

APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN EN LA ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES EXTRAORDINARIAS DE CO₂ POR QUEMAS DE ÁREAS INSULARES EN EL COMPLEJO LITORAL DE RÍO PARANÁ (R. ARGENTINA)

Walter Sione^{1,2}, Pablo Aceñolaza^{1,3}, Lisandra P. Zamboni¹, Héctor F. del Valle⁴, M. Cristina Serafini² y Juan F. Gallardo Lancho⁵.

¹CEREGEO-FCyT/UADER, Paraná (Argentina); ²PRODITEL-UNLU, Luján (Argentina); ³CICyTTP y FCA-UNER, Diamante (Argentina); ⁴CENPAT-CONICET, Puerto Madryn (Argentina); ⁵C.S.I.C., IRNA, Salamanca (España). Correo electrónico: <sione@ceregeo.org.ar>, <acenolaza@gmail.com>, <pamelazamboni@gmail.com>, <jgallard@usal.es>.

Resumen: Los ambientes insulares del Complejo Litoral del Río Paraná (R. Argentina) están sujetos a incendios con recurrencia controlada por factores antropogénicos, climáticos y topográficos, con consecuencias a escala local, regional y global. Como resultado se producen variaciones en las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre Marzo y Junio de 2008 se produjeron una serie de incendios extraordinarios que afectaron principalmente pastizales y juncales, ubicados en las porciones internas del Complejo. El objetivo de este trabajo fue estimar las emisiones de CO₂ que se produjeron durante el citado período mediante la utilización de la teledetección e información de campo. A partir del uso de compuestos de imágenes MODIS, Landsat y CBERS, se determinaron 10 unidades de cobertura utilizando el índice de vegetación EVI (*Enhanced Vegetation Index-MODIS*), cuatro de las cuales correspondieron a vegetación herbácea. El área quemada (4550 km²) se determinó mediante la aplicación del índice BAI (*Burnt Area Index*). Las estimaciones de las emisiones de CO₂ se realizaron en base a datos de biomasa herbácea propios, datos de campo y bibliográficos, utilizando un modelo paramétrico que incluye como variables la proporción de biomasa quemada (0,6), la relación de carbono total (Ct) fijado en biomasa (0,46) y la relación Ct/CO₂ (1:3,67). Los incendios del Complejo Litoral del Río Paraná produjeron emisiones de CO₂ cercanos a los 20 Mg C-CO₂ ha⁻¹ para juncales y pajonales del Delta, mientras que para las áreas del pre-Delta se calcularon emisiones entre 18 y 34 Mg C-CO₂ ha⁻¹ para canutillares y cortaderas. Las emisiones totales estimadas para el período fueron superiores a 7,7 Tg C-CO₂. Estos niveles de emisión de CO₂ son comparables a lo anualmente producido por una ciudad argentina de unos dos millones de habitantes.

Palabras clave: Incendios, ambientes fluviales, percepción remota, BAI, EVI, MODIS.

Remote sensing application to the estimation of CO₂ emissions produced by an intense wetland fire at the Paraná River Littoral Complex (Argentina)

Abstract: Fires in wetland environments at the Paraná River Littoral Complex (Argentina) present recurrence controlled by anthropogenic, climatic and topographic factors, with local and global consequences. As a result, variations in the emissions of greenhouse gases can be found. During the period March/June 2008 there were a series of extraordinary fires that affected mainly grassland in the entire Littoral Complex. The aim of this study was to estimate CO₂ emissions that occurred during the burning period of herbaceous plant communities in the area. To perform that, vegetation units were characterized from an unsupervised classification of the EVI index (Enhanced Vegetation Index, MODIS); as a result of, ten coverage units were identified; four of them corresponded to herbaceous vegetation. The burnt area (4550 km²) was determined by applying the index BAI (Burnt Area Index). Estimations of CO₂ emissions were made based on data from herbaceous biomass, bibliographic and field data, using a parametric model that includes as variables: the proportion of burnt biomass (0.6), the relation of total C fixed in the biomass (Ct: 0.46), and the relation Ct/CO₂ (3.67). Fires in the Paraná-river Littoral Complex produced CO₂ emissions close to 20 Mg C ha⁻¹ for grasses and bushlands, while for the pre-Delta areas the emissions were estimate between 18 and 34 Mg C ha⁻¹. Estimated emissions for the evaluated period were higher than 7,7 Tg C-CO₂; these levels of CO₂ emissions are comparable to the annually produced by an Argentinean city with two millions inhabitants.

Key words: Fires, riparian ecosystems, imagery, BAI, EVI, MODIS.

INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres acumulan diferentes cantidades de Carbono, tanto en su biomasa como C orgánico edáfico (COS), dependiendo fundamentalmente de las diferentes condiciones climáticas (García Oliva *et al.* 2006). Por otro lado, la concentración atmosférica del dióxido de C (CO₂) pasó de 280 partes por millón en volumen (ppmv) antes de la revolución industrial hasta 379 ppmv en el año 2005, superando las cifras más elevadas de los últimos 650 mil años (IPCC 2007).

Los incendios son un fenómeno global, apareciendo ya como registro geológico poco después de la aparición de plantas terrestres. Este influye en los patrones de distribución de los ecosistemas y sus procesos, incluyendo la distribución y la estructura de la vegetación, el ciclo del carbono y el clima (Bowman *et al.* 2009).

Desde la década del 80 los incendios se identifican como una de las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero (Seiler y Crutzen

1980; Crutzen y Andreae 1990; Andreae *et al.* 1998). Se reconoce así que entre los agentes de cambios ambientales el fuego es uno de los principales, con impacto tanto a escala local, como regionalmente sobre los procesos hidrológicos, bioquímicos y atmosféricos (Csiszar *et al.* 2004; Roy *et al.* 2005). Bowman *et al.* (2009) indicaron la relación entre los incendios y las emisiones de CO₂ atmosférico. Los incendios producen aproximadamente la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero proveniente de la deforestación y un veinte por ciento de las emisiones totales originadas por actividad humana (Bowman *et al.* 2009).

En la actualidad existen modelos como el *CATT-BRAMS* (Freitas *et al.* 2007) que permiten estimar el transporte atmosférico y las emisiones por quema de biomasa. Una limitante en este modelo es que no es posible discriminar en todos los casos el origen de las emisiones y su relación con actividades antrópicas en grandes ciudades o si fueron producidas por sucesos extraordinarios como los incendios, reduciendo así las posibilidades de prevención y gestión.

