey Bee Nutrition", en *Annu. Rev. Entomol.*, N° 15, pp. 143-156.

Higes, M., Martín-Hernández, R. y Meana, A.

(2006), "*Nosema ceranae*, a new microsporidian parasite in honeybees in Europe", en *J. Invertebr. Pathol.*, 92, pp. 93-95.

Jankielsohn, A.

(2018), "The importance of insects in agricultural ecosystems", en *Adv. Entomol.*, 06, pp. 62-73.

Klein, A. M., Vaissière, B. E., Cane, J. H., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S. A., Kremen, C. y Tscharrntke T.

"Importance of pollinators in changing landscapes for world crops", en *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, N° 274, pp. 303-313.

Kulhanek, K., Steinhauer, N., Rennich, K., Caron, D. M., Sagili, R. R., Pettis, J. S., Ellis, J. D., Wilson, M. E., Wilkes, J. T., Tarpy, D. R., Rose, R., Lee, K., Rangel, J. y VanEngelsdorp, D.

(2017), "A national survey of managed honey bee 2015–2016 annual colony losses in the USA", en *J. Apic. Res.* 56, pp. 328-340.

Locke, B.

(2016), "Natural Varroa mite-surviving *Apis mellifera* honeybee populations", en *Apidologie*, 47, pp. 467-482.

Maggi, M. D., Ruffinengo, S. R., Mendoza, Y., Ojeda, P., Ramallo, G., Floris, I. y Eguaras, M. J.

"Susceptibility of *Varroa destructor* (Acari: Varroidae) to synthetic acaricides in Uruguay: Varroa mites' potential to develop acaricide resistance", en *Parasitol. Res.*, 108, pp. 815-821.

Maggi, M., Tourn, E., Negri, P., Szawarski, N., Marconi, A., Gallez, L., Medici, S., Ruffinengo, S., Brasco, C., De Feudis, L., Quintana, S., Sammataro, D. y Eguaras, M.

"A new formulation of oxalic acid for *Varroa destructor* control applied in *Apis mellifera* colonies in the presence of brood", en *Apidologie*, 47, pp. 596-605.

Martin, S. J., Highfield, A. C., Brettell, L., Villalobos, E. M., Budge, G. E., Powell, M., Nikaido, S. y Schroeder, D. C.

(2012), "Global honey bee viral landscape altered by a parasitic mite", en *Science*, (80), 336, pp. 1304-1306.

Mattila, H. R. y Otis, G. W.

(2006), "Influence of pollen diet in spring on development of honey bee (Hymenoptera: Apidae) colonies", en *J. Econ. Entomol.*, 99, pp. 604-613.

McGregor, S. E.

(1976), "Insect pollination of cultivated crop plants", en *Usda*, 849.

MGAP

(2019), "Anuario estadístico agropecuario 2019" (2019). Disponible en: <<http://www.mgap.gub.uy/unidad-organizativa/oficina-de-programacion-y-politicas-agropecuarias/publicaciones/anuarios-diea/anuario-estadístico-de-diea-2019>>.

Milani, N.

(1999), "The resistance of *Varroa jacobsoni*", en *Oud. to acaricides*, 30, pp. 229-234.

Mitton, G. A., Quintana, S., Giménez Martínez, P., Mendoza, Y., Ramallo, G., Brasesco, C., Villalba, A., Eguaras, M. J., Maggi, M. D. y Ruffinengo, S. R.

(2016), "First record of resistance to flumethrin in a varroa population from Uruguay", en *J. Apic. Res.*, 55, pp. 422-427.

Morse, R. y Calderone, N. W.

(2000), "The value of honey bees as pollinators of U. S. Crops", en *Bee Cult.*, pp. 1-15.

Naug, D.

(2009), "Nutritional stress due to habitat loss may explain recent honeybee colony collapses", en *Biol. Conserv.*, en 142, pp. 2369-2372.

Porrini, C., Ghini, S., Girotti, S., Sabatini, A. G., Gattavecchia, E. y Celli, G.

(2002), *Honey Bees: Estimating the environmental impact of chemicals*, p. 332.

Potts, S. G., Biesmeijer, J. C., Kremen, C. Neumann, P., Schweiger, O. y Kunin, W. E.

(2010), "Global pollinator declines: trends, impacts and drivers", en *Trends Ecol. Evol.*, 25, pp. 345-353.

Potts, S. G., Imperatriz-Fonseca, V. L., Ngo, H. T., Biesmeijer, J. C., Breeze, T. D., Dicks, L. V., Garibaldi, L. A., Hill, R., Settele, J., Vanbergen, A. J., Aizen, M. A., Cunningham, S. A., Eardley, C., Freitas, B. M., Gallai, N., Kevan, P. G., Kovács-Hostyánszki, A., Kwapong, P. K., Li, J., Li, X., Martins, D. J., Nates-Parra, G., Pettis, J. S. y Rader, B. F. V. R.

(2016), "Summary for policymakers of the assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production", Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn (Alemania).

Rademacher, E. y Hrarz, M.

(2006), "Oxalic acid for the control of varroosis in honey bee colonies - a review", en *Apidologie*, 37, pp. 98-120.

Ramsey, S. D., Ochoa, R., Bauchan, G., Gulbranson, C., Mowery, J. D., Cohen, A., Lim, D., Joklik, J., Cicero, J. M., Ellis, J. D., Hawthorne, D. y Van Engelsdorp, D.

(2019), "*Varroa destructor* feeds primarily on honey bee fat body tissue and not hemolymph", en *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 116, pp. 1792-1801.

Requier, F., Antunez, K., Morales, C., Aldea, P., Castilhos, D., Garrido, P. M., Giacobino, A., Reynaldi, F., Rosso Londono, J. M., Santos, E. y Garibaldi, L.

