



**IMÁGENES SATELITALES SAR PARA LA IDENTIFICACIÓN DE CAMBIOS EN
CUERPOS DE AGUA DURANTE INUNDACIONES COSTERAS EN LA CIUDAD DE
CARTAGENA.**

Christian Jhair Abella Bernal

Fabio Neira Alzate

Diego Fernando Cadena Vélez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información
Geográfica

Asesor: Vladimir Henao Céspedes, Doctor (PhD) en Ingeniería

Asesores de recursos académicos: Luz Andrea Sepúlveda Escobar (asesora bibliográfica)

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Abella et al. 2025)
Referencia	Abella Bernal, C. J., Neira Alzate, F., & Cadena Vélez, D. F. (2025). <i>Imágenes satelitales SAR para la identificación de cambios en cuerpos de agua durante inundaciones costeras en la ciudad de Cartagena</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica - Virtual, I

Línea de Investigación: Territorios Inteligentes y Sostenibles

Declaración de inteligencia artificial: el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Turnitin, Copilot y Gemini, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A nuestras familias, por ser nuestro refugio constante, por su amor incondicional, su paciencia infinita y su fe en nosotros incluso en los momentos más difíciles. A nuestros amigos, por cada palabra de aliento, por acompañarnos en el camino y recordarnos que no estábamos solos. Este logro también es suyo, porque sin su apoyo, esta meta no habría sido posible.

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento al Ph.D. Vladimir Henao Céspedes, tutor de este trabajo, por su guía experta, su exigencia académica y su acompañamiento constante a lo largo del proceso. Su conocimiento, disposición y compromiso fueron fundamentales para el desarrollo y culminación exitosa de esta investigación. Gracias por ser un faro de orientación y exigencia que nos retó a dar lo mejor de nosotros.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
1.1 Antecedentes	18
2. Justificación.....	30
3. Objetivos	33
3.1 Objetivo general	33
3.2 Objetivos específicos.....	33
4 Hipótesis.....	34
4.1. Hipótesis de trabajo	34
4.2. Hipótesis nula.....	34
4.3. Hipótesis alterna.....	34
4.4. Variables.....	34
5 Marco teórico	35
5.1. Referente normativo y legal	35
5.2. Referente teórico	36
5.2.1. Definición de imágenes SAR.....	36
5.2.2. Técnicas y Metodologías	36
5.2.3. Plataformas y Herramientas.....	37
5.2.4. Contexto Socioeconómico y Vulnerabilidad en Colombia.....	38
5.2.5. Contexto Socioeconómico y Vulnerabilidad en Cartagena	38
6. Metodología	40
6.1. Enfoque metodológico	40
6.2. Tipo de estudio	41

6.3. Procedimiento.....	41
7. Resultados	70
8. Discusión.....	80
9. Conclusiones	82
10. Recomendaciones.....	84
11 Referencias	86

Lista de tablas

Tabla 1 <i>Análisis estadístico de retrodispersión en SNAP Parámetros y valores obtenidos</i>	59
Tabla 2 <i>Áreas de inundación en los años 2017, 2020 y 202</i>	71

Lista de figuras

Figura 1 Producción anual de artículos indexados, asociados al uso de imágenes SAR en inundaciones.....	32
Figura 2 Vista Inicial de SNAP con el Explorador de Productos	42
Figura 3 Importación de Imágenes SAR Sentinel-1 en SNAP	43
Figura 4 Explorador de Productos en SNAP con Imágenes Sentinel-1 Cargadas	43
Figura 5 Importación de imágenes Sentinel-1 como DIMAP en SNA	44
Figura 6 Exploración de bandas de imágenes Sentinel-1 en SNAP.....	45
Figura 7 Visualización de imágenes SAR Sentinel-1 en SNAP	46
Figura 8 Acceso a “Graph Builder” en SNAP para preprocesamiento de imágenes SAR.....	47
Figura 9 Configuración del flujo de preprocesamiento en “Graph Builder” de SNAP	48
Figura 10 Flujo de preprocesamiento en Graph Builder de SNAP	49
Figura 11: Ejecución de Batch Processing en SNAP para el preprocesamiento de Imágenes SAR	50
Figura 12 Configuración y ejecución de Batch Processing en SNAP.....	50
Figura 13 Configuración de parámetros de Apply Orbit File en Batch Processing de SNAP	51
Figura 14 Definición de Subset y coordenadas geográficas en Batch Processing de SNAP.....	51
Figura 15 Configuración de eliminación de ruido térmico en Batch Processing de SNAP	52
Figura 16 Configuración de calibración radiométrica en Batch Processing de SNAP.....	52
Figura 17 Configuración de filtro Speckle en Batch Processing de SNAP	53
Figura 18 Configuración de corrección de terreno en Batch Processing de SNAP	54
Figura 19 Explorador de productos en SNAP con imágenes SAR preprocesadas	55
Figura 20 Comparación de imágenes SAR Pre y Post inundación en SNAP.....	55
Figura 21 Análisis de valores de retrodispersión en imágenes SAR con SNAP	56

Figura 22 <i>Explorador de productos en SNAP con datos vectoriales y bandas procesadas</i>	57
Figura 23 <i>Identificación de áreas inundadas mediante polígonos de entrenamiento en SNAP en imagen anterior del evento de inundación.</i>	58
Figura 24 <i>Análisis estadístico de retrodispersión en SNAP mediante histogramas de imagen anterior al evento de inundación</i>	59
Figura 25 <i>Delimitación de polígonos de entrenamiento para la detección de inundaciones en SNAP en imagen posterior al evento de inundación</i>	60
Figura 26 <i>Aplicación de Band Maths en SNAP para generación de máscaras de agua</i>	61
Figura 27 <i>Creación de máscara de agua en SNAP usando Band Maths</i>	62
Figura 28 <i>Exportación de máscara de agua generada en SNAP</i>	63
Figura 29 <i>Generación de máscara de inundación en SNAP usando Band Maths</i>	64
Figura 30 <i>Exportación de máscara de inundación generada en SNAP</i>	64
Figura 31 <i>Visualización de máscaras de agua en ArcGIS Pro</i>	65
Figura 32 <i>Análisis de diferencias de inundación con Raster Calculator en ArcGIS Pro</i>	66
Figura 33 <i>Resultado del análisis de inundación con Raster Calculator en ArcGIS Pro</i>	66
Figura 34 <i>Reclasificación de datos de inundación en ArcGIS Pro</i>	67
Figura 35 <i>Mapa de zonas inundadas en Cartagena generado en ArcGIS Pro</i>	67
Figura 36 <i>Conversión de datos de inundación de Ráster a Polígono en ArcGIS Pro</i>	68
Figura 37 <i>Visualización y cuantificación de áreas inundadas en ArcGIS Pro</i>	68
Figura 38 <i>Porcentaje de área inundada por barrio en Cartagena (2017, 2020 y 2024).</i>	71
Figura 39 <i>Clasificación de barrios de Cartagena según el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) - 2024.</i>	72
Figura 40 <i>Mapa de inundaciones año 2017 de la ciudad de Cartagena.</i>	74
Figura 41 <i>Mapa de inundaciones año 2020 de la ciudad de Cartagena</i>	75
Figura 42 <i>Mapa de inundaciones año 2024 de la ciudad de Cartagena</i>	76
Figura 43 <i>Área inundada por tipo de pobreza multidimensional.</i>	77
Figura 44 <i>Mapa de áreas inundadas por índice de vulnerabilidad año 2024</i>	78

Figura 45 *Mapa de Cartagena con áreas de inundación*.....79

Siglas, acrónimos y abreviaturas

SAR	Radar de Apertura Sintética
IPM	Índice de Pobreza Multidimensional
m²	Metro Cuadrado
Esp.	Especialista
PhD	Philosophiae Doctor
UManizales	Universidad de Manizales

Resumen

El cambio climático está generando un aumento en el nivel del mar, intensificando las inundaciones costeras en ciudades vulnerables como Cartagena. Este trabajo se enfoca en aplicar imágenes satelitales SAR (Radar de Apertura Sintética) para identificar y monitorear los cambios en los cuerpos de agua durante estos eventos. Las imágenes SAR son especialmente útiles ya que permiten obtener datos en cualquier condición climática y momento del día, lo que las convierte en una herramienta eficaz para evaluar las áreas más afectadas por las inundaciones. Este trabajo tiene como objetivo poner en práctica el uso de estas tecnologías, proporcionando información estratégica para mejorar la gestión de riesgos y apoyar la planificación costera, con el fin de mitigar los impactos de las inundaciones en las comunidades locales y la infraestructura de Cartagena. Como resultado, se identificaron las zonas donde se presentaron cambios en los cuerpos de agua superficial en la ciudad de Cartagena durante los eventos de inundación en los años 2017, 2020 y 2024, y se realizó un análisis de la relación de estas zonas con el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) del año 2024, el cual permitió evidenciar una relación directa entre el área inundada y el IPM. Los resultados indican que las zonas con menor vulnerabilidad (<20 en el IPM) fueron las más afectadas por las inundaciones, probablemente debido a su proximidad a las costas y áreas bajas. En contraste, las zonas con mayor vulnerabilidad (≥ 80 en el IPM) presentaron una menor afectación, al encontrarse más alejadas de las zonas costeras.

