

IMPACTO DE LA INTENSIDAD DE USO DEL SUELO SOBRE LA PRODUCTIVIDAD DEL CULTIVO DE SOJA EN LOMADAS DEL ESTE

José Terra¹, Virginia Pravia², Álvaro Roel³ y José Correa⁴

INTRODUCCIÓN

El área destinada a la agricultura ha tenido un gran crecimiento en Uruguay en la última década. Este crecimiento se ha caracterizado por la generalización de la siembra directa, la incorporación de cultivos transgénicos, la intensificación del uso del suelo y una alta incorporación de tecnología en los sistemas productivos. El incremento del área agrícola, fundamentalmente soja, se ha basado en la intensificación de la agricultura en la zona núcleo (en detrimento de las pasturas) y en la expansión a nuevas regiones que antes eran consideradas marginales, ya sea por su lejanía a los centros de acopio o por la menor superficie o aptitud de uso agrícola de sus suelos.

Aunque la siembra directa se ha consolidado como sistema, la expansión agrícola a suelos frágiles, el predominio de la soja en la rotación y la disminución o eliminación de las pasturas perennes de las mismas, plantea nuevos desafíos en términos de conservación del recurso suelo en estas regiones. El cultivo de soja determina balances negativos de N y C del suelo y su rastrojo, poco abundante y de baja relación C-N, no brinda cobertura eficiente y duradera para mantener la erosión hídrica dentro de valores tolerables. Por tanto, la inclusión de cultivos de cobertura o cultivos graníferos con rastrojos voluminosos de alta relación C-N (ej: sorgo, maíz o trigo) y su ubicación en la rotación, son claves para la conservación del recurso suelo.

Los suelos ubicados en la región de lomadas de la cuenca de la laguna Merín (ej: Unidades Alférez y J.P. Varela), tienen menor capacidad de uso y manejo que los suelos agrícolas del litoral oeste. Entre sus limitantes destacan su menor capacidad de almacenamiento de agua, mayor diferenciación textural con alto contenido de limo en superficie y arcilla en profundidad, menor contenido de materia orgánica y estructura mas pobre. Por tanto, se trata de suelos frágiles, con alto riesgo de erosión y degradación, alto riesgo de sequía en periodos estivales y limitantes de drenaje durante el invierno. Sobre estos suelos deben utilizarse prácticas de manejo conservacionistas que maximicen los rastrojos sobre superficie, la preservación del agua en el perfil y la exploración radicular de los cultivos en profundidad. Existe creciente demanda por información acerca de la integración de cultivos graníferos a rotaciones de intensificación variable con siembra directa sobre estos suelos. Esto implica entre otras cosas, conocer el impacto que pueda tener la inclusión o no de pasturas perennes en la rotación o el pastoreo de los cultivos de cobertura durante el invierno, sobre la calidad del suelo y la productividad de los cultivos.

¹ Ing. Agr., Ph.D. Programa Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Treinta y Tres.

² Ing. Agr., Programa Pasturas y Forrajajes, INIA Treinta y Tres.

³ Ing. Agr., MSc., Ph.D. Director Regional, INIA Treinta y Tres.

⁴ Téc. Agr., Programa Producción y Sustentabilidad Ambiental, INIA Treinta y Tres.

El principal factor relacionado con la productividad de cultivos de verano es la capacidad de suministro de agua por el ambiente, resultante de la interacción del clima (lluvias y evapotranspiración), la topografía y la capacidad de almacenamiento de agua del perfil del suelo. Es ampliamente reconocida la alta variabilidad espacial de los suelos y sus propiedades en las chacras comerciales. Por tanto, la variabilidad edáfica y topográfica de una chacra debería ser considerada al estudiarse el impacto de prácticas de manejo sobre un cultivo. Los ensayos en fajas a escala de chacra permiten captar esta variabilidad y estudiar su interacción con las prácticas de manejo mediante el uso de las tecnologías asociadas a la agricultura de precisión (GPS y monitores de rendimiento) y herramientas de análisis geoestadístico.

El experimento de rotaciones de larga duración de 72 ha instalado en la UEPP en 1995 que evalúa cuatro intensidades de uso del suelo con siembra directa que se diferencian en la proporción de las pasturas en la rotación, es una buena plataforma experimental para responder alguna de las interrogantes que se plantean respecto a la integración de cultivos graníferos en estos suelos.

Los trabajos experimentales con cultivos de grano se iniciaron en 2005 y se concentran en una secuencia sorgo-soja rotando con pasturas anuales o perennes priorizando tres aspectos. Primero, la integración de los cultivos en sistemas de siembra directa que incluyan la rotación con estas pasturas. Segundo, la búsqueda de prácticas de manejo que maximicen la disponibilidad de agua para el cultivo y que minimicen los posibles efectos negativos del pastoreo (compactación y rastrojo). Finalmente, el estudio de la interacción entre las prácticas de manejo y la variabilidad de la chacra sobre la productividad de los cultivos y las propiedades dinámicas de los suelos.

El objetivo general de este trabajo fue determinar el efecto relativo e interactivo a escala de chacra de algunas prácticas de manejo de suelos sobre la productividad del cultivo de soja y sorgo en suelos sometidos a diferentes intensidades de uso en siembra directa. Un avance de los trabajos en soja durante la zafra 2006-07 fue presentado por Pravia et. al (2007), mientras que el análisis conjunto de tres zafras de los trabajos con sorgo fueron presentados por Pravia et. al (2008) en las jornadas de cultivos de verano de INIA Treinta y Tres. Debido a que en 2005-06 y 2006-07 existieron algunos inconvenientes con el monitor de rendimiento en el cultivo de soja, en esta oportunidad presentaremos el análisis conjunto de soja correspondiente a las zafras 2007-08 y 2008-09.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos fueron realizados durante 4 zafras (2005-06, 2006-07, 2007-08 y 2008-09) dentro del experimento de rotaciones de larga duración de la UEPP que ocupa 12 potreros experimentales de 6 ha c/u conteniendo todas las fases de las rotaciones presentes simultáneamente. Los suelos dominantes en el área experimental pertenecen a la unidad Alférez y consisten en Argisoles subéutricos melánicos abruptos y Planosoles subéutricos melánicos/ótricos clasificados como de clase III por su capacidad de uso y manejo. Los primeros ocupan las laderas y tienen alto riesgo de erosión y los segundos ocupan las partes altas planas y tienen problemas de drenaje y están asociados a blanqueales.

A partir de 2005, cada unidad experimental de 6 ha del experimento de largo plazo que entraba en la fase de cultivos fue subdividida en dos mitades de 3 ha, en una de las cuales se mantuvo la rotación forrajera original y en la otra mitad se incluyeron cultivos de grano. De esta forma, cada subparcela agrícola fue sembrada siguiendo una secuencia raigrás-sorgo-raigrás-soja instalada sobre tres rotaciones contrastantes que se mantenían estables en siembra directa desde 1995: a) sobre una pradera de festuca, trébol blanco y lotus de 4 años (implantada luego de 2 años de doble cultivo forrajero); b) sobre una pradera de trébol rojo de 2 años (implantada luego de 2 años de doble cultivo forrajero); y c) sobre una chacra de doble cultivo forrajero continuo desde 1995. De esta forma, en cada año hubo dos experimentos en fajas sobre una rotación de pasturas cortas (RC) y dos experimentos sobre una rotación de pasturas de larga duración (RL), uno conteniendo sorgo y otra soja; al tiempo que otro experimento se ubicó sobre la rotación de cultivos continuos (CC) conteniendo sorgo o soja en años alternados.