(2018), "Trends in beekeeping and honey bee colony losses in Latin America", en *J. Apic. Res.*

Rosenkranz, P., Aumeier, P. y Ziegelmann, B.

(2010), "Biology and control of *Varroa destructor*", en *J. Invertebr. Pathol.*, 103, S96-S119.

Saffari, A., Kevan, P. G. y Atkinson, J. L.

(2010), "Palatability and consumption of patty-formulated pollen and pollen substitutes and their effects on honeybee colony performance", en *J. Apic. Sci.*, 54, pp. 63-71.

Santos, E., Mendoza, Y., Díaz, R., Harriet, J. y Campá, J.

(2009), "Valor económico de la polinización realizada por abejas *Apis mellifera* en Uruguay, una aproximación", en *Ser. difusión INIA*, 568, pp. 25-28.

SINATPA

(2020), "Informe de datos del Registro Nacional de Propietarios de colmenas 2020".

Smith, K. M., Loh, E. H., Rostal, M. K., Zambrana-Torrelío, C. M., Mendiola, L. y Daszak, P.

(2013), "Pathogens, Pests, and Economics: Drivers of Honey Bee Colony Declines and Losses", en *Ecohealth*, 10, pp. 434-445.

Somerville, D. C.

(2001), "Nutritional value of bee collected pollens", en *Rural Ind. Res. Dev. Corp.*, pp. 1-166.

Steinhauer, N., Kulhanek, K., Antúnez, K., Human, H., Chantawanakul, P., Chauzat, M. P. y VanEngelsdorp, D.

(2018), "Drivers of colony losses", en *Curr. Opin. Insect Sci.*, 26, pp. 142-148.

VanEngelsdorp, D. y Meixner, M. D.

(2010), "A historical review of managed honey bee populations in Europe and the United States and the factors that may affect them", en *J. Invertebr. Pathol.*, 103, S80-S95.

Yang, X. y Cox-Foster, D. L.

(2007), "Effects of parasitization by *Varroa destructor* on survivorship and physiological traits of *Apis mellifera* in correlation with viral incidence and microbial challenge", en *Parasitology*, 134, pp. 405-412.

Capítulo 24

TIC para sistemas agropecuarios más sostenibles

Guadalupe Tiscornia, Adrián Cal y Juan Manuel Soares de Lima

1. Introducción

El término “tecnologías de la información y comunicación (TIC)” se refiere a todas las tecnologías de la comunicación, incluyendo Internet, redes inalámbricas, teléfonos celulares, computadoras, *software*, videoconferencias, redes sociales, y otras aplicaciones y servicios de medios que permiten a los usuarios acceder, recuperar, almacenar, transmitir y manipular información en forma digital. También alude a la convergencia de la tecnología de los medios como audiovisual y redes telefónicas con redes de computadoras. Sin embargo, no existe una definición universalmente aceptada de TIC, teniendo en cuenta que los conceptos, métodos y herramientas involucrados en las TIC están evolucionando diariamente (Agricultural Information Management Standards, 2020).

Es evidente, en los últimos años, la inserción de las TIC en todos los órdenes de la vida y el sector agropecuario no es ajeno a esto. A nivel mundial, distintas tecnologías y mejoras en el procesamiento de datos se han venido incorporando al sector, con beneficios en distintas dimensiones. En el sector agropecuario, el uso de TIC permite el desarrollo de soluciones para abordar cuestiones como seguridad alimentaria, nutrición y agricultura sostenible. A través del uso de las TICs se han logrado innovaciones en los servicios de asesoramiento a los agricultores, análisis de precios del mercado de valores y productos básicos, recopilación de datos meteorológicos, sistemas de alerta temprana, servicios financieros, trazabilidad de productos agrícolas y recopilación de datos estadísticos agrícolas, entre otros.

1.1. A nivel global

El uso de TIC en agro también se conoce con el término e-Agricultura. En 2007, la FAO y un grupo de socios lanzaron la Comunidad de e-Agricultura,¹ la cual es un espacio que busca facilitar el intercambio de conocimiento y experiencias en proyectos donde se haya usado TIC para agricultura y desarrollo rural. Actualmente, la Comunidad de e-Agricultura cuenta con más de 15.000 miembros de más de 170 países (FAO, 2015).

Hay ejemplos de uso de TIC para cadenas de valor que buscan alentar el intercambio de información entre pequeños agricultores, expertos y tomadores de decisión. A modo de ejemplo, en Colombia está la Red de Información y Comunicación del Sector Agropecuario de Colombia (AGRONET).² Se trata de una red descentralizada que propone proveer a pequeños agricultores y tomadores de decisión información concisa, apropiada y estratégica sobre nuevas tecnologías, para producción sostenible y diversidad de cultivos en pos de incrementar la productividad y las oportunidades de mercado. La red se conforma de varias bases de datos y brinda herramientas de inteligencia de negocios y análisis de datos (FAO, 2015).

También se han desarrollado herramientas TIC para el manejo del riesgo, cuyo ejemplo es la Red de Estaciones Meteorológicas (REM) de Argentina. Esta es una red de estaciones meteorológicas automáticas creada por la Universidad de La Punta, que provee información en tiempo real acerca de la provincia de San Luis. Esta red facilita los pronósticos, a la vez que se crea una base de datos. Está siendo usada por la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica) estadounidense (FAO, 2015). En Argentina, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) desarrolló una plataforma dedicada a fruticultura de precisión llamada FRUTIC,³ que proporciona una guía para el manejo de plagas por los agricultores. El sistema combina información de estados fenológicos, presencia de plagas y enfermedades, datos de estaciones meteorológicas. A partir de estos se generan modelos de impacto de pestes y enfermedades, y se suministran recomendaciones a los productores (Palmer, s. f.).

1 <<http://www.fao.org/e-agriculture/>>.

2 <<https://www.agronet.gov.co/Paginas/inicio.aspx>>.

