

Desarrollo de un experimento para estimación de humedad del suelo basado en un radiómetro de campo en microondas

Palabras clave: Teledetección, Misiones Satelitales, Modelos Inversos

OBJETIVOS GENERALES (máx 1 pág.)

Esta propuesta plantea un desarrollo tecnológico en el campo de la Teledetección en microondas a fin de caracterizar la respuesta electromagnética de un cultivo de soja en todo su ciclo de crecimiento como contribución a la estimación de variables biofísicas a través de observaciones satelitales.

Específicamente, se plantea el desarrollo de un experimento controlado que involucra la observación de un cultivo de soja por parte de un radiómetro de campo en microondas, con mediciones en simultáneo de las propiedades del suelo (humedad, rugosidad, temperatura), ambientales (temperatura, precipitaciones) y del cultivo (tamaño, altura, contenido hídrico, otros) y de la respuesta electromagnética de éste (temperatura de brillo).

La cuantificación del efecto que las propiedades dinámicas de la vegetación inducen en la respuesta en microondas contribuye al desarrollo de modelos de inversión de humedad del suelo para ser aplicados en observaciones satelitales.

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

Los objetivos específicos de esta propuesta son:

1. Instalar un radiómetro de campo sobre una superficie agrícola de tal forma de conformar un sitio experimental de mediciones
2. Llevar a cabo la siguiente serie de experimentos:
 - (a) Caracterización de la respuesta electromagnética de suelos desnudos (sin vegetación) al variar, de manera controlada, su humedad y su rugosidad.
 - (b) Caracterización de la respuesta electromagnética de un ciclo completo de un cultivo (soja) monitoreando, de manera continua, parámetros del suelo (humedad, rugosidad) y del cultivo (tamaño, altura, contenido hídrico, otros).
3. Comparación de las mediciones con los modelos electromagnéticos existentes. Análisis de sensibilidad de los parámetros del suelo y del cultivo con respecto a la respuesta medida (temperatura de brillo).
4. Determinación del impacto de las incertezas en los parámetros de entrada en la respuesta satelital.

Hipótesis de trabajo

1. Los resultados de este experimento sirven para mejorar la inversión de productos satelitales:
 - (a) Las mediciones del radiómetro se pueden relacionar directamente con las observaciones satelitales.
 - (b) Las condiciones del cultivo, si bien artificiales, son realistas (comparables a casos típicos encontrados en la Pampa Húmeda).
 - (c) Los modelos EM sirven para interpretar los datos medidos por el radiómetro de campo.
2. Es posible obtener valores semejantes a los reales de temperatura de brillo de la superficie a través de modelos directos y es posible estimar la humedad del suelo a partir de la temperatura de brillo empleando modelos inversos.
3. La calidad de la estimación de la humedad de suelo depende de manera crítica de la precisión de los modelos electromagnéticos usados.
4. Las incertezas provenientes del radiómetro se pueden estimar y son despreciables con respecto a las mediciones.
5. Las incertezas provenientes de la variabilidad espacial de las variables del blanco son despreciables (área de observación es uniforme).

RELEVANCIA DEL PROBLEMA (máx 3 pág.)

a) Relevancia del tema: humedad del suelo en presiembra y siembra

El conocimiento de la distribución espacial y de la dinámica del contenido hídrico del suelo es esencial en aplicaciones relacionadas con la agricultura, la hidrología, la meteorología y la climatología. En agricultura, sector socio económico de alto impacto en la economía de nuestro país, la humedad superficial del suelo es un factor determinante en el crecimiento y la productividad de los cultivos en sus estadios iniciales, puesto que determina el contenido de agua disponible en la parte superior del suelo. Condiciones de exceso o escasez en el agua disponible tienen efectos igualmente graves para los cultivos. La estimación de las reservas de humedad en el suelo y el monitoreo de sus cambios resultan particularmente relevantes antes (período presiembra) y durante la temporada de siembra [McNairn10]. Por ejemplo, a partir de simulaciones realizadas sobre un ciclo de cultivo de soja [DSSAT], por cada aumento de 10% en el agua disponible al momento de la siembra, se logra un aumento de 12% en el rinde potencial. De este modo, la información cuantitativa respecto de la humedad del suelo se transforma en una importante herramienta para la toma de decisiones por parte del sector agro-productivo. Por otro lado, la dificultad principal para estimar la humedad superficial del suelo es su gran variabilidad espacio-temporal, la cual responde a gradientes de precipitación, sumado a otros factores como el tipo de suelo, la vegetación y la topografía [Famiglietti99, Western99].

b) Monitoreo de la humedad del suelo

Las técnicas gravimétricas y dieléctricas usadas habitualmente para caracterizar el contenido hídrico del suelo están restringidas a pequeñas áreas (mediciones puntuales, del orden de un 1 m²) y conllevan una gran inversión en tiempo cuando se las quiere extender a áreas de mayor tamaño. Además, estas técnicas pueden disturbar la estructura del suelo impidiendo la repetición de las mediciones en el mismo punto. Finalmente, las mediciones puntuales pueden resultar poco representativas de la variabilidad intra-campo o incluso del valor medio de la humedad del suelo [Western02].

Los métodos más prometedores para mapear la humedad del suelo en grandes áreas involucran técnicas de teledetección aplicadas a instrumentos aerotransportados y satelitales. Numerosos estudios han demostrado el potencial de la teledetección de microondas pasivas para obtener parámetros geofísicos, siendo el de mayor relevancia la humedad del suelo [Wagner07, Schmugge74, Jackson82, Jackson95, Schmugge02]. Los sensores pasivos que operan en microondas proveen información en baja resolución (> 10 Km) aunque, como contrapartida, se ven poco influenciados por la rugosidad superficial y la cobertura de la vegetación [Jackson96]. Las técnicas radiométricas en banda L (1–2 GHz) resultan prometedoras para estimar humedad del suelo y tienen la ventaja de no ser afectadas por la cobertura nubosa y ser independientes de la radiación solar [Njoku96], lo que permite realizar observaciones continuas (día y noche) y bajo cualquier condición climática. La banda de frecuencias de 1.400–1.427 GHz es una banda protegida de radioastronomía, reduciendo de esta manera errores de medición debido a interferencia de radiofrecuencias. Adicionalmente, a estas frecuencias (~21 cm), la emisión del suelo proviene de profundidades relativamente grandes y los doseles de vegetación lucen semitransparentes [Guglielmetti08, Grant09].

