

Estimación desde satélites de la dinámica entre patrones de área inundada y altura hidrométrica en ríos de la Cuenca del Plata: desarrollo de estrategias multi-sensor.

OBJETIVOS GENERALES (máx 1 pág.)

Esta propuesta plantea desarrollos en el campo de la teledetección en microondas a fin de obtener información eco-hidrológica de relevancia para actividades de manejo y pronóstico en la Cuenca del Plata. Más específicamente, apuntamos a obtener mapas de área inundada a escala regional para los humedales fluviales de la Cuenca del Plata a partir de datos satelitales en microondas pasivas y activas, y a determinar una relación empírica entre el nivel hidrométrico en varias porciones del río Paraná (ya sea medido in situ o mediante sensores remotos) y la proporción de área inundada en las planicies de inundación aledañas, que permita evaluar la dinámica de los eventos de inundación regulares y extremos propia de dicha cuenca.

El conocimiento de la dinámica y de las fluctuaciones temporales del área inundada en las distintas planicies de inundación de la cuenca del Plata constituye información esencial para los sistemas de alerta temprana de inundación/sequía y para modelos de evaluación ambiental en general, incluyendo modelos de cambio global.

En este momento existen varios sistemas satelitales (Windsat y SMOS entre los pasivos, Cosmo Skymed y Radarsat 2 entre los activos) cuyos datos permiten llevar adelante esta propuesta. Pero mas aun, las dos misiones principales de CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) están basadas en sensores de microondas: la misión SACD/Aquarius, puesta en órbita en junio de 2011, lleva a bordo el radiómetro/scatterómetro de microondas Aquarius, y el radiómetro de microondas MWR; la misión SAOCOM, con lanzamiento previsto para 2015, consiste en un radar de apertura sintética. En este sentido, esta propuesta aportaría al desarrollo de aplicaciones para las misiones del Plan Espacial Nacional (PEN).

OBJETIVOS ESPECIFICOS E HIPÓTESIS DE TRABAJO (máx 1 pág.)

Los objetivos específicos de esta propuesta son:

- Desarrollar una metodología que genere mapas de área inundada utilizando datos de sistemas satelitales en microondas pasivas (AMSR-E, WindSat, SMOS y Aquarius). Esta metodología estará basada en el desarrollo de algoritmos específicos (Hamilton *et al.*, 2002, Salvia *et al.*, 2011), modelos de interacción (Bracaglia *et al.*, 1995, Grings *et al.*, 2008, Grings *et al.*, 2010) y otros datos satelitales ópticos y de campo (meteorológicos, hidrológicos, ecológicos).
- Desarrollar una metodología, para validar los mapas obtenidos con sensores pasivos en microondas (baja resolución espacial), utilizando datos de radar de mayor resolución espacial (RADARSAT 2–Constelación SIASGE Cosmo Skymed y SAOCOM) para eventos futuros y para el análisis de series históricas (Envisat ASAR, ALOS PALSAR).
- Estudiar la relación entre la fracción de área inundada de distintas unidades ecohidrológicas del corredor Paraná-Paraguay y datos hidrométricos correspondientes (ya sean medidos *in situ* o mediante sensores remotos).
- Construir, a partir de lo obtenido en el punto anterior, un diagrama de topografía efectiva para cada una de las unidades ecohidrológicas analizadas.
- Utilizando los diagramas de topografía efectiva desarrollados para cada una de las unidades ecohidrológicas, analizar la posibilidad de predecir la dinámica de eventos de inundación partiendo de datos hidrométricos e información auxiliar.

Hipótesis de trabajo

- Es posible obtener estimaciones de fracción de área inundada en planicies de inundación de la Cuenca del Plata, ya sea en suelo desnudo o con vegetación herbácea o arbórea, a partir de datos de microondas pasivas y algoritmos específicos.
- Dentro del corredor Paraná-Paraguay existen áreas con comportamiento hidrológico uniforme, en las cuales es posible establecer una relación entre datos hidrométricos y fracción de área inundada.
- Esta relación entre datos hidrométricos y fracción de área inundada da cuenta del comportamiento hidrodinámico efectivo de cada área.
- Con información sobre dinámica de inundaciones, tiempos de permanencia de aguas y fuentes de inundación, es posible obtener una evaluación cuantitativa de funciones y servicios brindados por los humedales presentes en las planicies de inundación.

RELEVANCIA DEL PROBLEMA (máx 3 págs.)

Introducción

Una de las ventajas principales de la teledetección satelital es la capacidad para cubrir grandes áreas de manera continua. Si bien la teledetección en las longitudes de onda ópticas y del infrarrojo brinda información de manera sistemática desde hace más de 30 años, los sistemas activos y pasivos en microondas desarrollados en la última década presentan ventajas con respecto a los ópticos en relación a variables hidrológicas.

Los sistemas ópticos detectan la radiación en las longitudes de onda del visible (VIS) y el infrarrojo cercano (IRc), midiendo la reflectancia de los objetos terrestres. Dependen para obtener mediciones de la radiación solar. Los tipos de interacciones presentes son a nivel molecular, ya que posee la energía para excitar electrones de las moléculas del blanco (Rees, 2005). La forma y la orientación de un dispersor también condicionan la naturaleza de la radiación reflejada, pero en un segundo orden. Existen dos limitaciones importantes para el uso de sensores remotos en el óptico para la determinación y monitoreo de inundaciones: 1) en general en episodios de inundación también hay cobertura nubosa que las ondas del VIS e IR no pueden atravesar y 2) los datos ópticos no penetran la vegetación y por lo tanto, no tienen la capacidad de observar las áreas inundadas debajo de bosques y/o vegetación herbácea densa que alcance 2 metros o más.

Por el contrario, los sistemas satelitales activos en microondas (radares de apertura sintética) atraviesan la cobertura nubosa y pueden medir de día y de noche. Al interactuar con el terreno, lo hacen con aquellos componentes del tamaño de la longitud de onda, en este caso del orden de centímetros (Rees, 2005). Los componentes del terreno que determinan la reflectividad del radar son su geometría y permitividad. Además, debido al alto contraste entre las propiedades dieléctricas del agua y del suelo seco resultan muy sensibles a la humedad del suelo (Njoku y Entekhab, 1996, Kim y van Zyl, 2009, Kerr, 2007), y a los procesos de inundación (Kasische *et al.*, 2003, Pope *et al.*, 1997, Parmuchi *et al.*, 2002). Adicionalmente, las microondas permiten determinar también áreas inundadas debajo de la vegetación (por ejemplo bosques). Estos sistemas presentan alta resolución espacial (decenas de metros) y resolución temporal intermedia (aproximadamente un mes), y miden el coeficiente de retrodispersión (*backscatter*) del terreno. Entre los sensores activos en banda C están los sistemas ERS-2, RADARSAT-1 y RADARSAT-2. En banda X se encuentran activos los satélites de la serie Cosmo SKYMED. Además, es posible contar con datos de archivo de los satélites ENVISAT ASAR (en banda C) y ALOS PALSAR (en banda L). Adicionalmente, en el futuro cercano se podrá contar con datos de la misión argentina SAOCOM (en banda L).