Dentro de cada sitio de 3 ha con cultivos de grano (5 en cada zafra) se instaló un ensayo en fajas evaluando 4 manejos de suelos resultantes de un factorial de 2 niveles de rastrojo (alto o bajo) generados por la intensidad de pastoreo invernal en el raigrás previo, y el uso o no de subsolado. Cada uno de los experimentos tuvo 3 bloques y 2 repeticiones por bloque (Fig. 1). Las fajas conteniendo los tratamientos fueron de aproximadamente 100m de largo y 7-10m de ancho y fueron dispuestas interceptando la máxima variación del terreno posible. Las fajas conteniendo los tratamientos fueron ubicadas al azar en 3 bloques (ladera alta, ladera media y ladera baja) y fueron repetidas 2 veces en cada bloque.

Tratamientos en Fajas

- 1) Cobertura invernal de raigrás sin pastoreo.
- 2) Cobertura invernal de raigrás sin pastoreo + Subsolado (Paraplow a 0,4 m de profundidad inmediatamente previo a la siembra)
- 3) Pastoreo raigrás (en agosto y setiembre previo a la aplicación de glifosato).
- 4) Pastoreo raigrás + Subsolado

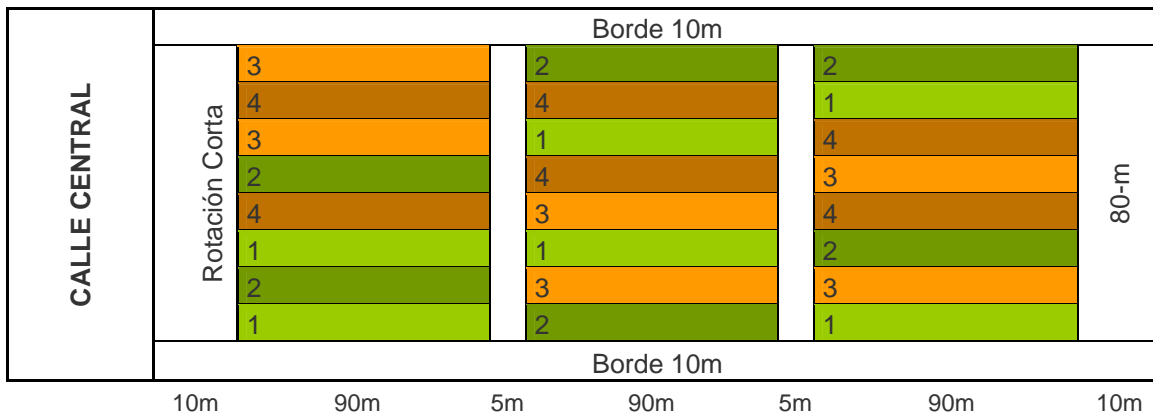


Figura 1. Esquema de un ensayo de soja conteniendo en tres bloques los 4 tratamientos en fajas.

Luego de la cosecha del sorgo, todas las chacras fueron sembradas con raigrás en el otoño previo a la siembra de la soja. El raigrás en los tratamientos correspondientes fue pastoreado entre el 20 de agosto y el 20 de setiembre en 2 oportunidades con una carga de 6,3 terneras/ha de 200 kg/ha. El raigrás y la vegetación acompañante fue controlada todos los años durante la última semana de setiembre, con la aplicación de 6 l/ha glifosato (Rango) y 200 cc/ha de dicamba (Dombel) en 2007 y 3,5 l/ha de glifosato potásico (Power Rango) en 2008; realizándose una segunda aplicación de 3,3 l/ha glifosato (Rango) en noviembre inmediatamente antes de la siembra.

Los ensayos de soja fueron sembrados el 9/11/2007 y el 4/12/2008 con el cultivar AGT6000 a una densidad objetivo de 400.000 semillas viables/ha en hileras espaciadas a 0,4 m utilizando una sembradora Semeato (Personale Drill) de 6 hileras con el sistema abresurco facón-guillotina. En ambas zafras la semilla fue curada con el insecticida imidacloprid (Gavilan) a dosis de 250 cc/ha e inoculada. La fertilización a la base fue de 140 kg/ha de 9-40-13 (N-P-K) en 2007-08 y 135 kg/ha de 8-39-15 en 2008-09 (N-P-K). La fertilización fue la misma para todas las rotaciones y se aplicó el 50% de la dosis en la línea a 10 cm de profundidad y el otro 50% al voleo.

En ambas zafras se realizaron controles de insectos, epinotia, lagartas o chinches de acuerdo a los umbrales de daño y productos recomendados a nivel comercial. En ambas zafras fue particularmente intenso el daño de langosta que necesitó de aplicaciones específicas para su control en la etapa vegetativa. Los detalles (fechas y dosis) del manejo agronómico, incluyendo fertilización y aplicaciones de insecticidas, herbicidas y fungicidas pueden ser apreciados en los Cuadros 1a y 1b.

Cuadro 1a. Manejo común en los ensayos de soja durante la zafra 2007-08

Fecha	Actividad	Producto	N. comercial	Dosis /ha
28/09/2007	Pulverización	Glifosato	Rango®	6 l
		Dicamba	Dombel®	250 cc
		Auxiliar	Hyspray	250 cc
07/11/2007	Pulverización	Glifosato	Rango®	3,3 l
		Auxiliar	Hyspray	150 cc
01/11/2007	Subsolado			
09/11/2006	Siembra	Soja	AGT 6000	75 kg
	Curasemilla	Imidacloprid	Gavilán	250cc/100kg
	Fertilización	Inoculante		1,5
		9-40-40-13	Maccio	140 kg
7-8/12/2007	Insecticida + herbicida	Metoxifenocide	Intrepid	150 cc
		Glifosato	Rango®	3,3 l
02/01/2008	Insecticida	Clorpirifos	Pyriban	1 l
05/02/2008	Insecticida	Clorpirifos	Pyriban	1 l
20/02/2008	Insecticida	Thiametoxam + Lambdacihalotrina	Engeo	160 cc
07/03/2008	Insecticida + Fungicida	Thiametoxam + Lambdacihalotrina	Engeo +	250cc +
		Diflubenzuron + Kresoxim-Tebuconazole	Conzerto	1 l
28/03/2008	Insecticida	Endosulfan	Endosulf	1 l

Cuadro 1b. Manejo común en los ensayos de soja durante la zafra 2008-09.