Palabras clave: Cambio climático, Inundaciones costeras, Teledetección, Imágenes SAR, Índice de Pobreza Multidimensional, IPM, Monitoreo de cuerpos de agua, Gestión de desastres.

Abstract

Climate change is causing a rise in sea levels, intensifying coastal flooding in vulnerable cities such as Cartagena. This study focuses on applying Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite imagery to identify and monitor changes in water bodies during these events. SAR imagery is particularly useful as it enables data collection under any weather conditions and at any time of day, making it an effective tool for assessing the most affected areas by flooding. The objective of this study is to implement the use of these technologies, providing strategic information to improve risk management and support coastal planning to mitigate the impacts of flooding on local communities and Cartagena's infrastructure. As a result, areas where changes in surface water bodies occurred in Cartagena during flood events in 2017, 2020, and 2024 were identified. Additionally, an analysis of the relationship between these areas and the 2024 Multidimensional Poverty Index (MPI) was conducted, revealing a direct correlation between flooded areas and the MPI. The findings indicate that areas with lower vulnerability (<20 in the MPI) were the most affected by flooding, likely due to their proximity to the coast and low-lying areas. In contrast, areas with higher vulnerability (≥ 80 in the MPI) experienced less impact, as they were located farther from coastal zones.

Keywords: Climate change, Coastal flooding, Remote sensing, SAR imagery, Multidimensional Poverty Index, MPI, Water body monitoring, Disaster management.

Introducción

El cambio climático ha intensificado la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos extremos, entre ellos, las inundaciones costeras que afectan de manera creciente a ciudades vulnerables como Cartagena. Dado que estas inundaciones representan una amenaza significativa para la población, la infraestructura urbana y los ecosistemas, se hace necesario implementar herramientas tecnológicas que permitan monitorear los eventos de forma precisa, continua y eficaz. En efecto, las imágenes satelitales SAR (Radar de Apertura Sintética) se han posicionado como una alternativa idónea para este tipo de análisis, debido a su capacidad para adquirir datos en cualquier condición climática y en diferentes momentos del día.

Actualmente, Cartagena enfrenta un escenario crítico como consecuencia de su localización geográfica, su crecimiento urbano acelerado y la falta de planificación territorial en zonas de riesgo. Por consiguiente, se requiere una comprensión detallada de cómo se comportan los cuerpos de agua durante los eventos de inundación, así como de las condiciones sociales que agravan sus impactos. Teniendo en cuenta lo anterior, este trabajo se plantea como una contribución a la identificación y monitoreo de los cambios en cuerpos de agua durante inundaciones costeras, utilizando imágenes SAR para analizar tres eventos específicos ocurridos en los años 2017, 2020 y 2024.

La pregunta que orienta esta investigación es: **¿Cómo pueden las imágenes satelitales SAR ser utilizadas para detectar y monitorear los cambios en la extensión de la presencia de agua superficial durante eventos de inundación en la ciudad de Cartagena?** A partir de esta cuestión, el objetivo general consiste en analizar los cambios en cuerpos de agua durante eventos de inundación costera en Cartagena, con el propósito de identificar las áreas más afectadas y su relación con el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM).

Así pues, la justificación de esta investigación radica en la necesidad de contar con información geoespacial precisa y actualizada que fortalezca la gestión del riesgo en zonas urbanas costeras. De igual manera, se busca evidenciar cómo las condiciones socioeconómicas influyen en la exposición y vulnerabilidad frente a las inundaciones, aportando elementos clave para una planificación territorial más resiliente y equitativa.

En síntesis, esta investigación se inscribe en el marco de los estudios aplicados en sistemas de información geográfica y teledetección, con un enfoque cuantitativo y territorial, que permite

articular el análisis físico de las inundaciones con variables sociales relevantes para la toma de decisiones.

1. Planteamiento del problema

¿Cómo pueden las imágenes satelitales SAR ser utilizadas para detectar y monitorear los cambios en la extensión de la presencia de agua superficial durante eventos de inundación en la Ciudad de Cartagena?

Las imágenes satelitales SAR son cruciales para detectar y monitorear cambios en cuerpos de agua durante eventos de inundación costera (Edwing et al, 2025), tal como los eventos que se han presentado recientemente en Cartagena afectando a más de 10.000 familias (El Tiempo, 2023). Con el uso de estas imágenes es posible identificar áreas inundadas mediante la comparación de la retrodispersión antes y después del evento, de esta forma se crean mapas detallados de las zonas afectadas que proporcionar un monitoreo continuo; lo cual es esencial para la gestión de emergencias y la planificación de acciones de mitigación (Huang and Jin, 2022).

En Colombia, el aumento del nivel del mar debido al cambio climático y el calentamiento global según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático IPCC amenaza con inundar municipios del Caribe Colombiano como Riohacha y Santa Marta en los próximos 30 años (Infobae, 2021); entre otros hallazgos, el IDEAM ha identificado que aproximadamente el 17% del territorio continental del país está en riesgo de inundación. En el Caribe colombiano, decenas de millones de personas en zonas costeras de baja altitud enfrentan fenómenos meteorológicos extremos que amenazan sus vidas y medios de subsistencia (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, 2024).

Abordar estas problemáticas permite no solo proteger a las comunidades vulnerables, sino también preservar los ecosistemas costeros, que son vitales para la biodiversidad y la economía local. La implementación de soluciones basadas en tecnología, como las imágenes SAR, son esenciales para mitigar los efectos del cambio climático y asegurar un futuro sostenible para las regiones costeras.

Según el INVEMAR (2019), se predice que, para el año 2100, entre el 3.4% y el 5% de las poblaciones costeras colombianas se verán afectadas por el aumento del nivel del mar, con un impacto significativo en infraestructuras turísticas y portuarias.

En Cartagena, la alta vulnerabilidad a inundaciones costeras se debe a una combinación de factores naturales y humanos, incluyendo la erosión costera, la expansión urbana no planificada y la ocupación indebida de terrenos. Estos fenómenos han contribuido al aumento de la frecuencia y severidad de las inundaciones, amenazando tanto a las comunidades locales como a la infraestructura crítica de la ciudad. Las lluvias torrenciales recientes han causado inundaciones significativas, afectando a más de 10,000 familias y dejando barrios enteros sumergidos (El Tiempo, 2023, El Espectador, 2023). La Oficina Asesora para la Gestión del Riesgo de Desastres (OAGRD, 2024) ha desplegado medidas de monitoreo y acción ante estas inundaciones, siendo implementadas en barrios como Las Palmeras, El Socorro, Arroz Barato, Nuevo Oriente, Parque Heredia, Barrio Chino, San Fernando y San José de los Campanos. Los impactos incluyen la caída de árboles y desbordamientos de canales, con evaluaciones de daños y medidas de respuesta coordinadas por la OAGRD (OAGRD, 2024).

Recientemente, Colombia ha enfrentado graves inundaciones que han afectado significativamente a departamentos como Chocó, La Guajira y Norte de Santander. En Chocó, más de 27 municipios han quedado inundados, afectando a más de 150,000 personas. Varios municipios y corregimientos de La Guajira han quedado incomunicados, exacerbando la vulnerabilidad de la región. Norte de Santander también ha sufrido inundaciones, aunque en menor medida, causando problemas significativos en varias comunidades. Estas situaciones reflejan cómo las condiciones climáticas extremas y la pobreza multidimensional se combinan para crear desafíos complejos en estas regiones (Infobae, 2023).

Actualmente, el monitoreo de inundaciones en Cartagena se realiza principalmente mediante observaciones terrestres y sensores ópticos, que son limitados por las condiciones climáticas y la visibilidad (EPA, 2015). Esto implica mayores costos, tiempos de procesamiento más largos y menor eficiencia en la respuesta a emergencias. El Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias ha desarrollado un protocolo de red inteligente de monitoreo, seguimiento y predicción de inundaciones, basadas en modelos hidrológicos e hidráulicos. De otra parte, se han establecido lineamientos para el control de inundaciones en las zonas costeras bajas de Cartagena, enfocándose en medidas de mitigación y monitoreo para reducir los riesgos asociados con el aumento del nivel del mar y eventos extremos.