En este sentido la teledetección constituye una herramienta que puede proporcionar un inventario rápido y preciso de las superficies incendiadas, gracias a la información que aportan los sensores remotos sobre regiones no visibles del espectro (infrarrojo cercano, *NIR*, y medio, *IRM*, térmico y microondas; Martín y Chuvieco 1998; Pereira 1999; Martín *et al.* 2005; Zamboni y Aceñolaza 2005; Sione *et al.* 2006; Sione *et al.* 2008). Así, la cartografía de áreas quemadas a partir de la teledetección se ha desarrollado notablemente en los últimos años (Ahern *et al.* 2001; Chuvieco *et al.* 2004). Más aún, estudios recientes (Chuvieco *et al.* 2002 y 2006; Opazo 2007) sugieren la precisión y conveniencia de los compuestos de imágenes *MODIS* para la cartografía de áreas recientemente quemadas, así como el uso de los índices *EVI* (*Enhanced Vegetation Index*; Huete *et al.* 2002) y *BAI* (*Burnt Area Index*; Martín *et al.* 2005).

En cuanto a la distribución geográfica de las emisiones de CO₂ algunos trabajos indican que gran parte de las emisiones ocurren en los trópicos, donde confluyen presión humana, bajo nivel de desarrollo, clima y disponibilidad de combustible, ocasionando que los aportes de gases efectos invernadero debido a la quema de biomasa sean mayores que la contribución que realizan los combustibles fósiles (Lioussse *et al.* 2004).

Es aún deficiente aún el conocimiento sobre el régimen histórico de ocurrencia de incendios y, particularmente, en los ambientes de islas a escala regional. Así mismo se desconocen las superficies, fisonomías y coberturas afectadas por los incendios, así como las consecuencias en las emisiones de CO₂ más allá de algunas publicaciones esporádicas (Zamboni y Aceñolaza 2005a; Aceñolaza *et al.* 2006; Vicari *et al.* 2006).

Relacionado con lo anterior en gran parte del Complejo Litoral del río Paraná se produjeron una serie de incendios durante el período de Marzo a Junio de 2008. Estos fueron considerados como extraordinarios por su

magnitud, época del año en que se generaron y efectos producidos sobre ciudades vecinas (Sione *et al.* 2008).

En este marco, el objetivo general de este trabajo fue integrar técnicas de teledetección y de campo para la estimación de emisiones de CO₂ a partir de los incendios producidos de Marzo a Junio del 2008 en ambientes insulares del Complejo Litoral del Río Paraná. Como objetivos específicos se planteó clasificar las principales unidades de cobertura de suelo del Complejo Litoral, evaluar las superficies quemadas totales y por unidad, y estimar las emisiones de CO₂ para el evento estudiado.

MATERIAL Y MÉTODOS

Ubicación y características del área de estudio

El área de trabajo abarca unos 17.500 km² de la llanura de inundación del Río Paraná ubicada entre 32° 00' y 34° 28' S y 60° 55' y 58° 20' O (Fig. 1).

El clima es templado-cálido y húmedo, rondando la medias de la temperatura media anual los 19 °C. La pluviometría media anual se acerca a los 1000 mm a⁻¹ con cierta estacionalidad de distribución primavero-otoñal de lluvias (Rojas y Saluso 1987).

El régimen hidrológico del sistema del río Paraná presenta anualmente un pulso de inundación (unimodal) generalmente en los meses de otoño (Abril a Junio), seguido de un período de estiaje (Neiff 1996; Zamboni y Aceñolaza 2004) que alcanza los meses de verano. A medida que se aproxima al delta propiamente dicho la dinámica adquiere mayor influencia mareal, con flujo bidireccional (Malvárez 1999).

Geomorfología

El Complejo Litoral corresponde al tramo final del río Paraná (sus últimos 350 km hasta su desembocadura), donde se conjugan estructuras fluviales con geoformas sedimentadas durante los últimos ingresos y egresos del mar durante el Holoceno (Iriondo 2004). La llanura fluvial propiamente dicha es la que está vinculada al efecto directo de la dinámica fluvial y está constituida por un sector de islas que presentan una morfología propia, con bordes externos (albardones marginales) más elevados y, tras ellos, bajos inundables en su zona interna, con áreas intermedias de transición (media loma). Se encuentran también albardones internos asociados a cauces que disectan internamente estas islas.

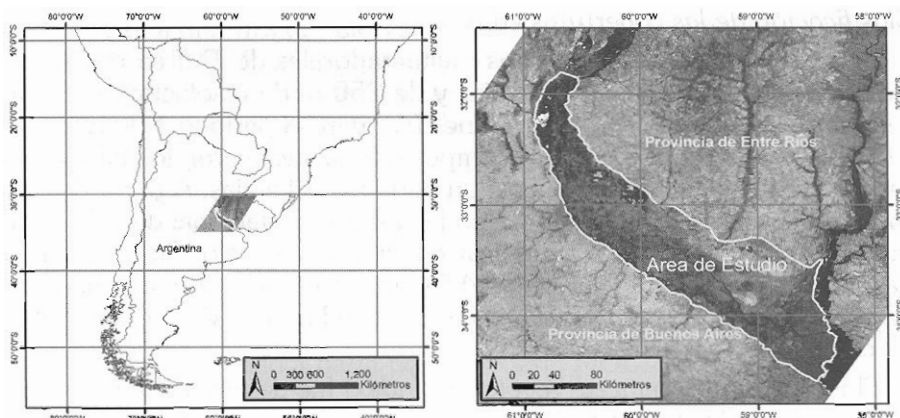


Figura 1. Ubicación del área de estudio (Entre Ríos, R. Argentina).

Cobertura del suelo

La vegetación fluvial se distribuye en un amplio rango de condiciones de hábitat. Las fisonomías herbáceas presentan una tendencia de distribución de mayor frecuencia en posiciones topográficas medias a bajas, mientras que las arbóreas lo hacen sobre posiciones altas (Aceñolaza *et al.* 2004 y 2008).

En el tramo superior y medio del Complejo Litoral, sobre albardones marginales, se extienden sauzales y alisales (*Salix humboldtiana* y *Tessaria integrifolia*) simples, mientras que en las porciones internas altas de las islas encontramos timbozales (*Albizia inundata*) y bosques mixtos. Los albardones de la porción inferior del Complejo se encontraban originalmente cubiertos por el llamado "Monte blanco" (Burkart 1957), pero que fue reemplazado prácticamente en su totalidad por plantaciones de salicáceas (Kalesnik *et al.* 2007).