Diversos experimentos se llevaron a cabo usando radiómetros aertransportados en banda L con el objetivo de entender mejor los efectos de la cobertura de la vegetación [Ferrazzoli92, Saleh07, Wigneron07, Schwank08], de la temperatura del suelo [Choudhury82, Chanzy97], de su rugosidad [Choudhury79, Mo87] y de su topografía [Mätzler00] sobre la emisión en microondas de superficies agrícolas. Estos efectos deben ser considerados en la interpretación de las respuestas medidas por los instrumentos, de otro modo la obtención de humedad del suelo resulta imprecisa. En la literatura existen algoritmos para estimar humedad superficial del suelo a partir de datos de microondas pasivas [Jackson93, Wigneron95]. Los mismos incluyen modelos para la rugosidad

superficial al igual que para la cobertura de vegetación y han sido aplicados con éxito en experimentos aerotransportados y terrestres en un amplio rango de condiciones [Jackson96].

c) El experimento propuesto y su aporte al conocimiento

En la actualidad pocas técnicas se encuentran disponibles para medir el contenido de humedad del suelo en una escala intermedia entre la puntual y la asociada a las observaciones satelitales, es decir, a escala de campo. Sin embargo, éstas son particularmente necesarias para mejorar y validar los productos satelitales de gran escala. A este respecto, las técnicas asociadas al uso de radiómetros de campo en microondas se adaptan específicamente a la caracterización de la humedad del suelo a escala de campo.

Dentro de este contexto, el desarrollo ulterior de algoritmos para la inversión de humedad del suelo basados en técnicas de Teledetección en microondas pasivas es esencial en virtud de las misiones satelitales actuales (SMAP, AQUARIUS, otras).

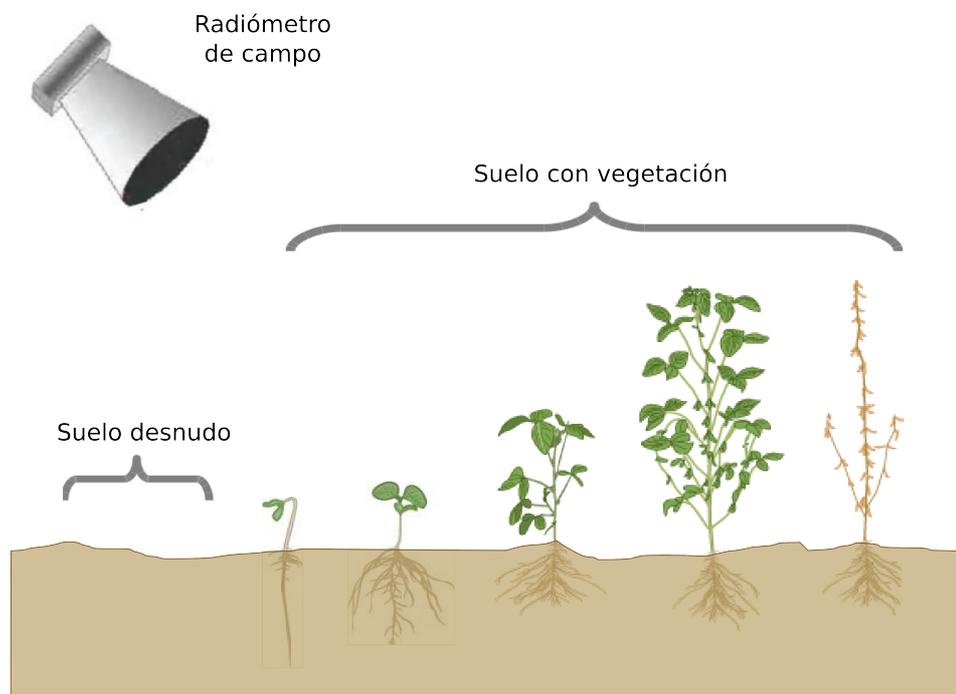


Figura 1: Esquema del experimento propuesto.

Para la apropiada calibración de dichos algoritmos se necesitan mediciones a campo realizadas en las escalas relevantes mencionadas. A este respecto, los radiómetros de campo se muestran prometedores para mapear las variaciones espacio-temporales de la humedad del suelo en escalas que abarcan desde unos pocos metros cuadrados a varias hectáreas y con una resolución espacial del orden de 1 m. Las técnicas mencionadas involucrando un radiómetro de campo soslayan las limitaciones asociadas a las mediciones puntuales de humedad del suelo y constituyen una solución promisoriosa para reducir la brecha en las escalas espaciales entre las mediciones puntuales y los datos satelitales.

El objetivo de esta propuesta es comparar la respuesta medida por un radiómetro de campo en microondas (banda L) con la humedad del suelo en presencia de vegetación (soja), como muestra la Figura 1, con el fin contribuir a la mejora de los algoritmos de estimación de humedad a partir de mediciones en microondas pasivas.

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

a) Trabajos previos del grupo de teledetección del IAFE

Resultados preliminares - caracterización del blanco (terreno) -

En el marco de la teledetección, el desarrollo de modelos de dispersión electromagnética requiere la caracterización geométrica y dieléctrica del blanco. Las superficies de agricultura (suelo + vegetación) son blancos estructural y dieléctricamente muy complejos y es muy importante cuantificarlos para modelarlos correctamente. En este contexto, el Grupo de Teledetección Cuantitativa del IAFE ha desarrollado y/o adquirido instrumental y metodologías específicas.