Fecha	Actividad	Producto	N. comercial	Dosis /ha
29/09/2008	Pulverización	Glifosato	PowerRango	3,3 l
		Dicamba	Dombel	200cc
		Auxiliar	Hyspray	250 cc
30/10/2008	Subsolado			
04/12/2008	Siembra	Soja	AGT 6000	85 kg
		Curasemilla	Gavilan	250 cc/100kg
		Inoculante		1,5
	Fertilización	8-39-39-15	ISUSA	135 kg
16/12/2008	Pulverización	Glifosato	Rango	3,3 l
24/12/2008	Insecticida Herbicida	Clorpirifos	Pyriban	1l
		Glifosato	Rango	2 l
23/01/2009	Insecticida Herbicida	Clorpirifos	Pyriban	1 l
		Glifosato	Rango	2 l
17/02/2009	Insecticida + Fungicida	Triclorfon + Kresoxim- Tebuconazole	Triclocib Conzerto	1.5 l 0.8 l
24/02/2009 *	Insecticida	Clorpirifos	Pyriban	0.8 l
18/03/2009	Insecticida + Fungicida	Triclorfon + Diflubenzuron + Kresoxim- Tebuconazole	Triclocib + Diflulin + Conzerto	1,5 l 50cc 0,8 l

* Se necesito aplicar para lagartas ya que el Triclocib no fue efectivo en su control como si lo fue para chinches.

Determinaciones

Cada 40 m a lo largo de cada faja se establecieron sitios de muestreo que se georeferenciaron a los efectos de realizar determinaciones en el suelo y en el cultivo durante su ciclo.

Se sacaron muestras de suelo a 0-15 cm en 8 sitios en cada bloque y se realizaron análisis de C orgánico, N total, potencial de mineralización de N (PMN), contenido de P (ácido cítrico), K intercambiable y textura.

En cada ensayo de 3 ha se realizó un mapa de conductividad eléctrica del suelo 0-30cm y 0-90-cm utilizando un sensor de conductividad Veris® Tech 3100 (Veris Tech. Salina, KS) equipada con un DGPS (Trimble AgGPS® 132) que pasó a lo largo de cada faja durante el invierno. Al mismo tiempo se realizó un relevamiento topográfico, y con un sistema de información geográfico se derivaron otros atributos de terreno primarios y secundarios como pendiente, índice compuesto topográfico y el índice de poder de la escorrentía.

Se siguió la evolución del contenido de agua (0-90 cm) a intervalos de 10 cm utilizando una sonda de capacitancia DIVINER 2000 durante algunos momentos fonológicos del cultivo. El equipo ha sido particularmente difícil de calibrar, por lo que no se presentarán los resultados en esta instancia.

En cada bloque se seleccionaron 2 sitios en cada una de las fajas para determinar la biomasa de rastrojo, implantación, evolución fonológica y crecimiento, estimación del contenido de clorofila, temperatura foliar y componentes de rendimiento.

El rastrojo remanente al inicio del barbecho se determinó mediante 3 muestras con un cuadrado de 20x50 cm en cada uno de los sitios seleccionados.

La implantación del cultivo se determinó a los 15 días postemergencia en los mismos sitios mediante 10 determinaciones a lo largo de 1 m de surco. Cada 2 semanas se hicieron determinaciones de altura del cultivo y estado fonológico.

La estimación del contenido de clorofila se realizó mediante lecturas con un sensor SPAD (Soil Plant Analysis Development) en las hojas superiores completamente desarrolladas de 5 plantas en cada sitio en el estadio R2-R3. En el mismo momento y en las mismas plantas se determinó temperatura foliar con un termómetro infrarrojo para estimar grado de estrés hídrico del cultivo.

A la cosecha, en cada sitio se muestrearon 2 m lineales en 2 surcos y se determinaron componentes de rendimiento en 10 plantas al azar, número de chauchas, número de granos/chaucha, peso de 1000 granos, humedad y se realizó una estimación de rendimiento para cuantificar posibles pérdidas de cosecha.

La cosecha se realizó a fines de abril en ambas zafras con una cosechadora comercial SLC de 4 m de cabezal equipada con GPS y un monitor de rendimiento AGLeader PF3000 mediante una pasada a lo largo de la faja por la parte central de la misma. El equipo fue programado para tomar datos de posición, flujo de grano y humedad cada 2 segundos lo que permitió conocer el efecto del tratamiento a lo largo de cada una de las fajas y también la variación espacial de rendimientos a través del terreno. El grano cosechado a lo largo de cada faja fue pesado con una balanza de campo a lo efectos de corregir posibles errores del equipo. A cada faja de 100 m de largo se la subdividió en tramos de 20-m (celdas) que coincidieron con los sitios de muestreo y se determinó el rendimiento promedio en su interior.

El análisis estadístico del efecto de los tratamientos fue realizado con modelos mixtos (PROC MIXED en SAS), conteniendo efectos fijos y aleatorios. Se tomaron como efectos fijos los efectos de tratamientos y la rotación, mientras que los bloques y sus interacciones fueron considerados aleatorios (Littell et al., 1996). Para determinar la significancia estadística de los efectos fijos se utilizó un test de F con $p < 0.05$. Para determinar la relación entre el rendimiento y los atributos edáficos y topográficos se utilizó análisis de regresión múltiple.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones climáticas

Aunque se observaron algunas diferencias en el régimen de precipitaciones y evapotranspiración durante el barbecho y las etapas vegetativas del cultivo entre las

zafas, ambas tuvieron en común un régimen de precipitaciones muy favorable durante las etapas reproductivas. Esto difiere con lo ocurrido en la zafra 2006-07 donde las precipitaciones no cubrieron la demanda atmosférica prácticamente durante todo el ciclo del cultivo y los rendimientos fueron bajos (Pravia et. al 2007).

En la zafra 2007-08 (Figura 2) existió buena recarga del perfil durante el barbecho. Sin embargo, algunas lluvias asociadas a eventos de bajas temperaturas luego de la siembra demoraron la emergencia del cultivo en todos los tratamientos, particularmente en las posiciones mas deprimidas del terreno. En diciembre se registró un pequeño déficit hídrico que se mantuvo hasta fin de mes y que fue acompañado por un importante ataque de langostas que necesitó control químico. Las precipitaciones de fines de diciembre permitieron al cultivo alcanzar un buen desarrollo durante su periodo vegetativo que se extendió hasta fines de enero. Si bien hubo cierto déficit hídrico al inicio de la floración, ocurrieron lluvias oportunas a partir de mediados de febrero que coincidieron con el estado R3 del cultivo permitiendo excelentes condiciones de llenado de grano.