En las zonas más bajas se observan una serie de comunidades vegetales herbáceas, pajonales y canutilares-verdolagales (Aceñolaza *et al.* 2005). Los juncales (*Schoenoplectus californicus* y *Cyperus giganteus*) adquieren mayor importancia en las porciones distales del Complejo.

Métodología

Para la clasificación de cobertura de suelo y la estimación de área quemada se utilizaron productos del sensor *MODIS* (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*) de 16 días (*MOD13Q1*) y 250 m de resolución nominal, generados a partir de compuestos estándar de reflectividad (*MOD09Q1*; *MODIS-TERRA*), que fueron provistos por *EOS Data Gateway* (EOS 2004).

Los datos se ofrecen escalados a $1:10^4$ y tienen una proyección sinusoidal.

Clasificación de las coberturas edáficas

La clasificación de compuestos multitemporales de *EVI* se realizó en base a productos *MODIS* de 16 días y de 250 m de resolución nominal, generando composiciones de imágenes *EVI* para el período 1 de Enero al 31 de Diciembre de 2007. En la composición se incluyeron los 23 índices *EVI* correspondiendo cada banda a un período de 16 días. A partir de esta composición multitemporal se evaluó la variación estacional del *EVI* para cada píxel y se procedió a identificar coberturas de suelo. Se realizó una clasificación no supervisada (*ISODATA: Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique*) del compuesto de 23 bandas del *EVI* y se definieron 10 clases.

El índice *EVI* (*Enhanced Vegetation Index*) fue desarrollado e incorporado dentro de los productos *MODIS* (Huete *et al.* 2002), e incluye en su cálculo la banda del infrarrojo cercano, del rojo, del azul, los coeficientes de corrección del suelo $L = 1$, usando para la corrección de efectos de dispersión atmosférica $C_1 = 6,0$ y $C_2 = 7,5$ y un factor de ganancia $G = 2,5$, según:

$$EVI = G \frac{\rho_{NIR} - \rho_{red}}{\rho_{NIR} + C_1 \rho_{red} - C_2 \rho_{blue} + L}$$

Para evaluar el grado de exactitud del resultado de la clasificación de coberturas se utilizaron imágenes de mayor resolución (*Landsat TM* y *CBERS* de fechas coincidentes con el período analizado), otras clasificaciones disponibles para el área (Salvia *et al.* 2007), imágenes de *Google Earth* y datos del terreno.

Determinación del área quemada

Para la identificación de las áreas quemadas se procedió al cálculo de un umbral para el índice *BAI* (*Burnt Area Index*). Se utilizaron para ello imágenes *CBERS 2b* órbita 165/137 del 12 de Mayo de 2008 sobre las que se realizó la interpretación visual y digitalización de polígonos de área quemada. Esos polígonos se utilizaron como máscara para analizar los valores de *BAI* calculado a partir de los compuestos *MODIS* (Enero a Junio de 2008). Para imágenes *MODIS* se propuso una variante del *BAI* que tiene en cuenta las bandas del *NIR* y el *SWIR* (Martín *et al.* 2005).

$$BAI = \frac{1}{(P_{C_{SWIR}} - \rho_{SWIR})^2 + (P_{C_{NIR}} - \rho_{NIR})^2}$$

Donde: ρ_{nir} es la Banda 2, compuesto *MODIS*; ρ_{swir} la Banda 7, compuesto *MODIS*; pc_{nir} el límite de convergencia para la señal del carbón en la banda del *NIR* (0,08); y pc_{swir} el límite de convergencia para la señal del carbón en la banda del *IRM* (0,2).

Sobre una muestra de valores de *BAI* para áreas quemadas en ambientes de islas (de 981 píxeles) se procedió al cálculo del percentil del 5 % que sería utilizado como umbral de corte para la determinación de área quemada. El criterio aplicado fue de *BAI MODIS* >85.

Para el cálculo de exactitud (y dada la dificultad de acceder a la información de campo sobre áreas quemadas en un territorio tan extenso) se decidió utilizar como base para la validación la interpretación visual (Roy *et al.* 2005) de imágenes del sensor *CBERS 2B* (Fig. 2).

Se realizó un sorteo de 100 puntos de verificación y se evaluó la presencia/ausencia de área quemada en las imágenes *CBERS 2B*; el producto de área quemada fue calculado a partir del compuesto *MODIS* (Fig. 3).

Estimación de las emisiones de CO₂

Una vez identificadas y cuantificadas espacialmente las unidades de vegetación (a partir de la clasificación de cobertura de suelo) fue posible integrar información de campo obtenida a partir de datos de biomasa a fin de estimar las emisiones de CO₂ producidas por la quema. El método (Bravo *et al.* 2007b) de estimación de biomasa y C ha sido utilizado en trabajos previos (Zamboni y Aceñolaza 2004, 2005b; Aceñolaza *et al.* 2006; Vicari *et al.* 2006).

En una primera instancia se obtuvieron valores de materia orgánica seca (MS) para cada unidad de vegetación a partir de valores de biomasa, expresados en Mg MS ha⁻¹. Para esto se han incorporado datos correspondientes a valores anuales de recolección de mantillo (necromasa) expresados en Mg MS ha⁻¹ (Zamboni y Aceñolaza 2005b) correspondientes al horizonte O sobre el suelo. Para la transformación a Mg C ha⁻¹ se dividió por dos (Bravo *et al.* 2007b).

Los datos de contenido de C orgánico del suelo (COS) para estas mismas unidades no fueron incorporados en la presente contribución debido a que se supone que, dadas las características de los incendios ocurridos, el contenido de COS (así como la biomasa de raíces), no se alteraron significativamente; por tanto, para la estimación de la emisión de CO₂ no se requieren estos datos.

La metodología utilizada para la obtención de valores de C (Mg C ha⁻¹) a partir de datos de materia seca consiste en aplicar un factor de división de 1,84 (a los valores de MS) bajo el supuesto de que el contenido de C es de aproximadamente el 46 % de la MS (Bravo *et al.* 2007b). A partir de los valores de C (Mg C ha⁻¹), se obtuvieron los valores en CO₂, multiplicando el valor de C por 3,67 (44:12; Bravo *et al.* 2007b).

