

**Baeza, S.¹; Gallego, F.²;
Lezama, F.^{1,3}; Altesor,
A.² y Paruelo J.^{2,4}**

¹Unidad de Sistemas ambientales,
Facultad de Agronomía, UDELAR.
sbaeza@fagro.edu.uy

²Grupo Ecología de Pastizales
(GEP), Instituto de Ecología y
Ciencias Ambientales, Facultad de
Ciencias, UDELAR.

³INIA, Estación Experimental Treinta
Tres.

⁴Laboratorio de Análisis Regional y
Teledetección, IFEVA, Facultad de
Agronomía, Universidad de Buenos
Aires.

CAPÍTULO II. Cartografía de los pastizales naturales en las regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas

Proyecto FPTA 175

Período de Ejecución: Mar. 2007-Mar. 2010

RESUMEN

En este trabajo describimos la variación espacial de los pastizales naturales de las 4 regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas, a partir de clasificaciones supervisadas de imágenes de satélite y censos de vegetación realizados a campo. Realizamos entre 54 y 110 censos de vegetación en cada unidad geomorfológica. Los censos fueron georreferenciados y utilizados para clasificar imágenes Landsat TM de dos fechas distintas (primavera-verano) aprovechando diferencias fenológicas en la vegetación. En total se cartografiaron aproximadamente 8.000.000 ha, un 46% del territorio nacional. El 81,6% de la superficie cartografiada correspondió a pastizales naturales (6.6 millones de ha). La cobertura de pastizales naturales fue mínima (69,3%) en la Cuenca Sedimentaria del Noreste y máxima (91,5%) en la Cuesta Basáltica. Los mapas generados discriminan entre dos unidades de pastizal en todas las regiones analizadas. Estas diferentes unidades mostraron una asociación a escala regional con las características de los suelos, fundamentalmente con el agua potencialmente disponible en los mismos.

Las cartografías generadas presentaron un acierto global de entre 95,3 y 99,4%. Este trabajo constituye un valioso aporte ya que además de llenar un vacío de conocimiento acerca de los pastizales naturales de la región, complementa la información disponible para un correcto manejo y conservación de nuestros recursos naturales.

INTRODUCCIÓN

La vegetación es el soporte para, prácticamente, todo el resto de la vida del planeta; nos provee de alimentos, fibras, combustible, etc. La caracterización de la heterogeneidad de la vegetación (la descripción de sus atributos estructurales y funcionales en el espacio y en el tiempo) es un paso ineludible en la definición de prácticas de uso y manejo de

los recursos naturales, planificar desarrollos agropecuarios y/o medidas destinadas a la conservación (Hansen *et al.*, 2000, IPCC, 2000, McGuire *et al.*, 2001). Esta caracterización de la vegetación, puede realizarse en base a componentes estructurales o en base a su funcionamiento. Las aproximaciones estructurales se centran en la descripción de comunidades a partir de las especies que las componen, o a la caracterización de

grandes extensiones de territorio a partir de la fisonomía de la vegetación o la presencia de especies dominantes (Terradas, 2001). Por otro lado, las aproximaciones funcionales van desde la identificación y abundancia relativa de tipos funcionales de plantas (Lavorel *et al.*, 1997, Gitay y Noble, 1997), a la caracterización del funcionamiento ecosistémico (i.e.: Intercambio de materia y energía en los ecosistemas) (Paruelo *et al.*, 2001, Guershman *et al.*, 2003a, Baeza *et al.*, 2006).

La distribución espacial de la vegetación es otro componente de su heterogeneidad y puede definirse como la variación en la composición de especies dentro de un área determinada, representando el componente geográfico en la diversidad de especies vegetales (Chaneton, 2005). La distribución geográfica de la vegetación sobre la superficie de la tierra tiene un rol central en muchos procesos ecosistémicos. La cobertura del suelo y su uso (las modificaciones que los humanos hacemos de la cobertura original) son los principales controles en el espacio y en el tiempo del ciclado e intercambio de carbono, energía y agua, dentro y entre los diferentes sistemas de la Tierra (Townshend *et al.*, 1992). El uso/cobertura del suelo regula también, muchos de los servicios que los ecosistemas proveen a los humanos: purificación del aire y del agua, regulación del clima y los flujos hidrológicos, regeneración de la fertilidad de los suelos, producción y mantenimiento de la biodiversidad, etc (Daily *et al.*, 1997). Finalmente, el cambio en el uso del suelo ha sido identificado como uno de los principales controles del fenómeno conocido como cambio climático global (Foley *et al.*, 2005). Por otro lado, la cuantificación de la cobertura/uso del suelo tiene una gran relevancia estratégica. Dado que la superficie agrícola es el principal control de los volúmenes producidos en años climáticamente normales, numerosos actores políticos, económicos y sociales requieren de esa información para planificar acciones, reducir la incertidumbre y/o mejorar la asignación de recursos (Paruelo *et al.*, 2004). A pesar de su importancia ecológica y económica las caracterizaciones del uso/cobertura del suelo distan mucho de ser completas, fundamentalmente en Uruguay.

En los últimos años los sensores a bordo de satélites se han convertido en la herramienta ideal para caracterizar el uso/cobertura del suelo sobre grandes extensiones de territorio (Townshend *et al.*, 1991), desde mapas locales con gran nivel de detalle (Clark *et al.*, 2004) hasta mapas globales de menor resolución espacial (DeFries *et al.*, 1998). La cobertura sinóptica, espacialmente continua y a intervalos regulares de tiempo, que las imágenes de satélite obtienen de la superficie terrestre es la base de su amplia utilización para la cartografía del uso y cobertura del suelo (Myneni *et al.*, 1997). La capacidad de discriminar entre diferentes coberturas del suelo a partir de imágenes tomadas por satélite viene dada por la respuesta diferencial de los diferentes materiales en diferentes porciones del espectro electromagnético (Curran, 1985). En conjunto, la fitosociología y la teledetección brindan la posibilidad de describir la distribución espacial de las comunidades vegetales; la fitosociología, reconociendo áreas homogéneas en base a la composición de especies; la teledetección reconociendo áreas homogéneas en base al comportamiento espectral mediante información espacialmente continua.

El territorio uruguayo se encuentra completamente incluido dentro de la región biogeográfica conocida como Pastizales del Río de la Plata, una de las regiones de pastizales más extensas del mundo (Soriano, 1991). Las descripciones espacialmente explícitas de la cobertura y uso del suelo en los pastizales del Río de la Plata son relativamente escasas (Guershman *et al.*, 2003b, Baldi, 2006, Baldi y Paruelo, 2008). Estos trabajos generalmente agrupan bajo una única clase de «pastizal» a comunidades vegetales heterogéneas desde el punto de vista florístico y/o fisonómico, limitándose a separar únicamente el uso/cobertura de la tierra en grandes categorías (cultivos de invierno y verano, forestación, pastizales, etc.).

Los antecedentes en Uruguay sobre caracterizaciones de uso/cobertura del suelo son aún más escasos. Existen clasificaciones que separan grandes tipos de vegetación definidos a partir de su fisonomía (monte ribereño, monte serrano, monte de parque, praderas, etc.)

(Carrere, 1990), la presencia de ciertas especies dominantes (Rosengurtt, 1944, Soriano 1991); el tipo de suelo o el sustrato geológico (Millot, 1987, Sganga, 1994). Estos trabajos no tienen un protocolo de observación documentado y/o identifican fundamentalmente la vegetación potencial.

El objetivo general de este trabajo fue cartografiar el uso y cobertura del suelo de las diferentes regiones geomorfológicas de Uruguay predominantemente ganaderas, con especial énfasis en la distribución de las diferentes unidades de pastizal natural. Sus objetivos específicos fueron:

- 1) Cartografiar el uso/cobertura del suelo en las regiones geomorfológicas del Cuesta Basáltica, Región Centro-Sur (Cristalino), Sierras del Este y Cuenca Sedimentaria del Noreste.
- 2) Analizar la distribución espacial de las principales unidades de vegetación de los pastizales naturales en cada unidad geomorfológica.

- 3) Analizar el tipo y grado de avance de la frontera agrícola sobre los pastizales naturales de las diferentes regiones analizadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio considerada en este trabajo abarca las regiones de Uruguay predominantemente ganaderas, o sea aquellas que mayoritariamente estaban cubiertas por pastizales naturales en el último censo agropecuario (Figura 1a). De acuerdo a Millot *et al.* (1987) estas regiones son: Cuesta Basáltica, Cuenca Sedimentaria del Noreste, Región Centro-Sur (Cristalino) y Sierras del Este. La división entre regiones siguió el criterio geomorfológico y la delimitación espacial propuesta por Panario (1987) (Figura 1b). En conjunto, estas regiones ocupan una superficie aproximada de 11.7 millones de hectáreas, correspondientes a más del 66,3% del territorio