Rugosidad del suelo

El marco de la tesis de licenciatura en Física de M. Barber se diseñó y construyó un perfilómetro láser para digitalización de superficies agrícolas. El mismo fue utilizado en una campaña extensa de medición de rugosidad sobre suelos agrícolas en Pampa Húmeda, recolectando ~200 perfiles bidimensionales cubriendo prácticamente todas las condiciones de labranza presentes en el área. Se cuenta con mediciones paralelas y perpendiculares a la estructura subyacente de la superficie agrícola. La Tabla X1 resume las características de los sitios donde se llevaron a cabo las mediciones. La importancia de este conjunto de superficies agrícolas digitalizadas es doble. Por un lado, permite inferir las características geométricas de una superficie agrícola únicamente conociendo su estado de labranza. Por otro lado, permite su uso en la validación de los modelos de scattering teóricos y numéricos desarrollados en el marco de esta propuesta.

Humedad del suelo

El Grupo de Teledetección Cuantitativa también cuenta con experiencia en el diseño de experimentos que involucran mediciones en el terreno de variables biofísicas (constante dieléctrica, humedad del suelo, otros) en simultáneo con adquisiciones de sensores SAR (aerotransportados u orbitales). Se desarrolló un dispositivo de toma de variables in situ (basado en una sonda Stevens Hydra Probe II), el cual mide posición, permitividad, temperatura y humedad del suelo. También se desarrolló una metodología para el diseño racional de experimentos para determinar la humedad media del suelo y su error [Barber15].

Resultados preliminares - modelos teóricos de dispersión -

Los mecanismos de interacción entre la onda y el blanco se agrupan en cuatro principales, denominados mecanismos de interacción dominantes: 1) superficie, 2) dispersión en volumen, 3) especular, 4) doble rebote. La suma de las contribuciones de cada uno de ellos debe dar cuenta del coeficiente de retrodispersión observado (σ^0). En general como los modelos de scattering son complejos, se modelan los que se asumen como responsables de la medición observada.. Sin embargo cuando hay importantes diferencias entre lo observado y lo modelado, se hace necesario sumar contribuciones adicionales para ver si dan cuenta de la medición.

En el tema específico de modelos teóricos sobre suelos, la contribución principal del grupo de trabajo estuvo vinculada a los desarrollos en el marco de la tesis doctoral de M. Franco, que consistió en el desarrollo de modelos de dispersión EM que incluyan contribuciones de distintos mecanismos de interacción, concretamente:

5. dispersión superficial debida a interfaces con geometrías aleatorias
6. dispersión en volumen debida a estratificación de capas subterráneas
7. dispersión en volumen debida a medios subterráneos inhomogéneos

A lo largo del trabajo se fue aumentando gradualmente la complejidad geométrica y dieléctrica del

blanco, de manera tal que el blanco estudiado se fuese acercando al ideal de un suelo de agricultura (un medio estratificado e inhomogéneo).

Para ello, primero se describió de manera detallada uno de los métodos frecuentemente usados para calcular el σ^0 , llamado IEM (*Integral Equation Model*). Se estudiaron las limitaciones que presenta el mismo, principalmente en los canales de polarización cruzada (HV). Luego se extendió este modelo sin tomar las aproximaciones que se suelen hacer para facilitar el cálculo del coeficiente de retrodispersión (σ^0), con el fin de realizar cálculos de orden superior sobre esta variable y obtener valores no nulos para los canales de polarización cruzada. Estos nuevos cálculos se validaron obteniendo el coeficiente σ^0 sobre perfiles reales de suelos de agricultura, a través de simulaciones numéricas [Franco14a].

Un segundo paso fue extender este modelo geométrico para dar una primera estimación de la contribución al coeficiente σ^0 debida a la presencia de un medio subterráneo dieléctricamente distinto (con otra humedad). En esta etapa, se simplificó el sistema físico considerando que debajo de la superficie iluminada por el radar, el medio se encuentra estratificado en capas planas, y en donde cada uno de los semi-espacios entre las interfaces está caracterizado por una permitividad dieléctrica constante. Las consecuencias de esta geometría compleja fueron evaluadas para sistemas activos (SAR) y para sistemas pasivos (radiómetros). Además, se analizó cómo se pueden aplicar estos resultados en algoritmos de obtención de humedad del suelo.

En la parte final de este trabajo se estudió el problema más general y realista: la dispersión debida a un medio aleatoriamente inhomogéneo. La aleatoriedad del medio subterráneo tiene como objetivo modelar la porosidad del suelo (e.g. en el medio se encuentran dispersas, en forma azarosa, burbujas de aire y agua). Esta porosidad fue modelada como una permitividad dieléctrica estocástica. El planteo de este problema se basó en una formulación novedosa (en este tema) enmarcada en la teoría estadística de campos. Si bien aun no hay publicaciones sobre el tema, en este punto esperamos dar una contribución original y significativa al problema de calcular de manera sistemática y robusta el coeficiente de retrodispersión de suelos de agricultura reales [Franco14b].

Resultados preliminares – experiencia del grupo de trabajo en extracción de información de imágenes en microondas pasivas (radiómetros) -

El grupo de teledetección del IAFE tiene 10 años de experiencia en la extracción de información a partir de mediciones en microondas por parte de sistemas aerotransportados satelitales. En 2005 empezamos a trabajar en modelos de dispersión en vinculación con Paolo Ferrazzoli (Tor Vergata University), enfocando nuestros esfuerzos en tratar de explicar las propiedades de dispersión de medios naturales complejos (vegetación en humedales). También en 2005, empezamos una colaboración con CONAE (a través de un convenio) que duró 4 años, en el tema de extracción de humedad del suelo a partir de datos SAR en vista de la misión SAOCOM. Más de diez informes técnicos se generaron en este convenio. La experiencia obtenida en este contexto ayudó a consolidar el grupo, lo cual redundó en varias becas doctorales (Grings, PhD thesis, Salvia, PhD thesis, [Grings08], [Grings09], [Salvia09a], [Salvia09b], [Grings12], [Barber2012]). Asimismo, entre 2011 y 2013 se adjudicaron dos proyectos AO SAOCOM al grupo.