En cuanto a los sistemas pasivos en microondas presentan alta resolución temporal (diaria) y baja resolución espacial (decenas de km), y miden la temperatura de brillo (Tb) del terreno. La baja resolución espacial implica que las observaciones corresponden a píxeles heterogéneos donde la señal medida en cada uno de ellos corresponde a la suma de las Tbs de los distintos elementos del terreno (suelo, agua, vegetación). Sin embargo, esta baja resolución espacial está acompañada de un gran ancho de barrido, lo que permite el monitoreo simultáneo de grandes áreas.

Dos características principales hacen de las observaciones en microondas pasivas de gran importancia para el monitoreo de inundaciones. En primer término, las observaciones en microondas son sensibles a las condiciones de humedad de la superficie y por ende, pueden detectar condiciones previas que conducirían a procesos de escorrentía normales o a eventos de inundación de escala regional. Además, al igual que los sistemas activos, estos instrumentos son capaces de penetrar las nubes, las cuales están presentes, en general, antes, durante y después de eventos de inundación.

Los sistemas en microondas pasivas pueden detectar patrones de inundación también bajo vegetación densa (según la frecuencia de operación del sistema). Un estudio reciente (Ferrazzoli *et al.*, 2010a) realizado sobre la cuenca del Plata mostró que es posible monitorear la ubicación de una onda de crecida durante varias semanas usando series temporales del índice de polarización obtenido con datos AMSR-E, señalando su contribución e importancia en el monitoreo de eventos a escala regional.

En este momento se cuenta con series de tiempo (10 años de datos) de cobertura global de los sensores WindSat (a bordo del sistema satelital Coriolis) y AMSR-E (a bordo del sistema satelital Aqua). Estos

instrumentos operan en varias bandas que van de los 6.9 GHz (banda C) hasta 36 GHz (banda Ku). Las bajas frecuencias son más adecuadas para aplicaciones terrestres, mientras que las altas son más útiles para aplicaciones meteorológicas. Los sistemas satelitales SMOS (Soil Moisture Ocean Salinity) de la ESA (European Space Agency) puesto en órbita en Noviembre de 2009 y el sistema Aquarius a bordo del SAC-D (satélite Argentino puesto en órbita en Junio de 2011) incluyen sensores que operan en banda L (1.3 GHz). Existen evidencias teóricas y experimentales que esta banda es la óptima para este tipo de estudios. Por ende, los datos de estos nuevos sistemas permitirán detectar y cuantificar áreas inundadas, aún debajo de vegetación arbórea densa.

La altimetría de radar consiste en mediciones verticales de rango entre el satélite y la superficie del agua. La diferencia entre la altitud del satélite sobre una superficie de referencia (usualmente un elipsoide), determinada a través de un cómputo orbital preciso y la distancia satélite-superficie del agua, provee mediciones de nivel de agua por sobre la referencia. Dada la repetición de la órbita del satélite, el altímetro vuela sobre una región dada a intervalos regulares de tiempo (llamados ciclos orbitales), durante los cuales se consigue una cobertura completa de la Tierra (http://www.legos.obs-mip.fr/en/soa/hydrologie/hydroweb/General_Info.en.html).

El sistema satelital GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment) mide las variaciones en el campo de gravedad de la Tierra. A medida que sus satélites mellizos orbitan la tierra, las variaciones en el campo gravitatorio causan cambios infinitesimales en la distancia entre ellos. Estas variaciones gravitatorias son atribuibles, en primera medida, al movimiento estacional e interanual de agua a lo largo del ciclo hidrológico. En términos generales, GRACE puede recuperar señales de almacenamiento de agua de aproximadamente 1 cm o menos para cuencas donde el radio efectivo es de 250-300 km o mayor. Esto implica una escala de estudio regional a continental, aunque cuanto mayor sea la cuenca estudiada, más precisas serán las mediciones (<http://www.csr.utexas.edu/grace/publications/brochure/page4.html>).

El modelado de grandes cuencas está en continuo desarrollo como resultado de las mejoras en los datos satelitales disponibles, y la incorporación de sistemas innovadores de asimilación de datos. A su vez, uno de los grandes desafíos de la teledetección satelital hoy es la posibilidad de combinar datos de sistemas de distintas frecuencias y características, como los mencionados anteriormente, en procedimientos que permitan el monitoreo sistemático de variables biogeofísicas en resoluciones espaciales y temporales convenientes, es decir que permitan la asimilación de estos datos en modelos predictivos.

La cuenca del Plata, sus planicies de inundación y humedales asociados

La cuenca del Plata abarca 3,2 millones de Km² distribuidos en 5 países (Argentina, Uruguay, Paraguay, Bolivia y Brasil), se define como el área en el cual las precipitaciones escurren, después de un largo recorrido, hacia el Río de la Plata e incluye las subcuencas de los ríos Paraguay, Paraná y Uruguay. La precipitación anual media total de la cuenca es de 1100 mm., de los cuales solo el 20% llega al mar como agua en superficie. El 80% restante se evapora o infiltra. En consecuencia un cambio en las tasas de evaporación e infiltración pueden llevar a mayores cambios en la escorrentía.

Esta región es importante desde el punto de vista económico y social por sus actividades agrícolas (la Pampa húmeda está incluida en esta cuenca) y su alta densidad poblacional, abasteciendo a 70 millones de personas.

Incluye varias eco-regiones (Pantanal, Gran Chaco, Pampa, Selva Paranaense, Delta e islas del Paraná, Esteros del Iberá, entre otros) que proveen tanto productos derivados de la agricultura y la forestación como servicios ambientales esenciales (La Plata Basin Project).

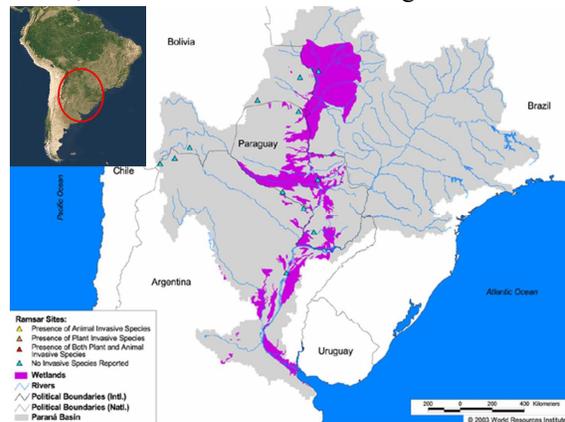


Figura 1: Humedales de la cuenca del Plata.