3 <<https://inta.gob.ar/servicios/frutic-fruticultura-de-precision-0>>.

Hay TIC desarrolladas para suministrar información de precios y mercados, tal es el caso de la plataforma EcoMarketPeru, que conecta consumidores, empresarios y productores orgánicos agroecológicos. La plataforma relaciona a casi 3.000 familias de productores agroecológicos con mercados alternativos (FAO, 2015).

En Estados Unidos, tenemos el caso de la TIC eXtension Initiative,⁴ la cual permite a los agricultores acceder a tecnología y conocimiento agrícola a través de los servicios de extensión (Palmer, s. f.).

Con respecto a las TIC como herramientas económicas, se están desarrollando servicios financiero-móviles que permiten a los agricultores acceder a crédito, transferencia de pagos y acceso a seguros, entre otros. La innovación en TIC juega un rol importante en la producción agropecuaria y las cadenas de valor. Los sistemas de trazabilidad de alimentos que usan las TIC se han vuelto herramientas muy importantes, ya que facilitan el mercadeo y el acceso a mercados, especialmente suministrando información de precios y demanda. Asimismo, estas fortalecen la capacidad de pequeños productores de incrementar sus ganancias mejorando su posicionamiento en mercados locales e internacionales, y reduciendo costos comerciales y de transacción (FAO, 2015).

También, las TIC se han integrado con herramientas de sistema de información geográfica (SIG), de sensoramiento remoto, y tecnologías agrometeorológicas que permiten la planificación del uso de la tierra, pronósticos de cosecha, y sistemas de alertas tempranas, entre otros. A su vez, el uso de teléfonos móviles se ha vuelto muy común para el intercambio de información como vigilancia de enfermedades y seguimiento de plagas. Asimismo, las TIC ofrecen soluciones en etapas posteriores de la cadena de valor, por ejemplo, en poscosecha, transporte y almacenaje (FAO, 2015).

1.2. A nivel nacional

Las características geográficas y el reducido tamaño de Uruguay determinan que la infraestructura digital pueda alcanzar casi todos los rincones del territorio, si bien en muchas regiones la cobertura y/o el ancho de banda pueda ser limitante para determinados fines. Esto determina una

4 <<http://www.extension.org>>.

gran ventaja para el uso de las TIC en el medio rural, al menos como base potencial para su desarrollo y utilización.

En este sentido, en Uruguay existen desarrollos e implementaciones de las TIC aplicados al agro a distintos niveles: servicios de información agroclimática, servicios de información de recursos naturales, producción y comercialización, bioinformática, trazabilidad, gestión, modelos, monitoreos y alertas, y otras tecnologías (Berterreche *et al.*, 2017). A nivel empresarial, son muchas las ofertas existentes de sistemas de gestión y manejo de información, aunque su adopción por parte de los productores o técnicos es variable.

1.3. A nivel institucional

El INIA viene desarrollando, adaptando e implementando TIC aplicadas a distintos sistemas productivos desde hace varios años. Durante los primeros meses del año 2020 se realizó un relevamiento interno para identificar las distintas iniciativas relacionadas con Agrotic que se estaban llevando adelante en la institución. Como resultado de dicho relevamiento, se identificó que el 75% de los programas o unidades tiene algún relacionamiento con las TIC. Las iniciativas identificadas se categorizaron en: desarrollo de alertas, desarrollos de aplicaciones, automatismos o instalación de sensores. Se identificaron, además, las distintas instancias formales de intercambio interno o externo.

En lo que se refiere a iniciativas desarrolladas o implementadas por el INIA, de las 66 identificadas y categorizadas, la mayor cantidad están relacionadas con el desarrollo de aplicaciones (tanto web como celulares), seguido de la implementación de sensores a nivel de campo. Muchas de estas se llevan adelante en el marco de las actividades de las unidades o los programas de investigación (*software*, aplicaciones web y móviles, sistemas de alerta, etc.).

Son de destacar también los sistemas de información y gestión del conocimiento como los desarrollados por la Unidad GRAS⁵ y las bibliotecas INIA.⁶

5 <<http://www.inia.uy/gras>>.

6 <<http://www.ainfo.inia.uy/consulta/>>.

1.4. Relacionamiento con otros organismos en el área de TIC

El INIA se ha vinculado con otros organismos e instituciones, gracias a lo cual se generan intercambios de información y conocimiento desde sus inicios. Muchos de los productos, herramientas o desarrollos relacionados con las TIC, fueron gestados mediante la colaboración y el relacionamiento interinstitucionales, tanto nacionales como internacionales.

En el año 2015 fue creado, con fondos de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII), un centro tecnológico enfocado en el uso de las TIC en áreas o sectores especialmente relevantes para la economía del país. El centro Information and Communication Technologies for Verticals (ICT4V) fue concebido con el objetivo de alcanzar rápidamente niveles de excelencia en investigación e innovación, y traducir esto en un impacto real sobre los principales retos sociales y objetivos económicos. El término “verticales”, que refiere al conjunto de empresas que aplican tecnología en un determinado sector, como puede ser el agropecuario, enfoca las actividades del centro en el agregado de valor. Teniendo esto en cuenta, el principal objetivo del ICT4V consiste en aumentar significativamente la capacidad de innovación a nivel nacional y regional y aportar a la mejora de la competitividad; contribuir en todas las etapas de los procesos de innovación y jugar un rol importante en el desarrollo de competencias de alto nivel. Busca acercar empresas, institutos de investigación y organismos del Estado a la academia –todas las universidades están representadas–, en pos de crear valor en distintos sectores verticales como el agro, la industria, las finanzas, la salud y la energía, entre otros.⁷

El INIA es socio estructural del ICT4V desde sus inicios –lo que implica la posibilidad de participar en todas las actividades transversales del centro, además de en la gobernanza–, participando en proyectos verticales del agro, y colaborando en consultorías realizadas por el centro, *workshops*, seminarios y otros.