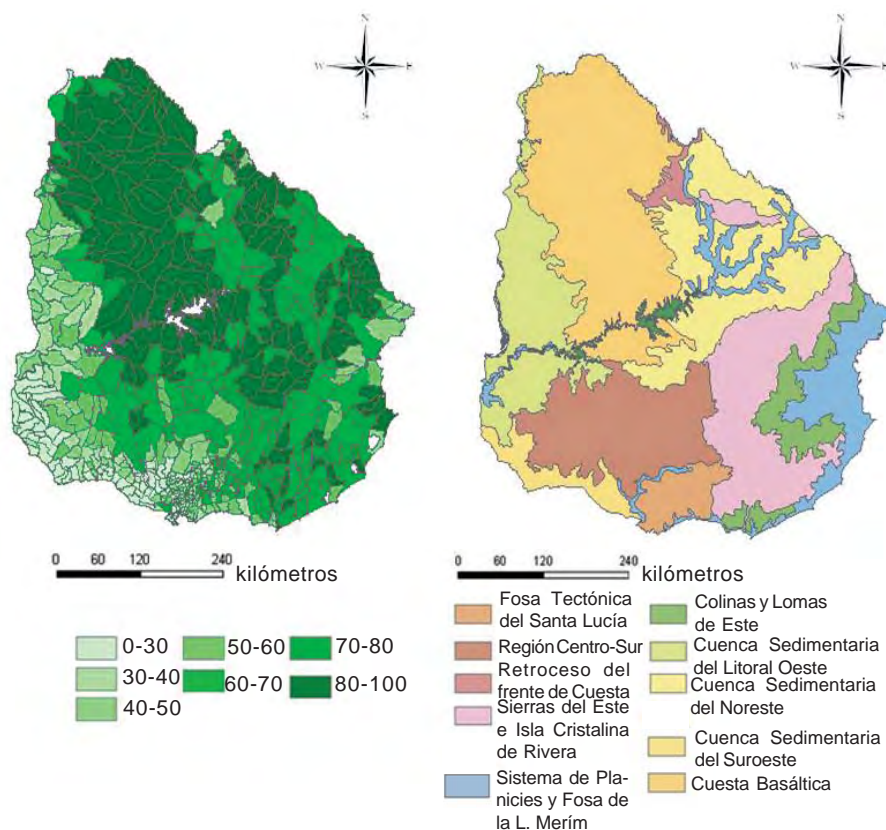


Figura 1. a) Porcentaje de pastizales naturales por unidad censal; Elaboración propia a partir de datos del censo general agropecuario del año 2000 (MGAP, DIEA 2000). b) Regiones geomorfológicas del Uruguay según lo propuesto por Panario (1987).

nacional. Más adelante se detallan las principales características de las regiones cartografiadas.

La heterogeneidad de la vegetación herbácea de la zona de estudio ha sido descrita por Lezama *et al.* (2010 este volumen) utilizando el método fitosociológico a partir de 313 censos de vegetación distribuidos en las diferentes regiones analizadas. En ese trabajo, Lezama *et al.*, identifican, dependiendo de la región considerada, entre 2 y 5 unidades de pastizales naturales. Una descripción completa del método fitosociológico y las unidades de vegetación discriminadas puede verse en dicho capítulo.

Procesamiento y clasificación de las imágenes

Para analizar la distribución espacial de la cobertura/uso del suelo se realizaron clasificaciones supervisadas de imágenes Landsat TM, cartografiando de manera independiente cada una de las regiones analizadas. En total se utilizaron 8 escenas Landsat y dos fechas por escena (primavera y verano, en total 16 imágenes), de forma de captar momentos contrastantes en la fenología de la vegetación. Estas imágenes tienen una resolución espacial de 30 x 30 m y están conformadas por siete bandas, cada una de ellas registra la intensidad de la energía reflejada y/o emitida por los objetos de la superficie en diferentes porciones del espectro electromagnético.

Las imágenes fueron corregidas geométricamente utilizando 30 o más puntos de control terrestres homogéneamente distribuidos en el área de estudio y con un error asociado de 0,5 píxeles. El método del re-muestreo utilizado fue el del vecino más cercano (nearest neighbor) de forma de no alterar la información espectral. Para cada escena una de las imágenes fue georeferenciada en la proyección más usada en Uruguay (Yacaré: Transverse Mercator; Elipsoide; Hayford, internacional 1924; Datum, Yacaré) y la otra corregida a la primera, de forma de compatibilizar la información espectral con el resto de la información digital disponible en el país (Carta de suelos, geomorfología, datos del censo agropecuario, etc.). Las imágenes fueron corre-

gidas radiométrica y atmosféricamente para lograr que la información espectral sea comparable en tiempo y espacio (Chuvienco, 2002) La corrección radiométrica se realizó a partir de la información provista en las imágenes y la corrección atmosférica se realizó separando el efecto producido por la dispersión Rayleigh de acuerdo a lo propuesto por Chander y Markham (2003) y Chander *et al.* (2007). Las imágenes se recortaron de manera de caracterizar exclusivamente a las regiones geomorfológicas consideradas en el estudio. Se realizaron compuestos multitemporales (superposición de las imágenes de las diferentes fechas en una misma escena) y mosaicos (ensamblaje de distintas imágenes que cubren, al menos, parte del mismo territorio) para cada región geomorfológica. Para cada región cartografiada se contó entonces con una imagen multitemporal de 12 bandas (6 bandas reflectivas por cada fecha; todas las bandas del sensor menos la térmica), que cubría toda el área de interés. El procesamiento digital de las imágenes se llevó a cabo mediante el programa ENVI 4.6-IDL 7.0.

El primer paso para llevar a cabo una clasificación supervisada es el desarrollo de un esquema conceptual de clasificación. Éste se define como el conjunto de clases o categorías de interés para ser identificadas y discriminadas (Curran, 1985). Por ello se definieron categorías que corresponden a las unidades de pastizales naturales definidas en el análisis fitosociológico, además de un conjunto de coberturas/ usos del suelo que permitieran caracterizar el resto de la heterogeneidad de las áreas, (ej.: monte nativo, forestación, cultivos de invierno y verano, agua, etc.). Para cada una de las clases definidas se digitalizaron polígonos de entrenamiento para realizar las clasificaciones y polígonos de control para evaluarlas con datos independientes. En el caso de las categorías de pastizal, los polígonos de entrenamiento y control corresponden a los «stands» de vegetación relevados durante los censos realizados a campo, cuya posición en el espacio se registró mediante GPS. Los polígonos de entrenamiento y control de las restantes categorías de cobertura/uso del suelo se generaron mediante fotointerpretación de las imágenes.

En todas las regiones analizadas se utilizó la información espectral de 12 bandas reflectivas (6 bandas en cada fecha) de todos los píxeles incluidos en los polígonos de entrenamiento y máxima verosimilitud como regla de decisión para clasificar todos los píxeles del área de estudio (Lillesand y Kiefer, 1994). El método de máxima verosimilitud utiliza el vector de medias y la matriz de covarianza de los píxeles de las áreas de entrenamiento de cada clase para asignar los píxeles de la imagen a cada una de las clases definidas en función de su probabilidad de pertenencia. Cada píxel de la imagen es asignado a la clase más probable a partir de un umbral definido por el usuario, en este caso del 90%. Este algoritmo de clasificación es el más utilizado en teledetección, por su robustez y por ajustarse con rigor a la disposición original de los datos (Chuvieco, 2002).

A cada una de las clasificaciones resultantes se le aplicó un filtro modal móvil de 3 x 3 píxeles. Este tipo de filtro es comúnmente utilizado para suavizar la apariencia de «sal y pimienta» que aparece en las clasificaciones. El fenómeno se observa frecuentemente en clasificaciones digitales cuando existe una excesiva fragmentación. Suele ocurrir que píxeles de una cierta categoría se encuentran salpicados por píxeles asignados a otras categorías, perdiéndose su unidad geográfica y dificultando la interpretación y posterior representación cartográfica. El pre-procesamiento de las imágenes y las clasificaciones supervisadas se llevó a cabo mediante los programas ENVI 4.6-IDL 7.0 y ERDAS Imagine 8.7.

Evaluación de las clasificaciones

Todas las clasificaciones fueron evaluadas mediante la construcción y análisis de una matriz de contingencia entre el resultado de la clasificación (filas) y la información de los píxeles correspondientes a los polígonos de control digitalizados (información de referencia o «verdad de campo», representada en las columnas) (Congalton, 1991). Esto permitió calcular el acierto global, el coeficiente Kappa y la precisión del productor y del usuario. El acierto global fue calculado

dividiendo el número de elementos (píxeles) correctamente clasificados (diagonal de la matriz) entre el número total de píxeles incluidos en el proceso de evaluación. El coeficiente Kappa mide la diferencia entre la clasificación realizada y la esperada simplemente por azar. Un valor de Kappa igual a 1 indica un acuerdo pleno entre la realidad y el mapa, mientras un valor cercano a 0 sugiere que el acuerdo observado es puramente debido al azar. Finalmente, se debe tener en cuenta que el acierto global puede ocultar importantes diferencias entre categorías, que esconden niveles de exactitud muy diversos. Por ello, se analizan las celdas marginales de la matriz calculando dos tipos diferentes de precisión; la del productor y la del usuario. La precisión del productor se calculó dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados de una categoría entre el número total de píxeles de esa categoría derivados de los datos de referencia (columnas de la matriz). La precisión del usuario se calculó dividiendo el número total de píxeles correctamente clasificados de una categoría entre el número total de píxeles que fueron clasificados dentro de esa categoría (filas de la matriz).

Análisis de la distribución espacial de las diferentes coberturas/ usos del suelo

Para analizar la distribución espacial de las diferentes clases de uso/cobertura del suelo y sus potenciales controles ambientales, fundamentalmente las clases correspondientes a pastizales naturales, comparamos las diferentes cartografías generadas con dos bases de datos en formato vectorial: La carta reconocimiento de suelos del Uruguay (Altamirano *et al.*, 1976) y el Agua Potencialmente Disponible Neta (APDN) de los diferentes grupos CONEAT (Molfino, 2009). Los grupos CONEAT separan áreas homogéneas en función de su capacidad productiva en términos de lana y carne bovina y ovina en pie (MGAP/DGRNR/ CONEAT, 1979). El trabajo de Molfino (2009) calcula el APDN en los diferentes grupos CONEAT a partir de la granulometría del suelo, la profundidad de los diferentes horizontes y el contenido de materia orgánica de los perfiles de suelos

representativos de cada grupo CONEAT; teniendo en cuenta además, la rocosidad, pedregosidad, relieve, grado de erosión y alcalinidad de las diferentes unidades cartográficas de los grupos CONEAT. Los cálculos de agua disponible realizados por Molfino (2009) fueron asignados a cada una de las unidades cartográficas CONEAT en formato vectorial. Mediante la superposición de las cartografías generadas en este trabajo con la información vectorial arriba descrita se obtuvo la cantidad de superficie de cada cobertura / uso del suelo asociada a cada tipo de suelo y la asociación de las diferentes clases cartografiadas a un gradiente de disponibilidad de agua

Finalmente evaluamos y comparamos el grado de modificación antrópica mediante acciones agropecuarias intensivas (agricultura y forestación) entre las diferentes regiones geomorfológicas analizadas. Se analizaron las clasificaciones resultantes cuantificando el porcentaje del área de estudio ocupada por forestación y agricultura (esta clase incluye: cultivos de invierno y verano, ciclos de doble cultivo, suelo desnudo en ambas estaciones y praderas implantadas). Las operaciones SIG fueron realizadas con los programas ArcMap-ArcGis 8.3 y Arc View 3.2.