Los humedales presentes en esta cuenca proveen funciones hidrológicas y ecológicas irremplazables, como mitigación de sequías e inundaciones, recarga de acuíferos, soporte de pesquerías, filtrado de nutrientes y contaminantes, y provisión de agua dulce de alta calidad (Kandus *et al.*, 2006).

La estructura y el funcionamiento de estos humedales, que se encuentran cerca de algunas de las ciudades más importantes, y de las tierras más modificadas y productivas de Argentina, se encuentra amenazado por la continua modificación antrópica de la hidrología de la cuenca. La modificación de la integridad funcional de estos sistemas puede causar gran impacto en el sistema productivo que sustenta la economía de la región, y en las vidas de los millones de personas que viven en las ciudades ubicadas en los márgenes de los ríos de incumbencia.

Esto hace que el monitoreo de los ciclos de inundación y sequía de la planicie de inundación del río Paraná y otros humedales de la cuenca sea de importancia crítica. Dado que estos ecosistemas se extienden a lo largo del corredor fluvial Paraguay-Paraná y presentan una alta dinámica con variaciones estacionales e interanuales, se requieren para su estudio sensores remotos de distintas características espectrales, espaciales y temporales.

En este sentido, la obtención de una relación entre la altura hidrométrica de los ríos, y su efecto sobre el área inundada en la planicie aluvial permitiría mejorar tanto los modelos de pronóstico hidrológico, tan necesarios en humedales que se encuentran bajo uso agropecuario forestal, como el estudio de las funciones y servicios brindados por estos sistemas a la sociedad. Además, esta información sería útil para estudios de cambio global, particularmente aquellos dedicados a las emisiones de metano (CH₄), ya que los humedales tropicales y subtropicales son una de las mayores fuentes de emisión de este gas invernadero (Bartlett y Harriss, 1993), particularmente en los períodos de inundación.

RESULTADOS PRELIMINARES Y APORTES DEL GRUPO AL ESTUDIO DEL PROBLEMA EN CUESTION (máx 3 págs.)

Trabajos previos del grupo de teledetección del IAFE

El grupo de teledetección del IAFE posee una amplia experiencia en estudios de teledetección y humedales, tanto mediante sensores ópticos como de microondas.

Parmuchi *et al.* (2002), utilizó imágenes RADARSAT-1 adquiridas durante el fenómeno del niño de 1998 para mapear áreas inundadas utilizando clasificadores supervisados y no supervisados. Sus conclusiones principales fueron que el efecto de una inundación extrema se observa como una disminución en el σ^0 de los juncos y la cortadera, y una aumento en el σ^0 de los bosques. Karszenbaum *et al* (2000) comparó observaciones SAR de distintas polarizaciones (HH y VV) de los sistemas RADARSAT-1 y ERS-2, en juncos, cortadera y bosques. Sus conclusiones principales fueron que es posible diferenciar entre distintos ecosistemas utilizando imágenes SAR multipolarización, y que el efecto del cambio del nivel de agua se observa mucho más fuertemente en el σ^0 HH que en el σ^0 VV. En Grings *et al.*, (2005) incorporamos modelos de interacción EM para simular el σ^0 de los juncos, explicando exitosamente la tendencia general observada en una serie temporal de imágenes ERS-2 que mostraban el recrecimiento de los juncos después de un fuego intenso. A continuación, se utilizaron dos versiones del modelo de TR (Grings *et al.*, 2006) para interpretar el σ^0 HH y VV de los juncos y la cortadera en ocasión de una inundación extraordinaria observada por el sistema ENVISAT/ASAR, simulando satisfactoriamente los σ^0 para ambos tipos de vegetación y para ambas polarizaciones. Este hecho nos indujo a proponer un esquema para estimar la altura del agua basado en imágenes SAR *dual polarization* (Grings *et al.*, 2006).

Desde 2004, tenemos adquisiciones SAR provistas por el proyecto ESA ENVISAT ASAR AO 667. Estas imágenes corresponden al Delta del Río Paraná, y fueron adquiridas durante condiciones ambientales diversas, usando diferentes modos (Standard y Wide Swath), polarizaciones (HH, VV y HV) y ángulos de incidencia. Para explicar el σ^0 de la vegetación para todas las imágenes, fue necesario refinar el modelo EM de los juncos. Esto implicó: 1) corregir inestabilidades en las rutinas que calculan el *scattering* biestático de los cilindros (juncos) ante cambios pequeños del ángulo de incidencia, 2) incluir como variable de entrada la distribución angular de los juncos, 3) Refinar el trabajo de campo, de manera de poder caracterizar estadísticamente las variables de entrada al modelo.

Una vez realizados estos pasos, se simuló el σ^0 de los juncales para 13 imágenes con distintas polarizaciones, ángulos de incidencia y condiciones ambientales, y se compararon estas simulaciones con los valores observados en las imágenes SAR (Grings *et al.*, 2008). Esto permitió refinar el algoritmo de obtención de altura del agua debajo de la vegetación. Los resultados indican que es posible utilizar imágenes SAR *dual polarization* para monitorear la altura del agua debajo de los juncos a escala regional con un error RMS de 25 cm.

En la tesis doctoral de Salvia (2010), se estudió la región del Delta del Paraná a escala regional, mediante el análisis de series temporales que incluyeron eventos extremos. Se obtuvo el primer mapa de ambientes a nivel de tipos fisonómicos de vegetación para la totalidad del Delta del Paraná a escala regional mediante la clasificación de datos satelitales ópticos del sistema argentino SACC-MMRS, concluyendo que los ambientes presentes en el Delta del Paraná son separables a nivel de tipos fisonómicos aún con sistemas de resolución espacial media, y que los mismos no se distribuyen al azar en el Delta, sino que presentan un patrón característico que es consistente con regionalizaciones previas del área aunque se sugirió la subdivisión de 2 de las unidades ecológicas (D e I).

A continuación, se estudió la extensión del evento ENOS (El Niño/Oscilación del Sur) ocurrido en 2007 utilizando imágenes SAR en modo Wide Swath de los sistemas ENVISAT ASAR y ALOS PALSAR, encontrando que ambos sistemas son capaces de mapear el área inundada aunque se encontraron diferencias en la discriminación relacionadas con la frecuencia de los sistemas SAR y con las distintas condiciones del área al momento de adquisición de las imágenes utilizadas. Además se observó que las primeras unidades en ser fuertemente afectadas por la inundación no fueron aquellas más cercanas a los ríos, sino aquellas que encontrándose en la zona central de la región, son topográficamente más bajas (Salvia, 2010).

