

# TITULO: Teledetección satelital en microondas: desarrollos para aplicaciones ambientales

## INDICE

### 1. RELEVANCIA del PROBLEMA y OPORTUNIDAD (máx 3 pág)

#### 1.1 Tema central de la teledetección

El sistema terrestre es observado continuamente desde hace 30 años. Sin embargo, la densidad de sistemas de observación satelital operativos en la última década es mayor que la de todos los años anteriores juntos. Por esto mismo, el volumen de datos ofrecidos es muy grande, y la capacidad para utilizarlos es bastante limitada, llegando al punto que solo el 20% de los datos adquiridos es requerido por algún usuario (5% en el caso de las microondas).

Se puede entender porque ocurre esto analizando en detalle los productos de los sistemas satelitales y los requerimientos de los usuarios de estos sistemas. Los sistemas satelitales miden magnitudes físicas asociadas con la radiación reflejada, retrodispersada o emitida por un blanco (Ej. reflectancia en superficie, coeficiente de *backscattering*, emisividad). Los usuarios de los sistemas satelitales, desean obtener o estimar los parámetros y las variables de estado de los sistemas terrestres que estudian. Pasar de las magnitudes observadas a los parámetros y variables de los sistemas terrestres puede ser relativamente fácil (si las magnitudes y las variables están relacionadas por alguna ley física, como en el caso de la temperatura y la ley de radiación de Planck) o un problema muy complejo. Este es el tema central de la teledetección.

#### 1.2 Por qué teledetección en microondas: características y oportunidad

##### 1.2.1 Características

La superficie terrestre se observa en todas las regiones del espectro electromagnético donde la atmósfera lo permite. Existen zonas del espectro electromagnético donde la transmitancia atmosférica es muy alta, denominadas comúnmente “ventanas atmosféricas”. En las longitudes de onda asociadas a estas “ventanas” es posible utilizar sensores orbitales para monitorear la superficie terrestre. Estas ventanas están agrupadas básicamente en dos grandes regiones: la zona que va de 450 nm a 5000 nm (longitudes de onda del óptico y el infrarrojo reflectivo y térmico) y la zona que va desde los 0.5 cm. a los 70 cm. (microondas). Los sistemas que operan en el visible (VIS) y el infrarrojo (IR) miden propiedades distintas a los que operan en la región de las microondas, y los trataremos de manera distinta.

El cociente entre el número de sistemas que operan en el VIS e IR y el número de sistemas que operan en microondas es del orden de 100. Considerando que ambas ventanas atmosféricas son igualmente accesibles para los sistemas orbitales, cabe preguntarse porque esto es así. Por un lado, existe una complejidad tecnológica mayor para construir sistemas que operen en las microondas (especialmente en el caso del radar). Otra razón es que la interacción de las ondas electromagnéticas con el terreno en el VIS y el IR suele ser mas fácil de interpretar que en las microondas. Explicaremos esto en más detalle.

La radiación en el VIS y el IRc (IRc: infrarrojo cercano), interactúa con los elementos del terreno, a nivel molecular, ya que posee la energía para excitar electrones de las moléculas del blanco. La forma y la orientación de un dispersor también condicionan la naturaleza de la radiación reflejada, pero en un segundo orden. Es lícito decir entonces, que la interacción de la radiación incidente en el VIS o IRc se da a nivel de los componentes químicos del dispersor y por lo tanto, **la radiación reflejada es básicamente función de los componentes químicos de la superficie terrestre.**

Por el contrario, cuando las microondas interactúan con el terreno, lo hacen con los componentes del terreno del tamaño de la longitud de onda, en este caso del orden de centímetros. Los componentes

químicos del blanco no serán ya cruciales para conocer la radiación reflejada, pero si **su geometría y sus propiedades dieléctricas**<sup>1</sup>.

Debido a que la interacción de la radiación con el terreno es, en general, más fácilmente interpretable en las longitudes de onda del VIS y el IR, suele ser también más sencillo el problema de estimar los parámetros biogeofísicos a partir de la radiación reflejada o emitida. Sin embargo, existe un consenso general de que los sistemas que operan en microondas aportarán una gran cantidad de información necesaria para monitorear los sistemas terrestres. Algunos de los argumentos utilizados para sostener esta hipótesis son los siguientes:

- La teledetección en microondas es sinérgica con la teledetección en el óptico. La información que se obtiene en distintas longitudes de onda es diferente y complementaria.
- Los sistemas que operan en microondas son bastante independientes del clima y pueden operar durante la noche.
- Los sistemas que operan en microondas son sensibles a la geometría de la superficie terrestre, por lo cual son potencialmente aptos para monitorear la rugosidad del océano (relacionada con la velocidad del viento) y la erosión del suelo.
- Los sistemas que operan en microondas son sensibles a las propiedades dieléctricas de la superficie terrestre, por lo cual serían aptos para monitorear la humedad del suelo, la salinidad del océano y el contenido de agua en la nieve.
- Los sistemas que operan en microondas tienen la capacidad de atravesar el dosel de la vegetación, por lo que serían útiles a la hora de monitorear agua debajo de la vegetación, y por ejemplo, biomasa maderable en el caso de los bosques. Esto último tiene importantes implicancias en la determinación de balance de carbono.

### **1.2.2 Oportunidad: misiones satelitales de Argentina y de otros países**

En el tema de las microondas pasivas hay dos misiones programadas: la misión SMOS (*Soil Moisture and Ocean salinity*) de la ESA (*European Space Agency*) con fecha posible de lanzamiento en el año 2008 y la misión Aquarius/SAC-D desarrollada por Estados Unidos y Argentina, con fecha de lanzamiento prevista para el año 2009.

- El objetivo de la misión SMOS es obtener mapas globales de humedad del suelo y salinidad del mar a fin de obtener avances en aplicaciones climatológicas, meteorológicas, hidrológicas y oceanográficas. El grupo científico de esta misión ha establecido que el conocimiento de la distribución global de humedad del suelo y de salinidad de los océanos y su variabilidad anual e interanual es crucial para entender el sistema climático global.
- La misión Aquarius/SAC-D ha sido diseñada con el fin de optimizar la precisión en la obtención de salinidad de los océanos a escala global para modelos climáticos. El avance científico esperado es la comprensión del balance atmósfera-océanos-agua dulce. En muchas regiones del planeta, el nivel de incerteza es del orden del flujo neto de agua dulce. Simulaciones hechas sobre los futuros datos de este sistema muestran que proveerán datos globales no disponibles hasta el momento y de gran influencia en los modelos climáticos globales. Asimismo esta misión operará conjuntamente con la misión SMOS.

Las expectativas con respecto a estos datos son muy grandes, pero también la necesidad de estudiar las características de estas futuras observaciones para que puedan ser aprovechadas por los expertos en las áreas pertinentes (oceanografía, cambio climático, otros). En las microondas activas, la siguiente tabla resume las misiones finalizadas, las actuales y las previstas.

**Tabla1: Misiones satelitales de radar finalizadas, vigentes y futuras**

---

<sup>1</sup> Los materiales en la superficie de la tierra pueden ser caracterizados según un índice denominado constante dieléctrica compleja, este índice mide las propiedades de conducción y reflexión de un cuerpo, presentando valores bajos cuando el cuerpo tiene bajo contenido de humedad y altos cuanto mayor es la presencia de agua.

Satélite	Misiones en operación			Misiones finalizadas			Misiones planificadas		
	RADARSAT-1	ENVISAT	ERS-2	ERS-1	SIR-C	JERS-1	RADARSAT-2	ALOS	SAOCOM
Banda Radar	C	C	C	C	L, C	L	C	L	L
Polarización	HH	HH o VV VV o HH	VV	VV	ALL	HH	HH + HV, VV + VH y HH+HV+ VV+VH	HH o VV HV o VH	HH + HV, VV + VH y HH+HV+ VV+VH
Ángulo de incidencia (grados)	16 – 60	20 – 45	24	24	17 – 60	35	10 – 60	20 – 55	11.8 – 48.6
Resolución (metros)	10 - 100	30	25	25	25	18	3 – 100	10 – 100	10 – 100
Ancho de Swath (Km)	50 – 500	50 – 400	100	100	15 – 40	76	10 – 500	70 – 250	31 – 126
Lanzamiento	1995	1999	1995	1991	1994	1992	2007	2006	2011

Los objetivos principales de las misiones satelitales de radar están generalmente relacionados con el monitoreo de fenómenos y recursos naturales y el manejo de emergencias (derrames de petróleo, inundaciones, erupciones, deslizamientos, movimientos terrestres, otros). Es particularmente importante su aporte en la determinación del contenido de agua en el suelo, vegetación y nieve. En particular, la Argentina participa activamente en este campo, la misión SAOCOM forma parte de una constelación de satélites SIASGE (Proyecto Argentino-Italiano) (<http://www.conae.gov.ar/satelites/saocom.html>) especialmente pensada para el monitoreo de emergencias.

Como se puede observar en la tabla, se han estado obteniendo datos de radares de apertura sintética desde los 90, aunque los primeros han sido limitados en sus características (única polarización y ángulo de incidencia), siendo también por lo tanto limitados sus usos. Como ya se ha señalado en la primera sección de este texto, debido a las dificultades en el uso de este tipo de datos, se hace necesario que los países generadores **faciliten su utilización mediante el desarrollo de procedimientos prácticos transferibles y/o aplicaciones operacionales. La idea principal de este proyecto es poder aportar en esta dirección.**

## RESULTADOS PRELIMINARES Y APORTES DEL GRUPO AL ESTUDIO DEL PROBLEMA EN CUESTIÓN: antecedentes (3 pags)

Nuestra experiencia en el tema propuesto se puede agrupar en tres líneas:

- El estudio del Delta del Río Paraná con datos provistos por la Agencia Espacial Europea (ESA) y la Agencia Espacial Canadiense a través del Centro de Sensores Remotos de Canadá (CCRS) en el marco de anuncios de oportunidad para presentación de proyectos.
- El estudio del mar argentino y las costas en el mismo marco (anuncios de oportunidad de la ESA y el CCRS).
- La incursión en los temas de determinación de humedad del suelo a escala regional a partir de imágenes SAR en el marco de un convenio con CONAE. La tarea principal es analizar cuáles deberían ser las características tecnológicas del SAOCOM para obtener la humedad del suelo con el error establecido por los expertos.