Como ejemplos de actividades llevadas adelante en conjunto con el ICT4V se destacan las Jornadas Uruguayas de Nuevas Tecnologías en el Agro, “Hay campo para las TIC”, llevadas a cabo en septiembre de 2017. En esta jornada se presentaron casos de éxito de la aplicación de las tecnologías de la información y la comunicación en el sector agropecuario

7 <www.ict4v.org/es/conocer/socios>.

y toda su cadena de valor, tanto desde el punto de vista técnico como a partir de sus impactos en la eficiencia, la productividad y la generación de valor y nuevas oportunidades en el sector. En lo que se refiere a proyectos, desde el INIA se ha participado en distintas iniciativas que involucran automatismos (para volver los sistemas más eficientes), mejoras en el acceso a información a través del procesamiento de lenguaje natural (PLN, área de investigación que estudia cómo usar computadoras para entender y manipular el lenguaje natural escrito o hablado) (Chowdhury, 2003), entre otros.

Finalmente, el INIA también participa de distintas instancias formales de relacionamiento e intercambio a nivel nacional, regional y global, lo que enriquece nuestro abordaje de los problemas y la búsqueda de posibles soluciones basadas en TIC aplicadas al sector agropecuario.

2. Situación actual

Para toda la producción agropecuaria, independientemente del tipo, tamaño y sistema de producción, es importante la incorporación de información para la toma de decisiones. Disponer de información, productos o herramientas que ayuden al productor a tomar mejores decisiones sin duda redundan en una optimización de la producción. A nivel internacional, y a modo de ejemplo, en el II Simposio Internacional sobre Agroecología se presentaron dos interesantes herramientas de e-Agricultura: una es un sitio web español llamado CONECT-e, sobre conocimiento ecológico tradicional.⁸ Esta es una plataforma interactiva que recoge y transmite conocimientos tradicionales sobre plantas, animales, hongos, variedades tradicionales de cultivos o ecosistemas. La segunda es una aplicación celular para viticultores, llamada Grape Mundo,⁹ que los apoya en producir uvas libres de residuos para exportación.

Un rol importante que juegan las TIC en la producción agroecológica es el apoyo a la comercialización. Tal es el caso del estudio realizado por Santini y Ghezán (2019), del que surge la importancia de incorporar canales de comercialización específicos para productos agroecológicos, donde los productores se conectan con consumidores locales, con la idea de difundir una alimentación más saludable mediante el uso de TIC.

8 <<https://www.conecte.es/index.php/es/>>.

9 <<https://grapemundo.com/>>.

A nivel nacional, y en lo que respecta a la utilización de TIC en el sector agropecuario, si bien existen distintas propuestas de TIC aplicadas al agro, la adopción está lejos de ser generalizada, dependiendo muchas veces del tamaño y del respaldo financiero de la empresa agropecuaria. En general, dentro de determinado rubro, son las empresas agropecuarias más grandes las que adoptan tecnología, quedando postergados los productores más pequeños. En este sentido, es mucho el trabajo que queda a realizar para difundir y jerarquizar las distintas propuestas y alternativas de TIC, teniendo en cuenta, siempre, los distintos tipos de público objetivo a los cuales se apunta.

En términos generales, los diferentes rubros productivos determinan distintos grados de adopción. En agricultura, una actividad más concentrada en relativamente pocas empresas grandes, el uso de diferentes combinaciones *hard/soft* en lo que se denomina “agricultura de precisión” es ampliamente difundido. La agricultura por ambientes, el monitoreo de cultivos mediante imágenes, el uso altamente extendido de monitores de siembra y cosecha incorporados en la maquinaria, son ejemplos de uso de tecnologías de la información en este rubro. En el otro extremo, en ganadería, donde hay casi 16.000 productores familiares, según el Censo General Agropecuario 2011 (Sganga, Gonzalez y Rodriguez, 2014), la utilización de herramientas digitales es mucho más reducida.

En la ganadería es de destacar la existencia de un sistema de trazabilidad individual del ganado, implementado desde el año 2005, con identificadores por radiofrecuencia (RFID, por sus siglas en inglés) que permiten el rastreo individual durante toda la vida del animal, e incluso dentro de la planta frigorífica (ICA, 2009). Esta plataforma de información ganadera, llevada adelante por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) de Uruguay, ha posibilitado la generación de un importante número de *softwares* y aplicaciones móviles que facilitan la gestión ganadera sobre la base de esta información. Relacionado con esto, el Sistema Nacional de Información Ganadera (SNIG) del MGAP ha desarrollado la App “SNIG Productor”,¹⁰ mediante la cual se puede consultar información de animales individuales en torno de: sexo, raza, edad, y movimientos del animal. Esta aplicación para dispositivos móviles es de descarga gratuita.

10 <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.mgap.snig.snigproductor&hl=es_UY>.

Es claro que la actividad agropecuaria es altamente dependiente de factores ambientales que condicionan su producción y, por lo tanto, la viabilidad de las empresas. En este sentido, poder contar con información que ayude a planificar, prever posibles efectos adversos y tomar decisiones más informadas es de gran importancia.

A modo de ejemplo, el estrés térmico puede producir pérdidas económicas relevantes en nuestros sistemas de producción por afectación en los animales. En el caso del estrés por calor en ganado bovino, y como se menciona en el Capítulo 21 de este libro, los animales sufren mermas en la producción (leche y carne) e impactos a nivel fisiológico y metabólico, que pueden causar su muerte (GRAS, 2019; La Manna *et al.*, 2020). Por otro lado, entre los corderos que mueren en los primeros 30 días de vida, el 68% fallece antes de las 72 horas posnacimiento, siendo el complejo inanición-exposición (pérdida de calor, hipotermia, agotamiento de reservas, otros) el responsable del 62% de las muertes, y donde factores ambientales como incremento del viento, abundantes precipitaciones y bajas temperaturas pueden potenciar los efectos adversos (Alfonso *et al.*, 2018; Tiscornia *et al.*, 2020).