Para abordar el propósito de un monitoreo de las inundaciones en zonas costeras; el uso de tecnologías avanzadas de teledetección, como las imágenes satelitales SAR (Radar de Apertura

Sintética), pueden ser de gran utilidad. Estas imágenes permiten detectar y monitorear cambios en cuerpos de agua, proporcionando datos en cualquier condición climática y momento del día, lo que las convierte en una herramienta valiosa para el análisis de inundaciones costeras (NASA, Learn ArcGIS) como Cartagena, la cual, presenta una alta frecuencia de nubosidad a lo largo del año, según lo confirman registros meteorológicos oficiales. Datos históricos de la estación meteorológica Aeropuerto Rafael Núñez (red del IDEAM) muestran que el cielo de Cartagena suele estar cubierto por nubes en gran proporción durante gran parte del año (EPA, 2015).

1.1 Antecedentes

Hong y Gourley (2015) presentaron un enfoque integral sobre los principios, modelos y aplicaciones de la hidrología radar, proporcionando una base teórica rigurosa para la estimación de precipitaciones mediante radar. Este trabajo abarca la calibración de datos de radar, el control de calidad y la estimación de tasas de precipitación, así como la aplicación de estos datos en modelos hidrológicos. Además, se exploran técnicas de asimilación de datos radar en modelos numéricos, destacando la importancia de la integración de información obtenida de múltiples sensores para mejorar la predicción de inundaciones. Este enfoque multidisciplinario permite abordar los desafíos de la predicción de caudales y el monitoreo de eventos extremos, posicionando al radar como una herramienta esencial en la hidrología contemporánea para la gestión del riesgo y la mitigación de desastres. Los autores también enfatizan en la necesidad de mejorar las metodologías de asimilación de datos para reducir las incertidumbres inherentes en la predicción hidrológica. Se hace especial mención a la relevancia de los modelos hidrológicos de última generación, que integran información de radar polarimétrico para una caracterización más precisa de las precipitaciones intensas y su distribución espacial, así como para la identificación de procesos de escorrentía en áreas críticas. Estos modelos mejorados no solo permiten una estimación más precisa de los caudales, sino que también facilitan una mejor comprensión de la dinámica hidrológica en condiciones de cambio climático, contribuyendo a una gestión adaptativa del agua.

Kim et al. (2014) llevaron a cabo un estudio sobre la aplicación de la retrodispersión SAR en banda L para monitorear el nivel del agua en marismas de agua dulce de los Everglades. Su trabajo demostró una alta correlación entre los niveles de agua medidos in situ y los coeficientes de retrodispersión SAR, lo que evidencia el potencial del radar L-band para la cuantificación de variaciones hidrológicas. Sin embargo, también se observó que la banda C no presentaba una correlación tan cercana con los niveles de agua, destacando las diferencias en la capacidad de penetración y sensibilidad entre ambas bandas. La combinación de técnicas de retrodispersión e interferometría proporcionó estimaciones de alta resolución de las variaciones del nivel del agua, lo cual resulta fundamental para la restauración y la gestión efectiva de estos humedales singulares y ecológicamente valiosos. Además, este estudio subraya la importancia de aplicar enfoques

multibanda para mejorar la comprensión de las dinámicas hidrológicas en áreas de humedales, donde las características físicas del terreno y la vegetación pueden afectar significativamente la precisión de las mediciones. La integración de información de múltiples fuentes puede ofrecer una visión más completa del estado hidrológico y facilitar la toma de decisiones en la conservación de ecosistemas críticos.

Sun et al. (2000) llevaron a cabo una investigación sobre la estimación de caudales de inundación utilizando datos combinados de radar meteorológico y pluviómetros en la cuenca del río Finniss, ubicada al sur de Darwin, Australia. Este estudio abordó de manera rigurosa las limitaciones inherentes a los métodos tradicionales de monitoreo hidrológico, particularmente la baja cobertura espacial de las redes de pluviómetros, que frecuentemente no logran capturar de manera adecuada la distribución espacial de eventos de lluvia intensa, especialmente en cuencas pequeñas y durante tormentas convectivas. Con el fin de superar estas limitaciones, se evaluaron diversos enfoques para la estimación de la precipitación: el uso exclusivo de datos de pluviómetros, la interpolación mediante Kriging, el uso de datos de radar, y el cokriging entre pluviómetros y radar. Los resultados mostraron que el cokriging era la metodología más efectiva, ya que permitía una integración óptima de ambas fuentes de datos, mejorando significativamente la precisión de las estimaciones de precipitación y, consecuentemente, las predicciones de caudales. La investigación también subrayó el papel fundamental del radar meteorológico, con su capacidad para medir la precipitación en tiempo real y con alta resolución espacial, como un complemento esencial a las redes de pluviómetros para la estimación de caudales en subcuencas. Este trabajo establece un precedente importante en el ámbito de la hidrología aplicada, resaltando la necesidad crítica de integrar tecnologías de monitoreo espacial para mejorar la modelación y la predicción de eventos extremos, tales como inundaciones, donde la precisión de los datos de entrada resulta crucial para la efectividad de las simulaciones hidrológicas.

Lee et al. (2024) desarrollaron un modelo innovador para la monitorización precisa de los cambios en el nivel del agua, utilizando imágenes de radar de apertura sintética (SAR) y técnicas avanzadas de detección de límites de cuerpos de agua. Este estudio se centró en abordar las dificultades inherentes a las mediciones tradicionales del nivel de agua en embalses, donde los errores sistemáticos y la limitación de puntos de medición restringen tanto la cobertura espacial como la exactitud de los resultados. El modelo propuesto incorpora sofisticadas técnicas de preprocesamiento, tales como el filtrado de imágenes, el remuestreo, y la multiplicación de

polarizaciones, con el fin de mejorar la precisión subpíxel en la detección de los límites del agua. Además, se eliminaron los píxeles correspondientes a las regiones de layover y sombra, que suelen introducir errores significativos en las estimaciones. La validación del modelo se realizó mediante el análisis de más de 700 imágenes del satélite Sentinel-1, comparadas con mediciones in situ en múltiples embalses y cauces de ríos en la península de Corea, demostrando así que el modelo tenía un rendimiento superior en términos de reducción del error medio absoluto (MAE), alcanzando niveles considerablemente inferiores a la resolución espacial de las imágenes SAR.

Rodríguez y Moreno (2023) llevaron a cabo un estudio centrado en el mapeo de inundaciones mediante imágenes SAR, empleando el método de clustering K-Means para evaluar los impactos de las inundaciones en la cuenca del Bajo Piura, Perú. El objetivo principal del estudio fue monitorear las inundaciones provocadas por el fenómeno de El Niño, logrando identificar las áreas afectadas a través de una clasificación precisa de imágenes SAR. Este trabajo establece una metodología robusta que puede ser replicada en otras regiones para evaluar los efectos de eventos extremos como las inundaciones costeras, proporcionando una base sólida para la identificación y monitoreo eficaz de cambios en cuerpos de agua. La capacidad del método K-Means para diferenciar las áreas afectadas permite no solo una evaluación cuantitativa de la extensión de las inundaciones, sino también la identificación de patrones que podrían ser utilizados para la planificación preventiva y la adaptación en contextos de vulnerabilidad climática. Además, este enfoque contribuye a la evaluación del riesgo y la elaboración de mapas de susceptibilidad, los cuales son fundamentales para la gestión territorial y la protección de la infraestructura crítica del Bajo Piura.

Por otro lado, Cissé et al. (2024) analizaron el impacto del aumento del nivel del mar y la subsidencia del terreno en las inundaciones costeras en Saint-Louis, Senegal, mediante el uso de interferometría SAR (InSAR). El estudio subrayó cómo la subsidencia local, combinada con el aumento del nivel del mar, incrementa de manera significativa la vulnerabilidad a las inundaciones, proporcionando mapas detallados de vulnerabilidad de las áreas afectadas. La relevancia de este trabajo radica en la similitud de los problemas de subsidencia y elevación del nivel del mar con situaciones presentes en muchas regiones costeras vulnerables, permitiendo así identificar posibles áreas de riesgo y adaptar estrategias de mitigación más efectivas. La combinación de técnicas de InSAR con escenarios de aumento del nivel del mar permite una evaluación más precisa de las áreas potencialmente afectadas, proporcionando información valiosa para el desarrollo de políticas

públicas y estrategias de adaptación climática. Los resultados de este estudio no solo aportan una visión detallada sobre la vulnerabilidad física de las regiones costeras, sino que también permiten a las autoridades locales priorizar las acciones de adaptación y mitigación necesarias para enfrentar los desafíos derivados del cambio climático.