A continuación se detallan las características, materiales y métodos de cada región analizada. Descripciones más detalladas a las provistas en este capítulo sobre la definición y características de los pastizales naturales de cada región pueden verse en Lezama *et al.* (2011 este número).

Cuesta Basáltica

La región del Basalto ó Cuesta Basáltica se encuentra en la mitad norte de Uruguay en su porción central, entre los 31° 35' y 32° 12' de latitud sur y los 56° 12'-57° 20' de longitud oeste. Ocupa una superficie aproximada de 4.39 millones de ha (21% de la superficie del país). Se extiende en gran parte por los departamentos de Artigas, Salto y Paysandú, este de Río Negro, norte de Durazno y suroeste de Tacuarembó. Se caracteriza por presentar un relieve que desciende de la Cuchilla de Haedo hasta las proximidades del Río Uruguay, con un paisaje de

sierras, seguido de una zona de colinas y lomadas (Millot *et al.*, 1987).

Para la clasificación supervisada de esta región se utilizaron 2 escenas Landsat (224-81 y 224-82) y dos fechas por cada una (25/09/09 y 13/02/09), discriminando 9 coberturas/ usos del suelo diferentes: 2 unidades de pastizales naturales: Pastizales de Basalto 1 (P. Bas1) y Pastizales de Basalto 2 (P. Bas2); Monte nativo; Cultivos de invierno y verano; Doble cultivo (un cultivo de invierno y otro de verano en la misma estación de crecimiento); Suelo desnudo en ambas fechas de adquisición de las imágenes; Forestación y Agua. P. Bas1, comprende las unidades B-I y B-II del trabajo de Lezama *et al.* (2010 este volumen) y está conformada por pastizales abiertos (con baja cobertura vegetal) sobre suelos superficiales y estepas de litófitas sobre afloramientos rocosos. P. Bas2 corresponde a la unidad B-III de Lezama *et al.*, (2010 este volumen) y está conformada por pastizales densos (con alta cobertura vegetal) sobre suelos medios y profundos. Se digitalizaron 39 polígonos de entrenamiento y 21 de control para las unidades de pastizal, a partir de los censos de vegetación georreferenciados. Aquellos censos en los que el tamaño del stand era menor a media hectárea no fueron considerados como insumo para la clasificación. Para el resto de las coberturas/ usos del suelo considerados se digitalizaron, mediante fotointerpretación de las imágenes, 140 polígonos de entrenamiento y 98 de control.

Cuenca Sedimentaria del Noreste

La zona de estudio se encuentra al Noreste de Uruguay, ocupando una superficie aproximada de 2.52 millones de ha (14,3 % de la superficie del país). Se extiende en gran parte por los departamentos de Durazno, Tacuarembó, Rivera y Cerro Largo. Los suelos dominantes son praderas arenosas (luvisoles y acrisoles) de 50-60 cm de espesor, de color pardo amarillento o grisáceo. Los suelos más profundos se encuentran en lomas y laderas altas, apareciendo suelos superficiales donde el relieve es más fuerte (Millot *et al.*, 1987).

Para la clasificación supervisada se utilizaron 2 escenas Landsat (223-82 y 223-83) y dos fechas por cada una (18/11/08 y 21/01/09), discriminando 8 coberturas/ usos del suelo diferentes: 2 unidades de pastizales naturales: Pastizales de la Cuenca Sedimentaria del Noreste 1 (P. SedNE1) y Pastizales de la Cuenca Sedimentaria del Noreste 2 (P. SedNE2); Monte nativo; Cultivos de verano; Praderas implantadas; Suelo desnudo en ambas fechas de adquisición de las imágenes; Forestación y Agua. P. SedNE1 corresponde a la unidad CSNE-I de Lezama *et al.* (2010 este volumen) y está conformada por pastizales abiertos sobre suelos superficiales. P. SedNE2 corresponde a la unidad CSNE-II de Lezama *et al.* (2010 este volumen) y está conformada por pastizales densos sobre suelos medios y profundos. Se digitalizaron 44 polígonos de entrenamiento y 18 de control para las unidades de pastizal a partir de los censos georreferenciados. Para el resto de las coberturas/ usos del suelo considerados se digitalizaron, mediante fotointerpretación de las imágenes, 126 polígonos de entrenamiento y 83 de control.

Sierras del Este

La región Sierras del Este se encuentra al Este de Uruguay, entre los 32° 04' - 34° 54' de latitud Sur y los 53° 43' - 55° 36' de longitud oeste, ocupando una superficie aproximada de 2.52 millones de ha (14,3% de la superficie del país). Se extiende en gran parte por los departamentos de Treinta y Tres, Lavalleja, Maldonado, Cerro Largo, noreste de Florida, centro sur de Rocha y este de Durazno. Se caracteriza por presentar una gran heterogeneidad en cuanto al relieve, afloramientos rocosos, pendiente y profundidad. Visiblemente se pueden distinguir dos zonas; una con sierras rocosas, relieve fuerte, afloramientos rocosos muy variables y predominancia de suelos superficiales a muy superficiales y otra con sierras no rocosas, pendientes menores, afloramientos rocosos con un área menor al cinco por ciento y suelos de bajo espesor. (Millot *et al.*, 1987).

Para la clasificación supervisada se utilizaron 2 escenas Landsat (Path: 223-83 y 223-84) y dos fechas por cada una

(29/09/07 y 04/02/08), discriminando 9 coberturas/ usos del suelo diferentes: 2 unidades de pastizales naturales: Pastizales de Sierras 1 (P. Sie1) y Pastizales de Sierras 2 (P. Sie2); Monte nativo; Cultivos de invierno y verano; Doble cultivo; Afloramientos rocosos; Forestación y Agua. P. Sie1, comprende las unidades S-II y S-IV del trabajo Lezama *et al.* (2010 este volumen) y está conformada por pastizales abiertos sobre suelos superficiales. P. Sie2, comprende las unidades S-I y S-V del trabajo Lezama *et al.* (2010 este volumen) y está conformada por pastizales densos sobre suelos medios y profundos.

Se digitalizaron 56 polígonos de entrenamiento y 19 de control para las unidades de pastizal a partir de los censos georreferenciados. Para el resto de las coberturas/ usos del suelo considerados se digitalizaron, mediante fotointerpretación de las imágenes, 153 polígonos de entrenamiento y 120 de control.

Región Centro-Sur

La Región Centro-Sur (Cristalino) se encuentra en la mitad sur de Uruguay entre los 33° 00' - 34° 36' de latitud Sur y los 55° 28' - 58° 05' de longitud oeste, ocupando una superficie aproximada de 2.25 millones de hectáreas (12,8% de la superficie del país). Se extiende en gran parte por los departamentos de Florida y Flores, sur de Durazno, noreste de Colonia y algunas áreas de Soriano, San José y Cerro Largo. Se caracteriza por presentar un relieve ondulado con predominancia de lomas irregulares de formas redondeadas, y por comprender suelos superficiales y profundos sobre basamento cristalino y sedimentos cuaternarios (Millot *et al.*, 1987).

Para la clasificación supervisada se utilizaron 2 escenas Landsat (224-83 y 224-84) y dos fechas por cada una (30/11/04 y 17/01/05), discriminando 8 coberturas/ usos del suelo diferentes: 2 unidades de pastizales naturales: Pastizales de Cristalino 1 (P. Cris1) y Pastizales de Cristalino 2 (P. Cris2); Monte nativo; Cultivos de invierno y verano; Suelo desnudo en ambas fechas de adquisición de las imágenes; Forestación y Agua. A diferencia de las regiones anteriores, las

unidades de pastizal del Cristalino no tienen una correspondencia con las presentadas por Lezama *et al.* (2010 este volumen). Debido a problemas para la discriminación espectral de las clases de pastizal, en esta región se optó por realizar una clasificación fitosociológica que además de la presencia - ausencia de especies tuviera en cuenta la abundancia relativa de cada una de ellas. Las unidades de pastizal de cristalino son entonces, definidas *ad hoc* para la realización de la cartografía; por este motivo son definidas aquí con más detalle.

La unidad P. Cris1 tiene como especies indicadoras a *Eragrostis neesi*, *Piptochaetium montevidense*, *Aristida murina*, *Chevreulia sarmentosa*, *Paspalum notatum*, *Andropogon ternatus* y *Aristida venustula*. Esta unidad presenta alta variación fisonómica, desde stands con un sólo estrato herbáceo de 5 cm hasta stands con dos estratos, uno alto de 30 cm de altura dominado por subarborescentes y otro bajo de 5 cm dominado por gramíneas prostradas. Ocupa preferentemente áreas convexas y laderas de pendiente leve a pronunciada y presenta una cobertura vegetal del suelo media alta (moda 80, mínima 50 y máxima 100).

La unidad P. Cris2 tiene como especies indicadoras a *Lolium multiflorum*, *Stipa charruana* y *Paspalum dilatatum*. La fisonomía representativa corresponde a un estrato de 30 cm de altura dominado por gramíneas erectas y un estrato bajo de 5 cm dominado por gramíneas prostradas. La cobertura vegetal del suelo es alta (moda 90, mínima 80 y máxima 100) y ocupa preferentemente superficies planas altas del paisaje y laderas de pendiente moderada.

