

Análisis de la extensión de agua usando imágenes Sentinel-1 durante temporada de crecidas

Uziel Luna V. ^a, Jhon Chura Ch. ^a, Santos Garzofino F. ^a

^aServicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Unidad de Estudios e investigación hidrológica La Paz, Bolivia

Email: uziel.luna@senamhi.gob.bo, jhon.chura@senamhi.gob.bo, santos.garzofino@senamhi.gob.bo

INFORMACIÓN

Palabras clave:

Inundación
Teledetección
Sentinel-1
Crecidas

RESUMEN

La época lluviosa del país trae consigo crecidas en todas las cuencas monitoreadas, estas son identificadas a través de lecturas limnimétricas. Para la cuenca del río Madre de Dios se cuenta con la estación “*El Sena*”. Si bien la cuenca del río Madre de Dios tiene una extensión que sale de los límites del territorio boliviano, se realizó un estudio preliminar con teledetección, reportes de desastres por inundación de las autoridades y con registros históricos en la estación disponible para delimitar franjas de seguridad durante las crecidas del río.

Fue fundamental acudir a información satelital para el análisis multitemporal del comportamiento del río en época lluviosa y así también poder identificar la variación del ancho del río, además esta técnica brinda una correcta y necesaria información en la visualización de zonas propensas a desbordes del mismo.

Uno de los principales resultados obtenidos consiste en realizar un análisis exhaustivo del espejo de agua formado por eventos de crecida con respecto a la relación que sostiene con la precipitación y tiempo de recorrido del agua hasta la sección de control.

1. Introducción

La interpretación de desastres de origen natural tales como las inundaciones visto desde una perspectiva superficial parece ser ampliamente atribuida a la precipitación pluvial, pendientes y estado del suelo. Identificar zonas expuestas a eventos de inundación y delimitar franjas de alerta es una respuesta técnica informativa para futuros estudios de prevención.

La cuenca del río Madre de Dios, de lado boliviano, cuenta con escasa información hidrometeorológica distribuida a lo largo del curso principal de agua dificultando el monitoreo año tras año. A pesar de contar con dos secciones de aforo a la salida de la cuenca, cerca de las poblaciones El Sena y Riberalta, se considera oportuno acudir a información de la parte alta de la cuenca ubicado en el territorio peruano para estudiar la aparición de zonas inundadas.

Acorde a una detallada revisión de las zonas con alto riesgo a sufrir inundación en Bolivia, se planteó la elaboración de propuestas metodológicas basadas en

criterios hidrológicos e hidráulicos para delimitar franjas de seguridad frente a desastres por inundación que se presenta con una gran fuerza en los meses más lluviosos en Bolivia (diciembre a febrero) Se tomó la cuenca del río madre de Dios como la cuenca piloto para definir una metodología fija a emplear en las demás cuencas como la del río Beni o Mamoré.

En primera instancia, considerando los mapas de frecuencia de inundaciones del VIDECI (Viceministerio de Defensa Civil) se logró identificar que los municipios de Puerto Rico, Filadelfia, Ixiamas y El Sena presentan cierto grado de afectación por inundaciones, principalmente a la “salida relativa” (estación hidrológica *El Sena*) de la cuenca. Por motivos prácticos se estableció a la estación *El Sena* como el punto de descarga (Salida relativa) de la cuenca del río Madre de Dios.

La modelización hidráulica e hidrológica es considerada como una de las mejores maneras de afrontar este tipo de estudios a través del uso de Modelos digitales de elevación (DEM), por motivos de ciertas variaciones

respecto de las salidas simuladas con modelos digital de elevación frente a los cuerpos de agua delimitados por imágenes SENTINEL 1 se decidió, en primera instancia, acudir a técnicas de teledetección para definir franjas tentativas respaldadas por la variación del ancho del río a nivel multitemporal.

2. Información de la zona de estudio

El río Madre de Dios forma parte de la cuenca del Amazonas, atraviesa los países de Perú y Bolivia. Es afluente del río Beni en la población de Riberalta. Tiene una longitud aproximada de 1150 km y es catalogado como un río internacional (binacional), puesto que atraviesa por la frontera sureste del Perú (655 km) y por la frontera noroeste de Bolivia. La cuenca de aporte cuenta con una extensión mayor a los 100 000 km² (ver Fig.1)

La cuenca entera corresponde a una zona muy húmeda de la Amazonía subandina, principalmente la Amazonía peruana, lo que explica su alto caudal de ingreso al territorio Boliviano (mayor a 10000 m³/s). Permite una óptima navegabilidad, se puede viajar sin dificultades

desde Puerto Maldonado hasta su confluencia con el río Beni.

La cuenca del río Madre de Dios al tener poca información meteorológica e hidrológica forma parte de un monitoreo y cuenta con un sistema de pronóstico hidrológico de inundaciones. La salida del curso principal y sus distintos ríos de aporte confluyen en la población de Riberalta, se realizó un análisis de la cuenca hasta la población del Sena para evaluar y definir una metodología definitiva para el presente estudio.

Debido a que no se cuenta con información hidrológica actualizada, no será posible validar las salidas generadas a través de las imágenes SENTINEL 1. La estación “El Sena”, emplazada en la población con el mismo nombre, corresponde a una estación limnimétrica sobre el cauce principal.

2.1 Información hidrométrica

El SENAMHI cuenta con un amplio registro de niveles de agua del río Madre de Dios en la estación *El Sena*, dicho registro es alimentado de manera diaria a través de lecturas realizadas por observadores. La estación *El*

