



CARTOGRAFÍA COMPARADA DE INUNDACIONES CON IMÁGENES SAR. CASO RÍO SANTA LUCÍA.

*Alicia Roxana Blanco¹
María Mercedes Salvia^{2,3}*

(Manuscrito recibido el 16 de julio de 2024, en versión final 12 de noviembre de 2024)

Para citar este documento

Blanco, A.R. & Salvia, M.M. (2024). Cartografía Comparada de Inundaciones con Imágenes SAR. Caso Río Santa Lucía. *Boletín geográfico*, 45, <https://id.caicyt.gov.ar/ark:/s2313903x/l2zexfqyq>

Resumen

Las inundaciones se encuentran entre los peligros más frecuentes y extensos a nivel mundial y se espera un aumento de los eventos en todo el mundo debido al crecimiento de la población en las áreas expuestas, el crecimiento económico y el cambio climático (Rojas *et al.*, 2022). El objetivo de este trabajo es comparar las capacidades de las bandas C y L de imágenes radar de apertura sintética (SAR, por su sigla en inglés) para cartografiar inundaciones, que permita, por una parte, el conocimiento y conservación de los humedales fluviales, y por otra, contribuir al ordenamiento territorial reduciendo la ocupación urbana en estas zonas expuestas a frecuentes inundaciones. Para ello, se generaron mapas de clases de cambio del coeficiente σ_0 utilizando las imágenes SAR en dos frecuencias: Banda C y Banda L, en condiciones de no-inundación e inundación. Luego se analizaron los mecanismos de interacción dominante entre el coeficiente de retrodispersión σ_0 y la vegetación presente que sumado a criterios estadísticos permitieron generar cartografías de inundaciones. Utilizando como verdad de campo puntos que reflejaron la extensión de la inundación en sitios indicados por los pobladores, así como cartografía de

¹ Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y Agrimensura (FACENA), Universidad Nacional del Nordeste. 9 de Julio 1449. 3400, Corrientes, Argentina. E-mail: agrim.blancoalicia@gmail.com. ² Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Godoy Cruz 2290, C1414, CABA. E-mail: mercedes.salvia@conicet.gov.ar. ³ Grupo de Teledetección Cuantitativa, Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE, UBA-CONICET). Pabellón IAFE, Ciudad Universitaria, C1428, CABA. E-mail: msalvia@iafe.uba.ar.

inundación realizada en la zona con anterioridad, se evidenció la superioridad de la Banda L para detectar la extensión de las inundaciones, sin embargo, ambos sistemas mostraron una importante sensibilidad a la condición de inundación.

Palabras clave: delimitación de inundaciones, Argentina, mecanismos de interacción, ordenamiento territorial, teledetección

COMPARATIVE FLOOD MAPPING USING SAR IMAGES: THE SANTA LUCÍA RIVER CASE

Abstract

Floods are among the most frequent and widespread hazards worldwide. An increase in flood events is anticipated due to population growth in exposed areas, economic growth and climate change (Rojas *et al.*, 2022). This study aims to compare the capabilities of C- and L-band synthetic aperture radar (SAR) images for flood mapping. This approach provides insight into the conservation of river wetlands and contributes to land use planning by minimizing urban development in areas prone to frequent flooding. To achieve this, maps depicting changes in the σ_0 coefficient were generated using SAR images captured at two frequencies: C-Band and L-Band, under both flood and non-flood conditions. Subsequently, dominant interaction mechanisms between the backscatter coefficient σ_0 and the existing vegetation were analyzed. combined with statistical criteria thee analyses facilitated the generation of flood maps. Ground truth points reflecting flood extent as reported by local residents and previously conducted flood mapping in the area, demonstrated, the superior performance of the L-Band in detecting flood extent. However, both systems showed significant sensitivity to flood conditions.

Keywords: flood delimitation, Argentina, interaction mechanisms, land use planning, remote sensing

Introducción

La expansión urbana en zonas ribereñas y la falta de ordenamiento territorial fomentan el uso de estas, incrementando así la exposición a inundaciones y, por tanto, el riesgo ante ellas. En este sentido, muchos de los fenómenos naturales amenazantes, como son las inundaciones, se desencadenan más que por el agua, por el mal manejo que le damos a ella y al territorio.” Los niveles de crecimiento de la urbanización costera han alcanzado velocidades y complejidades tales que requieren una rápida respuesta de planificación del paisaje” (Munizaga *et al.*, 2022, 2). Debido a esto y al cambio climático, se espera un aumento mundial de la frecuencia de inundaciones. En este sentido, la mayoría de los métodos utilizados para la identificación de áreas

inundadas corresponde a: históricos, geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos (Pérez Morales 2012; Delgado Noguera 2019). Además, cada vez es más frecuente el uso de técnicas de percepción remota, (Flores Lorenzo & Dávila Hernández 2018). Estas últimas se vuelven especialmente importantes cuando las zonas de inundación son de gran extensión y de limitada accesibilidad, como ocurre con los humedales en general. En este sentido, dentro la percepción remota, las técnicas de teledetección óptica no suelen ser adecuadas debido a que la cobertura nubosa del área y el dosel de la vegetación (especialmente la arbórea) suelen obstruir la visión del agua por parte del sensor. Pero a diferencia de éstos, los radares de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés), que operan en las longitudes de onda de las microondas, tienen como una de sus principales ventajas para mapear las inundaciones, su independencia de las condiciones atmosféricas, de iluminación y la capacidad de cartografiar las inundaciones en zonas vegetadas (Arnesen *et al.*, 2013; Rahman & Thakur 2018; Zozaya *et al.*, 2020; Sevillano *et al.*, 2020). Al mismo tiempo, ha demostrado ser una eficaz herramienta para detectar inundaciones bajo el bosque (Hess, *et al.*, 1990; Townsend *et al.*, 1998). Esto es posible debido a que las ondas más largas se asocian generalmente con una mayor penetración de doseles forestales, particularmente cuando las longitudes de onda son mayores que el tamaño de la hoja (Pope, Rey Benayas & Paris 1994; Townsend & Walsh 1998). Particularmente, en los humedales como las llanuras de inundación de los ríos, la tecnología SAR ha demostrado ser capaz de proporcionar información acerca de la estructura de la vegetación y las condiciones hidrológicas debajo de ellas (Grings *et al.*, 2006, Munizaga *et al.*, 2022), debido a los cambios en el coeficiente de retrodispersión en varias frecuencias y polarizaciones para diferentes tipos de vegetación herbácea en estas zonas (Hess *et al.*, 1995). Esto se debe a que el coeficiente de retrodispersión medido (σ_0 , magnitud física que mide el radar) es sensible tanto a las características de la vegetación como a la condición de humedad del suelo, por lo que “la presencia o ausencia de agua (que tiene una constante dieléctrica mucho más alta que la tierra seca o húmeda) puede alterar apreciablemente el σ_0 medido, dependiendo del tipo de vegetación dominante, su densidad y altura” (Grings 2008, 5-2).

Existen numerosos trabajos donde se han aplicado datos SAR en distintas partes del mundo, con diferentes frecuencias y con diversas técnicas, para obtener la extensión de la inundación. En los trabajos más recientes, los métodos más utilizados fueron clasificación supervisada a nivel objeto (Donezar Hoyos *et al.*, 2017; Sevillano Rodríguez *et al.*, 2020, Munizaga *et al.*, 2022) técnicas de segmentación por umbrales óptimos y clasificación (San Martín *et al.*, 2015; Berezowski *et al.*, 2020) y segmentación por umbrales (Rahman & Thakur 2018; Sánchez Sánchez *et al.*, 2019). En este contexto, el objetivo de este trabajo es obtener la delimitación cartográfica de las inundaciones utilizando imágenes SAR en banda C y banda L en la llanura de inundación de un tramo del río Santa Lucía. La importancia de delimitar estas áreas radica en que la delimitación contribuye a su buena gestión debido a que son espacios necesarios para soportar adecuadamente las inundaciones, sin que se produzcan

degradaciones del sistema ambiental y la vida humana sea sometida a riesgo (Mas 2013). Al mismo tiempo, la cobertura vegetal presente en estas zonas funciona como regulador de los flujos de agua, sedimentos y nutrientes (Vich 1996). Su función reguladora, hace que sea importante su conservación, debido a que la ausencia de estos incrementa la escorrentía superficial, incrementa la erosión del suelo y el transporte de los sedimentos erosionados al curso fluvial.