Tomando como base los datos de Zamboni y Aceñolaza (2005a) se supuso que la proporción de biomasa incinerada durante el incendio fue del 60 % del total de la biomasa presente en cada unidad de vegetación. Cerca del 20 % del C

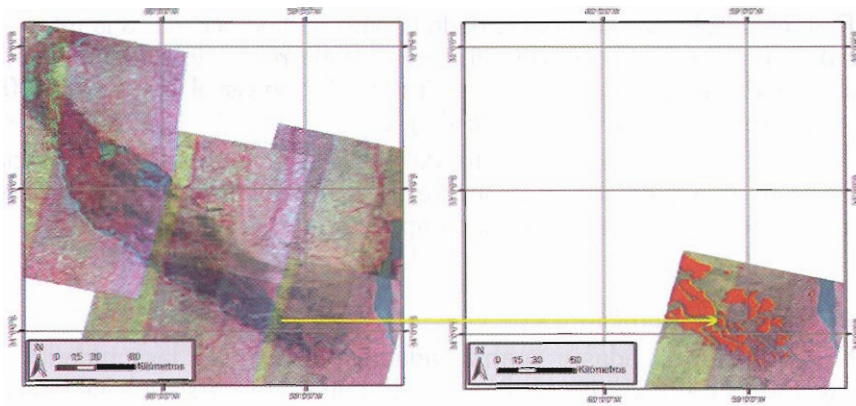


Figura 2. Digitización del polígonos de área quemada a una sola imagen. Izquierda: Mosaico de imágenes *CBERS 2B*. Derecha: Polígonos de área quemada sobre imágenes *CBERS 2B*.

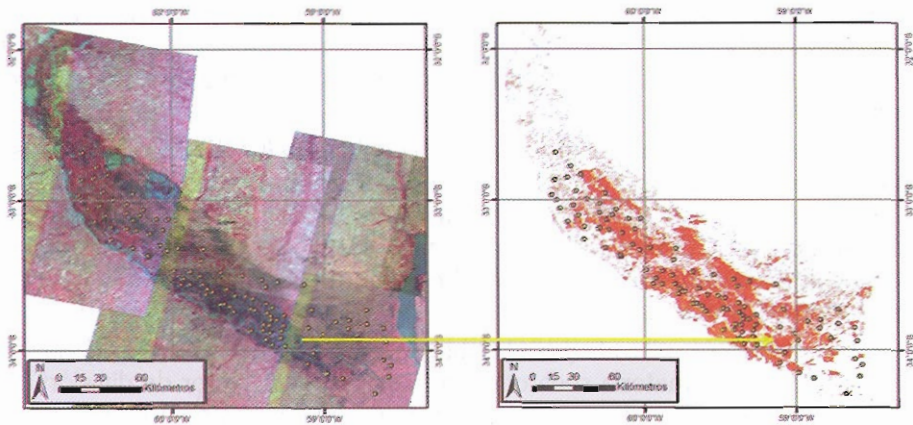


Figura 3. Verificación del área quemada. Izquierda: Puntos de verificación sobre mosaico de imágenes *CBERS 2B*. Derecha: Área quemada total para el período detectada sobre el compuesto *MODIS*.

que forma parte de la biomasa aérea se libera durante el incendio (emisión inmediata) esencialmente en forma de CO₂ (Seiler y Crutzen 1980), mientras que se estima un porcentaje del 60 % de esta emisión en relación con la biomasa de residuos (CORINE-AIRE 2000).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cobertura de suelo

El compuesto de imágenes *EVI* para el año 2007 (Fig. 4) permitió discriminar 10 clases de coberturas de suelo en ambientes de islas, de las cuales la mayoría se corresponde con patrones de paisajes que poseen fisonomías de vegetación que las caracterizan adaptando los criterios y trabajos previos (Burkart 1957; Bonfils 1962; Franceschi y Lewis 1979; Malvárez 1999; Aceñolaza *et al.* 2004; Iriondo 2004; Kalesnik y Kandel 2004; Aceñolaza *et al.* 2005; Kalesnik *et al.* 2007).

Las clases de cobertura se agruparon en fisonomías herbáceo-arbustivas (Clases 2, 6, 7, 8 y 9), arbóreas (Clases 1 y 10) y otras clases de cobertura que por sus características no presentan incendios (esto es: Agua, Clase 3; vegetación acuática, Clase 4; y suelo desnudo, Clase 5).

La exactitud de la clasificación a nivel de fisonomías fue superior al 60 %. Del total del área bajo análisis se determinó que el 12,9 % corresponde a coberturas mixtas, con presencia de fisonomías arbóreas (Clases 1 y 10), el 2,1 % corresponde a arbustivo (Clase 7) y el 69,4 % a herbáceo (Clases 2, 4, 6, 8 y 9; Tabla 1).

Al observar la distribución espacial de las unidades de vegetación se aprecia que las fisonomías arbóreas se encuentran mayormente asociadas a las áreas que limitan los cauces principales del Complejo Litoral del Paraná, diferenciándose para el extremo Norte paisajes complejos y bosques nativos (Clase 1) y para el extremo Sur paisajes más bajos y con presencia de plantaciones de salicáceas (Clase 10). Así mismo, las fisonomías herbáceas se encuentran en las zonas interiores del complejo, pudiendo identificarse en el extremo Norte-centro pastizales del Pre-Delta (dominados por cataizales y pajonales, principalmente Clases 2 y 8) y en el extremo Sur pastizales del Delta (representados por juncales y pajonales, principalmente Clase 9). Esto concuerda con lo sugerido por diferentes autores (Aceñolaza *et al.* 2005; Kandus *et al.* 2006; Kalesnik *et al.* 2007; Aceñolaza *et al.* 2008).

Determinación del área quemada

El área afectada por incendios desde inicios de Febrero hasta el 24 de Junio de 2008 en el Complejo Litoral del Paraná fue de 4550 km².

En la Tabla 1 se presentan las estimaciones de área quemada por tipos de cobertura según los resultados de la clasificación de cobertura de suelo (Fig. 4), mientras que en la Fig. 5 se presenta la superficie quemada en diferentes fechas del periodo considerado (2008). La exactitud de la estimación (considerando errores de omisión y cometidos) fue del 82 %.