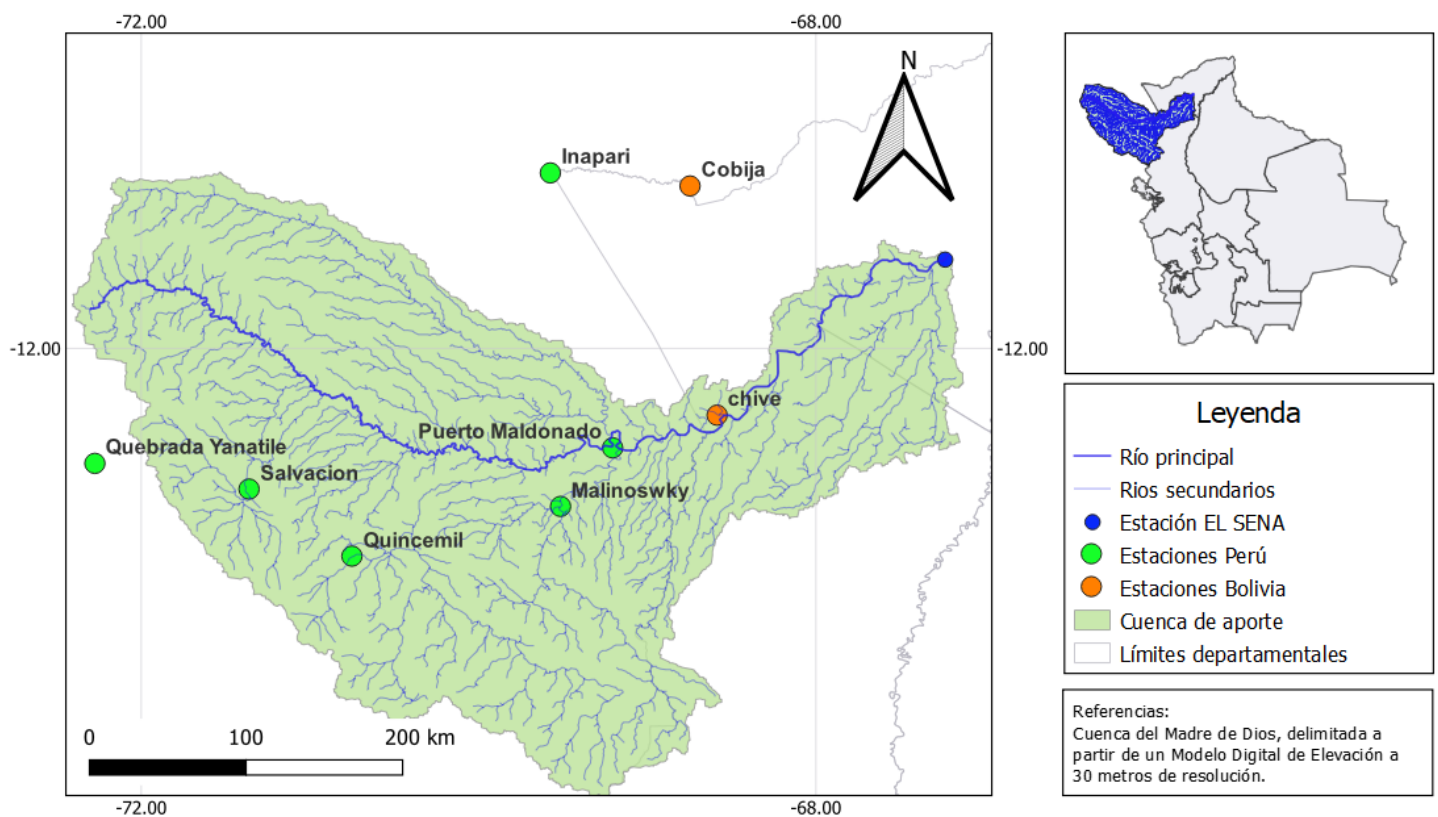


Fig. 1 Delimitación de la cuenca de estudio y su comparativa con los límites fronterizos entre Bolivia y Perú. Detalle de la cuenca de aporte y el cauce principal. Elaboración propia.

Tabla 1. Resumen del evento de crecida con mayor significancia. Información histórica de la base de datos del área de Hidrología del SENAMHI, Bolivia. Elaboración propia.

Estación de control	Nivel máximo registrado [cm]	Caudal máximo registrado [m ³ /s]	Ancho sección de aforo [m]	Día	Hora	Media anual del nivel de río [m]	Media anual de caudal del río [m ³ /s]
El Sena	897.0	13230.0	610.1	19/02/2014	13:25	444.0	6825.0

Sena fue adoptada como la sección de control a la salida de la cuenca del río Madre de Dios para el estudio de inundación. Este punto forma parte de las estaciones de monitoreo del proyecto HyBam en Bolivia por parte del instituto francés de investigación IRD. Si bien se cuenta con aforos realizados en la gestión 2022, específicamente en marzo de 2022, solo fue posible acceder a información actualizada hasta el 2017.

Esta información es utilizada y levemente validada por el área de pronósticos hidrológicos a través del análisis diario de crecidas de niveles.

La **Tabla 1** es un resumen del evento máximo histórico identificado en el aforo del año 2014. En la base de datos del SENAMHI se pudo apreciar también que el máximo nivel de agua alcanzado sucedió en un evento ocurrido en febrero de 2014 y el nivel mínimo fue registrado en octubre de 2020.

Revisando todo el registro histórico de niveles de agua registrados en las bases de datos mencionada, se hizo un relleno y crítica de los mismos. Una breve verificación de los registros de nivel permitió identificar crecidas significativas respecto a la precipitación registrada en las subcuencas de aporte circundantes a la sección de aforo.

3.1.3 Información Satelital

Debido a que la información tipo radar proporcionada en las imágenes Sentinel-1 fueron puestas a disposición a partir de abril de 2015 imposibilitado visualizar el evento del año 2014 como principal periodo de análisis remoto, por ello se buscó eventos similares del registro histórico que entren el rango de percepción de las imágenes Sentinel-1.

Sentinel-1 es un programa Copernicus está equipado con dos satélites de órbita polar diseñados para proporcionar datos espaciales en alta resolución. El satélite Sentinel-1 se destaca por tener un radar de

apertura sintética (SAR) de banda C. Un punto destacable del instrumento SAR es ofrecer información de alta y media resolución para la observación terrestre incluso por la noche. También permite obtener información a través de un radar con capacidad interferométrica para detectar pequeños movimientos del suelo (a nivel milimétrico o submilimétrico) Las bandas de Sentinel-1 permiten obtener imágenes en todas las condiciones meteorológicas. Funciona en un modo de operación preprogramado libre de conflictos que permite alcanzar una alta fiabilidad de servicio y crear un archivo de datos consistente a largo plazo para ser utilizado en la aplicación basada en series temporales largas. Se destacan algunas características ventajosas de la teledetección RADAR en comparación a la tecnología óptica:

- Detección en toda condición climática
- Modo diurno y nocturno (No es afectado por la iluminación del sol)
- Alta capacidad de medición de la rugosidad de la superficie

También presenta ciertos inconvenientes:

- Efectos de Speckle (Dificultad en la interpretación visual)
- Efectos de topografía (Sombreado topográfico)
- Efectos de rugosidad de la superficie

Por su disposición, acceso y procesamiento, se evaluó que la información satelital tipo radar (Sentinel-1) es adecuada para el estudio en épocas lluviosas debido a las múltiples ventajas en la medición que realiza. El criterio de selección de las imágenes Sentinel-1 frente a las Landsat fue la captura de información con respecto a la cobertura de nubosidad en periodos de lluvia en Bolivia (diciembre a marzo)

La **Tabla 2** presenta un resumen de las crecidas de mayor significancia identificadas y la disposición de imágenes Sentinel-1 elegidas durante el evento de crecida.

Tabla 2. Identificación de crecidas y su duración. Información histórica de la base de datos del área de Hidrología del SENAMHI, Bolivia. Elaboración propia.

Estación	Fecha del evento identificada	Fecha de la imagen sentinel-1 más cercana	Duración de la crecida				
			Fecha	nivel [cm]	Fecha	nivel [cm]	
El Sena	25/02/2021	28/02/2021	25/02/2021	918.0	a	14/03/2021	715.0
El Sena	05/02/2019	05/02/2019	05/02/2019	822.0	a	03/03/2019	820.0
El Sena	04/03/2017	09/03/2017	04/03/2017	833.0	a	10/03/2017	643.0
El Sena	24/02/2015	-	24/02/2015	838.0	a	08/08/2015	777.0

3. Metodología

Se propone una metodología del tipo cuantitativa centrada en estudiar los aspectos observables y susceptibles de la cuantificación para describir o explicar los fenómenos de inundación ocurridos en la cuenca. A través de un análisis exhaustivo de los registros históricos de nivel de agua se identificó crecidas en la cuenca con la finalidad de buscar información satelital que represente gráficamente el área de intrusión del agua en la crecida identificada.

Para cumplir con la metodología planteada se acudió a la tecnología RADAR. Las imágenes Sentinel-1 al ser una representación gráfica de sensores remotos que omiten la nubosidad, resulta ideal para un estudio de estas características debido a que el estudio entero se centra en visualizar y cuantificar el comportamiento de los ríos en épocas lluviosas.

La metodología comprende el análisis de series temporales, corrección de imágenes, identificación de cuerpos de agua y generación de shapefiles que representen la variación del ancho del río.