Área de Estudio

Para la cartografía de inundación del río Santa Lucía de la provincia de Corrientes, se eligió una zona próxima a la ciudad de San Roque, localizada geográficamente entre los $28^{\circ}37'28''$ y los $28^{\circ}26'35''$ Latitud Sur y los $58^{\circ}49'20''$ y $58^{\circ}35'37''$ Longitud Oeste (Figura 1), este río geomorfológicamente integra la cuenca del Río Paraná (Currie & Giménez 1998) y en la cuenca del Paraná medio, es uno de sus afluentes más importantes, debido a su extensión y a su importancia socioeconómica.

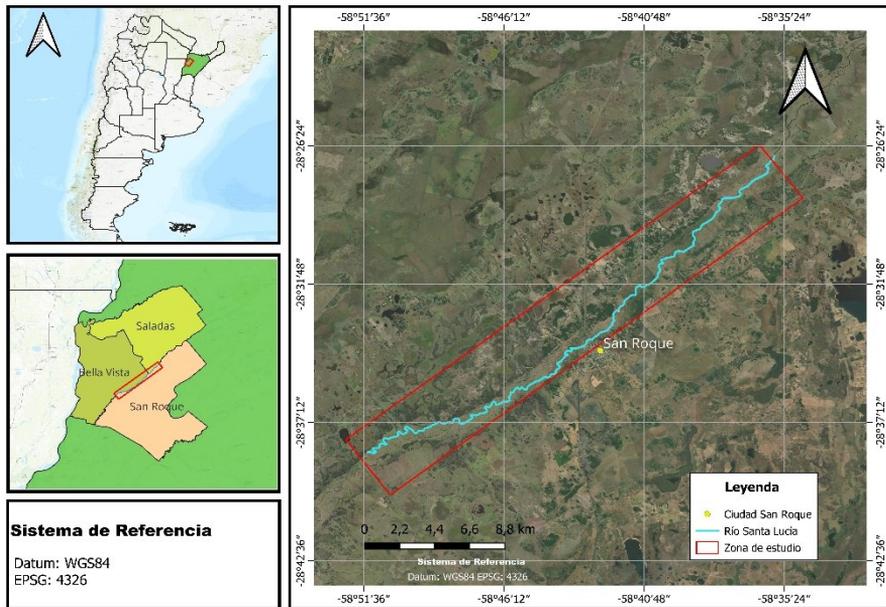


Figura 1. Zona de estudio. Datos: elaborado a partir de mapas bases de servidor web de QGIS y capas vectoriales de elaboración propia y del Instituto Geográfico Nacional (<https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/InformacionGeoespacial/CapasSIG>).

Metodología

Datos satelitales utilizados.

Las imágenes utilizadas corresponden a los sensores SENTINEL 1 y ALOS PALSAR 2. Para los mapas de cambio confeccionados con Banda C y Banda L, se utilizaron imágenes en condiciones no-inundado e inundado. Las alturas hidrométricas fueron obtenidas de la estación N° 3835 del Departamento de San Roque, de la provincia de Corrientes. Asimismo, para considerar una situación de inundación y en consecuencia obtener una imagen que refleje dicha situación, se tomó un umbral de nivel hidrométrico de 40,39 m.s.n.m., correspondiente al nivel de evacuación en la zona. Las fechas de adquisición de las imágenes y alturas hidrométricas observadas esos días se resumen en la Tabla 1. Los pares de imágenes SAR utilizadas se eligieron en función de la disponibilidad y con las siguientes condiciones:

1. La imagen de situación no inundada sea de similar día del año o muy cercana a la fecha de inundación, pero de un año antes o después de la inundación.
2. Ambas escenas deben tener condiciones hidrológicas distintas.
3. Ambas escenas deben corresponder a la misma estación del año para evitar el efecto de cambios fenológicos de la vegetación en las imágenes.
4. Con la misma dirección de pasada (descendente), ya que la mayoría de los objetos de la superficie terrestre no son isotrópicos, por lo tanto, responderán distinto según sean observados en una u otra dirección.
5. Corresponden al mismo sistema SAR, para tener mismo ángulo de observación, igual resolución espacial y tamaño del píxel, igual resolución radiométrica y la misma polarización.

Estas condiciones se consideraron necesarias en este trabajo para evitar incertidumbres relacionadas a las características de los sensores (diferentes resoluciones, diferentes direcciones de pasadas, diferentes ángulos de observación, polarización, etc.) o imprecisiones relacionadas a las diferencias fenológicas que influyen en el coeficiente de retrodispersión de las áreas vegetadas. Para evitar ruidos de los procesos relacionados con las estaciones de cultivos, se aplicó una máscara con el fin de separar las zonas agrícolas de las zonas de vegetación natural.

Preprocesamiento.

Las escenas SENTINEL 1 correspondientes a situaciones “no inundado” e “inundado”, fueron descargadas del sitio web <https://search.asf.alaska.edu/#/>, en modo TOPSAR, IW (Interferometric Wide Swath), en Nivel 1 de procesamiento de tipo GRD de alta resolución espacial (resolución rango x azimuth: 20x22 m, espaciado de píxeles range x azimuth: 10x10 m, n° looks: 5x1). Las escenas ALOS PALSAR 2, fueron adquiridas a través del proyecto "RA-6 nro 3343: Satellite Estimation Of Flooded Area And River Water Level Dynamics: Development Of Multisensor

Strategies", en modo ScanSar, WBDR1,5G y nivel de procesamiento 1,5. Las imágenes se procesaron utilizando el programa SNAP de la Agencia Espacial Europea (ESA, European Space Agency).

RADAR	NO INUNDADO fecha/ altura hidrométrica (ms.n.m.)	INUNDADO fecha/ altura hidrométrica (ms.n.m.)
SENTINEL 1	04-01-2018/36,99	11-01-2019/41,21
ALOS PALSAR 2	14-01-2018/37,09	13-01-2019/41,19

Tabla 1. Fechas de las imágenes adquiridas no inundación y de inundación y las alturas hidrométricas correspondientes. Datos: Elaborado en base a las fechas de adquisición de las imágenes y datos hidrométricos.

Las imágenes de ambos sistemas fueron calibradas radiométricamente. A las escenas SENTINEL 1, se les aplicaron correcciones por el archivo de órbita, corrección del ruido térmico y luego calibración radiométrica propiamente dicha. Por último, se efectuó la corrección geométrica con rango de altura promedio (Average Height Range- Doppler). Las escenas ALOS PALSAR 2, se reciben con las siguientes correcciones: corrección por pérdida debido al rango, corrección por ganancia de patrón de antena y corrección por ángulo de incidencia local. Debido a esto, las imágenes solo fueron calibradas radiométricamente. Estas escenas, en el nivel adquirido, se encuentran georreferenciadas. Para una correcta superposición de las imágenes, se generó una registración imagen a imagen tomando una como base.

Para la reducción del ruido Speckle, para ambas imágenes RADAR, se analizaron distintos filtros adaptativos: Lee, Gamma Map, con ventanas 3x3 y 5x5 e IDAN con 9 vecinos. Para elegir el filtro más conveniente, primero se realizó una comparación visual de las imágenes con los distintos filtros aplicados. Luego, se digitalizaron muestras de cuatro ambientes (agua, bosque, bañados con arbustos y pastos altos con arbustos) y se calculó para estos sitios los estadísticos media y desvío estándar, el Número Equivalente de Looks (ENL) a partir de la siguiente fórmula: $ENL = (\text{media}/\text{desvío estándar})^2$ y la incerteza radiométrica para intervalos de confianza de 50%, 90% y 95%. De todos los filtros comparados, se decidió aplicar el filtro IDAN porque en general conserva el valor de la media en todos los ambientes observados además de proporcionar un buen valor de ENL (con relación a conservar una buena resolución radiométrica) pero, sobre todo, arrojaba mejores resultados visuales, lo que implica una mejor conservación de los bordes entre objetos presentes en las escenas.

Procesamiento.

Mapas de cambio.

