



ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LA INTENSIFICACIÓN AGRARIA Y SU INCIDENCIA EN LA PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA. PROPUESTA METODOLÓGICA PARA URUGUAY 2000-2011

Ismael DÍAZ

Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio
Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales.
Universidad de la República (Montevideo-Uruguay)
idiez@fcien.edu.uy

Mauricio CERONI

Universidad Autónoma de México
ceroni.mauricio@gmail.com

Guzmán LÓPEZ

Departamento de Biología Pesquera.
Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (Montevideo-Uruguay)
glopez@dinara.gub.uy

Marcel ACHKAR

Laboratorio de Desarrollo Sustentable y Gestión Ambiental del Territorio
Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales.
Universidad de la República (Montevideo-Uruguay)
achkar@fcien.edu.uy

Recibido: 7 de marzo del 2018

Enviado a evaluar: 11 de marzo del 2018

Aceptado: 8 de junio del 2018

RESUMEN

Desde comienzos del siglo XXI en Uruguay se ha consolidado un proceso de intensificación agraria. Para evaluar los impactos de este proceso es clave conocer el comportamiento espacio-temporal de la intensificación y el funcionamiento del sistema ambiental, ambos a través de una variable síntesis. El objetivo de este trabajo fue definir una metodología para la evaluación espacio-temporal del proceso de intensificación y su incidencia en la productividad primaria neta aérea (PPNA). La estrategia de investigación consideró la definición de un índice de intensidad de uso del suelo y el análisis del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI). Los resultados muestran que el 80% de la superficie se intensificó; asimismo que, la tendencia del NDVI fue decreciente en zonas de alta intensidad de uso del suelo y creciente en las zonas de baja intensidad. Finalmente, se destaca la incidencia negativa de la intensificación sobre los sistemas ambientales.

Palabras Clave: Uso del suelo, NDVI, agricultura, sistemas ambientales.

SPACE-TEMPORAL ANALYSIS OF AGRARIAN INTENSIFICATION AND ITS INCIDENCE IN NET PRIMARY PRODUCTIVITY. METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR URUGUAY 2000-2011

ABSTRACT

Since the beginning of the 21st century Uruguay is witnessing a process of agrarian intensification. To assess the impacts of this processes crucial to understand the temporal and spatial behaviour of the intensification, and the functioning of the environmental system; both reported by a synthesis variable. The objective of this work was to define a methodology for the spatio-temporal evaluation of the intensification process, and its incidence on the above net primary productivity (ANPP). The research strategy considered the definition of a land use intensity index, and the analysis of the normalized differential vegetation index (NDVI). Results showed that 80% of the rural area has been intensified. Also, that the NDVI trend decreased in areas with high land use intensity and increased in areas with low land use intensity. Finally, it is important to highlight the negative impact of the intensification on the environmental systems.

Keywords: Land use, NDVI, agriculture, environmental systems.

ANALYSE SPATIALE-TEMPORELLE DE L'INTENSIFICATION AGRARIENNE ET DE SON INCIDENCE SUR LA PRODUCTIVITÉ PRIMAIRE NET. PROPOSITION MÉTHODOLOGIQUE POUR L'URUGUAY 2000-2011

RÉSUMÉ

L'Uruguay présente un processus d'intensification agraire consolidé depuis le début du XXI^e siècle. Comprendre le comportement spatio-temporel de l'intensification, et trouver une variable synthèse qui rend compte du fonctionnement du système environnemental, est essentiel pour évaluer les impacts de ce processus. L'objectif de ce travail était de définir une méthodologie pour l'évaluation spatio-temporelle du processus d'intensification et son incidence sur la production primaire nette aérienne (PPNA). La définition d'un indice d'intensité de l'utilisation des terres a été intégrée avec l'analyse de l'indice différentiel normalisé de végétation (NDVI). Les résultats indiquent que 80% de la surface s'intensifient. La tendance du NDVI diminue dans les zones de forte intensité et croît dans les zones de faible intensité d'occupation des sols. L'impact négatif de l'intensification sur les systèmes environnementaux est mis en évidence, ce qui ajoute aux impacts générés dans les dimensions socio-économique et politique.

Mots-clés: Utilisation des terres, NDVI, Agriculture, systèmes environnementaux.

1. INTRODUCCIÓN

La intensificación de los procesos productivos implica un conjunto de mecanismos desarrollados para acelerar y dinamizar el proceso productivo en el menor tiempo posible. Busca atender a un objetivo específico, el cual se puede analizar desde diversas posturas y dimensiones de análisis. Desde la tesis malthusiana, se sostiene que los procesos de intensificación y en particular la intensificación agraria (IA) ocurre por el simple hecho de que la presión demográfica conduce a la necesidad de aumentar la productividad total por unidad de tiempo (Boserup 1965). Dicha tesis se consolida con el

Neomalthusianismo, a través del Club de Roma¹. En este contexto es donde se elaboró el documento los "Límites de Crecimiento" (Meadows et al. 1972), que analizaba los obstáculos biofísicos y sociales del crecimiento económico del planeta, argumentando que uno de los problemas era el crecimiento sostenido de la población mundial y que por tanto era necesario mejorar e incrementar la productividad de los sistemas productivos.

Por otro lado, la interpretación crítica desde la economía política sostiene que la intensificación de los procesos productivos, ya sean industriales como agrarios, se asocia a un aumento en la composición orgánica del capital, principalmente el capital constante, para así obtener un aumento de la productividad que posibilite el incremento de la plusvalía (Barreda 2007). Uno de los mecanismos de incremento de la plusvalía, relacionado directamente con la intensificación agraria, es la búsqueda del aumento de la productividad de forma tal que por un lado se pueda contrarrestar las diferencias de productividad asociadas a la fertilidad natural del suelo, y por otro disminuir el peso de la renta diferencial determinado por el arrendamiento de la tierra (Bartra 2006). Por tanto, desde este marco, el crecimiento de la población no existe como problema, sino que el problema se identifica en la necesidad constante del capital de aumentar su rentabilidad. Así, se cuestiona el acceso a los satisfactores alimentarios de la población, no como un aspecto demográfico sino como un problema en la distribución de la riqueza.

