

Evaluación de sistemas SAR para el monitoreo hidrológico de los humedales del delta del Río Paraná

Verónica M. Kwaterka ^{*1,3}, María M. Salvia ^{2,3}, Laura M. Calfayan ^{1,3}, Jonathan Tissoni ^{1,3}, Rafael Grimson ^{1,3}

¹ Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental (IIIA, UNSAM-CONICET), Escuela de Hábitat y Sostenibilidad, Campus Miguelete, 25 de mayo y Francia, 1650-San Martín, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

² Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, UBA - CONICET), Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Godoy Cruz 2290, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Resultados destacados:

- La detección de agua bajo pajonales depende del esquema SAR destacándose la banda L copolarizada con ángulo empinado ($<28^\circ$).
- La interacción doble rebote informa el anegamiento del humedal y la dispersión volumétrica refleja la fenología vegetal.
- Los modelos GAM permitieron postular y evaluar las contribuciones adicionales que afectan la señal para cada esquema SAR.

Resumen: En este estudio se evaluaron distintos esquemas de adquisición de sistemas de radar de apertura sintética (SAR), considerando variaciones en la longitud de onda, la polarización y el ángulo de incidencia para el monitoreo hidrológico de los ecosistemas de humedal del interior de las islas del delta del Río Paraná. Con este propósito, se analizaron las variaciones de la señal retrodispersada del centro de las islas dominados por cortadera (*Scirpus giganteus*) a partir de tres series temporales de imágenes de las misiones satelitales Sentinel-1 (C-VH/VV-32,2°) y ALOS-2 PALSAR-2 (L-HH/HV-26,1° y L-HH/HV-37,5°), en relación con las fluctuaciones ordinarias de las condiciones de anegamiento. Dado que la señal retrodispersada en ambientes de humedal está influenciada por múltiples factores como las variaciones en el nivel de agua y saturación del suelo, la rugosidad superficial, y el estado fenológico de la vegetación; se aplicaron modelos aditivos generalizados (GAM) para analizar la influencia de estos factores en la variabilidad de la señal retrodispersada en cada configuración de adquisición satelital. Los resultados de esta investigación indican que la configuración más adecuada para el monitoreo de la dinámica hidrológica de los humedales del delta del Río Paraná corresponde a la señal en banda L, con polarización HH y ángulo de incidencia empinado ($<28^\circ$). Esto se debe a que la combinación de la banda L con ángulos de incidencia verticales permite una mayor penetración de la señal a través de la cobertura vegetal de las cortaderas, aportando información más sensible del estado de inundación del humedal.

Palabras clave: Teledetección, SAR, hidrodinámica, humedales, delta del Río Paraná.

To cite this article: Kwaterka, V.M., Salvia, M.M., Calfayan, L.M., Tissoni, J., Grimson, R. 2026. Evaluation of SAR systems for hydrological monitoring of wetlands in the Paraná River delta. *Revista de Teledetección*, 68, e25725. <https://doi.org/10.4995/raet.2026.25725>

* Corresponding author: vkwaterka@unsam.edu.ar

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Evaluation of SAR systems for hydrological monitoring of wetlands in the Paraná River delta

Abstract: In this study, different acquisition configurations of Synthetic Aperture Radar (SAR) systems were evaluated for hydrological monitoring of wetland ecosystems located in the inner islands of the Paraná River Delta, considering variations in wavelength, polarization, and incidence angle. For this purpose, we analyzed the variations of the backscattered signal in island cores dominated by cortadera (*Scirpus giganteus*) using three temporal series of ALOS-2 PALSAR-2 and Sentinel-1 satellite imagery, in relation to ordinary fluctuations in inundation conditions. Since the backscattered signal in wetland environments is influenced by multiple factors such as water level and soil saturation, surface roughness, and vegetation phenological state; generalized additive models (GAM) were applied to analyze how these factors contribute to the variability of the backscattered signal for each satellite acquisition configuration. The results of this research indicate that the most suitable configuration for monitoring the hydrological dynamics of the Paraná River Delta wetlands corresponds to L-band SAR, with HH polarization and steeper incidence angles. This is because the combination of L-band with steep incidence angles ($<28^\circ$) enhances penetration of the signal through cortadera vegetation, providing information more sensitive to inundation conditions within the wetland.

Keywords: remote sensing, SAR, hydrodynamics, wetlands, Parana River delta.

1. Introducción

Los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de los ecosistemas de humedal (Brinson, 1993), por ello diseñar herramientas satelitales efectivas para estimar tanto la saturación como el nivel del agua en estos ecosistemas resulta tan relevante como desafiante, especialmente en ambientes dominados por vegetación emergente y densa. En este sentido, los radares de apertura sintética (SAR) constituyen una herramienta particularmente útil para monitorear la dinámica hidrológica de los humedales, pues poseen la posibilidad de operar con longitudes de onda suficientemente largas para penetrar el dosel vegetal y brindar así información del estado de saturación del suelo, superando las limitaciones de otros sensores satelitales (Grings *et al.*, 2006, 2008; Henderson y Lewis, 2008). No obstante, este potencial ha sido demostrado principalmente en condiciones de escasa cobertura vegetal, ya que su efectividad disminuye a medida que aumenta la densidad y complejidad estructural de la vegetación (Millard y Richardson, 2018).

Los deltas son sistemas costeros dinámicos por naturaleza, que se caracterizan por estar sometidos a la interacción de procesos fluviales y marinos costeros. Aunque ocupan menos del 1 % de la superficie terrestre, se encuentran entre los ambientes más vitales del planeta, tanto por su

valor ecológico como económico para la sociedad (Ericson *et al.*, 2006). En el delta del Río Paraná, en Argentina, se desarrollan ecosistemas de humedal en el interior de las islas deltaicas, influenciados tanto por las mareas de agua dulce del estuario del Río de la Plata como por el régimen hidrológico estacional del Río Paraná (Violante *et al.*, 2008). Estas condiciones favorecen una alta diversidad vegetal, que en el interior de las islas se expresa en extensos mosaicos de comunidades herbáceas sometidas a anegamientos prolongados. Estos humedales se componen de praderas de herbáceas altas dominadas de paja brava (*Scirpus giganteus*) que, según Pratolongo y Kandus (2005), ocupan cerca del 40 % de la superficie insular.

Las frecuentes condiciones de anegamiento del suelo en la zona de estudio imponen serias dificultades de acceso, lo que hace necesario recurrir al uso de herramientas de teledetección, así como a modelos conceptuales y cuantitativos, que permitan describir la heterogeneidad espacial y la variabilidad temporal de estos paisajes.