Luego, se estudiaron los incendios producidos en el área durante el año 2008, durante la sequía regional sufrida en todo el país, utilizando datos del sistema SACC-MMRS para realizar un mapeo a escala regional del área quemada, y se realizó, en el área más afectada, un estudio detallado sobre la severidad de los incendios y la recuperación de la cobertura vegetal pasada una estación de crecimiento mediante clasificaciones de imágenes Landsat 5 TM y trabajo de campo. Los resultados indicaron que dada la presencia de material combustible producido por la sequía, el ambiente más afectado fue el juncal/pirial, y que aquellos parches que sufrieron quemaduras más severas, con afectación de los rizomas, y aquellos con menor provisión de agua, lograron una menor recuperación de su cobertura vegetal que aquellos donde la quema fue más superficial y que presentan una mayor influencia de las crecidas del río Paraná (Salvia, 2010). Esto permitió hacer una evaluación, mediante de imágenes de radar acerca de cómo los incendios afectan el “drag coefficient” (Salvia *et al.*, 2009).

Para finalizar, la tesis doctoral mencionada integra los resultados anteriores mediante el análisis de una serie temporal de 9 años (2000-2008) del índice verde NDVI producido por el sistema TERRA-MODIS mediante 3 metodologías de análisis y clasificación de los patrones mostrados por el índice. Por un lado, se analizaron los patrones anuales como parábolas y se pudieron identificar eventos extremos mediante la ruptura de estos patrones, y cambios moderados de las condiciones ambientales mediante cambios específicos en los parámetros que definen el ajuste parabólico. Luego, se generó y clasificó una curva media anual y sus desvíos, que daba cuenta de la variación anual y la variabilidad interanual, encontrándose patrones distintivos de influencia del origen del agua (fluvial, mareal, precipitaciones). Finalmente, mediante el análisis y clasificación de variables sintéticas se obtuvo una zonificación según grado de inundabilidad, y se analizó el evento extremo del período analizado que más fuertemente afectó cada uno de los ambientes presentes en el área de estudio.

En cuanto a trabajos con microondas pasivas, el grupo ha ganado experiencia a partir del año 2008 Moccia *et al.*, (2008), estudió las firmas multitemporales de índices de frecuencia y polarización de AMSR-E en la Cuenca del Plata, encontrando una buena respuesta, especialmente del índice de polarización a eventos de lluvias e inundaciones. Ferrazzoli *et al.*, (2009) estudió la sensibilidad de las firmas de AMSR-E a los eventos de lluvia e inundación en la Cuenca del Plata, Ferrazzoli *et al.*, (2010b) además estimó la fracción de área inundada durante el evento ENOS 2007 en un sitio del Delta del Paraná usando microondas pasivas y un mapa de coberturas. Este trabajo obtuvo el segundo premio en el congreso Microrad 2010.

Luego, en Salvia *et al.* (2010), se utilizó un esquema de extracción de información basado en microondas pasivas y activas, y un mapa de coberturas (derivado de sensores ópticos) para estudiar la fracción de área inundada en el Delta del Paraná durante el evento ENOS 2009-2010. Se obtuvo apoyo financiero de los organizadores del congreso IGARSS2010 para su presentación oral. Este trabajo utiliza microondas pasivas para el cálculo de la fracción de área inundada, microondas activas para la calibración de dichas estimaciones y simulaciones de un modelo teórico de emisión para estudiar el comportamiento de la diferencia entre las temperaturas de brillo de las polarizaciones H y V (ΔT) a distintas alturas del agua dentro de la planicie. Los resultados mostraron que para vegetación herbácea, no puede considerarse que dicha diferencia de temperaturas de brillo sea constante e independiente de la altura del agua (uno de los supuestos del modelo lineal utilizado), pero puede obtenerse una buena estimación de dicha diferencia si se poseen estimaciones independientes (SAR) de área inundada a intervalos de tiempo regulares.

Posteriormente, en Salvia *et al.* (2011) se avanzó sobre lo encontrado en el trabajo anterior, utilizando la dependencia de ΔT_f con la altura del agua para determinar tanto la fracción de área inundada como la altura del agua en la planicie de inundación. Para esto, en vez de utilizar los datos pasivos para calcular la fracción de área inundada ff , en este caso ff se calculó de los datos de microondas activas, y los datos de microondas pasivas (junto con los valores de ff) se utilizaron para calcular ΔT_f . A continuación, con el valor de ΔT_f y la inversión del modelo teórico de emisión se obtuvo la altura del agua en la planicie de inundación (WL).

Más recientemente, en Salvia *et al.* (2012), siguiendo el esquema del trabajo anterior se compararon los eventos de inundación causados por eventos ENOS 2007 y 2009-2010.

CONSTRUCCION DE LA HIPOTESIS Y JUSTIFICACION GENERAL DE LA METODOLOGIA DE TRABAJO (máx 1 pág.)

Debido a la muy baja resolución, casi por definición todos los píxeles de los sistemas orbitales que miden microondas pasivas contienen más de un tipo de cobertura. Esto es lo que se denomina píxeles heterogéneos. En general, la temperatura de brillo observada de un píxel puede modelarse como la suma de las T_b de los distintos componentes del terreno pesados por el área que ocupan dentro del píxel. Para el caso de una planicie de inundación, es posible postular tres componentes del terreno (agua, planicie no inundada y planicie inundada), que en combinación son responsables de los valores observados de todos los píxeles de la cuenca (Hamilton *et al.*, 2002).

En el caso de los sistemas SAR, debido al alto contraste entre las propiedades dieléctricas del agua y del suelo seco resultan muy sensibles a la humedad del suelo (Njoku y Entekhab, 1996, Kim y van Zyl, 2009, Kerr, 2007), y a los procesos de inundación (Kasische *et al.*, 2003, Pope *et al.*, 1997, Parmuchi *et al.*, 2002).

De acuerdo a esto, se plantean las siguientes hipótesis de trabajo:

- Es posible obtener estimaciones de fracción de área inundada en planicies de inundación de la Cuenca del Plata, ya sea en suelo desnudo o con vegetación herbácea o arbórea a partir de datos de microondas pasivas y algoritmos específicos.
- Dentro del corredor Paraná-Paraguay existen áreas con comportamiento hidrológico uniforme, en las cuales es posible establecer una relación entre datos hidrométricos y fracción de área inundada.
- Esta relación entre datos hidrométricos y fracción de área inundada da cuenta del comportamiento hidrodinámico efectivo de cada área.
- Con información sobre dinámica de inundaciones, tiempos de permanencia de aguas y fuentes de inundación, es posible obtener una evaluación cuantitativa de funciones y servicios brindados por los humedales presentes en las planicies de inundación.

TIPO DE DISEÑO DE INVESTIGACION Y METODOS (máx 9 pág.)