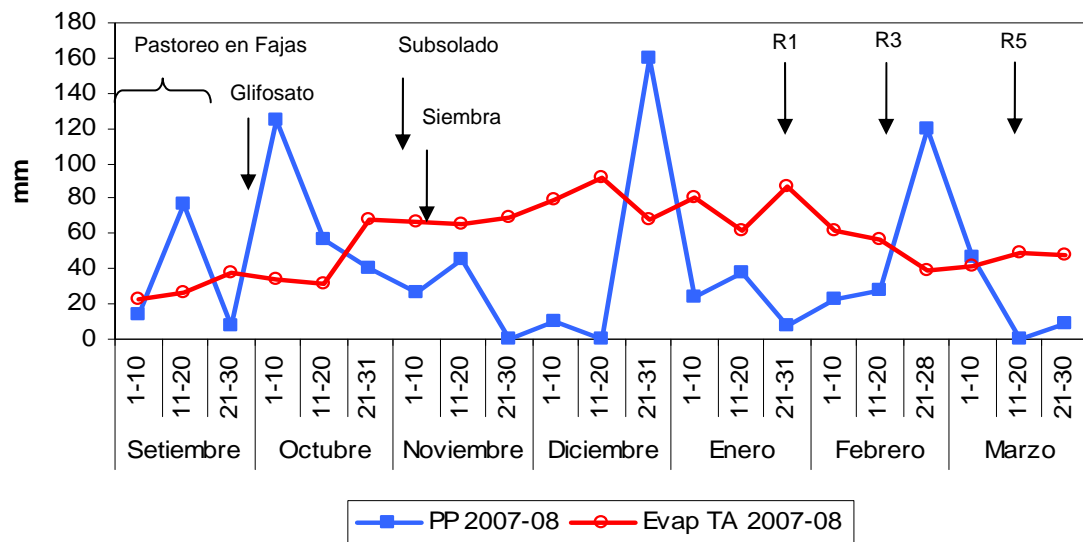


Figura 2. Precipitaciones y evaporación medida en tanque A decádicas (mm) durante el período del cultivo de soja, desde inicio del barbecho químico con glifosato y durante el ciclo del cultivo hasta el estadio R7 en la zafra 2007-08.

Por otro lado, en 2008-09 la falta de lluvias en la primavera, acompañado por la más alta demanda atmosférica que se tengan registros en noviembre en la región, determinó el retraso de la siembra un mes a la fecha prevista (Figura 3). La siembra se realizó luego de las lluvias ocurridas a inicios de diciembre que recargaron el perfil del suelo determinando que el cultivo se haya instalado como una soja de segunda. Las lluvias inmediatas a la siembra determinaron una buena implantación del cultivo y un rápido crecimiento inicial. Sin embargo, la ausencia de vegetación de campo natural en la región a causa de la seca primaveral generalizada, determinó una fuerte presencia de langostas en el cultivo a fines de diciembre que debieron ser controladas y que se agravó hacia enero cuando la falta de lluvias comprometieron el cultivo hasta casi el inicio del periodo reproductivo. Finalmente,

el régimen térmico y pluviométrico fue muy favorable para el cultivo desde el inicio de floración (R1) a fines de enero, hasta mediados de marzo que coincidió con las etapas críticas de llenado de grano del cultivo (R5-R6).

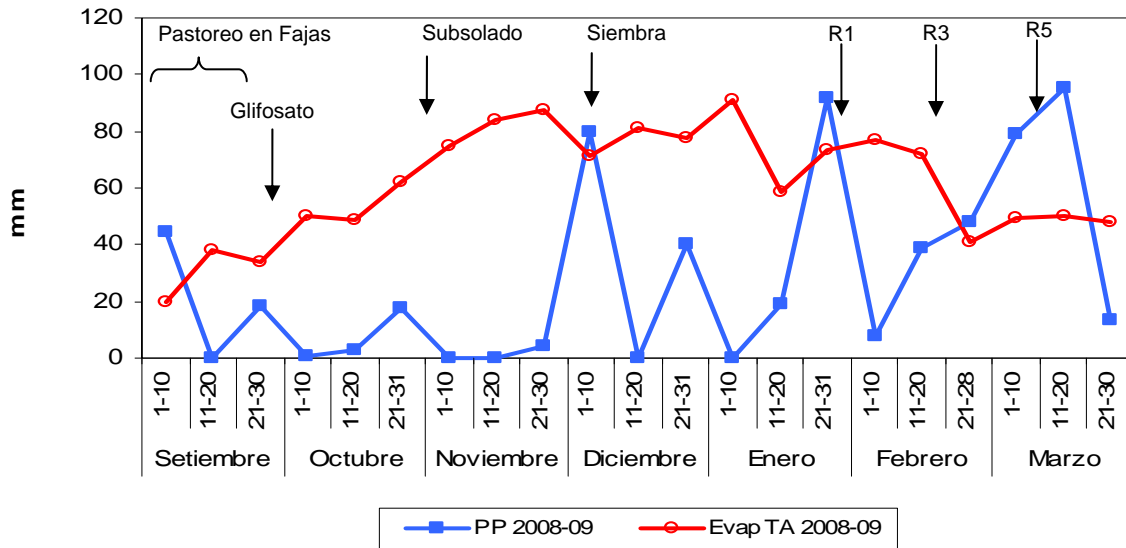


Figura 3. Precipitaciones y evaporación medida en tanque A decadas (mm) durante el período del cultivo de soja, desde inicio del barbecho químico con glifosato y durante el ciclo del cultivo hasta el estadio R7 en la zafra 2008-09.

Análisis de suelo

El contenido de carbono orgánico en el suelo fue superior en las rotaciones con pasturas de larga duración comparado con las rotaciones de mayor intensidad de uso del suelo (Cuadros 2a y 2b). El potencial de mineralización de N, que es un indicador de calidad de suelo más sensible que el C orgánico, también fue mayor en los potreros que rotaron con pasturas de larga duración. Esta mejor calidad de suelo constatada en la rotación con pasturas perennes coincide con los resultados observados en la zafra 2006-07 para soja (Pravia et al, 2007) y con otros ensayos de largo plazo (García Préchac et al, 2004). El mayor contenido de P en el suelo en las rotaciones más intensivas era esperable debido a la mayor frecuencia de fertilización fosfatada destinada a los cultivos anuales en la rotación. Si bien los niveles de fósforo en el suelo de las rotaciones con pasturas de larga duración fueron menores, los mismos no serían limitantes para el cultivo de soja. Se observó una tendencia a mayores niveles de P en las posiciones topográficas más elevadas y planas que puede estar relacionada a la variación de rendimiento de los cultivos como se verá más adelante. El contenido de K intercambiable detectado en los análisis fue relativamente bajo en todas las rotaciones y posiciones topográficas determinando la necesidad de agregar fertilizantes con potasio en forma generalizada en ambas zafras.

Cuadro 2a. Contenido de C orgánico, fósforo, potasio y potencial de mineralización de nitrógeno previo a la siembra de la soja en la zafra 2007-08 por sistema de rotación y posición topográfica.

Bloque	P _(Ac.cítrico) (ppm)		K int (meq/100g)		C.Org. (%)		PMN mg/kg N-NH ₄	
	RL	RC	RL	RC	RL	RC	RL	RC
Alto	17	23	0,22	0,20	2,26	1,56	64	60
Ladera media	14	15	0,20	0,18	2,31	1,56	55	63
Ladera baja	13	14	0,22	0,21	2,02	1,74	89	19

Referencias: RL rotación larga, RC rotación corta.

Cuadro 2b. Contenido de C orgánico, fósforo, potasio y potencial de mineralización de nitrógeno previo a la siembra de la soja en la zafra 2008-09 por sistema de rotación y posición topográfica.