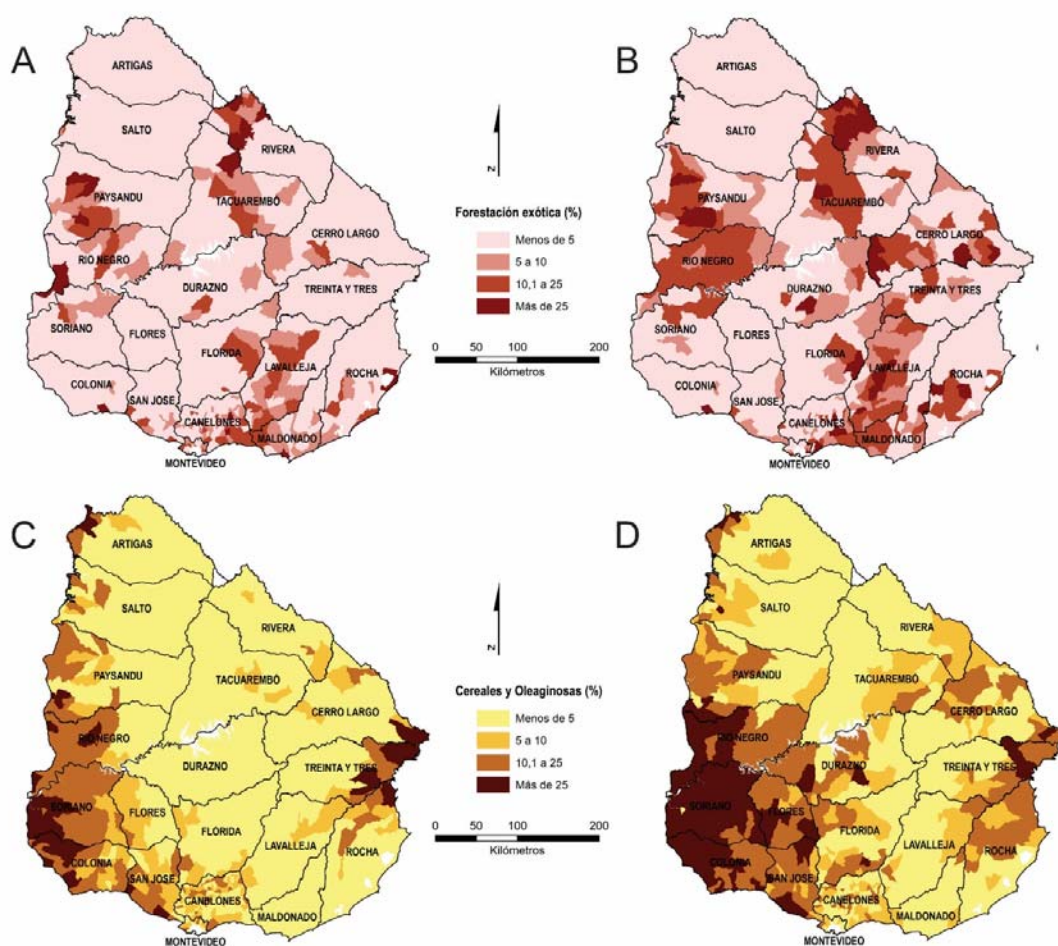
La interpretación crítica desde las ciencias ambientales caracterizara a la IA como un proceso de (auto)transformación del sistema ambiental, a través de una mayor presión sobre sus atributos estructurales y/o funcionales en la dimensión biofísica. Este proceso genera una configuración más simple de los sistemas (homogéneos y especializados), donde aumenta la velocidad de los flujos, se modifican los ciclos biogeoquímicos, y el funcionamiento del sistema se abre al aporte de cantidades crecientes de insumos con mayor dependencia de fuentes externas y una disminución de la capacidad general de regulación interna (De La Fuente and Suárez 2008). La transformación opera en forma multiescalar e interdependiente en las actividades agrarias, entre ellas y en el territorio (Llambí 2012). Conceptualmente la IA refiere a modificaciones significativas en el ritmo, nivel, amplitud y profundidad que la expansión del capital realiza en las actividades agrarias (Gazzano and Achkar 2013). Como concepto operativo generalmente se ha definido a la IA en forma parcial, aludiendo estrictamente a la expansión de la agricultura. Sin embargo, incluye el aumento del número de cosechas por unidad de superficie, de los rendimientos por hectárea, los insumos utilizados (Prados et al. 2002), la reducción de componentes planificados y no planificados de la biodiversidad, la dependencia de la economía de mercado (Vandermeer et al. 1998), el uso de tecnología y capital en el proceso productivo (García 2003) y un conjunto de externalidades ambientales negativas asociadas (Prados et al. 2002). Por tanto, la IA integra elementos vinculados al manejo y uso del suelo, y de los ecosistemas asociados, con efectos en el funcionamiento de los sistemas ambientales que aún resta conocer. Este camino ha sido dificultoso debido a la falta de consenso para definir los posibles impactos de la intensificación agraria y por tanto también, en la falta de una metodología operativa para su medición y evaluación espacio-temporal. Además, debido a que la IA afecta a un conjunto de componentes

¹ Organización de carácter científica, fundada en 1968 por un conjunto de empresas y fundaciones transnacionales, cuyo objetivo es financiar proyectos que analicen la viabilidad ecológica del planeta de la mano del crecimiento económico.

del sistema ambiental y sus interacciones, resulta especialmente complejo el modelado y la interpretación de todas las variables involucradas.

En este marco, el presente artículo pretende aportar a las definiciones ya existentes de la IA, mediante una metodología operativa de su cálculo a través de un índice que integra a la producción primaria neta aérea (PPNA), entendida a esta como una variable síntesis, ya que involucra procesos biofísicos como la disponibilidad de nutrientes y agua, la temperatura, la incidencia de la radiación solar, el contenido de CO₂ en la atmósfera (Nemani et al. 2003), que es afectada directamente por el tipo de cobertura vegetal (Paruelo et al. 2004). Al ser la PPNA una variable de comportamiento del sistema ambiental que integra atributos estructurales y/o funcionales (Fisher et al. 2009; Laterra et al. 2011; Requena-Mullor et al. 2014; Reyes-Díez et al. 2015) y la IA un proceso de de auto(transformación) de dichos atributos, el análisis de la variable PPNA que responde al proceso de IA permite identificar y aproximarse al funcionamiento de los sistemas ambientales y complementar a los estudios existentes.

Figura 1. Evolución de la superficie relativa de la forestación exótica y de los cultivos de cereales y oleaginosas por área de enumeración².



Fuente: Elaboración propia.

² A) forestación en 2000, B) forestación en 2011, C) cultivos de cereales y oleaginosas en 2000 y D) cultivos de cereales y oleaginosas en 2011.

El comienzo del siglo XXI ha determinado en la Cuenca del Plata un conjunto de transformaciones territoriales asociadas al proceso de intensificación agraria, con un aumento sostenido de la degradación de los suelos (CIC 2017). Uruguay, como parte de esta región, se encuentra afectado por los cambios en el uso del suelo que se manifiestan en el crecimiento de la superficie destinada a los cultivos cerealeros e industriales y a la forestación exótica (Figura 1). Estos rubros están asociados al desarrollo del agronegocio con un importante despliegue espacial en la región y con un acelerado incremento en inversión de capital, el cual se ha reflejado de manera directa en el aumento de las exportaciones (Ceroni 2018).