Las unidades de vegetación más afectadas por los incendios fueron las que poseían fisonomías del tipo herbáceo. Así, se quemaron el 43 % del pastizal/cataizal y el 28 % de los juncuales. Las fisonomías boscosas, en su conjunto, fueron afectadas en un 11 % de su superficie.

De estas fisonomías las que se distribuyen en la porción superior del Complejo Deltaico (Pre-Delta) representan el porcentaje más significativo pero, a su vez, son las que presentan mayor heterogeneidad espacial y, también, mayor error cometido. Este problema estaría asociado a la resolución espacial de los compuestos MODIS (250 m) aplicados a estudios y evaluaciones a escala regional; en este estudio la matriz de parches enmascararía fisonomías no arbóreas presentándolas como tal, lo que puede incrementar el error sobrestimando la superficies quemadas.

La distribución temporal de los incendios (Fig. 5) permite apreciar un incremento gradual de la superficie quemada hasta el inicio del mes de Abril para, posteriormente, incrementar significativamente durante la segunda quincena de Abril (2008), alcanzándose un pico de 194.000 ha. Esa superficie declinó pero se mantuvo durante el mes de Mayo y hasta finales del período de estudio, llegando a ser en Junio (2008) de 84.189 ha.

Estimación de las emisiones de CO₂

La Tabla 1 muestra la biomasa estimada por unidades de vegetación, su superficie y el área quemada obtenida para cada una; también se incluyen los cálculos de biomasa y mantillo quemados y la estimación de emisión de CO₂.

Si se tuviera en cuenta la proporción de área representada por cada unidad y la cantidad de hectáreas quemadas se podría afirmar que las herbáceas (fundamentalmente Clases 2 y 8) son las unidades más afectadas; así, el 40 % del área de estudio está conformada por estas unidades, de las cuales un 80 % (330.000 ha) se quemaron en el período comprendido entre Abril y Junio (2008), representando el 83 % de las emisiones de CO₂, provenientes de fisonomías de herbáceas.

Las áreas polderizadas (sistematizadas) con vegetación herbácea y las de vegetación herbácea/arbustal, de régimen hidrológico primordialmente mareal, representan en conjunto menos del 3 % del área estudiada y conforman menos del 7 % del área total quemada. Por otro lado, las clases que contienen fisonomías boscosas (Clases 1 y 10) representan cerca del 11 % del área, formando parte de un paisaje heterogéneo y complejo, con presencia de fisonomías arbustivas, herbáceas y arbóreas, donde se incluyen tanto bosques nativos como plantaciones comerciales. Hay que mencionar que dichas clases poseen heterogeneidad interna por las características geomorfológicas del área y, también, por la escala de trabajo, siendo las herbáceas mayoritariamente las fracciones quemadas.

Los incendios del Complejo Litoral del Río Paraná produjeron emisiones de CO_2 cercanos a los $20 \text{ Mg C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ procedentes de las praderas de pastizales/juncales y pajonales, mientras que para las áreas superiores del Complejo (pre-Delta) se calcularon emisiones entre 18 y $34 \text{ Mg C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$ para canutillares y cortadales. Las emisiones estimadas para todo el período evaluado y, considerando la extensión espacial de las unidades de vegetación quemadas, son superiores a $7,6 \text{ Tg C-CO}_2$ procedentes de la vegetación de tipo herbáceo ($1 \text{ Tg} = 10^{12} \text{ g}$).

De acuerdo a datos publicados por Naciones Unidas (2007; *Millennium Development Goals Indicators*) las emisiones de CO_2 para Argentina durante el año 2004 fueron de, aproximadamente, $3,7 \text{ Mg C-CO}_2$ per cápita. De estos datos surge que la emisión producida durante la quema de la cobertura herbácea en el período analizado es comparable a lo anualmente generado por una ciudad argentina de dos millones de habitantes.

Resulta de especial interés la evaluación de la utilidad de estos datos básicos para el funcionamiento de modelos de simulación tales como el *Century* (Parton *et al.* 1987; Parton y Rasmussen 1994), entre otros, lo que permitirá estimar y comprender las variaciones de los distintos componentes de la materia orgánica como resultado del manejo, de gran utilidad con vistas a futuro.

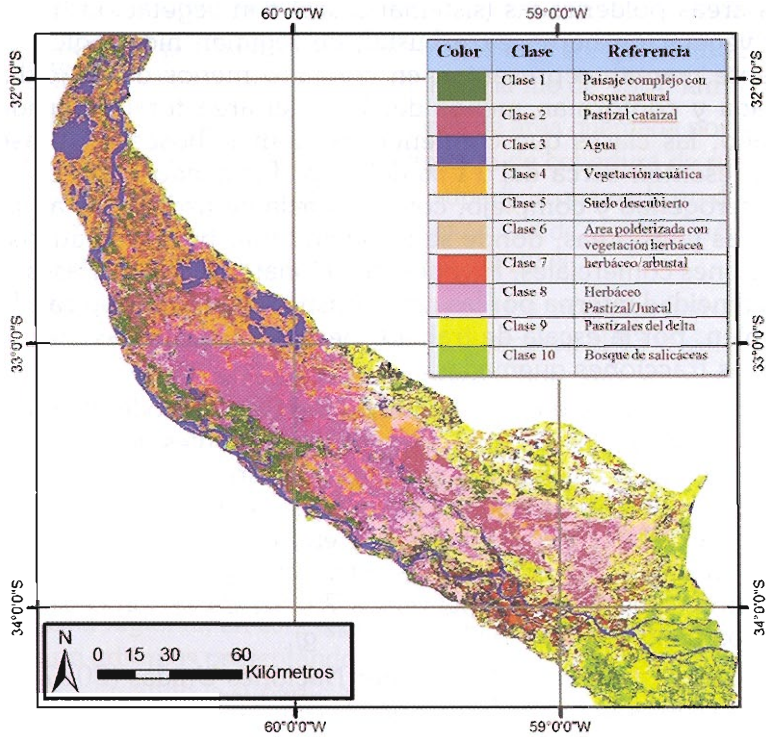


Figura 4. Coberturas del suelo en el área de estudio (Completo litoral del río Paraná, R. Argentina).