Para obtener la cartografía de la zona de inundación, primero se generaron mapas de cambio del σ_0 utilizando las imágenes SENTINEL 1 y ALOS PALSAR 2, en condiciones de no-inundación e inundación. Luego se generó un stack con las imágenes en condiciones de no inundación e inundación (para cada uno de los satélites por separado). Para cada satélite se obtuvo una imagen de cambio en dB, donde en cada píxel el valor corresponde al cambio debido a la diferencia del valor de σ_0 encontrado entre las dos imágenes utilizadas. Para esto, las imágenes de cambio generadas con imágenes SENTINEL y ALOS se segmentaron en 3 intervalos de cambio que cubrían todos los valores resultantes de la diferencia de imágenes realizada: 1) zonas que produjeron disminución en la señal, 2) zonas que no produjeron cambios en la señal y 3) zonas que generaron aumento en la señal. Los criterios para seleccionar los intervalos fueron estadísticos y físicos. Para seleccionar los intervalos utilizando los primeros, se consideraron los valores de incerteza radiométrica en dB de las muestras de distintos tipos de vegetación presentes en las zonas de estudio (agua, bosque, bañados con arbustos, etc.) para un intervalo de confianza del 95%. El criterio físico utilizado se basó en analizar los distintos intervalos de cambios en el σ_0 producidos por el evento de inundación en función de la verdad terrena. Los tres principales mecanismos de interacción son reflexión especular, dispersión en volumen y dispersión doble rebote. La prevalencia de cada uno de estos mecanismos depende de las características de la vegetación, la humedad del suelo, y de la frecuencia y polarización de la onda.

Mapas de inundación.

A partir de los mapas de cambio con cada sistema satelital, se obtuvieron los mapas de inundación. Estos se generaron bajo la premisa de que todas las áreas que sufrieron un cambio en el coeficiente de retrodispersión habían sido afectadas por la inundación. Para validar los mapas de áreas inundadas, se utilizaron puntos de apoyo medidos con equipo GPS en sitios indicados por los pobladores que reflejaron la extensión de la inundación ocurrida en 2019 así como cartografía de riesgo de inundaciones realizado por Odriozola y Contreras (2018). Se adquirieron 45 puntos de GPS y se tomaron al azar en la zona de estudio 34 puntos del mapa de Ordizola y Contreras, y se generó la matriz de errores, a partir de la cual se calcularon métricas por clase y métricas generales.

En el caso de las métricas por clase, se calculó la exactitud del productor y la exactitud del usuario tanto para la clase inundado como para la clase no inundado. Dado que nuestro caso es binario (inundado – no inundado), y si tomamos como foco de nuestro interés la clase inundado, la exactitud del productor para dicha clase suele llamarse

también exhaustividad o recall y nos indica el porcentaje de los puntos que correspondían a inundaciones reales que fueron etiquetados en el mapa como inundados. Por su parte, la exactitud del usuario para la clase inundado es también conocida como precisión y nos indica el porcentaje de los puntos etiquetados en el mapa como inundaciones que verdaderamente fueron inundaciones.

En el caso de las métricas generales se calculó la exactitud general de la clasificación, el índice Kappa y el valor F (F-Score, media armónica entre precisión y exhaustividad: $2 * \text{precisión} * \text{exhaustividad} / (\text{precisión} + \text{exhaustividad})$).

Cartografía de la extensión de la inundación.

Por último, para generar la cartografía de delimitación de la zona de inundación, se utilizó el mapa de inundación generado con la imagen en Banda L que, si bien tiene una resolución espacial más baja (25x25m), sus resultados son más confiables radiométricamente. Para reducir los efectos residuales del Speckle y facilitar la delimitación, se aplicó sobre el mapa de inundación un filtro de mayoría, con ventana 3x3 y fue apoyado en cartografía auxiliar, MDE y puntos GPS en sitios indicados por los pobladores que conocen la dinámica del evento fluvial.

Resultados

Mapas de cambio.

Como resultado del procesamiento de las imágenes de radar en condiciones de inundación y no inundación, se obtuvieron mapas de cambios, donde cada intervalo de cambio representa diferencias del coeficiente de retrodispersión σ_0 , en dB (Figuras 2 y 3). Como resultado se obtuvieron intervalos de dB diferentes para los pares de imágenes ALOS PALSAR 2 y SENTINEL 1, debido a las distintas resoluciones radiométricas de las imágenes utilizadas y configuración del trabajo al 95% de incerteza. De esta manera, para SENTINEL, se eligió -3,20 a 3,20 dB para intervalo de no cambio; y -1,10 a 1,10 dB para ALOS PALSAR. Estos intervalos fueron analizados visualmente en toda la cartografía realizada con el fin de descartar valores incoherentes o incorrectos. La Figura 2, corresponde al mapa de los cambios detectados en la imagen de radar con Banda C. En el mismo puede observarse: a) zonas sin cambios (-3,20 a +3,20 dB), que corresponde principalmente a unidades de paisajes como bosques densos, bosques de palmas y arbustos; b) zonas de disminución de la señal (-24,89 a -3,20 dB), donde el cambio predominante es la aparición o aumento en el protagonismo del mecanismo de interacción conocido como reflexión especular. Estas zonas pueden verse en la parte central del área de estudio, próximas al curso principal, representada por las unidades de paisajes bañados de pastos cortos, con presencia de arbustos aislados y zonas herbáceas. La respuesta especular que genera una disminución en la señal captada por el sensor, es producto de la presencia

de agua calma (con poca rugosidad superficial) en la superficie, por sobre la respuesta de la vegetación- suelo en condición normal; c) zonas de aumento de la señal (+3,20 a +11,96 dB) corresponde a la clase de cambio con menor frecuencia. Los ambientes presentes en estas áreas son principalmente bosques pluriespecíficos, bosques de sauces y bañados de arbusto, para los cuales el aumento de la señal está dado por el cambio del mecanismo de interacción: de dispersión en volumen del dosel al doble rebote agua-tronco.

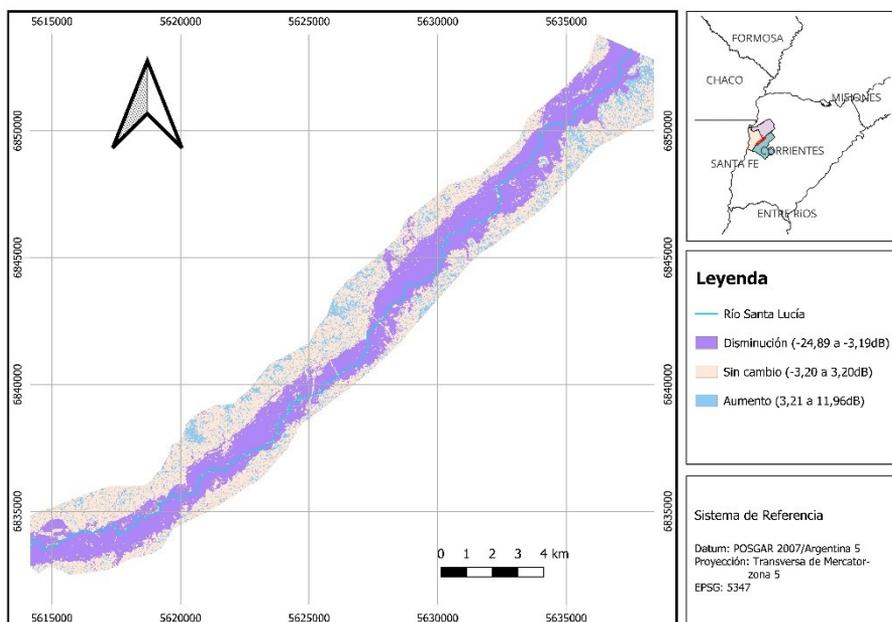


Figura 2. Mapa de cambio para la zona de estudio con Banda C. Datos: elaborado a partir de imágenes SENTINEL en condición no inundado e inundado.

En la Figura 3, correspondiente al mapa de cambio generada con imágenes en Banda L, el intervalo de no cambio es de -1,10 a +1,10 dB. En este mapa se observa menor cantidad de áreas que no presentaron cambios, restringidas únicamente a zonas de bosques muy densos. Al igual que el mapa generado con Banda C, las clases correspondientes a la disminución de la señal (-17,06 a -1,10 dB) corresponden a unidades de paisaje como bañados de pastos cortos, con presencia de arbustos aislados y zonas herbáceas. Las zonas que presentaron un aumento de la señal (+1,10 a +4,81 dB) se encuentran principalmente en las zonas de bosques pluriespecíficos, bosques de una especie y bañados de arbustos.