Se digitalizaron 31 polígonos de entrenamiento y 27 de control para las unidades de pastizal a partir de los censos georreferenciados. Para el resto de las coberturas/ usos del suelo considerados se digitalizaron, mediante fotointerpretación de las imágenes, 65 polígonos de entrenamiento y 39 de control.

RESULTADOS

Las cartografías generadas describen el uso/cobertura del suelo de, aproximadamente, 8 millones de ha (46% del

territorio nacional). El 81,6% de la superficie cartografiada correspondió a pastizales naturales (6.6 millones de ha). El resto de la superficie estuvo ocupada por agricultura y forestación en un 15,8% y monte nativo 1,3%; el resto de las categorías definidas son marginales en el paisaje y ocupan proporciones muy bajas del área cartografiada (Figura 2). Dependiendo de la región analizada los pastizales naturales representan entre un 69,3 y 91,4% de la superficie relevada. Las cartografías generadas presentaron un acierto global de entre 95,3 y 99,4%, y el coeficiente Kappa varió entre 0,94 y 0,99. A continuación se detallan los resultados para cada una de las regiones analizadas.

Cuesta basáltica

El mapa de vegetación para la Cuesta Basáltica muestra que, de las aproximadamente 2,8 millones de hectáreas analizadas, el 91,41% correspondió a pastizales naturales. Las unidades de pastizal, P. Bas1 y P. Bas2 ocuparon respectivamente 35,8 y 55,6% del área clasificada. La agricultura representó el 5,1% del territorio de esta región (cultivos de invierno 1,1%, cultivos de verano 2,6%, suelo desnudo en ambas fechas de adquisición de las imágenes 0,8% y Doble cultivo 0,6%); la forestación el 1,4%, monte nativo 1,89% y los cuerpos de agua, el 0,1% (Figura 3).

La evaluación de la clasificación mostró buenos resultados, la exactitud global fue de 99,4% y el coeficiente Kappa fue de 0,9932. La matriz de contingencia para esta región se muestra en el cuadro 1. En cuanto a la precisión del productor y usuario, todas las clases presentaron niveles de aciertos similares y muy altos, lo que muestra un gran acierto entre la realidad y la clasificación realizada (Cuadro 2).

Cuenca Sedimentaria del Noreste

El mapa de vegetación para la Cuenca Sedimentaria del Noreste, muestra que de las aproximadamente 2.1 millones de hectáreas analizadas, el 69,3% correspondió a pastizales naturales. Las unida-

Cuadro 2. Precisión del productor (P Prod) y del usuario (P. Usu), expresados en porcentajes para la cartografía de Basalto. Las abreviaturas de las clases cartografiadas son las mismas que en el cuadro 1.

Clase	P. Prod.	P. Usu.
P. Bas1	100	90,4
P. Bas2	97,6	96,1
C. inv	99,1	100
C. ver	100	100
Dc	98,9	100
Sd	98,2	100
Forest	100	99,5
Monte	100	100
Agua	100	100

des de pastizal, P. SedNE1 y P. SedNE2, ocuparon respectivamente un 66,2 y 3,1% respectivamente. La agricultura representó el 21,5% del territorio (cultivos de verano 1,8%, pasturas implantadas 16% y suelo desnudo en ambas fechas de adquisición de las imágenes 3,7%); la forestación el 7,4%; el monte nativo, 1,2% y el 0,5 % por cuerpos de agua (Figura 4).

La evaluación de la clasificación mostró buenos resultados, la exactitud global fue de 99,3% y el coeficiente Kappa fue de 0,9909. La matriz de contingencia para esta región se muestra en el cuadro 3. En cuanto a la precisión del productor y usuario, todas las clases presentaron niveles de acierto buenos a muy buenos (Cuadro 4).

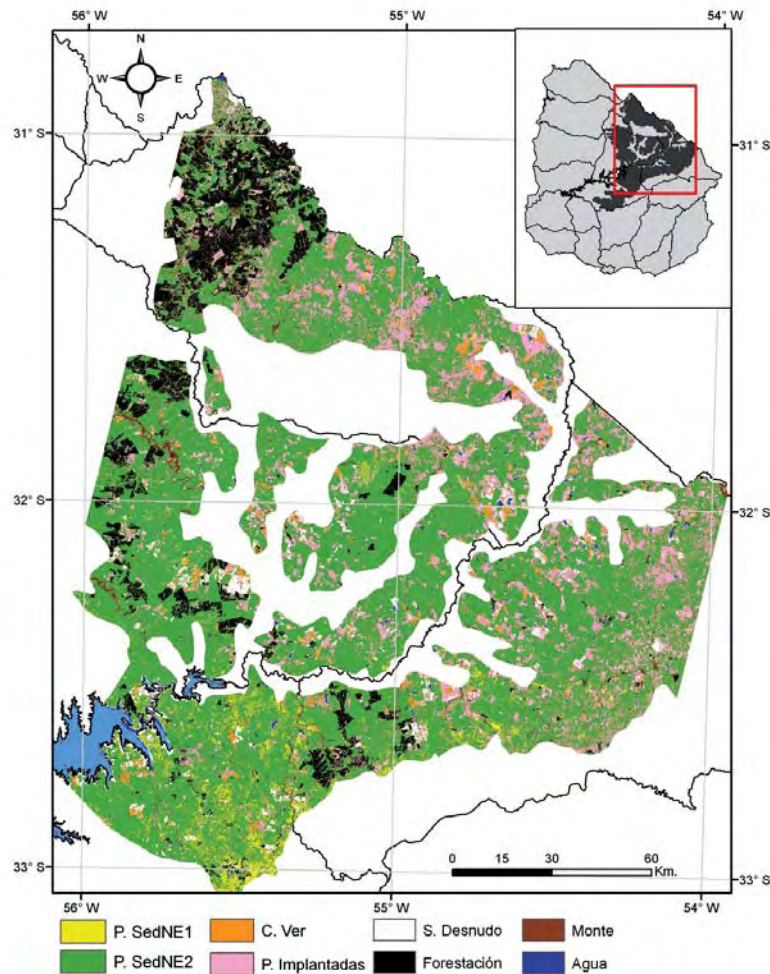


Figura 4. Mapa de cobertura/uso del suelo para la región Cuenca Sedimentaria del Noreste y su ubicación en el territorio uruguayo. P. SedNE1: Pastizales de la Cuenca Sedimentaria del Noreste 1; P. SedNE2: Pastizales de la Cuenca Sedimentaria del Noreste 2; C ver: Cultivo de verano; P. Implantadas: Pasturas implantadas; S. Desnudo: Suelo desnudo; Monte: Monte nativo.

Cuadro 3. Matriz de contingencia de la clasificación supervisada correspondiente a la unidad geomorfológica Cuenca Sedimentaria del Noreste. Los valores indicados en la diagonal de la matriz corresponden al porcentaje de píxeles clasificados correctamente. Los valores marginales a la diagonal corresponden a los píxeles erróneamente clasificados. P. SedNE1: Pastizales de la Cuenca Sedimentaria del Noreste 1; P. SedNE 2: Pastizales de la Cuenca Sedimentaria del Noreste 2; C ver: Cultivo de verano; P. Imp: Pasturas implantadas; Sd: Suelo desnudo en ambas fechas de adquisición de las imágenes; Forest: Forestación; Monte: Monte nativo.

Clases		Verdad Terrestre							
		P. SedNE1	P. SedNE2	C. ver	P. Imp	Sd	Forest	Monte	Agua
Clasificación	P. SedNE1	92,3	18,2	0	0	0	0	0	0
	P. SedNE2	7,7	70,4	0	0	0	0	0	0
	C. ver	0	0	100	0	0	0	0	0
	P. Imp	0	0	0	100	0	0	0	0
	Sd	0	11,4	0	0	100	0	0	0
	Forest	0	0	0	0	0	100	0	0
	Monte	0	0	0	0	0	0	100	0
	Agua	0	0	0	0	0	0	0	100

Cuadro 4. Precisión del productor (P. Prod) y del usuario (P. Usu), expresados en porcentajes, para la cartografía de la Cuenca Sedimentaria Noreste. Las abreviaturas de las clases cartografiadas son las mismas que en el cuadro 3.

Clase	P. Prod.	P. Usu.
P. SedNE1	92,31	88,24
P. SedNE2	70,45	86,11
C. ver	100	100
P. imp	100	100
Sd	100	97,33
Forest	100	100
Monte	100	100
Agua	100	100

Sierras del Este

El mapa de vegetación para la unidad Sierras del Este, muestra que, de las aproximadamente 1.8 millones de hectáreas analizadas, el 87,6% correspondió a pastizales naturales. Las unidades de pastizal, P. Sie1 y P. Sie2 ocuparon el 39,06 y el 48,54% respectivamente. La agricultura representó el 1,2% del territorio (cultivos de invierno 0,1%, cultivos de verano 0,1%, y doble cultivo 1%); la forestación el 6,6%; mon-

te nativo, 2,7%; afloramientos rocosos, 1,8% y el 0,04% por cuerpos de agua (Figura 5).

La evaluación de la clasificación mostró una exactitud global de 97,2% y el coeficiente Kappa fue de 0,9652. La matriz de contingencia para esta región se muestra en el cuadro 5. La precisión del productor y usuario para todas las categorías consideradas fueron muy altas y similares (Cuadro 6).

Cuadro 5. Matriz de contingencia de la clasificación supervisada correspondiente a la unidad geomorfológica de Sierras del Este. Los valores indicados en la diagonal de la matriz corresponden al porcentaje de píxeles clasificados correctamente. Los valores marginales a la diagonal corresponden a los píxeles erróneamente clasificados. P. Sie1: Pastizales de Sierras 1; P. Sie2: Pastizales de Sierras 2; C inv: Cultivo de invierno; C ver: Cultivo de verano; Dc: Doble cultivos; Forest: Forestación; Monte: Monte nativo; Roca: Afloramientos rocosos.

