

Datos satelitales ópticos y de radar para el mapeo de ambientes en macrosistemas de humedal

Optical and radar satellital data for mapping and monitoring wetland macrosystems

M. Salvia¹, H. Karszenbaum¹, P. Kandus² y F. Grings¹
msalvia@iafe.uba.ar

¹ Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE), Pabellón IAFE. Ciudad Universitaria, (C1428EHA), Buenos Aires, ARGENTINA.

² Laboratorio de Ecología, Teledetección y Eco-Informática, Instituto de Investigaciones e Ingeniería Ambiental (3iA), Universidad Nacional de San Martín, Peatonal Belgrano 3563, San Martín, Pcia de Buenos Aires, Argentina.

Recibido el 28 de agosto de 2008, aceptado el 21 de enero de 2009

RESUMEN

La región del Delta del Río Paraná (Argentina) es un macrosistema de humedales que se extiende a lo largo de los 300 km, finales de la Cuenca del Paraná. Con el objetivo de identificar diferentes tipos de humedales y estimar la extensión de la última inundación, ocurrida en el verano-otoño de 2007 (enero-junio), se usaron datos provenientes de dos sistemas satelitales de resolución espacial media: El argentino SACC MMRS (Multispectral Medium Resolution Scanner) en el rango óptico y el de la Agencia Espacial Europea (ESA) ENVISAT ASAR (Advanced Synthetic Aperture RADAR) en modo WS (Wide Swath) en el rango de las microondas. Para la obtención de los mapas temáticos generados se realizaron clasificaciones progresivas no supervisadas sobre las imágenes ópticas y diferencia de imágenes en las de radar. Como resultado de este trabajo se obtuvo el primer mapa de tipos fisonómicos de vegetación para la región del delta en toda su extensión y un mapa de inundación durante el más reciente evento del Niño (2007).

PALABRAS CLAVE: Delta del Río Paraná, tipos fisonómicos, inundación, SAC-C, ENVISAT ASAR WSM.

ABSTRACT

The Paraná River Delta region (Argentina) is a macrosystem of wetlands that stretches through the final 300 km of the Paraná Basin. With the aim of identifying different types of wetland and the extent of the latest flooding in the region, data from two medium resolution satellite systems, the Argentinean SACC MMRS (Multispectral Medium Resolution Scanner) in the optical range and the European ESA ENVISAT ASAR (Advanced Synthetic Aperture RADAR) WSM (Wide Swath Mode) in the microwave range, were used. Progressive unsupervised classifications on the optical images and image differences on SAR images were used to obtain thematic maps. As a result, we obtained the first map of dominant physiognomic vegetation types for the whole region, and a map of the latest El Niño flooding (2007).

KEYWORDS: Paraná River Delta, fisonomic types, flooding map, SAC-C, ENVISAT ASAR WSM.

INTRODUCCIÓN

Una de las características significativas de Sudamérica es la gran extensión de humedales que, considerando el área de tierra firme de la biosfera, son individual y globalmente, los más grandes del mundo ocupando más de un millón de kilómetros cuadrados (Neff, 1997). En Argentina, estos ecosistemas ocupan más del 20% de la superficie del país (Kandus *et al.* 2006).

El término humedal se utiliza para denominar áreas que permanecen en condiciones de anegamiento o inundación, o por lo menos con su suelo saturado con agua, durante considerables períodos de tiempo, en particular durante la estación de crecimiento de la vegetación. Estos ambientes tienen suelos con rasgos de hidromorfismo y una biota adaptada a las condiciones de inundación o de alternancia de períodos de exceso y déficit hídrico (Mitsch y Gosselink, 2000).

Los mayores humedales de Sudamérica están asociados con las planicies de inundación de los grandes ríos (Orinoco, Amazonas y Paraná). Aquellos correspondientes al eje Paraná-Paraguay forman el corredor de humedales fluviales más importante del mundo, desde el Pantanal en Brasil, hasta el Delta del Río Paraná en Argentina. Además, su emplazamiento geográfico desde latitudes tropicales hasta templadas le confiere un especial valor desde el punto de vista de la biodiversidad. De acuerdo a Neff y Malvarez (2004), los grandes humedales fluviales de Sudamérica son macrosistemas de extensión sub-regional y su presencia y extensión depende principalmente del aporte de agua superficial (precipitaciones y descarga de los ríos), y de los ciclos de inundación-estiaje.

Estos ecosistemas cumplen funciones de gran importancia, entre ellas la reserva y purificación de agua, amortiguación de inundaciones, acumulación y/o exportación de sedimentos, materia orgánica y nutrientes, son sumideros de carbono, sostén de cadenas tróficas de sistemas vecinos, sostén económico de numerosas poblaciones locales. Además son áreas de alta biodiversidad, con importantes recursos naturales para el hombre, y sitios aptos para diversas actividades de turismo y recreación (Kandus *et al.*, 2006).

La extensión y dificultad de acceso y tránsito en estos humedales determina una significativa falta de información acerca de aspectos básicos sobre biodiversidad y ecología de estos ecosistemas y en consecuencia resultan de particular interés los

relevamientos regionales a partir de datos de sensores remotos satelitales.

Dadas las características de fragmentación natural y variabilidad temporal de los macrosistemas de humedal, idealmente, un sensor para la caracterización y monitoreo de sus procesos debería involucrar alta resolución espacial, alta frecuencia de pasada y una amplia cobertura geográfica. Estas características no están disponibles aún en un único sistema satelital.

Entre las opciones disponibles, el uso de sensores ópticos de baja resolución espacial (NOAA-AVHRR, TERRA-MODIS, etc.) tiene como ventaja la cobertura regional debido a su amplia franja de barrido. La principal desventaja de estos sistemas es la dificultad en la interpretación de la señal medida, debido a que en muchos casos los píxeles representan áreas heterogéneas, con diversas comunidades y coberturas del suelo. Aún así, estos sensores resultan ser aptos para identificar los rasgos estructurales dominantes del paisaje de humedales, como grupos fisonómicos dominantes (por ejemplo bosques, praderas de plantas acuáticas arraigadas, pastizales o cuerpos de agua libre) que dan cuenta de su funcionamiento ecológico (Kandus *et al.*, 2003).

Si bien en los sensores de resolución espacial media, como los correspondientes a la serie LANDSAT, el problema con los píxeles mixtos es menos significativo, presentan el problema de no abarcar en una sola escena (franja de barrido: 180x180 km) ni en escenas de la misma órbita, el área correspondiente a un macrosistema, que suele ser de más de cientos de kilómetros. Esto implica trabajar sobre un mosaico de imágenes de fechas dispares lo que hace más engorrosos los procedimientos para la generación de mapas de uso y cobertura y para los monitoreos regionales regulares. El sistema SACC-MMRS, por sus características orbitales, tiene una franja de barrido de 360 km y garantiza la cobertura simultánea de la región (http://catalogos.conae.gov.ar/sac_c/especificaciones.htm). Si bien tiene una menor resolución espacial (175 metros) que el sistema Landsat, en este caso resulta más adecuado que los sensores a bordo del Terra y el NOAA.

A diferencia de los sistemas ópticos, los radares de apertura sintética (SARs), que operan en las longitudes de onda de las microondas, revisten particular interés para monitorear y mapear la dinámica de inundación de los humedales (Pope *et al.*, 1997, Kasischke *et al.*, 2003, Grings *et al.*, 2006 y 2008). En

distintos tipos de vegetación, la onda transmitida por el radar (de acuerdo a su frecuencia) puede penetrar en la vegetación e interactuar con la misma y con el suelo o el agua debajo de ella. En consecuencia, el coeficiente de retrodispersión medido, magnitud física que mide el radar y que da cuenta de las propiedades del blanco, depende tanto de la estructura de la vegetación como de la condición del suelo y la presencia o ausencia de una película de agua (que tiene una constante dieléctrica mucho más alta que el suelo subyacente) altera significativamente la señal detectada en un humedal (Grings *et al.*, 2005, 2006, 2008).