Metodología y tareas

1. Sistemas satelitales a utilizar

Sistema	Magnitud	Resolución espacial	Resolución temporal	Rol
Radiómetro microondas (AMSR-E, WindSat, SMOS, SAC-D/Aquarius)	Temperatura de brillo [K]	- 8 Km (AMSR-E, Banda Ku) - 25 Km (WindSat) - 100 Km (SAC-D/Aquarius, Banda L)	Hasta dos días	Monitoreo y estimación sistemática de la fracción de área inundada.
SAR (Envisat ASAR, ALOS Palsar, COSMO SkyMed)	Coefficiente de backscattering	- 75 m x 75 m (Envisat ASAR Wide Scan) - 100 m x 100 m (ALOS PALSAR Scan SAR mode)	32 días	Validación de la fracción de área inundada.
Altímetro (ERS-1, ERS-2, Envisat, TOPEX/Poseidon, Jason)	Anomalía de altura [m]	Puntual	32 días	Estimación de la variación de la altura del agua en los ríos.
Óptico (MODIS)	Reflectancia	250 m x 250 m (rojo e IRc) 500 m x 500 m (verde, azul, IRm)	16 días	Validación de la fracción de área inundada. Monitoreo de disturbios en la vegetación. Actualización de mapa de coberturas.
Gravímetro (GRACE)	Anomalía gravitatoria medida en cm de agua equivalente [cm]	300 Km x 300 Km	Una solución cada 10 días.	Monitoreo del volumen total de agua en el área.

2. Variables físicas de sistemas satelitales en microondas

2.1 Emisividad (sistemas pasivos)

La emisividad de un terreno se define como:

$$\varepsilon_{\lambda,p} = \frac{Tb_{\lambda,p}}{T} \quad (1)$$

Donde ε es la emisividad, Tb es la temperatura de brillo del terreno para una frecuencia λ y una polarización $p = (h, v)$ y T la temperatura real del terreno. Los sistemas orbitales como AMSR-E, SMOS, SAC-D/Aquarius y otros miden Tb para algunas frecuencias y polarizaciones. La temperatura de brillo es igual a la temperatura real del objeto solo para el caso de un cuerpo negro ideal, y es en general menor para el caso de un cuerpo real. Por lo tanto, la emisividad es siempre menor que 1. La emisividad en distintas polarizaciones es necesariamente igual únicamente para el caso de incidencia normal, donde la dirección del campo eléctrico en H y en V es siempre paralela a la superficie. Para todos los demás casos, se observa en general valores distintos de ε_h y ε_v para casi todos los elementos del terreno. Mas aun, se observan cambios en la diferencia $\varepsilon_h - \varepsilon_v$ que dependen de la cobertura del terreno (tipo y condición de la vegetación, tipo y condición del suelo, estado de inundación, etc.). Con el doble objetivo de explotar esta diferencia e independizarse de la temperatura real del objeto se define el índice de polarización PI para una frecuencia λ como,

$$PI_{\lambda} = \frac{Tb_{\lambda v} - Tb_{\lambda h}}{0.5(Tb_{\lambda v} + Tb_{\lambda h})} \quad (2)$$

Este es un indicador robusto del estado del terreno, frecuentemente utilizado para monitorear cambios en la condición del terreno.

2.2 Coeficiente de Backscattering (sistemas activos)

El SAR es un sistema que emite un pulso electromagnético y mide el tiempo y la intensidad del eco reflejado (mediciones de amplitud y fase). Muchos de los sistemas SAR actuales, son capaces también de controlar la dirección del campo eléctrico emitido (polarización) y del recibido. La relación entre la energía retrodispersada (captada por el radar) y la incidente (emitida por el radar) y constituye el coeficiente de *backscattering* (retrodispersión) notado como σ^0 , magnitud física que contiene la información sobre el blanco. En general, el coeficiente de *backscattering* es distinto para cada polarización. Para expresar este hecho, se define la matriz compleja S , llamada matriz de *scattering*, la cual relaciona el campo eléctrico incidente E^i y el reflejado E^s por medio de la expresión:

$$\begin{bmatrix} E_v^s \\ E_h^s \end{bmatrix} = \frac{e^{ik_0 r}}{r} \begin{bmatrix} S_{vv} & S_{vh} \\ S_{hv} & S_{hh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_v^i \\ E_h^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

en la que r es la distancia entre el radar y el blanco, y k_0 es el llamado vector de propagación y S_{ij} es la amplitud de *scattering* del blanco cuando se incide con una onda polarizada i y se mide la onda retrodispersada con polarización j ($i, j = h, v$). Para calcular el coeficiente de backscattering a una polarización dada,

$$\sigma_{ij}^0 = 4\pi |S_{ij}| \quad (4)$$

La matriz S incluye todas las magnitudes medidas por un radar polarimétrico para una celda de resolución y contiene toda la información necesaria para caracterizar un blanco como dispersor electromagnético a una frecuencia dada.

En general, dos conjuntos de factores determinan el coeficiente de *backscattering* de un blanco: factores geométricos determinados por la estructura y orientación del blanco y factores eléctricos determinados por las constantes dieléctricas de los constituyentes del blanco. En el caso de los sistemas terrestres, el valor del coeficiente de *backscattering* está gobernado por las propiedades dieléctricas de suelo y vegetación y por la orientación de los elementos dispersantes que integran el blanco con respecto a la dirección y polarización de la onda incidente.

3. Estimación del área inundada utilizando datos satelitales en microondas

Debido a la muy baja resolución, casi por definición todos los píxeles de los sistemas orbitales que miden microondas pasivas contienen más de un tipo de cobertura. Esto es lo que se denomina píxeles heterogéneos. En general, la temperatura de brillo observada de un píxel puede modelarse como la suma de las Tb de los distintos componentes del terreno pesados por el área que ocupan dentro del píxel. Para el caso de una planicie de inundación, es posible postular tres componentes del terreno (agua, planicie no inundada y planicie inundada), que en combinación son responsables de los valores observados de todos los píxeles de la cuenca (Hamilton *et al.*, 2002). Entonces, el PI observado de cada píxel puede modelarse como,

$$PI_{obs,\lambda} = f_w PI_{w,\lambda} + f_{nf} PI_{nf,\lambda} + f_f PI_{f,\lambda} \quad (5)$$

Donde PI_w , PI_{nf} y PI_f corresponden al PI de ríos y lagos permanentes, de planicie no inundada y planicie inundada respectivamente, y f_w , f_{nf} y f_f corresponden a la fracción del área de píxel ocupada por cada una de estos componentes del terreno. Por definición,

$$1 = f_w + f_{nf} + f_f \quad (6)$$

Ya que la suma de todos los componentes presentes en el píxel debe ser igual al área del píxel. Ahora, es posible estimar el área inundada despejando de (5) y (6)

$$f_f = \frac{PI_{obs,\lambda} - f_w PI_w - PI_{nf,\lambda} + f_w PI_{nf,\lambda}}{PI_{f,\lambda} - PI_{nf,\lambda}} \quad (7)$$

Este esquema fue planteado inicialmente por (Hamilton *et al.*, 2002) para estimar área inundada en grandes planicies de inundación utilizando el radiómetro pasivo *Scanning Multichannel Microwave Radiometer* (SMMR) (Gloersen y Hardis, 1979). Este esquema cuenta con la información en una única frecuencia (36 GHz) y dos polarizaciones (PI_{obs}) y requiere poder estimar por medios externos los siguientes parámetros para cada píxel:

- f_w (fracción del píxel inundada permanentemente). Este parámetro es estimado en Sippel *et al.* (1998) con imágenes ópticas, a través de una clasificación que incluye bandas en el infrarrojo; con imágenes de un sistema SAR Banda X en Hamilton *et al.* (2002), utilizando el hecho de que los cuerpos de agua tiene asociados coeficientes de *backscattering* muy bajos. En el trabajo propuesto, estimaremos f_w utilizando una combinación de imágenes MODIS e imágenes Envista ASAR en modo *Wide Swath*.
- PI_w (PI de un cuerpo de agua). Este valor puede calcularse teóricamente para un cuerpo de agua calma y pura dado el ángulo de incidencia y es del orden de 60 K. también es posible estimarlo del valor de píxeles homogéneos (totalmente inundados) o utilizando una metodología desarrollada por Hamilton *et al.* (2002), análoga a (5) pero aplicable a píxeles con dos coberturas del terreno presentes. Por ultimo, es posible derivarlo teóricamente utilizando modelos de interacción electromagnética como los introducidos en Ferrazzoli *et al.* (1992).
- PI_{nf} (PI de la planicie no inundada). Este valor puede determinarse empíricamente de zonas no inundadas (Hamilton *et al.*, 2002) o puede simular utilizando modelos de interacción. En esta última opción permite entender en detalle el comportamiento de PI_{nf} , pero requiere de un conocimiento importante del terreno, ya que el modelo de interacción requiere como entrada las características geométricas y dieléctricas del terreno (suelo y vegetación).
- PI_f (PI de la planicie inundada). Al igual que el anterior, este parámetro puede determinarse empíricamente o puede simularse. La primera opción es la utilizada por Sippel *et al.* (1998), Hamilton *et al.* (2002) y la segunda puede implementarse como para el PI_{nf} .

En la actualidad, esta disponible el sistema WindSat, que mide Tb en cuatro frecuencias (37, 23.8, 18.7 y 10.7 GHz) y dos polarizaciones (H y V). Por ende, es posible calcular 4 valores de PI (uno para cada polarización) y escribir 4 ecuaciones como (5), una para cada frecuencia. Esto permite relajar algunas de las condiciones implícitas en la evaluación de parámetros (a-d), ya sea que se elija estimarlos desde datos o calculándolos teóricamente. En este último caso, es posible calibrar y validar los modelos de interacción en muchas frecuencias y polarizaciones, lo cual permite estimar los parámetros de manera más robusta.

Asimismo, empiezan a estar disponibles los datos de emisividad en Banda L provistos por los sistemas SMOS y SACD Aquarius, los cuales son más sensibles a las variaciones de la condición de inundación del suelo debajo de bosques.

Además, si bien el sistema AMSR-E ha dejado de funcionar en octubre de 2011, se encuentra disponible la serie de datos tomados por este sensor (2002-2011) que consiste en Tb en cuatro frecuencias (36, 18, 10 y 6.9 GHz) y dos polarizaciones (H y V).

4. Validación de la estimación de área inundada con datos de Radares de Apertura Sintética (SAR).

Para validar las estimaciones de fracción de área inundada se utilizarán a intervalos más o menos regulares de tiempo, mapas de área inundada obtenidos por medio de detección de cambios de imágenes SAR (ENVISAT ASAR y ALOS PALSAR en el caso de eventos históricos, COSMO SKYMED y RADARSAT 2 en futuros eventos), de mayor resolución espacial y menor resolución temporal.

El procedimiento de detección de cambios consiste en la obtención de una imagen de cambio a partir de una imagen de condiciones normales y una en condiciones de inundación mediante la fórmula

$$\Delta\sigma_{db}^0 = \sigma_i^0 - \sigma_n^0 \quad (8)$$

donde σ_i^0 es el coeficiente de backscattering en la imagen de condiciones de inundación y σ_n^0 es el coeficiente de backscattering en la imagen de condiciones normales.

A continuación, los valores de cambio son segmentados en intervalos de cambio definidos teniendo en cuenta la incerteza radiométrica de las imágenes utilizadas. Estos intervalos de cambio se analizan de acuerdo al tipo de cobertura vegetal sobre la cual ocurren. Para finalizar, los intervalos de cambio se recodifican en las categorías inundado / no inundado.

La validación de la estimación de fracción de área inundada se realiza calculando la proporción de píxeles inundados según los mapas SAR para la misma área utilizada en la estimación de microondas pasivas.

5. Obtención de alturas hidrométricas a partir de altímetro de radar.

Básicamente, un altímetro orbital determina la distancia desde el satélite a la superficie terrestre emitiendo un pulso de radar hacia la superficie y midiendo su tiempo de viaje (Rosmorduc *et al.*, 2009). Además de esta medición básica, todos los altímetros miden la potencia y la forma de onda de la señal retrodispersada, de manera de poder inferir características del blanco (Rosmorduc *et al.*, 2009). Utilizando altímetros se han desarrollado aplicaciones para medir la altura de las olas y la velocidad del viento en océanos.

Los altímetros se usan desde hace años en aplicaciones hidrológicas (Parsons *et al.*, 1994). En particular, para medir la altura del agua en ríos sobre áreas puntuales. Para ello, se selecciona un área de agua abierta del orden de 1 Km², de manera de que el coeficiente de backscattering en nadir sea importante. Con este recaudo, las mediciones de altura del agua basadas en radiómetros tienen una precisión ~ 5 cm (Parsons *et al.*, 1994).

Las series de datos de altura del agua en ríos y lagos pueden descargarse, con sus errores asociados, de la página web del GOHS team (Geodesy, Oceanography et Hydrologie from Space) del LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Oceanographie Spatiales): <http://www.legos.obs-mip.fr/en/soa/hydrologie/hydroweb/index.html>

6. Análisis de la relación entre la fracción de área inundada y la altura hidrométrica de los ríos circundantes.

Los niveles hidrométricos proveen el mejor *proxy* de las variaciones temporales en el área inundada en las planicies que flanquean los grandes ríos de Sudamérica. Si bien el agua presente en las planicies de inundación puede originarse tanto por desborde de los ríos como por escorrentía local, es el río el que controla mayormente los niveles de agua y por lo tanto el área inundada en las planicies adyacentes (Sippel *et al.*, 1998).

Un enfoque para el estudio de la dinámica de las inundaciones es el estudio de la relación existente entre la altura del agua en un río, y el área inundada en la planicie adyacente. Así las características de esta relación son un indicador del comportamiento hidrodinámico equivalente de las planicies de inundación de un área de la cuenca. Este comportamiento hidrodinámico describe de manera global los movimientos del agua durante los eventos de inundación (figura 2).