Bloque	P _(Ac.Cítrico) (ppm)			K int (meq/100g)			C.Org. (%)			PMN mg/kg N-NH ₄		
	RL	RC	CC	RL	RC	CC	RL	RC	CC	RL	RC	CC
Alto	16	19	39	0,19	0,21	0,18	1,4	1,6	1,4	25	18	10
Ladera media	14	13	24	0,22	0,21	0,18	2,1	1,6	1,6			23
Ladera baja	12	12	29	0,22	0,14	0,19	1,7	1,3	1,3	30	19	21

Referencias: RL rotación larga, RC rotación corta, CC Cultivo continuo

Biomasa de rastrojo

Como era previsible, se generaron diferencias significativas en la biomasa de rastrojo de raigrás remanente en las dos zafras entre las parcelas pastoreadas y aquellas que no lo fueron (Cuadro 3). Las fajas pastoreadas hasta la semana previa a la aplicación del glifosato, dejaron una biomasa de rastrojo sobre el suelo 62% inferior en promedio que aquellos tratamientos que no fueron pastoreados durante el invierno. Por otro lado, la biomasa de rastrojo de raigrás en la zafra 2008-09 fue 44% menor en la rotación de cultivos continuos comparado con las rotaciones incluyendo pasturas. El raigrás fue la fracción dominante de la biomasa de rastrojo en todos los años en la mayoría de las rotaciones aunque el sorgo representó una proporción importante del mismo.

Cuadro 3. Efecto del pastoreo del raigras sobre la biomasa de rastrojo remanente al inicio del barbecho químico para la siembra de soja en distintas rotaciones.

TRATAMIENTO	Zafra 2007-08		Zafra 2008-09		
	Rotación Larga	Rotación Corta	Rotación Larga	Rotación Corta	Cultivo Continuo
	-----kg/ha-----				
No Pastoreado	4310a	4120a	5500a	7100a	3400a
Pastoreado	1700b	1560b	2100b	2500b	1400b
Promedio	3005A	2840A	3800B	4800A	2400C

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con $p=0,05$

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en misma la fila dentro de una zafra no difieren significativamente con $p=0,05$

Número de plantas

La población lograda estuvo algo por debajo de la población objetivo buscada para el cultivo, principalmente en la zafra 2007-08 (Cuadro 4). En esa zafra, el exceso de humedad y las bajas temperaturas en los días inmediatos a la siembra afectaron la germinación y emergencia del cultivo, particularmente en las zonas mal drenadas de las chacras. De esta forma, la población de plantas fue menor en RC que en RL posiblemente debido a la mayor presencia de zonas planas con drenaje pobre en el potrero en que se ubico el ensayo. Por el contrario, en la zafra 2008-09 la población de plantas fue un 16% mayor en el ensayo sobre RC comparado con el de CC. No se observaron diferencias agrónomicamente importantes en la población de plantas entre los tratamientos de manejo de suelos en ninguna de las zafras, aunque se observó una tendencia a menor número de plantas en el tratamiento pastoreado en la última zafra.

Cuadro 4. Efecto de 3 intensidades de uso del suelo (proporción pasturas y cultivos en la rotación) y de 4 practicas de manejo de suelos y rastrojos sobre la implantación del cultivo de sorgo para tres zafras evaluadas (2006, 2007 y 2008).

TRATAMIENTO	Zafra 2007-08		Zafra 2008-09		
	Rotación Larga	Rotación Corta	Rotación Larga	Rotación Corta	Cultivo Continuo
	-----plantas/m2 -----				
No Pastoreado	27,6a	22,5a	30,0a	33,3a	29,5a
No Pastoreado Subsulado	26,0b	22,4a	30,4a	34,8a	30,5a
Pastoreado	26,3a	23,2a	29,5a	32,5b	26,3b
Pastoreado Subsulado	27,1a	23,4a	30,3a	34,0a	29,4a
Media	26,7A	22,9B	30,1AB	33,6A	28,9B

Valores seguidos por una misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente con $p=0,05$

Valores seguidos por una misma letra mayúscula en misma la fila no difieren significativamente con $p=0,05$

Índice de clorofila (SPAD)

Se observaron diferencias significativas entre zafras en el índice de clorofila en las hojas superiores del cultivo al estadio R3 (Cuadro 5), posiblemente explicado por la diferencias de densidad del cultivo y acumulación de biomasa entre ambos años. En la zafra 2008-09 la soja sembrada en rotación con pasturas cortas presentó lecturas de SPAD un 9% menor que la soja sembrada sobre pasturas anuales, posiblemente explicado por un efecto de dilución de la clorofila en RC que presentaba mayor acumulación de biomasa en ese momento. Estos datos son coincidentes con los obtenidos en los análisis de suelo, que mostraban un potencial de mineralización de N mayor en las rotaciones con pasturas.

En ambas zafras se encontró una tendencia clara en todas las rotaciones a mayores valores de SPAD en los tratamientos pastoreados en invierno comparados con los no pastoreados.

Cuadro 5. Estimación del contenido de clorofila del cultivo de soja en el estado de R3, medido como índice SPAD según manejo de pastoreo y de suelo en tres rotaciones con diferente proporción de pasturas.

TRATAMIENTO	Zafra 2007-08		Zafra 2008-09		
	Rotación Larga	Rotación Corta	Rotación Larga	Rotación Corta	Cultivo Continuo
	-----SPAD -----				
No Pastoreado	38,6b	39,8a	32,0b	30,6b	33,7b
No Pastoreado Subsulado	38,4b	41,0a	33,6ab	30,7b	33,5b
Pastoreado	39,1ab	40,3a	33,0ab	32,4a	35,0ab
Pastoreado Subsulado	39,6a	40,5a	34,1a	32,3a	35,2a
Media	38,9A	40,4A	33,2AB	31,5B	34,3A

Valores seguidos por la misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente $p=0,05$

Valores seguidos por la misma letra mayúscula en la misma fila dentro de cada zafra no difieren significativamente $p=0,05$

Crecimiento del Cultivo

Se constató un mayor crecimiento y más rápido desarrollo inicial del cultivo en las fajas subsuladas que en las no subsuladas, principalmente durante la etapa vegetativa. Aunque estas diferencias se diluyeron a medida que se avanzó en el ciclo del cultivo, los efectos del subsulado sobre la altura del cultivo se siguieron apreciando en las parcelas pastoreadas, inclusive hasta las etapas reproductivas avanzadas. En la zafra 2008-09 la soja sembrada sobre rotaciones con pasturas tuvo un mayor desarrollo y altura que la sembrada en el potrero de agricultura continua lo que podría estar relacionado con la mejor condición de suelo comentada anteriormente y a la mayor cobertura del suelo generada por el rastrojo del raigrás previo.

Cuadro 6. Efecto del subsulado y del pastoreo invernal sobre la altura de planta de soja al estado R3 (Zafra 2007, 19/2) y R4 (Zafra 2008-09, 6-3) en tres sistemas de rotación con diferente proporción y largo de pasturas.