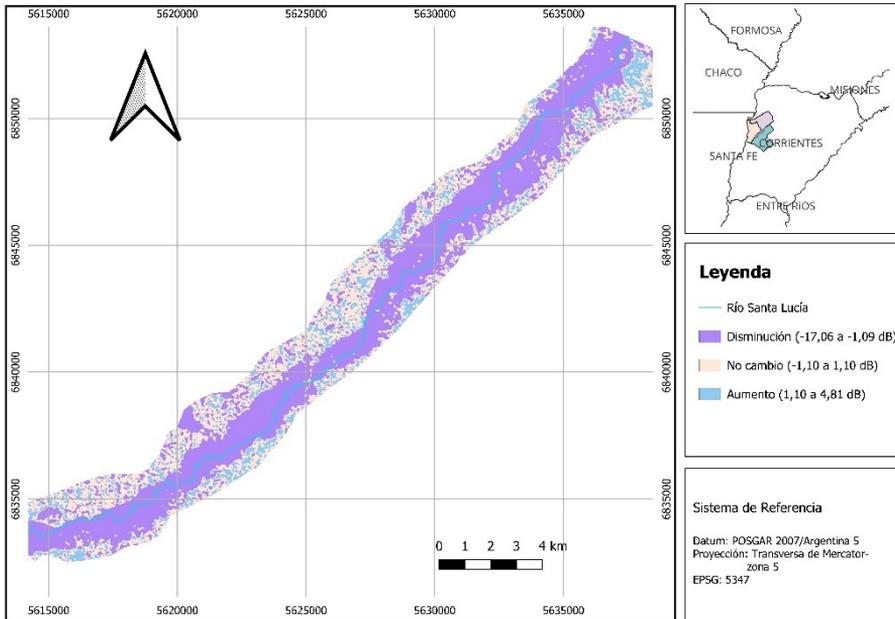


Figura 3. Mapa de cambio para la zona de estudio con Banda L. Datos: elaborado a partir de imágenes ALOS en condición no inundado e inundado.

Mapas de inundación.

Considerando los mecanismos de interacción presentes en los mapas de cambio (Figuras 4 y 5) de acuerdo a la distribución y características de la vegetación en la zona de estudio, la determinación del área inundada fue generada considerando que: a) todos los valores comprendidos entre -3,20 y +3,20 dB (mapa generado con Banda C) y los valores comprendidos entre -1,10 y +1,10 dB (mapa generado con Banda L) no indican cambios sustanciales, es decir que no puede afirmarse que estas zonas se hayan visto afectadas por la inundación, b) todas las diferencias en valor absoluto por fuera del intervalo de no cambio definido para cada banda (ya sea aumento o disminución) corresponden a zonas inundadas por la crecida del río Santa Lucía. Teniendo en cuenta estos criterios se agrupan las clases de cambio correspondientes para generar un mapa de áreas inundadas para cada sistema satelital. La figura 4 corresponde al mapa de inundación con imagen en Banda C, para la zona de estudio.

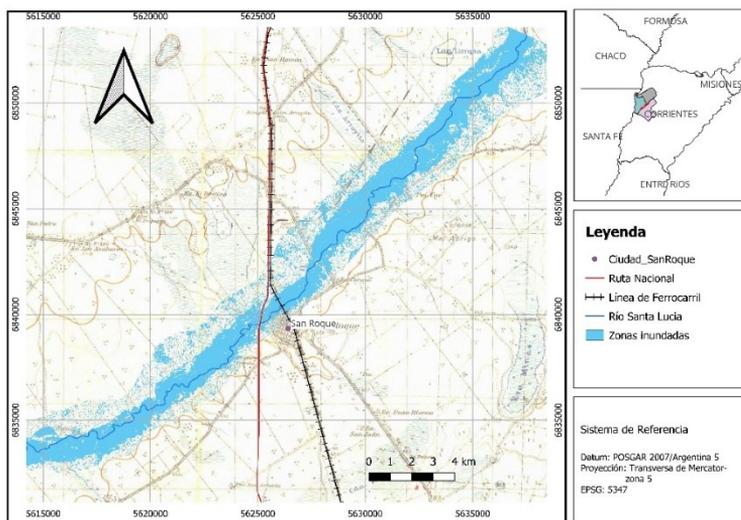


Figura 4. Mapa de inundación con imagen en Banda C. Datos: elaborado en base a mapa de cambio para la zona de estudio con Banda C.

Asimismo, la Figura 5 corresponde al mapa de inundación con imagen en Banda L, para la zona de estudio.

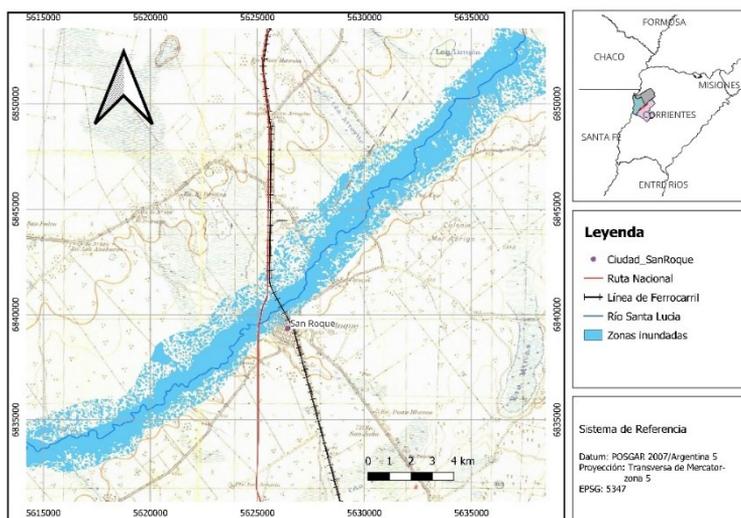


Figura 5. Mapa de inundación con imagen en Banda L. Datos: elaborado en base a mapa de cambio para la zona de estudio con Banda L.

La zona de estudio cuenta con un área total de 10308,83 ha. Con el método empleado, el mapa de inundación con Banda C para el día 11/01/2019 (Figura 4) arrojó un área inundada de 5631,98 ha, lo que representa el 54,63% del área estudiada. Sin embargo, el mapeo de la inundación con Banda L para el día 13/01/2019 (Figura 5), arrojó un área inundada de 6196,98 ha, que corresponde al 60,11% del área de estudio. La matriz de errores, la exactitud del productor y del usuario para cada clase, la exactitud general, el índice Kappa, y el valor-F pueden verse en las Tablas 2 y 3.

Evaluación de exactitud con SENTINEL		Referencia		Exactitud para el usuario (%)	Error por comisión (%)
		Áreas inundadas	Áreas no inundadas		
Mapas de áreas inundadas	Áreas inundadas	27	9	75	25
	Áreas no inundadas	25	18	43	58
Exactitud del productor (%)		52	66	Exactitud General: 57%	
Error por omisión (%)		48	34	Índice Kappa: 0,16 Valor-F: 0,61	

Tabla 2. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas con banda C
Datos: obtenido de la comparación entre el mapa elaborado con banda C y puntos medidos en la zona de estudio y obtenidos de la cartografía elaborada por Odriozola y Contreras (2018).

Evaluación de exactitud con ALOS		Referencia		Exactitud para el usuario (%)	Error por comisión (%)
		Áreas Inundadas	Áreas no inundadas		
Mapas de áreas inundadas	Áreas inundadas	36	8	82	18
	Áreas no inundadas	15	20	57	43
Exactitud del productor (%)		70	71	Exactitud General: 71%	
Error por omisión (%)		30	29	Índice Kappa: 0,40 Valor-F: 0,76	

Tabla 3. Evaluación de la exactitud del mapa de áreas inundadas con banda L
Datos: obtenido de la comparación entre el mapa elaborado con Banda L y puntos medidos en la zona de estudio y obtenidos de la cartografía elaborada por Odriozola y Contreras (2018).

La matriz de errores elaborada para el mapa realizado a partir de imágenes SAR en Banda C (Tabla 2) arroja una exactitud general del 57%, que puede ser considerada como moderada y significa que el 57% de los píxeles fueron clasificados correctamente según los datos de referencia. La clase “inundado” muestra una buena exactitud para el usuario o precisión (75%), lo que refleja que fueron pocos los sitios se etiquetaron falsamente como inundados, en este sentido las áreas clasificadas como “inundadas” en el mapa generado son confiables. Por su parte, la clase “no inundado” muestra una baja exactitud para el usuario (42%). Por otra parte, la clase “inundado” arroja una moderada exactitud para el productor o exhaustividad (52%), lo que indica que hubo una cantidad significativa de puntos inundados que no se clasificaron como tal y la clase “no inundado” presenta una moderada exactitud para el mismo (66%). Por otro lado, el Índice Kappa, al tener en cuenta las coincidencias por efecto del azar a través de la multiplicación de los totales marginales, indica una concordancia leve (0,16) entre el mapa de inundación y los puntos de referencia, lo que indicaría que cerca de un 40% de los aciertos habría sido por azar. Sin embargo, el valor-F, que también toma en cuenta los totales marginales, aunque a través de la media armónica de las exactitudes del productor del usuario, da un valor de 0,61, lo que puede considerarse un resultado moderado a bueno. Por último, observando detalladamente la matriz de errores se observa que habría un importante número de puntos o sitios de referencia designados como inundados y que en el mapa producido con datos de microondas con Banda C se clasifican como no inundados. Al menos parte de este error arrojado por los mapas generados con Banda C pueden ser atribuidos a la baja capacidad de penetración de la onda de radar en sitios con doseles denso.