El hecho de disponer de herramientas de consulta diaria que permitan prever, a partir de las condiciones ambientales, situaciones de estrés térmico y anticiparse a tomar medidas de previsión, minimizando los problemas productivos y de bienestar, resulta por demás interesante. En este sentido, desde el INIA, y también en colaboración con otras instituciones, se pusieron a disposición productos que permiten, a nivel país, acceder a información de las condiciones climáticas, tanto para estrés calórico en ganado bovino de carne y leche (mediante el índice de temperatura y humedad ITH)¹¹ como para estrés por frío en el caso de la sobrevivencia de corderos recién nacidos (Chill Index).¹²

Según Tittonell (2019), transitar hacia una producción sostenible a través de los principios de la agroecología implica transiciones a diferentes escalas, niveles y dimensiones: social, biológica, económica, cultural, institucional y política. Estas transiciones pueden implicar una optimización de prácticas de manejo, una sustitución de insumos, o bien el rediseño del sistema. En varias de estas etapas, las TIC son susceptibles

11 <<http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Prevision-ITH-Vacunos#:~:text=Las%20condiciones%20predisponentes%20al%20estr%C3%A9s,m%C3%A1s%20utilizado%20a%20nivel%20mundial>>.

12 <<http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Prevision%20Corderos>>.

de contribuir a lograr los objetivos propuestos mediante el acceso y la optimización de la información. Adicionalmente, y teniendo en cuenta que la transición agroecológica puede comenzar a distintos niveles de industrialización o degradación de los sistemas (Tiftonell, 2019), es posible que muchos productores ya estén incorporando tecnologías y que esto esté aportando a la implementación de prácticas con bases agroecológicas.

3. Propuestas tecnológicas

Los sistemas de información para la toma de decisión disponibles en la página web de la Unidad GRAS del INIA¹³ se basan en el principio general de que, para mejorar la planificación y la toma de decisiones, es necesario considerar tres grandes tipos de información: 1) información generada en el pasado, 2) información de la situación actual, y 3) perspectivas más probables del futuro. Para ello se combina una serie de productos, alertas y herramientas modernas de acceso y manejo de información que sea fácilmente entendible y, por lo tanto, utilizable. Y disponer de información de manera accionable se aplica a distintas escalas productivas y niveles de intensificación, por lo que también resulta particularmente útil en procesos de transición agroecológica.

En este sentido, son trascendentales la disponibilidad y el acceso a datos e información. Desde el INIA, está disponible la información agroclimática en tiempo real de las estaciones automáticas¹⁴ y toda su base de datos, proveniente de las estaciones convencionales.¹⁵ Estas bases de datos, de más de 40 años, permiten evaluar comportamientos históricos de las distintas variables registradas, lo cual ayuda a detectar comportamientos anómalos y a evaluar períodos de recurrencia de determinados eventos. Adicionalmente, el monitoreo de algunas variables relacionadas con las condiciones óptimas de aparición de algunos patógenos permite estimar posibles niveles de infección y el adecuado momento de visita a predios para identificar su efectiva presencia. Finalmente, el seguimiento diario de variables climáticas, como son las unidades Richardson, horas o porciones de frío, heliofanía y humedad, resulta extremadamente

13 <<http://www.inia.uy/gras>>.

14 <<http://www.inia.uy/gras/Clima/Estaciones-on-line>>.

15 <<http://www.inia.uy/gras/Clima/Banco-datos-agroclimatico>>.

útil a la hora de definir un momento de intervención o aplicación, a fin de optimizar el manejo de plagas y enfermedades.

Relacionado con lo anterior, también está disponible la información de distintas variables del balance hídrico a nivel nacional¹⁶ y, adicionalmente, toda la base histórica del porcentaje de agua disponible (PAD) a nivel de grilla está accesible en el catálogo de datos abiertos.¹⁷ En caso de no tener información a nivel predial, estos datos permiten monitorear la saturación del suelo y relacionar esto con aplicaciones de productos químicos y posibles situaciones de escorrentía. Si existe información registrada en el predio, el INIA brinda la herramienta “CuantAgua”,¹⁸ como estimador predial de agua disponible en el suelo.

Por otro lado, también es importante la información a futuro a la que se pueda acceder. En este sentido, el INIA ofrece herramientas como el pronóstico de deoxinivalenol (DON) en trigo¹⁹ o el sistema de alerta a roya asiática (SARAS),²⁰ donde se muestran mapas de predicción del riesgo para los siguientes cinco días. Estas herramientas permiten prever visitas al campo cuando las condiciones ambientales son adecuadas para la aparición de estos problemas y ser así más eficientes en las aplicaciones de agroquímicos en los cultivos de trigo y soja. De esta manera se enfocan las aplicaciones cuando son realmente necesarias.

Para el ámbito ganadero, ya se mencionó la disponibilidad de información a futuro sobre variables que afectan directamente el bienestar animal y su productividad. Esta información orienta a productores y técnicos para tomar las medidas necesarias para minimizar los efectos del estrés y evitar pérdidas en bienestar y producción animal. Idealmente, las medidas que se implementen de sombra, abrigo o refugio para mitigar los efectos ambientales en los animales deberían ser estructurales de los sistemas. En este sentido, y pensando en transiciones hacia sistemas agroecológicos, la incorporación de especies arbóreas nativas o la protec-

16 <<http://www.inia.uy/gras/Monitoreo-Ambiental/Balance-H%C3%ADdrico/Balance-h%C3%ADdrico-suelos-Uruguay>>.

17 <<https://catalogodatos.gub.uy/>>.

18 <<http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/cuantagua>>.