TRATAMIENTO	Zafra 2007-08		Zafra 2008-09		
	Rotación Larga	Rotación Corta	Rotación Larga	Rotación Corta	Cultivo Continuo
	-----cm -----				
No Pastoreado	81,5ab	74,5b	92,8ab	93,5ab	86,0a
No Pastoreado Subsulado	75,7b	80,6a	94,4a	95,8ab	88,4a
Pastoreado	74,4b	76,6b	89,6b	93,3b	86,8a
Pastoreado Subsulado	85,7a	80,1a	92,0ab	96,1a	87,0a
Media	79,3A	78,0A	92,2AB	94,7A	87,1B

Valores seguidos por la misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente $p=0,05$

Valores seguidos por la misma letra mayúscula en la misma fila dentro de cada zafra no difieren significativamente $p=0,05$

Componentes de Rendimiento

En ambos zafras hubo una producción de vainas por unidad de superficie de más de 1000/m² (Cuadro 7), que explican los altos rendimientos obtenidos en todas las

situaciones que sobrepasaron largamente los 3000 kg/ha. A pesar que el número de vainas/m² fue el componente de rendimiento mas correlacionado con la variación de productividad en todos los tratamientos ($r= 0.71$), no se detectaron efectos significativos de las rotaciones o de los manejos de suelos sobre este componente, a excepción de CC en la zafra 2008-09. En esta rotación, la soja ubicada sobre las fajas con raigrás pastoreado durante el invierno tuvo una producción de vainas/m² 17% inferior a las fajas donde el raigrás no fue pastoreado.

Cuadro 7. Efecto del subsolado y del pastoreo invernal sobre el número de vainas/m² del cultivo de soja durante 2 zafras en tres sistemas de rotación con diferente proporción y largo de pasturas.

TRATAMIENTO	Zafra 2007-08		Zafra 2008-09		
	Rotación Larga	Rotación Corta	Rotación Larga	Rotación Corta	Cultivo Continuo
	-----vainas/m ² -----				
No Pastoreado	1083a	1020a	1037a	978a	1094a
No Pastoreado Subsolado	1257a	1088a	1075a	1084a	1195a
Pastoreado	1118a	1056a	990a	1109a	928b
Pastoreado Subsolado	1203a	1051a	1157a	1111a	970ab
Media	1165A	1053A	1065A	1070A	1046A

Valores seguidos por la misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente $p=0,05$

Valores seguidos por la misma letra mayúscula en la misma fila dentro de cada zafra no difieren significativamente $p=0,05$

El número de granos/vaina fue 17% mayor en la zafra 2008-09 que en la 2007-08 (Cuadro 8) y fue el componente menos correlacionado con el rendimiento ($r= -0.19$), posiblemente explicado por un mejor régimen de precipitaciones en marzo durante R4-R5. Las vainas sobre la rotación de cultivos continuos tuvieron una mayor cantidad de granos que las rotaciones que incluyeron pasturas. No se observaron efectos del pastoreo ni del subsolado sobre el número de granos/vaina.

Cuadro 8. Efecto del subsolado y del pastoreo invernal sobre el número de grano/vainas del cultivo de soja durante 2 zafras en tres sistemas de rotación con diferente proporción y largo de pasturas.

TRATAMIENTO	Zafra 2007-08		Zafra 2008-09		
	Rotación Larga	Rotación Corta	Rotación Larga	Rotación Corta	Cultivo Continuo
	-----granos/vaina -----				
No Pastoreado	1,78a	1,96a	2,21a	2,10a	2,27a
No Pastoreado Subsolado	1,69a	1,86a	2,05a	2,06a	2,03a
Pastoreado	1,86a	1,82a	2,06a	2,11a	2,27a
Pastoreado Subsolado	1,76a	1,86a	1,92b	1,96a	2,29a
Media	1,77A	1,87A	2,06B	2,06B	2,22A

Valores seguidos por la misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente $p=0,05$

Valores seguidos por la misma letra mayúscula en la misma fila dentro de cada zafra no difieren significativamente $p=0.05$

El peso de los granos estuvo moderadamente correlacionado con el rendimiento ($r= 0.35$), pero fue el componente relativamente más afectado por los tratamientos y las rotaciones

(Cuadro 9). El peso de los granos fue 21% mayor en 2007-08 comparado con 2008-09, posiblemente relacionado a la menor densidad de plantas ya comentada. En la zafra 2007-08 el peso de los granos en la rotación corta fue un 5% mayor que en la rotación larga, también en parte explicado por una menor densidad de plantas obtenidas en la rotación sobre pasturas cortas. Por otro lado, en la última zafra, el peso de los granos de la soja sobre la rotación larga fue mayor que en las rotaciones de mayor intensidad de uso del suelo. Las fajas pastoreadas sin subsolar presentaron el menor peso de grano en 3 de los 5 ensayos analizados.

Cuadro 9. Efecto del subsolado y del pastoreo invernal sobre el peso de granos en el cultivo de soja durante 2 zafras en tres sistemas de rotación con diferente proporción y largo de pasturas.

TRATAMIENTO	Zafra 2007-08		Zafra 2008-09		
	Rotación Larga	Rotación Corta	Rotación Larga	Rotación Corta	Cultivo Continuo
	----- g/mil granos -----				
No Pastoreado	194a	189b	160a	157a	156a
No Pastoreado Subsulado	184ab	199ab	164a	158a	159a
Pastoreado	181b	191b	162a	150b	154a
Pastoreado Subsulado	188ab	205a	163a	160a	155a
Media	187B	196A	162A	156B	156B

Valores seguidos por la misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente $p=0.05$

Valores seguidos por la misma letra mayúscula en la misma fila dentro de cada zafra no difieren significativamente $p=0.05$

Rendimiento de grano

No se observaron diferencias significativas de rendimiento entre las dos últimas zafras (Figura 4, Cuadro 10). El promedio de rendimiento de los ensayos de las dos últimas zafras promedio 3505 kg/ha y fue un 80% y un 67% superior al promedio de rendimiento de los ensayos de las zafras 2005-2006 y 2006-2007, respectivamente.

No se observaron diferencias de productividad entre rotaciones en la zafra 2007-08. En ésta existió un claro efecto (de escasa relevancia agronómica) en ambas rotaciones de aumentar el rendimiento de las fajas pastoreadas mediante el uso del subsolado. Sin embargo, este efecto positivo del subsolado sobre el rendimiento no fue observado en las parcelas que no fueron pastoreadas.

En la zafra 2008-09 la productividad en la rotación larga fue un 9% superior a la obtenida en la rotación de cultivos continuos. Esto cambia la tendencia a lo observado en los primeros años en estos ensayos, donde la productividad del sorgo y la soja fueron generalmente menores sobre pasturas de larga duración que en rotaciones más intensivas a pesar de las diferencias en calidad de suelos observada (Pravia et. al 2007; Pravia et al, 2008). En RL la menor productividad fue observada en las fajas sin pastoreo que fue un 9% inferior a los otros tratamientos de manejo. En RC las fajas pastoreadas sin subsolado tuvieron un rendimiento 8% inferior al promedio de las fajas sin pastoreo. En la rotación con cultivos continuos las fajas pastoreadas que fueron subsoladas tuvieron un rendimiento 8% superior al promedio de los otros 3 tratamientos.