A partir de estos intereses, hicimos un recorrido en:

- bases físicas de la teledetección de radar
- procedimientos de preparación de los datos (preprocesamiento): calibración, reducción de ruido speckle y corrección geométrica
- interpretación y análisis de datos para mapeo de inundaciones, de patrones batimétricos marinos, derrames de petróleo, otros.
- desarrollo de modelos electromagnéticos directos que simulan la interacción entre la onda de radar y el medio
- desarrollo de modelos inversos para la obtención de variables biofísicas.

Todos estos temas con énfasis en hidrología de superficie y aplicaciones marino-costeras

Desde hace aproximadamente un década que el grupo tiene proyectos en temas afines. Los vigentes son:

- “Teledetección satelital de radar: desarrollo de metodologías para la obtención de parámetros de la superficie terrestre”. Proyecto Agencia, PICT 14339, (2005-Junio 2008) (Dir.: H. Karszenbaum).
- “Evaluation of ENVISAT/ASAR alternating polarisation mode for determining the areal extent of standing water, its fluctuations and the related land cover units in the Delta of Parana river, Argentina”, Agencia Espacial Europea, ESA, (2003 - en adelante) (Dir. H Karszenbaum).
- “Polarimetric features of wetland environments”, proyecto aprobado por la Agencia Espacial Canadiense (CSA), se iniciará cuando estén disponibles los datos del sistema Radarsat 2 a lanzarse próximamente (Dir. H Karszenbaum).
- Obtención de propiedades de la superficie terrestre mediante teledetección satelital de radar: aprovechamiento de datos de polarización dual y cuádruple (quadpol) (Dir: H. Karszenbaum) (Convocatoria CONICET 2004, ejecución 2006-2007). PID 6109.
- "Modelos Electromagnéticos de Radar de Apertura Sintética (SAR): su aplicación a la teledetección satelital de cubiertas vegetales". Proyecto UBACyT (2004-en adelante) (Dir: J. Jacobo Berlles).
- “Determinación de Características Ambientales del Golfo San Matías Mediante Información Satelital y Datos de Campañas: Contribución al Manejo de los Recursos Pesqueros”. Proyecto 2005-Junio 2008 (15221) de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica/FONCYT(Dir. D. Gagliardini).
- “Integrated Analysis of Ocean-Coastal-Land Ecosystems by ENVISAT-1 Data for the Characterization of Argentine Coastal Regions” (2000- en adelante) (Dir.: D. A. Gagliardini).
- “Características ambientales de los golfos San Matías y San José mediante datos de campañas oceanográficas e imágenes satelitales: identificación de áreas claves en el desarrollo de procesos biológicos”, Subproyecto Competitivo de Innovación Tecnológica e Investigación Aplicada N° B-C-Del Proyecto GEF Contaminación y Biodiversidad de las Costas (GEF-PNUD ARG B-B-60) dirigido por el Lic. Andrés Rivas (Dr.: D. A. Gagliardini colaborador)

Se señalan a continuación algunos de los logros obtenidos.

### **Delta del Río Paraná – monitoreo de las propiedades biogeofísicas de humedales**

El área correspondiente al Bajo Delta del Río Paraná fue observada por varios sistemas SAR en el marco de los proyectos mencionados. En Parmuchi *et al.* (2002) y Kandus *et al.* (2001), se muestra la utilización de imágenes RADARSAT-1 adquiridas durante el fenómeno del niño de 1998 para analizar el efecto de la inundación sobre la respuesta del radar para distintos tipos de vegetación y mapear áreas inundadas utilizando clasificadores supervisados y no supervisados. Las imágenes fueron tomadas en dos episodios extremos: condiciones de inundación normal de la vegetación e inundación extrema (vegetación cubierta de agua). Sus conclusiones principales fueron que el efecto de una inundación extrema se observa como una disminución en el  $\sigma^0$  de los juncos y la cortadera, y un aumento en el  $\sigma^0$  de los bosques (Parmuchi *et al.*, 2002). En Karszenbaum *et al.* (2000) se compararon 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  $\sigma^0$  HH que en el  $\sigma^0$  VV. En Grings *et al.*, (2005) incorporamos modelos de interacción EM para simular el  $\sigma^0$  de los juncos. Utilizando estos modelos, trabajo de campo simultáneo a las adquisiciones y datos ambientales, logramos explicar 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. En *Grings et al.*, (2004), a los fines de ver las diferencias en la respuesta del radar en banda C y banda L en vistas al SAOCOM, se obtuvieron, mediante simulaciones de un radar de polarización completa, las firmas polarimétricas de los juncos para banda C y banda L. Esto tiene implicancias en la posibilidad de discriminar tipos de vegetación en distintas superficies secas o con agua.

Recientemente, se utilizaron dos versiones del modelo de Transferencia radiativa (TR) (*Grings et al.*, 2006) para interpretar el  $\sigma^0$  HH y VV de los juncos y la cortadera en ocasión de una inundación extraordinaria observada por el sistema ENVISAT/ASAR en el modo APP S1 (*alternating polarization*, ángulo de incidencia medio = 19°). En este trabajo se lograron simular satisfactoriamente los  $\sigma^0$  para ambos tipos de vegetación y para ambas polarizaciones. Además, se logró simular la variación en el  $\sigma^0$  de la vegetación debida a los cambios en la altura del agua debajo de la misma. Este hecho nos indujo a proponer un esquema para estimar la altura del agua debajo de estos tipos de vegetación basado en imágenes SAR *dual polarization* (*Grings et al.*, 2006).

Con el fin de utilizar todo el potencial del sistema ENVISAT ASAR (múltiples polarizaciones y ángulos de incidencia), se introdujeron nuevas modificaciones al modelo de interacción. Para ello, se utilizaron como base adquisiciones ASAR provistas por el proyecto ESA ENVISAT ASAR AO 667. Estas imágenes corresponden al bajo Delta del Río Paraná, y fueron adquiridas durante condiciones ambientales diversas, usando polarizaciones distintas (HH, VV y HV) y ángulos de incidencia distintos. Para explicar el  $\sigma^0$  de la vegetación para todas las polarizaciones, todos los ángulos de incidencia y las diferentes condiciones ambientales, fue necesario refinar el modelo de interacción de la radiación con el juncal. 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 (ángulo entre el junco y la normal al terreno) de los juncos para una condición ambiental dada,
3. Refinar el trabajo de campo, de manera de poder caracterizar estadísticamente las variables de entrada al modelo (altura, radio, densidad de juncos, contenido gravimétrico de agua, densidad de materia seca, distribución angular)

Una vez realizados estos pasos, se simuló el  $\sigma^0$  de los juncales para 13 imágenes distintas observadas con distintas polarizaciones, ángulos de incidencia y correspondientes a distintas condiciones ambientales. Luego, se compararon estas simulaciones con los valores observados en las imágenes SAR (*Grings et al.*, 2007a, aceptado). El resultado de la comparación fue bueno, lo cual implica que el modelo de interacción de los juncos es capaz de reproducir el  $\sigma^0$  de los juncales para un amplio rango de condiciones de observación y ambientales. Esto nos motivo para refinar el algoritmo de obtención de altura del agua debajo de la vegetación (*Grings et al.*, 2006). 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 (error máximo esperado = 40 cm). En este año (2007) se enviaron dos trabajos uno al Environmental Management y el otro al International Journal of Remote Sensing en los cuales se proponen métodos de obtención de altura del agua debajo de la vegetación utilizando modelos electromagnéticos. En estos trabajos se realizan también estimaciones sobre la cantidad de agua almacenada en los humedales. Ambos trabajos están en revisión.

### **Humedad del suelo – estudio de las posibilidades teóricas**

En cuanto a humedad del suelo, hemos generado documentos inéditos como informes de avance del convenio suscripto entre CONAE, CONICET y FCEN (iniciado en Agosto del 2005) (ver listado en referencias del grupo de trabajo) en los cuales analizamos en detalle algunos de los métodos de obtención de humedad del suelo basados en imágenes SAR. Utilizando el método semiempírico de *Oh et al.*, (2004), se evaluaron algunos de los parámetros del SAOCOM. También se implementó en

lenguaje JAVA una solución de primer orden al Integral Equation Method (Fung *et al.*, 1994), un modelo que simula el coeficiente de retrodispersión de un suelo con ciertas características de humedad y rugosidad. En este tema también participaron investigadores del departamento de física de la UBA.

### **Océano – monitoreo de la rugosidad superficial del mar**

En el tema de interacción de las microondas con la superficie del mar; la retrodispersión se produce por interacción de las microondas con la rugosidad de la superficie del mar, la cual es generada por pequeñas olas con longitudes de onda similares al de las microondas incidentes, o sea ondas gravito-capilares del orden de centímetros, denominadas ondas de Bragg. Una mayor presencia y amplitud de estas olas implica más rugosidad, por lo tanto una mayor intensidad de energía retrodispersada. Las ondas de Bragg son detectables normalmente cuando los vientos tienen velocidades superiores a 2-3 m/seg, por debajo de esos valores la retrodispersión es muy baja o nula y las áreas correspondientes en las imágenes se ven oscuras. Por encima de 12 m/seg la retrodispersión es máxima y los sectores afectados, aparecen en las imágenes como zonas muy brillantes y muchos fenómenos superficiales no son observados.

En base a lo expresado en el párrafo anterior se puede decir que todo fenómeno que genera una distribución espacial de la rugosidad superficial del mar con características propias puede ser identificado por las estructuras o patrones observados en la imagen. Fenómenos atmosféricos, tales como frentes de tormentas, celdas de precipitación, ondas gravitatorias y procesos oceanográficos, entre los que se pueden mencionar frentes, remolinos, ondas internas y surgencias, pueden ser identificados y analizados a través de los patrones que generan en las imágenes de radar. También se pueden detectar, por la misma razón, irregularidades del fondo del mar, debido a las modificaciones que producen en la dirección e intensidad de las corrientes de marea. El grupo de trabajo liderado por el Dr. Gagliardini cuenta con numerosas imágenes de radar del mar y las costas argentinas. La interpretación y análisis de estas imágenes permitió la identificación de patrones batimétricos (Gagliardini *et al.*, 2004), la caracterización de la zona de confluencia Malvinas-Brasil mediante imágenes de radar y térmicas (Gagliardini *et al.*, 2001, 2004), la identificación y monitoreo de patrones oceánicos-costeros mediante imágenes ópticas y de radar (Gagliardini y Karszenbaum, 2006).