A fines de 2012 se comenzó a utilizar datos pasivos a través del anuncio de oportunidad CONAE-NASA-Mincyt para la misión SAC-D/Aquarius ("La Plata Basin floods and droughts: Contribution of microwave remote sensing in monitoring and prediction, Dir: H. Karszenbaum, 2011-2015"), que incluye dos becas para realizar doctorados. Este proyecto permitió ampliar nuestra experiencia en microondas, combinando datos activos y pasivos para monitoreo de inundaciones y análisis de déficit hídricos en bosques y monitoreo de humedad del suelo. Varios trabajos se publicaron en estos temas ([Ferrazzoli09], [Salvia11], [Grings12], [Barraza13a], [Bruscantini13], [Bruscantini13b]). Asimismo, tuvimos otro dos convenios: uno para la calibración del instrumento

MWR a bordo de SAC-D y otro para la calibración validación del instrumento aerotransportado SAR-AT (soporte científico para la misión SAOCOM). Esto implicó el análisis de datos MWR y datos SAR-AT.

Resultados preliminares – armado de un radiómetro de campo –

El grupo de Teledetección Cuantitativa del IAFE en colaboración con el Laboratorio de Teledetección (CFRSL) de la Universidad de Central Florida (UCF) desarrollan un programa de medición de humedad de suelo experimental, que involucra mediciones a campo con un radiómetro de microondas en banda L. El radiómetro es del tipo Dicke de 4 estados con inyección de ruido, un diseño complejo y sofisticado que permite obtener una alta calidad de los datos observados. La temperatura equivalente de ruido es menor a 1 K para 10 segundos de integración de la medición. La frecuencia de medición central es 1.413 GHz con un ancho de banda de 13 MHz. Esta frecuencia es una banda de radioastronomía protegida donde las transmisiones activas están prohibidas. Sin embargo, suele haber fuentes de interferencias de radio frecuencia (RFI) que deben ser mitigadas. Para rechazar RFI de frecuencias cercanas, el radiómetro tiene un filtro pasabanda con una frecuencia de corte muy pronunciada y un ancho de banda angosto. Además es posible configurar la frecuencia del receptor para rechazar RFI en una frecuencia particular. El rango de frecuencia central de operación del radiómetro varía de 1.1 GHz a 1.8 GHz. A su vez, el ajuste de la frecuencia de operación del radiómetro permite la validación de la física de los modelos.

Resultados preliminares - modelos teóricos de transferencia radiativa y modelos inversos -

Las emisiones terrestres en microondas son sensibles a la humedad del suelo superficial. Desafortunadamente, las emisiones terrestres también se ven influenciadas por el contenido de agua en la vegetación que absorbe, emite, y refleja la radiación electromagnética. Un modelo de emisión en microondas comúnmente utilizado que describe el impacto de la vegetación en la emisividad es el modelo τ - ω . El modelo representa el total de la emisividad como el conjunto de tres contribuciones principales: la temperatura de brillo total del suelo atenuada por la cobertura de vegetación, y la emisión de la vegetación hacia el satélite y reflejada en el suelo y atenuada por la vegetación. El modelo utiliza parametrizaciones de la vegetación, como la opacidad de la vegetación τ (espesor óptico) y su característica de dispersión ω (albedo). Estas parametrizaciones se obtienen de manera empírica en campañas de campo en sitios específicos, que luego suelen utilizarse de manera operativa a escala global. Sin embargo, la extrapolación directa de los valores de las parametrizaciones es propenso a generar errores en la estimación final de la humedad de suelo. Teniendo en cuenta esta limitación, se desarrolló un algoritmo de estimación de humedad de suelo que utiliza inferencia bayesiana para describir la función de densidad de probabilidad de la humedad del suelo teniendo en cuenta la distribución esperable de errores de las parametrizaciones del modelo. En este contexto, un radiómetro de campo permite mejorar las parametrizaciones para la región de estudio, y por consiguiente mejorar la calidad de la estimación de la humedad de suelo.

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

La hipótesis central del trabajo es que un experimento de campo controlado, que mida la misma variable física que un sistema satelital, permite refinar los algoritmos de inversión utilizados en el producto operativo. En particular, supondremos que medir simultáneamente temperatura de brillo en banda L y dos polarizaciones (SMAP) y todos los parámetros del terreno (propiedades geométricas y dieléctricas del suelo y la vegetación), permitirán estudiar en detalle las hipótesis asociadas al modelo de inversión. En este contexto, la metodología de trabajo es razonable, ya que permite encarar la validación del producto humedad del suelo de SMAP sin utilizar redes espacialmente extensas de sensores de humedad del suelo, que son caras de comprar y mantener.

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

Instalación de un radiómetro de campo - conformación de un sitio experimental de mediciones

El experimento de medición involucra situar el radiómetro (Figura 2) en una torre de alrededor de 2 metros de altura, con una antena capaz de rotar mecánicamente. La rotación de la antena en elevación (con un ángulo de elevación de hasta 140° aproximadamente) permitirá observar el cielo y la superficie terrestre, con fines de calibración. A su vez, la rotación de la antena en azimuth permitirá la observación de múltiples experimentos (distintos tipos de vegetación, en distintos estadios, bajo distintas condiciones hídricas, etc.) en simultáneo (Figura 3). La antena se encuentra en construcción.

El lugar físico del sitio se encuentra dentro del Predio Experimental de Ciudad Universitaria, un predio cercado y con cuidadores dentro de Ciudad Universitaria, a 100 m del IAFE.