3.1 Procesamiento en SNAP

La información satelital obtenida fue procesada con el software SNAP desarrollado por las ESA, este software es óptimo para el manejo de imágenes Sentinel-1 en general. Como todo tratamiento de información satelital el procesamiento que realiza SNAP va limitado por las capacidades del ordenador utilizado. Se pudo analizar la exigencia de SNAP es determinado a través del “nivel de zoom” que maneja, aclarando que este es distinto a lo que se maneja en Bolivia, es decir, una cuenca a nivel 5 o 6 en Bolivia resulta ser de nivel 0 o 1 en SNAP (**Fig. 2**) Regresando al procesamiento de información, para acelerar tiempos de carga en el tratamiento de la imagen se utilizó recortes de la

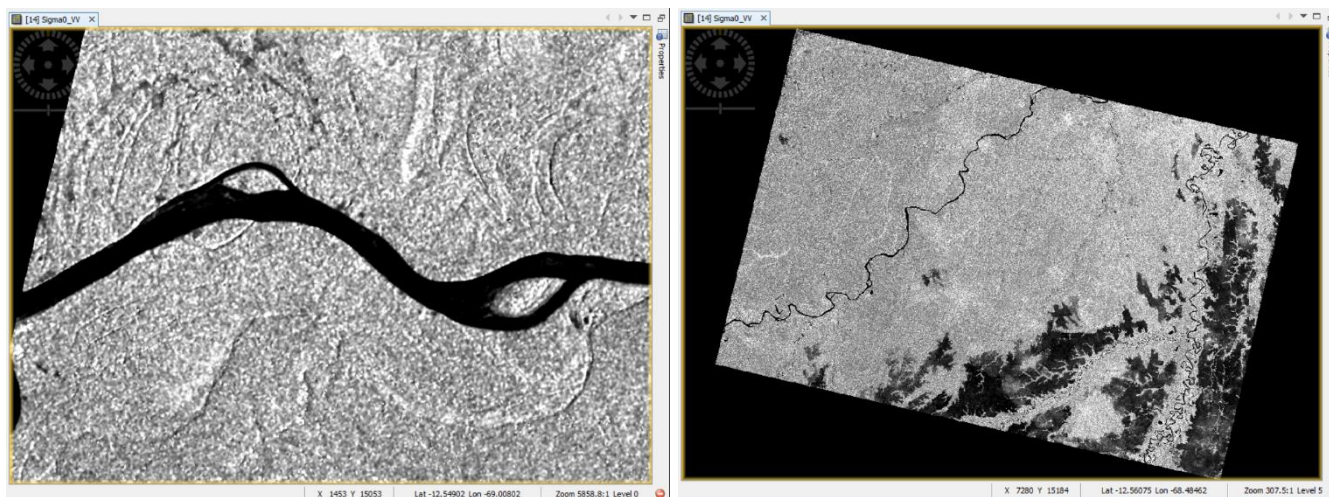


Fig. 2 Proceso de recorte de imágenes SENTINEL 1 para optimizar tiempos de procesamiento. Imágenes extraídas de <https://scihub.copernicus.eu>.

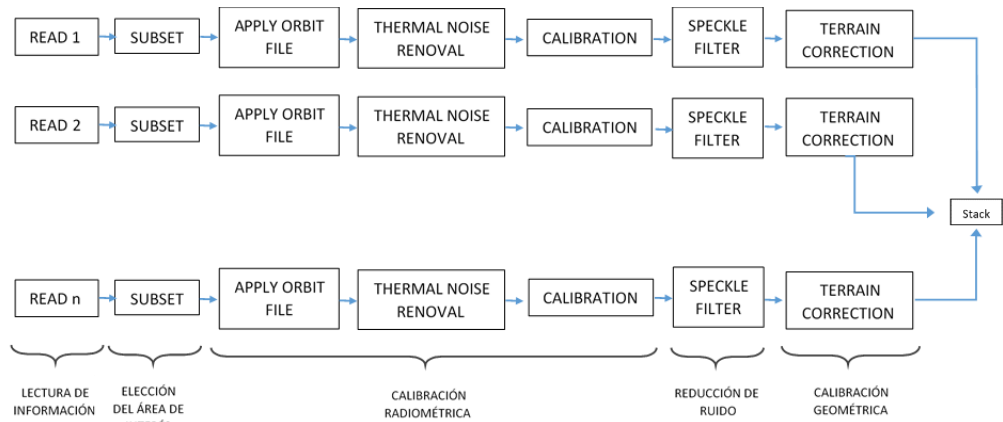


Fig. 3 Metodología utilizada para la detección de cuerpos de agua en imágenes Sentinel-1 en los periodos de crecida identificados. Información obtenida de múltiples bibliografías y estudios. Elaboración propia.

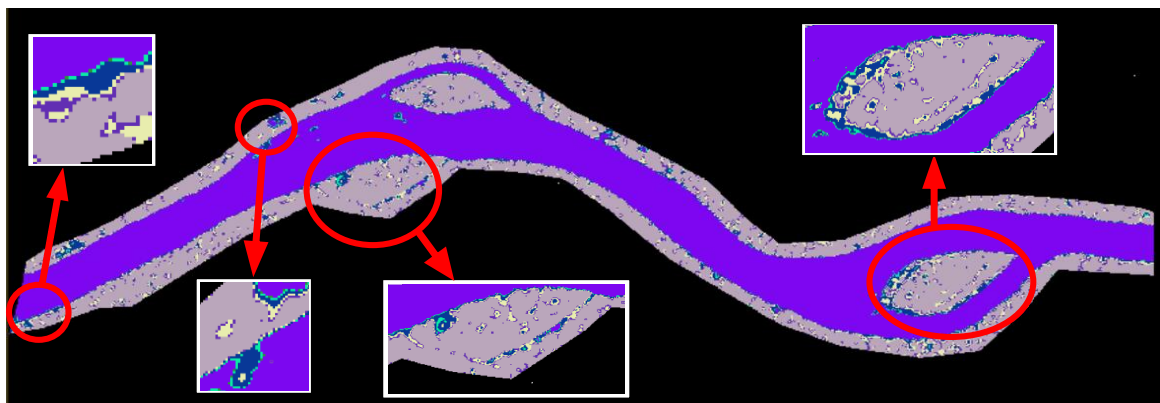


Fig. 4 Clasificación no supervisada de la zona de estudio. Se detalla la importancia de considerar múltiples Clusters de análisis para mejor precisión, Elaboración propia.

imagen a nivel 1, donde fue necesario generar geometrías a lo largo del río para realizar recortes de la imagen.

Concluidas las actividades previas al desarrollo del método de análisis de inundación, se generó la presencia de cuerpos de agua a través de la comparación de máscaras de agua generado con un análisis multitemporal de imágenes Sentinel-1 en SNAP utilizando un procedimiento minucioso de ajuste, calibración radiométrica y geométrica (**Fig. 3**)

Sin aplicar filtro o corrección alguna se pudo apreciar la evidente diferencia en la imagen con múltiples polarizaciones (VV y VH) Entre otras observaciones relevantes se identifica que, a través de un cambio de base lineal a logarítmica en la imagen corregida, en el histograma de frecuencias de intensidades, los pixeles con valores inferiores o iguales a los -20 decibelios pertenecen a los cuerpos de agua.

Al realizar el tratamiento de detección de cuerpos de agua y mapeo de inundaciones, se exportó la imagen clasificada en formato Tiff para su análisis en Qgis. Observándose que cuanto mayor sean los grupos (clusters) de la clasificación no supervisada mejor son los resultados.

La **Figura 4** muestra la atenuación del error de clasificación al aumentar grupos (clusters), donde el ancho del río se ve mejor delimitado sin la falsa aparición de cuerpos de agua circundantes al mismo.

4. Análisis de resultados

4.1 Imágenes Sentinel-1 procesadas

Analizando las salidas del procesamiento de las imágenes a través del software SNAP fue posible evidenciar múltiples consideraciones al momento de identificar cuerpos de agua permanentes y temporales.

Sin aplicar filtros de reducción de ruido (Speckle filter) se pudo apreciar una evidente diferencia entre las polarizaciones VV y VH.