El propósito general del presente trabajo es mostrar la complementariedad de la teledetección óptica y de radar de resolución media en el estudio y monitoreo de los macrosistemas de humedal sudamericanos, ilustrando su uso combinado en el Delta del Paraná. Los objetivos entonces son:

- Identificar y mapear diferentes tipos de humedales presentes en la región del Delta del Río Paraná en términos de grandes tipos fisonómicos, usando el sistema óptico argentino SACC-MMRS (de resolución espacial media)

- Determinar la extensión de la última inundación ocurrida en la región (verano-otoño 2007) usando el sistema europeo ENVISAT ASAR en modo Wide Swath (banda C, resolución espacial media)
- Analizar el alcance de la inundación para cada uno de los ambientes identificados.

En este marco, se discute el alcance de estos datos para el relevamiento y monitoreo de los humedales.

ÁREA DE ESTUDIO

La región del Delta del Río Paraná es un macrosistema formado por un mosaico de humedales que se extiende a lo largo de los 300 km., finales de la cuenca de ese río, entre los 32° 05' S, 60° 48' O, al sur de la ciudad de Diamante, Provincia de Entre Ríos, y los 34° 29' S, 58° 30' O, en las cercanías de la ciudad de Buenos Aires (figura 1). Con una superficie aproximada de 17.500 Km², la región es clave dentro de la cuenca por la oferta de situaciones ambientales contrastantes y por la importancia en términos de los bienes y servicios que ofrece en las inmediaciones del sector agroindustrial más importante y de mayor densidad poblacional de Argentina.

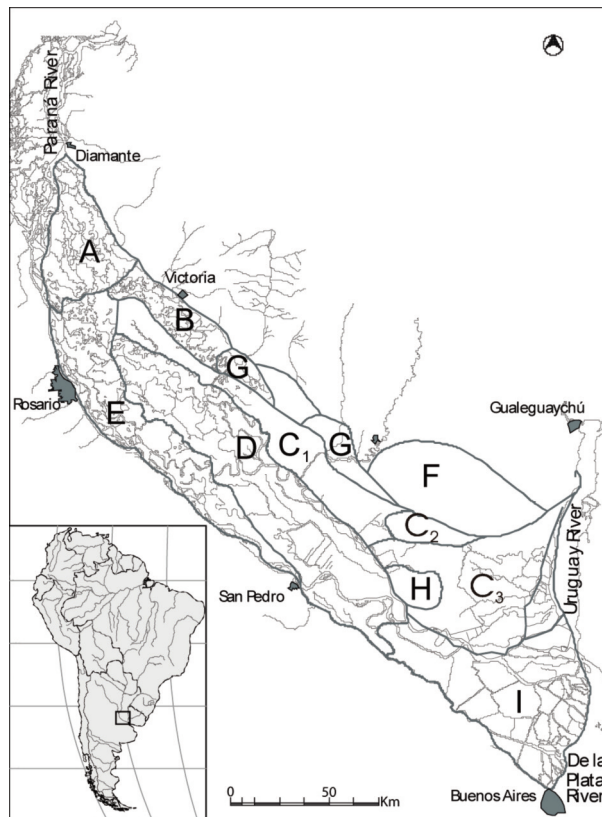


Figura 1. Región del Delta del Río Paraná, ubicación geográfica y zonificación de la misma (Malvarez, 1997). La descripción de las distintas unidades se encuentra en la Tabla 1.

Según Malvarez (1997), las fisonomías dominantes en la región corresponden a bosques, pajonales, juncuales, pastizales y praderas de herbáceas acuáticas. Sin embargo, estas fisonomías se expresan y com-

binan en forma diferente a lo largo de la región conformando unidades ecológicas distintivas de acuerdo a los patrones de paisaje y el régimen hidrológico (Tabla 1).

UNIDAD	PATRÓN DE PAISAJE	RÉGIMEN HIDROLÓGICO	VEGETACIÓN
A	Lagunas no vegetadas y patrón de espiras de meandro. Albardones altos en tramos del Paraná	Río Paraná. Inundación estacional.	Albardones y espiras: bosque. Media loma: praderas herbáceas altas. Bajos: praderas de herbáceas acuáticas.
B	Constituido por grandes superficies cubiertas de agua con algunas isletas, que se corresponden a antiguos albardones.	Río Paraná. Inundación estacional.	Isletas: praderas de herbáceas gramini-formes con algunos árboles aislados.
C	Alternancia de cordones arenosos y depresiones anegables. No presenta lagunas permanentes y los cauces son escasos.	Río Paraná y, hacia el sur, Uruguay. Los tiempos de permanencia son intermedios.	Cordones: comunidades herbáceo-arbus-tivas con espinillo, seibo y tala. Depresiones anegables: composición variable según condiciones hidrológicas.
D	Zonas inundadas en forma permanente y semipermanente, lagunas que ocupan una pequeña extensión y riberas elevadas.	Río Paraná. Prolongado tiempo de permanencia de las aguas.	Albardones: bosques bajos. Media loma: praderas de herbáceas.
E	Conformado por secuencias de altos y depresiones	Río Paraná. Tiempos breves de permanencia de agua. Con aguas altas: gran proporción sin inundación.	Altos: bosques. Zonas deprimidas: comunidades de her-báceas latifoliadas o de herbáceas grami-niformes flotantes.
F	Constituido por una extensa planicie correspondiente a la Antigua albufera. Se encuentra a mayor altura y se separa del resto de la región por la barrera del cordón litoral.	Precipitaciones locales.	Pradera de herbáceas graminiiformes bajas sobre las que se encuentran ejem-plares de especies arbóreas.
G	Constituido por los antiguos deltas de los ríos Nogoyá, Cle y Gualeguay.	Ríos Paraná y Gualeguay. Tiempos intermedios de permanencia de agua.	Albardones: bosque con especies típicas de ambientes ribereños. Media loma: arbustal y bosques bajos. Bajos o bañados: praderas de herbáceas acuáticas.
H	Constituido por la isla Ibicuy. Sector topográficamente elevado.	Río Paraná. Baja frecuencia de inundaciones.	Praderas de graminiiformes bajas.
I	Patrón de islas y cauces de distinta magnitud. Islas: conformadas por albardones perimetrales que rodean áreas deprimidas.	Ríos Paraná y Uruguay, mareas del estuario Del Plata y sudestas-das. Permanencia de agua breve.	Albardones: bosque. Áreas deprimidas: praderas de herbáceas altas – pajonales o juncuales.

Tabla1. Síntesis de las principales características (patrones de paisaje, régimen hidrológico y vegetación) de las unidades de paisaje del Delta del Paraná (Malvarez, 1997)

Los bosques ocupan una baja proporción de la superficie e incluyen comunidades de bosque fluvial en las unidades A y E, bosques plantados de sauce (*Salix sp.*) y álamo (*Populus sp.*) en las unidades I y H y algunos parches de bosques de espinillo (*Acacia caven*) y algarrobo (*Prosopis sp.*) en las unidades F y C. Los pajonales incluyen comunidades de paja brava (*Scirpus giganteus*) en la unidad I, y de *Panicum prionitis* en las unidades A, B, D. Los juncales corresponden a comunidades de *Schoenoplectus californicus*, y se extienden al sur de la unidad D y norte de la unidad I. Las praderas de herbáceas acuáticas presentan una alta diversidad de especies graminoides y latifoliadas, con *Panicum grumosum*, *Panicum elephantipes* y *Polygonum hispidum* entre las dominantes. Los pastizales están formados por una matriz de alta diversidad de gramíneas (*Panicum milioides*, *Stipa hyalina*, *Hordeum euclaston* y otras) con cobertura de suelo y altura variable de acuerdo al grado de pastoreo por ganado vacuno y con presencia aislada de individuos arbóreos, principalmente *Prosopis sp.* y *Acacia caven* en la unidad F.

Desde el punto de vista hidrológico, la región presenta un patrón complejo debido a que existen varias fuentes de agua con comportamiento distinto: las precipitaciones locales, de régimen estacional, y los grandes ríos, cuyos regímenes de inundación actúan aislada o conjuntamente según la zona de la región de que se trate.