En este contexto, se busca responder dos interrogantes centrales en el comportamiento espacio-temporal de los sistemas ambientales del Uruguay, por un lado ¿Cuál es la distribución espacial de la intensidad de uso del suelo en Uruguay durante el comienzo del siglo XXI? y por otro, ¿Cuál ha sido la tendencia temporal de la intensidad de uso del suelo en Uruguay durante el comienzo del siglo XXI? En este sentido, el objetivo de este trabajo es analizar la distribución espacio-temporal del proceso de intensificación agraria en Uruguay durante el comienzo del siglo XXI y su incidencia en la PPNA.

2. METODOLOGÍA

La estrategia implementada integró la definición e implementación de un índice de intensidad de uso del suelo y el análisis espacio-temporal del índice de vegetación diferencial normalizado (NDVI).

2.1. ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DEL NDVI

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la teledetección constituyen herramientas fundamentales y básicas que permiten evaluar los cambios en los usos del suelo (Guerschman et al. 2003; Zhang et al. 2007). En los últimos años existe un aumento sostenido en la utilización de imágenes satelitales de baja resolución para el monitoreo de la variación anual de la vegetación en escalas pequeñas de análisis. Las bajas resoluciones espaciales son contrarrestadas por altas resoluciones temporales que permiten un monitoreo en escalas temporales reducidas (Carreiras et al. 2002; Etchanchu et al. 2017; Guissard et al. 2004; Tarnavsky et al. 2008). Para los monitoreos de sustitución y cambios en la cobertura vegetal, los índices de vegetación se han convertido desde hace varias décadas en las principales fuentes de información. El más utilizado es el NDVI, indicador directo de la cantidad de biomasa verde fotosintéticamente activa (Tucker and Sellers 1986) que se encuentra fuertemente correlacionada con la PPNA (Prince 1991). El NDVI ha sido ampliamente utilizado a diversas escalas: locales (Ceroni et al. 2015), regionales, continentales y globales (Zhao and Running 2010) y a partir de diversos productos espaciales, destacándose entre ellos el Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT), y The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).

2.2. BASE DE DATOS

Para el cálculo del NDVI se utilizaron imágenes del programa SPOT, correspondiente a los satélites SPOT 4 y 5. Los productos utilizados corresponden a imágenes de baja resolución espacial (1km²) y alta resolución temporal (10 días), disponibles desde 1/4/1998. La temporalidad

de la base de datos generada corresponde al período de enero de 2000 a mayo de 2010 (período entre censos agropecuarios de 2000 y 2011). De esta manera, la base de datos estuvo compuesta inicialmente por 365 imágenes.

Los productos NDVI de SPOT-VGT contienen la información en valores numéricos (DN) con una amplitud de 256 (0 a 255), estos valores corresponden a una función lineal del NDVI:

$$\text{NDVI} = (a * \text{DN}) + b \quad (1) \quad \text{Siendo: } a = 0.004 \text{ y } b = -0.1$$

2.3. PROCESAMIENTO

La primera etapa de procesamiento correspondió al filtrado de los datos. Se trabajó con el Software ENVI 4.7 e IDL Virtual Machine 6.3, mediante una aplicación "regression.sav3". Se obtuvieron los estadísticos principales por imagen (media aritmética (MA), desvío estándar (DS) el máximo y mínimo). El conjunto de los estadísticos fue reunido por estación, verano (diciembre, enero y febrero), otoño (marzo, abril y mayo), invierno (junio, julio y agosto), y primavera (setiembre, octubre y noviembre). Este corte estacional sirvió de base para la identificación de los datos atípicos. Datos posteriormente eliminados utilizando el criterio del comportamiento en una distribución normal de los residuales (Anderson et al. 2010), en los cuales se consideraron atípicos si los valores caían fuera del rango de $Z < -2$ o $Z > 2$, debido a que se encuentran en las colas de la distribución normal, por fuera del 95.4 % de la serie de datos. Luego de este procesamiento fueron descartadas 15 imágenes.

Posteriormente se procedió a la etapa de suavizado, la cual ayuda a disminuir los cambios abruptos de la serie, producidos generalmente por los ruidos y alternaciones que contienen las señales captadas por los sensores de los satélites (Cihlar et al. 1997; Goward et al. 1991). Por tanto, todos los métodos que ayuden a disminuir la brecha entre el dato real y el dato observado, mejorando los resultados obtenidos. Para ello, se empleó el programa Virtual Machine 6.3, mediante una secuencia de cuatro tipos de suavizados, el ajuste de la "Media Móvil", el ajuste de "Savitzky-Golay" y los ajustes mediante los métodos polinómicos X y 6. Tanto para el modelo de "Media Móvil", y de "Savitzky-Golay" se utilizó una ecuación de orden 2, mientras que para el modelo polinómico se utilizó un orden 6 y un orden X, ajustando este último por cada pixel en el mejor grado polinómico (Atzberger and Eilers 2011). Para evaluar el mejor modelo de ajuste a la serie original se utilizaron los parámetros del Error Medio Cuadrático (EMC) y de Rugosidad (RU).

2.4. INTENSIDAD DE USO DEL SUELO

Se diseñó un índice de intensidad de uso del suelo a escala de área de enumeración (AE) definidas en los censos agropecuarios de los años 2000 y 2011.

Para su elaboración se empleó la técnica Proceso Analítico Jerárquico (AHP), desarrollado por Saaty (1980). El AHP es una técnica que permite, a partir de consultas a expertos, sistematizar la ponderación de un conjunto de variables a los efectos de determinar el peso relativo de cada variable de

³ Dicha aplicación fue proporcionada por el Dr. Rene Colditz.

respuesta. En este caso, fueron consultados 20 especialistas en geografía, agronomía, gestión de recursos naturales y ecología, sobre la intensidad de 8 categorías de uso del suelo (huertas, cereales y oleaginosas, frutales, forestación, praderas, campo natural, campo natural mejorado, y humedales y bosque nativo) que surgen de una agrupación realizada de la información oficial del censo agropecuario (DIEA 2011a). Cada categoría fue valorada en términos relativos mediante una comparación con las otras, generando una matriz de 8x8 que evaluaba desde 1/9 (mucho menos intensivo) a 9 (mucho más intensivo) a cada categoría de uso del suelo. Luego se constató la consistencia de las respuestas (Saaty 1980) y posteriormente con los casos que cumplieron ese requisito se estimó el peso de cada categoría. El valor de intensidad de uso del suelo es el resultado de la sumatoria ponderada de la superficie relativa de cada categoría (Ec 1).

$$\text{Ec.1} \quad \mathbf{IAE}_i = \sum (S_{ni} / \mathbf{SAE}_i) \times P_n$$

Dónde:

IAE=Intensidad en el AE i

S=Superficie del uso del suelo n en el AE i

SAE= Superficie total AE i

P= Ponderador del uso del suelo n

Posteriormente el índice fue estandarizado (Ec 2), asumiendo valores de 0 a 1, correspondiendo 1 a la situación en la cual la totalidad del área de enumeración presenta el uso de mayor intensidad.

$$\text{Ec.2} \quad \mathbf{IIAE}_i = (\mathbf{IAE}_i / \mathbf{IAE}_{\text{máx}_i})$$

Dónde:

IIAE = Índice de intensidad en el AE i

IAE máx i = Índice de intensidad máximo posible en AE i

2.5. ANÁLISIS DE DATOS

A los efectos de caracterizar el comportamiento del NDVI para todo el territorio nacional se trabajó con análisis de series temporales, mediante la implementación de la prueba no paramétrica de tendencia de Mann-Kendall (Hirsch et al. 1982; Westmacott and Burn 1997).