### **3. OBJETIVOS PROPUESTOS (MAX 2 PGS)**

#### **Objetivos generales e impacto (máx 1 pág)**

El **objetivo general** de nuestra propuesta es desarrollar **métodos prácticos** para la obtención de parámetros biofísicos de interés para aplicaciones en hidrología de superficie y marinas a partir de datos de misiones satelitales activas y pasivas en la región de las microondas del espectro electromagnético.

Los abordajes en teledetección son fundamentalmente interdisciplinarios y la concepción de un **método práctico** implica el desarrollo de métodos físicos, pero también la posibilidad de desarrollar instrumentos que midan las variables de entrada a los métodos físicos, la formulación de modelos de arquitectura de vegetación, la evaluación de errores en la determinación de las variables biofísicas, el alcance espacial de los valores medidos en el terreno y muchos otros temas, es decir, hacer efectivo un enfoque interdisciplinario en la forma de pensar y dar respuesta a problemas como la obtención a escala regional de la humedad del suelo, la rugosidad del mar, el contenido de agua en humedales, y otros.

### Objetivos específicos e hipótesis de trabajo (máx 1 pág)

Los sistemas satelitales activos y pasivos miden el coeficiente de retrodispersión (activo) y la emisividad (pasivo). Se postula que estas dos variables contienen información sobre los objetos de estudio propuestos:

$$\sigma_{pq}^0 = f(\lambda, \theta, V_1, \dots, V_n) \quad (1)$$

$$\varepsilon_q^0 = g(\lambda, \theta, V_1, \dots, V_n) \quad (2)$$

donde,

$\lambda$ : longitud de onda del radar o del radiómetro

$\theta$ : ángulo de incidencia

$p$ : polarización de transmisión

$q$ : polarización en recepción

$V_1, \dots, V_n$ : variables del medio terrestre.

El objetivo central de la teledetección es obtener las variables  $V$ . Para hacerlo, es necesario:

- Desarrollar modelos físicos que permitan describir satisfactoriamente la interacción entre el medio y la onda emitida (pasivo) o retrodispersada (activo). Estos modelos deben tener la capacidad de considerar la variable biofísica de interés y también otras variables que modifiquen la onda emitida (pasivo) o retrodispersada (activo).
- Desarrollar métodos físicos, semi-empíricos o estadísticos que a partir de una observación con ciertas características (polarización y del ángulo de incidencia), determinar qué propiedades del medio generan ese dato observado.
- Desarrollar instrumentos que permitan medir en el campo las variables de entrada a los modelos (por ejemplo propiedades de la vegetación y del suelo) y/o validar los valores de los parámetros biofísicos obtenidos a partir de los datos satelitales (Ej: rugosidad y humedad del suelo).
- Desarrollar procedimientos de preprocesamiento y extracción de información específicos para el aprovechamiento de las mediciones que harán los sistemas satelitales argentinos SAOCOM (activo) y SAC-D (pasivo).

### 4. CONSTRUCCIÓN DE LA HIPÓTESIS Y JUSTIFICACIÓN GENERAL DE LA METODOLOGÍA (MÁX 1 PÁG)

Dentro de los sistemas activos, el radar trasmite un pulso y mide el tiempo y la intensidad del eco reflejado (mediciones de amplitud y fase) donde la relación entre la energía incidente (emitida por el radar) y retrodispersada (captada por el radar) constituye el coeficiente de backscattering (retrodispersión) notado como  $\sigma^0$ , magnitud física que contiene la información sobre el blanco. El comportamiento de la señal de radar está gobernado por las propiedades dieléctricas de suelo y vegetación y por la configuración geométrica de los elementos dispersantes que integran el blanco con respecto a la frecuencia, dirección y polarización de la onda incidente. Esto se expresa a través de mecanismos de interacción señal-blanco característicos.

En las microondas pasivas, la emisión térmica natural de la superficie terrestre se mide utilizando un radiómetro de microondas a bordo de un satélite. La variable física medida es la temperatura de brillo, la cual esta relacionada a través de la temperatura real con la emisividad del medio.

La polarización es una propiedad de las ondas de radar (y de todas las ondas electromagnéticas), que describe la dirección relativa del campo eléctrico en el espacio. Como casos particulares de la

polarización lineal, tenemos la polarización horizontal (H), cuando el vector campo eléctrico es paralelo al plano de tierra, y la polarización vertical (V), cuando dicho vector es perpendicular a la dirección horizontal. Muchos de los terrenos de interés para la teledetección son anisotrópicos, lo cual significa que modifican la polarización de las ondas de radar retrodispersadas.

Para un terreno de estudio dado, se pueden definir una serie de variables de interés que sería interesante conocer desde el punto de vista biológico o ecológico. (Ej. Biomasa, condición de inundación, humedad del suelo, salinidad del mar). Una aplicación es un procedimiento diseñado para obtener una variable biofísica de interés a partir de una medición de un sistema satelital y datos auxiliares de campo.

En el caso de radar, se podría escribir simbólicamente como:

$$V_i = h(\sigma_{pq}^0(\lambda, \theta)) \quad (3)$$

donde  $V_i$  es la variable biofísica de interés elegida y  $\sigma_{pq}^0(\lambda, \theta)$  es el coeficiente de retrodispersión y  $h$  es la función que relaciona los parámetros del radar con la variable biofísica. Para el caso de las microondas pasivas,

$$V_i = j(\epsilon_q^0(\lambda, \theta)) \quad (4)$$

donde  $V_i$  es la variable biofísica de interés elegida y  $\epsilon_q^0(\lambda, \theta)$  es la emisividad y  $j$  es la función que relaciona los parámetros del radar con la variable biofísica.

En teledetección cuantitativa, se trabaja sobre dos enfoques simultáneos y complementarios:

- *Problema directo.* Se trata de describir el medio y determinar qué onda electromagnética se obtendría de ese medio si incidiera un haz de radar (modelo directo).
- *Problema inverso.* Se trata de, a partir de una onda electromagnética (observación) que tiene ciertas propiedades, preguntarse qué medio y qué características del medio generan esas propiedades en la onda (modelo inverso, “retrieval”).

**Hipótesis de trabajo:** La matriz de *scattering*<sup>2</sup> (en el caso del pasivo la emisividad) contiene toda la información que es obtenible de un blanco (emisor en el pasivo) para un ángulo de incidencia y una frecuencia dada. Asimismo, los cambios en el medio terrestre que traen aparejados cambios en las propiedades geométricas o eléctricas de sus componentes, cambian los valores de la matriz de *scattering* (la emisividad) asociada con el medio.

**Se postula entonces:** **a)** que la medición y el análisis de las variaciones de la matriz de *scattering* (la emisividad) medida con un sistema SAR hace posible determinar propiedades biofísicas del blanco y **b)** que debido a la complejidad de la interacción entre las ondas electromagnéticas y los elementos del terreno, la combinación de métodos físicos, observaciones y trabajo de campo es lo que permite extraer información relevante de las mediciones.

---

<sup>2</sup> Nos referimos a coeficiente de retrodispersión cuando se trata de radares de polarización simple y/o dual. Cuando se trata de radares de polarización completa, la magnitud física correspondiente es la matriz de *scattering*. En este escrito, a veces hacemos referencia al coeficiente de retrodispersión y otras a la matriz de *scattering*. Las diferencias son muy importantes, pero no podemos en el marco de este escrito dar los detalles correspondientes.

## 5. TIPO DE DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Y MÉTODOS (MÁX 9 PÁG)

El diseño de esta propuesta de investigación se enmarca en el desarrollo de tres líneas de trabajo: a) bases físico-computacionales, b) trabajo de campo y construcción de instrumentos para mediciones de campo, c) aplicaciones ambientales. A diferencia de proyectos anteriores, este incluye como tema de teledetección no tratado antes las microondas pasivas y como aplicaciones adicionales humedad del suelo y aplicaciones marinas.

Se detallan a continuación.

### 5.1 LINEA 1: Bases físico-computacionales de la teledetección en microondas

*Abarca las siguientes áreas:*

- *desarrollo de modelos de que simulen la interacción entre las ondas electromagnéticas y el medio, capaces de estimar tanto  $\sigma_{pq}^0(\lambda, \theta)$  como  $\epsilon_q^0(\lambda, \theta)$ . Estos modelos estarán basados en la teoría de transferencia radiativa.*
- *desarrollo de técnicas polarimétricas*
- *desarrollo de técnicas interferométricas*
- *desarrollo de algoritmos (modelos inversos) para obtención de variables biofísicas a partir de  $\sigma_{pq}^0(\lambda, \theta)$ , o  $\epsilon_q^0(\lambda, \theta)$  o ambas mediciones en conjunto (sinergia activo/pasivo)*