La mayor parte de la región se ve afectada por el régimen hidrológico del río Paraná, que presenta un período de ascenso a partir del mes de septiembre, culminando con un máximo en el mes de marzo. Este régimen puede presentar irregularidades interanuales considerables y, en años excepcionales, pueden producirse inundaciones que cubren enteramente la llanura aluvial, como las ocurridas en los años 1905, 1966 y 1983, 1998 y 2007, asociadas con los eventos ENSO (El Niño/Southern Oscillation).

La porción terminal de la región, aquella que se encuentra en contacto con el estuario del Plata, también está sometida al régimen micromareal del mismo, con ascensos y descensos diarios de la altura del agua que rondan el metro.

Sin embargo, el emplazamiento de numerosas obras de infraestructura de gran magnitud como el Puente Rosario Victoria y enormes endicamientos transformaron los patrones de inundación y circulación de las aguas de estos humedales modificando la oferta del recurso hídrico. Por otra parte, en el

marco de la Cuenca del Plata cobran singular interés como reguladores y agentes de transformación en la región los eventos asociados a la variabilidad climática como el fenómeno ENSO (“El Niño/Oscilación del Sur”) y el ascenso del nivel medio del mar y los cambios en las lluvias y caudales de los cursos y en los patrones de evapotranspiración pronosticados en el campo de los escenarios de calentamiento global (Barros *et al.*, 2006; IPCC, 2007).

Desde el punto de vista socioeconómico, históricamente ha sido un área de relativa marginalidad. Sin embargo, el avance de la frontera agrícola y reemplazo de pasturas por cultivos produjo el desplazamiento de una importante fracción de la actividad ganadera hacia estos sitios. La radicación de foresto-industrias (aglomerados y pasta papel) concentró la producción maderera, y en su modalidad más intensiva, junto con la actividad agrícola, implican el drenaje del humedal y su posterior “pampanización”, permitiendo el ingreso también de la ganadería.

Este proceso de cambio se sustenta no sólo en una visión de oferta ilimitada y homogénea de recursos naturales sino también en una percepción estática de los humedales. El urgente intento de rescate de ganado de islas, en el verano 2007, como consecuencia de la inminente crecida del Paraná debida al evento de variabilidad climática interanual conocido como el ENSO, ilustran claramente las graves consecuencias de la falta de previsión basada en esa falsa perspectiva, y la demanda sectorial al estado de obras de infraestructura, como caminos o puentes, que pueden sumar efectos negativos.

MÉTODOS

Datos satelitales disponibles

Para elaborar el mapa de coberturas de la región se utilizó una imagen SACC MMRS (Multispectral Medium Resolution Scanner) de Path 226, provista por CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) por medio de un proyecto de investigación, correspondiente al 22 de diciembre de 2004.

Para obtener un mapa de inundaciones se usaron dos imágenes ENVISAT ASAR WSM de polarización horizontal (HH) y pasada descendente provistas por la Agencia Espacial Europea (ESA, proyecto AO 667) correspondientes al 12 de septiembre de 2005 (condición normal), y al 26 de marzo de 2007 (condición de inundación). De los dos tipos de polarizaciones disponibles (HH o VV, correspondientes a

campo eléctrico horizontal o vertical respectivamente), se optó por imágenes en polarización HH, ya que existen evidencias teóricas y observacionales de que el coeficiente de retrodispersión, σ^0 HH es más sensible a cambios de altura del agua debajo de la vegetación (Grings *et al.*, 2006, Townsend y Foster, 2002).

Las siguientes tablas presentan las características principales de los sistemas satelitales usados, el argentino SACC MMRS y el europeo ENVISAT ASAR.

	SACC MMRS
Agencia espacial	CONAE
Tipo de sensor	Pasivo
Ancho de barrido	360 Km.
Tamaño del píxel	175 m x 175 m.
Tiempo de revisita	9 días
Número de bandas	5
Bandas espectrales	480-500 nm
	540-560 nm
	630-690 nm
	795-835 nm
Resolución espectral	8 bits

Tabla 2. Características de las imágenes SACC MMRS (CONAE, página web http://ggt.conae.gov.ar/sac_c/producto1.htm)

	ENVISAT ASAR WSM
Agencia espacial	ESA
Tipo de sensor	Activo
Longitud de onda	5 cm.
Ancho de barrido	400 Km.
Tamaño del píxel	75m x 75m.
Tiempo de revisita	14 días
Resolución radiométrica	21 ENL
Polarizaciones disponibles	HH o VV
Ángulo de incidencia	21-45°

Tabla 3. Características de las imágenes ENVISAT ASAR modo Wide Swath (ESA, Asar Product Specifications).

Preprocesamiento de las imágenes

Imágenes ópticas

Se obtuvo el valor de reflectancia en superficie corregida parcialmente por atmósfera de la imagen SACC-MMRS. Se aplicaron los coeficientes de calibración y se corrigió por efecto Rayleigh. En el primer caso se consideraron los parámetros de ganancia y offset del sensor provistos por la CONAE. En el segundo se usó el modelo de corrección desarrollado por Stumpf (1992) para scattering molecular (Rayleigh) considerando la variación de los ángulos de iluminación solar (azimutal: 0-80°; cenital: 0-65°) y de observación del sensor (azimutal: 0-280°; cenital: 0-16°) a lo largo de las imágenes, de acuerdo al ancho de la franja de barrido y extensión en latitud de las imágenes SACC. Para esto se utilizaron los datos de ángulos provistos por la CONAE junto con las imágenes, el programa `angulos.exe` (http://ggt.conae.gov.ar/sac_c/AngulosMMRS.htm), y el programa `Cppl.exe` (generado por este grupo de trabajo). El programa `angulos.exe`, calcula, a partir del día y hora de adquisición de la imagen, y el ángulo cenital de observación del sensor, los ángulos de iluminación solar y observación del sensor, en formato de archivo de texto. El programa `cppl.exe` genera, a partir del archivo de texto resultante en el paso anterior, una imagen para cada uno de los ángulos solares y de observación. Estas imágenes se usaron para la corrección atmosférica parcial.

No se realizó corrección por aerosoles ya que no hay disponibilidad de datos de concentración de los mismos en el área, y la utilización de los modelos de corrección completa de la atmósfera exige conocer las propiedades ópticas de la atmósfera en el momento de adquisición de la escena. De acuerdo a Song *et al* (2001), la implementación del algoritmo utilizando valores de una atmósfera estándar para el área de estudio y la época del año, produce valores de reflectancia de precisión cuestionable.

Las correcciones geométricas y geolocalización se realizaron utilizando como base las imágenes del sistema TERRA-MODIS, una transformación de segundo orden y un remuestreo de acuerdo al método de vecino mas cercano, con un error RMS de 0,5 píxel.

Imágenes de microondas

Si bien las imágenes ENVISAT ASAR WSM son

de distintas estaciones (primavera y verano) de años distintos, nuestro conocimiento del área nos indica que entre las fechas seleccionadas no hubo cambios mayores en la cobertura vegetal (incendios, obras de infraestructura, etc.), y los cambios fenológicos de la vegetación, si bien existen, no provocan cambios significativos en la respuesta al RADAR, al no producir cambios en los mecanismos de interacción onda – suelo – vegetación (Parmuchi *et al.*, 2002, Kandus, *et al.*, 2001).

Las imágenes HH se calibraron a valores de coeficiente de retrodispersión (σ^0) mediante el uso del programa de la ESA BEST (<http://earth.esa.int/services/best/>).

Luego, se corrigieron manualmente, mediante la aplicación de un corrimiento con respecto a la imagen elegida como base (con un error de 0,5 píxel), y se geolocalizaron usando las imágenes SACC como referencia, una transformación polinomial de segundo grado y convolución cúbica como método de remuestreo, con un error RMS de 0,5 píxel. Esto resulta en un error de geolocalización menor a 1 píxel (75m.)

Dado el número equivalente de looks (ENL=21) con que la ESA produce las imágenes ASAR en modo Wide Swath, no se consideró necesaria la aplicación de procedimientos de supresión del speckle.

Extracción de información

Imágenes ópticas

Las clases de información planteadas corresponden a los grandes tipos fisonómicos presentes en la región: Cuerpos de agua, bosques, juncales, pajonales, pastizales, praderas de vegetación acuática.