Se utilizó el modo del sensor IW (interferometric wide swath) con un ancho de escena de 250 Kilómetros a una resolución de 5x20 metros. Analizando dos tipos de polarizaciones (VH y VV)

Se usó la conversión a una base logarítmica de las bandas para identificar mejor los píxeles de agua donde se logró obtener ciertas diferencias al analizar zonas inundadas en tonos más oscuros por debajo a -10.5 dB (Tabla 3)

$$\text{Sigma0_VV_db} = 10 \cdot \log(\text{abs}(\text{Sigma0_VV})) \quad (1)$$

$$\text{Sigma0_VH_db} = 10 \cdot \log(\text{abs}(\text{Sigma0_VH})) \quad (2)$$

El estudio también contempló la discriminación de cuerpos de agua transitorios (inundaciones) y zonas secas. Todo este proceso fue logrado siguiendo el proceso metodológico que contemplaba los siguientes pasos: Aplicación del archivo de orbita, renovación del

Tabla 3. Análisis de cuerpos de agua para las polarizaciones VH y VV. Elaboración propia.

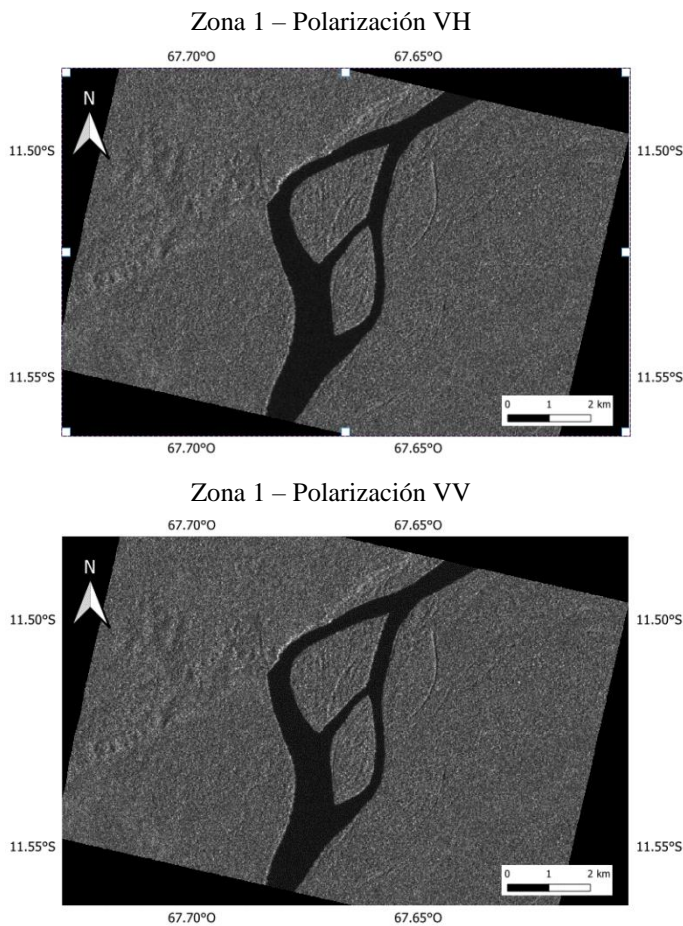
S1 Modo	Polarización	Diferencia Agua/Tierra seca [dB]
IW	VH	-20.79
IW	VV	-13.27

ruido térmico, calibración, filtro de ruido y corrección terrestre (Fig. 5)

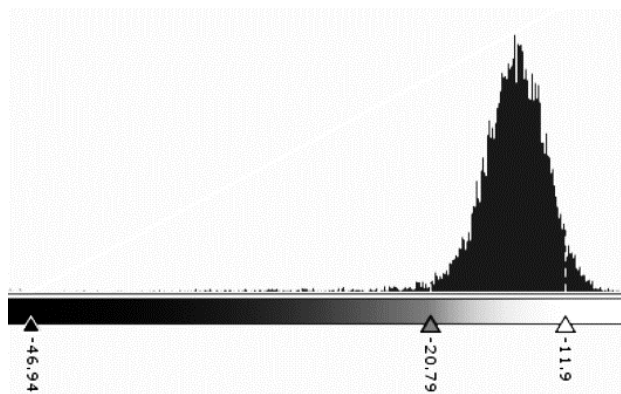
El estudio también contempló la discriminación de cuerpos de agua transitorios (inundaciones) y zonas secas. Se identificó la importancia de corregir los errores de ruido por la aparición de falsos píxeles, es decir, se observaba cierta distorsión en la imagen en los bordes y en ciertas zonas.

4.2 Frecuencia y extensión de la inundación

El resultado de la evaluación de las crecidas significativas de agua fue verificado con las salidas del visor llamado Global Surface Water, el cual permite



Histograma Zona 1 – Amplitude_VH – 2021-02-04



Histograma Zona 1 – Amplitude_VV – 2021-02-04

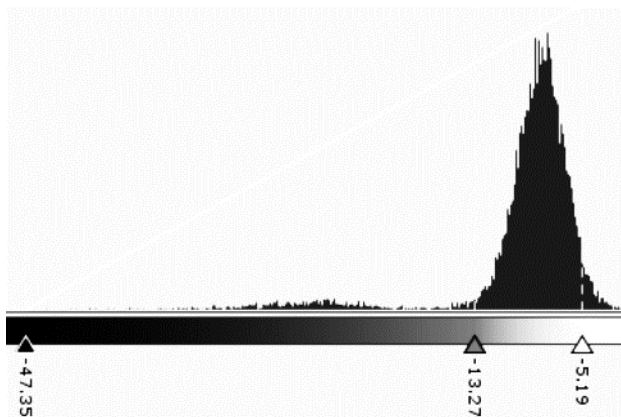


Fig. 5 Análisis de los histogramas de frecuencias de la zona 1. Detalle de las polarizaciones VH y VV. Elaboración propia.

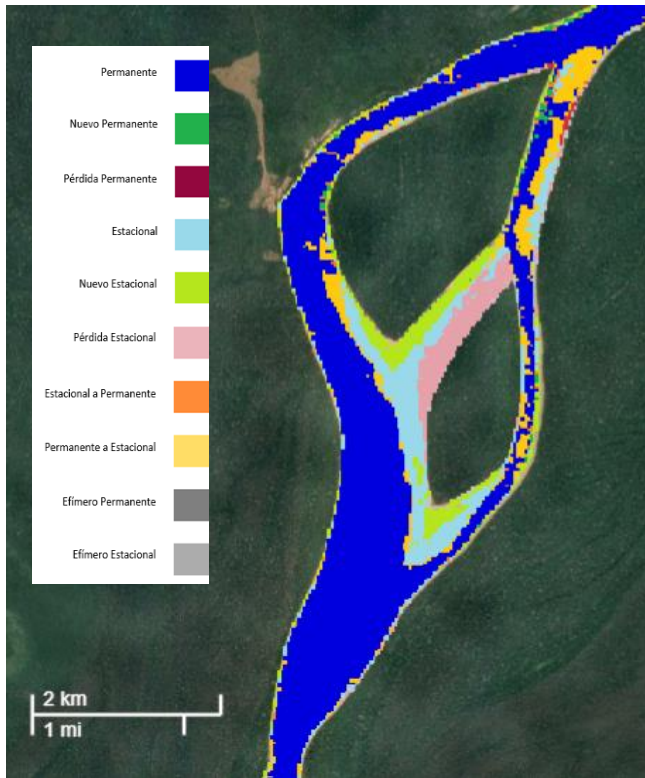


Fig. 6 Recurrencia de la extensión de agua, zona 1 de análisis. Obtenido del portal <https://global-surface-water.appspot.com/map>.

acceder a un análisis de información satelital histórica comprendido entre los años 1984 a 2020, este visor permite identificar las zonas de máxima inundación ocurridos antes del año 2015 (lanzamiento del programa Sentinel-1) Entonces, esta herramienta

Tabla 3. Recurrencia de agua por pixel identificado. Elaboración propia.