#### *Fundamentos de la metodología*

1. En este proyecto, la modelización del coeficiente de *backscattering* (magnitud que mide el radar) de los elementos del terreno se basará en primera aproximación en la teoría de transferencia radiativa (TR). Las propiedades de los centros dispersores dentro del medio (elementos del terreno) se caracterizan por parámetros electromagnéticos: la sección eficaz de extinción y la sección eficaz de *scattering* biestática. Para calcular estos parámetros, se implementarán soluciones de TR utilizando algoritmos numéricos, y después, utilizando la técnica de *Matrix Doubling* (Bracaglia *et al.*, 1995), se combinarán las distintas contribuciones de la vegetación y del suelo a fin de obtener el coeficiente de retrodispersión total  $\sigma^0$  simulado para cada polarización. Así, se simulará la matriz de *scattering* completa. Los modelos permitirán, de este modo, identificar cuáles son las condiciones de los elementos del terreno que dieron como resultado el valor medido por el sistema satelital de radar.
2. Ya existe un considerable trabajo realizado por el grupo de teledetección del IAFE en la modelización del *backscattering* de la vegetación en humedales y el suelo de agricultura utilizando modelos electromagnéticos (problema directo). En este tema se centra la tesis de doctorado de Francisco Grings (ver Antecedentes) y la mayoría de los artículos publicados durante la misma. Por lo tanto, en este proyecto, **el énfasis estará puesto en el desarrollo de propuestas para la solución del problema inverso.**
3. En general, los problemas inversos son problemas mal condicionados, lo cual implica que sus soluciones no cumplen con alguna de estas tres características: existencia, unicidad y estabilidad. Por lo tanto, no existe una teoría general de los problemas inversos, aunque si existen enfoques adecuados para sistemas lineales (Euler-Lagrange) y toda una batería de soluciones específicas para problemas particulares. Entre ellas, podemos mencionar, la inversión numérica, la inversión estadística (métodos de máxima verosimilitud) y técnicas avanzadas de *data mining*.
4. En lo que se refiere específicamente al radar, existe una metodología de inversión característica de los sistemas polarimétricos, desarrollada inicialmente por Claude y Pottier (1996) y ahora ampliamente extendida. Estas técnicas se denominan *Target Decomposition* (descomposición del blanco), y se basan en descomponer la matriz de *scattering* de un blanco en matrices de *scattering* de mecanismos de interacción conocidos (descomposición de Pauli) o más recientemente, en obtener de la matriz de *scattering* de un blanco, magnitudes que identifiquen el mecanismo de interacción (Cloude y Pottier, 1997; Hajnsek, 2001).
5. Las técnicas interferométricas son aquéllas que permiten obtener la posición de un dispersor en la cordenada  $z$  (altura), utilizando dos imágenes SAR complejas adquiridas en una

configuración particular. Esta técnica tiene una gran potencialidad, ya que permite la generación de modelos topográficos del terreno con resolución espacial del tamaño del píxel y una resolución en  $z$  del orden de la decena de centímetros, todo esto desde una plataforma orbital. Asimismo, esta técnica puede utilizarse para generar mapas de altura del agua en humedales donde existan dispersores permanentes (Wdowinski et al., 2004).

6. Los radiómetros pasivos son sistemas que miden la energía emitida por el medio terrestre en la región de las microondas. Al igual que en el radar, esta energía está relacionada con la constante dieléctrica y con la geometría del blanco (o más precisamente, emisor). Entre las aplicaciones desarrolladas a partir de radiómetros pasivos, se encuentra la obtención de la humedad del suelo y el monitoreo de la salinidad del océano. En la actualidad, existen varios radiómetros pasivos operacionales (AMSR-E y otros), los cuales generan imágenes sobre toda la superficie terrestre. Muchas de estas imágenes pueden obtenerse gratuitamente de las agencias espaciales. Sin embargo, al igual que en el radar, es muy difícil relacionar los cambios en la energía emitida con el cambio de alguna variable biofísica característica del emisor. Para resolver este problema, también fueron introducidos modelos basados en TR para simular la emisividad de un medio terrestre (suelo y vegetación) (Ferrazzoli y Guerreiro, 1996). Estos modelos son conceptualmente muy similares a los modelos para el radar, y están a disposición del grupo de teledetección del IAFE. Por lo tanto, se procederá a la puesta en marcha de estos modelos, y a la comparación preliminar con imágenes de radiómetros de microondas orbitales.

## **5.2 LINEA 2: Trabajo de campo y desarrollo y construcción de instrumentos para el trabajo de campo**

### **En el marco de los objetivos de esta propuesta, bajo esta línea nos proponemos:**

Diseñar el trabajo de campo e instrumentos que permitan medir variables del terreno *in situ* a fin de alimentar y validar los modelos físicos y determinar así cómo las características del terreno están afectando la señal medida por el radar y/o el radiómetro, la sensibilidad del instrumento de medición y los errores esperables en la determinación de la variable biofísica.

### **Protocolos de campo**

#### **Objetivo/s y tareas a los que debe responder el protocolo de campo a implementarse en el caso de humedad del suelo:**

Teniendo en cuenta la hipótesis de base de que tanto en la matriz de *scattering* (activo) como en la emisividad (pasivo) influyen las propiedades estructurales y dieléctricas del terreno, para poder separar la contribución de la rugosidad y de la humedad, se hace necesario:

- Cuantificar el contenido de humedad superficial del suelo (“contenido hídrico”) para interpretar las observaciones satelitales y contar con datos de entrada para los modelos de simulación.
- Conocer la variación del contenido hídrico bajo diferentes condiciones de cobertura (suelo desnudo, rastrojo, maleza, cultivo).
- Conocer la variación del contenido hídrico bajo diferentes condiciones de relieve.
- Identificar la variabilidad espacial.
- Cuantificar los parámetros que caracterizan la rugosidad del terreno, y su variabilidad espacial y temporal.

(ver en cronograma de actividades, las tareas y responsables)

#### **Objetivo/s y tareas a los que debe responder el protocolo de campo a implementarse en el caso de la determinación de altura del agua en la planicie de inundación:**

Teniendo en cuenta la hipótesis de base de que la matriz de *scattering* da cuenta de la interacción de la señal con los elementos del terreno (suelo y vegetación) para estimar la altura del agua debajo de la vegetación es necesario:

- Medir los parámetros biogeofísicos de la vegetación presente en áreas de la planicie de inundación del Paraná y cualquier otra variable estructural que pueda influir en la respuesta del SAR (por ejemplo distribución angular de las hojas, contenido de agua en la hoja, otros).
- Hacer análisis estadísticos para determinar sus distribuciones y la variación espacial y temporal de las mismas.
- Medir la altura del agua debajo de la vegetación en islas donde sea posible acceder y colocar los medidores.
- Implementar protocolos que permitan evaluar la variabilidad de las mediciones locales y el alcance espacial.

(ver en cronograma de actividades, las tareas y responsables)

## **Construcción de instrumentos**

### **a. Medidor de altura del agua en la planicie de inundación**

Siendo nuestra área de interés la medición remota de altura de agua en distintas regiones del Delta del Río Paraná, nos es preciso corroborar los datos que interpretamos de imágenes de radar con medidas reales de altura de agua tomadas *in-situ*. Este proceso presenta varias dificultades entre las que se encuentra la frecuencia relativamente alta de mediciones necesarias para seguir el comportamiento de la marea (aprox. 3 por hora), la situación de anegamiento en la que muchas veces se encuentran los puntos de interés y la independencia entre los distintos niveles de agua de humedales vecinos (no son vasos comunicantes entre sí).

#### **Descripción**

El instrumento consiste de un tubo plástico de 2 metros de largo que es fijado sobre un parche de vegetación. En el extremo superior se coloca la electrónica asociada, en donde se genera, a través de un oscilador, una frecuencia de aproximadamente 40 Khz. (ultrasonido) que luego es amplificada y emitida en forma de ultrasonido por un transductor hacia abajo en el tubo. Un reloj interno mide el tiempo de vuelo de la onda que rebota sobre la superficie del agua y vuelve al transductor. Este último valor de tiempo se convierte en una medición de distancia y se guarda en una memoria no volátil que permite conservar los datos hasta el momento de transferirlo a una PC / Portátil a través de un cable.

#### **Desarrollo**

El trabajo se puede dividir en 3 tareas:

- Mecánica del instrumento (selección del soporte físico, impermeabilizar la electrónica, sujeción al fondo, etc.)
- Desarrollo de la electrónica “inteligente” del medidor de distancias, con la posibilidad de variar la forma de onda emitida y su frecuencia. Es preciso también, tener en cuenta los cambios que se producen en la velocidad del sonido por cambios en humedad y temperatura. Esto obliga a la elaboración de un procedimiento de calibración automático y periódico del instrumento.
- Desarrollo de una interfaz para la comunicación del instrumento (cable, infrarrojo) teniendo en cuenta que el aparato sufrirá un constante daño al encontrarse a la intemperie.
- Optimización del desarrollo para hacerlo confiable y robusto, con el objetivo de construir un número grande de unidades.

### **b. Medidor de rugosidad de la superficie: Rugosímetro**

La respuesta al radar del suelo desnudo está influenciada por su humedad y rugosidad. Nuestro interés es obtener humedad del suelo. La rugosidad constituye una incógnita del modelo inverso y necesitamos tener una medición precisa de ella. Un método de parametrización de la rugosidad del

suelo es a través de su altura RMS (varianza del suelo) y de su longitud de correlación, ambos potencialmente obtenibles partiendo de un perfil digital del terreno.

Existen opciones tecnológicamente muy avanzadas por las que se pueden obtener mediciones a escalas nanométricas del perfil del terreno, basadas en tiempo de vuelo de un pulso láser emitido o basadas en interferometría láser. Ambas opciones son extremadamente caras y sobrepasan nuestra necesidad en términos de resolución espacial.

### **Descripción**

Se propone la utilización de un láser que proyecta una línea sobre el terreno del que se quiere obtener el perfil. Esta línea proyectada presenta una deformación que se registra con una cámara digital colocada a una distancia precisa del emisor del haz. Teniendo en cuenta dicha distancia y el ángulo de emisión del láser se puede procesar en la computadora los puntos tridimensionales que corresponden a cada píxel en la imagen adquirida de una forma similar a la triangulación. Este procedimiento se repite varias veces a lo largo de un trayecto (50 cm. ~ 1 m.) con el propósito de obtener el relieve de la superficie.

### **Desarrollo**

La construcción implica la realización de un soporte para el sistema, el diseño de un circuito que controle los motores que varían el ángulo de “visión”, un sistema eficiente de alimentación y la construcción de una interfase con la computadora. Con respecto al software, se necesita implementar una solución al problema de triangulación de puntos sobre imágenes adquiridas a través de la cámara y su posterior procesamiento para generar el relieve.