En base a la experiencia obtenida en trabajos anteriores (Kandus *et al.*, 1999) se seleccionó un método de clasificación no supervisado progresivo basado en el algoritmo ISODATA (Jensen, 2000). Se trata de un proceso iterativo, para el cual se define a priori un número máximo de clases espectrales o *clusters* deseado (Cmax). La localización inicial de cada cluster en el espacio multidimensional de la imagen es arbitraria y se define a partir del espacio de las características. Este algoritmo asigna cada píxel de la imagen a una clase espectral de acuerdo a la distancia entre los valores de los píxeles y el centroide de cada cluster. Para cada clasificación se usaron 300 clases, 40 iteraciones y 0,98 como nivel de convergencia.

En cada paso se extrajeron de la clasificación las

clases espectrales correspondientes a alguna clase de información de interés que fue posible discriminar, generando un mapa provisorio de clases temáticas. Las clases espectrales generadas por el algoritmo de clasificación se asignaron a la clase de información buscada por medio del análisis tanto de sus firmas espectrales como de su ubicación espacial.

El mapa temático así obtenido se usó como máscara de la imagen original la cual se volvió a clasificar, repitiendo el procedimiento anterior, para así obtener las clases de información restantes. Por ejemplo, en el primer paso, se extrajeron las clases correspondientes a cuerpos de agua abierta (ríos y lagunas sin vegetación) y aquellas correspondientes a juncales, generándose con ellas un mapa temático parcial. Con ese mapa temático parcial se enmascaró la imagen original, la cual se volvió a clasificar para obtener por ejemplo las áreas con pajonales.

Finalmente, se superpusieron los mapas temáticos provisorios de cada grupo de clases, obteniendo así el mapa final.

Imágenes de microondas

Como ya explicamos brevemente en la introducción, existen fuertes evidencias, en ecosistemas de humedal, de que el σ^0 de la vegetación depende del nivel de inundación. Por lo tanto, para obtener un mapa de inundación se generó una imagen de cambio del σ^0 entre la condición de inundación y la condición normal, mediante el procedimiento de diferencia de imágenes.

El coeficiente de backscattering, σ^0 , es sensible a características estructurales y dieléctricas de los elementos de la superficie terrestre, por lo tanto el análisis de las imágenes SAR debe realizarse teniendo en cuenta los mecanismos por los cuales la onda de radar interactúa con la vegetación y el suelo. Si bien cada elemento de la superficie puede interactuar de distinto modo con la onda de radar, puede decirse que dada un área heterogénea, existe un mecanismo de interacción que domina sobre el resto, es decir que es el que aporta la mayor parte de la respuesta.

Los principales mecanismos de interacción son:

- reflexión especular, donde la onda proveniente del radar rebota en una superficie muy lisa y se va en la dirección opuesta al sensor, generando una respuesta nula (ej. cuerpos de agua)
- dispersión en volumen, donde la onda penetra en el dosel de la vegetación y rebota muchas veces en los distintos elementos, atenuándose antes de que una parte regrese en la dirección del sensor

generando una respuesta moderada (ej. forestaciones)

- dispersión de doble rebote, donde se combina la respuesta de dos medios (agua y vegetación) donde cada uno provoca una reflexión especular, y la onda vuelve hacia el sensor generando una respuesta muy intensa (ej. juncos sobre suelo cubierto por una película de agua).

La importancia relativa de cada uno de estos mecanismos depende de las características del terreno, y de la frecuencia y polarización de la onda.

Para analizar los cambios en el σ^0 producidos por un evento de inundación, es necesario evaluar los cambios que dicho evento produce sobre los mecanismos de interacción dominantes del área de estudio. Para esto, la imagen de cambio se segmentó en 9 intervalos de cambio que cubrían todos los valores resultantes de la diferencia de imágenes realizada. El intervalo de la segmentación (2 dB) fue seleccionado utilizando criterios estadísticos, de manera tal que la probabilidad de que un píxel que fue asignado a un rango de variación dado efectivamente pertenezca a él sea mayor al 95% (Oliver y Quegan, 1998).

Una inundación puede causar tanto un aumento como una disminución de la señal retrodispersada, dependiendo del tipo de cobertura dominante, el mecanismo de interacción presente entre ese tipo de cobertura y la señal de radar, y la altura de agua que la inundación produzca (Kandus *et al.*, 2001).

Se obtuvo un mapa de inundación bajo la premisa de que en este caso, todas las áreas que sufrieron un cambio en el coeficiente de retrodispersión (ya sea de aumento o disminución) mayor a 2 dB habían sido afectadas, en alguna medida, por la inundación. Este umbral se basó en obtener un nivel de confianza de 95% en la determinación de la clase no inundada (sin cambios), de acuerdo al número equivalente de looks (21) de las imágenes usadas (página web ESA, http://earth.esa.int/ers/ers_archive/esc_i.html).

Para estimar el área afectada por la inundación en cada uno de los ambientes, se combinó el mapa de ambientes con el de áreas inundadas, y se calculó la superficie afectada por ambiente.

Análisis de exactitud de los mapas generados

Mapa de ambientes

La evaluación de la exactitud del mapa de ambientes producido se realizó usando dos fuentes de datos. Para la zona del Delta medio y superior se to-

maron puntos de campo, mientras que para la zona del Bajo Delta se tomó como verdad terrena el mapa de ambientes a mayor detalle generado por Kandus *et al.* (2006). Dado que en este último mapa los ambientes están diferenciados a nivel de comunidades y que posee una mayor resolución espacial, antes de comenzar la evaluación se agruparon las clases en términos de fisonomía y se degradó su resolución espacial de modo de hacerlas compatibles con las clases generadas en este trabajo. Se tomaron 1000 puntos estratificados por clases temáticas y dentro de estas al azar, se realizó la matriz de errores y se calculó la exactitud general y de cada clase, y el índice Kappa (Congalton *et al.*, 1983).

Mapa de áreas inundadas

Para la evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas, se tomo como verdad terrena el mapa de agua en superficie realizado por el Área de Sensores Remotos y SIG del SIyAH - INA (Sistema de Información y Alerta Hidrológico - Instituto Nacional del Agua, Argentina). Se tomaron 1000 puntos estratificados al azar, se realizó igual que en el caso anterior la matriz de errores y se calculó la exactitud general y de cada clase y el índice Kappa.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 2 se presenta el mapa resultante del proceso de clasificación de la imagen SACC MMRS. Se identifican bosques (incluyen bosque fluviales en el norte y bosques plantados de salicáceas en la porción sur), pastizales, cuerpos de agua, praderas de herbáceas equisetoides (juncales), praderas de herbáceas graminoides altas (pajonales) y praderas de herbáceas acuáticas arraigadas graminoides y latifoliadas. Los datos satelitales, permiten ver que estos grandes grupos se distribuyen en forma sectorial en la región, de modo consistente con la descripción de las unidades de paisaje realizada en la Tabla 1. En la unidad I dominan pajonales, bosques y juncales, y en la unidad F los pastizales con algunas isletas de bosque. Esto coincide ampliamente con el mapa de detalle realizado por Kandus *et al.* (2006). En la unidad E (planicie de inundación del Río Paraná) dominan los bosques a lo largo de las espiras de meandro e islas de cauce. En la unidad A se alternan bosques y praderas de herbáceas acuáticas, en tanto que la unidad B está dominada por los cuerpos de aguas abiertas y en menos medida las praderas de herbáceas acuáticas.