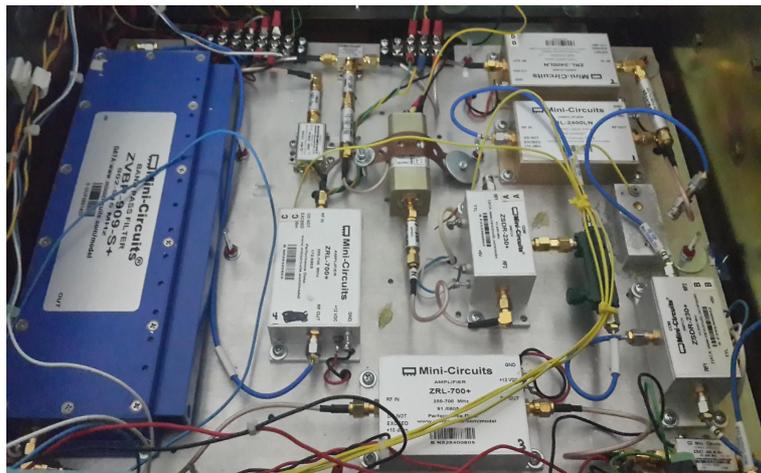


Figure 2: Vista interna del radiómetro. Se evidencia la circuitería de microondas y los componentes.

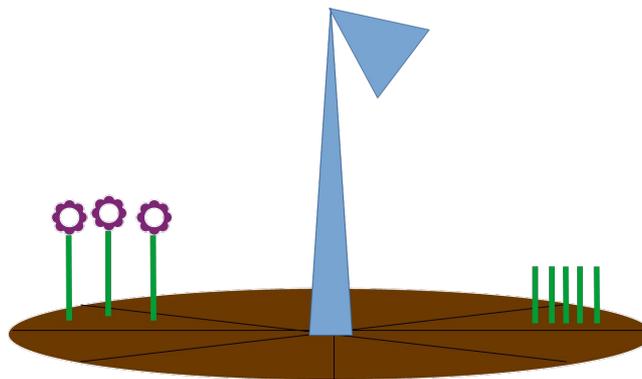


Figura 3: Esquema conceptual de varios experimentos simultáneos. Esto es posible debido a la rotación del radiómetro.

Aspectos generales de la respuesta electromagnética de un cultivo

La humedad del suelo puede obtenerse a partir de mediciones de sensores pasivos (de campo o satelitales) debido al marcado contraste entre las propiedades dieléctricas en microondas del agua en estado líquido ($\epsilon_r \approx 80$) y las del suelo seco ($\epsilon_r \approx 3$). Como resultado, las mezclas suelo-agua presentan una variabilidad en las propiedades dieléctricas que abarcan condiciones de extrema sequedad a saturación ($\epsilon_r \approx 3-30$). Esto hace que la permitividad del suelo como medio sea básicamente función del contenido hídrico del mismo. A partir de ésta, puede estimarse el contenido

de humedad del suelo (Hong and Shin, 2011; Hornbuckle et al., 2003; Saleh et al., 2007; Schneeberger et al., 2004; Wigneron et al., 1995, entre otros). Existen modelos empiricos para convertir la permitividad de un suelo a humedad del suelo. Los mismos requieren como entrada las fracciones de arena, arcilla y temperatura.

Los sistemas pasivos son sensibles a la energía radiante emitida por la superficie. La magnitud física medida es la temperatura de brillo T_B , equivalente a la emisividad de la superficie por su temperatura física, $T_B = \epsilon T_s$.

Como se mencionó, las emisiones terrestres en microondas son sensibles a la humedad del suelo superficial. Desafortunadamente, las emisiones terrestres también se ven influenciadas por el contenido de agua en la vegetación que absorbe, emite, y refleja la radiación electromagnética. En la Figura 4 se muestra un esquema de las diferentes componentes de la señal pasiva medida por el radiómetro, con T_B la temperatura de brillo. T_a es la temperatura de la capa atmosférica, T_v es la temperatura de la capa de vegetación, T_s es el perfil de temperaturas del suelo y ϵ su constante dieléctrica. La señal pasiva se compone de: la señal emitida por la atmósfera (A), la emisión de la atmósfera que se refleja en suelo en dirección al radiómetro (B), la emisión del suelo (C), la emisión del suelo que atraviesa la capa de vegetación en dirección al radiómetro (D), la emisión del dosel de vegetación (E) y la emisión del dosel que se refleja en el suelo en dirección al radiómetro (F).

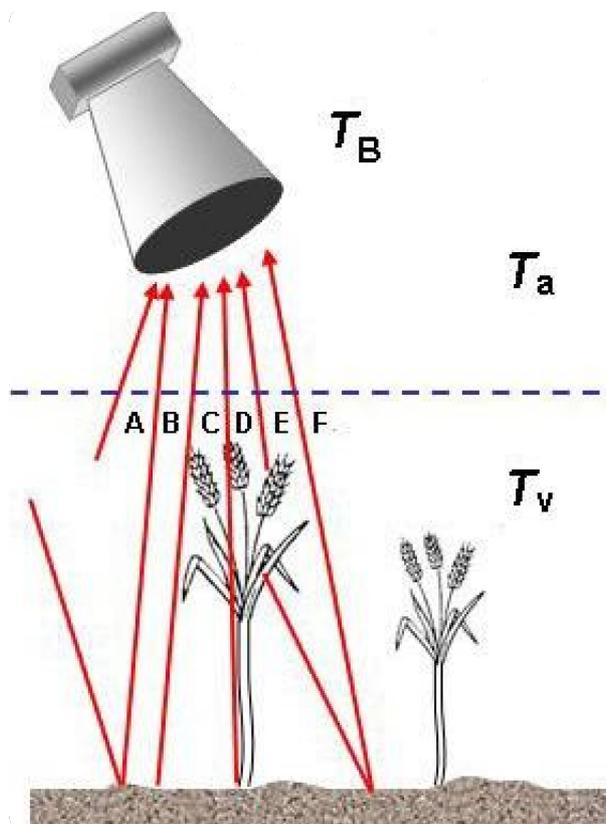


Figura 4: Componentes de la señal medida por un radiómetro observando un cultivo.

Caracterización de la respuesta electromagnética de suelos desnudos (sin vegetación)

Base racional

La determinación de la permitividad ϵ se basa en la medición de la radiancia térmica emitida por la superficie terrestre para alguna frecuencia dada (Njoku and Entekhabi, 1996). A una frecuencia específica en el espectro de las microondas, la intensidad de la radiación recibida (emisión térmica) es proporcional a la temperatura termodinámica T_s [K] y a la emisividad ϵ_s del suelo, según la aproximación de Rayleigh-Jeans a la ley de Planck.