Entre los principales antecedentes, se encuentra el trabajo de Salvia *et al.* (2008) que analiza la respuesta de los sistemas ENVISAT ASAR (banda C) y ALOS PALSAR (banda L) para el monitoreo de juncales y pajonales en diferentes condiciones de inundación, mostrando cómo la frecuencia influye en la respuesta de la señal radar durante un evento



de inundación. Al igual que en ese estudio, la mayoría de las investigaciones previas en la cuenca baja del Río Paraná (Kandus *et al.*, 2001; Grings *et al.*, 2006; Salvia *et al.*, 2008) han evaluado variaciones de la señal retrodispersada con distintos tipos de coberturas vegetales en condiciones de inundación y no inundación, sin incluir las fluctuaciones regulares del nivel de agua. Por su parte, Zhang *et al.* (2016) realiza un estudio utilizando series temporales de imágenes radar de diferentes frecuencias, polarizaciones y ángulos de incidencia sobre los humedales costeros del delta del río Liaohe (China) en pantanos de juncos y arrozales, con el fin de caracterizar las variaciones estacionales del coeficiente de retrodispersión del radar, combinando el índice óptico de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Este autor concluye que los cambios en el nivel del agua en humedales de juncos y arrozales se detectan mejor con la señal radar de banda L y polarización HH que con el radar de banda C con polarización VV. Adeli *et al.* (2020) presenta una revisión donde compila de forma sistemática estudios sobre el uso

de sensores SAR en el monitoreo de humedales, destacando en los últimos años un incremento en el empleo de datos multisensor con integración de bandas C y L frente a otras configuraciones.

Con la finalidad de evaluar la respuesta radar para diferentes niveles de inundación, fue necesario calibrar un modelo hidrológico que describiera la hidrodinámica de los centros de isla inundables, puesto que los modelos existentes en la zona de estudio permiten estimar solamente los caudales de los ríos del delta del Río Paraná (Guizzardi *et al.*, 2022). El modelo calibrado presentó una capacidad predictiva adecuada, de forma que pudo ser utilizado para evaluar la respuesta de la señal radar en distintos escenarios hidrológicos.

Esta investigación tiene como objetivo comparar distintas configuraciones de adquisición de sistemas satelitales SAR (ALOS-2 PALSAR-2 y Sentinel-1) para monitorear los anegamientos regulares que ocurren en los humedales costeros del delta del Río Paraná.

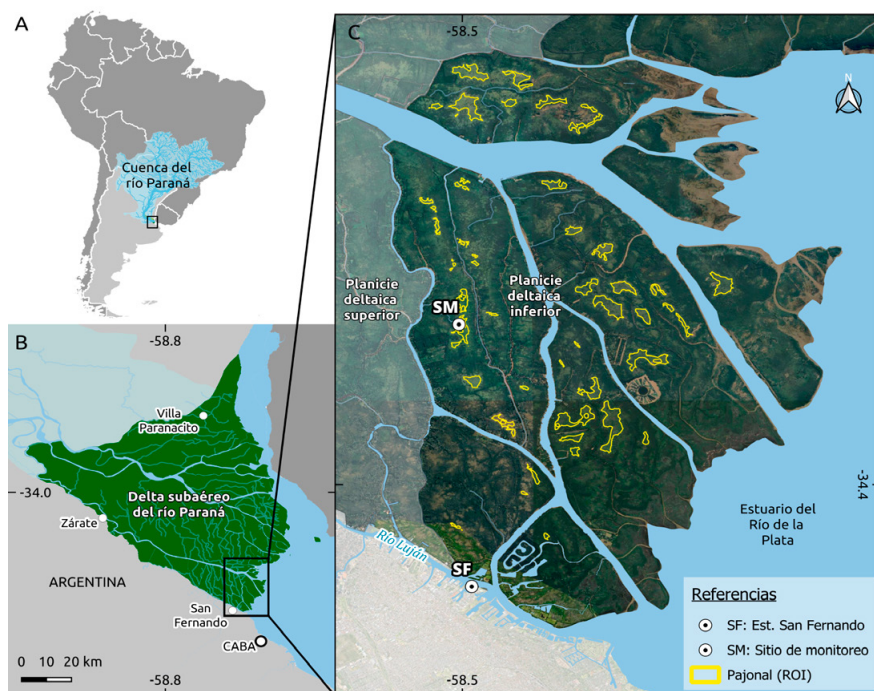


Figura 1. (A) y (B) Ubicación de la zona de estudio, (C) Detalle del área de estudio con delimitación del ROI analizado y ubicación de los sensores hidrométricos SM y SF empleados en el modelo hidrológico. Modificado de Quesada y Marco-mini (2025).

2. Métodos

2.1. Área de estudio

El tramo inferior de la cuenca del Río Paraná presenta una extensión de 17 500 km² (Kandus *et al.* 2006), y desemboca en el estuario del Río de la Plata, formando un delta que ocupa una superficie de 2,700 km² (Iriondo y Scotta, 1979). Su sector emergido (delta subaéreo) se encuentra constituido por cursos fluviales que delimitan islas interdistributarias. El área de estudio se ubica dentro de la planicie deltaica inferior (Quesada y Marcomini, 2025), caracterizada por la presencia de canales de marea que configuran la dinámica hidrológica local (Figura 1). Éstos se desarrollan sobre islas de morfología alargada, con orientación predominante sureste y dimensiones promedio cercanas a 9 km de largo por 3 km de ancho.

El interior de estas islas tiene forma de cubeta, una depresión central rodeada por un albardón perimetral, que se anega periódicamente (Kandus *et al.* 2003). En condiciones normales la elevación del albardón perimetral restringe la entrada del agua al interior de las islas y sólo se registran flujos superficiales bidireccionales durante las pleamares de gran magnitud que ocurren durante los eventos de sudestadas. Mientras los albardones se fijan por el crecimiento de la vegetación, la isla crece verticalmente por el aporte sedimentario de los sucesivos pulsos de inundación (Kokot y Codignotto, 2014).

Desde una perspectiva ecológica, en el centro de las islas interdistributarias se emplazan humedales costeros influenciados por mareas de agua dulce con alta productividad primaria (Mitsch y Gosselink, 2000). Estos ecosistemas se encuentran conformados por praderas de herbáceas altas graminiformes dominadas por la ciperácea *Scirpus giganteus*, también conocida como cortadera o paja brava, a los que suelen denominar pajonales. Estos pajonales suelen desarrollarse sobre suelos saturados y ocasionalmente inundados, poseen una densidad vertical casi uniforme, una altura promedio de 2 metros, y fenología perenne. En el centro de las islas se extienden formando asociaciones casi monoespecíficas con diferentes arbustos y escasos árboles presentes de manera aislada y con baja cobertura (Kandus *et al.*, 2003; Pratolongo y Kandus, 2005).

2.2. Procesamiento y evaluación de datos satelitales

Para la investigación se emplearon imágenes adquiridas por sensores de radar de apertura sintética a bordo de las misiones ALOS-2 PALSAR-2 (A2P2) de la Agencia Espacial Japonesa (JAXA) y Sentinel-1 (S1) de la Agencia Espacial Europea (ESA), debido a su accesibilidad y amplia cobertura temporal en el área de estudio.

El análisis incluyó el procesamiento de imágenes radar adquiridas en la zona de estudio y la calibración de un modelado físico basado en el registro de alturas hidrométricas monitoreadas en la zona de estudio y datos satelitales de precipitaciones. Por último se evaluó la señal retrodispersada para cada esquema de adquisición en función del modelo hidrométrico obtenido, a partir del coeficiente de correlación de Spearman y la elaboración de modelos aditivos generalizados (GAM) (Figura 2).