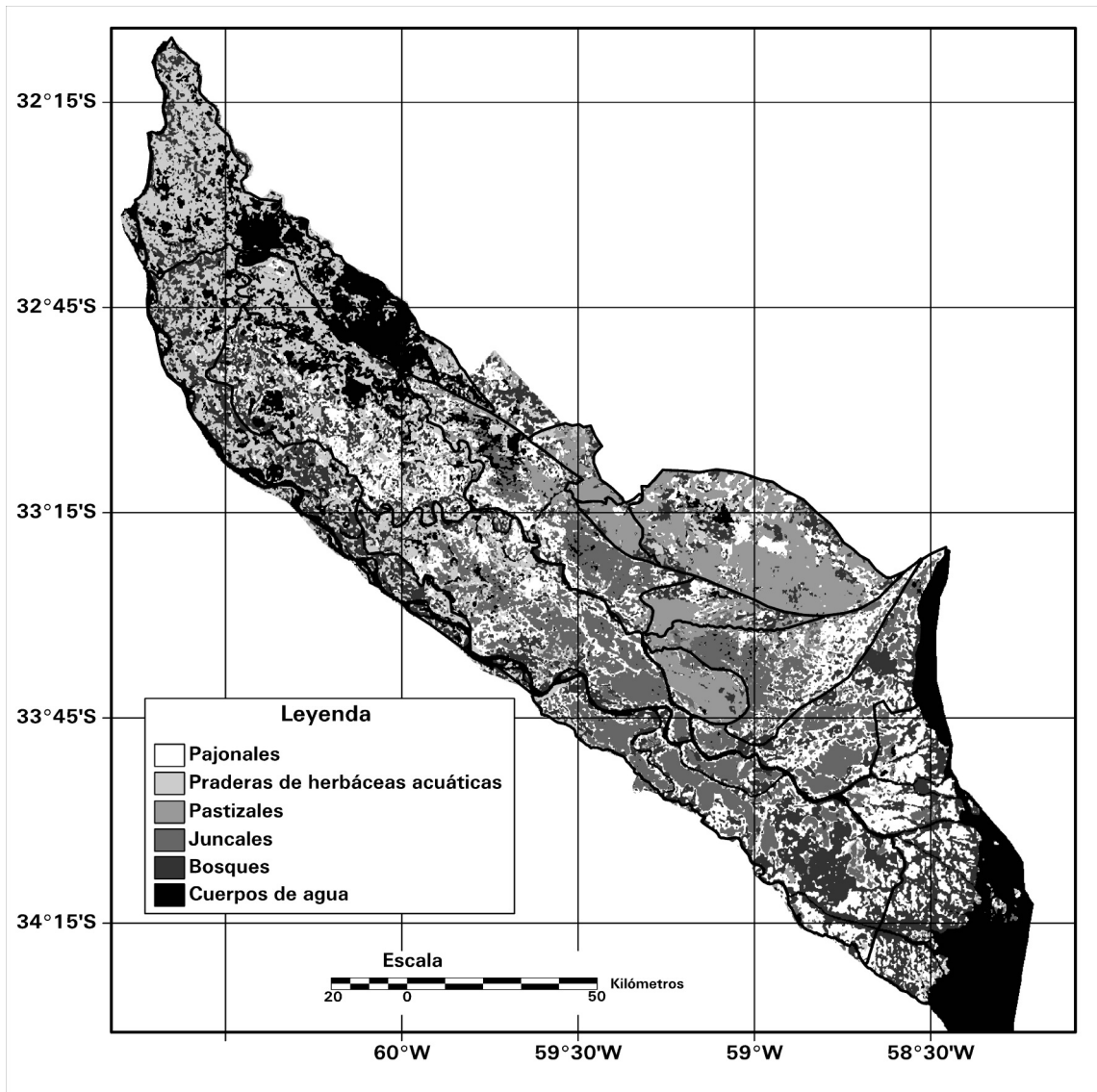


Figura 2. Mapa de ambientes de la región del Delta del Río Paraná.

Unidad Ambiente (%cobertura)	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Juncales	0	0,02	27,09	24,02	4,41	2,98	0,44	11,05	19,79
Praderas de herbáceas acuáticas	57,66	22,85	11,42	20,52	37,48	3,43	14,47	0,45	2,35
Pajonales	0,46	0,68	23,34	24,00	8,85	17,64	13,90	7,59	32,49
Bosques	16,34	3,32	12,23	16,87	30,56	14,04	22,88	6,57	35,21
Pastizales	0,44	0,88	16,24	0,86	0,49	59,19	38,12	70,28	0,59
Cuerpos de agua	25,1	72,25	9,68	13,73	18,21	2,72	10,19	4,06	9,57
Hectáreas totales	138933	81787	351275	382084	265173	175150	107334	31599	502507

Tabla 4. Distribución de los ambientes por unidad

Es significativa la diferencia en términos de tipos fisonómicos existente entre la porción norte y sur de la unidad D. Esta unidad se encuentra en la porción central de la región y según Malvárez (1997) está caracterizada por la presencia de un mosaico de comunidades herbáceas.

Según el mapa resultante la porción norte está dominada por pajonales, bosques y cuerpos de agua. La porción sur en cambio, está constituida por una matriz de juncales solo interrumpida por algunos albardones, principalmente con pajonales y algunos bosques aislados. Este resultado coincide con las observaciones realizadas para la misma unidad por Zoffoli *et al* (2008) en términos de su dinámica anual e interanual a partir del estudio de una serie temporal de datos de NDVI del sistema NOAA-

AVHRR.

En la figura 3 pueden verse el mapa de Kandus *et al* (2006), la adaptación de dicho mapa para la evaluación de la exactitud presentada aquí, y la porción correspondiente al Bajo Delta del mapa generado en este trabajo

La exactitud del mapa es de 66,88%, con un índice kappa de 59,02. Si se toma en cuenta sólo el Bajo Delta, donde se tomaron más puntos, la exactitud general del mapa es de 69%, con un índice Kappa de 60.82%.

Todas las clases obtuvieron exactitudes (tanto se usuario como de productor) mayores al 50%, siendo las clases pastizal, juncal y cuerpos de agua las de mayor exactitud para el usuario (en ese orden).

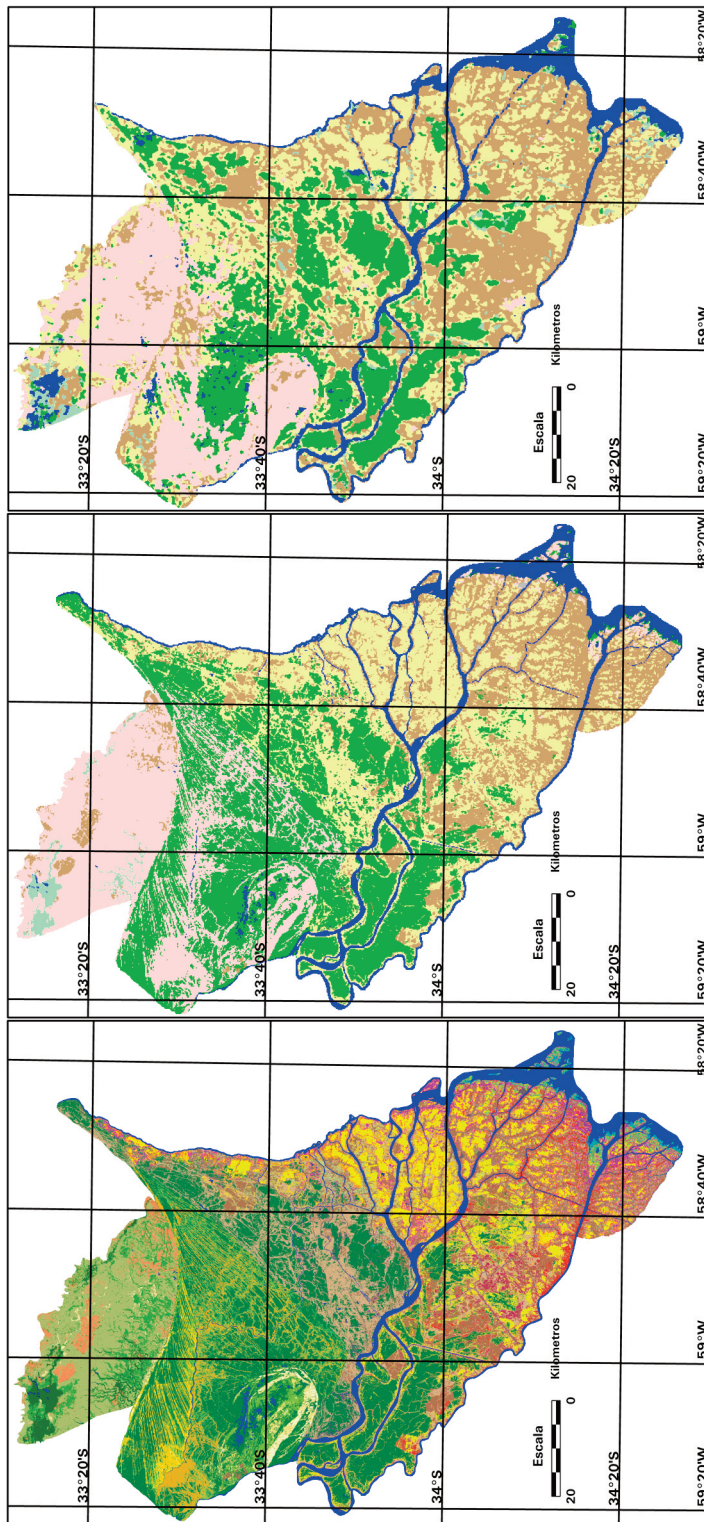


Figura 3. Izquierda, mapa de ambientes del Bajo Delta (Kandus *et al.*, 2006); centro: adaptación del mapa de Kandus et al para la evaluación de la exactitud del mapa producido en este trabajo; derecha: porción correspondiente al Bajo Delta del mapa presentado en este trabajo