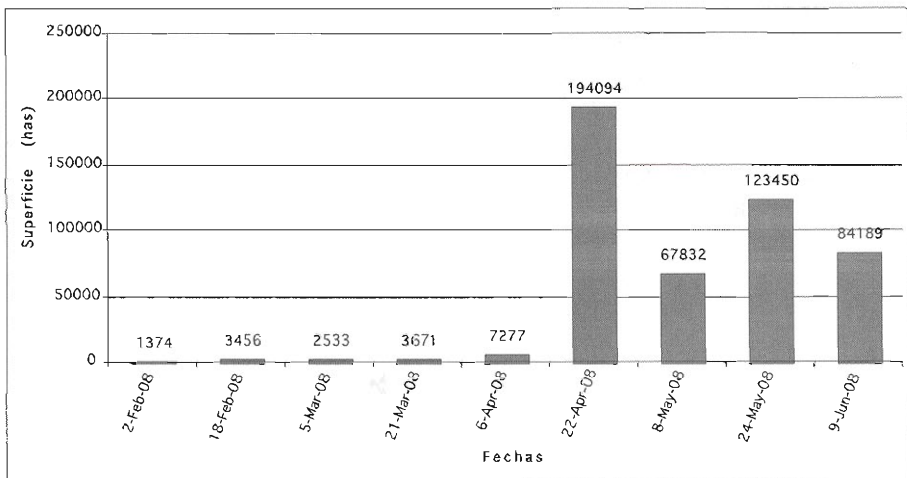


Figura 5. Superficie quemada (en hectáreas) por períodos (de 16 días cada uno, desde Enero a Junio de 2008).

Tabla 1. Estimaciones de emisiones totales de Mg C-CO₂ ha⁻¹. Fuentes: Datos propios correspondientes a: Aceñolaza et al. 2006; Zamboni y Aceñolaza 2004 y 2005b. Sd: Sin datos; nc: No corresponde.

Referencia	Área representada por cada unidad (% superficie)	Hectáreas quemadas (por cada unidad)	Quemado por unidad (% ha)	Unidades muestreadas	Biomasa (Mg MS ha ⁻¹)	Biomasa quemada (Mg MS ha ⁻¹)	C (Mg C ha ⁻¹)	CO ₂ (Mg CO ₂ ha ⁻¹)	Emisiones Totales CO ₂ (Mg CO ₂ ha ⁻¹)	Fuentes
Paisaje complejo con bosque natural	10,3	46903	10,3	Bosque albardón marginal de <i>Salix humboldtiana</i>	225	135	67,5	248	11619046	Datos propios
Pastizal caitaizal	25,9	198710	43,7	Canutillar	12	9,6	4,8	18	3500475	Datos propios
Área poldenizada con vegetación herbácea	0,6	10626	2,3	S. d.	sd	sd	sd	sd		
Herbazal/arbustal	2,1	20865	4,6							
Juncales	13,3	130770	28,7	<i>Scirpus giganteus</i> (SG)	18	10,8	5,4	20	2680785	Vicari et al. (2006)
Bosque de saltáceas	2,6	1567	0,3	<i>Schoenoplectus californicus</i> (SC)	19	11,4	5,7	21	198406	Vicari et al. (2006)
Pastizales del Pre-delta	18	45551	10,0	Plantación de <i>Populus</i> y <i>Salix</i>	115	69	34,5	127	1537984	Datos propios
Agua	7,6	0	0,0	nc	nc	nc	nc	nc		
Vegetación acuática	11,6	0	0,0	nc	nc	nc	nc	nc		
Suelo desnudo	8	0	0,0	nc	nc	nc	nc	nc		
Total	100	454992	91,5							

Emisiones totales c/herbáceas: 7719244 Mg CO₂ ha⁻¹.

CONSIDERACIONES FINALES

- Las técnicas de clasificación de cobertura de suelo a partir de compuestos *MODIS* mediante el empleo del *EVI* resultaron útiles para la discriminación de unidades de vegetación representativas del Complejo Litoral del río Paraná. La distribución espacial de las clases permite identificar un sector Norte (Pre-Delta) y uno Sur (Delta).
- El producto *MOD13Q1* resultó apropiado para la determinación de área quemada a escala regional. El umbral sobre el *BAI* estimado permitió discriminar de manera confiable el área quemada y su evolución para cada período analizado. Así mismo, se puede observar un acelerado incremento de dicha superficie desde inicios de Abril, señalando de esta forma la existencia de un pico en los incendios durante la segunda quincena de Abril de 2008.
- Las unidades más afectadas por efectos por quemas fueron las herbáceas en relación a las emisiones de CO_2 ; se produjeron, por quema de las praderas de pastizales/juncales y pajonales, emisiones cercanas a los $20 \text{ Mg C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, mientras que para el área del Pre-delta se calcularon para canutillares y cortaderales emisiones entre 18 y $34 \text{ Mg C-CO}_2 \text{ ha}^{-1}$.
- A fin de interpretar las magnitudes de las emisiones estimadas cabe mencionar que son comparables a las emisiones generadas anualmente por una ciudad argentina de dos millones de habitantes.
- Las técnicas de teledetección y su integración con técnicas de campo (como las aquí empleadas) permitieron clasificar las coberturas de suelo del Complejo Litoral del río Paraná y así estimar las emisiones de CO_2 para cada una de las unidades de vegetación.

Agradecimientos:

Los datos *MODIS* utilizados en este trabajo fueron descargados del *Land Processes Distributed Active Archive Center (LPDAAC)* y del *Center for Earth Resources Observation and Science (EROS)*, *U.S. Geological Survey (USGS, USA)*. Los datos *CBERS2B* han sido descargados del centro de distribución de datos del *I.N.P.E.* (Brasil). Se recibió financiamiento parcial por parte de la Universidad Autónoma de Entre Ríos, *ACTIER*, del *CONICET* y de la Universidad Nacional de Luján. Se agradece la revisión del Dr. F. García Oliva (*UNAM, Méjico*) y a evaluadores anónimos quienes, con sus comentarios, contribuyeron a la mejora del trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