19 <[http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Pron%C3%B3stico-DON-para-trigo#:~:text=Los%20niveles%20de%20DON%20en,para%20consumo%20animal%20\(ganado\)](http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/Pron%C3%B3stico-DON-para-trigo#:~:text=Los%20niveles%20de%20DON%20en,para%20consumo%20animal%20(ganado))>.

20 <<http://www.inia.uy/estaciones-experimentales/direcciones-regionales/inia-la-estanzuela/saras-sistema-de-alerta-a-roya-asi%C3%A1tica>>.

ción de ambientes de bosque existentes, así como la provisión de agua de buena calidad y en cantidad, parecen iniciativas por demás interesantes.

Finalmente, también se tienen disponibles herramientas como SIGRAS web²¹ y aplicación para móviles,²² como sistema de gestión de la información. SIGRAS web es un sistema de información geográfica web elaborado por la Unidad GRAS del INIA, cuya principal característica es que permite realizar búsquedas individuales y cruzadas dentro y entre las distintas capas de información incluidas en el mismo. Este sistema incluye diferentes bases de datos, con capas de información geográfica de clima, cartografía básica (caminería, localidades, límites administrativos, etc.), suelos, Google Maps y otras que se irán incorporando. La información geográfica está en formato *Shapefile* y la mayor parte de ella puede ser descargada libremente. Por otra parte, SIGRAS App es una aplicación para teléfonos móviles que brinda información actual e histórica del estado de la vegetación mediante el uso de índices espectrales, como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés), agua en el suelo, climatología, suelo y cartografía general, entre otros, para el área en donde el usuario se encuentre posicionado u otra ubicación que seleccione. Esta aplicación para dispositivos móviles está disponible para sistemas operativos Android y iOS. Además, dispone de algunas herramientas y alertas tales como pronósticos de heladas y precipitaciones, un sistema para estimación personalizada de agua en el suelo (CuantAgua), previsión de condiciones ambientales para corderos recién nacidos y pronósticos de DON en trigo. Esta información, utilizada de manera conjunta y complementaria a otra existente, contribuye a la toma de decisión a distintas escalas, regional y predial.

La producción agropecuaria con base agroecológica no escapa a la lógica de manejo de información. Más aún, en predios en donde la mirada es sistémica e integral, la necesidad de información generada por distintas fuentes y a diferentes escalas es aún mayor. Esta mirada sistémica requiere de las distintas fuentes y escalas, pero además, de la integración de esa información que permita modelar posibles escenarios y así evaluar la interacción de los distintos elementos del sistema. De esta manera, los productores dispuestos a transitar hacia una producción sostenible

21 <http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/sigras-web>

22 <http://www.inia.uy/gras/Alertas-y-herramientas/sigras-app>

a través de los principios de la agroecología podrán tomar las decisiones adecuadas y potenciar mecanismos naturales favorables.

4. Mejoras a partir del uso o de la implementación de las tecnologías propuestas

Son varios los factores que vienen promoviendo el uso de TIC en el sector agropecuario. Algunos de ellos son:

- Avances en las comunicaciones (conectividad) y terminales móviles que permiten llevar los sistemas de información a los centros productivos.
- Abaratamiento de equipos, sensores e insumos informáticos en general.
- Madurez y creciente oferta de aplicaciones de gestión empresarial (gestión de clientes, de insumos, control de producción, información de áreas de interés, etc.).
- Aceptación por parte de los empresarios y técnicos como consecuencia del cambio generacional.
- Escasez de mano de obra para tareas específicas.
- Demanda/necesidad/regulaciones, de condiciones laborales menos adversas, más saludables, más atractivas.
- Sustitución del trabajo rutinario.

Es evidente, entonces, que el futuro del agro se encamina en esa línea, y cada vez más el sector irá incorporando distintos aspectos de las TIC en sus sistemas. Ya sea por necesidad, en el caso de la falta de mano de obra, o por aspirar a un aumento en su productividad o a una mejor calidad de vida, el productor agropecuario necesita de sistemas de información y gestión que le permitan ser más eficiente en su actividad. Las TIC juegan un papel central en esto.

Los productores que llevan adelante transiciones agroecológicas no son ajenos a esta realidad, siendo aún más relevante, ya que la información juega un papel central en el manejo de estos predios. Estos son predios donde son muchas las dimensiones que se tiene que considerar.

Es esperable, por lo tanto, que la incorporación de más información y más tecnología en los sistemas de producción redunde en beneficios en todas las dimensiones consideradas. Dentro de la dimensión agronómica o productiva, la disponibilidad de sistemas, tecnologías o herramientas que nos brinden información del pasado, de la situación actual y de los escenarios futuros más probables nos permite prever y tomar las me-

didadas de manejo más adecuadas en el momento justo. Esto, sin duda, conlleva un aumento en los rendimientos y, por lo tanto, un beneficio también en la dimensión económica. En lo que respecta a la dimensión ambiental, ayuda a ser más eficientes y reducir la cantidad de productos químicos incorporados al predio, o a generar impactos positivos en el bienestar animal, mediante el monitoreo de variables agroambientales. Finalmente, en lo relativo a la dimensión social, la incorporación de tecnologías como son los sistemas de monitoreo y alerta, automatización y robotización, afecta positivamente la calidad de vida de los productores contribuyendo a un alivio de las tareas repetitivas o de los controles presenciales.

La incorporación de las TIC en los sistemas agropecuarios se visualiza entonces como una oportunidad para los productores agropecuarios – incluyendo a los que están implementando transiciones hacia sistemas agroecológicos– de beneficiarse a nivel multidimensional. A pesar de esto, y como ya se mencionó, la adopción de tecnología a nivel nacional está lejos de alcanzar lo deseable. En ese contexto, institutos de investigación como el INIA tienen un gran trabajo por delante en generar más y mejor información, herramientas de procesamiento, productos y alertas que contribuyan en este sentido. Es importante también que todo esto sea accesible, útil y accionable, permitiendo su inclusión en los procesos de toma de decisión. Finalmente, es necesario implementar una difusión exitosa y sistemas de transferencia adecuados para lograr la adopción.