Posteriormente, se analizó la relación entre los valores de intensidad de uso del suelo y los valores de NDVI hallados a escala de área de enumeración. Para esto se realizaron análisis de correlación no paramétrica de Spearman (Legendre and Legendre 1998).

Finalmente se generó un agrupamiento de las áreas de enumeración en función de sus valores de intensidad de uso del suelo (muy alta, alta, media y baja), y se analizó la tendencia en sus valores de NDVI para el período 1999-2010 utilizando la prueba de Mann-Kendall y analizando la pendiente de Sen (Sen 1968).

Las comparaciones de valores de NDVI, entre las diferentes categorías de intensidad de uso del suelo se realizó mediante el análisis de varianza (ANOVA) de medidas repetidas (F). Los datos cumplieron con la hipótesis de esfericidad por lo que se utilizó el estadístico F sin corrección (von Ende 1993). Posteriormente, se realizó la prueba post-hoc para efectuar la comparación múltiple entre los valores de NDVI pertenecientes a las diferentes categorías de intensidad de usos del suelo, utilizando la prueba de Tukey.

Los procesamientos se realizaron utilizando el programa R (R Core Team, 2017), y las librerías Kendall (McLeod 2011) y wq (Jassby and Cloern 2017). En todos los casos se asumió un p valor de 0.05.

3. RESULTADOS

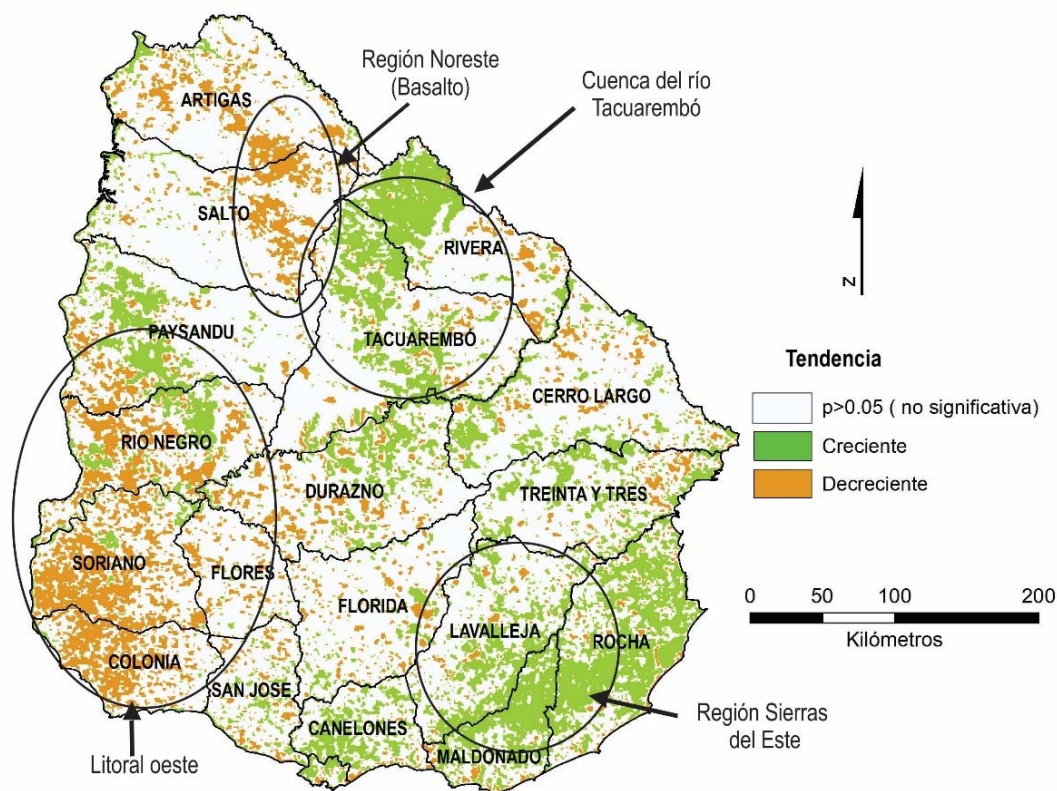
3.1. SUAVIZACIÓN

Según los parámetros medios del EMC y RU el mejor modelo de ajuste fue el de "Medias Móviles" con un EMC de 0.523 y un RU de 0.192. El resto de los modelos obtuvieron peores comportamientos del EMC y el RU.

3.2. COMPORTAMIENTO DEL NDVI A ESCALA PAÍS

El valor de NDVI medio para todo el país no presentó una tendencia significativa en el período estudiado (MK, $p > 0.05$). Sin embargo, el 16% de la superficie del país presentó una tendencia significativa creciente ($p < 0.05$, $Sen > 0$) y el 34% presentó una tendencia decreciente significativa ($p < 0.05$, $Sen < 0$) (Figura 2).

Figura 2. Tendencia del NDVI en el período 2000-2011.



Fuente: Elaboración propia.

La tendencia creciente se registró principalmente en la zona sureste y sur del país, en la cuenca del Río Tacuarembó, y en la zona del Basalto, y en la zona central de los departamentos de Río Negro y Salto. En la zona con tendencia creciente predominan las coberturas de pastizales naturales,