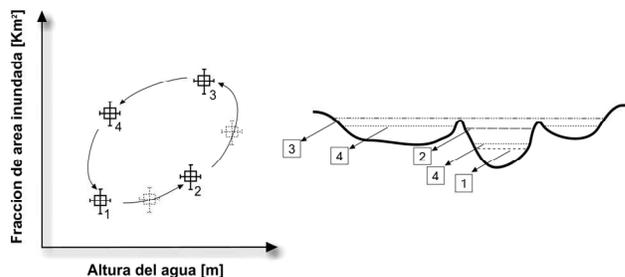


Figura 2: esquema de los resultados esperados de la relación área inundada/ altura hidrométrica. Der: gráfico esperado de fracción de área inundada vs. Altura del agua. Izq: Esquema de topografía equivalente resultante de la relación fracción de área inundada vs altura del agua.

En el caso esquematizado en la figura 2, por ejemplo, observaríamos que al pasar de la situación 1 (altura normal del curso de agua correspondiente) a la situación 2, se observa un aumento de la altura del agua en el río, pero casi no se observan cambios en la fracción de área inundada (fig. 2 izq.), lo que indicaría una crecida del curso de agua, pero sin sobrepasar los albardones perimetrales del mismo. Al pasar de la situación 2 a 3 se observa un pequeño aumento en la altura del agua y un gran aumento en la fracción de área inundada, lo que indicaría que el agua sobrepasó el albardón, derramándose sobre la planicie de inundación. Al pasar del punto 3 al 4, se observa que desciende mucho la altura del agua en el río, pero el descenso de la fracción de área inundada es leve. Esto implicaría que la planicie de inundación está funcionando como reservorio de agua, ya que el agua recibida al sobrepasar el río el nivel del albardón queda en la planicie aun después que el río ha bajado su nivel. Este tipo de efectos es lo que explica el efecto amortiguador de crecidas que poseen los humedales. La magnitud de este efecto amortiguador dependerá del tiempo que el humedal pueda retener el agua y de cuan gradualmente se efectue la descarga, ya sea al mismo río o a las napas debajo de él.

Este tipo de análisis permite no solo conocer la forma en que cada una de las unidades ecohidrológicas responde a una crecida del río correspondiente, sino también estudiar su histéresis, es decir, la forma en que se comporta la unidad en cuestión luego de un evento de inundación, por ejemplo, cómo es la circulación del agua dentro de la unidad y cuál es su tiempo de permanencia. El tiempo de permanencia del agua en las unidades presenta una gran importancia, ya que condiciona las especies vegetales que pueden existir en cada una de las unidades, y condiciona también la emisión de metano (CH_4), un gas invernadero cuya dinámica es muy importante y poco conocida para los estudios de cambio global.

7. Obtención del volumen de agua almacenado y validación del producto fracción de área inundada * altura del agua.

A través de las mediciones del sistema satelital GRACE, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) provee el producto altura de agua equivalente (EWH), que es la altura que tendría una columna de agua sobre un píxel dado. Este dato se obtiene de la variación del campo gravitatorio observado por el sistema satelital, integrado en un período de observación de 10 días.

Estos datos serán usados para validar las estimaciones de fracción de área inundada y altura del agua, ya que para un período de tiempo dado el volumen de agua estimado por GRACE debería ser proporcional al producto del área inundada estimada de datos de microondas pasivas y la altura del agua estimada utilizando datos de altímetro radar.

Las tareas previstas son las siguientes:

1. Selección y bajada de datos de microondas pasivas (AMSR-E, WindSat, SMOS, SACD Aquarius), SAR (ENVISAT ASAR, ALOS PALSAR, RADARSAT2, COSMO Skymed), ópticos (MODIS), Altímetro (ERS-1, ERS-2, Topex/Poseidon, Jason) y Gravímetro (GRACE).
2. Definición de las unidades ecohidrológicas de cada humedal, en base a regionalizaciones existentes y estudios preliminares de eventos de inundación pasados. Cada unidad se definirá como el área contigua que presenta la misma fuente (río o arroyo) de inundación.
3. Recopilación de datos de lluvia y altura de los ríos, y armado de un Sistema de Información Geográfica (GIS)
4. Construcción de base de datos que incluya para cada área hidrológica del humedal los datos disponibles de: altura y caudal del agua en el cauce del río, precipitación acumulada diaria, temperatura media máxima y mínima diaria, humedad relativa del aire. Asimismo se integrarán otros datos auxiliares como régimen de funcionamiento de las represas de la cuenca, registro de grandes obras de infraestructura y cambios de escala regional de uso y cobertura.
5. Preprocesamiento de datos satelitales
6. Georreferenciación, calibración y cálculo de índices cuando corresponda.
7. Desarrollo e implementación de estrategias de obtención de área inundada basados en la ecuación 5. Se probarán distintas estrategias basadas en modelos de interacción, datos de bibliografía e información ad hoc obtenida de trabajo de campo.

8. Determinación de la dinámica del flujo de la inundación/sequía en las planicies de inundación de la parte argentina del río Paraná en Rosario (onda de inundación).
9. Estudio de la variabilidad mensual, estacional, anual e interanual de los patrones de inundación del Paraná. Interpretación usando datos ambientales auxiliares
10. Determinación de las fracciones de agua abierta en superficie, área inundada, área seca en función del tiempo, a partir de datos de microondas. Validación utilizando datos ópticos de resolución media (MODIS) y de radar de apertura sintética (ENVISAT ASAR)
11. Determinación de la correlación entre área inundada y nivel del agua de los ríos que corresponden a cada planicie.
12. Estudio de la correlación entre área inundada y nivel de agua en el río, basado en la metodología desarrollada en Hamilton 2002, y durante este proyecto. Interpretación usando datos ambientales auxiliares.
13. Armado de una base de información espacio-temporal con los resultados obtenidos.

CRONOGRAMA DE TRABAJO (máx 1 pág.)