Clases		Verdad Terrestre								
		P. Sie1	P. Sie2	C. inv	C. ver	Dc	Forest	Monte	Roca	Agua
Clasificación	P. Sie 1	88,03	4,21	0,76	0,19	0	0	0,15	0	0
	P. Sie2	7,69	91,57	0,85	0	0	0	0	0	0
	C. inv	0	0	94,6	0	0	0	0	0	0
	C. ver	0	0,38	0	99,22	0	0	0	0	0
	Dc	0	3,83	3,79	0,58	100	0	0	0	0
	Forest	0	0	0	0	0	99,88	0,3	0	0
	Monte	0	0	0	0	0	0	99,55	0	0
	Roca	4,27	0	0	0	0	0	0	100	0
	Agua	0	0	0	0	0	0	0	0	93,55

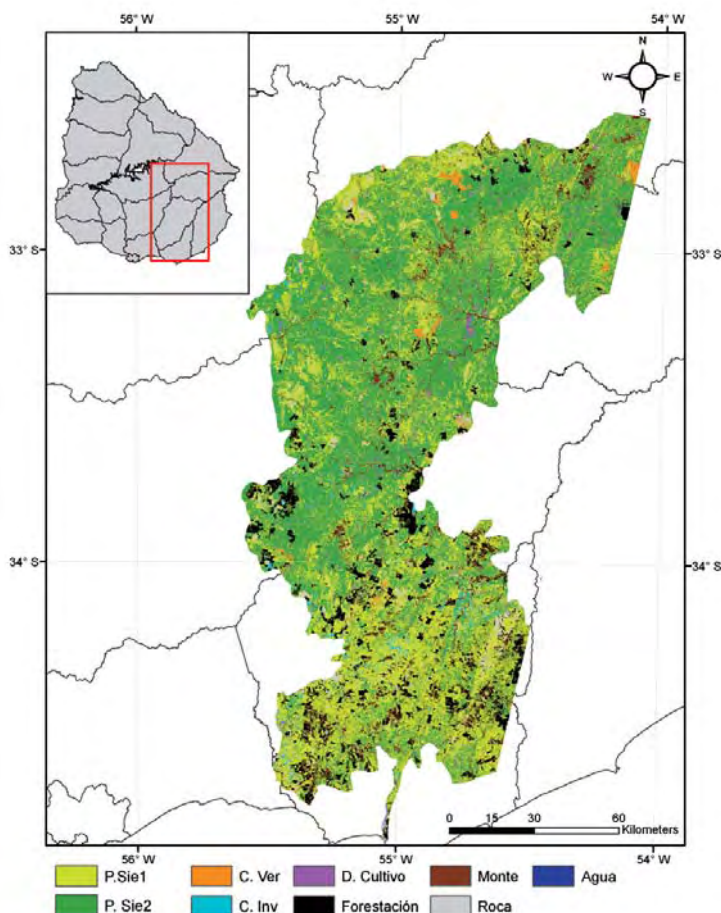


Figura 5. Mapa de cobertura/uso del suelo para la región Sierras del Este y su ubicación en el territorio uruguayo. P. Sie1: Pastizal de Sierras 1; P. Sie2: Pastizal de Sierras 2; C ver: Cultivo de verano; C inv: Cultivo de invierno; D. Cultivo: Doble cultivo; Monte: Monte nativo; Roca: Afloramientos rocosos.

Cuadro 6. Precisión del productor (P.Prod) y del usuario (P.Usu), expresados en porcentajes para la cartografía del Sierras del Este. Las abreviaturas de las clases cartografiadas son las mismas que en el cuadro 5.

Clase	P. Prod.	P. Usu
P. Sie1	88,03	83,06
P. Sie2	91,57	93
C. inv	94,6	100
C. ver	99,22	99,8
Dc	100	77,16
Forest	99,88	99,76
Monte	99,55	100
Roca	100	87,5
Agua	93,55	100

Región Centro-Sur

El mapa de vegetación para la Región Centro-Sur (Cristalino), muestra que, de las aproximadamente 1,3 millón de hectáreas analizadas, el 72,1% del área correspondió a pastizales naturales. Las unidades de pastizal, P. Cris1 y P. Cris2, ocuparon el 29,0 y el 43,1% respectivamente. La agricultura representó el 22,2% del territorio (cultivos de invierno 11,2%, cultivos de verano 2,6% y suelo desnudo en ambas estaciones 8,4%); la foresta-

El análisis de la relación entre las cartografías generadas y las unidades de suelo mostró que, en la región geomorfológica Cuesta Basáltica, los pastizales P. Bas1 fueron los dominantes en las unidades de suelo Masoller y Cuchilla de Haido-Paso de los Toros, mientras que los pastizales P. Bas2 dominaron en el resto de las unidades de suelo de esta región. En el Basalto, la agricultura y la forestación fueron dominantes solamente en la unidad de suelo Chapicuy (conformada por suelos originados a partir de depósitos sedimentarios y por lo tanto contrastantes con los suelos dominantes de la región), mientras que el monte nativo lo fue en la unidad de suelo Arapey (Figura 7a). En la región de la Cuenca Sedimentaria del Noreste, los pastizales P. SedNE2 dominaron en todas las unidades de suelo y los pastizales P. SedNE 1 alcanzaron su mayor cobertura en la unidad de suelo Capilla de Farruco. En esta región, la agricultura alcanzó su máxima cobertura en la unidad de suelo El Palmito, la forestación en la unidad de suelo Rivera y el monte nativo en la unidad Río Tacuarembó (Figura 7b). En la región de Sierras del Este, los pastizales P. Sie1 dominaron en las unidades de suelo Valle Fuentes, Carapé, Valle Aiguá, Sierra de Ánimas, Sierra de Aiguá y Santa Clara; mientras que P. Sie2 dominó en el resto de las unidades. La agricultura alcanzó su máxima cobertura en la unidad Valle Fuentes, mientras que la forestación y el monte nativo lo hicieron en la unidad Sierra de Ánimas (Figura 7c). En la región Centro-Sur (Cristalino), los pastizales P. Cris1 dominaron en todas las unidades de suelo y los pastizales P. Cris 2 alcanzaron su máxima cobertura en la unidad San Gabriel-Guaycurú. En el cristalino, la agricultura tuvo su máxima cobertura en la unidad La Carolina mientras que la forestación y el monte nativo la tuvieron en San Gabriel-Guaycurú (Figura 7d).

El análisis de la relación entre la cobertura de las clases cartografiadas y el agua potencialmente disponible neta (APDN) en los diferentes grupos CO-NEAT mostró una asociación muy clara. En todas las regiones geomorfológicas analizadas, la proporción de pastizales del tipo 1 (pastizales abiertos ó con menor cobertura del suelo) disminuye a

medida que aumenta el APDN de los suelos. En el caso de las regiones geomorfológicas Cuesta Basáltica y Sierras del Este, esta tendencia se interrumpe en las categorías con mucha agua potencialmente disponible (APDN alta y muy alta) (Figura 8).

DISCUSIÓN

El este trabajo presentamos la primera descripción espacialmente explícita, con un protocolo de realización documentado, sobre el uso/cobertura del suelo de una importante porción del Uruguay. Las cartografías generadas describen aproximadamente el 46 % del territorio nacional y el 70% de las regiones geomorfológicas predominantemente ganaderas (Figura 2). El trabajo presta especial atención a las diferentes unidades de pastizales naturales, principal sustento de la ganadería extensiva, uno de los pilares de la economía nacional. En este sentido cubre un gran vacío de información en un país en el cual los pastizales naturales son la cobertura del suelo mayoritaria, generando información sobre la ubicación en el espacio de las diferentes unidades de pastizal a partir de una descripción florística de las mismas. Reportamos también, el grado de avance de la frontera agrícola sobre los pastizales uruguayos, identificando el lugar y los principales tipos de usos agrarios intensivos de las regiones analizadas.

Los trabajos en la región que describen el uso/cobertura del suelo suelen agrupar a los pastizales naturales en una única clase (ver por ejemplo: Baldi y Paruelo, 2008, Guershman *et al.*, 2003b), juntando unidades de vegetación bastante heterogéneas. El trabajo aquí presentado discrimina entre diferentes unidades de pastizal dentro de cada una de las regiones analizadas. Estas diferentes unidades de pastizal están definidas en función de su composición de especies a partir del método fitosociológico (ver Lezama *et al.*, 2011 este número).