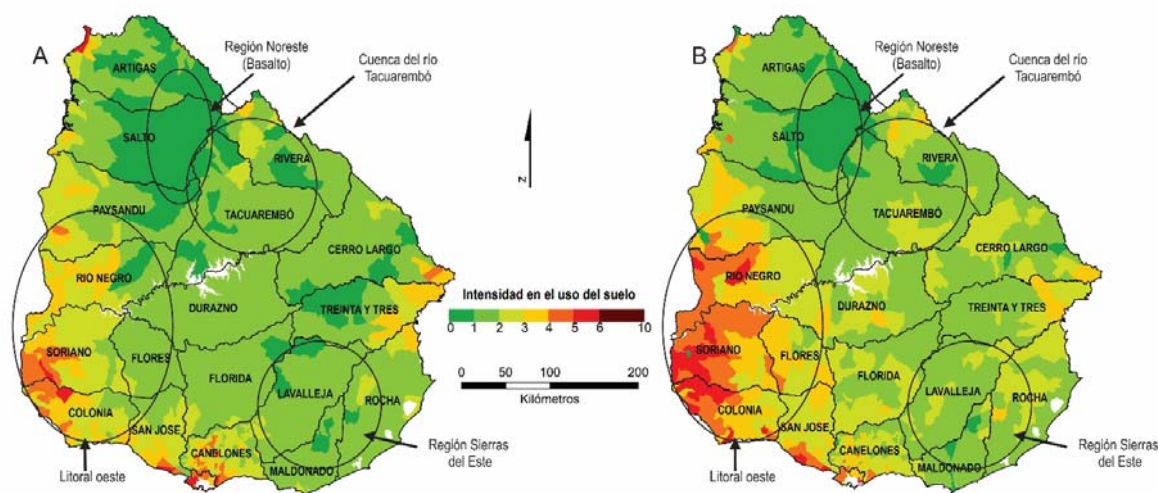
monte nativo y forestación exótica. Mientras que la tendencia decreciente se registró principalmente en la zona del litoral sur y centro del país, en la zona este de los departamentos de Salto y Artigas. En estas zonas predomina la agricultura de secano y la ganadería de mayor intensidad (Figura 1).

3.3. INTENSIDAD EN EL USO DEL SUELO

Se destaca un incremento de los valores de intensidad de uso del suelo en más del 70% de las áreas de enumeración, las que determinan más del 83% de la superficie del país (Figura 3). A escala país, el valor medio de intensidad en el año 2000 (1.66) presentó un crecimiento del 29% en 2011 (2.14). Los cambios en la intensidad han sido diferenciales a nivel espacial, registrándose principalmente en la zona suroeste, zona de mayor intensidad de uso del suelo rural. Adicionalmente se visualiza la importancia creciente del avance de la frontera agrícola desde el litoral oeste hacia el centro del país, debido mayoritariamente a la expansión de los cultivos de secano. Además, se destaca el importante crecimiento de la forestación en el sureste y noreste, y la pérdida de importancia relativa de los cultivos cerealeros (arroz) en la zona este del país.

El proceso de intensificación muestra un importante avance de la frontera agrícola, en primera instancia hacia el centro este del país y posteriormente se consolida en toda la región del centro. Estos procesos se explican fundamentalmente por la expansión sostenida de los cultivos cerealeros y oleaginosos y por la importancia relativa de la forestación exótica que consolida a la zona este (Figura 1).

Figura 3. Intensidad del uso del suelo en A) año 2000 y B) año 2011



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de NDVI se vieron afectados por la intensidad de uso del suelo del AE ($F=440$, $p<0.0001$). En cuanto a las comparaciones entre categorías, las diferencias entre los valores de NDVI de las categorías de intensidad muy alta y alta fueron significativamente superiores ($p<0.001$) a las de las categorías media, y las tres categorías fueron significativamente superiores ($p<0.001$) a la categoría baja. No se detectaron diferencias significativas entre las categorías muy alta y alta ($p>0.05$).

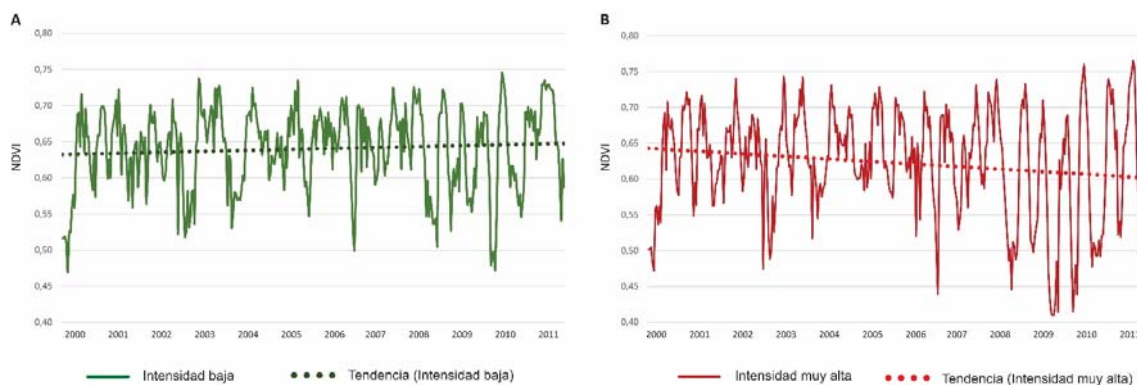
Los mayores valores medios de NDVI se registraron en las AE de menor intensidad de uso del suelo (Tabla 2). Esta situación se registró para los valores medios de todo el período, para los valores medios de cada año, y para los valores medios por estación. En las zonas de mayor intensidad de uso del suelo los mayores valores de NDVI se registraron en los meses de verano, mientras que en las zonas de menor intensidad en los meses de primavera ($p < 0.05$).

Tabla 2. NDVI medio para el todo el período y por estación del año, según intensidad de uso del suelo del área de enumeración

	Intensidad de uso del suelo			
	Muy Alta	Alta	Media	Baja
NDVI	0,612	0,620	0,636	0,644
NDVI verano	0,648	0,644	0,644	0,644
NDVI otoño	0,576	0,584	0,636	0,652
NDVI invierno	0,600	0,600	0,608	0,616
NDVI	0,620	0,632	0,652	0,664

Fuente: Elaboración propia.

Figura 5: Tendencia del NDVI en: A) AE con baja intensidad y B) AE con alta intensidad.



Fuente: Elaboración propia.

Las AE de mayor intensidad de uso del suelo rural presentaron una tendencia significativa decreciente del NDVI (MK test, $z = -1,97$; $p < 0.05$) (Figura X). De forma contraria, las AE que no registraron procesos de intensificación del uso del suelo rural, presentaron una tendencia creciente del NDVI (MK test, $z = 1,68$; $p < 0.05$) (Figura 5). Además, en las AE de mayor intensidad, las tendencias decrecientes más notorias se registraron en las AE de mayor intensidad. Inversamente ocurrió al interior de las AE de menor intensidad.

4. DISCUSIÓN

En el período comprendido entre los censos agropecuarios de 2000 y 2011 se ha registrado un claro proceso de intensificación agraria. La zona suroeste ha sido la de mayor intensidad en ambos períodos, y el proceso de intensificación ha avanzado desde el suroeste hacia el centro del país. Por otro lado, se han registrado zonas del país con tendencia creciente del NDVI, zonas con tendencia decreciente y zonas sin una tendencia significativa. Las zonas con tendencia decreciente se asociaron a las zonas con mayor intensidad en el uso del suelo rural, mientras que las zonas de tendencia creciente se relacionan a las zonas de menores intensidades de uso del suelo.