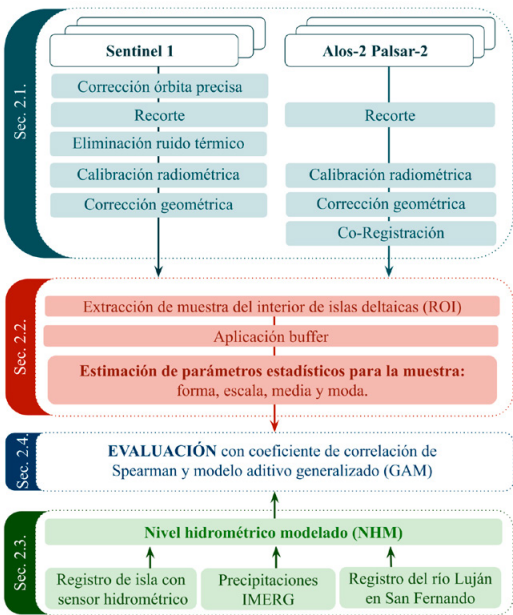


Figura 2. Esquema metodológico utilizado para el análisis.

Para el análisis se empleó un enfoque temporal con tres series de imágenes, priorizando esquemas de adquisición que tuvieran alta disponibilidad de imágenes en la zona de estudio ($n > 40$), con la finalidad de capturar una mayor variabilidad en las condiciones de anegamiento.

Para ambas misiones satelitales se descargaron productos con nivel de procesamiento *Ground Range Detected* (GRD) de los respectivos portales de imágenes de la agencia espacial japonesa JAXA (<https://gportal.jaxa.jp>) y europea ESA (<https://browser.dataspace.copernicus.eu>). Se aplicaron distintos preprocesamientos con el *software* SNAP (ESA): se actualizaron los metadatos orbitales, se aplicaron las correcciones de eliminación de ruido térmico (solo en S1), calibración radiométrica y corrección geométrica basada en el modelo elipsoidal terrestre debido a que se trata de una zona sin pendiente. Este flujo de correcciones se encuentra alineado con los resultados obtenidos por Flores-Anderson *et al.* (2023), donde concluye que no es recomendable utilizar productos GRD sin correcciones radiométricas ni geométricas para ninguna aplicación. Por último se truncaron los valores de píxeles menores al NEZS (*Noise Equivalent Sigma Zero*) correspondiente a cada configuración de adquisición, ya que el ruido de fondo de los instrumentos satelitales reduce la sensibilidad de las señales con retrodispersión débil como el agua (JAXA, 2017; Torres *et al.*, 2017) (esquema de preprocesamiento en Figura 2, valor de NEZS para cada configuración satelital en Tabla 1). Adicionalmente, fue

necesario corregir las imágenes A2P2 debido a las importantes variaciones de georreferenciación observadas entre escenas. Como resultado, se obtuvieron tres series temporales de imágenes con distintas longitudes de onda y polarizaciones, L-HH/HV (A2-P2) y C-VH/VV (S1) (polarización disponible en S1 en este sector de la Tierra) y ángulos de incidencia que abarcan las tres categorías propuesta por Wohlfart *et al.* (2018) para ángulos empinados (<28°), medios (28-38°) y rasantes (>38°) (más características técnicas en Tabla 1).

Para la conformación de la muestra espacial se seleccionaron islas interdistributarias ubicadas entre el Río Paraná de las Palmas y el Río Luján, cuyos interiores presentan una cobertura homogénea de vegetación de pajonal. La región de interés (ROI) fue delimitada en el software QGIS a partir de la interpretación visual de imágenes ópticas, resultando en la selección de 15 islas interdistributarias cuyos pajonales sumaban una superficie total de 1,6 km². Con el fin de minimizar los errores asociados a la mezcla de distintas coberturas vegetales, se aplicó un buffer equivalente al tamaño de un píxel en las imágenes de la misión A2P2 y de dos píxeles en las imágenes de la misión S1.

Tabla 1. Parámetros de adquisición generales de las misiones analizadas y particulares de las tres series de imágenes disponibles en zona de estudio y para la muestra espacial.

Parámetros de adquisición radar generales para las misiones satelitales				
Parámetros de adquisición	ALOS-2 PALSAR-2 (A2P2)		Sentinel-1 (S1)	
Longitud de onda	L (1,236 GHz - 23,6 cm)		C (5,405 GHz - 5,3 cm)	
Modo de adquisición	ScanSAR		Interferometric Wide-swath	
Tipo de órbita	Descendente		Mode (IW)	
Nivel de procesamiento	L1.5 - GRD		Descendente	
Tamaño de píxel [m]	25x25		L1C - GRD	
Ruido de fondo (NESZ)	25x25		10x10	
	σ_{HH} : -36 dB	σ_{HV} : -46 dB	σ_{VH} : -24 dB	σ_{VV} : -24 dB
Parámetros de adquisición radar específicos para las series de imágenes analizadas				
Código de la serie	A2P2-P123	A2P2-P124	S1	
Polarizaciones	HH - HV	HH - HV	VV - VH	
Path	123	124	141	
Row	4300	4300	697	
Nº imágenes analizadas	42	44	113	
Nº imágenes por estación	V:10, O:9, I:14, P:9	V:10, O:13, I:13, P:8	V:30, O:25, I:29, P:29	
Período analizado	2015 - 2022	2015 - 2023	2015 - 2019	
Ángulo de incidencia medio [°]	38,3±11	38,3±11	38,0±8	
Parámetros de adquisición radar de cada serie de imágenes para la región de interés				
Ángulo de incidencia medio para el ROI [°]	37,5	26,1	32,2	
Cantidad de píxeles del ROI	~80 000	~80 000	~500 000	

Posteriormente, se procedió a la extracción y procesamiento de la región de interés para las tres series temporales de imágenes, utilizando librerías especializadas en el manejo de datos espaciales en Python: Rasterio (Gillies *et al.*, 2013), Geopandas (Kelsey *et al.*, 2020) y GDAL (GDAL/OGR contributors, 2024). Se excluyeron del análisis las imágenes adquiridas durante eventos de sudestada, ya que representaban una proporción mínima dentro de las tres series temporales y no se ajustaban al objetivo del estudio.

Como resultado, se generaron tres series de datos con distintas configuraciones de adquisición compuestas de 42 imágenes adquiridas en un período 7 años para A2P2-P123, 44 imágenes en 8 años para A2P2-P124 y 113 adquisiciones en 4 años para S1, distribuidas a lo largo de las cuatro estaciones del año (Tabla 1).

Para cada fecha se calcularon distintos parámetros estadísticos descriptivos de la región de interés para las bandas co-polarizadas (Co) y con polarización

cruzada (PC). Dado que el coeficiente de retrodispersión en áreas radiométricamente homogéneas responde una distribución tipo Gamma (Lee *et al.*, 1994), se estimaron los parámetros característicos de dicha distribución: forma (σ) y escala (λ); y las medidas de tendencia central de dicha distribución: media ($\mu = \sigma \cdot \lambda$) y moda ($\mu_0 = (\sigma - 1) \cdot \lambda$), esta última únicamente cuando $\sigma > 1$. Los cálculos fueron realizados con asistencia de las librerías Pandas (Pandas Development Team, 2020) y Scikit-learn (Pedregosa *et al.*, 2011).