Fernández-Ordoñez et al. (2020) emplearon imágenes SAR de los satélites Sentinel-1A y Radarsat-2 para estudiar las inundaciones en Tabasco, México. El propósito de este estudio fue caracterizar el comportamiento de las inundaciones durante la temporada de lluvias utilizando técnicas de teledetección. El análisis permitió la generación de cartografías comparativas de las zonas inundadas y cuerpos de agua, lo cual sugiere que la metodología empleada podría ser extrapolada para la identificación de cambios en cuerpos de agua en otras regiones durante eventos de inundación. Este enfoque no solo facilita la comprensión de los patrones de inundación, sino que también ofrece una herramienta efectiva para la planificación y gestión de recursos hídricos. La cartografía comparativa entre temporadas de lluvias y de sequía permite identificar áreas críticas y evaluar el impacto de las medidas de mitigación implementadas, lo cual resulta fundamental para la planificación de infraestructuras resilientes. Además, este estudio enfatiza la importancia del monitoreo continuo y de la actualización de los datos hidrológicos, especialmente en áreas propensas a desastres naturales, ya que una comprensión detallada de los ciclos de inundación permite una mejor preparación y respuesta ante futuros eventos.

Shen et al. (2019) desarrollaron un sistema de mapeo de inundaciones en tiempo casi real denominado RAPID, que integra imágenes SAR y datos de sensores remotos para generar mapas de alta resolución de áreas inundadas. Este enfoque permite una respuesta más rápida ante eventos de inundación, lo cual resulta crucial para la gestión de desastres en zonas costeras. La capacidad de RAPID para producir mapas en tiempo casi real posibilita una toma de decisiones informada durante los eventos de inundación, mejorando la coordinación entre las agencias de respuesta y reduciendo el impacto de los desastres. Además, la integración de múltiples fuentes de datos y el uso de técnicas avanzadas de procesamiento permiten una mayor precisión en la detección de áreas inundadas, lo cual es esencial para la planificación de la recuperación post-desastre y la reducción de riesgos futuros. La automatización del proceso de detección de inundaciones mediante el sistema RAPID también representa un avance significativo en términos de eficiencia y eficacia, ya que minimiza la necesidad de intervención manual y permite generar productos cartográficos

en un lapso de tiempo reducido, lo cual es particularmente útil durante emergencias que requieren respuestas rápidas y precisas.

Hernández et al. (2021) implementaron el uso de Google Earth Engine para el mapeo de inundaciones en Tabasco, utilizando imágenes Sentinel-1A y Sentinel-2A. Este estudio demostró que herramientas de procesamiento geoespacial, como Google Earth Engine, son eficaces para el monitoreo de inundaciones a gran escala y en zonas de difícil acceso. Este enfoque facilita la identificación de cambios en cuerpos de agua debido a su capacidad para el procesamiento y análisis en tiempo casi real. La plataforma Google Earth Engine ofrece una infraestructura computacional potente que permite procesar grandes volúmenes de datos geoespaciales de manera eficiente, lo cual es particularmente útil en situaciones de emergencia donde la rapidez y la precisión son cruciales. Además, el uso combinado de imágenes ópticas y SAR proporciona una visión más completa del fenómeno de inundación, permitiendo identificar no solo las áreas afectadas, sino también el grado de severidad y los cambios temporales en los cuerpos de agua. Este estudio también destaca la importancia de contar con plataformas de código abierto y accesibles para la gestión de riesgos, ya que estas permiten democratizar el acceso a tecnologías avanzadas de monitoreo ambiental y mejorar la capacidad de respuesta de diversas organizaciones a nivel local y regional.

Dhanabalan et al. (2021) llevaron a cabo un estudio detallado sobre la aplicación de datos de radar de apertura sintética (SAR) obtenidos por el satélite Sentinel-1 para la monitorización de eventos de inundación en la región sur de Kerala, India, durante los años 2018 y 2019. Este trabajo se enfoca en la utilización del SAR para la detección y delimitación de áreas afectadas por inundaciones, empleando un enfoque basado en metodologías de umbral para identificar cambios en la superficie. La principal fortaleza de los datos SAR radica en su capacidad para operar bajo cualquier condición meteorológica, incluyendo la penetración de la cobertura nubosa, lo cual resulta especialmente ventajoso durante eventos de precipitaciones intensas. El estudio emplea técnicas de detección de cambios para evaluar la extensión de las áreas inundadas y cuantificar los daños sufridos, particularmente en áreas agrícolas. Los resultados indican que la tecnología SAR constituye una herramienta robusta para el monitoreo de inundaciones, proporcionando información esencial para la evaluación de la vulnerabilidad y la implementación de estrategias de mitigación durante los eventos de inundación. Además, se destaca la capacidad del SAR para ofrecer datos en tiempo casi real, lo que permite a las autoridades tomar decisiones informadas

durante las fases críticas de respuesta a emergencias. La investigación también sugiere que la integración de SAR con datos ópticos puede mejorar la precisión en la identificación de áreas inundadas y ayudar en la planificación a largo plazo de estrategias de mitigación de desastres.

McCormack et al. (2022) desarrollaron un enfoque automatizado innovador para mapear las extensiones anuales de inundaciones utilizando datos multitemporales del satélite Sentinel-1 en Irlanda. La metodología incluyó el uso de un umbral basado en histogramas y la corrección topográfica para mejorar la detección de áreas inundadas. Además, se implementaron filtros multitemporales que aprovecharon la información contextual del terreno para reducir los falsos positivos, así como filtros basados en la topografía y el uso del suelo. Estos filtros permitieron delimitar la extensión de las inundaciones y generar mapas de alta precisión con una exactitud superior al 95%. Esta metodología representa una solución sistemática para la cartografía de inundaciones no urbanas, que facilita la comparación interanual de las extensiones de inundación y proporciona información crucial para la gestión de los riesgos hídricos en sitios tanto instrumentados como no instrumentados, destacándose por su estabilidad y aplicabilidad a gran escala. Además, este enfoque ha permitido la implementación de prácticas de mitigación del riesgo de inundaciones, mejorando la planificación y respuesta ante desastres naturales en áreas vulnerables, con un enfoque especial en la adaptación a eventos extremos cada vez más frecuentes debido al cambio climático.

Garg et al. (2024) investigaron el uso de datos de Sentinel-1 para la detección de inundaciones en regiones áridas, donde la diferenciación entre agua y terrenos arenosos presenta un desafío considerable debido a las características similares de retrodispersión entre ambos elementos. Utilizando la coherencia interferométrica, la información polarimétrica y temporal, el estudio examinó tres eventos de inundación en Irán, Pakistán y Turkmenistán, determinando que la combinación VV y la amplitud en imágenes pre y post-inundación mejoró significativamente la precisión de los mapas de inundación. El estudio concluye que la aplicación de estas técnicas no solo aumentó la precisión en un 50%, sino que también redujo el costo computacional en un 35%, facilitando así la aplicación de estas metodologías en situaciones de emergencia y respuesta rápida durante eventos de inundación. Este enfoque adaptativo, probado en distintas zonas áridas, constituye un avance significativo en la mejora de los algoritmos globales para la cartografía de inundaciones, aportando soluciones valiosas para las regiones vulnerables a estos eventos debido a la baja permeabilidad del suelo y la falta de infraestructura adecuada. Adicionalmente, el estudio

resalta el potencial de los datos de radar para mejorar la precisión de la modelización hidrológica en regiones áridas, donde la disponibilidad de datos in situ es limitada. Esto representa un paso importante hacia el desarrollo de sistemas de alerta temprana y la gestión integrada del riesgo de inundaciones en contextos de vulnerabilidad hídrica.

Anusha y Bharathi (2020) llevaron a cabo un estudio sobre el mapeo de áreas inundadas en el estado de Uttar Pradesh, India, utilizando datos SAR multitemporales y ópticos. Durante las inundaciones de agosto de 2017, se aplicaron metodologías de umbralización y clasificación no supervisada para identificar las zonas afectadas. Los resultados se validaron mediante observaciones meteorológicas, demostrando que los datos SAR pueden ser sumamente útiles para el monitoreo y la gestión de riesgos de inundación a nivel distrital. Esta investigación destaca la importancia de integrar datos de alta resolución para la evaluación rápida de la magnitud de las inundaciones, particularmente en regiones densamente pobladas, donde las respuestas a desastres requieren ser eficaces y precisas para mitigar los impactos en la infraestructura y la población. Además, el estudio enfatiza la necesidad de utilizar enfoques híbridos que combinan imágenes ópticas y SAR para mejorar la detección y caracterización de inundaciones en áreas complejas, lo cual contribuye a la formulación de políticas públicas enfocadas en la reducción del riesgo de desastres y la resiliencia comunitaria frente a eventos climáticos extremos.