La matriz de errores realizada para el mapa generado a partir de imágenes SAR en Banda L (Tabla 3), muestra una buena exactitud general (71%), una concordancia regular de acuerdo al índice Kappa (0,40), y un muy buen valor-F (0,76). A su vez, para el usuario, la clase “inundado” tiene una muy buena exactitud (precisión del 82%), mientras que la clase “no inundado” tiene una exactitud moderada (57%). En cuanto a la exactitud para el productor, ambas clases presentan una buena exactitud, para la clase “inundado” (exhaustividad) es del 70%, mientras que para la clase “no inundado” es de 71%. La exactitud moderada del 57% en la clase “no inundado” para el usuario implica que habría un número de puntos o sitios de referencia designados como inundados y que en el mapa producido con datos de microondas con Banda L se clasifican como no inundados. Esto se debe a los puntos que fueron tomados del mapa de inundación generados con MDE y cuyo resultado arrojan un área de inundación mayor al mapeado con imágenes RADAR. En este caso, el error se asocia a puntos que fueron catalogados como no inundados, y que en el mapa producido por Odriozola y Contreras (2018) están clasificados como inundados.

Cartografía de la extensión de la inundación.

Para delimitar el área de inundación (Figura 6), la cartografía de inundación utilizada fue la generada con Banda L, por resultar más confiable considerando la

resolución radiométrica y mayor exactitud en la validación efectuada. El criterio para definir el área inundada por desbordamiento del río fue delimitar la zona contigua que se inunda desde el río hacia afuera. Este criterio permite separar con seguridad de otras zonas contiguas inundadas, donde la presencia de agua puede deberse a anegamientos debido a lluvias locales.

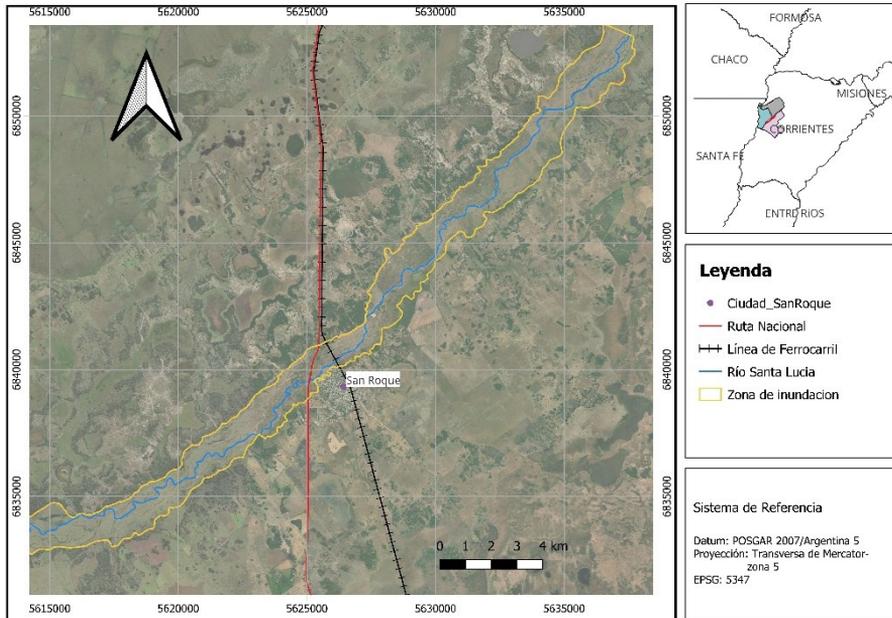


Figura 6. Cartografía de inundación para la zona de San Roque. Datos: obtenido en base al mapa de inundación con banda L.

Discusión

Una inundación puede causar tanto un aumento como una disminución de la señal retrodispersada, dependiendo del mecanismo de interacción dominante resultado de la interacción de la señal del radar con el tipo de cobertura vegetal, y la altura de agua que la inundación produzca. Por lo tanto, las diferencias encontradas en los mapas elaborados con Banda C y Banda L en este trabajo, se deberán a la combinación de características de la vegetación, el tamaño de los píxeles (10 x 10 m SENTINEL 1 y 25 x 25 m ALOS) y características de los sensores relacionadas con la frecuencia (5,60 GHz en Banda C y 1,27 GHz en Banda L) y polarización (VV, VH en SENTINEL y HH, HV en ALOS PALSAR 2). Pero, además, las diferencias encontradas en los resultados también se deben a factores que influyen en la

inundación como ser la situación hidrológica existente los días de adquisición de las imágenes: el día de la adquisición de la imagen SENTINEL 1, sobre el área de estudio se registró una precipitación acumulada de 105 mm, debido a esto, la imagen en Banda C fue adquirida en fecha posterior a la de ocurrencia de una importante precipitación en la zona. Esto podría implicar una mayor cantidad de agua superficial en la imagen de inundación en Banda C. Sin embargo, al poseer SENTINEL una mayor incerteza radiométrica que ALOS, se definió un intervalo de no cambio mayor, lo que no permitió registrar el alcance de esta importante precipitación.

En coincidencia con otros autores, en los mapas producidos se evidenció que los sensores SAR son sensibles a los fenómenos de inundación, y la distribución heterogénea de las clases de cambio en toda la zona de estudio muestra que existen desiguales condiciones de inundación que el radar es capaz de distinguir en función de los mecanismos de interacción dominantes al incidir la señal del RADAR sobre la vegetación presente en la llanura de inundación. La Figura 7 ilustra una muestra de los resultados obtenidos en los mapas de cambios, donde puede verse la diferencia en las respuestas de un mismo ambiente con Banda C o Banda L. Se observa que algunas zonas herbáceas en Banda C producen un aumento en la señal mientras que en Banda L produce una disminución. Esto se debe a que, en banda C, y especialmente para la polarización VV, la vegetación herbácea produce cierta atenuación de la señal que la atraviesa. Por lo tanto, al subir el nivel del agua, disminuye la altura emergida de la vegetación provocando que la señal atravesase menos cantidad de vegetación, y por lo tanto sea menos atenuada, generando que aún sin cambiar el mecanismo de interacción, la respuesta del doble rebote agua-tallo tenga mayor intensidad. Esto ocurrirá hasta que el nivel del agua sea tal que el mecanismo de interacción de reflexión especular gane protagonismo y la señal medida empiece a disminuir. En Banda L, sin embargo, la atenuación por la vegetación herbácea es muy baja, por lo que un aumento en la altura del agua provoca directamente una disminución en la retrodispersión por el aumento en la reflexión especular en desmedro del doble rebote agua-tallo (Salvia 2010).

Por su parte, en la muestra de bosques, en el mapeo realizado con Banda L aparecen con aumento de la señal muchas de las zonas que aparecen sin cambio en Banda C. Esto puede deberse a la mayor capacidad de los sistemas SAR en Banda L para penetrar la vegetación en zonas densas y detectar la presencia de la lámina de agua debajo de ella (Hess *et al.*, 1990).

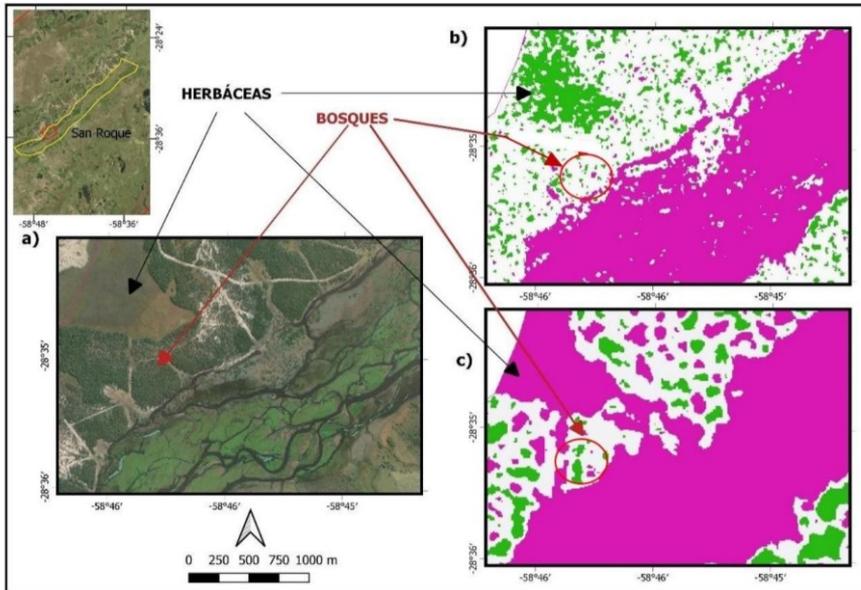


Figura 7. Comparación de respuestas en Banda C y Banda L para vegetación herbáceas y bosques. Figura a) imagen satelital de la zona de estudio. Figura b) Mapa de cambio con banda C. Figura c) Mapa de cambio con banda L. Datos: Elaborado a partir de los mapas de cambio con banda C y Banda L.