En una de las islas ubicadas en el centro oeste de la región de interés (Figura 1), se realizaron relevamientos de campo entre los años 2021 y 2022, y se instaló un sensor hidrométrico (*levellogger*) que registró el nivel de agua y temperatura horaria del agua desde octubre de 2021 hasta febrero de 2022 (Figura 3). El registro permitió conocer la dinámica hidrológica del interior de la isla y modelar el comportamiento de este ecosistema, integrando datos de precipitaciones estimados para la zona a partir del modelo IMERG de la

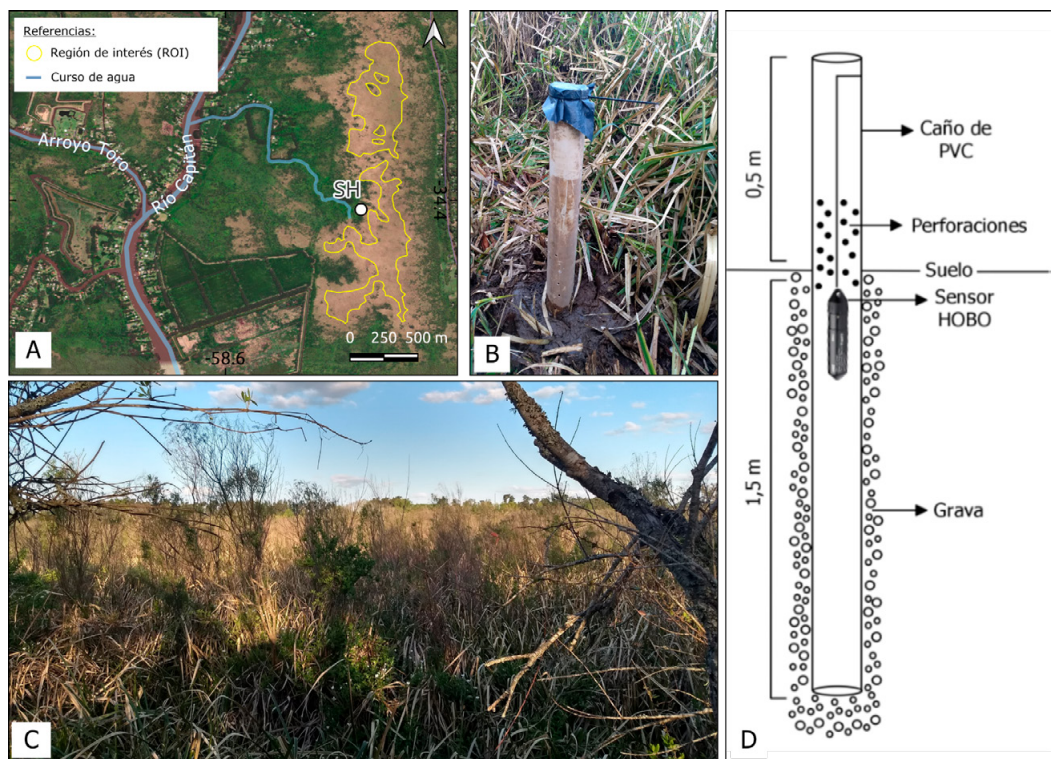


Figura 3. (A) Ubicación del sensor hidrométrico instalado cerca de una de las islas muestreadas (ROI), (B) Pozo instalado en el pajonal, (C) Cobertura vegetal de pajonal en el interior de la isla, (D) Esquema de instalación del pozo y sensor *levellogger*.

NASA (mayor detalle en Complemento A). De este modo, se obtuvo un nivel hidrométrico modelado (NHM) del interior de la isla con un valor de RMSE de 5.08 cm y eficiencia de Nash–Sutcliffe (Nash y Sutcliffe, 1970) que alcanzó un valor de 0,828 indicando un muy buen ajuste para el período de evaluación. El modelo se estimó para el período de adquisición de las imágenes analizadas, que abarca desde el año 2014 hasta el año 2024 (ver características y construcción del modelo hidrométrico en Complemento A).

Para evaluar la respuesta de la señal retrodispersada de la muestra espacial (ROI) de los pajonales en relación al modelado NHM se utilizaron el coeficiente de correlación de Spearman y Modelos Aditivos Generalizados (GAM, por sus siglas en inglés). Se seleccionó el coeficiente de correlación de Spearman debido a la ausencia de normalidad en las variables a correlacionar y a la presencia de relaciones no lineales. En función de los resultados obtenidos, se aplicaron modelos GAM con el objetivo de explorar relaciones lineales y no lineales entre la respuesta retrodispersada con los cambios del modelado NHM y de otras variables potencialmente explicativas. Se seleccionó como variable respuesta la moda de la señal retrodispersada por los pajonales, por considerarse el parámetro estadístico más representativo de la muestra espacial (ROI). Dado que la señal de retrodispersión radar es sensible a las propiedades dieléctricas (contenido de humedad del suelo y de la vegetación) y a los atributos geométricos (rugosidad superficial, estructura de la vegetación) de la superficie captada (Henderson y Lewis, 2008), se eligieron como variables el tiempo transcurrido desde la última inundación (TUI), el índice óptico de vegetación NDVI calculado con la colección satelital MOD09A1 de MODIS (NASA), el modelo NHM y el tiempo de sedimentación (TS) en interior de la isla desde el inicio del análisis. El número de días transcurridos desde la última inundación (TUI) se utilizó como indicador del contenido de humedad del suelo, y fue calculada iniciando un conteo de tiempo en días desde el momento que se genera el cambio de pendiente de la señal del modelo NHM como respuesta al pico de inundación, hasta el momento en que se genera otro cambio de pendiente por el siguiente pico de inundación. El índice NDVI fue calculado con una composición de imágenes de reflectancia en superficie con una resolución espacial de 500 metros y temporal de

8 días, y fue seleccionado como indicador de las variaciones fenológicas estacionales del pajonal. El TS se calculó iniciando un conteo en días desde la primera adquisición satelital incorporada al análisis de este trabajo. Estos análisis se realizaron con el programa R, y en particular los modelos GAM se aplicaron mediante el uso del paquete “mgcv” (Wood, 2017; R Core Team, 2024) (mayor detalle de modelos GAM en Complemento B).

3. Resultados

3.1. Análisis de correlación

Los coeficientes de correlación de Spearman obtenidos para las tres configuraciones de adquisición presentaron asociaciones moderadas a bajas con variados niveles de significancia (Figura 4 y 5), en su mayoría positivas, a excepción de los parámetros de forma y escala que presentaron algunas asociaciones negativas.