- Aceñolaza P.G., H.E. Povedano, A.S. Manzano, J de D. Muñoz, J.I. Areta y A.L. Ronchi Virgolini. 2004. Biodiversidad del Parque Nacional Pre-Delta. *Serie Misc.*, 12: 169-184.
- Aceñolaza P., W. Sione, F. Kalesnik y M.C. Serafini. 2005. Determinación de unidades homogéneas de vegetación en el Parque Nacional Pre-Delta (Argentina). *Serie Misc.*, 14: 81-90.
- Aceñolaza P., L.P. Zamboni y J.F. Gallardo. 2006. Ciclos biogeoquímicos de bosques de la llanura de inundación del río Paraná (Argentina): Aporte de hojarasca. En: J. F. Gallardo Lancho (edt.). *Medioambiente en Iberoamérica. Visión desde la Física y la Química en los albores del SXXI*. Sociedad Iberoamericana de Física y Química Ambiental, Badajoz (España). Vol. 2: 529-536.
- Aceñolaza P., A. Manzano, E. Rodríguez, L. Sanchez, A.L Ronchi, E. Giménez, D. Demonte y Z. Marchetti. 2008. Biodiversidad de la región superior del complejo deltaico del Río Paraná. *Serie Misc.*, 17: 127-152.
- Ahern F.J., J.G. Goldammer y C.O. Justice (eds.). 2001. *Global and Regional Vegetation Fire Monitoring from Space: Planning a Coordinated International Effort*. S.P.B., Academic Publ., The Hague. 302 pp.
- Andreae M.O., T.W. Andreae, H. Annegarn, J. Beer, H. Cachier, P. le Canut, W. Elbert, W. Maenhaut, I. Salma, F.G. Wienhold y T. Zenker. 1998. Airborne studies of aerosol emissions from savanna fires in southern Africa: 2. Aerosol chemical composition. *J. Geophys. Res.*, 103: 119-128.
- Bonfils C. 1962. Los suelos del Delta del Río Paraná. Factores generadores, clasificación y uso. *Revista Investigación Agrícola*, 16: 257-270.
- Bowman D.M., J.S. J.K. Balch, P. Artaxo, W.J. Bond, J.M. Carlson, M.A. Cochrane, C.M. D'Antonio, R.S. DeFries, J.C. Doyle, S.P. Harrison, F.H. Johnston, J.E. Keeley, M.A. Krawchuk, C.A. Kull, J.B. Marston, M.A. Moritz, I.C. Prentice, C.I. Roos, A.C. Scott, T.W. Swetnam, G.R. van der Werf, y S.J. Pyne. 2009. Fire in the Earth System. *Science*, 324: 481-484.
- Bravo F., M. J. Fernández Nieto, S. Bogino, M. Segur, A. Bravo-Oviedo, R. Ruiz-Peinado y C. Ordóñez. 2007a. Bosques y gestión forestal, ¿una solución al cambio climático? En: Bravo F. (Coord.) *El papel de los Bosques Españoles en la Mitigación del Cambio Climático*. Editorial Fundación Gas Natural, Barcelona, 1-42 pp.
- Bravo F., J.A. Delgado, J.F. Gallardo, A. Bravo-Oviedo, R. Ruiz-Peinado, A. Merino, G. Montero, A. Cámara; R. Navarro, C. Ordóñez y E. Canga. 2007b. Métodos para cuantificar la fijación de CO₂ en los sistemas forestales. En: Bravo F. (Coord.) *El Papel de los Bosques Españoles en la Mitigación del Cambio Climático*. Editorial Fundación Gas Natural, Barcelona. Pp.: 65-112.
- Burkart A. 1957. Ojeada sinóptica sobre la vegetación del Delta del Río Paraná. *Darwiniana*, 11: 457-561.
- Chuvieco E., D. Cocero, D. Riaño, P. Martín, J. Martínez-Vega, J. de la Riva y F. Pérez. 2004. Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sens. Environ.*, 92: 322-331.

- Chuvienco E., M.P. Martín y G. Ventura. 2002. Evaluación de imágenes NOAA-AVHRR y Terra-MODIS para cartografía regional de áreas quemadas. *X Simposio Internacional SELPER*. Cochabamba, Bolivia. 10 pp.
- Chuvienco E., O. Sergio, H. del Valle, W. Sione, J. Anaya, F. González, G. López, C. Di Bella, N. Mari, A. Setzer, I. Csiszar, L. Manzo, F. Morelli, P. Acevedo y A. Bastarrika. 2006. Cartografía global de áreas quemadas en América Latina: experiencias del proyecto AQL2004. *XII Simposio SELPER*. Cartagena de Indias (Colombia). 10 pp.
- CORINE-AIRE. 2000. *Inventario de Emisiones de Contaminantes a la Atmósfera CORINE-AIRE 1994, 1995, 1996 e Inventarios Complementarios*. Vol 2: Análisis por Actividades Emisoras del Grupo 11 "Naturaleza" de la Nomenclatura SNAP-97. CORINE, M.M.A., Madrid.
- Crutzen P.J. y M.O. Andreae. 1990. Biomass burning in the Tropics: impact on atmospheric chemical and biogeochemical cycles. *Science*, 250: 1669-1678.
- Csiszar I., C.O. Justice, A.D. Mcguire, M.A. Cochrane, D.P. Roy, F. Brown, S.G. Conard, P.G.H. Frost, L. Giglio, C. Elvidge, M.D. Flannigan, E. Kasischke, D.J. McCrae, T.S. Rupp, B.J. Stocks y D.L. Verbyla. 2004. Land use and fires. En: *Land Change Science: Observing, Monitoring, and Understanding Trajectories of Change on the Earths Surface* (Gutman et al. eds). Kluwer Academic Publ., Dordrecht (Holanda). Pp.: 329-350.
- EOS. 2004. *NASA Earth Observing System data gateway*. Consulta: <<http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>>.
- Franceschi E. A. y J. J. Lewis. 1979. Notas sobre la vegetación del valle Santafesino del Río Paraná (República Argentina). *Ecosur*, 6: 55-82.
- Freitas S., R. K. Longo, M. Dias, R. Chatfield, P. Dias, P. Artaxo, M. Andreae, G. Grell, L. Rodrigues, A. Fazenda y J. Panetta. 2007. The coupled aerosol and tracer transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS). Part 1: Model description and evaluation. *Atmos. Chem. Phys. Discuss*, 7: 8525-8569.
- García Oliva F., G. Hernández y J.F. Gallado Lancho. 2006. Comparison of ecosystem C pools in three forest in Spain and Latin America. *Ann. For. Sci.*, 63: 519-523.
- Huete A., K. Didan, T. Miura, E. Rodríguez, X. Gao y L.G. Ferreira. 2002. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices. *Remote Sens. Environ.*, 83: 195-213.
- IPCC. 2007. *Intergovernmental Panel on Climate Change. The Physical Sciences Basis (Summary for policymakers)*. <www.ipcc.ch>. Consulta: Junio 2007.
- Iriondo M. 2004. The littoral complex at the Paraná mouth. *Quaternary Intern.*, 114: 143-154.
- Kalesnik F. y C. Kandel. 2004. *Reserva de Biosfera Delta del Paraná*. Formación en educación para el ambiente y el desarrollo. UNESCO y Municipalidad de San Fernando. UNESCO, París. 255 pp.
- Kalesnik F., P. Aceñolaza, M. Hurtado y J. Martínez. 2007. Relación entre la vegetación de los neo-ecosistemas de albardón y la heterogeneidad ambiental en el Bajo Delta del Río Paraná, Argentina. *River Res. & Appl.* En prensa. ISSN: 1535-1459.