La productividad no ha tenido un comportamiento homogéneo a nivel temporal y tampoco a nivel espacial. Se registró una tendencia temporal no significativa en todo el período, que podría explicarse por la secuencia de dos períodos con tendencias opuestas: entre 2000 y 2009 un período seco y entre 2009 y 2015 un período húmedo. Este comportamiento ha sido identificado por Zhao y Running (2010) en estudios a escala global y se ajustan al comportamiento encontrado en Uruguay. A nivel espacial se destacan zonas con diferentes comportamientos tanto en sus valores promedios de NDVI como así también en sus tendencias. Esta situación sugiere la incidencia de los usos del suelo en el comportamiento de la productividad (Jain and Yang 2005) y además, la tendencia decreciente del NDVI en las zonas con mayor nivel de intensificación indica la necesidad de considerar el comportamiento del sistema ambiental cuando se aumentan los niveles de cosecha. Estos resultados evidencian la importancia de la utilización de las series temporales del NDVI como indicador del comportamiento del sistema ambiental en relación a la evaluación de la intensificación del uso del suelo y la variabilidad espacio-temporal de la productividad.

El comportamiento de la productividad ha presentado también cambios importantes entre las estaciones del año. Hasta 2006 los mayores valores medios de NDVI se registraron en primavera, asociado a los picos máximos de productividad de los pastizales naturales (Guido et al. 2014). Sin embargo, a partir de 2007 los valores máximos se registraron en los meses de verano. Esta situación pone en evidencia la importancia del crecimiento de los cultivos de verano (principalmente soja) y el cambio radical de la agricultura uruguaya transitando desde la dominancia histórica de los cultivos invernales (trigo y cebada principalmente) hacia un escenario de veranización de la agricultura (Arbeletche 2016). Estos cambios han generado que durante el invierno, en muchos campos de cultivo de soja el suelo se encuentre prácticamente sin vegetación, estando solamente protegido con los escasos residuos vegetales de los rastrojos de la soja, el cual tiene muy poca biomasa para cubrir el suelo, lo que favorece el riesgo de erosión (Bidegain et al. 2010). Por otra parte, existe un aumento sostenido de introducción de plaguicidas y fertilizantes en las cuencas agrícolas, del orden del 400 % para el período 2000-2011 (DIEA 2012), lo que está generando una serie de problemas de eutrofización de cuerpos de agua superficial (Aubriot et al. 2017; Fabre et al. 2010) y principalmente muchas incertidumbres sobre los impactos en el mediano y largo plazo sobre los sistemas ambientales.

El proceso de intensificación agraria ha sido muy significativo durante el comienzo del siglo XXI, ya que afectó el 80 % del país. Frente a este resultado, surgen algunas hipótesis explicativas. En primer lugar, durante el período analizado existió un aumento sostenido de los precios de las

materias primas. Según el índice de precios de las materias primas agrícolas (CFPI-Commodity Food Price Index) integrado por diversas mercancías agrarias (cereales, aceites vegetales, carne, mariscos, azúcar, plátanos y naranjas) para el mes de enero del año 2000 registraba 48 U\$S la tonelada, mientras que para el mismo mes del año 2011, el precio había aumentado a 126 U\$S la tonelada (IndexMundi 2017a). Esto marca la tendencia global creciente de los precios de las materias primas, pero si observamos los datos para el cultivo de soja, siendo el de mayor crecimiento en superficie y volumen que registro el país durante el periodo analizado (DIEA 2012) para enero del año 2000 el precio registraba 208 U\$S la tonelada, mientras que para el año 2011 del mismo mes el precio era de 436 U\$S la tonelada (IndexMundi 2017b). Por tanto, para los once años considerados existió un aumento de más del doble de los precios de las materias primas, lo que ayudo de manera significativa al crecimiento del sector agropecuario en general. Esta coyuntura internacional, lleva a la segunda hipótesis explicativa, referida al aumento en la inversión de capital en el sector. Dicha inversión ocurrió principalmente el capital constante, en búsqueda de un aumento de la productividad. Si se observan los datos de la importación de insumos (fertilizantes) para el año 2000 se habían importado 295,619 toneladas, mientras que para el año 2011 la importación fue de 806.468 (incremento del 173 %) (DIEA 2008, 2012). Además, en este período existió la incorporación del paquete tecnológico denominado la "segunda revolución verde" basado en la plantación de cultivos transgénicos y del manejo de uso del suelo denominado "laboreo cero" (Segrelles 2005). Esto género que existiera una fragmentación de los procesos productivos, aumento en la tercerización de las fases productivas, lo que llevo al extremo la racionalidad y gestión del recurso suelo, llegando a casi un cultivo y medio por año (DIEA 2011b).

Este comportamiento, de todas maneras, ha sido diferencial entre las diferentes zonas del país. El proceso de intensificación se agudiza en las zonas históricamente agrícolas (suroeste), siendo las zonas de mayor fertilidad natural del suelo, lo que permite mayores niveles de productividad y ganancias para el capital. El despliegue espacial del capital hacia otras zonas del país (zonas centro) en búsqueda de la reproducción ampliada, va estar influenciado por los niveles de rentabilidad que pueda encontrar. En este sentido, la compensación entre el precio internacional de la mercancía producida, la composición orgánica del capital y la fertilidad natural del suelo, son elementos que intervienen en la producción (Arango, 1983) e influyen directamente sobre la expansión de la frontera agrícola del Uruguay.

El proceso de intensificación y particularmente su comportamiento espacial ha generado diversos impactos. La competencia territorial con otros usos ha desplazado de forma voluntaria (venta de tierras) y forzosa (incremento del precio de la tierra e imposibilidad de afrontar el costo del arrendamiento) a un importante número de productores. En el período intercensal se constató una disminución del 27,6% de las explotaciones agropecuarias y una disminución de 77,5% de la población agrícola (DIEA 2000, 2011a). Ambas disminuyeron más en las zonas que más se intensifican. Este proceso, adicionalmente, ha provocado el desplazamiento en el territorio de algunas actividades menos intensivas como la ganadería, que abandona tierras con potencial agrícola y pastoril, y se localiza en zonas de menor aptitud. Estos procesos, no han sido acompañados por un monitoreo sobre los efectos en los sistemas ambientales, generado un conjunto de incertidumbres sobre los resultados de la presión creciente de las actividades agropecuarias sobre los suelos y ecosistemas. Tampoco se ha avanzado sobre los criterios para el ordenamiento territorial de estas

actividades, en especial en cuanto a la definición de posibles escenarios futuros, ya sean definidos por la continuidad de las actividades o por su retracción.