En el caso de las bandas co-polarizadas, la configuración de adquisición correspondiente a A2P2-P124 (L-HH) presentó asociaciones moderadas ($\rho=0,63$ - 0,44) y significativas ($p<0,01$) para la escala, moda y media; seguido por la configuración S1(C-VV) con asociaciones débiles

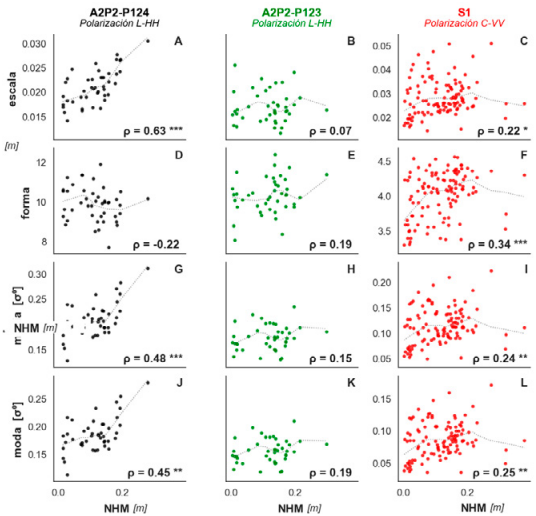


Figura 4. Gráfico de dispersión entre modelado NHM y parámetros estadísticos calculados para las bandas co-polarizadas de cada serie de imágenes por fecha. Se incluye el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) y p-valor expresado con el siguiente código: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; · $p < 0,1$.

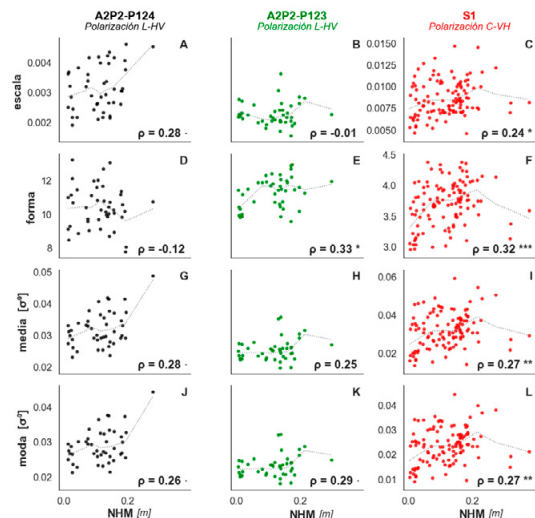


Figura 5. Gráfico de dispersión entre modelado NHM y parámetros estadísticos calculados para las bandas con polarización cruzada de cada serie de imágenes por fecha. Se incluye el coeficiente de correlación de Spearman (ρ) y p-valor expresado con el siguiente código: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; · $p < 0,1$.

($\rho = 0,34 - 0,22$) y significativas ($p < 0,05$) para los cuatro parámetros estadísticos, y finalmente la configuración A2P2-P123 (L-HH) presentó asociaciones débiles a nulas ($\rho = 0,19 - 0,15$) y no significativas ($p > 0,1$) para los parámetros de escala, moda y media (Figura 4).

En el caso de las bandas con polarización cruzada, la configuración de adquisición correspondiente a S1(C-VH) obtuvo asociaciones débiles ($\rho = 0,34 - 0,22$) y significativas ($p < 0,05$) para los cuatro parámetros estadísticos; seguido por la configuración A2P2-P123 (L-HV) que presentó asociaciones débiles ($\rho = 0,33 - 0,25$) de poco a nada significativas ($p < 0,1$) para la forma, moda y media; y finalmente la configuración A2P2-P124 (L-HV) presentó asociaciones débiles ($\rho = 0,28 - 0,26$) y poco significativas ($p < 0,1$) para la escala, moda y media (Figura 5).

3.2. Modelo aditivo generalizado

Se aplicaron modelos GAM para explicar la moda de la señal retrodispersada en el interior de las quince islas interdistributarias para cada esquema de adquisición, incluyendo como variables explicativas el modelo NHM y las tres variables adicionales propuestas. Las variables propuestas

obtuvieron asociaciones significativas con la moda de las bandas co-polarizadas de cada serie de imágenes, a excepción de la variable TUI que presentó, en todos los casos, valores de grados de libertad estimados (edf) cercanos a cero y p-valores no significativos ($p > 0,1$) (mayor detalle del análisis con modelos GAM en Complemento C). Para la configuración A2P2-P124 (L-HH) se logró explicar 80,5 % de la variabilidad total de la moda, para la configuración A2P2-P123 (L-HH) se alcanzó a explicar el 52,8 % de la variabilidad total de la señal, y para la configuración S1 (C-VV) las variables propuestas lograron explicar el 37,9 % de la variabilidad total de la moda del coeficiente de retrodispersión (Figura 6).

En cambio, las tres variables explicativas obtuvieron asociaciones significativas con la respuesta de las bandas con polarización cruzada para las configuraciones de A2P2-P124 (L-HV) y S1 (C-VH), explicando el 50,3 % y 51,7 % de la variabilidad total de la moda respectivamente; en tanto que para la configuración A2P2-P123 (L-HV) se logró explicar el 24,1 % de la variabilidad total de la moda, sin asociaciones significativas con ninguna de las variables respuestas, a excepción de una

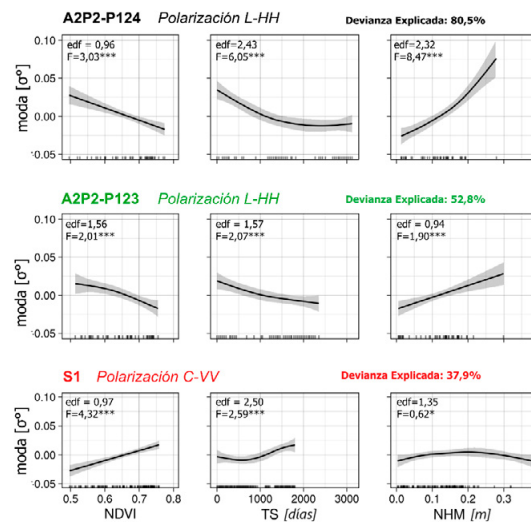


Figura 6. Curvas de suavizado estimadas mediante modelos GAM para la moda co-polarizada en función de las variables explicativas. Se incluyen los grados de libertad estimados (edf), el valor de estadístico (F), su p-valor asociado para cada suavizado, y la devianza total explicada por cada uno de los modelos. Códigos de significancia para p-valor: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; · $p < 0,1$.

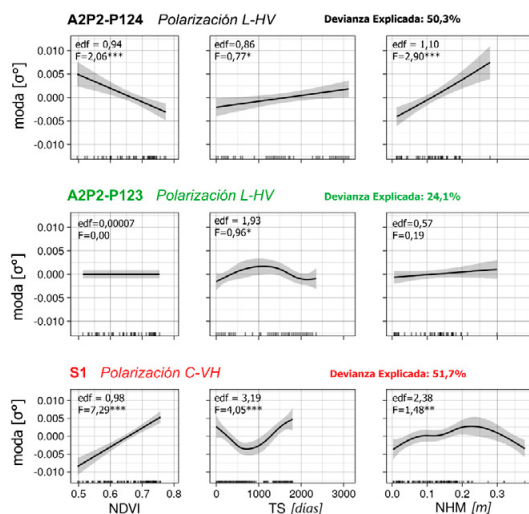


Figura 7. Curvas de suavizado estimadas mediante modelos GAM para la moda con polarización cruzada en función de las variables explicativas. Se incluyen los grados de libertad estimados (edf), el valor de estadístico (F), su p-valor asociado para cada suavizado, y la devianza total explicada por cada uno de los modelos. Códigos de significancia para p-valor: *** $p < 0,001$; ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; · $p < 0,1$.

relación no lineal poco significativa con la variable TS (Figura 7). En todos los casos se excluyó la variable TUI de los gráficos ya que no explicó una variación significativa.