**5.3 LINEA 3: Aplicación de la teledetección en microondas a hidrología de superficie y propiedades del mar (rugosidad, salinidad): a)** Combinación de observaciones (satelitales y de campo) y modelos, **b)** Obtención de parámetros biofísicos (solución del problema inverso)

#### **5.3.1. Planicie de inundación del Delta del Paraná: estudio de la capacidad de almacenamiento de agua dulce y su variabilidad**

##### **Planteo del problema**

- Debido a los bienes y servicios que aportan los humedales, este tema es de interés global. En el continente sudamericano estos sistemas ocupan una enorme superficie en comparación con otras regiones del globo, y en Argentina involucran cerca del 23% del territorio (*Kandus et al, 2007, en prensa*). La mayoría de los grandes humedales en el continente conforman *macrosistemas* de expresión subregional o transregional asociados a las planicies de inundación de los grandes ríos como el Orinoco, el Amazonas y el Paraná en Argentina. El área y permanencia de estos humedales dependen del agua en superficie y las características de su hidoperíodo (ciclos inundación-estiaje) los que determinan sus propiedades y funciones ecológicas y productivas (*Neiff y Malvárez, 2004*). En el caso del Paraná el comportamiento del agua está forzado por eventos de variabilidad interanual (ENSO) y por los cambios climáticos pronosticados. Por lo tanto, monitorear el agua almacenada en la planicie de inundación es de alto interés. Un escenario de particular interés en este sentido lo conforma la región del Delta del Río Paraná, dada su localización en la porción final de la cuenca del plata y su vecindad con el principal cordón productivo industrial del país.
- Sin embargo, no existen instrumentos de medición de la altura del agua ubicados en la planicie de inundación. La descarga de agua se mide en los canales principales donde el flujo está confinado en cambio en las planicies de inundación el flujo de agua no está delimitado. Las islas que forman la planicie de inundación del Bajo Delta tienen una estructura básica de olla, varían en profundidad, forma y vegetación presente (*Kandus et al., 2003*). Por lo tanto es difícil medir altura del agua mediante procedimientos convencionales. Los sistemas de radar han demostrado ser la única herramienta que tiene la capacidad potencial de monitorear de manera sistemática el agua en los humedales a nivel regional (*Bach y Mauser, 2003*).

- Si bien se acepta que el enfoque mediante teledetección satelital es el único método capaz de monitorear el nivel del agua en grandes humedales, existe aún discusión acerca de cuál es la técnica a utilizarse (altimetría, interferometría, otros). Cada propuesta tecnológica tiene sus *pro* y sus *con*. Esto está discutido en detalle en Grings et al., (2007, en prensa).
- La técnica propuesta en este proyecto (Grings et al., 2006) consiste en caracterizar los parámetros de la vegetación herbácea de la zona a partir de trabajo de campo, medir o modelar la variación temporal de estos parámetros, utilizar un modelo de interacción *em* para simular la respuesta del radar de la vegetación y combinar simulaciones y observaciones satelitales y de campo para producir un esquema de obtención de la altura del agua para cada tipo de vegetación.

### **Cómo se obtiene la altura del agua debajo de la vegetación usando un radar satelital?**

- Los cambios en  $\sigma^0$  (magnitud física que mide el radar) pueden relacionarse con cambios en distintas variables ambientales. En nuestro caso, cambios importantes en  $\sigma^0$  de *junco* y *cortadera* pueden relacionarse con el nivel del agua, la geometría de la planta, el arreglo espacial, y el contenido de agua en la planta misma. Otras variables de menor importancia pero que también afectan la respuesta del radar son el viento (modifica la estructura de la planta), la condición de salinidad de la planta y la vegetación flotante. Por lo tanto, un modelo de interacción que simule el  $\sigma^0$  de la vegetación dadas ciertas condiciones ambientales, requiere también tener la capacidad de pesar cada variable ambiental en el  $\sigma^0$  total obtenido.
- La técnica de monitoreo de altura del agua propuesta aquí requiere modelar y explicar los efectos de los eventos de inundación en el área considerada. Para esto, se utiliza un modelo electromagnético desarrollado por la Universidad de Tor Vergata (Bracaglia et al., 1995) y mejorado y adaptado por nosotros a las condiciones del Delta del Río Paraná (tipo de vegetación). En su versión general el modelo describe el suelo como un semi-espacio homogéneo con una interfaz rugosa y la vegetación como un conjunto discreto de elementos dieléctricos. Se utilizan cuerpos canónicos como cilindros y discos.
- Para simular correctamente el evento de inundación, necesitamos especificar como un aumento en la altura del agua afecta las variables de entrada al modelo (parámetros de la vegetación). El efecto es diferente según se trate de *junco* o *cortadera*. En el caso de *cortadera*, nuestra hipótesis es que los cambios observados en  $\sigma^0$  debido a cambios en la altura del agua se relacionan con una reducción en la cantidad de biomasa emergente. Esto se expresa como una reducción del LAI emergente. Entonces es posible escribir la altura del agua  $x$  con el LAI:

$$x = \left(1 - \frac{\text{LAI}}{\text{LAI}_{\text{Max}}}\right) h_c, \text{ donde } h_c \text{ es la altura de la } \textit{cortadera}. \text{ Como la altura de la } \textit{cortadera}$$

se asume constante, es posible relacionar el LAI emergente con la altura del agua. En el caso del *junco*, el aumento observado en los valores de  $\sigma^0$  se relaciona con una reducción de la altura de la planta causada por el aumento en la altura del agua. Si el agua cubriese la planta, la respuesta del radar disminuiría hasta casi ser despreciable (reflexión especular). Esto nos permite evaluar por los menos tres escenarios: unos cm de agua, aumento del agua (1 metro) y la vegetación cubierta por agua. En este caso, el nivel del agua ( $x$ ) se relaciona con la altura de los juncos de una manera simple:  $x = h_{\text{Max}} - h_j$ , donde  $h_j$  es la altura emergente del junco y  $h_{\text{Max}}$  es la altura total.

- El esquema de obtención del agua debajo de la vegetación se basa en minimizar la función de costo  $CF = \sum_{m=1}^{Ms} \sum_{p=1}^2 [\sigma_{ppS}^0(WL) - \sigma_{ppEm}^0]^2$ , donde  $\sigma_{ppS}^0(WL)$  es el coeficiente de backscattering simulado en la polarización *pp* para altura del agua  $WL$ ,  $\sigma_{ppEm}^0$  es el coeficiente de backscattering en la misma polarización pero observado por el radar y  $Ms$  es la cantidad de parcelas de vegetación en el sitio.
- Una vez obtenida la altura del agua debajo de la vegetación, es posible obtener el volumen de agua (considerando distintas hipótesis respecto de la condición de la vegetación y la batimetría

de las islas, Grings et al., 2007b, en prensa) como  $V = Ah$ , donde  $V$  es el volumen,  $A$  el área de la isla y  $h$  la altura del agua. Haciendo propagación de errores, es posible determinar el error en esta determinación.

#### **¿Cuáles son algunos de los problemas abiertos?**

- La estimación del volumen de agua (capacidad de carga) de un parche del humedal se hace considerando que las islas no tienen topografía. Esto no es cierto en general, y esta suposición introduce errores importantes en la estimación del volumen.
- Todavía está en discusión cuál es un error aceptable en la estimación de la capacidad de carga de un humedal. Que un error sea aceptable o no, depende de para qué se desea utilizar el dato obtenido.
- El método propuesto puede ser refinado, desarrollando un modelo de interacción que simule el  $\sigma^0$  para todos los ángulos de incidencia del sistema ENVISAT ASAR y la polarización cruzada. Esta información adicional mejoraría el error en la estimación de la capacidad de carga.

#### **¿Con qué contamos?**

- El grupo ha estado trabajando los últimos años en este tema, hay dos candidatos a doctorado en Física y en Biología trabajando conjuntamente con profesionales reconocidos del IAFE y de la FCEyN de la UBA (investigadores responsables de este proyecto). Ya se han publicado varios trabajos y hemos sido invitados a presentaciones en ámbitos específicos. También contamos con la colaboración del Dr. Ferrazzoli.
- Asimismo tenemos disponibilidad de datos satelitales de radar del proyecto Envisat ASAR 0667 oportunamente aprobado por la ESA. Canadá lanzará en los próximos meses un satélite de radar avanzado y ya tenemos un proyecto aprobado por la Agencia Espacial Canadiense que nos va a brindar los datos para este tema en particular (ver proyectos en Antecedentes).
- Esta línea es de importancia estratégica en el país, conocer los recursos de agua dulce en extensión y en volumen, evaluar su variabilidad. Debido a esto, instituciones como el INA y el INTA están interesadas en nuestros desarrollos. Asimismo CONAE está trabajando en un radar banda L que brindará mejores datos que los actuales por su capacidad de penetrar la vegetación.

### **5.3.2. Humedad y rugosidad del suelo (Activo)**

#### **Planteo del problema:**

Durante la última década se produjo en nuestro país, una importantísima expansión e intensificación de la actividad agrícola de la mano de un cambio tecnológico sustancial en la forma en que se da esta práctica. Este cambio tecnológico lleva al reemplazo de la *agricultura tradicional* por un nuevo modelo que involucra entre otros la llamada *siembra directa*.

Con la denominada *labranza cero o siembra directa*, los agricultores dejan los restos de los cultivos en la tierra después de la cosecha, en vez de ararlos o quemarlos. Siembran nuevos cultivos con aperos especialmente diseñados, que introducen las semillas, por un hueco abierto en el suelo conjuntamente con una batería de agroquímicos, por debajo de la capa protectora de materia orgánica formada de residuos en descomposición.

Las parcelas agrícolas en los tiempos entre cultivos, entonces, cambian rotundamente su fisonomía. Una gran proporción de las parcelas agrícolas se encuentra bajo esta nueva práctica y en aumento, con lo cual ya no se espera encontrar parcelas con suelo desnudo sino más bien con una cubierta poco homogénea de materia muerta en pie o caída y materia viva fotosintética (malezas) que crecen en forma relativamente inmediata luego de las cosechas. Esto hace que, las predicciones sobre las potenciales mediciones con radar de humedad del suelo, obtenidas a partir de la formulación de modelos que parten de la condición de suelo desnudo, ya no sean tan realistas.