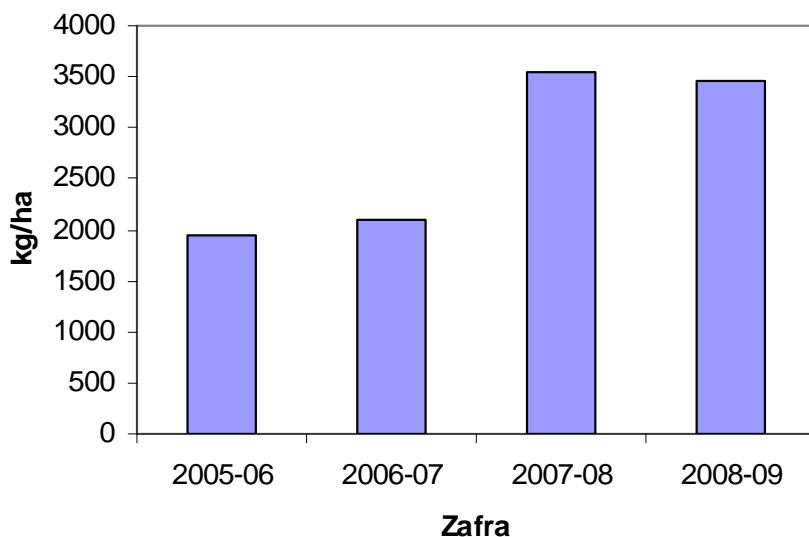


Figura 4. Rendimiento de grano de soja de los ensayos en fajas instalados sobre distintos sistemas de rotaciones en la Unidad Experimental Palo a Pique durante 4 zafras desde 2005.

Cuadro 10. Efecto del subsolado y del pastoreo invernal sobre la productividad del cultivo de soja a escala de chacra en tres sistemas de rotación con diferente proporción y largo de pasturas.

TRATAMIENTO	Zafra 2007-08		Zafra 2008-09		Cultivo Continuo
	Rotación Larga	Rotación Corta	Rotación Larga	Rotación Corta	
	----- kg/ha -----				
No Pastoreado	3645a	3401b	3372b	3465a	3289b
No Pastoreado Subsulado	3666a	3492b	3669a	3563a	3290b
Pastoreado	3448b	3415b	3761a	3243b	3305b
Pastoreado Subsulado	3664a	3646a	3633a	3365ab	3553a
Media	3605A	3490A	3610A	3410AB	3360B

Valores seguidos por la misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente $p=0.05$

Valores seguidos por la misma letra mayúscula en la misma fila dentro de cada zafra no difieren significativamente $p=0.05$

A pesar de las diferencias de rastrojo generadas por el pastoreo invernal, este deprimió el rendimiento con respecto a las fajas no pastoreadas en dos oportunidades de los 5 ensayos realizados en las últimas 2 zafras. Sin embargo, este efecto depresivo del pastoreo invernal del raigrás representó en promedio solo 220 kg/ha de grano de soja de diferencia. Estos resultados confirman en alguna medida los resultados obtenidos por Pravia et al. (2008) con sorgo en el mismo experimento. Los trabajos indicaron que la compactación generada por el pastoreo de los verdeos de invierno en condiciones controladas y de buen piso, no causa mermas de rendimiento importantes en el cultivo siguiente y que la biomasa de rastrojo de raigrás no tuvo mayor incidencia en la conservación de agua del suelo más allá de las etapas iniciales del cultivo.

Aunque se observó que los tratamientos con subsolado tuvieron una tendencia a mejorar la implantación del cultivo y promover un mayor desarrollo inicial permitiendo mayor extracción de agua en el perfil, el incremento de rendimiento fue muy modesto cuando hubo respuesta. El uso del subolador permitió aumentar un 7% el rendimiento de las parcelas pastoreadas en 3 de los 5 ensayos, superando incluso en dos de estos casos a la productividad de las parcelas no pastoreadas. De todas formas, el impacto productivo de subsolar cuando hubo respuesta fue de solo 230 kg/ha en promedio. Similar a lo encontrado para sorgo (Pravia et al., 2003), este nivel de respuesta no justifica el uso de esta herramienta ya que la misma está muy por debajo de los resultados obtenidos por Martino (2001) en el litoral agrícola en otro tipo de suelos y cultivos.

Un aspecto importante de resaltar es que en la zafra 2008-09 se observó por primera vez que el rendimiento de la soja sembrada en una rotación con pasturas de larga duración fue mayor que el rendimiento en un esquema de agricultura continua sin laboreo. La merma de rendimientos de los cultivos a la salida de las praderas de larga duración se había observado en ambos cultivos de la secuencia en zafras anteriores. Esta es una de las principales limitantes que manifiestan los agricultores para rotar con pasturas en sistemas de siembra directa a pesar de los beneficios en calidad de suelos que se obtienen. Este efecto ha sido más evidente en el 1er cultivo de cabecera (sorgo), pero también se ha manifestado hasta el 2do cultivo inclusive, en este caso la soja y ha estado atribuido a la degradación de la pastura, presencia de malezas, particularmente gramilla y compactación de la superficie entre otros.

No obstante los altos rendimientos promedios obtenidos en las dos últimas zafras entre los tratamientos evaluados, puede apreciarse la alta variabilidad de rendimientos a lo largo de las fajas en cada una de las chacras (Figura 5) y las diferencias de productividad que existen en algunos potreros entre las zonas topográficas (Cuadro 11). En este sentido puede apreciarse que en tres de los cinco ensayos hay una clara tendencia a menores rendimientos de soja en la zona alta del terreno donde se encuentra el Planosol asociado a blanqueales comparado con la ladera media o la ladera baja del terreno donde domina el Argisol; la excepción es la rotación larga en 2008-09 que no tiene una zona realmente plana.

Los análisis de regresión entre atributos edáficos y topográficos con la productividad de soja de 22 sitios en cada ensayo lograron explicar una parte de la variabilidad de rendimientos en 3 de los 5 casos. No se encontraron modelos significativos para el potrero de cultivos continuos y de la rotación corta en la última zafra. El contenido de P y la conductividad eléctrica del suelo explicaron el 71% de la variabilidad de rendimiento en la rotación larga en 2007-08, mientras que el índice compuesto topográfico explicó el 40% de la variación de rendimiento de la rotación corta en esa zafra. Por último, el contenido de P explicó un modesto 23% de la variabilidad de rendimiento en la soja sembrada sobre la rotación larga en 2008-09.