- Kandus P., R. Quintana y R. Bó. 2006. *Patrones de Paisaje y Biodiversidad del Bajo Delta del Río Paraná. Mapa de Ambientes*. Editorial GIEH, FCEyN-UBA, Buenos Aires. 40 pp.
- Liousse C., M.O. Andreae, P. Artaxo, P. Barbosa, H. Cachier, J.M. Grégoire, P. Hobbs, D. Lavoué, F. Mouillot, J. Penner, M. Scholes y M.G. Schultz. 2004. Deriving global quantitative estimates for spatial and temporal distributions of biomass burning emissions, En: C. Granier, P. Artaxo y C. Reeves (eds.). *Emissions of Atmospheric Trace Compounds*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht (Holanda). Pp.: 77-120.
- Malvárez A. I. 1999. El Delta del Río Paraná como mosaico de humedales. En: A.I. Malvárez y P. Kandus (eds.). *Tópicos Sobre Grandes Humedales Sudamericanos*. Editorial ORCYT-MAB (UNESCO), Montevideo. Pp.: 35-53.
- Martín M.P. y E. Chuvieco. 1998. Cartografía de grandes incendios forestales en la península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. *Serie Geográfica*, 7: 109-128.
- Martín M., P. I. Gómez y E. Chuvieco. 2005. Performance of a burned-area index (BAI) for mapping Mediterranean burned scars from MODIS data. En: J. Riva, F. Pérez-Cabello y E. Chuvieco (eds.). *Proceedings of the 5th International Workshop on Remote Sensing and GIS Applications to Forest Fire Management: Fire Effects Assessment*. Universidad de Zaragoza, GOF-C-GOLD, EARSeL, París. Pp.: 193-198.
- Naciones Unidas. 2007. *Millennium Development Goals Indicators. Carbon Dioxide Emissions (CO₂), metric tons of CO₂ per capita (CDIAC)*. <<http://mdgs.un.org/unsd/mdg/SeriesDetail.aspx?srid=751&crd=>>>.
- Neiff J. 1996. Large rivers of South America: toward the new approach. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 26: 167-180.
- Opazo Saldivia S. y E. Chuvieco. 2007. Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas. *Rev. Asoc. Española Teledet.*, 27: 27-43.
- Parton W.J. y P. E. Rasmussen. 1994. Long-term effects of crop management in wheat-fallow: II. CENTURY model simulations. *Soil Sci. Soc. Am J.*, 58: 530-536.
- Parton W.J., D.S. Schimel, C.V. Cole y D.S. Ojima. 1987. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51: 1173-1179.
- Pereira J.M.C. 1999. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping". *IEEE Transact. Geosci. Remote Sens.*, 37: 217-226.
- Rojas A. y J. H. Saluso. 1987. *Informe Climático de la Provincia de Entre Ríos*. INTA EEA Paraná, Publicación Técnica N° 14. Paraná, Entre Ríos. 20 pp.
- Roy D.P., Y. Jin, P.E. Lewis y C.O. Justice. 2005. Prototyping a global algorithm for systematic fire-affected area mapping using MODIS time series data. *Remote Sens. Environ.*, 97:137-162.
- Salvia M., H. Karszenbaum, F. Grings, y P. Kandus. 2007. Datos satelitales ópticos y de radar para el mapeo de ambientes en macrosistemas de humedal. *XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Septiembre de 2007. A.E.T., Mar del Plata (Argentina).

- Seiler W. y P.J. Crutzen. 1980. Estimates of gross and net fluxes of carbon between the biosphere and the atmosphere from biomass burning. *Climatic Change*, 2: 207-247.
- Sione W., P.G. Aceñolaza, L.P. Zamboni y M.C. Serafini. 2006. Estudio de la evolución de un área quemada en ambiente de humedales de la provincia de Entre Ríos con variables derivadas de imágenes MODIS. *Actas XII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica*. Cartagena de Indias (Colombia).
- Sione W., P. Aceñolaza, L.P. Zamboni, C. Serafini, H.F. del Valle y J.F. Gallardo Lancho. 2008. Estimación indirecta de emisiones de CO₂ a partir de información satelital en áreas quemadas de ambientes insulares del delta del río Paraná (ARGENTINA). *Actas XII Simposio de la Sociedad Latinoamericana de Especialistas en Percepción Remota (SELPER)*. La Habana (Cuba). 16 pp.
- Vicari R., P. Kandus, P. Pratolongo y M. Burghi. 2006. Alteración en el almacenaje de carbono por la intervención humana de los sistemas naturales en el Bajo delta del Río Paraná. Su importancia en el balance emisión-sumidero de CO₂ atmosférico. En: Brown *et al.* (eds.) *La Situación Ambiental de la Argentina*. Editorial Fundación Vida Silvestre Argentina, Buenos Aires. Pp.: 161-163.
- Zamboni P. y P.G. Aceñolaza. 2004. Aporte al conocimiento de ciclos de materia orgánica en formaciones boscosas de la llanura de inundación del río Paraná. *Serie Misc.*, 12: 5-12.
- Zamboni L. P y P.G. Aceñolaza. 2005 a. Efectos del fuego sobre la biomasa vegetal en un área del Predelta del río Paraná (Entre Ríos, Argentina). *Bol. Soc. Argentina Bot.*, 40: 141.
- Zamboni P. y P.G. Aceñolaza 2005 b. Aporte al conocimiento de la dinámica de materia orgánica en bosques de la porción baja de la Cuenca del Plata. En: Cappato y Petean (eds.) *Humedales Fluviales de América del Sur: Hacia un Manejo Sustentable*. Editorial Fundación Proteger, Buenos Aires. Pp.: 535-541.