Al respecto, en la Figura 8 se esquematizan estas situaciones: a) cuando no hay inundación el mecanismo de interacción dominante en el caso de vegetación herbácea con estructura vertical o casi vertical, cuando posee algunos centímetros de agua sobre el suelo, es el doble rebote agua-tallo, y b) en el caso de los pajonales, o especies estructuralmente similares a *Scirpus giganteus* o *Panicum prionites*, es la dispersión en volumen. Pero en ambos casos, al ir aumentando la altura del agua, cambia el mecanismo de interacción por la reflexión especular. Por ende, la disminución de la señal retrodispersada observada en los mapas producidos se debe a un importante aumento en la altura del agua sobre el suelo en estos ambientes. En el caso de los paisajes con bosques, habitualmente con suelo seco, el aumento en la señal registrada se debe a la aparición agua sobre el suelo, que provoca un cambio en el mecanismo de interacción dominante, de dispersión en volumen del dosel a doble rebote agua-tronco, tanto para el caso de la banda C como para la banda L (Hess *et al.*, 1990).

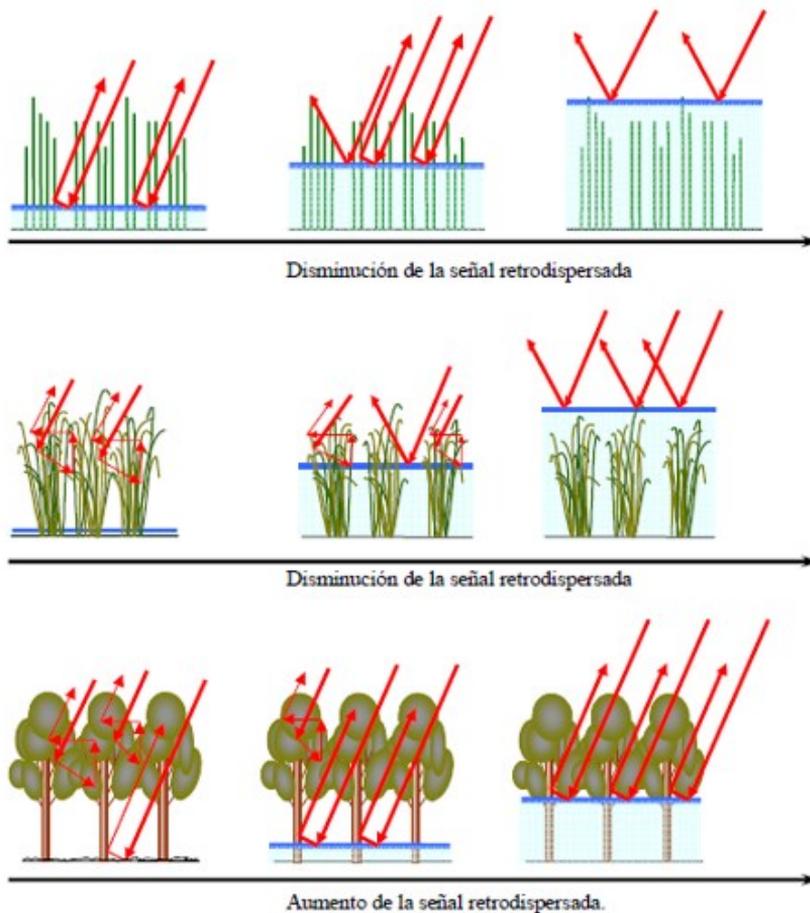


Figura 8. Esquema de los cambios en los mecanismos de interacción de acuerdo a la condición hidrológica para vegetación arbórea y herbácea. Fuente: Salvia (2010, 102).

Por su parte, para los mapas de inundación, en este trabajo se utilizó el criterio de que las zonas donde se registró un aumento o disminución significativos en la señal estaban inundadas. Este mismo criterio fue utilizado por Pope *et al.* (1997) para definir las zonas inundadas en los humedales de la Península de Yucatán, donde la inundación mostró: 1) un aumento en la magnitud de la retrodispersión en las zonas con cubierta alta y densa; 2) una disminución en la magnitud de la retrodispersión en áreas con cobertura escasa y corta. Por su parte, Salvia (2010) utilizó el mismo criterio en el mapeo de inundaciones en el Delta del Paraná, observando los mismos resultados en la interacción de la señal del radar con los diferentes tipos de vegetación inundada.

Por otra parte, las diferencias obtenidas respecto a las áreas de inundación: con banda L se obtuvo un área inundada de 6196,98 ha y con banda C, se obtuvo un área inundada de 5631,98 ha; lo que representa una diferencia de 565 ha. Cabe preguntarse entonces: ¿esa diferencia se debe a las capacidades diferentes de los sensores utilizados para detectar áreas inundadas?, ¿hubo algún otro factor influyendo en esta diferencia?

En primer lugar, esta diferencia se debe a las distintas capacidades para detectar inundación en zonas vegetadas con longitudes de onda correspondientes a Banda C y Banda L. Del análisis exhaustivo de los mapas en este trabajo, puede verse que, la banda L tuvo una mayor penetración en el dosel de los bosques. En este sentido, en trabajos anteriores se ha demostrado que las ondas más largas se asocian generalmente con una mayor penetración de doseles forestales, particularmente cuando las longitudes de onda son mayores que el tamaño de la hoja (Pope *et al.*, 1994; Townsend *et al.*, 1998). En coincidencia con estos resultados, San Martín *et al.* (2015) han señalado la utilidad de las imágenes SAR en Banda L para la identificación e inventariado de humedales, debido a su mayor capacidad de detectar el agua debajo de la vegetación. Todo esto, implica una mayor exactitud espacial de la extensión de las inundaciones y por consiguiente mapas más exactos que permitan una mejor planificación territorial y gestión del riesgo de inundación. También es importante considerar la mayor incerteza radiométrica de las imágenes SENTINEL, que lleva a tener un rango amplio para la clase de no cambio en valores similares a los que dieron en banda L, lo que enmascara los cambios que puedan haber ocurrido.

Por otra parte, es necesario tener en cuenta las diferencias de fechas en que fueron adquiridas las imágenes y por lo tanto la situación hidrológica existente. Las imágenes de condición inundada fueron adquiridas con dos días de diferencia, el producto SENTINEL 1 se generó el 11/01/2019 a las 10:55 a.m. (imagen en Banda C), y la Banda L, al 13/01/2019 a las 3:25 p.m. Conjuntamente, entre las 9 am del día 10/01 y las 9 am del día 11/01 sobre el área de estudio se registró una precipitación acumulada de 105 mm, según datos obtenidos de la Estación meteorológica de Santa Lucía (<https://snih.hidricosargentina.gob.ar/>), que junto a las precipitaciones acumuladas a la fecha, marcó en el hidrómetro una altura de 41,21 m.s.n.m. Cuando se obtuvo la imagen de Banda L (13/01/2019 a las 3:25 p.m), sobre el área de estudio se registró una precipitación acumulada de 20 mm entre las 9 am del día 12/01 y las 9 am del día 13/01 y una altura hidrométrica de 41,19 m.s.n.m. Según estos datos, la imagen en Banda C fue adquirida en fecha posterior a la de ocurrencia de una importante precipitación en la zona. Esto podría implicar una mayor cantidad de agua superficial en la imagen de inundación en Banda C. Sin embargo, si bien SENTINEL tiene una mejor resolución espacial, tiene mayor incerteza radiométrica a diferencia de ALOS, lo que conlleva a definir distintos intervalos de no cambio, siendo el de SENTINEL mucho mayor. Esto último, reduce la posibilidad de SENTINEL para detectar mejor las inundaciones. Sin embargo, estos factores son inherentes a las

características de las imágenes, y el proceso que se realiza para mejorar los resultados de las imágenes es aplicar filtros Speckle.