Varios factores deben ser tenidos en cuenta a la hora de describir estas nuevas situaciones:

- El atteronamiento del suelo es variable, según el sistema de cultivo empleado (*siembra directa o labranza convencional*). A su vez, las características particulares del suelo, en términos de su textura, contenido de materia orgánica, estructura, etc. también condicionan el grado de atteronamiento de un suelo.
- Los sistemas de cultivo convencionales pueden dejar diferentes tipos de atteronamiento, variando, según la herramienta utilizada y la frecuencia de utilización de la misma, el tipo de suelo y estado físico del mismo.
- El suelo puede expresar síntomas de degradación física, que modifican el color del suelo y la porosidad superficial del mismo.

En el caso de la *siembra directa*:

- Luego de las cosechas el suelo queda cubierto por plantas fotosintéticamente activas (vivas) o materia muerta (rastrajo).

### ¿Cómo se obtiene humedad del suelo a partir de la matriz de scattering de un sistema SAR?

La reflectividad de una superficie ante una onda EM incidente depende de sus características (constante dieléctrica y rugosidad), de las propiedades del sistema (frecuencia y polarización) y de las condiciones en las que opera (ángulo de incidencia).

El *scattering* de superficies depende, entre otras cosas, de la constante dieléctrica de la superficie. Como esta constante para agua es diez veces mayor que para el suelo seco (en las longitudes de onda de las microondas), la presencia de agua en los primeros centímetros de un suelo desnudo influirá significativamente en la medición del radar.

Como un suelo húmedo es una mezcla compleja de partículas del suelo, agua líquida y aire, cada uno de estos elementos con su propia constante dieléctrica, la obtención de la constante dieléctrica de un suelo húmedo no es un tema trivial. Existen varios modelos empíricos, semiempíricos y basados en procesos físicos que permiten obtener la constante dieléctrica promedio.

La medición realizada por el radar también depende de la rugosidad del suelo, por eso los modelos directos de suelos incluyen consideraciones sobre la rugosidad a partir de parámetros característicos tales como la longitud de correlación  $l$  y la altura  $rms$   $s$ . La altura  $rms$  y la longitud de correlación se calculan a partir de una discretización de la variable  $z_i$ , con  $i = 1, \dots, n$  de un perfil unidimensional  $z$  como:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1}}$$

$$\rho(j) = \frac{\sum_{i=1}^{N-j} z_i z_{j+i}}{\sum_{i=1}^N z_i^2} \quad \rightarrow \quad \rho(l) = \frac{1}{e}$$

con  $j = 0, \dots, n-1$ . La longitud de correlación  $l$  esta definida como la distancia a la cual la función de autocorrelación  $\rho(j)$  es  $1/e$ .

### Modelos para calcular la constante dieléctrica del suelo

Se han propuesto varios modelos destinados a calcular la constante dieléctrica del suelo. La mayor parte de estos modelos adoptan la fórmula de semiempírica propuesta por *Dobson et al.*, (1985) y refinada por *Ulaby et al.* (1986, Apéndice E) o la fórmula empírica derivada por *Hallikainen et*

al.,(1985). Esta última expresa la parte real e imaginaria de la constante dieléctrica relativa  $\epsilon$  como un polinomio de segundo orden, función del contenido volumétrico de humedad del suelo ( $Mv$ ) para una temperatura del suelo de  $22C^{\circ} \pm 2C^{\circ}$ . Los coeficientes del polinomio dependen de la textura del suelo (ej. el porcentaje de arcilla y arena) y de la frecuencia de la radiación electromagnética, que esta restringida al rango 1.4-18 GHz. En *Satalino et al.*(2002), el efecto de la variabilidad de la textura del suelo en la constante dieléctrica y por ende, en el *backscatter* del suelo, se cuantifica aproximadamente en  $\pm 1dB$  para banda C. La dependencia de  $\epsilon$  con la temperatura y la salinidad del suelo a 10 GHz están tratadas exhaustivamente en (*Ulaby et al., 1986, Apéndice E*).

Una limitación práctica de los mencionados enfoques empíricos o semiempíricos es que describen suelos homogéneos. Sin embargo, los suelos agrícolas suelen presentar condiciones heterogéneas, y están a menudo compuestos por capas verticales con diferente contenido de humedad.

### **Modelos directos para calcular el scattering del suelo**

El *scattering EM* de superficies dieléctricas rugosas ha sido objeto de estudios intensivos durante varias décadas. Muchas mediciones se han llevado a cabo a fin de poder predecir e interpretar datos experimentales. A pesar de este esfuerzo, la solución general al problema de *scattering* de superficies no está resuelto de forma completa de manera analítica. Los enfoques que se describen a continuación pueden categorizarse como soluciones aproximadas.

El suelo se caracteriza por un semi-espacio homogéneo, y por lo tanto, sólo es necesario calcular el *scattering* ascendente. Los modelos de vegetación simples de primer orden, incluyen, por ejemplo, para un árbol, el *backscattering* del dosel, de los troncos y del suelo. En el caso del suelo, se requiere sólo el *backscattering* del suelo mismo (para calcular la respuesta directa del suelo) y el coeficiente de reflexión especular (para calcular las interacciones de doble rebote). Los modelos más avanzados de vegetación que toman en cuenta efectos de orden dos y más grandes (correspondientes a interacciones más complejas), requieren el coeficiente de *scattering* biestático del suelo en todo el semi-espacio superior.

Para el *backscattering*, la altura *rms s* de la superficie y su longitud de correlación *l* son necesarias como entrada. Dos teorías clásicas, basadas en las aproximaciones de perturbaciones (*Small Perturbations*) y de óptica geométrica (*Geometrical Optics*), son válidas en los límites de baja frecuencia y de alta frecuencia, respectivamente (*Ulaby et al., 1986*). Para salvar el *gap* de frecuencias y para mejorar la incerteza general, *Fung* (*Fung et al., 1994*) desarrolló el enfoque *Integral Equation Method* (IEM), tanto la versión monostática como la versión biestática.

Para estimar el *scattering* de superficies, casi todos los enfoques teóricos asumen que los valores de altura de la superficie se pueden representar como un proceso estocástico con altura media cero  $z=z(x,y)$  que sirve de interfase entre dos medios homogéneos caracterizados por su constante dieléctrica  $\epsilon$ . El proceso  $z=z(x,y)$  se supone generalmente como un proceso aleatorio gaussiano estacionario descrito por una función de autocorrelación (ACF), una altura *rms s* de la superficie y una longitud de correlación *l*.

Cuando una onda electromagnética choca con una de estas superficies rugosas aleatorias, el campo electromagnético se dispersará en todas las direcciones. Para cada dirección, el campo dispersado será una variable aleatoria caracterizada por sus momentos estadísticos. Para obtener la expresión exacta del campo dispersado como una función de la dirección de observación, es necesario resolver el sistema de ecuaciones diferenciales de Maxwell acopladas con las condiciones de contorno de la superficie. Desgraciadamente, esta solución exacta generalmente no está disponible en una forma cerrada y analítica, pero a menudo se da como una ecuación integral (*De Santo y Wombell, 1991*). Entonces, el *scattering* electromagnético de superficies rugosas aleatorias se puede obtener como una solución numérica o como una solución aproximada.

Además de los enfoques teóricos (numéricos o analíticos) existen modelos de *scattering* semi-empíricos que asumen una dependencia sencilla entre el *backscattering* y los parámetros de la superficie. Los más conocidos son el modelo de *Oh et al., (2004)* y el modelo de *Dubois et al., (1995)*. La dependencia funcional entre  $\sigma^0$  y los parámetros de la superficie se deriva de consideraciones físicas. Sin embargo, los valores de los parámetros libres que forman parte de la relación funcional, se ajustan mediante un conjunto experimental de datos.

### **Modelos inversos para la extracción de humedad del suelo**

Si bien la gama de modelos inversos es mucho menor a la de modelos directos, existen algunos enfoques para la solución del problema inverso:

- Inversión directa de modelos semi-empíricos como el de *Dubois et al., (1995)*. Las relaciones empíricas están validadas sobre un conjunto limitado de datos y no siempre son válidos en condiciones operacionales o diferentes contextos ambientales.
- Inversión directa de modelos semi-empíricos basados en modelos físicos (*Oh et al., 2004*). Este enfoque presenta una validez más general con respecto al anterior.
- Inversión numérica. Se trata de la inversión multi-variable de modelos físicos. Los modelos físicos representan un proceso de *scattering* en el cual  $\sigma^0$  (coeficiente de *backscattering*) dependen de varias variables del suelo y de la vegetación. Desde un punto de vista puramente matemático, el problema inverso se puede resolver si el sitio se observa con el radar en distintas configuraciones de modo de obtener tantos valores de  $\sigma^0$  como variables a obtener. La complejidad matemática del problema se puede abordar mediante algoritmos numéricos. Sin embargo las inexactitudes aunque sean pequeñas del modelo directo pueden producir efectos negativos en las soluciones.
- Inversión utilizando métodos estadísticos basados en argumentos bayesianos, *Haddad et al., 1996*.
- Inversión basada en técnicas polarimétricas. Una de las principales ventajas de las técnicas polarimétricas es su capacidad comparativa a la hora de separar las contribuciones de *scattering* de distinta naturaleza. Una de las técnicas más utilizadas para extraer información es la descomposición del blanco o “Target Decomposition” (TD, en inglés) (*Hajnsek et al. 2003*).

### **¿Cuáles son algunos de los problemas abiertos?**

- ¿Qué efecto tiene en la señal retro-dispersada, las características del residuo: contenido de humedad, tipo y cantidad, dirección del arado?
- ¿Puede la cobertura de rastrojo afectar la sensibilidad del radar a la humedad del suelo?
- ¿Qué configuraciones del sensor, frecuencia, polarización, y ángulo de incidencia, proporcionan la mayor sensibilidad a las características del rastrojo?
- La posibilidad de medir y parametrizar de modo realista los factores de perturbación: rugosidad, vegetación.
- La alta frecuencia temporal requerida y la baja frecuencia temporal de los sistemas satelitales que hace que sea necesario utilizar distintos ángulos de incidencia con las implicancias para la interpretación y el desarrollo del modelo inverso.
- La falta de modelos adecuados para aprovechamiento de la polarización cruzada y la fase.
- Las propias limitaciones de los sistemas satelitales de radar en cuanto a la relación señal/ruido.