La asociación más fuerte con el modelo hidrométrico NHM se encontró para ambas polarizaciones de la configuración A2P2-P124 ($F_{HH}=8,47^{***}$ y $F_{HV}=2,90^{***}$), mostrando una asociación positiva donde al aumentar el nivel de anegamiento, también se incrementa la moda de la señal radar (Figura 6 y 7).

4. Discusión

La señal retrodispersada depende tanto de la configuración de adquisición satelital —longitud de onda, polarización y ángulo de incidencia— como de las propiedades del objeto observado —estructura de la vegetación, la rugosidad superficial y el contenido de humedad del suelo— (Henderson y Lewis, 1998). De acuerdo a la revisión de Adeli *et al.* (2020), las adquisiciones con bandas C y L, co-polarizadas y ángulos de incidencia empinados ($<28^\circ$), presentan mayor capacidad para detectar

información relacionada al estado hidrométrico por debajo de vegetación emergente en ecosistemas de humedales. Esto se debe a que dichas configuraciones reducen la interacción con la vegetación y, en consecuencia, atenúan menos la señal. En concordancia con ello, en este estudio las asociaciones más fuertes y estadísticamente significativas se obtuvieron con la configuración satelital A2P2-P124 (L-HH), que reúne estas características.

4.1. Ángulos de incidencia

La relación entre el ángulo de incidencia y las condiciones ambientales determina cambios en los mecanismos de retrodispersión. De acuerdo a la bibliografía, para discriminar vegetación inundada de no inundada es necesario utilizar ángulos de incidencia más empinados con el fin maximizar la penetración sobre la vegetación y aumentar así la interacción entre la señal incidente y la combinación de agua y vegetación a través del mecanismo de doble rebote (Dabboor y Brisco, 2019). En estudios realizados en el delta del Río Paraná, se ha observado que la señal radar en banda C genera respuestas del coeficiente de retrodispersión distintas de acuerdo al estrato vegetal y a los ángulos de incidencia (Kandus *et al.*, 2001; Grings *et al.*, 2006; Morandeira *et al.*, 2021). Mientras la vegetación corta es dominada por la interacción directa con el suelo (o agua sobre él), en zonas con coberturas vegetales más densas la contribución del suelo es atenuada por la vegetación y solo puede generar mecanismos de interacción doble rebote con determinados ángulos de incidencia (Grings *et al.*, 2006; Morandeira *et al.*, 2021). En Kandus *et al.* (2001) se estudió la variación de ángulos de incidencia en banda C para juncuales del delta del Río Paraná, y observaron que ángulos de incidencia más empinados favorecen un dominio del mecanismo de doble rebote en juncuales no inundados, mientras que ángulos más rasantes evidencian una atenuación considerable de la señal debido a la dispersión volumétrica. Por su parte, Grings *et al.* (2008) advierte que pequeñas variaciones en el ángulo de incidencia en la banda C generan cambios moderados en la respuesta retrodispersada de los juncuales, mientras que las polarizaciones HH y VV presentan comportamientos diferenciados.

Las series de imágenes analizadas en este trabajo poseen los siguientes ángulos de

incidencia: $37,5^\circ$ (A2P2-P123) $> 32,2^\circ$ (S1) $> 26,1^\circ$ (A2P2-124). Se compararon las respuestas de las dos series de imágenes adquiridas por la misión A2P2, pues las características de adquisición sólo difieren en el ángulo de incidencia. De acuerdo a los resultados, la banda L-HH de la serie de imágenes A2P2-P124 mostró asociaciones significativas más fuerte que la serie de imágenes A2P2-P123 para cada una de las variables explicativas propuestas. En concordancia con la bibliografía (Grings *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2016; Dabboor y Brisco, 2019; Adeli *et al.*, 2020; Morandeira *et al.*, 2021), los resultados del análisis de correlación y modelos GAM determinaron que las adquisiciones co-polarizadas con ángulos empinados (A2P2-P124) son más adecuados para estimar el nivel de agua debajo de vegetación herbácea que la configuración con ángulo de incidencia rasantes (A2P2-P123). Esto posiblemente se debe a que en las interacciones con ángulos más empinados domina el mecanismo de doble rebote, en tanto que para la configuración A2P2-P123, la señal radar sufre más atenuación debido a la vegetación.

4.2. Longitud de onda

Según lo reportado en la literatura, las adquisiciones de la misión A2P2, al operar en banda L ($\lambda \approx 23,5$ cm), deberían presentar una mayor capacidad de penetración en la vegetación de pajonal, facilitando la detección de las variaciones del agua subyacente (Henderson y Lewis 2008; Whitcomb *et al.* 2007; Zhang *et al.* 2016). Por el contrario, la banda C ($\lambda \approx 5,66$ cm), con una longitud de onda menor, presenta una capacidad de penetración reducida y una mayor sensibilidad a los parámetros estructurales de las plantas (Ramsey, 1999; Morandeira *et al.*, 2021). En numerosos trabajos se ha observado el aumento de la retrodispersión de la banda C con el aumento del nivel de agua debajo de coberturas herbáceas de baja densidad. En este trabajo se evaluó la penetración de la señal radar sobre vegetación herbácea alta y densa de los pajonales, utilizando como indicador de la fenología vegetal el índice óptico NDVI calculado para el interior de las islas (ROI) a partir de la misión satelital MODIS. Los resultados del trabajo mostraron que la serie de imágenes S1, en ambos tipos de polarización, mostraron asociaciones más fuertes y significativas con el índice NDVI

que con el modelo NHM. Este comportamiento podría indicar que una proporción significativa de la variabilidad captada por el sensor S1 se encuentra vinculada a los cambios fenológicos de los pajonales, mientras que la componente con el suelo y el agua parecería ejercer una influencia secundaria sobre la señal radar en banda C. Roßberg y Schmitt (2025), analizan la relación entre la señal retrodispersada de sistemas radar y el índice NDVI de sistemas ópticos para diversos tipos de vegetación, y concluyen que la relación es compleja y dependientes tanto de las características de la vegetación —fenología, forma de las plantas y disposición de las hojas— pero también del esquema de adquisición SAR —frecuencia, polarización, ángulo de incidencia y orientación del terreno—.

En el análisis de modelos GAM, se evidencia que la señal retrodispersada de la misión satelital A2P2 presenta respuestas con tendencias semejantes entre sí y diferenciadas respecto a la configuración S1 para las variables explicativas propuestas. A partir de estos resultados se podría inferir que las series de imágenes adquiridas en banda L por la misión satelital A2P2 poseen mayor capacidad de penetración sobre la vegetación, y brinda más información acerca del estado hídrico del humedal a través de la interacción de doble rebote. En cambio, la banda C de la misión S1, debido a la altura y densidad de los pajonales estudiados, responde principalmente a los cambios fenológicos estacionales de la vegetación dominadas por la dispersión en volumen. En este sentido, la longitud de onda de la señal radar emerge como el principal factor de la configuración satelital que condiciona la capacidad de monitorear la presencia de agua debajo de la vegetación de pajonal durante eventos de inundación ordinaria.