	Semestre 1	Semestre 2	Semestre 3	Semestre 4
1	x		x	
2			x	
3	x	x		
4	x	x	x	
5	x		x	
6	x		x	
7	x	x	x	x
8		x	x	x
9			x	x
10		x	x	x
11		x	x	x
12			x	x
13				x

Bibliografía

- Bartlett, K. B., and Harriss, R. C., 1993, Review and assessment of methane emissions from wetlands. *Chemosphere*, 26, 261:320.
- Bracaglia, M, P. Ferrazzoli, and L. Guerriero. 1995. A fully polarimetric multiple scattering model for crops. *Remote Sensing of Environment.*, vol. 54, pp. 170–179, 1995.
- Ferrazzoli, P., L. Guerriero, S. Paloscia, P. Pampaloni, and D. Solimini. 1992. Modelling polarization properties of emission from soil covered with vegetation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, pp. 157-165, 1992.
- Ferrazzoli P., R. Rahmoune, F. Grings, M. Salvia, M. Barber, H. Karszenbaum, A. Soldano, D. Goniaski, G. Parmuchi, C. Montenegro, P. Kandus, M. Borro. 2009. Monitoring rain and flooding events in de la Plata Basin using AMSR-E signatures. *Proceedings IGARSS 2009*.
- Ferrazzoli P., Rahmoune, F. Moccia , F. Grings, M. Salvia, M. Barber, H. Karszenbaum, A. Soldano, D. Goniadzki, G. Parmuchi , C. Montenegro, P. Kandus, M. Borro. 2010a. The effect of rain and flooding events on AMSR-E signatures of La Plata Basin, Argentina , *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, número especial, vol 3 (1): 81-90.
- Ferrazzoli P., Rahmoune, F. Grings, V. Douna, G. Parmuchi, M. Salvia, H. Karszenbaum. 2010b. AMSR-E observations of rain and flood events over vegetated areas of La Plata Basin. *IEEE Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad) Proceedings*.
- Gloersen, P., and L. Hardis. 1979. "The Scanning Multichannel Microwave Radiometer (SMMR) Experiment", *Nimbus-7 User's Guide*, ed. By C.R. Madrid, NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, Maryland, pp. 213-245.
- Grings, F. M., Ferrazzoli, P., Karszenbaum, H., Tiffenberg, J., Kandus, P., Guerriero, L., Jacobo-Berlles, J. C., 2005, "Temporal evolution of junco marshes radar signatures". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43, no. 10, pp. 2238-2245.
- Grings, F. M., Ferrazzoli, P, Jacobo-Berlles, .J. C., Karszenbaum, H., Tiffenberg, J., Pratolongo, P. and Kandus, P., 2006, Monitoring flood condition in marshes using EM models and Envisat ASAR observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, no. 4, pp. 936-942.
- Grings, F. M., Ferrazzoli, P, Jacobo-Berlles, .J. C., Karszenbaum, H., Salvia M., Pratolongo, P. and Kandus, P., 2008, "Model investigation about the potential of C band SAR in herbaceous wetlands flood monitoring", *International journal of Remote Sensing*. Vol 29 (17-18), pp. 5361-5372
- Grings, F. M., Salvia M., Karszenbaum, H., Ferrazzoli, P., Perna, P., Barber, M., Jacobo-Berlles, .J. C. 2010. Statistical information of ASAR observations over wetland areas: An interaction model interpretation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, pp. 77-85
- Hamilton, S. K., S. J. Sippel, y J. M. Melack. 2002. Comparison of inundation patterns among major South American floodplains, *Journal of Geophysical Research*, 107(D20), 8038.
- 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.
- Karszenbaum H., P. Kandus, J. M. Martinez, T. Le Toan, J. Tiffenberg and G. Parmuchi, 2000. ERS-2, RADARSAT SAR backscattering characteristics of the Paraná river delta wetlands, Argentina, *ERS-Envisat Symposium (ESA), ESA-SP-461*, 2000
- Kasischke E. S., Smith K. B., Bourgeau-Chavez L. L., Romanowicz E. A., Brunzell S., Richardson C. J., 2003. *Effects of the seasonal hydrologic patterns in South Florida wetlands on radar backscatter measured on ERS-2 SAR image*, *Remote Sensing Environ.* 88. 423-441.
- Y. Kerr. 2007. Soil moisture from space: Where are we?, *Hydrogeology Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 117-120.

Y. Kim y J. J. van Zyl. 2009. A Time-Series Approach to Estimate Soil Moisture Using Polarimetric Radar Data. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol. 47, no. 8, pp. 2519 -2527.

LA PLATA BASIN PROJECT, <http://www.eol.ucar.edu/projects/lpb/>

Moccia F., M. Salvia, P. Ferrazzoli, P. Kandus, H. Karszenbaum, F. Grings, G. Parmuchi, A. Soldano. 2008. Monitoring de la Plata Basin using passive and active microwave instruments. Abstract Proceedings IGARSS 2008.

Njoku, E., D. Entekhabi, 1996. Passive microwave remote sensing of soil moistures, *Journal of Hydrology*, 184, 1996, 101-129.

Parmuchi M. G., H. Karszenbaum and P. Kandus, "Mapping the Paraná River delta wetland using multitemporal RADARSAT/SAR data and a decision based classifier". *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol. 28, 2002. Parsons, C.L.; Walsh, E.J.; Vandemark, D.C., Nov 1994, "Topographic mapping using a multibeam radar altimeter," *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, vol.32, no.6, pp.1170-1178.

Pope, K.O., E. Rejmankova, F. F. Paris, and R.Woodruff, 1997 Detecting seasonal flooding cycles in marshes of the Yucatan peninsula with SIR-C polarimetric radar imagery. *Remote Sensing of Environment*, vol. 59, pp. 157-166, 1997.

Rees W.G. 2005. "Physical Principles of Remote Sensing (Topics in Remote Sensing)".

Rosmorduc, V., J. Benveniste, O. Lauret, C. Maheu, M. Milagro, N. Picot, 2009, Radar Altimetry Tutorial, J. Benveniste and N. Picot Ed., <http://www.altimetry.info>.

Salvia M., Franco, M, Grings, F., Perna, P., Martino, R., Karszenbaum H., Ferrazzoli, P. 2009. Estimating Flow Resistance of Wetlands Using SAR Images and Interaction Models. *Remote Sens.* 2009, 1, 992-1008.

Salvia M. 2010. Aporte de la teledetección al estudio del funcionamiento del Macrosistema Delta del Paraná: análisis de series de tiempo y eventos extremos. Tesis Doctoral. Universidad de Buenos Aires, Argentina.

Salvia, M, Grings, F., Perna, P., Ferrazzoli, P., Rahmoune, R., Barber, M., Douna, V., Karszenbaum, H. 2010. Monitoring flooded area fraction in floodplains of Paraná basin using passive and active microwave systems. IGARSS 2010 Proceedings.

Salvia, M., Grings, F., Ferrazzoli, P., Barraza, V., Douna, V., Perna, P., and Karszenbaum, H. 2011. "Estimating flooded area and mean water level using active and passive microwaves: The example of Paraná River Delta floodplain". *Hydrol. Earth Syst. Sci*, 15: 2679-2692. doi:10.5194/hess-15-2679-2011.

Salvia, M., Grings, F., Barraza, V., Perna, P., Karszenbaum, H., Ferrazzoli, P. 2012. Active and passive microwave systems in the assessment of flooded area fraction and mean water level in the Paraná River floodplain. Artículo completo. Presentación en póster. Microrad 2012. Frascati, Italia.

Sippel, S.J., S.K. Hamilton, J.M. Melack Y E.M.M. Novo. 1998. Passive microwave observations of inundation area and the area/stage relation in the Amazon River floodplain. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 3055- 3074.