### **¿Con qué contamos?**

- El grupo ha estado trabajando el último año en este tema en virtud del convenio CONAE-CONICET-FCEN. La colaboración de expertos en suelos y en muestreo, y la del Dr. Ferrazzoli experto en el tema de humedad del suelo y microondas.
- Vamos a contar con datos del sistema Envisat ASAR y Radarsat II.
- Planteamos la construcción de instrumento que mida rugosidad

- Esta también es una línea de importancia estratégica en el país. Contamos con el apoyo e interés de INTA y CONAE que está trabajando en un radar banda L el cual brindará mejores datos que los actuales por su capacidad de penetrar la vegetación.

### 5.3.3 Humedad del suelo - escala continental/global Sistemas pasivos

Aquí también, el fundamento físico de los métodos de medida del contenido de humedad del suelo mediante técnicas de microondas se basa en el valor elevado (aprox. 80) que presenta la constante dieléctrica del agua frente a los valores de este parámetro en suelos secos (aprox. 4).

- Las ecuaciones de reflexión de Fresnel (Ulaby *et al.*, 1986) predicen los coeficientes de reflexión de la superficie  $R_0^p$  como función de la constante dieléctrica ( $\epsilon$ ) y el ángulo de observación del sistema ( $\theta$ ), según la polarización del sensor,

$$R_0^H = \left| \frac{\cos \theta - (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}}{\cos \theta + (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} \right|^2 \quad R_0^V = \left| \frac{\epsilon_r \cos \theta - (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}}{\epsilon_r \cos \theta + (\epsilon_r - \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}}} \right|^2$$

- Sobre la base de la constante dieléctrica obtenida de las ecuaciones de Fresnel e información de textura del suelo, se puede estimar la humedad volumétrica del suelo (*Hallikainen et al. 1985*).
- En las frecuencias de las microondas, la ley de Planck puede aproximarse por la de Rayleigh-Jeans donde la temperatura de brillo observada  $T_B$  y las radiancias medidas son directamente proporcionales.
- Por otro lado  $T_B = \epsilon T_s$  donde  $T_s$  es la temperatura de la superficie y  $\epsilon$  es la emisividad de la superficie. Por la ley de conservación de la energía, en las longitudes de onda de las microondas, la emisividad observada es igual a 1 menos reflectividad. Esta última magnitud es la que provee, utilizando las ecuaciones de Fresnel, el enlace con la constante dieléctrica y la humedad del suelo.

#### ***¿Cómo se obtiene humedad del suelo a partir de temperaturas de brillo obtenidas por un radiómetro en microondas pasivas a bordo de un satélite?***

Lo que vimos hasta ahora son los principios físicos de manera esquemática y simplificada. A los fines de obtener humedad del suelo es necesario tener en cuenta su rugosidad y la vegetación presente. Entonces en el desarrollo del procedimiento para obtener humedad del suelo nos preguntamos cómo influyen la rugosidad y la vegetación en la emisividad medida y cómo separar de la emisividad medida, la componente que nos permitiría obtener la humedad.

Se describen a continuación algunos enfoques:

- La relación básica entre  $T_B$  y la humedad del suelo está dada por  $T_B = f(\theta, p, SMC, F_1, F_2, \dots)$  donde  $\theta$  es el ángulo de observación y  $p$  la polarización del instrumento,  $SMC$  la humedad del suelo (sigla en inglés Soil Moisture Content) y  $F_1, F_2, \dots$  son los factores de perturbación.
- La temperatura de brillo expresada en términos de reflectividad viene dada por  $T_B = (1 - \Gamma_c - \Gamma_d) T_s$ , donde  $\Gamma_c$  es la componente especular (relacionada con la permitividad del suelo a través de las ecuaciones de Fresnel) y  $\Gamma_d$  es la componente difusa. Estas dos componentes se ven modificadas según la rugosidad del suelo y la vegetación presente (factores de perturbación).
- Enfoques semiempíricos resuelven este problema expresando la reflectividad del suelo como:  $\Gamma_s(\theta, p) = [(1 - Q)\Gamma_c(\theta, p) + Q\Gamma_c(\theta, q)] \exp[-h \cos^n(\theta)]$ , donde  $Q$ ,  $h$  y  $n$  se ajustan

con datos experimentales dando cuenta de los efectos de rugosidad, de la componente difusa y de la vegetación.

- Existen también modelos físicos que calculan la componente difusa como el IEM (ya mencionado en el caso activo)

#### *Cuáles son algunos de los problemas abiertos?*

- Los parámetros de ajuste  $Q$ ,  $h$ ,  $n$  no están validados suficientemente y dependen del sitio.
- Puesto que  $T_B = (1 - \Gamma_s)T_s$ , se debe conocer a priori la temperatura del suelo  $T_s$  (es decir con un procedimiento o instrumento independiente) a fin de obtener  $\Gamma_s$ .
- La vegetación atenúa la emisión del suelo y produce su propia emisión. Modelar los efectos de la vegetación implica conocer las características estructurales y dieléctricas de la misma y contar con un modelo que permita evaluar su aporte en  $\Gamma_s$ .
- El píxel de estos sistemas es de alrededor de 30 km (por eso la escala de trabajo) pero ya existen grupos trabajando en lo que se llaman “algoritmos de desagregación” para poder contar con una grilla de datos de mayor resolución espacial.

#### *Con qué contamos?*

- Con los modelos de Transferencia Radiativa desarrollados por el grupo del Dr. Ferrazzoli (colaborador de este proyecto) que permiten reproducir las principales tendencias según el tipo y características de la vegetación presente.
- Con la posibilidad de contar con mediciones de  $T_s$  de manera independiente ya que CONAE tiene acceso a las principales fuentes de observación satelital.
- Con un grupo en condiciones de encarar el tema desde el punto de vista teórico y también en el diseño del trabajo de campo
- Con la oportunidad de tener en un futuro (2009) datos adquiridos por el SACD.
- Con la decisión de esta propuesta de construir algunos instrumentos para campo cuyas mediciones van a facilitar la interpretación de los datos satelitales.

### 5.3.4. Aplicaciones marinas

#### Rugosidad del mar – salinidad del mar (microondas pasivas)

- **¿Cuál es la relación entre la variable medida, Temperatura de brillo  $T_B$ , y la salinidad del mar en las longitudes de onda de las microondas?** Como lo manifestamos en la introducción, estas son las preguntas claves de la teledetección, las que tratan de vincular el resultado de la medición (en este caso un radiómetro en microondas) y la variable biofísica de interés. Esta es, en particular, una pregunta para nada trivial.
- **¿Por qué es de interés plantearse la pregunta? A partir del 2007 se lanzarán dos misiones** espaciales, con el objetivo y por primera vez, de medir la salinidad superficial del mar (Sea Surface Salinity, **SSS**) con una resolución capaz de proveer cobertura global para estudios de gran escala oceánicos y climáticos. Las dos misiones son la misión europea SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*) y la encabezada por EEUU con aporte de Argentina *Aquarius*. Ambas emplean radiómetros de microondas en baja frecuencia (banda L), pero de tecnologías diferentes.
- Los principios de la determinación de **SSS** en microondas están bien establecidos. En banda L, la temperatura de brillo medida por el radiómetro se vincula con la salinidad a través de la constante dieléctrica del agua de mar. Por lo tanto la obtención de salinidad a partir de un radiómetro pasivo depende de la relación del parámetro medido **TB a variables como: frecuencia y polarización de la observación, ángulo de incidencia, temperatura de superficie del mar, salinidad del mar y rugosidad de la superficie.**
- La **dependencia de TB con la salinidad** es a través del **efecto** que la **salinidad** tiene sobre la **constante dieléctrica** del mar. Esto requiere de un modelo que vincule las dos variables: salinidad y constante dieléctrica (Tarea que está fuera del alcance de este proyecto).

- **Por otro lado, la emisión de la superficie del océano depende de la estructura (rugosidad producida por las olas) de la superficie..** Los efectos de la rugosidad en band L aún no están bien modelados. **La habilidad para predecir correctamente la emisividad depende de 1) la precisión con que se describe la superficie del mar, 2) la solución al problema de scattering de superficies.**
- Considerando la dificultad y novedoso del tema así como la inexperiencia de Argentina en extracción de información del mar de radiómetros satelitales pasivos, en este tema se aprovechará la experiencia del grupo en modelos y los aspectos comunes de las aplicaciones terrestres y marinas para indagar sobre modelos de superficie adecuados para el mar.
- Se solicita en el marco de este proyecto un becario de postdoctorado que tomará el tema. También, este proyecto, a través del Dr. Gagliardini establecerá los contactos necesarios con el sector pertinente.

**NOTA:** los evaluadores se este proyecto notarán que alguna de las aplicaciones propuestas tienen un desarrollo detallado en esta sección y otras muy breve. Esto se debe a que para aquellos temas en que el desarrollo es breve (por ejemplo rugosidad del mar, salinidad) no tenemos ninguna experiencia. Este proyecto daría inicio a estas líneas. Sin embargo consideramos que la experiencia adquirida en las otras aplicaciones nos permitirá abordar los nuevos temas en tiempo y forma y producir resultados válidos y valiosos ya que éstas serían nuevas líneas de trabajo en el país y muy importantes en virtud de la propuesta tecnológica del Plan Espacial Nacional.