La unión de datos fitosociológicos con la información espectral provista por las imágenes Landsat TM, se mostró como una combinación muy adecuada y de alta precisión para una descripción exhaustiva de la cobertura/uso del suelo

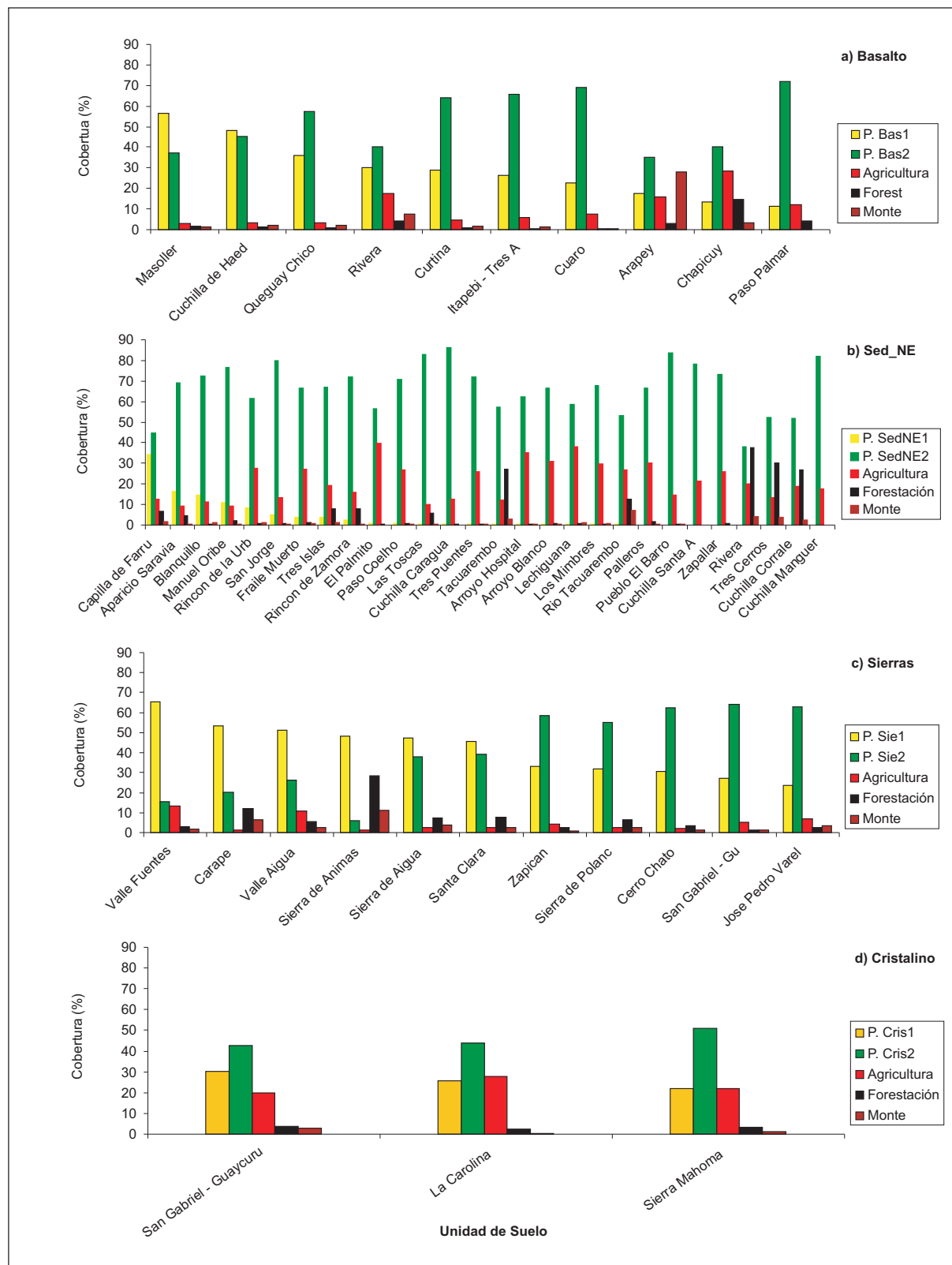


Figura 7. Porcentaje de las diferentes clases cartografiadas en las diferentes unidades de suelo comprendidas en cada región geomorfológica. P. Bas1 y P. Bas2. Pastizales de la Cuesta Basáltica 1 y 2; P. SedNE1 y P. Sed NE2: Pastizales de la Cuenca Sedimentaria del Noreste 1 y 2; P. Sie1 y P. Sie2: Pastizales de las Sierras del Este 1 y 2; P. Cris1 y P. Cris2: Pastizales de la Región Centro-Sur (Cristalino) 1 y 2.

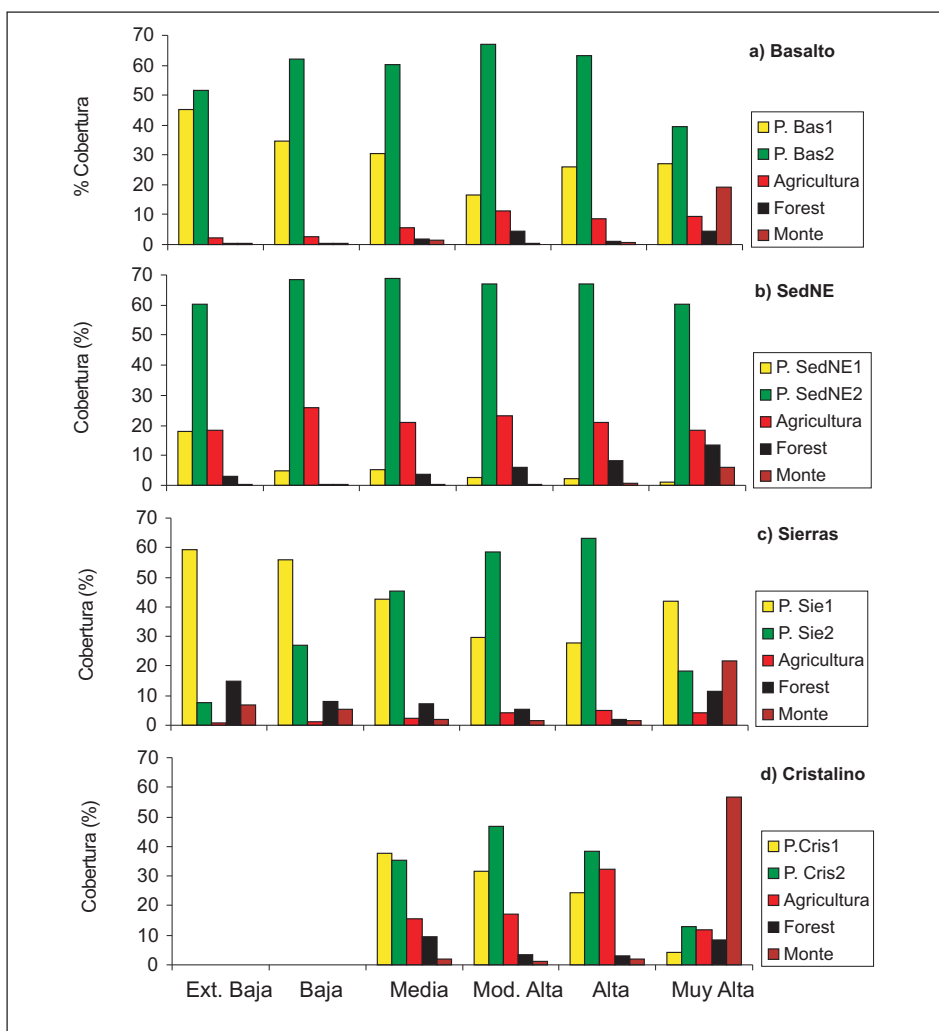


Figura 8. Porcentaje de cobertura de las diferentes clases cartografiadas para las distintas categorías de agua potencialmente disponible (APDN) de las unidades cartográficas CONEAT en las regiones geomorfológicas analizadas. P. Bas1 y P. Bas2: Pastizales de la Cuesta Basáltica 1 y 2; P. SedNE1 y P. Sed NE2: Pastizales de la Cuenca Sedimentaria del Noreste 1 y 2; P. Sie1 y P. Sie2: Pastizales de las Sierras del Este 1 y 2; P. Cris1 y P. Cris2: Pastizales de la Región Centro-Sur (Cristalino) 1 y 2.

sobre grandes extensiones de territorio. La exactitud global de las diferentes cartografías realizadas varió entre 95,3 y 99,4%, un resultado excelente que permite discriminar con claridad los principales usos del suelo en Uruguay. La exactitud en la discriminación de las diferentes unidades de pastizal varió entre 70 y 100% dependiendo de la región y la unidad de pastizal considerada, presentando un valor promedio de 86,5%. Estos resultados no son tan buenos como los de la exactitud global pero continúan siendo muy buenos si tenemos en cuenta la relativa homogeneidad fisonómica de los pastizales naturales.

La combinación de fitosociología con técnicas de teledetección ha sido escasamente usada. En Argentina, Zak y Cabido (2002) caracterizaron y cartografiaron la vegetación del Chaco utilizando censos fitosociológicos e imágenes Landsat; sin embargo, hay pocos trabajos en la bibliografía que intenten cartografiar, como en este caso, diferentes tipos de vegetación en zonas con fisonomía homogénea. En Uruguay, Baeza *et al.* (2010), en el marco de este mismo proyecto, utilizaron la misma aproximación para cartografiar las unidades de vegetación del Basalto Superficial. En este capítulo extendemos ese análisis a

todas las unidades geomorfológicas de Uruguay con predominancia de pastizales naturales.

Las cartografías generadas discriminan, en cada región, entre 2 grandes unidades de pastizal. Florísticamente, en cada región se discriminaron entre 3 y 5 unidades diferentes (ver Lezama *et al.*, en este volumen). La reducción a dos unidades por región responde a limitaciones en la resolución espacial y/o espectral de las imágenes utilizadas. En algunos casos las unidades de vegetación forman stands muy pequeños, marginales en el paisaje, cuya discriminación es dificultosa con un píxel de 30 x 30 m como el de las imágenes Landsat y/o cuando se realizan cartografías que cubren áreas tan extensas. Este es el caso por ejemplo de la unidad II del Basalto o la unidad III en la región de Sierras del Este (B-II y S-III en Lezama *et al.*, 2010 este volumen). En otros casos, la similitud en la fisonomía, fenología y cobertura del suelo entre diferentes unidades de pastizales naturales no permitió su discriminación espectral. Un ejemplo de esta situación es lo ocurrido con las unidades S-II y S-IV y las unidades S-I y S-V de la región Sierras del Este. A la hora de cartografiar, se optó entonces por definir las unidades de pastizal en un nivel superior del dendrograma (con menor similitud), agrupando los censos en 2 grupos más grandes. Estas unidades de vegetación cartografiadas también están definidas florísticamente y simplemente agrupan las unidades definidas por Lezama *et al.* (2011 este número) en grupos un poco más generales. Cartografías que intenten discriminar entre las diferentes comunidades de pastizal definidas por Lezama *et al.* (2010 este volumen) deberían utilizar imágenes de satélites con mayor resolución espacial como las provistas por el satélite Ikonos (resolución espacial pancromática: 1 x 1 m) o el satélite QuicBird (resolución espacial pancromática: 60 x 60 cm). Otra posibilidad es utilizar imágenes con mayor resolución espectral como el caso del sensor Hyperion (220 bandas espectrales contiguas, resolución espacial 30 m). Los sensores hiperespectrales, que registran la radiación reflejada en porciones estrechas y continuas del espectro electromagnético, han sido utilizados para

discriminar entre diferentes comunidades de vegetación con fisonomía homogénea como humedales (Schmidt y Skidmore, 2003) o pastizales (Lewis, 1994).