Chen et al. (2024) realizaron un análisis integral sobre las inundaciones ocurridas en Pakistán durante 2022, empleando imágenes del satélite Sentinel-1 SAR. El estudio implementó un mapeo mejorado a nivel nacional de las áreas inundadas, mediante el uso de técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes, tales como contornos activos y detección de cambios, con el objetivo de identificar con alta precisión la magnitud de las inundaciones y sus posibles causas. Los resultados indicaron que las precipitaciones monzónicas intensas y acumulativas durante el período de junio a agosto fueron la principal causa de las inundaciones, junto con la rápida fusión de nieve, que, aunque contribuyó de manera marginal al volumen total de agua, creó condiciones propicias para eventos extremos. Asimismo, el estudio destacó la utilidad de las imágenes SAR para la monitorización continua de inundaciones en áreas extensas, superando las limitaciones inherentes a otros métodos dependientes de las condiciones atmosféricas o de la energía solar, como las imágenes ópticas. Con una precisión general (OA) superior al 83% y un índice de éxito crítico (CSI) de hasta el 91%, el algoritmo propuesto demostró ser adecuado para la monitorización automatizada en tiempo real. Este estudio ilustra cómo el uso de datos de teledetección puede

proporcionar una comprensión más profunda de los factores influyentes y las tendencias futuras de las inundaciones en contextos altamente vulnerables al cambio climático, facilitando una respuesta más efectiva y eficiente ante desastres naturales.

Clement et al. (2018) abordan la necesidad de mejorar la precisión y rapidez en la detección de inundaciones mediante el uso de imágenes de radar de apertura sintética (SAR) multitemporales. Ellos se centraron en la identificación precisa de áreas inundadas, especialmente en condiciones de nubosidad y durante la noche, donde los sensores ópticos fallan. La metodología empleada incluye la detección de cambios y el umbral de imágenes SAR de Sentinel-1, capturadas durante las inundaciones de invierno de 2015-2016 en Yorkshire, Reino Unido. Se procesaron 13 imágenes SAR en dos polarizaciones (VH y VV) y se compararon con datos ópticos de Sentinel-2 para validar la precisión. Los resultados mostraron que ambas polarizaciones lograron una precisión total del 97%, con VV produciendo menos errores de clasificación. En términos numéricos, el 6.7% y el 6.1% de la región de estudio se inundaron el 29 de diciembre de 2015, según las polarizaciones VH y VV, respectivamente, al adaptar su metodología, se mejoró la precisión de la detección de inundaciones y puede ser utilizada como una herramienta autónoma y en tiempo real para el monitoreo de inundaciones.

Lahsaini et al. (2024) explora la necesidad de mejorar la detección y monitoreo de inundaciones mediante el uso de datos de radar de apertura sintética (SAR). El dilema central es la identificación precisa y oportuna de áreas inundadas, especialmente en condiciones meteorológicas adversas. La metodología propuesta, denominada SAR-RST-FLOOD, utiliza un análisis multitemporal de datos de Sentinel-1 para identificar automáticamente áreas inundadas, evaluando la precisión de esta técnica en cinco estudios de caso, comparando los resultados con mapas de referencia de inundaciones. Los resultados mostraron una precisión del usuario superior a 0.78 y una precisión general que superó el 0.96, con valores del índice Kappa superiores a 0.78. Por ejemplo, en el evento del río Ouse en Inglaterra, la precisión del usuario fue de 0.64 y la precisión del productor fue de 0.98. Se realza que la metodología SAR-RST-FLOOD es altamente precisa y puede proporcionar información oportuna para la gestión de desastres, siendo implementada en la plataforma Google Earth Engine para aplicaciones a escala global.

Ajadi et al. (2016), se enfoca en la detección automática de cambios en imágenes de radar de apertura sintética (SAR), un desafío debido al ruido de moteado y la complejidad de la respuesta de dispersión. La metodología propuesta incluye tres pasos: preprocesamiento inicial, mejora de

datos/filtrado y detección de cambios basada en wavelets a múltiples escalas. Se aplicaron técnicas modernas de corrección radiométrica y filtrado no local para suprimir el ruido y preservar los detalles de la imagen. Los resultados mostraron una alta precisión en la detección de cambios, con una precisión general del 98.97% y un coeficiente kappa de 0.906 en datos sintéticos. La conclusión destaca la robustez y flexibilidad del enfoque para diversas aplicaciones de detección de cambios, (Ajadi et al., 2016).

Uddin et al. (2019), aborda la problemática de las inundaciones en Bangladesh, un país altamente vulnerable a estos desastres naturales. La investigación se centra en desarrollar una metodología operativa para la rápida identificación y mapeo de áreas inundadas utilizando imágenes SAR de Sentinel-1. El estudio empleó imágenes de Sentinel-1 de marzo, abril, junio y agosto de 2017 para generar mapas de inundación y evaluó la cobertura terrestre previa a las inundaciones con imágenes Landsat-8. La metodología incluyó la calibración radiométrica, filtrado de ruido y corrección geométrica de las imágenes SAR, seguidas de una clasificación basada en el conocimiento para distinguir entre áreas inundadas y no inundadas. Los resultados mostraron que el área total inundada fue del 2.01% en abril, 4.53% en junio y 7.01% en agosto de 2017. Además, se determinó que el 1.51% de las tierras agrícolas fueron afectadas en abril, 3.46% en junio y 5.30% en agosto, principalmente en las divisiones de Sylhet y Rangpur. La precisión general del mapeo de inundaciones fue del 96.44%. Se resalta la utilidad de los datos SAR para el monitoreo de inundaciones en tiempo real y la importancia de estos mapas para la gestión de desastres y la planificación de respuestas de emergencia.

La plataforma UN-SPIDER de las Naciones Unidas ha desarrollado una Práctica Recomendada para el mapeo de inundaciones utilizando datos satelitales, la cual proporciona una metodología clara y replicable para la identificación y monitoreo de áreas afectadas por inundaciones (UN-SPIDER, 2015). Esta guía enfatiza el uso de imágenes SAR, como las proporcionadas por el satélite Sentinel-1, y recomienda herramientas de software como SNAP y Google Earth Engine para el procesamiento y análisis de datos. Además, incluye pasos detallados para la validación de resultados y la generación de mapas, lo que asegura la precisión y confiabilidad de los productos finales. Esta práctica recomendada sirve como un marco de referencia valioso para la aplicación de tecnologías espaciales en la gestión de desastres relacionados con inundaciones.

Sharma et al. (2025) El estudio de Sharma y su equipo desarrolló DeepSARFlood, una herramienta innovadora de inteligencia artificial para monitorear inundaciones en tiempo real. Utilizando datos SAR y combinando redes neuronales convolucionales (CNN) con Transformadores de Visión (ViT), lograron generar mapas precisos de inundación rápidamente.

Al aplicarlo a inundaciones recientes en Pakistán (2022) y Assam, India (2020), el modelo mostró gran eficiencia, generando mapas detallados en menos de 40 segundos para áreas amplias. Esta herramienta está diseñada especialmente para situaciones de emergencia. Este estudio es especialmente importante para la presente investigación porque proporciona un enfoque innovador y práctico basado en inteligencia artificial, lo que representa un gran avance para la respuesta rápida y efectiva ante desastres naturales. (Sharma & Saharia, 2025).

Prasad et al. (2024) El equipo de Prasad desarrolló un modelo para detectar áreas vulnerables a inundaciones en la costa suroeste de la India, utilizando datos de radar SAR y técnicas avanzadas de aprendizaje automático. El objetivo fue mejorar la precisión en la identificación de estas áreas mediante el análisis de 16 variables ambientales clave.

Probaron seis métodos de aprendizaje automático, destacando las Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) y los Bosques Aleatorios (RF) por su precisión y estabilidad. Los resultados indicaron que cerca del 13% del área estudiada presenta un riesgo alto de inundación.

Este estudio subraya la importancia de utilizar datos remotos para gestionar los riesgos de inundación de forma más precisa y efectiva. Es relevante porque muestra cómo los métodos de aprendizaje automático pueden replicarse en otros contextos para evaluar con exactitud el riesgo de inundaciones. (Prasad et al., 2024).