Referencias

Agricultural Information Management Standards

(2020), “Information and Communication Technologies (ICT) | Agricultural Information Management Standards (AIMS)”. Disponible en: <<http://aims.fao.org/information-and-communication-technologies-ict>> [Consulta: 27 de enero de 2021].

Alfonso, M., De Barbieri, I., De Brum, F., Tiscornia, G., Saravia, C., Van Lier, E., Olivera, J., Casaretto, A., Marchelli, J., Fierro, S., Bidegain, M. y De los Santos, B.

(2018), “Previsión de condiciones ambientales para corderos recién nacidos”, en *Revista INIA Uruguay*, 53, pp. 15-17.

Berterreche, M., Soares de Lima, J. M., Domínguez, G. y Pivel, C.

(2017), *Estudio prospectivo al año 2050: TIC y verticales. Fase 1: estado de situación*, Vertical Agro-Forestal y Alimentos, 64 pp.

Chowdhury, G. G.

(2003), “Natural language processing”, en *Annual Review of Information Science and Technology*, 37(1), pp 51-89. Disponible en: <<https://doi.org/10.1002/aris.1440370103>>.

FAO

(2015), *e-agriculture 10 year Review Report Implementation of the World Summit on the Information Society (wsis) Action Line C7. ICT Applications: e-agriculture*. Disponible en: <www.fao.org/publications>.

FAO

(2007), *E Technical Consultation on Agricultural Information and Knowledge Management E-AGRICULTURE*. Disponible en: <http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/kce/Doc_for_Technical_Consult/E-AGRICULTURE_-_English.pdf>.

GRAS

(2019), “Programa nacional de producción de leche; Programa nacional de producción de carne y lana; UCTT. Anticiparnos a las condiciones de estrés en bovinos de carne y leche”, en *Revista INIA Uruguay*, 58, p. 23.

IICA

(2009), “Un nodo de cooperación sobre: la experiencia de Uruguay en trazabilidad bovina”. Disponible en: <https://www.inac.uy/innovaportal/file/5046/1/libro_trazabilidad_espanol_con_tapa_definitivo.pdf>.

La Manna, A., Canozzi, M. E. A., Tiscornia, G., Otaño, C. y Lapetina, J.

(2020), “Previsión de estrés calórico en bovinos. Producción Animal”, en *Revista INIA Uruguay*, 2020, 63, pp. 6-10.

Palmer, N.

(s. f.), *Las TIC y la agricultura en el contexto del «crecimiento verde» Ndubuisi Ekekwe, Institución Africana de Tecnología*. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/a-aq000s.pdf>>.

Santini, S. y Ghezan, G.

(2019), *Uso y resignificación de las TIC en una red de comercio electrónico de alimentos agroecológicos*.

Sganga, F., González, M. y Rodríguez, S.

(2014), *Producción Familiar Agropecuaria uruguaya y sus Productores Familiares a partir de los datos del Censo General Agropecuario y el Registro de Productores Familiares*, 11 pp. Disponible en: <<http://www2.mgap.gub.uy/portal/afiledownload.aspx?2,10,821,O,S,O,10981%3BS%3B1%3B76>>.

Tiscornia, G., Porcile, V., Bidegain, M., De los Santos, B., De Brum Rodríguez, F., Van Lier, E., Olivera, J., Casaretto, A., Marchelli, J., Fierro, S., Saravia, C. y De Barbieri, I.

(2020), “Comportamiento histórico del Índice de enfriamiento (Chill index) para ovinos durante la estación fría”, en *Revista INIA Uruguay*, 61, pp. 23-27.

Tittonell, P.

(2019), “Las transiciones agroecológicas: múltiples escalas, niveles y desafíos”, en *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*, 51(1), pp. 231-246.

Acerca de los autores

- Abreo, Eduardo:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Aguerre, Verónica:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Aguiar, Ignacio:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Albicette, María Marta:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Albín, Alfredo:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Altesor, Alice:** Lic. Cs. Biológicas, Dra. en Ecología. Universidad de la República (UDELAR), Facultad de Ciencias, Uruguay.
- Altier, Nora:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Antúnez, Karina:** Lic. MSc. PhD. Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IBCE), Uruguay.
- Araujo, Agustín:** Ing. de Producción. Universidad de la República (UDELAR), Facultad de Ingeniería, Uruguay.
- Arbolea, Jorge:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Barlocco, Claudia:** Lic. Bioquímica Mag. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Barro, Raquel:** Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Bernal, Roberto:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Berrueta, Cecilia:** Ing. Agr. MSc. Dra. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Bertoni, Paloma:** Ing. Agr., Facultad de Agronomía, Universidad de la República (UDELAR), Uruguay.
- Beyhaut, Elena:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Blumetto, Oscar:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Branchiccela, Belén:** Lic. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.

- Cabrera, Danilo:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Cal, Adrián:** Ing. Agr. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Castagna, Andrés:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Castelli, Loreley:** Lic. Msc. Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE), Uruguay.
- Ciappesoni, Gabriel:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Ciganda, Verónica:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Dini, Maximiliano:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Dogliotti, Santiago:** Ing. Agr. PhD. Universidad de la República (UDELAR), Facultad de Agronomía, Uruguay.
- Fariña, Santiago:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Garaycochea, Silvia:** Lic. Bioq. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- García-Inza, Georgina Paula:** Ing. Agr. Dra. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay. Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Agronomía, Argentina.
- García, M. Alejandro:** Ing. Agr., PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- García, Claudio:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Jiménez, Gustavo:** Ing. Agr. MSc. Dr. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Gómez Miller, Raúl:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Goñi, Carmen:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Invernizzi, Ciro:** Lic. MSc. PhD. Universidad de la República (UDELAR), Facultad de Ciencias, Uruguay.
- Kaspary, Tiago Edu:** Ing. Agr., MSc., PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- La Manna, Alejandro:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Larnaudie, Valeria:** Ing. Qca. PhD. Universidad de la República (UDELAR), Facultad de Ingeniería, Uruguay.
- Leoni, Carolina:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Macedo, Ignacio:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Maeso, Diego:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.