El comportamiento del NDVI se presentó como un buen indicador de los procesos que están ocurriendo en los territorios agrícolas. La productividad primaria ha tenido una tendencia creciente en las zonas productivas con menores valores de intensidad en el uso del suelo. Sin embargo, en las zonas de mayor intensidad se registraron menores valores de NDVI. En un proceso que, junto al aumento del uso de insumos para mantener los niveles de intensificación, están acelerando la alteración en el funcionamiento de los agroecosistemas. Además, en las zonas con mayor intensidad de uso del suelo se están desarrollando las mayores transformaciones en las relaciones socio-económicas del país, y además las mayores transformaciones en los ecosistemas y por lo tanto en la provisión de servicios que estos brindan. Por otro lado, en las zonas de mayor intensidad de uso del suelo la disminución del NDVI es mayor, lo cual además de reforzar lo anterior presenta un escenario futuro de mayor complejidad asociado a que los problemas detectados serán mayores en las zonas de mayor intensidad.

Uruguay, país agroexportador, durante los primeros años del siglo XXI ha recibido los mensajes de suba de precios de los commodities y ha respondido con una apertura a la inversión de capital extranjero principalmente y también nacional, que se ha materializado en el proceso de intensificación agrícola. Este proceso, asociado a las dinámicas de los mercados internacionales, y aún con variaciones, es esperable que se mantenga relativamente estable en los próximos años. Por lo tanto, la presión ejercida sobre los territorios rurales, y la capacidad de resiliencia y posterior recuperación de estos es actualmente una gran interrogante. El análisis mediante variables síntesis puede contribuir a responder a estas interrogantes además de ser un instrumento sumamente operativo para el monitoreo del proceso de intensificación.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo aporta una metodología simple y de fácil aplicación para dar cuenta del proceso de intensificación agraria mediante la utilización de una variable de respuesta de los sistemas ambientales como es la PPN. Los cambios en la intensidad de uso del suelo determinaron cambios en la tendencia de la productividad primaria, situación que deja abierta la interrogante sobre qué capacidad tienen los sistemas ambientales de Uruguay para seguir amortiguando procesos de intensificación agraria, proceso que viene ocurriendo en toda la cuenca baja del Río de la Plata.

Los resultados obtenidos destacan la incidencia negativa de los procesos de intensificación sobre los sistemas ambientales, a los cuales se le adicionan otros impactos vinculados al modelo de desarrollo que la impulsa y que la consolidada, debido a los impactos históricos en las dimensiones económicas, sociales y políticas.

Los cambios en la productividad primaria neta y en dos de los principales parámetros demográficos del agro uruguayo, asociados a los procesos de intensificación agraria, invita a preguntarse si es posible sostener que las estrategias actuales del capitalismo correctivo basada en teorías y conceptos asociados al "capitalismo verde" e "intensificación sustentable" son aún vigentes y viables.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, L. O., Malhi, Y., Aragao, L. E. O. C., Ladle, R., Arai, E., Barbier, N., y Phillips, O. (2010). Remote sensing detection of droughts in Amazonian forest canopies. *New Phytologist*, 187(3), 733–750. doi:10.1111/j.1469-8137.2010.03355.x
- Arbeletche, P. (2016). *Análisis de la agricultura desde la perspectiva de la Economía Industrial: el caso de Uruguay*. Universidad de Alicante.
- Atzberger, C., y Eilers, P. H. C. (2011). Evaluating the effectiveness of smoothing algorithms in the absence of ground reference measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 32(13), 3689–3709. doi:10.1080/01431161003762405
- Aubriot, L., Delbene, L., Haakonsson, S., Somma, A., Hirsch, F., y Bonilla, S. (2017). Evolución de la eutrofización en el Río Santa Lucía: influencia de la intensificación productiva y perspectivas. *Innotec*, 14.
- Barreda, A. (2007). Capitalismo y devastación ecológica. In *Problemas sociales y humanos* (pp. 83–90). Ciudad de México: Itaca/Universidad de Guerrero.
- Bartra, A. (2006). *El capital en su laberinto: De la renta de la tierra a la renta de la vida*. México DF: ITACA.
- Bidegain, M., García Prechac, F., Hill, M., y Clerici, C. (2010). La erosión de Suelo en sistemas agrícolas. In *La intensificación agrícola: oportunidades y amenazas para un país productivo y natural* (CSIC., pp. 67–88). Montevideo.
- Boserup, E. (1965). The conditions of agricultural growth. *Population Studies*, 20(1), 1–108. doi:10.2307/2172620
- Carreiras, J. M. B., Shimabukuro, Y. E., y Pereira, J. M. C. (2002). Fraction images derived from SPOT-4 VEGETATION data to assess land-cover change over the State of Mato Grosso, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 23(23), 4979–4983. doi:10.1080/0143116021000016743
- Ceroni, M. (2018). El agronegocio en Latinoamérica: estrategias del capitalismo global sobre el espacio agrario uruguayo. *Perfiles Latinoamericanos*, 52(En prensa).
- Ceroni, M., Achkar, M., Gazzano, I., y Burgeño, J. (2015). Estudio del NDVI mediante análisis multiescalar y series temporales utilizando imágenes SPOT, durante el período 1998-2012 en el Uruguay. *Revista de Teledetección*, (43), 31. doi:10.4995/raet.2015.3683
- CIC. (2017). *Comité Intergubernamental Coordinador de los Países de la Cuenca del Plata Degradación de tierras en la Cuenca del Plata*. Buenos Aires.
- Cihlar, J., Ly, H., Li, Z., Chen, J., Pokrant, H., y Huang, F. (1997). Multitemporal, multichannel AVHRR data sets for land biosphere studies - Artifacts and corrections. *Remote Sensing of Environment*, 60(1), 35–57. doi:10.1016/S0034-4257(96)00137-X
- De La Fuente, E. B., y Suárez, S. A. (2008). problemas ambientales asociados a la actividad humana: La agricultura. *Ecología Austral*, 18(3), 239–252.
- DIEA. (2000). *Censo General Agropecuario*. MGAP. Montevideo.
- DIEA. (2008). *Anuario estadístico agropecuario*. MGAP. Montevideo.
- DIEA. (2011a). *Censo General Agropecuario. Resultados definitivos*. MGAP. Montevideo. <http://www.mgap.gub.uy/portal/hgxpp001.aspx?7,5,786,O,S,O>. Montevideo.
- DIEA. (2011b). *Anuario Estadístico Agropecuario 2011*. MGAP. Montevideo.
- DIEA. (2012). *Anuario estadístico agropecuario*. MGAP. Montevideo.