	Pérdida Temporal	Temporal	Nuevo Temporal	Permanente a Temporal	Permanente
ene	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
feb	1.00	1.00	0.80	1.00	1.00
mar	1.00	1.00	0.83	0.75	1.00
abr	0.89	1.00	0.66	0.89	1.00
may	0.62	0.90	0.55	0.95	0.96
jun	0.53	0.68	0.41	0.96	0.96
jul	0.31	0.31	0.30	0.94	1.00
ago	0.13	0.09	0.00	0.63	0.88
sep	0.15	0.00	0.00	0.42	0.79
oct	0.13	0.15	0.13	0.43	0.85
nov	0.50	0.53	0.37	0.92	0.83
dic	0.80	0.88	0.50	0.88	0.83

resulta de suma importancia para poder visualizar la crecida máxima registrada el año 2014 permitiéndonos complementar el estudio con información de Sentinel-1 desde el año 2020 en adelante

Como se aprecia en la **Figura 6** el análisis de recurrencia de la extensión y aparición de cuerpos de agua circundantes al río fue realizado con distintos tipos de imágenes a diferentes resoluciones una gran mayoría con Landsat (Pekel J-F *et. al* 2016)

La **Tabla 3** detalla un ponderado de ocurrencia de cada pixel identificado en la **Figura 6**.

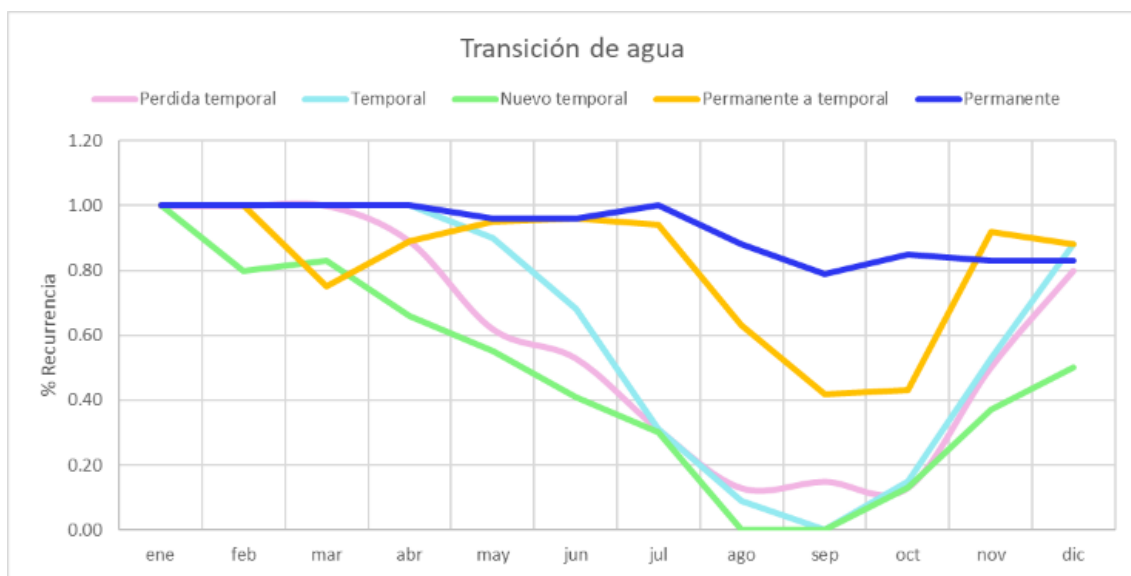


Fig. 7 Análisis de los histogramas de frecuencias de la zona 1. Detalle de las polarizaciones VH y VV. Elaboración propia.

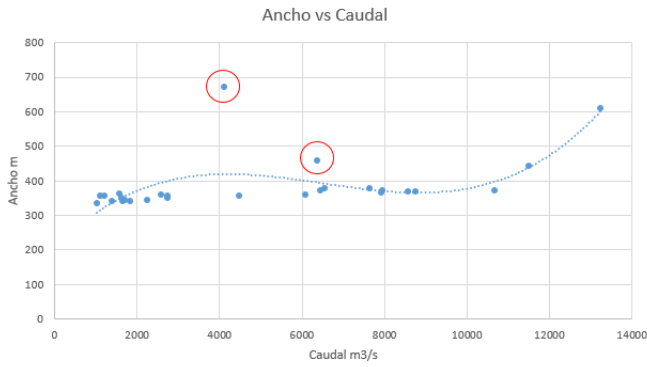


Fig. 8 Análisis de la variación del ancho de la sección de aforo (El Sena) frente al caudal medido. Elaboración propia.

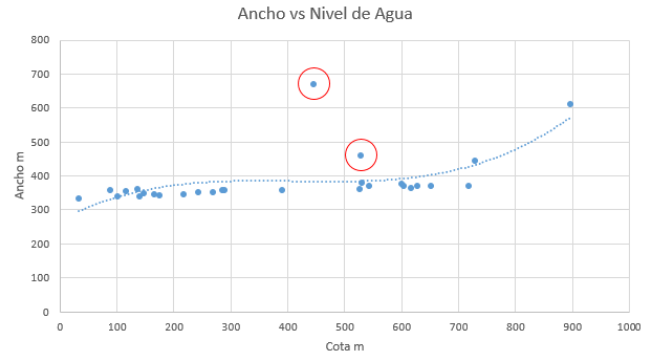


Fig. 9 Análisis de la variación del ancho de la sección de aforo (El Sena) frente al nivel de agua. Elaboración propia.

Resultó que todo el tramo del río Madre de Dios del lado boliviano contiene las crecidas de manera eficaz, un claro indicador de dicho evento de crecida es la aparición y desaparición de islas centrales las cuales actúan como disipadores de energía y en muchos casos separan el flujo de agua (Zona 1 de análisis, **Figura 6**)

Los meandros también juegan un rol en la disipación de energía del río generando, en ciertas ocasiones, la aparición de algunos cursos de agua (riachuelos)

4.3 Análisis de la relación entre el nivel de agua y la extensión de la inundación.

Con la información de aforos (Caudales y ancho de río) realizados hasta el año 2017 y los niveles de agua medidos de manera diaria se realizó un análisis a fin de identificar algún tipo de comportamiento.

El tratamiento de las imágenes Sentinel-1 para identificar inundaciones se realizó utilizando el filtro de ruido (Speckle Filter) Lee con una ventana de 7x7.