4.3. Análisis GAM

Las asociaciones evaluadas a partir del coeficiente de Spearman, presentaron valores de moderados a bajos, aunque con elevados niveles de significancia estadística. El empleo de modelos GAM aportó un marco analítico complementario al análisis de correlación y permitió incorporar variables explicativas adicionales al modelo NHM, alcanzando explicar desde el 24,1% al 80,5% de la señal retrodispersada por el interior de las islas interdistritarias para las distintas



configuraciones satelitales. En líneas generales las variables explicativas consideradas realizaron aportes estadísticamente significativos al modelo, con la única excepción de la variable TUI. Así la implementación de modelos GAM permitió evaluar la influencia de factores adicionales al modelo hidrométrico NHM para mejorar la interpretación de los mecanismos de interacción dominantes en cada caso.

Las asociaciones más fuertes con el modelo hidrométrico NHM resultaron del dominio del mecanismo de doble rebote, generando un incremento de la señal retrodispersada a medida que aumenta el nivel de inundación, efecto que se ve más acentuado en las adquisiciones co-polarizadas en banda L con ángulos de incidencia empinados. El otro mecanismo de interacción propuesto fue la dispersión en volumen, representado por la variación del índice NDVI, que produce un atenuamiento en la retrodispersión, mecanismo con mayor influencia en las adquisiciones en banda C, con polarización cruzada y ángulos de incidencia más bajos.

5. Conclusiones

Este estudio evalúa la capacidad que poseen tres esquemas de adquisición satelital para detectar la presencia de agua en el interior de 15 islas dominadas por vegetación de pajonal (*Scirpus giganteus*) en el delta del Río Paraná. Se compararon las misiones satelitales ALOS-2 Palsar-2 (A2P2) y Sentinel-1 (S1) a través de tres esquemas de adquisición con distintas longitudes de onda, polarizaciones y ángulos de incidencia: L-HH/HV-26,1° (A2P2-P124), L-HH/HV-37,5° (A2P2-P123) y C-VH/VV-32,2° (S1). La respuesta de señal retrodispersada se evaluó en relación a un modelo hidrométrico calibrado para la presente investigación, concluyendo que la detección de áreas inundadas bajo la vegetación de pajonal varía significativamente de acuerdo al esquema de adquisición satelital. El coeficiente de correlación de Spearman mostró asociaciones de moderadas a débiles con distintos niveles de significancia estadística para la señal retrodispersada en relación al modelado NHM. Los valores de coeficientes más elevados (ρ entre 0,44 y 0,63) y significativos ($p < 0,01$) con el modelo NHM fueron los correspondientes al esquema de adquisición en banda L,

co-polarizada con ángulo de incidencia empinado (A2P2-P124).

A partir del análisis realizado mediante modelos GAM, se postula que existen componentes estacionales e interanuales que introducen variabilidad en la señal radar no explicada por el nivel de anegamiento modelado. La componente estacional se asocia principalmente a los cambios fenológicos de la vegetación de cortadera a lo largo del año, representada por el índice óptico de vegetación NDVI; mientras que la variabilidad interanual, representada por la variable TS, se atribuye al proceso de sedimentación que ocurre en el interior de las islas durante el período analizado y a los cambios de humedad generados en el ambiente debido al efecto de las crecientes del Río Paraná, las mareas lunares y eólicas.

En el caso de la configuración de adquisición S1, el índice NDVI explica mayor variabilidad de la respuesta radar que el modelo NHM, especialmente en la banda con polarización cruzada. En cambio, las dos configuraciones de adquisición de la misión A2P2 —que difieren únicamente en el ángulo de incidencia— muestran asociaciones de comportamiento similar, aunque la configuración con ángulo de incidencia más empinado (A2P2-P124) presenta correlaciones fuertes y significativas con las variables explicativas NHM, NDVI y TS. En este trabajo se plantea que los mecanismos de doble rebote constituyen el principal aporte de información para inferir el estado de anegamiento en el interior de las islas deltaicas. Dicho mecanismo tiende a ser predominante en configuraciones con mayor longitud de onda (banda L), especialmente para las bandas co-polarizadas y ángulos de incidencia empinados. Por otro lado, la dispersión volumétrica se asocia principalmente a variaciones estructurales y fenológicas de la vegetación de pajonal, resultando más significativa en banda C, con polarización cruzada y ángulos de incidencia rasantes.

Este estudio contribuye a identificar las capacidades y limitaciones de los sistemas SAR en bandas L y C, bajo distintas configuraciones de adquisición, para el análisis de la dinámica hidrológica en humedales de agua dulce con coberturas densas y altas de pajonal. No obstante, se destaca la necesidad de continuar evaluando y comparando diferentes modalidades de adquisición SAR, a fin de profundizar la comprensión de las interacciones

radar-agua-vegetación y avanzar hacia el desarrollo de herramientas de monitoreo más robustas para el seguimiento de funciones ecosistémicas en humedales.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) de Argentina y a la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) por la provisión de imágenes satelitales ALOS-2 a través del convenio colaborativo ER3A2N547 en el marco de la convocatoria EO-RA3 del Centro de Investigaciones sobre Observaciones de la Tierra (EORC).

Financiación

Esta investigación fue financiada por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de Argentina otorgado a través del proyecto PICT 04001-2020 (PRÉSTAMO BID).

Contribución de autoría

En este trabajo el procesamiento de imágenes, análisis e interpretación de datos y redacción del manuscrito estuvieron a cargo de la Lic. Verónica Kwaterka; la construcción del modelado hidrométrico estuvo a cargo del Ing. Jonathan Tissoni; el análisis estadístico estuvo a cargo de la Dra. Laura Calfayan; y el diseño de la investigación, la obtención y administración del proyecto de financiamiento, la definición del esquema metodológico, la interpretación de resultados y revisión del manuscrito estuvieron a cargo de la Dra. Mercedes Salvia y el Dr. Rafael Grimson.

Conflictos de interés

Los autores declaran que no tienen conflictos de interés.

Declaración sobre la IA generativa y las tecnologías asistidas por IA en el proceso de escritura

Durante la preparación de este trabajo, los autores utilizaron ChatGPT con el propósito de mejorar la redacción de la publicación. Después de utilizar esta herramienta/servicio, el/los autor(es) revisaron y editaron el contenido según fue necesario y asumen plena responsabilidad por el contenido de la publicación.