Por último, se ha comprobado en otros estudios la influencia de la polarización utilizada para detectar inundaciones, en el caso de las imágenes SENTINEL, para la zona de estudio solo se encuentran disponibles las polarizaciones VV y VH. Por lo tanto, y dado que la vegetación tiene una mayor presencia de componentes de orientación vertical, la atenuación es mayor para estas imágenes, no solo por la frecuencia sino también por la polarización involucrada; en cambio, las imágenes ALOS PALSAR2 en el modo usado son adquiridas en polarizaciones HH y HV. Al respecto, en otros estudios se ha demostrado que los datos VH son menos adecuados para el mapeo de extensión de inundación que los datos VV. Uno de los trabajos más recientes es el de Berezowski *et al.* (2020), quienes utilizaron imágenes SENTINEL, en polarizaciones VV y VH para el mapeo de la extensión de inundación en la cuenca baja del río Bígaraen, al noreste de Polonia. Dichos autores llegaron a la conclusión de que ninguna de las polarizaciones analizadas fue capaz de identificar la inundación debajo de los árboles o la vegetación densa. A diferencia de esto, existen trabajos donde se evidenció que la polarización Horizontal-Horizontal (HH) es más adecuada para la detección de agua (Hess *et al.* 1995; Henry 2006). En suma, las escenas ALOS PALSAR 2 utilizadas en este trabajo fueron en modo ScanSar, obteniendo buenos resultados en el mapeo de las inundaciones. Este mismo tipo de imágenes fue utilizado por Arnesen *et al.* (2013) en la planicie de inundación del río Amazonas, con el fin de obtener la extensión de la inundación, obteniendo una muy buena precisión del mapeo de la inundación. Por otra parte, Hess *et al.* (1995) delinearón con precisión la inundación de la planicie aluvial y la vegetación a lo largo de los ríos Negro y Amazonas, cerca de Manaus, Brasil, utilizando datos polarimétricos de radar de apertura sintética (SAR). En este trabajo, se ha realizado la cartografía de delimitación de la inundación con similares resultados a los obtenidos por Hess *et al.* (1995), siendo uno de los principales desafíos durante la inundación obtener una visión general del evento con la extensión precisa de la zona afectada (Rahman & Thakur, 2018), debido a que es imprescindible evaluar la extensión máxima de la lámina de agua producida por estas crecidas para determinar la zona inundada.

Con respecto a los resultados obtenidos en las matrices de error e índice Kappa, puede decirse que, si bien los indicadores de exactitud del modelo presentan un valor de aceptable a bueno, el alto porcentaje de omisión (48%) y comisión (25%) de áreas inundadas en el mapa con banda C, pueden llevar a una evaluación errónea del riesgo permitiendo la ocupación urbana en sitios donde llega el agua. Si bien, en el mapeo con banda L, el error por omisión (30%) y comisión (18%) es menor, sigue siendo importante atender debido a que se trata de un evento de alta sensibilidad social como es una inundación y puede tener consecuencias graves

Sin embargo, estas discrepancias pueden deberse a errores provenientes de los datos tomados de referencias, principalmente cartografía elaborada por Odriozola y Contreras (2018). Este mapa fue generado utilizando MDE generado a partir de la

imagen Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con resolución de 90 m y curvas de nivel generadas con una equidistancia de 1 m. El método de evaluación utilizando mapas de comparación no es el ideal, ya que el mapa usado tiene su propio error, y puede haberse generado a partir de eventos de inundación de distinta magnitud y por ende de distinta extensión, pero en muchos casos es la única opción viable, esto puede verse en la exactitud del productor, métrica que indica la probabilidad de que una muestra de referencia esté correctamente clasificada. Sumado a esto, la evaluación de la exactitud mediante datos de campo no se realizó con más puntos tomados en campo debido a la situación de pandemia que atravesamos a nivel mundial y las restricciones sanitarias que limitaron la movilización de una ciudad a otra.

Por lo tanto, se sugiere para futuros trabajos, realizar la validación con un mayor número de puntos, principalmente obtenidos en campo y reducir la utilización de otras cartografías debido a la fuerte influencia de los propios errores que pudieran tener y los distintos métodos con que se obtiene la extensión de las inundaciones como en este caso. Debido principalmente a que esto implica una evaluación errónea del riesgo y en la divulgación de la cartografía.

La exactitud de los mapas de inundación, particularmente la mayor exhaustividad del mapa realizado con banda L, puede relacionarse a la mayor capacidad de esta banda, para penetrar en los doseles forestales, lo que se traduce a un cambio en el mecanismo de interacción de dispersión en volumen del dosel a doble rebote agua-tronco, lo que genera un cambio en el valor del coeficiente de retrodispersión y por lo tanto, es considerado en este trabajo como inundación.

Por otra parte, los falsos positivos en ambas matrices no difieren mucho, lo que puede asociarse a discrepancias con el mapa de referencia en estas zonas. Sin embargo, los falsos negativos, en el mapa producido con banda L, se reduce notablemente. Esto último puede asociarse a la mayor capacidad de la banda L para detectar el agua debajo de los bosques y por lo tanto un cambio en el valor del coeficiente de retrodispersión.

En resumen, las imágenes RADAR resultan ser idóneas y de bajo costo para mapear humedales (Munizaga *et al.*, 2022) y en las cuales las masas de agua pueden verse incluso con cobertura nubosa y debajo del dosel de la vegetación. En coincidencia con otros autores, la tecnología SAR es óptima para cartografiar áreas afectadas por la inundación bajo condiciones meteorológicas adversas dando respuesta al monitoreo de emergencias hidrológicas, y prevaleciendo potencialmente sobre otros sensores (espectro visible) los cuales están condicionados por la falta de visibilidad. Han demostrado ser los únicos sensores capaces de monitorear sistemáticamente el nivel y alcance del agua a escala regional.

Cabe aclarar que el monitoreo de emergencias hidrológicas utilizando sistemas SAR, es posible gracias a que Argentina forma parte de la Carta Internacional “El Espacio y las Grandes Catástrofes” (<https://www.argentina.gob.ar/aplicaciones-de-la-informacion-satelital/carta-internacional-el-espacio-y-las-grandes-catastrofes>), <https://disasterscharter.org/rter.org/>, a través de la cual, al

momento de ocurrir una emergencia, la CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) puede solicitar la activación del mecanismo por el cual todas las agencias espaciales integrantes ponen en máxima prioridad la cobertura del área afectada, redireccionando las antenas de los sensores SAR para obtener una mayor frecuencia de adquisición de imágenes de dicha área. Generalmente la activación de la Carta puede durar varias semanas, de acuerdo a la magnitud de la emergencia monitoreada, lo que garantiza la posibilidad de seguimiento. En este contexto, el hecho de que los sistemas SAR puedan adquirir imágenes a través de las nubes resulta en que muchas de las emergencias hidrológicas que implican la activación de la Carta, sean monitoreadas principalmente por sistemas SAR.

Por otra parte, las inundaciones se encuentran entre los peligros más frecuentes y extensos a nivel mundial. En este sentido, se ha reconocido que existe la necesidad de estudios científicos para apoyar la protección y restauración de los humedales y comprender su papel en las inundaciones (Liu *et al.*, 2018; Pattison Williams *et al.*, 2018; Rojas *et al.*, 2022). El mapeo del evento de inundación con imágenes RADAR realizado en este trabajo constituye una base fundamental para: a) el conocimiento de los humedales fluviales debido a que nos permite conocer la extensión de los mismos y b) el monitoreo de los eventos de inundación en estas zonas. De esta manera constituye, además, una base de datos con información actualizada, con las mejores técnicas de teledetección para el mapeo de las inundaciones.

Conclusiones

Para realizar la delimitación de las zonas inundadas por desborde del río, se generaron mapas de clases de cambio de valores de sigma 0. A partir de dos de estos sistemas con distintas frecuencias: en Banda C el sistema europeo SENTINEL 1 (5,6 GHz), y en Banda L el sistema japonés ALOS PALSAR 2 (1,27 GHz). Se utilizaron dos fechas de distinta condición hidrológica: inundado (evento de inundación del año 2019) y no inundado (2018), consiguiendo que las imágenes correspondientes a la condición inundada solo difieran en 2 días (lo que no siempre es posible de acuerdo a las restricciones orbitales de los distintos sistemas satelitales utilizados). Luego, considerando las unidades de paisaje presentes en la llanura de inundación y los mapas de cambios de valores de sigma 0, se observó el comportamiento de la señal registrada en base a el mecanismo de interacción dominante y el tipo fisonómico de vegetación. Posteriormente, en base a los mapas de cambios para las dos frecuencias analizadas, se generaron mapas de inundación para las zonas de estudio. Por último, utilizando los mapas producidos con Banda L, por resultar los mapas más confiables radiométricamente y con mejor exactitud, y apoyados en datos auxiliares, se delimitó la zona de inundación por el desborde del río, a través de la vectorización manual.