Dhawale et al. (2024) El estudio realizado por Dhawale y su equipo analiza de forma detallada cómo las comunidades se ven afectadas por inundaciones y sequías, reconociendo la complejidad y diversidad de estos fenómenos. Al revisar 83 artículos publicados entre 2010 y 2023, identificaron factores fundamentales que incrementan la vulnerabilidad, como la exposición física al desastre, el nivel socioeconómico, la calidad de la gobernanza y los valores culturales locales. Encontraron que la mayoría de los estudios han analizado estas situaciones a escala regional y que esta tendencia aumentó después del año 2019. También notaron que los métodos más comunes para manejar y presentar datos son la normalización min-max y la asignación de igual peso a todos los factores.

Uno de los resultados más importantes es la falta significativa de validación y análisis de sensibilidad en los índices utilizados para evaluar la vulnerabilidad, lo cual afecta la confianza en estos resultados. Además, destacaron la importancia de integrar diferentes disciplinas como la hidrología, climatología, geografía y ciencias sociales para obtener evaluaciones más precisas y diseñar mejores estrategias para reducir los riesgos.

Este trabajo es clave para la presente investigación porque ofrece un marco teórico sólido para analizar la vulnerabilidad a inundaciones desde distintos enfoques. También resalta la necesidad de contar con métodos más rigurosos y validados para obtener resultados precisos y confiables en evaluaciones de riesgos por inundación (Dhawale et al., 2024).

Gambo et al. (2023) El estudio de Gambo y colaboradores analizó cómo la pobreza influye en la vulnerabilidad a inundaciones en el estado de Jigawa, Nigeria, una zona donde las inundaciones son frecuentes y la pobreza es muy alta. Utilizando datos geoespaciales, registros históricos y técnicas de teledetección, lograron identificar las áreas más propensas a sufrir inundaciones. Mediante un análisis estadístico (Análisis de Componentes Principales - PCA), detectaron que factores como la agricultura, bajos ingresos, acceso limitado a educación y salud, viviendas precarias e infraestructura deficiente aumentan considerablemente el impacto de las inundaciones.

Sus resultados mostraron que cerca del 40% de la población es altamente vulnerable, manteniendo la pobreza multidimensional en la región, mientras que entre un 3% y un 13% del territorio está en riesgo extremadamente alto de inundación. Los autores destacaron la importancia de usar información geoespacial para gestionar mejor estos riesgos y enfatizaron que políticas públicas basadas en evidencia podrían reducir notablemente el impacto en comunidades vulnerables.

Este trabajo es muy relevante porque demuestra la eficacia del análisis geoespacial para identificar zonas de alto riesgo, y aporta perspectivas útiles sobre cómo la pobreza influye en la vulnerabilidad, sirviendo como referencia para crear estrategias similares en otras regiones. (Gambo et al., 2024).

Isia et al. (2023) El estudio dirigido por Isia evaluó cómo las comunidades en Sarawak, Malasia, responden socialmente ante el riesgo de inundaciones, creando un Índice de Vulnerabilidad Social (SVI). Los autores utilizaron métodos estadísticos avanzados como el PCA

y técnicas de entropía para asignar peso a diversos factores de vulnerabilidad en 12 divisiones administrativas.

Los resultados mostraron que Kuching, Miri, Sibú y Bintulu son las divisiones con mayor vulnerabilidad debido a factores como alta exposición a eventos climáticos extremos, alta densidad poblacional y poca capacidad adaptativa. También se observó que las comunidades con menos recursos para adaptarse sufren impactos más severos, destacando la necesidad de adaptar las políticas de mitigación según las características particulares de cada zona.

El estudio concluyó que evaluar la vulnerabilidad social es clave para reducir riesgos, ya que permite identificar claramente las áreas prioritarias. Esta investigación ofrece un marco metodológico sólido que podría ser usado para crear mapas similares en otras regiones vulnerables a inundaciones (Isia et al., 2023).

2. Justificación

Las imágenes satelitales obtenidas por radar SAR (Synthetic Aperture Radar) son fundamentales para monitorear cambios en cuerpos de agua durante inundaciones costeras, ya que proporcionan información precisa y constante, independientemente de las condiciones climáticas o del momento del día. A diferencia de otros métodos de monitoreo, esta tecnología puede penetrar nubes densas, niebla y condiciones de oscuridad, permitiendo su uso en situaciones críticas y emergencias donde la visibilidad se ve gravemente afectada (NASA, 2017). Además, el radar SAR tiene la capacidad de detectar pequeños cambios en la superficie terrestre, lo que permite identificar rápidamente las áreas inundadas y crear mapas detallados que sirven para la gestión eficaz del riesgo de desastres naturales (Faster Capital, 2024). Las imágenes SAR también presentan ventajas significativas en términos de cobertura espacial y frecuencia de actualización. Pueden obtener datos constantes y de alta resolución, esenciales para realizar un monitoreo continuo y detallado. Esto mejora considerablemente la capacidad de las autoridades para tomar decisiones informadas y oportunas frente a emergencias climáticas y desastres naturales.

El uso del SAR ha demostrado su efectividad en diversos contextos internacionales, mejorando notablemente la respuesta ante emergencias generadas por inundaciones. Uno de los ejemplos más notables es la inundación ocurrida en el río Mississippi en 2011. En este evento, las imágenes SAR permitieron que las autoridades observaran en tiempo real la expansión de las aguas, facilitando así la coordinación precisa y rápida de evacuaciones y rescates, salvando vidas y minimizando daños materiales (NASA, 2011).

Otra experiencia significativa se presentó durante las inundaciones en el sudeste asiático en 2018. En este caso, el uso del SAR aceleró la elaboración de mapas detallados de las áreas afectadas, lo que agilizó la distribución de ayuda humanitaria y permitió planificar de manera más efectiva la recuperación y reconstrucción posterior al desastre (The European Space Agency, 2018). De manera similar, durante las inundaciones del río Brahmaputra en la India en 2020, y en Mozambique en 2019, la tecnología SAR volvió a mostrar su utilidad al facilitar respuestas rápidas y precisas, consolidándose como una herramienta indispensable para la gestión de riesgos en todo el mundo (Indian Space Research Organisation, 2020; Copernicus, 2019).

En Cartagena, las inundaciones constituyen un desafío constante que genera graves impactos sociales y económicos. Por ejemplo, durante la temporada de lluvias de 2010-2011, más

de 43.500 familias en el departamento de Bolívar fueron afectadas, causando pérdidas económicas equivalentes a más del 5% del Producto Interno Bruto departamental (Observatorio Ambiental de Cartagena). Además, en el año 2022 se registraron 616 emergencias relacionadas con inundaciones, de las cuales el 87% se concentró en asentamientos informales, afectando directamente a 1.531 hogares y exacerbando las condiciones de vulnerabilidad social y económica en estas comunidades (Cartagena Cómo Vamos, 2022).

Estos hechos evidencian claramente la necesidad urgente de contar con métodos más eficientes y precisos para monitorear inundaciones y responder adecuadamente a estas emergencias frecuentes. Actualmente, la ciudad de Cartagena cuenta con diversas herramientas y métodos para gestionar el riesgo de inundaciones:

Mapas de inundación: El Observatorio Ambiental desarrolla mapas que identifican áreas vulnerables utilizando registros históricos, datos topográficos y análisis climáticos para delimitar claramente las zonas propensas a inundarse.

Planes de Ordenamiento Territorial (POT): Estos planes incluyen estrategias específicas para reducir riesgos en áreas especialmente vulnerables como Fredonia y Nuevo Paraíso, procurando incorporar la gestión del riesgo en la planificación urbana. Protocolos de monitoreo y respuesta: Implementados por la Oficina Asesora para la Gestión del Riesgo de Desastres (OAGRD,2020), estos protocolos aseguran una respuesta inmediata en situaciones de emergencia, coordinando esfuerzos entre diferentes autoridades y organismos locales.

A pesar de los esfuerzos actuales, la incorporación de imágenes satelitales SAR representa una gran oportunidad para fortalecer significativamente el monitoreo y la capacidad de respuesta frente a inundaciones en Cartagena. Esta tecnología no solo mejorará el alcance en la detección de áreas afectadas, sino que además permitirá a las autoridades actuar rápidamente ante emergencias, optimizando la planificación de acciones preventivas y de mitigación.

El interés creciente en la investigación y uso del SAR, reflejado en el número creciente de publicaciones científicas desde 2008 hasta 2025, resalta aún más su relevancia y efectividad en contextos de desastres naturales (Science Direct, 2025). Donde se observa un incremento en el número de artículos publicados entre los años 2008 y 2025, la ecuación de búsqueda usada fue: “flood” AND “SAR” AND “remote sensing” AND “detection”. Además, se consideró como criterio adicional que los artículos sean de acceso abierto (open access).