- Etchanchu, J., Rivalland, V., Gascoin, S., Cros, J., Brut, A., y Boulet, G. (2017). Effects of multi-temporal high-resolution remote sensing products on simulated hydrometeorological variables in a cultivated area (southwestern France). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–23. doi:10.5194/hess-2016-661
- Fabre, A., Carballo, C., Hernández, E., Piriz, P., Bergamino, L., Mello, L., Gonzalez, S, Perez, G., León, J., Aubriot, L., Bonilla, S., Kruk, C (2010). El nitrógeno y la relación zona eufótica/zona de mezcla explican la presencia de cianobacterias en pequeños lagos subtropicales, artificiales de Uruguay. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5(1), 112–125.
- Fisher, B., Turner, R. K., y Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643–653. doi: 10.1016/j.ecolecon.2008.09.014
- García, F. (2003). La agricultura latinoamericana en la era de la globalización y de las políticas neoliberales: Un primer balance. *Revista De Geografía*, 2, 9–36.
- Gazzano, I., y Achkar, M. (2013). Análisis de la Intensificación agraria en la cuenca del área protegida Esteros de Farrapos : la necesidad de articular conservación y producción. In *IV Congreso Latinoamericano de Agroecología*. Lima: SOCLA.
- Goward, S. N., Markham, B., Dye, D. G., Dulaney, W., y Yang, J. (1991). Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer. *Remote Sensing of Environment*, 35(2–3), 257–277. doi:10.1016/0034-4257(91)90017-Z
- Guerschman, J. P., Paruelo, J. M., Di Bella, C., Giallorenzi, M. C., y Pacin, F. (2003). Land cover classification in the Argentine Pampas using multi-temporal Landsat TM data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(17), 3381–3402. doi:10.1080/0143116021000021288
- Guido, A., Varela, R. D., Baldassini, P., y Paruelo, J. (2014). Spatial and Temporal Variability in Aboveground Net Primary Production of Uruguayan Grasslands. *Rangeland Ecology & Management*, 67(1), 30–38. doi:10.2111/REM-D-12-00125.1
- Guissard, V., Defourny, P., y Ledent, J.-F. (2004). Crop specific information extraction based on coarse resolution pixel sampling. In *2nd VEGETATION Int. User Conf., Antwerp, Belgium, 2004*.
- Hirsch, R. M., Slack, J. R., y Smith, R. A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18(1), 107–121. doi:10.1029/WR018i001p00107
- IndexMundi. (2017a). IndexMundi. <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=food-price-index&months=240>
- IndexMundi. (2017b). IndexMundi. <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=soybeans&months=240>
- Jain, A. K., y Yang, X. (2005). Modeling the effects of two different land cover change data sets on the carbon stocks of plants and soils in concert with CO₂ and climate change. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(2), 1–20. doi:10.1029/2004GB002349
- Jassby, A., y Cloern, J. (2017). wq: Some tools for exploring water quality monitoring data. <https://cran.r-project.org/package=wq>
- Laterra, P., Jobbagy, E., y J, P. (2011). *Valoración de bienes y servicios ecosistémicos: Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial* (INTA.). Buenos Aires.
- Legendre, P., y Legendre, L. (1998). *Numerical ecology, 2nd English Edition. Numerical ecology*,. doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- Llambí, L. (2012). Procesos de transformación de los territorios rurales latinoamericanos: Los retos de la interdisciplinariedad. *EUTOPIA*, 3, 117–134.

- McLeod, A. (2011). Kendall: Kendall rank correlation and Mann-Kendall trend test R package version 2.2. <https://cranr-project.org/package=Kendall>
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., y Behrens, W. (1972). *The limits to growth*. New York.
- Nemani, R. R., Keeling, C. D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S. C., Tucker, C. J., Myneni, R.B. y Running, S.W. (2003). Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300(5625), 1560–1563. doi:10.1126/science.1082750
- Paruelo, J. M., Garbulsky, M. F., Guerschman, J. P., y Jobbágy, E. G. (2004). Two decades of Normalized Difference Vegetation Index changes in South America: identifying the imprint of global change. *International Journal of Remote Sensing*, 25(14), 2793–2806. doi:10.1080/01431160310001619526
- Prados, M., Camarillo, J., y García, F. (2002). Metodología para la identificación y el análisis de procesos de intensificación agraria mediante la utilización de sistemas de información geográfica e imágenes de satélite. Caso práctico en la cuenca del Guadiamar. In *X Congreso de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección*. Valladolid: AGE.
- Prince, S. D. (1991). Satellite remote sensing of primary production: comparison of results for Sahelian grasslands 1981-1988. *International Journal of Remote Sensing*, 12(6), 1301–1311. doi:10.1080/01431169108929727
- R-Team. (2017). R: A language and environment for statistical computing R Foundation for Statistical Computing. Vienna. <http://www.r-project.org/>
- Requena-Mullor, J. M., López, E., Castro, A. J., Cabello, J., Virgós, E., González-Miras, E., y Castro, H. (2014). Modeling spatial distribution of European badger in arid landscapes: an ecosystem functioning approach. *Landscape Ecology*, 29(5), 843–855. doi:10.1007/s10980-014-0020-4
- Reyes-Díez, A., Alcaraz-Segura, D., y Cabello-Piñar, J. (2015). Implicaciones del filtrado de calidad del índice de vegetación EVI para el seguimiento funcional de ecosistemas. *Revista de Teledetección*, 2015(43), 11–29. doi:10.4995/raet.2015.3316
- Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process. *Education*, 1–11. doi:10.3414/ME10-01-0028
- Segrelles, J. (2005). El problema de los cultivos transgénicos en América latina: una “nueva” revolución verde. *Departamento de Geografía, Universidad del Valle*, 3, 93–120.
- Sen, P. K. (1968). On a Class of Aligned Rank Order Tests in Two-way Layouts. *The Annals of Mathematical Statistics*, 39(4), 1115–1124. doi:10.1214/aoms/1177733256
- Tarnavsky, E., Garrigues, S., y Brown, M. E. (2008). Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products. *Remote Sensing of Environment*, 112(2), 535–549. doi:10.1016/j.rse.2007.05.008
- Tucker, C. J., y Sellers, P. J. (1986). Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, 7(11), 1395–1416. doi:10.1080/01431168608948944
- Vandermeer, J., Van Noordwijk, M., Anderson, J., Ong, C., y Perfecto, I. (1998). Global change and multi-species agroecosystems: Concepts and issues. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. doi:10.1016/S0167-8809(97)00150-3
- von Ende, C. (1993). Repeated-measures analysis: growth and other time-dependent measures. In S. Scheiner y J. Gurevitch (Eds.), *Design and analysis of ecological experiments* (pp. 113–137). New York: Chapman & Hall.

- Westmacott, J. R., y Burn, D. H. (1997). Climate change effects on the hydrologic regime within the Churchill-Nelson River Basin. *Journal of Hydrology*, 202(1-4), 263-279. doi:10.1016/S0022-1694(97)00073-5
- Zhang, C., Jordan, C., y Higgins, A. (2007). Using neighbourhood statistics and GIS to quantify and visualize spatial variation in geochemical variables: An example using Ni concentrations in the topsoils of Northern Ireland. *Geoderma*, 137(3-4), 466-476. doi:10.1016/j.geoderma.2006.10.018
- Zhao, M., y Running, S. W. (2010). Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science*, 329(5994), 940-943. doi:10.1126/science.1192666