En el caso del sistema SENTINEL-1, que opera en Banda C, presentó métricas de exactitud general de moderadas a bajas, con un bajo a moderado error por comisión, pero un moderado a alto error por omisión de la clase “inundado”. Estos resultados

podrían indicar que dichas imágenes no son aptas para este tipo de mapeos o monitoreos, cuyos resultados conllevan una alta sensibilidad social. Sin embargo, las autoras consideramos que antes de descartar por completo el uso de este recurso de relativamente larga extensión de su serie temporal (10 años) y fácil disponibilidad puede ser necesario mejorar los datos usados como referencia para su evaluación o validación, ya que una mayor extensión o mejor calidad de los mismos puede resultar en mejores resultados de exactitud, como se explicó en la discusión.

Este trabajo corresponde al primer mapeo de inundaciones realizado con sistema SAR sobre el río Santa Lucía. Si bien se delimitó la zona inundada para el evento de inundación 2019, el siguiente paso sería realizar la determinación de las zonas de inundación durante otros eventos posteriores, y de esta forma obtener un monitoreo actualizado de las inundaciones, necesario debido al comportamiento hidrodinámico del río en la planicie de inundación que caracteriza estos eventos. Los cuales deben ser monitoreados sistemáticamente ya que su intensidad cambia con la estación del año e incluso con ciclos de periodos más grandes (Ej, los fenómenos de “El Niño”) (Grings, 2008).

Referencias

- Arnesen, A.S., Silva, T.S.F., Hess, L.L., Novo, E.M.L.M., Rudorff, C.M., Chapman, B.D., McDonald, K.C. (2013) Monitoring flood extent in the lower Amazon River floodplain using ALOS/PALSAR ScanSAR images. *Remote Sensing of Environment*, 130: 52-61.
- Berezowski, T., Bielinski, T. & Series Using River Gauge Observations. (2020) *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 13: 2626-2638.
- Bruniard, E. D. (1966) *Bases Fisiográficas para una división regional de la provincia de Corrientes. Resistencia, Chaco: Revista Nordeste*, 8, 7–80..
- Carnevali, R. (1994) Fitogeografía de la Provincia de Corrientes. Provincia de Corrientes - República Argentina: Gobierno de la Provincia de Corrientes - Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Currie, H. M., & Gimenez, J. E. (1998), *Las Cuencas Hidricas de la Provincia de Corrientes potencial y recursos* (recopilación). Corrientes: Cátedra de Hidrología Agrícola Facultad de Ciencias Agrarias - UNNE,.
- Delgado Noguera, J. G. (2019). Zonificación del riesgo por inundación como aporte a la prevención, en el puerto - Laguna de la Cocha- Colombia. *Revista Novedades Colombianas*, 14(1), 27–47. <https://doi.org/10.47374/novcol.2019.v14.1432>
- Donezar-Hoyos, U.; Larrañaga Urien, A.; Tamés-Noriega, A.; Sánchez-Gil, C.; Albizua-Huarte, L.; Ciriza-Labiano, R., & Del Barrio-Arellano, F. (2017). Aplicación de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en la detección y delineación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios

- Copernicus EMS. *Revista de Teledetección*. (50):49-57.
<https://doi.org/10.4995/raet.2017.8896>
- Grings, F. M. (2008) Extracción de información ambiental a partir de imágenes de radar utilizando modelos de interacción onda-blanco. Universidad de Buenos Aires: Tesis doctoral.
- Grings, F., Ferrazzoli, P., Jacobo-berlles, J., 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. 10.1109/TGRS.2005.863482.
- Henry, J. B. (2006). Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 10(27), 1921-1929.
- Hess, L. L., Melack, J. M., Filoso, S., & Wang, Y. (1995). Delineation of inundated area and vegetation along the Amazon floodplain with the SIR-C synthetic aperture radar. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33(4).
- Hess, L. L., Melack, J. M., & Simonett, D. S. (1990). Radar detection of flooding beneath the forest canopy: A review. *International Journal of Remote Sensing*, 11(7), 1313-1325.
- Liu, Z., Zhao, L., Xu, T., Bu, F., Liu, X., & Zhou, D. (2018). Quantification of potential flood inundation areas in the marsh wetland of Honghe National Natural Reserve, Northeast China. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18(4), 355-364.
- Mas, F. M. (2013). Las riberas fluviales. *Ambienta*, 90-101.
- Munizaga, J., Garcia, M., Ureta, F., Novoa, V., Rojas, O., & Rojas, C. (2022). Mapping coastal wetlands using satellite imagery and machine learning in a highly urbanized landscape. *Sustainability*, 14, 5700.
- Odriozola, M. P., & Contreras, F. I. (2018). Cartografías de riesgos de inundaciones y anegamientos en la provincia de Corrientes (Argentina). Universidad de San Martín: UNSAM.
- Oliver, C., & Quegan, S. (2004). *Understanding synthetic aperture radar images*. SciTech Publishing.
- Pattison, J. K. W., Pomeroy, J. W., Badiou, P., & Gabor, S. (2018). Wetlands, flood control, and ecosystem services in the Smith Creek drainage basin: A case study in Saskatchewan, Canada. *Ecological Economics*, 147, 36-47.
- Pérez Morales, A. (2012). Estado actual de la cartografía de los riesgos de inundación y su aplicación en la ordenación del territorio: El caso de la región de Murcia. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (58), 57-81.
- Pope, K. O., Rejmankova, E., Paris, F. F., & Woodruff, R. (1997). Detecting seasonal flooding cycles in marshes of the Yucatan Peninsula with SIR-C polarimetric radar imagery. *Remote Sensing of Environment*, 157-166.

- Pope, K. O., Rey Benayas, J. M., & Paris, J. F. (1994). Radar remote sensing of forest and wetland ecosystems in the Central American tropics. *Remote Sensing of Environment*, 48, 205-219.
- Rahman, R. M., & Thakur, P. K. (2018). Detecting, mapping, and analyzing flood water propagation using synthetic aperture radar (SAR) satellite data and GIS: A case study from the Kendrapara District of Orissa State of India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 21, 37-41.
- Rojas, O., Soto, E., Rojas, C., & López, J. J. (2022). Assessment of the flood mitigation ecosystem service in a coastal wetland and potential impact of future urban development in Chile. *Habitat International*, 123.
- Salvia, M. M. (2010). *Aporte de la teledetección al estudio del funcionamiento del macrosistema Delta del Paraná: Análisis de series de tiempo y eventos extremos*. Biblioteca Digital-Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- San Martín, L., Morandeira, N., Grimson, R., & Kandus, P. (2015). *Uso de imágenes ALOS/PALSAR-1 para la clasificación e inventario de humedales en la Llanura Costera de Ajó (Buenos Aires, Argentina)*. Teledetección: Humedales y Espacios Protegidos, XVI Congreso de la Asociación Española de Teledetección, 583-586.
- Sánchez Sánchez, Y., Quirós, E., Durán Barroso, P., & Martínez Graña, A. (2019). Selección del umbral óptimo para la separación de la lámina de agua del embalse Jerte-Plasencia a partir de Sentinel-1. *Teledetección: Hacia una visión global del cambio climático*, 501-504.
- Sevillano Rodríguez, M. E., Bravo Peña, L. C., Alatorre Cejudo, L. C., & Salcedo Hurtado, E. de J. (2020). Identificación de zonas de inundación a partir de imágenes (SAR) y de eventos históricos de inundación: Caso de estudio Santiago de Cali, Colombia. *Cuadernos Geográficos*, 59(2), 308-329.
- Townsend, P. A., & Walsh, S. J. (1998). Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. *Geomorphology*, 21, 295-312.
- Vich, A. J. (1996). *Aguas continentales: Formas y procesos*. Mendoza: Centro de Economía, Legislación y Administración del Agua.
- Zozaya, A., & Del Pino, P. (2020). Design of an antenna array for an LFM-CW synthetic aperture radar prototype. *DYNA*, 87(212), 96-101.