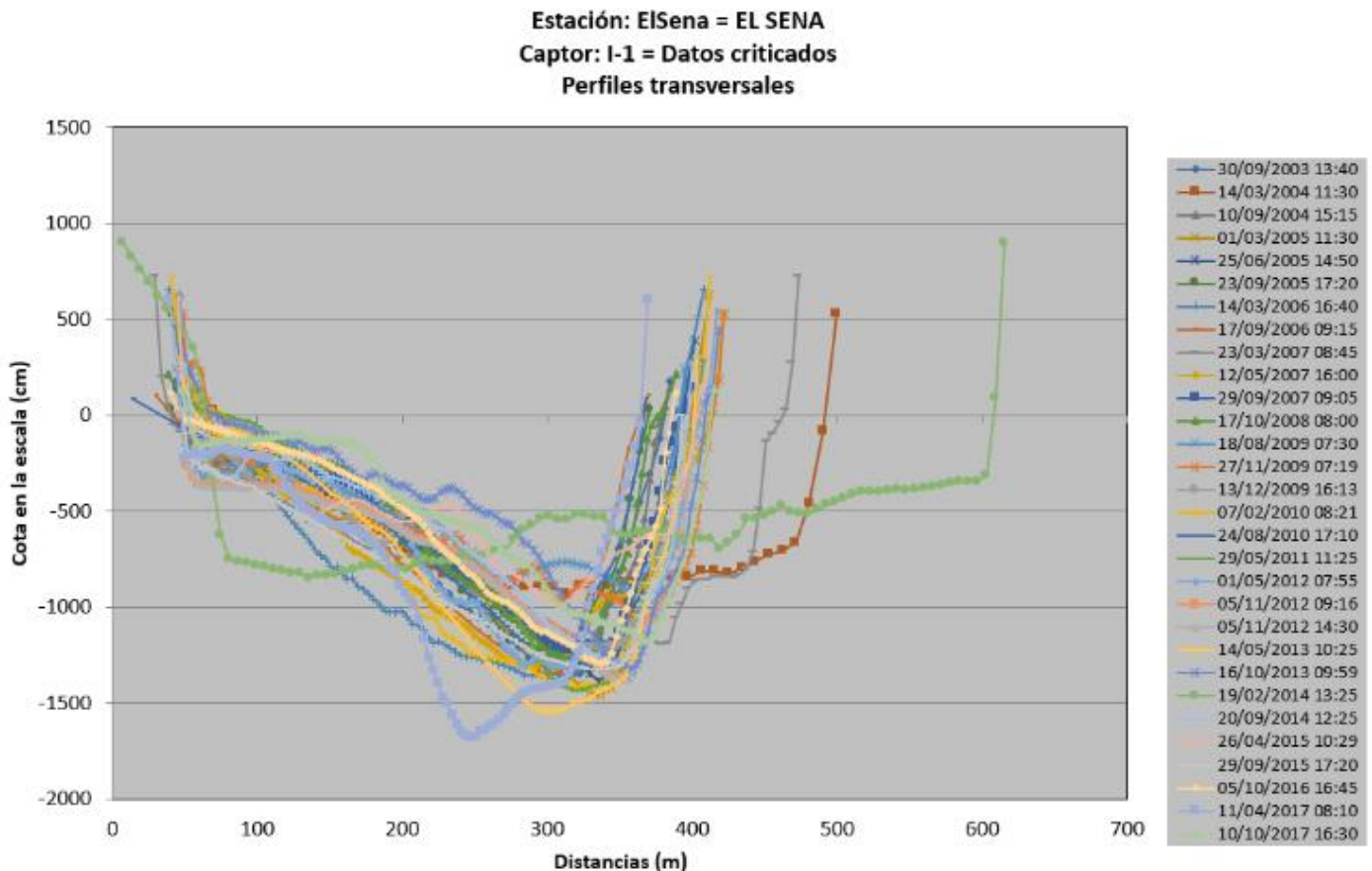


Fig. 10 Variación de la sección del río en las fechas de aforo realizadas. Extraído de la base de datos del SENAMHI.

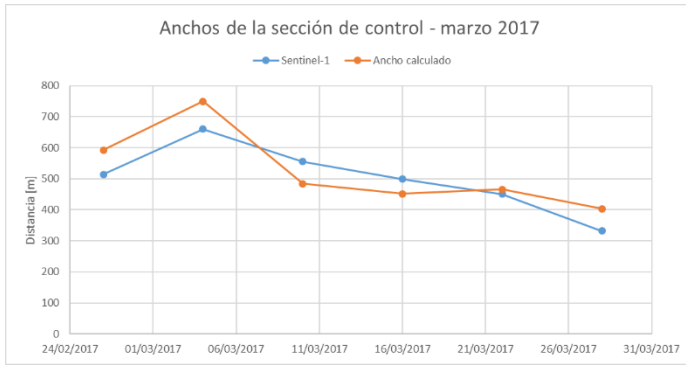


Fig. 11 Comparación de las mediciones del ancho del río por aforos y generadas por información satelital. Marzo de 2017. Elaboración propia.

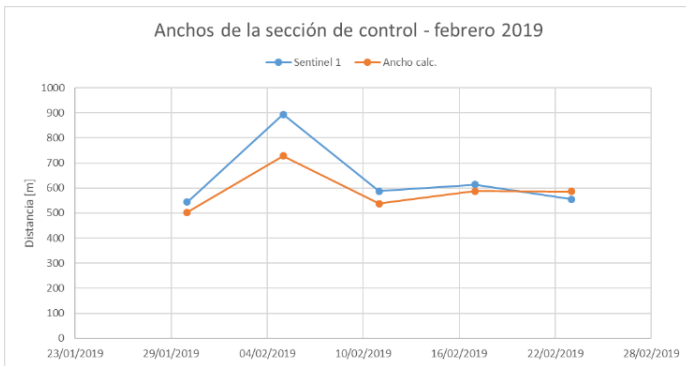


Fig. 12 Comparación de las mediciones del ancho del río por aforos y generadas por información satelital. Febrero de 2019. Elaboración propia.

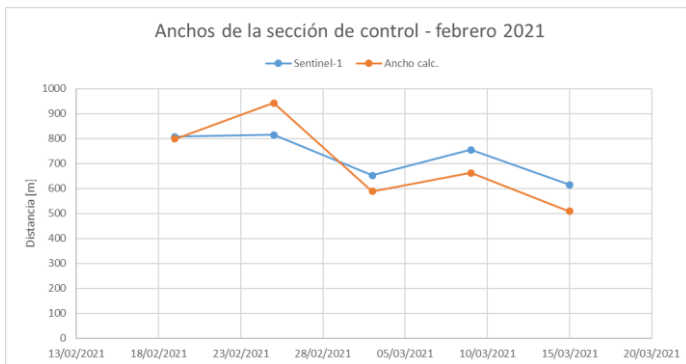


Fig. 13 Comparación de las mediciones del ancho del río por aforos y generadas por información satelital. Febrero de 2021. Elaboración propia.

Si bien no se encontró notorias diferencias entre los cuerpos de agua identificados a través del tratamiento de las imágenes con distintas polarizaciones (VV y VH) se consideró suficiente identificar la media entre ambas mediciones a fin de subsanar ciertos tipos de errores que se hayan cometido.

Las **Figuras 8 y 9** presentan la variación del ancho del río frente a dos variables como el nivel de agua y el caudal aforado con la observación que las mediciones realizadas en 14/03/2003 y 16/10/2013 muestran cierto error con respecto de los años próximos.

Si bien es posible omitir dichas mediciones para el análisis de información posterior al año 2017, fue importante analizar establecer una verificación y posterior corrección de caudales relacionados con dichos niveles de agua. Lastimosamente no fue posible debido a la variación de la sección de aforo por el transporte de sedimentos y variación del lecho del río resultando complicado definir un método preciso de ajuste de información con los datos disponibles (**Fig. 10**).

Tomando dichas consideraciones, se analizó la información posterior al año 2013 a fin de evitar el uso de información dudosa. Las gráficas mostradas en las **Figuras 11,12 y 13** presentan el cálculo del ancho del río con el uso de imágenes Sentinel-1 a través del uso de la metodología planteada donde se evidencia cierta variación con la información obtenida con los aforos. Se evidencia una cierta diferencia en el ancho calculado y los medidos en campo por múltiples factores que puedan ocurrir durante el foro o durante el análisis de las imágenes Sentinel-1.

5. Discusión

El estudio surgió frente a la inundación ocurrida el año 2014, donde todo el departamento de Pando sufrió un aumento brusco de niveles en sus cuerpos de agua producto de un evento máximo de inundación en toda la historia del monitoreo de la zona.

Se espera profundizar el estudio acompañado de información de campo para validar la delimitación del ancho del río como mínimo en periodos de estiaje, para así tener información futuras modelaciones.

Si bien se realizó el análisis del aumento de área del agua en zonas con alta variación de la superficie inundada cerca a la población El Sena no se descarta la posibilidad de extender el estudio hacia la cabecera de la cuenca.