		Referencia						Exactitud para el usuario	Error por comisión
		Bosque	Pastizal	Juncal	Pajonal	Pradera de herbáceas	Cuerpos de agua		
Mapa de ambientes	Bosque	150	34	24	58	8	7	53,38	46,62
	Pastizal	4	150	10	0	0	0	91,46	8,54
	Juncal	8	7	163	17	2	1	82,32	17,68
	Pajonal	34	34	51	157	4	0	56,07	43,93
	Pradera de herbáceas	5	14	1	8	42	9	53,16	46,84
	Cuerpos de agua	2	5	1	3	9	65	76,47	23,53
Exactitud del productor		73,89	61,48	65,20	64,61	64,62	79,27	Exactitud General: 66,98%	
Error por omisión		26,11	38,52	34,80	35,39	35,38	20,73	Indice Kappa: 59,02	

Tabla 5. Evaluación de exactitud del mapa de ambientes

Es importante destacar, sin embargo, que la región del Delta del Río Paraná posee una gran complejidad y un alto nivel de fragmentación natural. Esta característica intrínseca al sistema en estudio, sumada a la resolución espacial de las imágenes usadas generó algunas dificultades en la asignación de las clases espectrales a las clases de información, principalmente en las unidades A, E y D norte, donde la abundancia de ríos y arroyos de poco ancho genera una gran cantidad de píxeles mixtos, que incluyen a los arroyos y los bosques presentes en los albardones adyacentes.

También se encontraron dificultades para diferenciar (en las mismas unidades) los píxeles de bosques de los correspondientes a praderas herbáceas acuáticas, debido a la semejanza espectral (en las bandas presentes en el sistema SACC-MMRS) de estas clases. En este caso además de la información espectral se utilizó la ubicación espacial de los píxeles de cada clase espectral, debido al conocimiento de que, en esta zona, los bosques generalmente se encuentran solo en los albardones adyacentes a los cuerpos de agua.

A partir del procesamiento de las imágenes de radar, se generó un mapa de cambios donde cada ca-

tegoría de cambio representa un intervalo de diferencia del coeficiente de retrodispersión σ^0 , en dB (figura 4).

Aquí se observa que la mayor parte del delta se vio afectado por la crecida del Paraná. Sin embargo, no es sencillo determinar a priori de que manera responderá el σ^0 a cambios en la condición de inundación. El σ^0 HH de una zona boscosa depende de muchos factores del terreno, como la densidad y estructura del dosel, la rugosidad del suelo a micro y meso escala y el contenido de humedad del suelo y de la vegetación. Sin embargo, existen evidencias de que el σ^0 de la vegetación en humedales puede modelarse en primer orden considerando tres mecanismos de interacción básicos: (1) retrodispersión del dosel, (2) retrodispersión del suelo y (3) doble rebote suelo-tronco.

En general, se observa que las áreas que muestran un aumento de la señal mayor a 2 dB son aquellas dominadas por bosques. Este aumento puede explicarse como un cambio en el mecanismo de interacción dominante, al pasar de una condición normal del suelo (suelo seco y bien drenado) a suelo inundado. En condiciones de suelo seco, el mecanismo de interacción dominante es la retrodispersión del

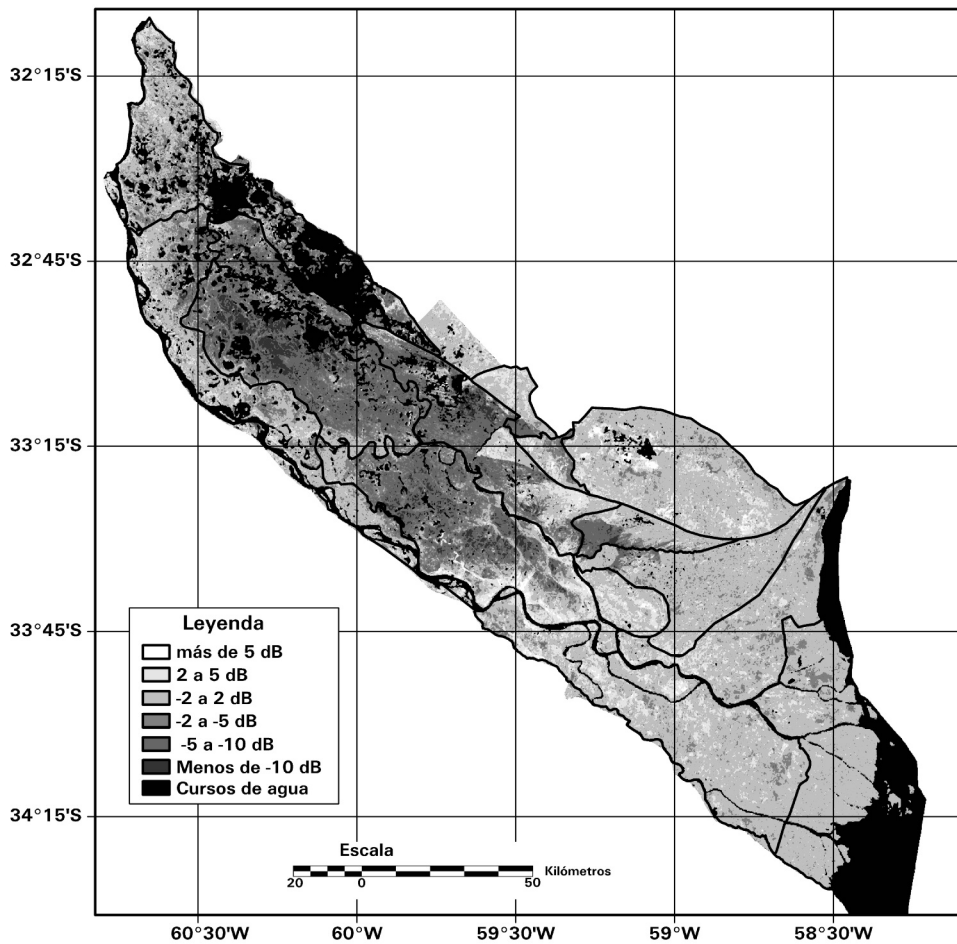


Figura 4. Mapa de cambio de la respuesta de los elementos de la superficie a la onda del radar.

dosel, en cambio, al aparecer agua sobre el suelo, el mecanismo de interacción dominante pasa a ser el doble rebote suelo-tronco (donde la onda rebota en el agua y el tronco del árbol), lo cual genera una retrodispersión mucho mayor que la correspondiente al dosel.

En las zonas que muestran disminución de la señal retrodispersada dominan distintos tipos de comunidades de herbáceas. Esta disminución también puede explicarse como un cambio en el mecanismo de interacción. En condiciones normales de inundación, el mecanismo de interacción dominante en las herbáceas es el doble rebote suelo-tallo (o suelo hoja). Sin embargo, el ingreso de agua por la crecida reduce la altura emergida de la vegetación dejando disponible menos superficie de vegetación con la cual la onda de radar puede interactuar.