El análisis de la relación entre las unidades de suelo y las unidades de vegetación muestra, prácticamente en todas las unidades geomorfológicas, la relación que existe entre el tipo de sustrato y la vegetación que soporta. En términos generales, las unidades más xerófitas y/o con menor cobertura del suelo cobran mayor importancia en las unidades de suelo a escala 1:1000000 con predominancia de suelos superficiales (Figura 7). Esto es particularmente claro en el caso del Basalto y las Sierras del Este. En la Cuesta basáltica la unidad P. Bas1 es dominante en las unidades de suelo Masoller y Cuchilla de Haedo – Paso de los Toros, perdiendo la dominancia y disminuyendo su importancia relativa en unidades con dominancia de suelos medios y profundos (Figura 7a). En el caso de Sierras del Este, la unidad P. Sie1, es dominante en las unidades de suelo Valle Fuentes, Carapé, Valle Aiguá, Sierra de las Ánimas, Sierra de Aiguá y Santa Clara. Estas unidades poseen generalmente dominancia de suelos superficiales o moderadamente profundos. La unidad de sierras P. Sie2, pasa a ser dominante en aquellas unidades de suelo cubiertas mayoritariamente por suelos medios y profundos (Figura 7b). En el caso de la Cuenca Sedimentaria del Noreste, la unidad P. SedNE1, solo es relativamente importante (30 % de cobertura) en la unidad de suelo Capilla de Farruco, la única unidad de la Cuenca Sedimentaria del Noreste con predominancia de suelos superficiales. (Figura 7c). En el caso de la región Centro Sur (Cristalino), no se encontró una asociación marcada entre la vegetación y las unidades de suelo (Figura 7d). Esto puede deberse a el gran tamaño de las unidades de suelo de esa parte del país y/o a una peor definición de los grupos florísticos definidos fitosociológicamente. Además, según lo reportado en el último censo agropecuario (MGAP, DIEA 2000), la práctica de mejoramientos extensivos sobre pastizales naturales es bastante común en esta región, lo que podría contribuir a enmascarar la asociación entre vegetación y suelos. Es

importante destacar que las diferencias en la escala de análisis de la carta de suelos 1:1000000 y los mapas resultantes de nuestro trabajo, no permiten analizar estrictamente la relación entre los suelos y la vegetación cartografiada, por lo que este análisis solamente muestra grandes tendencias en dicha asociación.

Los patrones de asociación entre la vegetación y las características del suelo son más claros cuando analizamos la relación entre el agua potencialmente neta (APDN) en los grupos CONEAT y la cobertura de cada una de las clases cartografiadas. Para todas las unidades geomorfológicas cartografiadas, la proporción de las unidades de pastizal más xerófitas o con menor cobertura del suelo (Pastizales 1 en todos los casos), disminuye a medida que aumenta el agua disponible (Figura 8). En algunas unidades analizadas (Por ej. Basalto y Sierras) esta tendencia se interrumpe en la categoría suelos con APDN muy alta (y APDN alta en el caso del Basalto). Esto puede deberse a que las condiciones de anegamiento en algún momento del año impidan el desarrollo de comunidades de pastizal con alta cobertura vegetal. Esta mayor claridad en la asociación entre la vegetación y el APDN seguramente responda a una mejor resolución espacial del producto cartográfico y al hecho de relacionar la vegetación con una variable crítica como el agua disponible en los suelos. El tamaño promedio de las unidades cartográficas de las dos variables utilizadas para analizar la distribución de pastizales, ejemplifica las diferencias en la resolución espacial; mientras que en la Carta de Suelos 1:1000000, el tamaño promedio de las unidades cartográficas es de 54.000 ha, en la cartografía CONEAT es de 520 ha.

A pesar del avance en la frontera agropecuaria, los pastizales naturales continúan siendo la cobertura del suelo dominante en las regiones analizadas. El porcentaje de pastizales naturales osciló entre un 69,3% en la Cuenca sedimentaria del Noreste y casi un 91,5% en la Cuesta basáltica, cubriendo en total el 81,7% del área cartografiada. Los grandes cambios en el uso del suelo responden a procesos diferentes en las distintas regiones analizadas. La forestación presenta su mayor desarrollo en la Cuen-

ca Sedimentaria del Noreste (7.4%), seguida por la región Sierras del Este (6,6 %). Aún dentro de estas regiones la distribución espacial de la forestación no resultó homogénea. En la Cuenca Sedimentaria del Noreste, la forestación se presenta concentrada mayormente en la zona noroeste de la unidad geomorfológica, constituyendo uno de los polos forestales más importantes del país (Figura 4). La superficie forestada supera el 25% de la superficie en las unidades de suelo Tacuarembó, Cuchilla Corrales y Tres Cerros, y alcanza casi el 40% en la unidad de suelo Rivera (Figura 7). En la región de Sierras del Este la forestación se concentra mayoritariamente en la mitad sur de la unidad geomorfológica; en el centro sur de Lavalleja y el norte de Maldonado (Figura 5). La superficie forestada alcanzó al 28% en la unidad de suelos Sierra de Animas (Figura 7). Seguramente, el desarrollo forestal en la Cuenca Sedimentaria del Noreste y en Sierras del Este, sea aún mayor a lo reportado en este trabajo. Algunos casos de forestaciones recién implantadas que no se lograron captar con la clasificación, fueron detectados en el proceso de cartografía de ambas regiones. Estas situaciones generalmente quedaron confundidas con cultivos o suelo desnudo, dependiendo de la edad y el momento de implantación de las nuevas parcelas forestales.

La agricultura intensiva (cultivos de invierno y verano, pasturas implantadas) ocupó el 15,8 % del territorio analizado y fue máxima en la región Centro-Sur (22,2%) y la Cuenca Sedimentaria del Noreste (21,5%). Seguramente el avance de la frontera agrícola sea aún mayor que lo reportado en la región Centro-Sur. Un uso del suelo muy frecuente en esta zona del país son las pasturas implantadas; según el último censo agropecuario, las unidades censales que abarca la zona de estudio poseen en promedio un 13,5% de pasturas implantadas (MGAP, DIEA, 2000). El no haber definido esa categoría en la clasificación de esta región seguramente produjo una sobreestimación de la cobertura de los pastizales naturales, dado que las pasturas implantadas pueden presentar en algunos momentos del año respuestas espectrales similares a la de los pastizales (fundamentalmente los más productivos). La ausen-

cia de áreas protegidas en esta región del país, directamente enfocadas a la conservación de pastizales pone en riesgo la conservación de estos ecosistemas.

El abanico de posibilidades generadas a partir de la información provista por este proyecto es muy amplio. En primer lugar, la metodología desarrollada abre las puertas para una evaluación formal del cambio en el uso del suelo en nuestro país y los impactos que genera. Clasificaciones sucesivas a lo largo del tiempo, como las presentadas en este trabajo, permitirán evaluar con facilidad el grado y las tendencias de los principales cambios en el uso del suelo. Esta información es extremadamente importante si tenemos en cuenta que la cobertura/uso del suelo es el principal control en el espacio y en el tiempo del flujo de energía y el ciclado de carbono y agua en los ecosistemas terrestres (Townshend *et al.*, 1992); regula también muchos de los servicios que los humanos obtenemos de los ecosistemas como al purificación del aire y del agua, la regulación del clima y los flujos hidrológicos o la regeneración de la fertilidad de los suelos (Daily *et al.*, 1997); y es uno de los principales controles del fenómeno conocido como cambio global (Foley *et al.*, 2005).

En segundo lugar, la información generada permite una caracterización del funcionamiento ecosistémico de los pastizales naturales uruguayos. La posibilidad de combinar los mapas de los pastizales naturales uruguayos con imágenes de satélite de alta resolución temporal como la generadas por los sensores MODIS o AVHRR permitiría evaluar el funcionamiento de estos ecosistemas de pastizal en términos de la fracción de Radiación Fotosintéticamente Activa interceptada por la vegetación verde (fRFA) y la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) (por una explicación detallada de la metodología para estimar la PPNA a partir de imágenes de satélite ver Paruelo *et al.*, 2010 y/o Oyarzabal *et al.*, 2010 en este volumen). Utilizando ambas aproximaciones, la cartografía de pastizales a partir de datos fitosociológicos e imágenes Landsat y estimando la PPNA a partir de imágenes MODIS, Baeza *et al.* (2010) determinaron la variación espacial y temporal de la PPNA en pastizales naturales del Basalto superficial. Parte

de ese proceso puede verse el capítulo sobre caracterización funcional que forma parte del presente volumen (Baeza *et al.*, 2011 este número). Dado que la PPNA es el principal control de la carga de ganado en sistemas de ganadería extensiva (Oesterheld *et al.*, 1998), realizar estimaciones de la PPNA asociadas a las diferentes unidades de pastizales naturales permitiría evaluar la disponibilidad de forraje a nivel de potrero en establecimientos agropecuarios, definiendo y mejorando el manejo de la carga ganadera.

Toda la información generada en este trabajo, así como las posibilidades que brinda, permitirá optimizar el manejo y conservación de los pastizales naturales de Uruguay, la principal cobertura del suelo en nuestro país.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue parcialmente financiado por un subsidio proveniente del Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) CRN-2031 el cual recibe el apoyo de la US National Science Foundation (Grant GEO-0452325).