- Mancebo, Santiago:** Ing. de Producción. Universidad de la República (UDE-LAR), Facultad de Ingeniería, Uruguay.
- Matonte, Federico:** Ing. en Computación. Universidad de la República (UDE-LAR), Facultad de Ingeniería, Uruguay.
- Mauttone, Antonio:** Ing. MSc. PhD. Universidad de la República (UDE-LAR), Facultad de Ingeniería, Uruguay.
- Mendoza, Yamandú:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Moncalvo, Valentina:** Ing. de Producción. Universidad de la República (UDE-LAR), Facultad de Ingeniería, Uruguay.
- Mujica, Valentina:** Ing. Agr. MSc. Dra. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Navajas, Elly Ana:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Otero, Álvaro:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Paruelo, José María:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA); Universidad de la República (UDE-LAR), Facultad de Ciencias, Uruguay; Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Agronomía, Argentina.
- Parrilla, Agustina:** Ing. de Producción. Universidad de la República (UDE-LAR), Facultad de Ingeniería, Uruguay.
- Pereyra, Silvia:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Piñeiro, Gervasio:** Ing. Agr. Dr. Universidad de la República (UDE-LAR), Facultad de Agronomía, Uruguay; Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Agronomía, Argentina.
- Pinto, Priscila:** Ing. Agr. Dra. Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Agronomía, Argentina.
- Pravia, Virginia:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Quincke, Andrés:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Quiñones Dellepiane, Amparo:** Ing. Agr., Mag. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Ravagnolo, Olga:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Rivas, Federico:** Lic. Bioqco., MSc., PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Rodríguez Gallego, Lorena:** Lic. Cs. Bio., MSc. Dra. Universidad de la República (UDE-LAR), Uruguay.
- Rovira, Pablo:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Rubio, Leticia:** Ing. Agr. Mag. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.

- Rubio, Valentina:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Ruggia, Andrea:** Ing. Agr. MSc. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Santos, Estela:** Lic. MSc. PhD. Universidad de la República (UDELAR), Facultad de Ciencias, Uruguay.
- Sawchik, Jorge:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Scarlato, Mariana:** Ing. Agr. MSc. Universidad de la República (UDELAR), Facultad de Agronomía, Uruguay.
- Scarlato, Santiago:** Ing. Agr. MSc. Universidad de la República (UDELAR), Facultad de Agronomía, Uruguay.
- Sierra, Miguel:** Ing. Agr. MSc. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Soares de Lima, Juan Manuel:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Terra, José:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Tiscornia, Guadalupe:** Lic. Cs. Biol. Mag. Dra. Coordinadora Unidad GRAS. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Valle, Diana:** Dott. Mag. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Zerbino, María Stella:** Ing. Agr. Dra. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.
- Zoppolo, Roberto:** Ing. Agr. PhD. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Uruguay.

SOMOS GENTE DE PALABRA

Tomamos de ella su capacidad de construir comunidad, conciencia y una cultura de hermandades.

Palabra escrita hecha libros/semilla que nos ayuden a transitar el camino hacia una sociedad más justa e igualitaria, rumbo al Buen Vivir. Palabras puentes y no muros.

Corren tiempos en los que se las manipula para el desencuentro, la división, la xenofobia. Se las usa como excavadoras para ensanchar y profundizar grietas; como señuelos consumistas que enmudecen el daño a nuestra casa común.

Si la verdad nos hará libres, el engaño premeditado persigue esclavizar-nos, colonizarnos. Palabrerío irresponsable de pícara impostura, enfermando el entendimiento común de los sentidos, martillando informaciones falsas. Naturalizar la posverdad no es otra cosa que la celebración de la mentira. Nosotros somos los que le gritan al rey desnudo.

Queridos lectores: reciban y circulen los libros de CICCUS como una buena nueva, más allá de la temática que aborden, como un don para el discernimiento, la paz y el amor a la vida, que no es poca cosa.

CONSEJO EDITORIAL:

*Juan Carlos Manoukian, Hugo Chumbita, José Muchnik,
Diana Braceras, Héctor Olmos, José Luis Coraggio, Roberto Benencia, Nerio Tello,
Federico Giménez, Pablo Medina, Adrián Scribano, Gabriela Merlinsky
María Miguel, Enrique Del Percio, Daniel Parceró*

EDICIONES
ciccus

CENTRO DE INTEGRACIÓN
COMUNICACIÓN, CULTURA Y SOCIEDAD

Ediciones ciccus y los autores agradecerán a los lectores que envíen sus comentarios sobre esta obra a: ggarciaianza@inia.org.uy

APORTES CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS DEL INIA A LAS TRAYECTORIAS AGROECOLÓGICAS

Editores: Georgina Paula García-Inza, José Paruelo y Roberto Zoppolo

Desde una perspectiva institucional en INIA nos referiremos a la agroecología como la aplicación de principios y conceptos ecológicos al diseño y manejo de agroecosistemas más sostenibles.

Esta definición se alinea con la enunciada en la Ley 19.717 sancionada por el Parlamento de Uruguay en 2018.

La visión agroecológica implica necesariamente un enfoque de sistema, co-evolutivo y participativo que, más allá de abordar aspectos ambientales, debe tener en cuenta la dimensión social y económica.



Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria
U R U G U A Y



Ministerio
de Ganadería,
Agricultura y Pesca