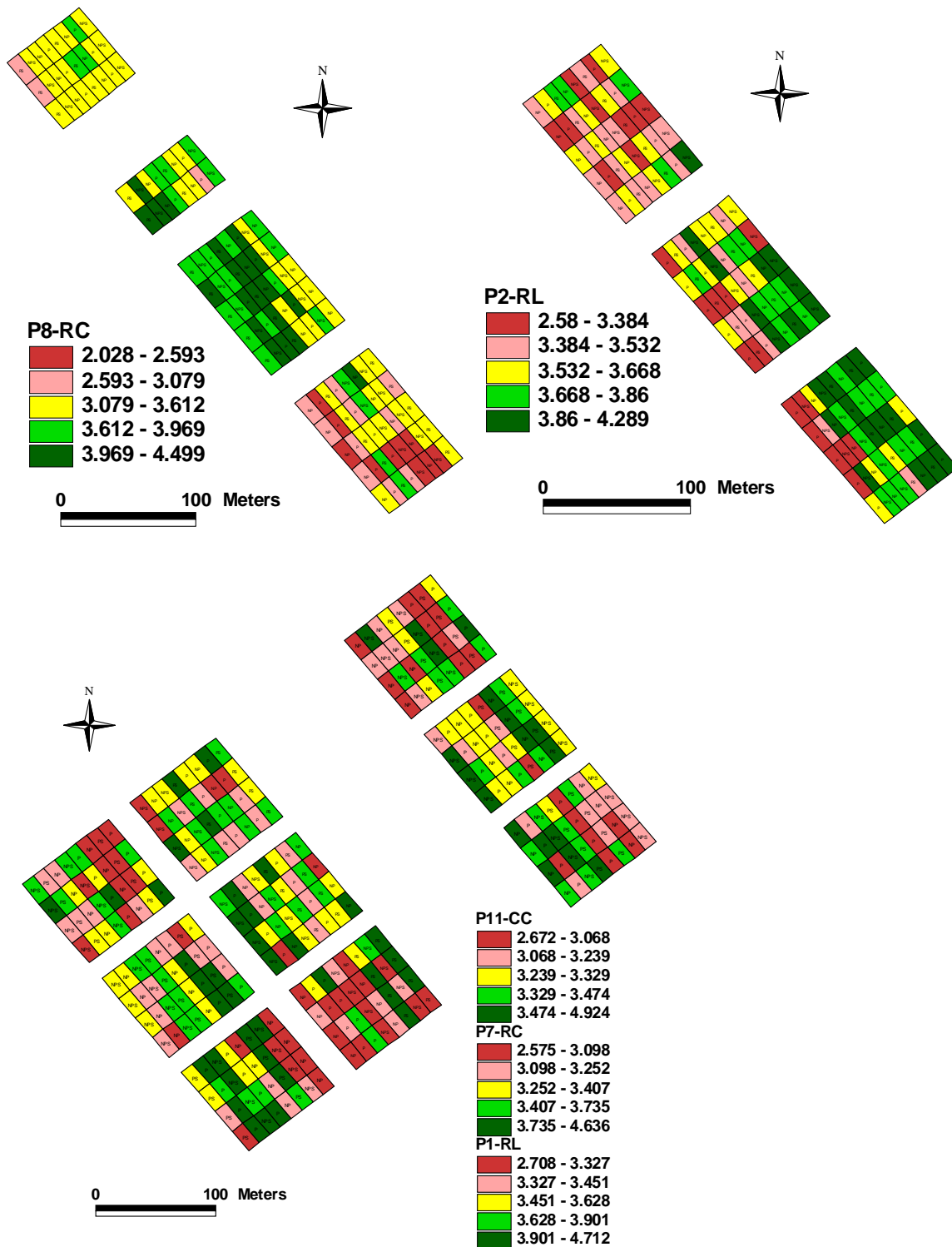


Figura 5. Mapas de rendimiento del cultivo de soja generados por un monitor de rendimiento en distintas rotaciones durante 2 zafas.

Cuadro 11. Productividad del cultivo de soja a lo largo de una toposecuencia en tres sistemas de rotación con diferente proporción y largo de pasturas durante 2 zafras.

TRATAMIENTO	Zafra 2007-08		Zafra 2008-09		
	Rotación Larga	Rotación Corta	Rotación Larga	Rotación Corta	Cultivo Continuo
	----- kg/ha -----				
Alto	3690a	3070c	3470b	3310b	3320a
Ladera Media	3640a	3890a	3630ab	3550a	3440a
Ladera Baja	3490b	3540b	3730a	3370b	3310a

Valores seguidos por la misma letra minúscula en la misma columna no difieren significativamente $p=0.05$

CONSIDERACIONES FINALES

Luego de cuatro años contrastantes en términos climáticos, la secuencia sorgo-soja mostró ser una alternativa viable y estable para su inclusión en sistemas de rotaciones de intensificación variable con siembra directa en los suelos de lomadas. Los rendimientos promedio de sorgo y soja en los últimos 4 años en los ensayos de rotaciones a escala de chacra fueron de 6000 y 2770 kg/ha respectivamente. Si bien la soja tuvo una alta respuesta productiva ante ambientes favorables como los ocurridos en las últimas dos zafras con rendimientos del orden de 3500 kg/ha, ante años climáticos complicados como en 2006-07, se pudieron obtener rendimientos aceptables en el orden de 2100 kg/ha.

A diferencia del sorgo, la soja fue ligeramente afectada en algunas situaciones por el pastoreo del raigrás que le precedió. El hecho que los efectos negativos hayan sido esporádicos, de escasa magnitud y que hayan ocurrido sólo en años climáticamente favorables, relativiza al pisoteo animal como un factor de compactación importante y a la biomasa de rastrojo como un factor relevante en la dinámica de agua más allá de las etapas iniciales del cultivo. Si bien el subsolado logró mitigar el efecto negativo del pisoteo cuando se constató, el escaso impacto sobre el rendimiento de ambos y el costo operativo no justificaría su uso más allá de situaciones complejas constatadas eventualmente a la salida de praderas degradadas.

El análisis de los efectos de los tratamientos en zonas de distinta productividad aparece como una cuestión relevante con el avance de las tecnologías de la agricultura de precisión. Es indudable que con el avance de las tecnologías de la información y los sistemas de geoposicionamiento el manejo sitio específico de suelos y cultivos está al alcance de la mano.

Es necesario perseverar en la búsqueda de alternativas sustentables de rotación para el cultivo de soja en la región que incluyan cultivos de alta producción de rastrojos de lenta descomposición como el sorgo o el trigo y en la integración de estos cultivos a sistemas de rotación con pasturas, al menos de corta duración, para mantener la capacidad productiva y calidad del suelo en el mediano y largo plazo.

REFERENCIAS

García-Préchac, F.; Ernst, O.; Siri-Prieto, G.; Terra, J. 2004. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil Till. Res.* 77:1-13.

Martino, D. 2001. Manejo de Restricciones físicas en sistemas de siembra directa. In: Diaz Rosello (ed.). *Siembra Directa en el cono sur*. Montevideo, IICA/PROCISUR. Documentos. pp 225-257.

Pedersen, P. 2004. Soybean growth and development. Iowa State University. University Extension. Pp 28.

Pravia, M.V., Terra, J.A, Roel, A., Correa J.M. 2007. Impacto de la intensidad de uso del suelo sobre la productividad del cultivo de sorgo y soja en lomadas del Este. INIA. Serie Actividades de Difusión 499, pp 8-28.

Pravia, M.V., Terra, J.A, Roel, A., Correa J.M. 2008. Impacto de la intensidad de uso del suelo sobre la productividad del cultivo de sorgo en lomadas del Este. INIA. Serie Actividades de Difusión 538.

Littell, R.C., G.A. Milliken, W.W Stroup, and R.D. Wolfinger. 1996. SAS system for mixed models. SAS Institute, Cary, NC, 633pp.