Cuando el ingreso de agua es tal que la vegetación está completa o casi completamente cubierta, el mecanismo de interacción dominante es la retrodispersión proveniente de la superficie de agua (reflexión especular), la cual genera una retrodispersión mucho menor que el doble rebote suelo-tallo.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, la interpretación y análisis del aumento o disminución de la señal en la imagen diferencia se realizó del siguiente modo (figura 5):

- a) todos los valores comprendidos entre -2 y 2 dB se consideró que no indican cambios significativos, es decir que el área en consideración no se vio afectada por la crecida del río Paraná.
- b) todas las diferencias mayores a 2 dB (ya sea aumento o disminución) corresponden a zonas inundadas por la crecida del río Paraná.

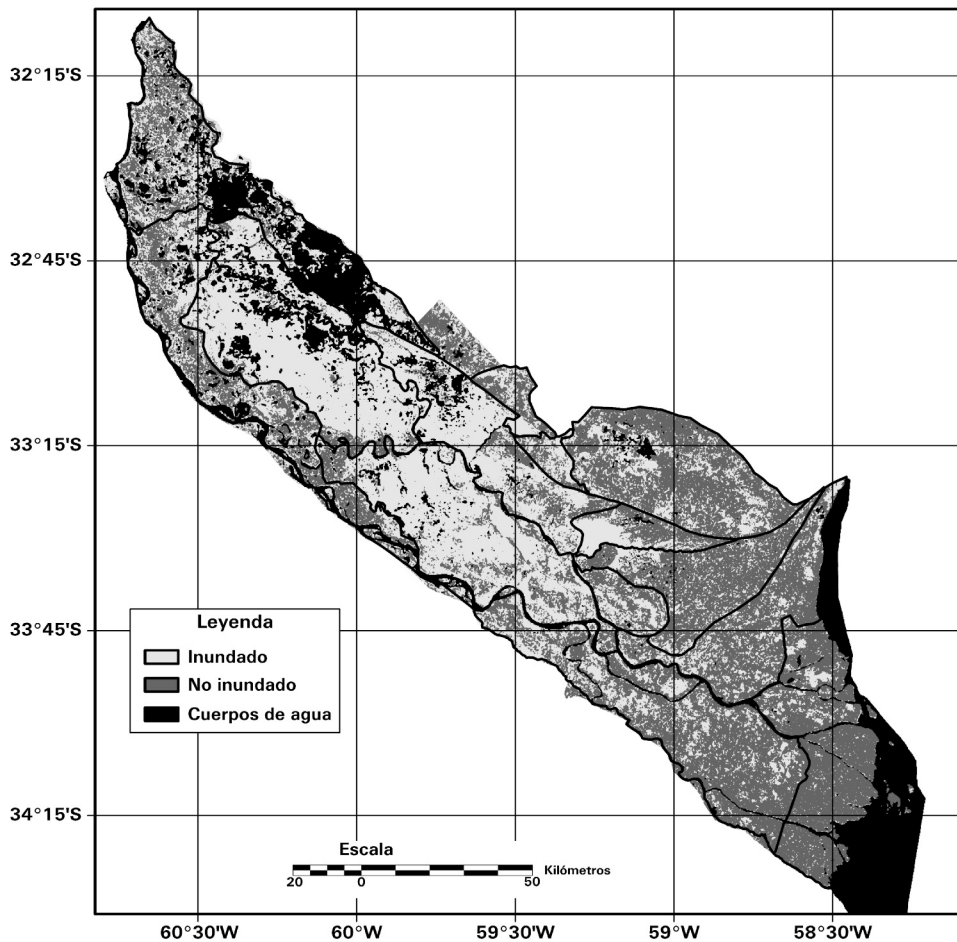


Figura 5. Mapa de inundación obtenido por medio de detección de cambios de imágenes de radar

En la figura 5 puede observarse que la superficie afectada por la inundación fue 840946,5 ha, lo que representa el 49% del área de estudio (sin tener en cuenta los cuerpos de agua). También puede observarse que al ser la crecida del río Paraná, que circula en sentido NO – SE, el principal causante de las inundaciones, la zona más afectada por la inundación se ubica en la porción noroeste del área de estudio.

La matriz de errores realizada muestra una exactitud general del mapa de áreas inundadas del 63.4%, Además la clase “inundado” muestra una exactitud para el usuario de 90.29%. Esto quiere decir que la mayor parte del error de este mapa corresponde a áreas inundadas que habrían sido clasificadas como no inundadas. Sin embargo, la imagen usada en el mapa realizado en este trabajo es de una fecha (26 de marzo de 2007) 14 días anterior a la usada en el mapa referencia (9 de abril de 2007), semanas en las

cuales llovieron más de 360 mm. en el área (Soldano, comunicación personal), lo que podría explicar la baja exactitud para el usuario de la clase “no inundado”.

Los datos obtenidos a través de la combinación de los mapas temáticos muestra que todos los ambientes han sido afectados por la inundación en por lo menos un 40% de su área, principalmente aquellas zonas ubicadas hacia el noroeste de la región. El ambiente más afectado fue la clase pradera de herbáceas, con algo más del 65% de su área inundada, seguido por el juncal, con el 50,38%. Ya que estos ambientes son los más usados por el ganado como pasturas, esta inundación generó un esfuerzo de los productores y las autoridades para evacuar el ganado de aquellas áreas a medida que éstas iban siendo afectadas por la crecida. Al mismo tiempo se explica el por qué de las pérdidas sufridas, ya que puede suponerse la complejidad de la evacuación de

		Referencia		Exactitud para el usuario	Error por comisión
		Áreas inundadas	Áreas no inundadas		
Mapa de áreas inundadas	Áreas inundadas	409	44	90,29	9,71
	Áreas no inundadas	322	225	41,13	58,87
Exactitud del productor		55,95	83,64	Exactitud General: 63,40% Índice Kappa: 29,85%	
Error por omisión		44,05	16,36		

Tabla 6. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas

un área tan extensa. Este tipo de análisis permite una primera estimación del cambio en la condición de inundación. El siguiente paso sería determinar el nivel de inundación (es decir, si el agua cubrió la vegetación, o cual es la altura del agua sobre el sustrato) de los distintos ambientes presentes en el área de estudio. Extraer este tipo de información es más complejo y requiere un análisis cuantitativo de los mecanismos de interacción intervinientes en cada ambiente, y del tipo de cambio de mecanismos de interacción que representaría en ellos distintas alturas de agua sobre el suelo, en el paso de no inundado a totalmente cubierto de agua (Parmuchi *et al.*, 2002). Para obtener la altura del agua debajo de la vegetación se requiere:

1) contar con un modelo de arquitectura de la vegetación, 2) contar con un modelo electromagnético de interacción señal de radar - modelo de vegetación, 3) contar con un algoritmo (solución del problema inverso) que obtenga la altura del agua para cada tipo de vegetación.

Esto se ha llevado a cabo para juncales y pajonales del Bajo Delta (Grings *et al.*, 2006, 2008). La extensión de ese trabajo a la totalidad de los ambientes presentes en el área de estudio aquí presentada requiere un gran esfuerzo en el trabajo de campo y en el desarrollo de modelos, y forman parte de un proyecto cuyo desarrollo está en curso.

CONCLUSIÓN

La región del Delta del Río Paraná (Argentina) es un macrosistema de humedales que se extiende a lo largo de los 300 km. finales de la Cuenca del Paraná. Con el objetivo de identificar los diferentes tipos de humedales presentes en el área, estimar la extensión de la última inundación ocurrida en el verano-otoño de 2007 (enero-junio) y determinar su alcance en términos de ecosistemas afectados, se usaron datos provenientes de dos sistemas satelitales de resolución espacial media: el argentino SACC MMRS (Multispectral Medium Resolution Scanner) en el rango óptico y el de la Agencia Espacial Europea (ESA) ENVISAT ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) en modo WS (Wide Swath) en el rango de las microondas.

En primer lugar, los datos satelitales ópticos se utilizaron para la producción del primer mapa regional de tipos fisonómicos de vegetación del área de estudio. Este mapa, además de su valor como trabajo de investigación, es de gran utilidad para el manejo del área, ya que muestra la potencialidad de las distintas zonas geográficas del área de estudio para actividades como ganadería, agricultura y forestación, la vulnerabilidad de ciertas áreas por la presencia de importantes obras de infraestructura, como los endicamientos para la actividad forestal y agrí-

cola, y es una herramienta muy necesaria para evaluar los daños producidos por eventos extremos, ya sean de origen natural o antrópico, como la inundación ocurrida en 2007 o los recientes incendios masivos (otoño-invierno 2008).