De acuerdo a esto, la radiancia es proporcional a la temperatura física de la superficie y,

consecuentemente, conocida como temperatura de brillo T_B [K] (Njoku and Entekhabi, 1996; Wigneron et al., 2001).

En consecuencia, la temperatura de brillo de un suelo observada por un radiómetro operando en banda L se puede expresar como (Jackson, 1993; Wigneron et al., 2001):

$$T_{B,p} = e_{s,p} T_s + (1 - e_{s,p}) T_a \quad [1]$$

donde $e_{s,p}$ es la emisividad de la superficie, T_a [K] es la temperatura de la atmósfera calculada según Pellarin et al. (2003), T_s [K] es la temperatura física efectiva del suelo y p denota la polarización (horizontal o vertical). La emisividad, para una superficie, se calcula como

$$e_{s,p} = 1 - r_{v,p}$$

donde $r_{v,p}$ es la reflectividad, que se relaciona con la permitividad y la rugosidad según

$$r_v = r_{sv} e^{-h} = \left| \frac{\epsilon_c \cos(\theta) - \sqrt{\epsilon_c - \sin^2(\theta)}}{\epsilon_c \cos(\theta) + \sqrt{\epsilon_c - \sin^2(\theta)}} \right|^2 e^{-h}$$

con θ el ángulo de incidencia local. La información de la rugosidad (altura RMS s) se encuentra contenida en el factor $h = [2 k s \cos(\theta)]^2$, donde k es el número de onda ($k=2\pi/\lambda$).

Cómo se llevará a cabo el experimento

Una vez instalado el radiómetro, se dispondrá de una parcela de suelo de aproximadamente 5 m x 5 m. La misma será sujeta a los siguientes tratamientos para modificar su rugosidad:

8. alisamiento con un pisón (rugosidad baja)
9. pasaje de una rastrillo (rugosidad alta)

Para cada tratamiento, la rugosidad se medirá con el perfilómetro láser mencionado en la sección “Resultados preliminares ...”. Para cada tratamiento, se procederá a humedecer el suelo de manera controlada con un suministro de agua a modo de riego artificial. En simultáneo se instalarán dos sensores de humedad para monitorear el contenido hídrico en el suelo a dos profundidades (10 cm y 20 cm). El dispositivo portátil de medición de humedad (ver sección “Resultados preliminares ...”) se usará para medir el valor de humedad promedio en toda la superficie.

Caracterización de la respuesta electromagnética de un ciclo completo de un cultivo

Base racional

En presencia de vegetación, no obstante, la ecuación [1] no es válida debido a que deben tomarse en cuenta fenómenos de absorción, emisión y dispersión por parte del dosel de la vegetación en la formulación del modelo de transferencia radiativa (ver Figura 2). Consecuentemente, T_B para una polarización de un sistema suelo-vegetación puede expresarse como

$$T_B = T_v(1 - r_v - \gamma) + e_s T_s \gamma + T_v(1 - r_v - \gamma)(1 - e_s) \gamma \quad [2]$$

con T_v la temperatura de la vegetación [K], r_v la reflectividad del dosel de vegetación y γ su transmitividad (Chukhlantsev et al., 2003). En [2], el primer término representa la componente de emisividad de la vegetación, el segundo término la componente del suelo atenuada por la

vegetación y el tercero la emisividad proveniente de la vegetación que interactúa con el suelo. Para cultivos observados a bajas frecuencias (banda L), puede emplearse una solución a orden cero de la ecuación de transferencia radiativa [2], llamado modelo Tau–Omega, expresada como:

$$T_{B,p} = (1 - \omega_p) (1 - \gamma_p) (1 + \gamma_p r_{v,p}) T_V + (1 - r_{v,p}) \gamma_p T_s \quad [3]$$

con $r_{v,p}$ la reflectividad del suelo y ω el albedo de dispersión simple.

La atenuación en la capa de vegetación, cuantificada por el factor de atenuación γ (o la transmitividad de la vegetación), puede definirse en términos del espesor óptico (τ) y el ángulo de incidencia (θ , el ángulo entre un rayo incidente sobre la superficie y la línea perpendicular al punto de incidencia) (Wigneron et al., 2007) según:

$$\gamma_p = \exp(-\tau_p/\cos\theta). \quad [4]$$

En Jackson and O'Neill (1990) se muestra que existe una relación lineal entre el espesor óptico (τ) y el contenido hídrico de la vegetación VWC [kg m^{-2}):

$$\tau_p = b_p \text{VWC} \quad [5]$$

donde b_p es un coeficiente de regresión que depende tanto de la frecuencia como de la polarización y es característico del tipo de dosel (Jackson and Schmugge, 1991; Van de Griend and Wigneron, 2004).

Cómo se llevará a cabo el experimento

Manteniendo la infraestructura mencionada en el experimento anterior, el suelo se sembrará con soja. A partir de ese momento, se monitoreará durante todo su ciclo de crecimiento, tomando muestras periódicas de vegetación para cada estadio de crecimiento de la soja que represente un cambio significativo en su geometría o contenido de humedad (por ejemplo, inicio de floración, floración completa, semilla completamente desarrollada, maduración completa). Para esta etapa contaremos con el asesoramiento de un ingeniero agrónomo.

Comparación de las mediciones con los modelos electromagnéticos existentes. Análisis de sensibilidad de los parámetros del suelo y del cultivo con respecto a la respuesta medida (temperatura de brillo).

La temperatura de brillo medida se comparará

6. en el experimento de suelo desnudo con la expresión [1]. Las mediciones realizadas permitan evaluar el modelo para todo el rango de humedades (permitividad de 3 a 30) posibles y para las dos condiciones de rugosidad mencionadas (baja y alta).
7. en el experimento sobre el ciclo de cultivo con la expresión [3] (modelo Tau–Omega). Las mediciones realizadas permitirán evaluar el modelo para todo el rango dinámico de espesores ópticos a través del cambio en el contenido hídrico (VWC) almacenado en los tallos y hojas de la soja.