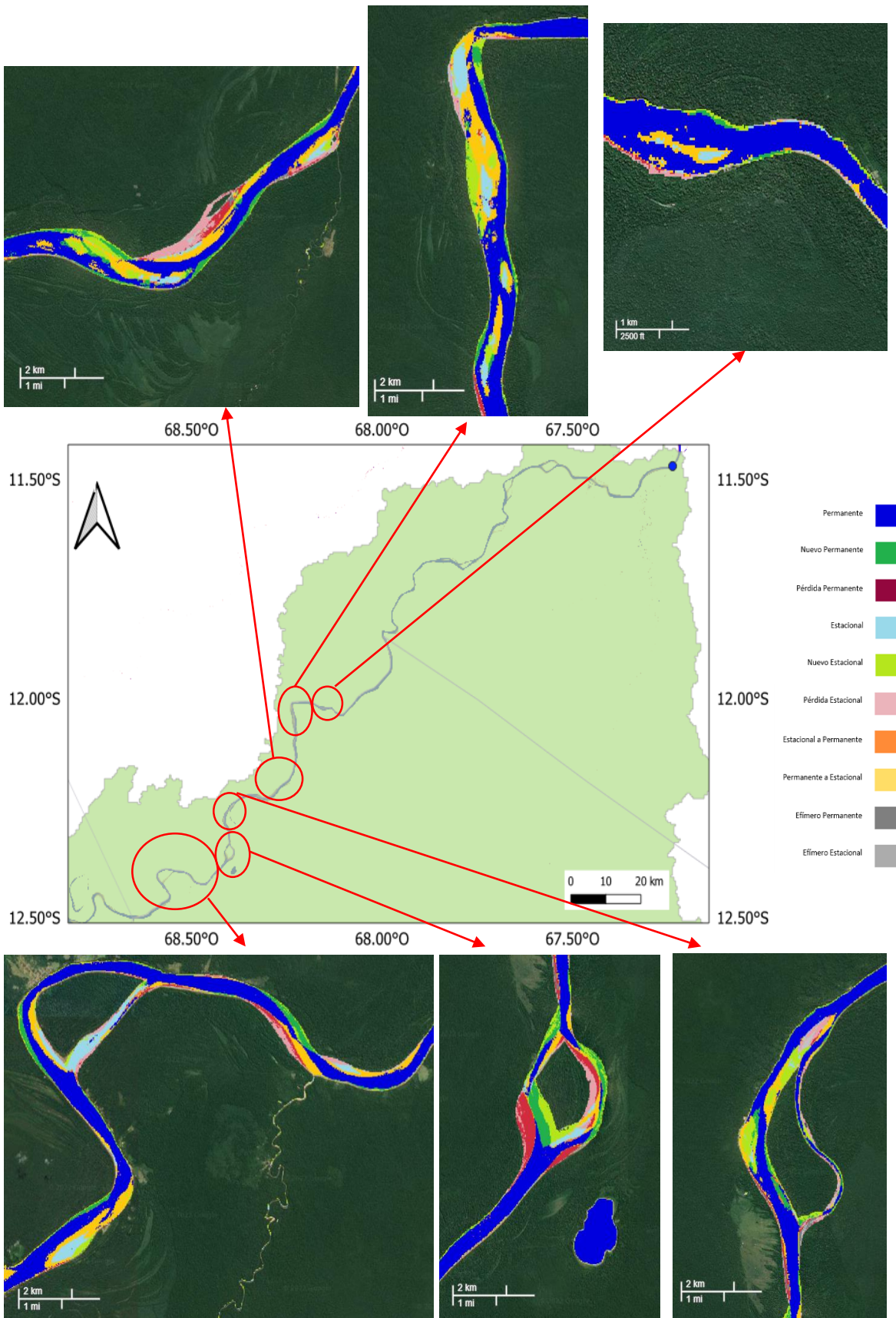


Fig. 14 Recurrencia de la extensión de agua, identificación de zonas críticas. Obtenido del portal <https://global-surface-water.appspot.com/map>.

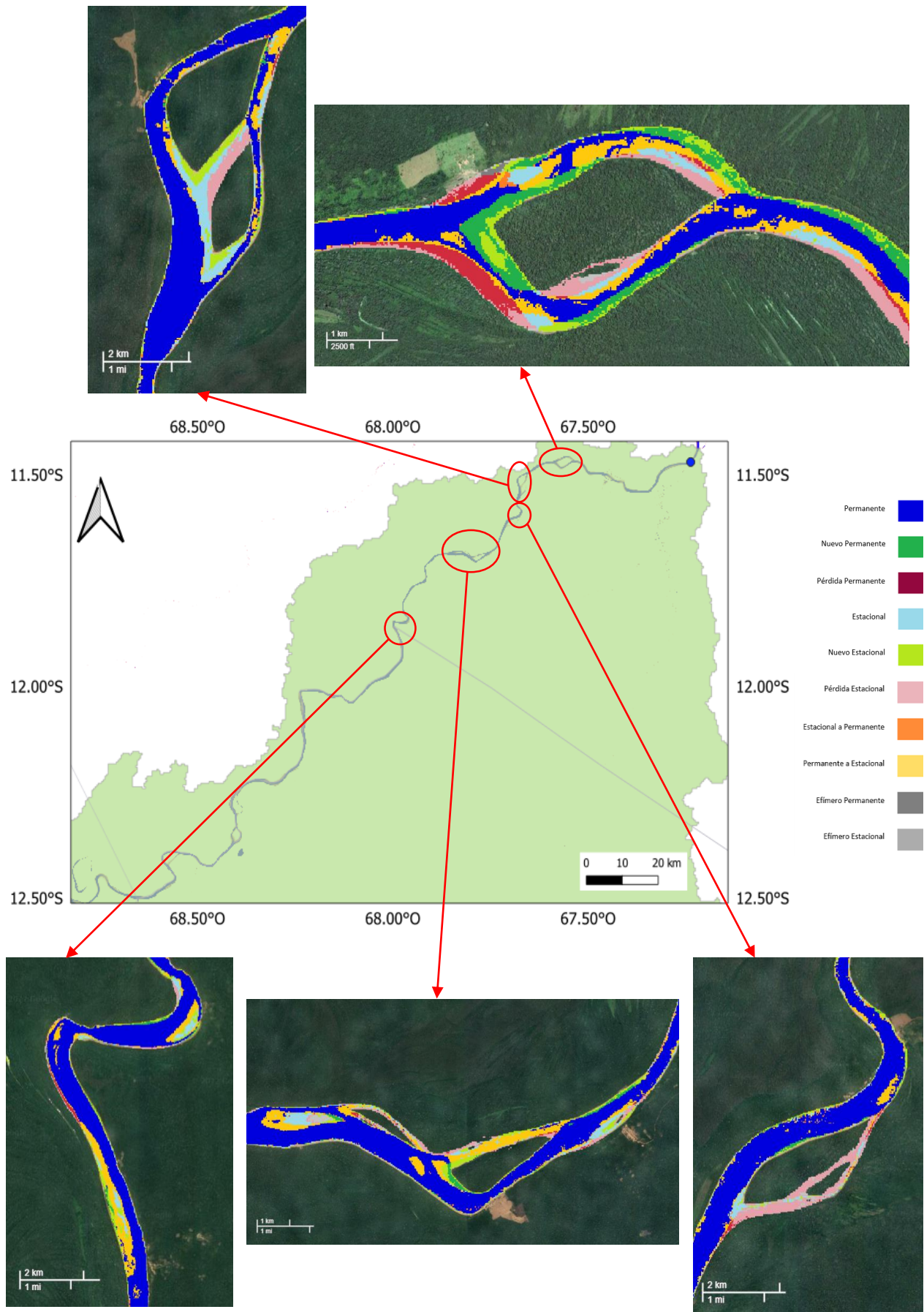


Fig. 15 Recurrencia de la extensión de agua, identificación de zonas críticas. Obtenido del portal <https://global-surface-water.appspot.com/map>.