#### Plan de tareas, cronograma, responsables.

Tema	tareas	1er año	2do año	3er año	Responsables
Humedad del suelo en la Provincia de Buenos Aires (activo/pasivo)	Desarrollo de Modelos directos (pasivo/activo)	X	X		Karszenbaum Grings Ferrazzoli Salvia Depine
	Desarrollo de modelos inversos (pasivo/activo)	X	X	X	Ferrazzoli Grings Salvia Karszenbaum
	Trabajo de campo: diseño del muestreo y realización de las mediciones en cuanto a estructura de la vegetación y condición del suelo.	X	X	X	Kandus Salvia Carbajo Piscitelli
	Desarrollo y construcción de instrumentos	X	X		Grings Piscitelli Salvia
	Análisis de observaciones satelitales de coeficiente de backscattering y de temperatura de brillo	X	X	X	Karszenbaum Grings Salvia Depine
	Combinación de observaciones, modelos y campo: generación de procedimientos de obtención de humedad del suelo a escala local y continental. Comparaciones. Estimación de errores	X	X	X	Karszenbaum Grings Salvia Ferrazzoli Piscitelli Kandus Carbajo

Planicie de inundación del Delta del Paraná	Mejora de los modelos directos ya implementados	X	X		Ferrazzoli Grings Karszenbaum Kandus Salvia Depine
	Desarrollo de modelos inversos		X	X	Grings Karszenbaum Ferrazzoli
	Técnicas polarimétricas			X	Jacobo Grings Ferrazzoli Depine
	Técnicas interferométricas		X	X	Jacobo Grings Ferrazzoli
	Generación de mapas de cobertura y altura del agua combinando óptico y radar.		X	X	Grings Ferrazzoli Jacobó Salvia Karszenbaum
	Mediciones de campo intensivas	X	X	X	Salvia Kandus Grings
	Estudio de modelos de proceso		X	X	Grings Kandus Ferrazzoli Salvia
Scattering de superficies (zonas costeras, mar), salinidad	Revisión de la literatura sobre rugosidad del mar en microondas activas y pasivas	X			Becario de postdoctorado Gagliardini Grings Karszenbaum Depine
	Estudio detallado de los modelos de rugosidad del mar	X	X		Gagliardini Ferrazzoli Jacobó Grings Depine
	Estudio detallado de los modelos de obtención de salinidad	X	X	X	Gagliardini Ferrazzoli Jacobó Grings
	análisis e interpretación de datos satelitales medidos.	X	X	X	Gagliardini Ferrazzoli Karszenbaum Grings

## Referencias

- Bach, H.; Mauser, W., 2003. **Methods and examples for remote sensing data assimilation in land surface process modelling**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing., 41, 7, 1, 1629–1637
- Bracaglia, M.; Ferrazzoli, P.; Guerriero, L., 1995, **A fully polarimetric multiple scattering model for crops**. Remote Sensing of Environment, 54, pp. 170-179.
- Cloude, S.R.; Pottier, E.; 1996. **A review of target decomposition theorems in radar polarimetry**. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Volume 34, Issue 2, March 1996 Page(s):498 - 518
- Cloude, S.R.; Pottier, E.; 1997. **An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR**. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on Volume 35, Issue 1, Jan. 1997 Page(s):68 - 78
- Davidson M. W. J.; Le Toan T.; Mattia F.; Satalino G.; Manninen T.; Borgeaud M., **On the characterisation of agricultural soil roughness for radar remote sensing studies**, IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens., vol. 38(2), 630–640, 2000.
- De Santo J.A.; Wombell, R.J., **Rough Surface Scattering**, Waves Random Media, vol. 1, 1991.
- Dobson, M. C.; Ulaby, F. T.; Hallikainen, M. T.; El-Rayes, M. A., 1985. **Microwave dielectric behavior of wet soil, Part II: Dielectric mixing models**. IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., 23(1), 35–46.
- Dubois Pascale C.; Jakob van Zyl; Ted Engman, 1995. **Measuring Soil Moisture with Imaging Radars**, IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., vol. 33, n° 4, 1995.
- Ferrazzoli, P.; Guerriero, L.; 1996. **Passive microwave remote sensing of forests: a model investigation**. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. Volume 34, Issue 2, March 1996 Page(s):433 - 443
- Fung A. K., **Microwave Scattering and Emission Models and their Applications**, Arctech House Norwood USA, p. 573, 1994.
- Gagliardini, D. A.; Clemente Colón, P.; Bava, J.; Milovich, J.; Frulla, L. A.; 2001. **Complementary Use of SAR and Thermal IR Observations in the Brazil-Malvinas Confluence Region**. *Canadian Journal for Remote Sensing*, vol. 27, N° 6, 6433-650, Diciembre 2001
- Gagliardini D. A.; Clemente Colón, P. 2004. **A Comparative Assessment on the Use of SAR and High Resolution Optical Images in Ocean Dynamics Studies**, *International Journal for Remote Sensing*, Vol. 25 no 7-8, 1271-1275, 2004.
- Gagliardini, D. A.; Clemente Colón, P. 2004. **Ocean feature detection using microwave backscatter and sun glint observations.**, *International Journal of Biodiversity, Oceanology and Conservation*, 68, 2, 180-185, 2004
- Gagliardini, D. A.; Dogliotti, A.; Karszenbaum, H.; y Grings, F. 2004. **Comparison of bathymetric features detected by Ers2 SAR and LANDSAT-TM data over San Matías gulf, Argentina.** *International Journal of Biodiversity, Oceanology and Conservation*, 68, 2, 201-208, 2004

Gagliardini D. A.; Aliotta, S.; Dogliotti, A. I.; Clemente Colón, P. 2005. **Identification of bed forms through ers sar images in San Matias gulf, Argentina**, , J.A.G. Cooper & D.W.T. Jackson, *Journal of Coastal Research* 21-1-193-2001, 2005

Gagliaddini, D.A.; Karszenbaum, H., 2006. **The Contribution of High-Resolution Microwave and Optical Remote Sensing Observations for Detecting and Monitoring Ocean Coastal Features**, 36th COSPAR2006 Assembly, Pkin, China, Junio 2006

Grings F.; Ferrazzoli, P.; Jacobo Berlles, J.C.; Karszenbaum, H.; Tiffenberg, J.; Kandus, P.; Depine, R. 2004. **Comparing Capabilities of Current C-Band Systems and Future L-Band Argentine SAR System in Wetland Studies**, 4th International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications, Innsbruck. 2004.

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, 4. 936-942.

Grings, F.; Ferrazzoli, P.; Karszenbaum, H.; Salvia, M.; Kandus, P.; Jacobo Berlles, J.C.; Perna, P. 2007a. **Model investigation about the potential of C band SAR in herbaceous wetlands flood monitoring**. Submitted to the *International Journal of Remote Sensing*, January 2007.

Grings, F.; Salvia, M.; Karszenbaum, H.; Ferrazzoli, P.; Kandus, P.; Perna, P. 2007b. **Exploring the capacity of radar remote sensing to estimate Wetland Marshes Water Storage**. *Journal of Environmental Management*. En prensa.

Haddad Z.; Dubois, P.; van Zyl, J. 1996. **Bayesian Estimation of Soil Parameters from Radar Backscatter Data**, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 34, n.1, January 1996.

Hajnsek I., **Inversion Of Surface Parameters Using Polarimetric Sar**, DLR PhD thesis, 2001.

Hajnsek, I.; Pottier, E.; Cloude, S.R. 2003. **Inversion of surface parameters from polarimetric SAR**. *Geoscience and Remote Sensing*, *IEEE Transactions on*. Volume 41, Issue 4, Part 1, April 2003 Page(s):727 – 744

Hallikainen, M.T.; Ulaby, F.T.; Dobson, M.C.; El-Rayes, M.A.; Lil-Kun Wu; 1985. **Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1: Empirical Models and Experimental Observations**. *Geoscience and Remote Sensing*, *IEEE Transactions on*. Volume GE-23, Issue 1, Jan. 1985 Page(s):25 - 34

Kandus P.; Karszenbaum, H.; Pultz, T.; Parmuchi, G.; Bava, J. 2001. **Influence of Flood Condition and Vegetation Status in the Radar Backscatter of Wetland Ecosystems. Analysis of Multitemporal/Multiangle Radarsat SAR data**. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27, no. 6.

Kandus, P.; Málvarez, A. I.; Madanes, N. 2003. **Study on the herbaceous plant communities in the Lower Delta islands of the Paraná River (Argentina)**. *Darwiniana* 41(1-4): 1-16. Argentina. ISSN: 0011-6793

Kandus P.; Minotti, P. ; Malvárez, A. I. 2007. **La distribución de humedales en Argentina y su estimación a partir de la carta de suelos**. *Acta Scientiarum*. En prensa. Brasil ISSN 1415-6814

Karszenbaum H.; Kandus P.; Martinez J. M.; Le Toan T.; Tiffenberg J.; Parmuchi G. 2000. **ERS-2, RADARSAT SAR backscattering characteristics of the Paraná river delta wetlands, Argentina**, ERS-Envisat Symposium (ESA), ESA-SP-461, 2000

Malagnino E.; Gagliardini, D.A. 2002 **Morfology of Submerged Moraines in the North Area of Tierra del Fuego, Its Detections from ERS2 Radar Imagery**, 29 *Simposio Internacional Sobre la Teleobservación del Medio Ambiente*, Buenos Aires, 8 -12 de abril, **2002**

Neiff J.J.; Malvárez, A. I. 2004. **Grandes humedales fluviales**. In Malvárez and Bó comp. "Bases ecológicas para la clasificación de humedales en Argentina". Pp. 77-83.

Oh Y. 2004. **Quantitative Retrieval of Soil Moisture Content and Surface Roughness From Multipolarized Radar Observations of Bare Soil Surfaces**, IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., vol. 42, n. 3, 2004.

Parmuchi M. G.; Karszenbaum H.; Kandus P., 2002. **Mapping the Paraná River delta wetland using multitemporal RADARSAT/SAR data and a decision based classifier**. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 28: 631-635.

Satalino, G.; Mattia, F.; Davidson, M.W.J.; Thuy Le Toan; Pasquariello, G.; Borgeaud, M.; 2002. **On current limits of soil moisture retrieval from ERS-SAR data**. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. Volume 40, Issue 11, Nov. 2002 Page(s):2438 - 2447

Ulaby F. T., Moore R. K., and Fung A. K. 1986. **Microwave Remote Sensing, Active and Passive**, Volume III: from Theory to Applications. Artech House, Inc.

Wdowski, S.; Amelung, F.; Miralles-Wilhelm, F.; Dixon, T.; Carande, R.; 2004. **InSAR-based hydrology of the Everglades, South Florida**. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International. Volume 3, 2004 Page(s):1870 - 1873 vol.3