Referencias

- Adeli, S., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L.J., Brisco, B., Tamiminia, H., Shaw, S. 2020. Wetland monitoring using SAR data: A meta-analysis and comprehensive review. *Remote Sensing*, 12(14), 2190. <https://doi.org/10.3390/rs12142190>
- Brinson, M.M. 1993. *A hydrogeomorphic classification for wetlands* (Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-4). U.S. Army Corps of Engineers.
- Dabboor, M., Brisco, B. 2019. Wetland monitoring and mapping using synthetic aperture radar. In D. Gokce (Ed.), *Wetlands management: Assessing risk and sustainable solutions* (pp. 61-86). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.80224>
- Ericson, J.P., Vorosmarty, C.J., Dingman, S.L., Ward, L.G., Meybeck, M. 2006. Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications. *Global and Planetary Change*, 50, 63-82. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2005.07.004>
- Flores-Anderson, A.I., Parache, H.B., Martin-Arias, V., Jiménez, S.A., Herndon, K., Mehlich, S., Meyer, F.J., Agarwal, S., Ilyushchenko, S., Agarwal, M., Nicolau, A., Markert, A., Saah, D., Cherrington, E. 2023. Evaluating SAR radiometric terrain correction products: Analysis-ready data for users. *Remote Sensing*, 15(21), 5110. <https://doi.org/10.3390/rs15215110>
- GDAL/OGR contributors. 2024. *GDAL/OGR geospatial data abstraction software library* [Computer software]. Open Source Geospatial Foundation. <https://gdal.org>
- Gillies, S., et al. (2013-). *Rasterio: Geospatial raster I/O for Python programmers* [Computer software]. Mapbox. <https://github.com/rasterio/rasterio>
- Grings, F.M., Ferrazzoli, P., Jacobo-Berlles, J.C., Karszenbaum, H., Tiffenberg, J., Pratolongo, P., Kandus, P. 2006. Monitoring flood condition in marshes using EM models and ENVISAT ASAR observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 936-942. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.863482>
- Grings, F.M., Ferrazzoli, P., Karszenbaum, H., Salvia, M., Kandus, P., Jacobo-Berlles, J.C., Perna, P. 2008. Model investigation about the potential of C band SAR in herbaceous wetlands flood monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 29(17-18), 5361-5372. <https://doi.org/10.1080/01431160802036409>



- Guizzardi, S., Bianchi, J., Cortese, J.E., Uriburu Quirno, M., Sabarots Gerbec, M. 2022. Forecast system implementation in the Paraná Delta. In *IAHR World Congress*, Granada, Spain. <https://doi.org/10.3850/IAHR-39WC2521711920221831>
- Henderson, F.M., Lewis, A.J. 1998. *Principles and applications of imaging radar: Manual of remote sensing* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Henderson, F.M., Lewis, A.J. 2008. Radar detection of wetland ecosystems: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 29(20), 5809-5835. <https://doi.org/10.1080/01431160801958405>
- Iriondo, M., Scotta, E. 1979. The evolution of the Paraná River delta. In *Proceedings of the 1978 International Symposium on Coastal Evolution in the Quaternary* (pp. 405-418). São Paulo, Brazil.
- JAXA/EORC. 2024. *Calibration result of ALOS-2*. https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/calval/calval_index.htm
- Kandus, P., Karszenbaum, H., Pultz, T., Parmuchi, G., Bava, J. 2001. Influence of flood conditions and vegetation status on the radar backscatter of wetland ecosystems. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 27(6), 651-662. <https://doi.org/10.1080/07038992.2001.10854907>
- 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.
- Kandus, P., Quintana, R.D., Bó, R.F. 2006. *Landscape patterns and biodiversity of the lower delta of the Paraná River: Land cover map*. Pablo Casamajor.
- Kelsey, J., Van den Bossche, J., Fleischmann, M., Wasserman, J., McBride, J., Gerard, J., ... Leblanc, F. 2020. *geopandas/geopandas: v0.8.1* (Version v0.8.1) [Computer software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3946761>
- Kokot, R., Codignotto, J. 2014. Geología y geomorfología del Delta del Paraná. In *El Delta Bonaerense: Naturaleza, conservación y patrimonio cultural* (pp. 23-37). Fundación de Historia Natural Félix de Azara.
- Lee, J.S., Hoppel, K.W., Mango, S.A., Miller, A.R. 1994. Intensity and phase statistics of multilook polarimetric and interferometric SAR imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(5), 1017-1028. <https://doi.org/10.1109/36.312890>
- Millard, K., Richardson, M. 2018. Quantifying the relative contributions of vegetation and soil moisture conditions to polarimetric C-band SAR response in a temperate peatland. *Remote Sensing of Environment*, 206, 123-138. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.011>
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G. 2000. *Wetlands* (Third edition). New York (USA): John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/rrr.637>
- Morandeira, N.S., Barber, M.E., Grings, F.M., Ahern, F., Kandus, P., Brisco, B. 2021. Response of multi-incidence angle polarimetric RADARSAT-2 data to herbaceous vegetation features in the lower Paraná River floodplain, Argentina. *Remote Sensing*, 13(13), 2518. <https://doi.org/10.3390/rs13132518>
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Pandas Development Team. 2020. *pandas-dev/pandas: Pandas* (Version latest) [Computer software]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3509134>
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ..., Duchesnay, É. 2011. Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.
- Pratolongo, P., Kandus, P. 2005. Dinámica de la biomasa aérea en pajonales de *Scirpus giganteus* y juncales de *Schoenoplectus californicus* en la zona frontal del Bajo Delta del río Paraná (Argentina). *Ecotrópicos*, 18, 30-37.
- Quesada, A., Marcomini, S.C. 2025. Evolución geomorfológica de canales distributarios en el frente sudoriental del delta del Paraná (Tigre, Buenos Aires, Argentina). *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 77(3), A110925. <https://doi.org/10.18268/BSGM2025v77n3a110925>
- R Core Team. 2024. *R: A language and environment for statistical computing* [Computer software]. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Ramsey, E., III. 1999. Radar remote sensing of wetlands. In *Remote sensing change detection* (pp. 211-243). Ann Arbor Press.
- Roßberg, T., Schmitt, M. 2025. Comparing the relationship between NDVI and SAR backscatter across different frequency bands in agricultural areas. *Remote Sensing of Environment*, 319, 114612. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.114612>

- Salvia, M., Grings, F., Karszenbaum, H., Ferrazzoli, P., Kandus, P., Soldano, A., Guerriero, L. 2008. Monitoring inundation dynamics in Paraná River, Argentina, by C and L band SAR. In *IGARSS 2008 - 2008 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (Vol. 1, p. I-102). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4778803>
- Torres, R., Navas-Traver, I., Bibby, D., Lokas, S., Snoeij, P., Rommen, B., Osborne, S., Ceba-Vega, F., Potin, P., Geudtner, D. 2017. Sentinel-1 SAR system and mission. In *Proceedings of the 2017 IEEE Radar Conference (RadarConf)* (pp. 1582-1585). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2017.7944460>
- Violante, R.A., Cavallotto, J.L., Kandus, P. 2008. Río de la Plata y delta del Paraná. In *Sitios de interés geológico de la República Argentina* (Anales 46, II, pp. 461-475). Instituto de Geología y Recursos Minerales - Servicio Geológico Minero Argentino.
- Whitcomb, J., Moghaddam, M., McDonald, K., Podest, E., Kelndorfer, J. 2007. Wetlands map of Alaska using L-band radar satellite imagery. In *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 2487-2490). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4423348>
- Wohlfart, C., Winkler, K., Wendleder, A., Roth, A. 2018. TerraSAR-X and wetlands: A review. *Remote Sensing*, 10(6), 916. <https://doi.org/10.3390/rs10060916>
- Wood, S.N. 2017. *Generalized additive models: An introduction with R*. Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781315370279>
- Zhang, M., Li, Z., Tian, B., Zhou, J., Tang, P. 2016. The backscattering characteristics of wetland vegetation and water-level changes detection using multi-mode SAR: A case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 45, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.10.001>