En segundo lugar, los datos del sistema ENVISAT ASAR permitieron evaluar la extensión de la inundación producida por la crecida del río Paraná ocurrida en el 2007 y obtener la superficie afectada. Por último, se combinaron los mapas temáticos ya mencionados para calcular el porcentaje de cada ambiente que resultó afectado por la inundación. Esta información también resulta útil para las acciones de manejo del área, ya que permiten evaluar las zonas de mayor vulnerabilidad ambiental (mayor efecto de las inundaciones provocadas por crecidas del río Paraná) y que a su vez, presentan mayor riesgo para las actividades productivas que se están llevando a cabo, sobre todo la ganadería. Se observó también, que las áreas afectadas no sólo se encuentran en zonas relativamente bajas como las de vegetación herbácea, sino que inclusive zonas relativamente altas, como las forestaciones protegidas por diques, también resultaron inundadas.

Generalmente, durante los eventos climáticos extremos como inundaciones y tormentas no es posible obtener imágenes ópticas debido a la cobertura de nubes, y en el caso en que puedan obtenerse, éstas no siempre permiten estimar la extensión de la inundación, ya que no puede verse el agua presente debajo del dosel de la vegetación. Estos dos inconvenientes pueden solucionarse mediante el uso de imágenes del rango de las microondas, que pueden obtenerse de noche y en presencia de nubes, y que potencialmente atraviesan el dosel de la vegetación, permitiendo “observar” el agua presente por debajo de la misma.

Sin embargo, a fin de interpretar correctamente la imagen de cambios del coeficiente de backscattering, es necesario conocer el tipo de cobertura presente, tarea para la cual los sistemas ópticos son mucho más eficientes que los de microondas. Así, la mejor forma de abordar el estudio de un macrosistema de humedal es mediante el uso combinado de sistemas satelitales ópticos y de radar.

REFERENCIAS

- BARROS, V., CLARKE R. Y SILVA DIAS P. ED. 2006. El cambio climático en la cuenca del Plata. Buenos Aires: CIMA-CONICET. 232 pags.
- CONAE, página web. http://ggt.conae.gov.ar/sac_c/AngulosMMRS.htm
- CONAE, página web, http://ggt.conae.gov.ar/sac_c/producto1.htm
- CONAE, página web, http://catalogos.conae.gov.ar/sac_c/especificaciones.htm
- CONGALTON, R.G., ODERWALD, R.G., Y MEAD, R.A. 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49(12):1671-1678.
- ESA, página web. <http://earth.esa.int/services/best/>
- ESA, página web. http://earth.esa.int/ers/ers_archive/esc_i.html
- ESA. 2007. ASAR Product Specifications.
- GRINGS F. M., FERRAZZOLI P., KARSZENBAUM H., TIFFENBERG J., KANDUS P., GUERRIERO L., JACOBO-BERLLES J. C. 2005. Modelling temporal evolution of junco marshes radar signatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 43 (10), 2238-2245
- GRINGS, F. M., FERRAZZOLI P., KARSZENBAUM H., SALVIA M., KANDUS P., JACOBO-BERLLES J. C., PERNA P. 2006. Effects of vegetation structure on wetlands flood monitoring using SAR instruments. *Proceeding of the 2nd International Symposium of Recent Advances in Quantitative Remote Sensing (RAQR'S II)*, Valencia, España, 25-29 Setiembre, 2006, 844-849.
- GRINGS, F.M., FERRAZZOLI, P., KARSZENBAUM, H., SALVIA, M., KANDUS, P., JACOBO-BERLLES, J. C., PERNA, P., 2008, Model investigation about the potential of C band SAR in herbaceous wetlands flood monitoring. *International Journal of Remote Sensing* 29 (17-18): 5361-5372.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. IPCC WGI Fourth Assessment Report. 18pp.
- JENSEN, J. R. 2000. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. Upper Saddle River, N.J., Prentice-Hall, Inc.
- KANDUS P., KARSZENBAUM H. Y FRULLA L.A. 1999. Land cover classification system for the Lower Delta of the Paraná River (Argentina): Its relationship with Landsat Thematic Mapper spectral classes. *Journal of Coastal Research*. 15 (4): 909-926.
- KANDUS P, KARSZENBAUM H, PULTZ T, PAR-

- MUCHI G Y BAVA J. 2001. Influence of flood conditions and vegetation status on the radar backscatter of wetland ecosystems. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27 (6): 561-662.
- KANDUS, P., MALVAREZ, A.I., Y MADANES, N. 2003. Estudio de las comunidades de plantas herbáceas de las islas bonaerenses del Bajo Delta del Río Paraná (Argentina). *Darwiniana*. 41 (1-4) 1-16.
- KANDUS, P., QUINTANA, R. D., Y BO, R. F., 2006, Patrones de paisaje y Biodiversidad del Bajo Delta del Río Paraná., Mapa de Ambientes, Buenos Aires, Pablo Casamajor ed., 48págs.
- KASISCHKE, E.S., SMITH, K.B., BOURGEOU-CHAVEZ, L.L., ROMANOWICZ, E.A., BRUNZELL, S., RICHARDSON, C.J. 2003. Effects of seasonal hydrologic patterns in south Florida wetlands on radar backscatter measured from ERS-2 SAR imagery. *Remote Sensing of Environment*. 88: 423-441.
- MALVAREZ A. I., 1997. Las comunidades vegetales del Delta del río Paraná. Su relación con factores ambientales y patrones de paisaje. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 167 pags.
- MITSCH W.J., GOSSELINK J.G. 2000. Wetlands. Third edition. New York, USA: John Wiley and Sons.
- NEIFF J.J. 1997. Aspectos conceptuales para la evaluación ambiental de tierras húmedas continentales de América del Sur. *Anais do VIII Seminario Regional de Ecología. Vol VIII*. Programa de pos-graduacao em Ecología e Recursos Naturais, UFSCar, Sao Carlos, Brasil: 1-18.
- NEIFF J.J. Y MALVÁREZ, A. I. 2004. Grandes humedales fluviales. En Malvárez and Bó comp. "Bases ecológicas para la clasificación de humedales en Argentina". 77-83.
- OLIVER, S Y QUEGAN S. 1998, Understanding Synthetic Aperture Radar Images, Artech House Publishers. 464 pags.
- PARMUCHI, M. G., KARSZENBAUM, H. Y KANDUS, P. 2002. Mapping the Paraná River delta wetland using multitemporal RADARSAT/SAR data and a decision based classifier. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2002. 28: 631-635.
- POPE, K.O, REJMANKOVA, E., PARIS, JF, WOODRUFF, R. 1997. Detecting seasonal flooding cycles in marshes of the Yucatan Peninsula with SIR-C polarimetric Radar imagery. *Remote Sensing of Environment*, 59: 157-166.
- SOLDANO, A. 2008. Área de Sensores Remotos y SIG del SIyAH – INA, comunicación personal.
- SONG, C.; WOODCOCK, C.E.; SETO, K. C.; LENNEY, M.P. Y MACOMBER, S.A. 2001. Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effects? *Remote Sensing of Environment* 75:230-244.
- STUMPF. R.P. 1992. Remote sensing of water clarity and suspended sediments in coastal waters. *Proceedings of the First Thematic Conference on Remote Sensing for Marine and coastal Environments, Louisiana, USA*.
- TOWNSEND, P. & FOSTER, J. 2002, Assessing flooding and vegetation structure in forested wetlands using Radarsat SAR imagery. *in Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002. IGARSS'02. IEEE International* 2 (24-28):1171 - 1173
- ZOFFOLI, L., KANDUS, P., MADANES, N., Y CALVO, D. 2008 Contribution of NOAA AVHRR-NDVI time series to seasonal and interannual analysis of wetlands in South America. The case of the Paraná Delta Region. *Landscape Ecology*. 23: 833-848