Figura 1 Producción anual de artículos indexados, asociados al uso de imágenes SAR en inundaciones.



Fuente: Science Direct (2025).

Considerando la amenaza permanente de inundaciones costeras en Cartagena, la implementación del SAR resulta indispensable para mejorar la resiliencia urbana y fortalecer la capacidad de planificación de largo plazo. Además, esta tecnología permitirá evaluar de manera más completa los impactos prolongados de las inundaciones y desarrollar estrategias más sólidas y sostenibles para la recuperación de las comunidades más vulnerables (NASA, 2017).

Finalmente, el objetivo principal de este proyecto es aplicar tecnologías SAR para identificar con exactitud las áreas afectadas por inundaciones en Cartagena y analizar su relación con el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM). Los resultados obtenidos proporcionarán información esencial que facilitará la toma de decisiones estratégicas y permitirá diseñar intervenciones efectivas orientadas al bienestar y la protección de las comunidades más vulnerables de la ciudad.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Analizar los cambios en cuerpos de agua durante eventos de inundación costera en Cartagena, con el propósito de identificar las áreas más afectadas y su relación con el índice de pobreza multidimensional, a partir de la utilización de imágenes SAR.

3.2 Objetivos específicos

1. Detectar los cambios de área ocupada por cuerpos de agua antes y después de los eventos de inundación costera utilizando imágenes SAR.
2. Establecer y definir las áreas afectadas por las inundaciones costeras utilizando los datos SAR.
3. Analizar la relación existente entre el área inundada y el índice de pobreza multidimensional (IPM).

4 Hipótesis

La presente investigación parte de la necesidad de comprender la relación entre las áreas afectadas por inundaciones costeras y las condiciones socioeconómicas de la población, representadas a través del Índice de Pobreza Multidimensional (IPM). En este contexto, se plantea una hipótesis que busca explicar cómo el uso de imágenes SAR permite identificar patrones espaciales en la distribución del agua superficial durante eventos de inundación, y cómo estos patrones se relacionan con el grado de vulnerabilidad socioeconómica de las zonas afectadas.

4.1. Hipótesis de trabajo: Se considera que las imágenes satelitales SAR permiten una detección precisa de las áreas inundadas en Cartagena, y que existe una relación directa entre la distribución espacial de dichas áreas y el nivel de pobreza multidimensional, donde las zonas con menor IPM (mayor bienestar) tienden a estar más expuestas a las inundaciones debido a su ubicación geográfica cercana a la costa.

4.2. Hipótesis nula: No existe una relación significativa entre las zonas afectadas por las inundaciones costeras detectadas mediante imágenes SAR y el nivel de pobreza multidimensional (IPM) en la ciudad de Cartagena.

4.3. Hipótesis alterna. Existe una relación significativa entre la extensión de las zonas afectadas por las inundaciones costeras, detectadas mediante imágenes SAR, y el nivel de pobreza multidimensional (IPM) en la ciudad de Cartagena. Las zonas con menores niveles de pobreza (IPM bajo) presentan mayor afectación por inundaciones debido a su localización más cercana a las áreas costeras y cuerpos de agua.

4.4. Variables. En la presente investigación se identifican tres tipos de variables. La variable independiente corresponde al Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) de los barrios de Cartagena, el cual representa el nivel de vulnerabilidad socioeconómica de la población. La variable dependiente es la extensión del área inundada, detectada mediante el procesamiento de imágenes satelitales SAR, que permite cuantificar los cambios en cuerpos de agua durante eventos de inundación.

5 Marco teórico

5.1. Referente normativo y legal

Colombia cuenta con un sólido marco normativo y legal para la gestión del riesgo de inundaciones, orientado a la prevención, mitigación y respuesta ante desastres naturales. A continuación, se destacan las principales leyes y decretos relacionados con este tema:

Ley 1523 de 2012: Esta ley adopta la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SNGRD). Define la gestión del riesgo como un proceso social que busca la planificación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones para el conocimiento y reducción del riesgo, así como para el manejo de desastres.

Decreto 1807 de 2014: Este decreto reglamenta la incorporación de la gestión del riesgo en los Planes de Ordenamiento Territorial (POT). Establece que las autoridades territoriales deben integrar la gestión del riesgo en sus procesos de planificación, incluyendo la identificación y zonificación de áreas susceptibles a amenazas naturales, como las inundaciones.

Decreto 2157 de 2017: Este decreto adopta directrices generales para la elaboración de planes de gestión del riesgo de desastres por parte de entidades públicas y privadas, en el marco del artículo 42 de la Ley 1523 de 2012. Fomenta la implementación de estrategias para la reducción del riesgo y la preparación ante eventos adversos, incluyendo las inundaciones.

Decreto 1076 de 2015: Conocido como el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, compila normas relacionadas con la gestión ambiental y el manejo de recursos hídricos. Establece la necesidad de implementar tecnologías innovadoras para el monitoreo y protección de cuerpos de agua, lo que incluye medidas para la prevención de inundaciones.

Plan Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres 2015-2030: Este plan es una estrategia de desarrollo que funciona como hoja de ruta para que el país implemente acciones conjuntas en la gestión del riesgo de desastres. Está alineado con las prioridades del Marco de Sendai 2015-2030 y busca contribuir a la seguridad, al mejoramiento de la calidad de vida y al desarrollo sostenible.

Estas normativas reflejan el compromiso de Colombia en fortalecer la gestión del riesgo de desastres, especialmente en lo relacionado con las inundaciones, mediante la integración de políticas, planes y acciones que promuevan la resiliencia y la sostenibilidad en el territorio nacional.

5.2. Referente teórico

Las imágenes de radar de apertura sintética (SAR) se han consolidado como una herramienta fundamental en el monitoreo de inundaciones, gracias a su capacidad para operar en condiciones climáticas adversas y durante la noche (Horritt & Bates, 2002). A diferencia de los sensores ópticos, las imágenes SAR pueden penetrar nubes, niebla y oscuridad, lo que las hace ideales para situaciones de emergencia donde la visibilidad es limitada. Esta característica permite detectar cambios en cuerpos de agua superficial, lo que resulta crucial para la gestión de desastres, especialmente en regiones costeras como Cartagena, donde los eventos de inundación son frecuentes y devastadores.

5.2.1. Definición de imágenes SAR

Las imágenes de radar de apertura sintética (SAR) son un tipo de imagen de teledetección obtenida mediante sistemas de radar activos. A diferencia de los sensores ópticos, que dependen de la luz solar para capturar imágenes, los sistemas SAR emiten sus propias señales de microondas y registran la retrodispersión de los objetos en la superficie terrestre. Esto permite obtener imágenes detalladas independientemente de las condiciones climáticas o de iluminación (Moreira et al., 2013).

5.2.2. Técnicas y Metodologías

El monitoreo de inundaciones mediante imágenes SAR requiere el uso de diversas técnicas y metodologías. Una de las más comunes es la detección de cambios, que se basa en métodos de umbralización y clasificación no supervisada para identificar áreas inundadas (Lu et al., 2004). Otra técnica ampliamente utilizada es la interferometría SAR (InSAR), que mide cambios en la superficie terrestre con alta precisión, siendo especialmente útil para evaluar subsidencia y deformaciones del terreno (Massonnet & Feigl, 1998). Además, la integración con datos ópticos permite mejorar la precisión en la identificación de áreas inundadas y la caracterización de los cambios en cuerpos de agua, combinando las ventajas de ambos tipos de sensores (Martinis et al., 2015).

Dentro del preprocesamiento de imágenes SAR, se aplican varias técnicas clave para garantizar la calidad de los datos:

- **Apply Orbit File:** Aplicación de los archivos de órbita precisos para mejorar la exactitud geométrica de las imágenes (ESA, 2018).
- **Calibration:** Calibración radiométrica para convertir los valores de intensidad de retrodispersión a unidades físicas en decibelios (dB) (ESA, 2018).
- **Speckle Filtering:** Aplicación de filtros como Gamma Map para reducir el ruido speckle sin comprometer la integridad de la información (Lee et al., 1994).
- **Terrain Correction:** Corrección de terreno mediante un Modelo Digital de Elevación (DEM), garantizando así la correcta georreferenciación y eliminación de distorsiones geométricas (Small, 2011).

Las imágenes satelitales utilizadas en este estudio fueron obtenidas del satélite Sentinel-1, parte del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). Sentinel-1 opera en la banda C con una longitud de onda de aproximadamente 5.6 cm y proporciona imágenes SAR en diferentes modos de adquisición, como Interferometric Wide Swath (IW), que ofrece una resolución espacial de aproximadamente 10 metros (Torres et al., 2012). Este satélite cuenta con un tiempo de revisita de 6 días en condiciones óptimas, permitiendo obtener datos recientes y recurrentes sobre la evolución de los cuerpos de agua afectados por inundaciones.