BIBLIOGRAFÍA

- ALTAMIRANO, A.; DA SILVA, H.; DURÁN, A.; ECHEVERRÍA, A.; CANARIO, D.; PUENTES, R.** 1976. *Clasificación de Suelos*. Dirección de Suelos y Fertilizantes. Ministerio de Agricultura y Pesca. Tomo I. Montevideo.
- BAEZA, S.; LEZAMA, F.; PIÑEIRO, G.; ALTESOR, A.; PARUELO, J.M.** 2010. Spatial variability of aboveground net primary production in Uruguayan Grasslands: A remote sensing approach. *Applied Vegetation Science* 13: 72–85.
- BAEZA, S.; PARUELO, J.M.; ALTESOR, A.** 2006. Caracterización Funcional de la Vegetación de Uruguay Mediante el Uso de Sensores Remotos. *Interciencia* 31: 382-388.
- BAEZA, S.; PARUELO, J.M.; LEZAMA, F.; ALTESOR, A.** 2011. Caracterización funcional en pastizales y sus aplicaciones en Uruguay. En: Altesor, A., W. Ayala y J.M. Paruelo editores. *Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales*. Serie FPTA N° 26, INIA.
- BALDI, G.; GUERSCHMAN, J.P.; PARUELO,**

- J.M. 2006. Characterizing fragmentation in temperate South America grasslands. *Agriculture Ecosystem & Environment* 116: 197–208.
- BALDI, G.; PARUELO, J.M.** 2008. Land-use and land cover dynamics in South American temperate grasslands. *Ecology and Society* 13(2): 6. [online] URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol13/iss2/art6/>
- CARRERE, R.** 1990. El bosque natural uruguayo, caracterización y estudios de caso. Investigaciones, CIEDUR.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B.L.** 2003. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41: 2674–2677.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B.L.; BARSÍ, J.A.** 2007. Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 4: 490-494.
- CHANETON, E.** 2005. Factores que determinan la heterogeneidad de la comunidad vegetal en diferentes escalas espaciales. En: La heterogeneidad de la vegetación de los agroecosistemas; un homenaje a Rolando León. Oesterheld, M. *et al.*, editores. Editorial Facultad de agronomía. Buenos Aires, Argentina. Pp. 19-42.
- CHUVIECO, E.** 2002. Teledetección Ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio. Editorial Ariel, Barcelona, España.
- CLARK, D.B.; READ, J.M.; CLARK, M.L.; CRUZ, A.M.; DOTTI, M.F.; CLARK, D.A.** 2004. Application of 1-m and 4-m resolution satellite data to ecological studies of tropical rain forests. *Ecological Applications*, 14:61-74.
- CONGALTON, R.** 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment* 37: 35-46.
- CURRAN, P.J.** 1985. Principles of remote sensing. Longman Scientific & Technical, London.
- DAILY, G.C.** 1997. Introduction: What are ecosystem services? Páginas 1-10 en G. Daily, editor. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington, D.C.
- DEFRIES, R.S.; HANSEN, M.C.; TOWNSHEND, J.R.G.; SOHLBERG, R.S.** 1998. Global land cover classifications at 8 km spatial resolution: the use of training data derived from Landsat imagery in decision tree classifiers. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3141-3168.
- FOLEY, J.A.; DEFRIES, 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.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P.K.** 2005. Global consequences of land use. *Science* 309, 570–574.
- GITAY, H.; NOBLE, I.R.** 1997. What are functional types and how should we seek them? En: *Plant functional types, their relevance to ecosystem properties and global change*. Cambridge Univ. Press. Cambridge.
- GUERSHMAN, J.P.; PARUELO, J.M.; BURKE, I.C.** 2003a. Land Use Impacts on the Normalized Difference Vegetation Index in Temperate Argentina. *Ecological Applications* 13: 616-628.
- GUERSHMAN, J.P.; PARUELO, J.M.; DI BELLA, C.; GIALLORENZI, I.C.; PACIN, F.** 2003b. Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*. 24: 3381-3402.
- HANSEN, M.C.; DEFRIES, R.; TOWNSHEND, J.R.G.; SOHLBERG, R.** 2000. Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*. 21: 1331-1364.
- IPCC** (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2000. Special report on land use, land-use change, and forestry. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- LAVOREL, S.; MCINTYRE, S.; LANDSBERG, J.; FORBES, T.D.A.** 1997. Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. *Trends in Ecology & Evolution* 12: 474–478.
- LEZAMA, F.; ALTESOR, A.; PEREIRA, M.; PARUELO, J.M.** 2011. Descripción de la heterogeneidad florística de las principales regiones geomorfológicas de Uruguay. En: Altesor, A., W. Ayala y

- J.M. Paruelo editores. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA N° 26, INIA.
- LEWIS, M.M.** 1994. Species composition related to spectral classification in an Australian Spinifex hummock grassland. *International Journal of Remote Sensing*, 15: 3223–3239.
- LILLESAND, T.; KIEFER, R.** 1994. Remote Sensing and Image Interpretation, 3rd Ed. (New York: John Wiley & Sons).
- MCGUIRE, A.D.; SITCH, S.; CLEIN, J.S.; DARGAVILLE, R.; ESSER, G.; FOLEY, J.; HEIMANN, M.; JOOS, F.; KAPLAN, J.; KICKLIGHTER, D.W.; MEIER, R.A.; MELILLO, J.M.; MOORE III, B.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; REICHENAU, T.; SCHLOSS, A.; TIAN, H.; WILLIAMS, L.J.; WITTENBERG, Y.U.** 2001. Carbon balance of the terrestrial biosphere in the twentieth century: Analyses of CO₂, climate and land use effects with four process-based ecosystem models. *Global Biogeochemical Cycles* 15: 183-206.
- MILLOT, J.C.; RISSO, D.; METHOL, R.** 1987. Relevamiento de Pasturas Naturales y Mejoramientos Extensivos en Áreas Ganaderas del Uruguay. Consultora FUCREA. Informe Técnico para la Comisión Honoraria del Plan Agropecuario, MGAP, Montevideo.
- MINISTERIO DE GANADERÍA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE ESTADÍSTICAS AGROPECUARIAS (MGAP, DIEA).** 2000. Censo General Agropecuario. Disponible en Internet: www.mgap.gub.uy.
- MGAP/DGRNR/CONEAT.** 1979. Grupos de suelos e índices de productividad. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, Montevideo, Uruguay.
- MOLFINO, J.H.** 2009 Estimación del agua potencialmente disponible en los grupos CONEAT. Acuerdo de Trabajo: MGAP (DIRENARE) – INIA (GRAS). Disponible en http://www.inia.org.uy/online/files/contenidos/link_28102009105045.pdf
- MYNENI, R.B.; KEELING, C.D.; TUCKER, C.J.; ASRAR, G.; NEMANI, R.R.** 1997. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981-1991. *Nature* 386: 698-702.
- OESTERHELD, M.; DIBELLA, C.M.; KERDILES, H.** 1998. Relation between NOAA AVHRR satellite data and stocking rate of rangelands. *Ecology Application* 8: 207–212.
- OYARZABAL M.; OESTERHELD, M.; GRIGERA, G.** 2011. ¿Cómo estimar la eficiencia en el uso de la radiación mediante sensores remotos y cosechas de biomasa? Un ejemplo local. En: Altesor, A., W. Ayala y J.M. Paruelo editores. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA N° 26, INIA.
- PANARIO, D.** 1987. Geomorfología del Uruguay. Publicación de la Facultad de Humanidades y Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- PARUELO, J.M.; OYARZABAL, M.; OESTERHELD, M.** 2011. El Seguimiento de los recursos forrajeros mediante sensores remotos: bases y aplicaciones. En: Altesor, A., W. Ayala y J.M. Paruelo editores. Bases ecológicas y tecnológicas para el manejo de pastizales. Serie FPTA N° 26, INIA.
- PARUELO, J.M.; GUERSHMAN, J.P.; G. BALDI, G.; DIBELLA, C.** 2004. La estimación de la superficie agrícola. Antecedentes y una propuesta metodológica. *Interciencia*, 29: 421-427.
- PARUELO J.M.; JOBBAJY, E.; SALA, O.E.** 2001. Current distribution of ecosystem functional types in temperate South America. *Ecosystems*, 4: 683-698.
- ROSENGURTT, B.** 1944. Estudios sobre praderas naturales del Uruguay. 4ª Contribución. AGROS, 134:1-45.
- SCHMIDT, K.S.; SKIDMORE, A.K.** 2003. Spectral discrimination of vegetation types in a coastal wetland. *Remote Sensing of Environment*, 85, 92-108.
- SORIANO, A.** 1991. Rio de la Plata Grasslands pp. 367-407. En: R. T. Coupland editor *Natural grasslands. Introduction and Western Hemisphere*. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- SGANGA, J.C.** 1994. Caracterización de la Vegetación de la República Oriental del Uruguay. En: Contribución de los estudios edafológicos al conocimiento de la vegetación en la República Oriental del Uruguay. Boletín técnico N° 13, MGAP, Dirección Suelos y Aguas, Montevideo.
- TERRADAS, J.** 2001. Ecología de la vegetación. De la ecofisiología de las plantas a la dinámica de comunidades y paisajes. Editorial Omega, Barcelona, España.

- TOWNSHEND, J.R.G.** (editor). 1992. Improved global data for land applications: a proposal for a new high resolution dataset. Report No 20, International Geosphere-Biosphere Program, Stockholm, Sweden.
- TOWNSHEND, J.R.G.; JUSTICE, C.; LI, W. ; GURNEY, C.; MCMANUS, J.** 1991. Global land cover classification by remote sensing: present capabilities and future possibilities. *Remote Sensing of Environment*, 35, 243– 255.
- ZAK, M.R.; CABIDO, M.** 2002. Spatial patterns of the Chaco vegetation of central Argentina: Integration of remote sensing and phytosociology. *Applied Vegetation Science*. 5: 213-226.