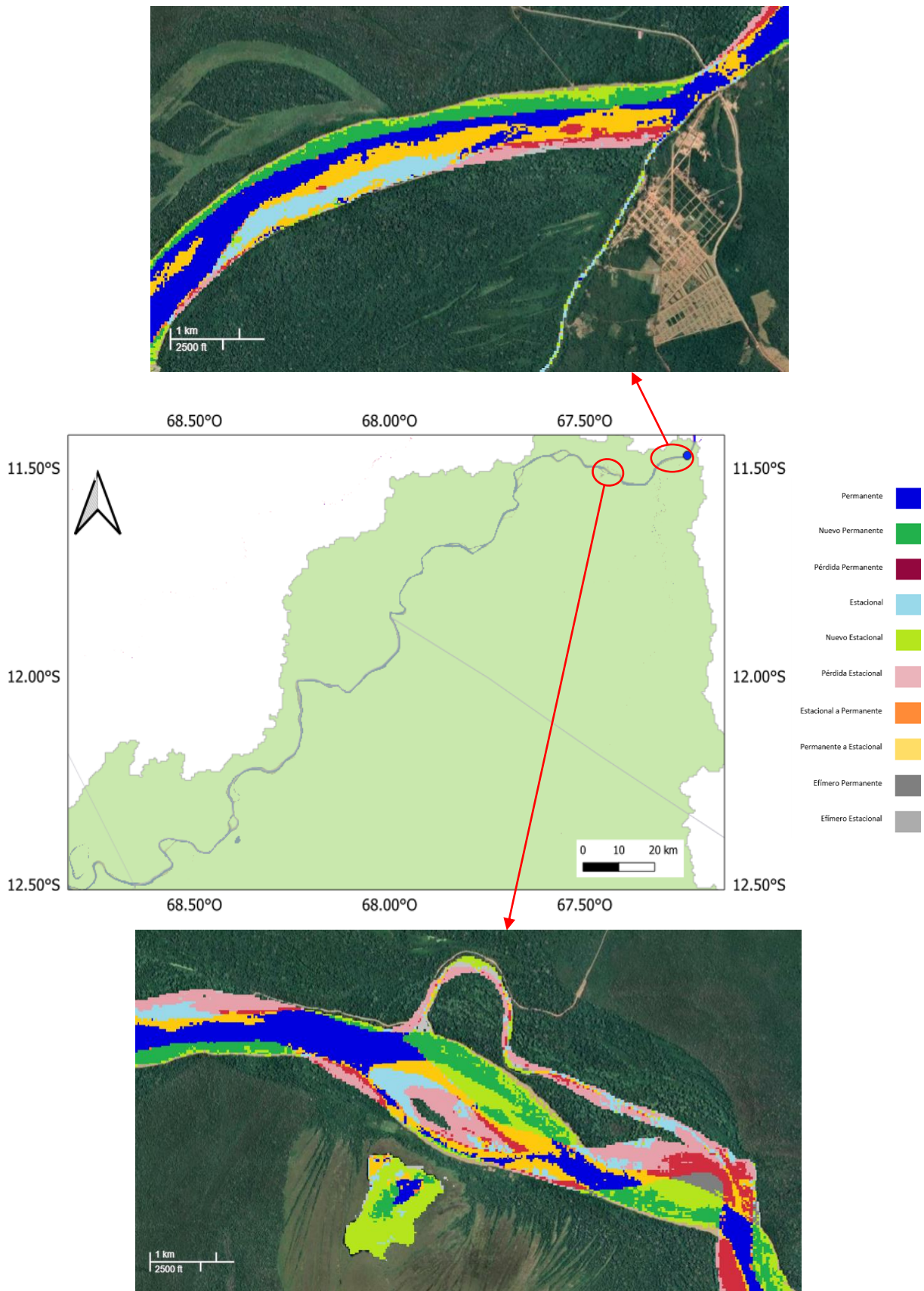


Fig. 16 Recurrencia de la extensión de agua, identificación de zonas críticas. Obtenido del portal <https://global-surface-water.appspot.com/map>.

Las **figuras 14, 15 y 16** detallan la recurrencia de agua presente en el tramo boliviano de la cuenca de Madre de Dios, mostrando el comportamiento del agua frente a meandros y tramos rectos. Se aclara que cerca de la población El Sena, aproximadamente 10 kilómetros antes (**Figura 16**), se presenta un tramo recto que experimenta gran variación del espejo de agua como también la aparición y desaparición de pequeños cursos de agua.

6. Conclusiones

Ante la falta de información en la cuenca Madre de Dios se propuso una metodología alterna pero necesaria para el monitoreo de inundaciones en la de estudio. Se entiende que respaldar este tipo de trabajos con análisis hidrológicos es necesario para contar con una interpretación físico-matemática de eventos de crecida. Como un punto fuerte y de mucha importancia es aplicar y proponer el uso de información Sentinel-1 SAR. Las imágenes tipo SAR facilitan mucho la creación de máscaras de zonas inundadas con bastante facilidad a través de la identificación de píxeles potencialmente inundados cuya característica principal es su baja retrodispersión resultando ser una superficie lisa y expresado como un pixel oscuro. Algunas correcciones de órbita y de proyección fueron necesarios para georreferenciar cada imagen analizada.

La metodología propuesta no puede ser validada por la información existente debido a que únicamente se accedió a registro de niveles de agua y aforos realizados hasta el año 2017. Un análisis más detallado de las zonas propensas a sufrir inundaciones se logra gracias al portal *Global Surface Water* donde se muestra la frecuencia en que una zona es afectada por agua.

El acceso a las coordenadas del trayecto del bote al momento de realizar el aforo en la estación de control es de suma importancia para determinar el ancho real del río debido a que por efecto de arrastre del río es fundamental navegar de forma diagonal en contra de la dirección de flujo para lograr tener un trayecto recto.

Si bien el script desarrollado en Rstudio realiza las mediciones de la distancia de la coordenada del punto de aforo en dirección perpendicular al shapefile del margen opuesto (medición de margen derecha a izquierda) puede no ser representativo del ancho medido en campo debido a las consideraciones del modo de navegación empleado.

Referencias

- Cunjian, Y.; Yiming, W.; Siyuan, W.; Zengxiang, Z.; Shifeng, H. Extracting the flood extent from satellite SAR image with the support of topographic data. In Proceedings of the International Conferences on Info-Tech and Info-Net. Networks (ICII 2001), Beijing, China, 29 October–1 November 2001; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2001; Volume 1, pp. 87–92
- ESA Sentinel Online. User Guides and Technical Guides of Sentinel-1 SAR. Available online: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel> (accessed on 8 August 2019).35.
- European Environment Agency. Flood Risks and Environmental Vulnerability; Exploring the Synergies between Floodplain Restoration, Water Policies and Thematic Policies; European Environment Agency: Copenhagen, Denmark, 2016; pp. 9–15
- Jean-Francois Pekel, Andrew Cottam, Noel Gorelick, Alan S. Belward, High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540, 418–422 (2016). (doi:10.1038/nature20584)
- Martínez, J.M.; Toan, T. Mapping of flood dynamics and vegetation spatial distribution in the Amazon floodplain using multitemporal SAR data. *Remote Sens. Environ.* 2007, 108, 209–223.
- Martinis, S.; Twele, A.; Voigt, S. Unsupervised extraction of flood-induced backscatter changes in SAR data using Markov image modeling on irregular graphs. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011, 49, 251–263
- Psomiadis, E. Flash flood area mapping utilising Sentinel-1 radar data. In Proceedings of the SPIE 10005, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications, Dresden, Germany, 11 November 2013; VII 100051G. SPIE: Edimburgh, UK, 2016
- Westerhoff, R.S.; Kleuskens, M.P.H.; Winsemius, H.C.; Huizinga, H.J.; Brakenridge, G.R.; Bishop, C. Automated global water mapping based on wide-swath orbital synthetic-aperture radar. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2013, 17, 651–663