Para el análisis de sensibilidad, se calculará numéricamente las derivadas de T_B en función de los parámetros del suelo (permitividad) y del cultivo (espesor óptico). Para el caso del cultivo presente, mediante una simulación de Monte Carlo, se agregará incerteza al resto de los parámetros (supuestos constantes) rugosidad, albedo y temperatura de la superficie.

Determinación del impacto de la incertezas en la parámetros de entrada en las respuesta satelital.

Base racional

Un algoritmo de inversión muy utilizado para obtener humedad del suelo a partir de observaciones satelitales en microondas pasivas es el *Single Channel Algorithm (SCA)*. SCA utiliza la polarización H, que presenta una mayor sensibilidad a la humedad del suelo que la polarización V. En este algoritmo, la temperatura de brillo se convierte a emisividad usando una estimación satelital para la temperatura de la superficie emisora humedad del suelo (la cual puede ser provista por ECMWF o por AMSRE-2). Dicha emisividad se corrige teniendo en cuenta la vegetación y la rugosidad para obtener la emisividad del suelo. Finalmente, se utiliza un modelo de mezcla dieléctrica (modelo de Mironov, Mironov et al., 2012) para convertir la permitividad a humedad del suelo usando la ecuaciones de Fresnel.

El impacto de la incertezas se realizará mediante una simulación Monte Carlo, en la cual se modelarán las incertezas en los parámetros de entrada mediante una distribución gaussiana y se analizará como éstas se propagan en el modelo inverso SCA. Se pondrá énfasis en la temperatura del suelo T_s , el cual es un parámetro estimado a partir de observaciones satelitales en un aplicación real.

CRONOGRAMA DE TRABAJO (máx 1 pág.)

Las tareas previstas son las siguientes:

1. Finalización de la construcción de la antena. Instalación de torre y montaje del radiómetro. Pruebas de funcionamiento.
2. Desmalezado/limpieza de parcela. Instalación de estación sensores de humedad fijos.
3. Alisamiento del suelo y posterior humedecimiento. Mediciones continuas con el radiómetro y los sensores de humedad.
4. Rastrillaje del suelo y posterior humedecimiento. Mediciones continuas con el radiómetro y los sensores de humedad.
5. Siembra de semillas de soja. Humidificación del suelo hasta alcanzar valor óptimo para crecimiento de la semilla.
6. Mediciones continuas con el radiómetro durante el ciclo de cultivo de soja (6 meses).
7. Comparación de la mediciones con el modelo tau-omega para la condición de suelo desnudo.
8. Comparación para la condición de suelo con cobertura vegetal. Calculo de la derivadas numéricas y comparación.
9. Determinación del impacto de la incertezas en la parámetros de entrada en las respuesta satelital.

	Semestre 1	Semestre 2	Semestre 3	Semestre 4
1	x			
2	x			
3		x		
4		x		
5		x		
6			x	
7		x		
8				x
9				x

Bibliografía

- [Barber12] M. Barber, F. Grings, P. Perna, M. Piscitelli, M. Maas, C. Bruscantini, J. Jacobo Berlles, H. Karszenbaum, "Speckle noise and soil heterogeneities as error sources in a Bayesian soil moisture retrieval scheme for SAR data", *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, June 2012, vol. 5, n. 3 p.942-951.
- [Barber15] M. Barber, F. Grings, C. Bruscantini, H. Karszenbaum, "Rationale behind an optimal field experiment to assess the suitability of soil moisture retrieval algorithms for SAR data", *Geoscience and Remote Sensing Letters*, April 2015, vol. 12, n. 4 p.791-795.
- [CONAE] <http://www.conae.gob.ar/index.php/es/misiones-satelitales/saocom/objetivos>
- [DSSAT] Datos presentados presentados por CONAE en el *Mission Critical Design Review* (M-CDR) del proyecto SAOCOM en el contexto de la Aplicación Estratégica Sistema de Soporte para la Toma de Decisiones en la Agricultura, Buenos Aires 18 - 22 de Noviembre de 2013).
- [ESA07] Measuring the Moisture in the Earth's Soil - Advancing the Science with ESA's SMOS Mission, Michael Berger et al., ESA Directorate of Earth Observation, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 2007.
- [Famiglietti99] Famiglietti, J.S., J.A. Devereaux, C.A. Laymon, T. Tsegaye, P.R. Houser, T.J. Jackson, S.T. Graham, M. Rodell y P.J. van Oevelen, 1999. Ground based investigation of soil moisture variability within remote sensing footprints during the SGP 97 hydrology experiment. *Water Resour. Res.* 35(6): 1839-1851.
- [Fung94] Fung A. K., "Microwave scattering and emission models and their applications", Artech House, Boston, MA, 1994.
- [Jackson85] T. J. Jackson, P. E. O'Neill, "Aircraft scatterometer observations of soil moisture on rangeland watersheds", *Int. J. Remote Sensing*, vol. 6, n. 7 pp.1135-1152, 1985.
- [Lee 94] J.S. Lee, K. W. Hoppel, S. A. Mango, and A. R. Miller, "Intensity and Phase Statistics of Multilook Polarimetric and Interferometric SAR Imagery", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, pp. 1017-1028, September 1994.
- [McNairn 2010] H. McNairn, A. Merzouki, A. Pacheco, and J. Fitzmaurice. Monitoring Soil Moisture to Support Risk Reduction for the Agriculture Sector Using RADARSAT-2. *Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, *IEEE Journal of*, 5(3):824-834, 2012. 3, 54
- [NMM3D] <http://www.ee.washington.edu/research/laceo/NMM3D-LUT.html>
- [SMAP] <http://smap.jpl.nasa.gov/observatory/specifications/>
- [Ulaby82] Ulaby, F.T., R.K. Moore, y A.K. Fung, 1982. *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume II: Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory*. Artech House, Inc. Norwood, USA.
- [Western99] Western A. W., Grayson R. B., Blöschl G., Willgoose G. R., McMahon T. A. Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices. *Water Resour. Res.* 35(3): 797-810 pp, 1999.
- [Western02] A. W. Western, R. B. Grayson, and G. Blöschl, "Scaling of soil moisture: A hydrologic perspective," *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, vol. 30, pp. 149-180, May 2002.
- [Jackson96] T. J. Jackson, J. Schmugge, and E. T. Engman, "Remote sensing applications to hydrology: Soil moisture," *Hydrol. Sci.*, vol. 41, no. 4, pp. 517-530, 1996.
- [Wagner07] W. Wagner, G. Blöschl, P. Pampaloni, J. C. Calvet, B. Bizzarri, J. P. Wigneron, and Y. Kerr, "Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications," *Nordic Hydrol.*, vol. 38, no. 1, pp. 1-20, 2007.
- [Schmugge74] T. Schmugge, P. Gloersen, T. Wilheit, and F. Geiger, "Remote-sensing of soil-moisture with microwave radiometers," *J. Geophys. Res.*, vol. 79, no. 2, pp. 317-323, 1974.
- [Jackson82] T. J. Jackson, T. J. Schmugge, and J. R. Wang, "Passive microwave sensing of soil-moisture under vegetation canopies," *Water Resour. Res.*, vol. 18, no. 4, pp. 1137-1142, 1982.
- [Jackson95] T. J. Jackson, D. M. Levine, C. T. Swift, T. J. Schmugge, and F. R. Schiebe, "Large-area mapping of soil-moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in Washita'92," *Remote Sens. Environ.*, vol. 54, no. 1, pp. 27-37, Oct. 1995.
- [Schmugge02] T. J. Schmugge, W. P. Kustas, J. C. Ritchie, T. J. Jackson, and A. Rango, "Remote sensing in hydrology," *Adv. Water Resour.*, vol. 25, no. 8-12, pp. 1367-1385, 2002.
- [Njoku96] E. G. Njoku and D. Entekhabi, "Passive microwave remote sensing of soil moisture," *J. Hydrol.*, vol. 184, no. 1/2, pp. 101-129, 1996
- [Guglielmetti08] M. Guglielmetti, M. Schwank, C. Mätzler, C. Oberdorster, J. Vanderborght, and H. Fluhler, "Fosmex: Forest soil moisture

- experiments with microwave radiometry,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 3, pp. 727–735, Mar. 2008.
- [Grant09] J. P. Grant, A. A. Van de Griend, M. Schwank, and J. P. Wigneron, “Observations and modeling of a pine forest floor at L-band,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 47, no. 7, pp. 2024–2034, Jul. 2009.
- [Ferrazzoli92] P. Ferrazzoli, S. Paloscia, P. Pampaloni, G. Schiavon, D. Solimini, and P. Coppo, “Sensitivity of microwave measurements to vegetation biomass and soil-moisture content—A case-study,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 30, no. 4, pp. 750–756, Jul. 1992.
- [Saleh07] K. Saleh, J. P. Wigneron, P. Waldteufel, P. de Rosnay, M. Schwank, J. C. Calvet, and Y. H. Kerr, “Estimates of surface soil moisture under grass covers using L-band radiometry,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 109, no. 1, pp. 42–53, Jul. 2007.
- [Wigneron07] J. P. Wigneron, Y. Kerr, P. Waldteufel, K. Saleh, M. J. Escorihuela, P. Richaume, P. Ferrazzoli, P. de Rosnay, R. Gurney, J. C. Calvet, J. P. Grant, M. Guglielmetti, B. Hornbuckle, C. Mätzler, T. Pellarin, and M. Schwank, “L-band Microwave Emission of the Biosphere (L-MEB) model: Description and calibration against experimental data sets over crop fields,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 107, no. 4, pp. 639–655, Apr. 2007.
- [Schwank08] M. Schwank, M. Guglielmetti, C. Mätzler, and H. Fluhler, “Testing a new model for the L-band radiation of moist leaf litter,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 46, no. 7, pp. 1982–1994, Jul. 2008.
- [Choudhury82] B. J. Choudhury, T. J. Schmugge, and T. Mo, “A parameterization of effective soil-temperature for microwave emission,” *J. Geophys. Res.*, vol. 87, no. C2, pp. 1301–1304, 1982.
- [Chanzy97] A. Chanzy, S. Raju, and J. P. Wigneron, “Estimation of soil microwave effective temperature at L and C bands,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 35, no. 3, pp. 570–580, May 1997.
- [Choudhury79] B. J. Choudhury, T. J. Schmugge, A. Chang, and R. W. Newton, “Effect of surface-roughness on the microwave emission from soils,” *J. Geophys. Res.*, vol. 84, no. C9, pp. 5699–5706, 1979.
- [Mo87] T. Mo and T. J. Schmugge, “A parameterization of the effect of surface-roughness on microwave emission,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GRS-25, no. 4, pp. 481–486, Jul. 1987.
- [Mätzler00] C. Mätzler and A. Standley, “Relief effects for passive microwave remote sensing,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 21, no. 12, pp. 2403–2412, 2000.
- [Jackson93] T. J. Jackson, “Measuring surface soil-moisture using passive microwave remote-sensing,” *Hydrol. Process.*, vol. 7, no. 2, pp. 139–152, 1993.
- [Wigneron95] J. P. Wigneron, A. Chanzy, J. C. Calvet, and W. Bruguier, “A simple algorithm to retrieve soil-moisture and vegetation biomass using passive microwave measurements over crop fields,” *Remote Sens. Environ.*, vol. 51, no. 3, pp. 331–341, Mar. 1995.
- [Grings05] 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.
- [Grings06] 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.
- [Grings08] 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

- [Grings10] 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
- [Salvia09] 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.
- [Salvia10] 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.
- [Salvia11] 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.
- [Salvia12] 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.
- [Mironov12] Mironov, V., Kerr, Y., Wigneron, J. P., Kosolapova, L., & Demontoux, F. (2012). Temperature- and Texture-Dependent Dielectric Model for Moist Soils at 1.4 GHz. *Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE*, 10, 419–423.