Las imágenes adquiridas presentan polarización VV (vertical-vertical) y VH (vertical-horizontal). La polarización VV es más adecuada para detectar agua debido a que su señal es más reflejada por superficies lisas, como cuerpos de agua, resultando en una baja respuesta de retrodispersión en comparación con VH. En cambio, la polarización VH es más efectiva para diferenciar estructuras y vegetación, ya que la dispersión cruzada de la señal permite detectar irregularidades en la superficie (Henry et al., 2006). La combinación de ambas polarizaciones permite una mejor identificación de las áreas inundadas y la distinción de elementos dentro del paisaje afectado (Henry et al., 2006).

5.2.3. Plataformas y Herramientas

El procesamiento y análisis de imágenes SAR se ha optimizado gracias al desarrollo de plataformas y herramientas avanzadas. Una de las más destacadas es Google Earth Engine, que proporciona una infraestructura computacional potente para el procesamiento de grandes

volúmenes de datos geospaciales en tiempo casi real (Gorelick et al., 2017). Otra herramienta clave es el sistema RAPID, que automatiza el mapeo de inundaciones, permitiendo una respuesta rápida y eficiente durante eventos de emergencia (Bischiniotis et al., 2020). Además, SNAP (Sentinel Application Platform), desarrollada por la ESA (Agencia Espacial Europea), es ampliamente utilizada para tareas como calibración, filtrado y detección de cambios en imágenes SAR (ESA, 2018). Por último, ArcGIS permite la integración, visualización y análisis de datos geospaciales, lo que facilita la creación de mapas temáticos y la gestión de bases de datos espaciales (ESRI, 2021).

5.2.4. Contexto Socioeconómico y Vulnerabilidad en Colombia

En Colombia, el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) mide la pobreza considerando múltiples dimensiones, como educación, salud y condiciones de vida. Este índice es fundamental para evaluar la vulnerabilidad de las comunidades frente a eventos climáticos extremos, como inundaciones, ya que la pobreza influye directamente en la capacidad de respuesta y recuperación ante desastres.

En 2023, la incidencia de pobreza multidimensional en el país fue del 12.1%, lo que representa una disminución de 0.8 puntos porcentuales respecto al año anterior (DANE, 2023). Sin embargo, existen desigualdades significativas entre las regiones. Por ejemplo, en Guainía la incidencia es del 65%, mientras que en La Guajira es del 51.4%. En Chocó, la pobreza multidimensional alcanza el 45.1%, y en Norte de Santander es del 31.5% (DANE, 2018). Estas cifras reflejan la disparidad en el acceso a recursos y servicios básicos, lo que afecta la capacidad de mitigación y adaptación de estas comunidades ante eventos de inundación.

El impacto de las inundaciones en poblaciones con altos niveles de pobreza multidimensional es particularmente severo (UNGRD, 2018). Muchas de estas comunidades carecen de infraestructura adecuada, acceso a sistemas de alerta temprana y recursos para la recuperación. En este contexto, el uso de imágenes SAR para el monitoreo de inundaciones adquiere una relevancia aún mayor, ya que permite identificar las áreas afectadas y facilitar la implementación de estrategias de respuesta y asistencia dirigidas a las poblaciones más vulnerables.

5.2.5. Contexto Socioeconómico y Vulnerabilidad en Cartagena

Cartagena, como ciudad costera, enfrenta desafíos significativos relacionados con las inundaciones, especialmente durante la temporada de lluvias. La Oficina Asesora para la Gestión

del Riesgo de Desastres (OAGRD) ha identificado múltiples puntos críticos en las tres localidades de la ciudad, donde la población es altamente vulnerable a estos eventos.

En la Localidad 1, el principal sector afectado por las inundaciones es el Centro Histórico, una zona de gran importancia patrimonial y turística.

Por su parte, la Localidad 2 presenta una mayor cantidad de barrios expuestos a inundaciones, entre ellos Boston, Puerto de Pescadores, Canal Matute, Las Palmeras, Villa Rosita y Olaya (en sus sectores 11 de noviembre, Ricaurte, Central, La Puntilla, Playas Blancas y Zarabanda). También se ven afectados Fredonia, Nuevo Paraíso, Isla de Belén, Bayunca, Reino de Pambelé, Caizeba, Mano de Dios, Manzanillo del Mar, Puerto Rey y Tierrabaja, zonas donde el impacto de las lluvias es recurrente.

En la Localidad 3, además de las inundaciones, los deslizamientos representan un alto riesgo para los habitantes. Las áreas más afectadas incluyen los Cerros de Albornoz (sectores Girasoles, La Paz, Mirador de Cartagena y Nuevo Israel), así como los barrios 20 de Julio, Sucre, Villa Rosa, Bellavista, El Libertador, Henequén, Nelson Mandela, Policarpa, Arroz Barato, Membrillal, Cabildo Indígena Zenú, San José de los Campanos y La Carolina.

Durante noviembre de 2024, fuertes lluvias impactaron gravemente a la ciudad, afectando aproximadamente a 7.000 familias. Las zonas más perjudicadas fueron los barrios cercanos a la Ciénaga de la Virgen, así como las localidades de Manzanillo del Mar, Punta Canoa y La Boquilla. Estos eventos reflejan la necesidad urgente de fortalecer las estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático en Cartagena.

6. Metodología

La presente sección describe cada uno de los procesos que se llevaron a cabo para alcanzar cada uno de los objetivos específicos del presente proyecto. Se detallan los procedimientos, técnicas, actividades y estrategias metodológicas requeridas, incluyendo la recolección, organización, sistematización y análisis de los datos. Además, este diseño permite establecer la secuencia lógica de actividades y facilitar la evaluación y replicabilidad del estudio, asegurando un enfoque robusto y sistemático para abordar el fenómeno de las inundaciones en Cartagena.

6.1. Enfoque metodológico

El enfoque metodológico adoptado en esta investigación es de carácter cuantitativo, ya que implica la recopilación y análisis de datos medibles con el objetivo de caracterizar y cuantificar las áreas afectadas por inundaciones en Cartagena mediante el uso de imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética). Este enfoque permite evaluar de manera objetiva la extensión de las áreas inundadas y proporciona una base sólida para la toma de decisiones orientadas a la mitigación y manejo de riesgos.

El uso de técnicas de teledetección y análisis espacial respalda la selección de un enfoque cuantitativo, ya que este permite alcanzar altos niveles de objetividad y precisión en la identificación y caracterización de las áreas afectadas. El enfoque metodológico del presente proyecto se define como cuantitativo, enfocado exclusivamente en el análisis de datos medibles para evaluar el impacto de las inundaciones. Además, se incluye la relación que existe entre las inundaciones y el índice de pobreza multidimensional con el propósito de interpretar los resultados en un contexto socioeconómico local, lo que proporciona una perspectiva integral sobre el impacto de las inundaciones. De este modo, el análisis considera tanto los factores físicos como los sociales que afectan a las comunidades.

Este enfoque busca ofrecer un análisis de los factores que influyen en las comunidades afectadas, integrando elementos físicos y sociales del fenómeno.

6.2. Tipo de estudio

El estudio se clasifica como descriptivo y geoestadístico.

- **Estudio Descriptivo:** Este estudio tiene como finalidad describir las características de las áreas afectadas por inundaciones, proporcionando un análisis detallado de la extensión de las zonas inundadas antes y después del evento de precipitación. El enfoque descriptivo permite caracterizar el fenómeno de la inundación en términos de su distribución espacial y la evolución temporal del área afectada. Además, se desarrollará una caracterización espacial y temporal que permitirá identificar patrones recurrentes y áreas particularmente vulnerables a este tipo de eventos.
- **Estudio correlacional:** Este tipo de estudio permite analizar los factores que influyen en la extensión y distribución espacial de las áreas inundadas. Para lograrlo, se aplicarán técnicas de estadística descriptiva integradas con métodos avanzados de análisis espacial. Dicha integración permitirá evaluar la incidencia de las inundaciones en relación con el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) de las zonas afectadas, revelando posibles relaciones entre vulnerabilidad social e impacto ambiental. Los resultados obtenidos mediante análisis correlacional serán clave para identificar variables determinantes en la dinámica de las inundaciones y facilitarán el diseño de estrategias de mitigación más efectivas, poniendo especial énfasis en proteger y fortalecer a las comunidades más vulnerables.

6.3. Procedimiento

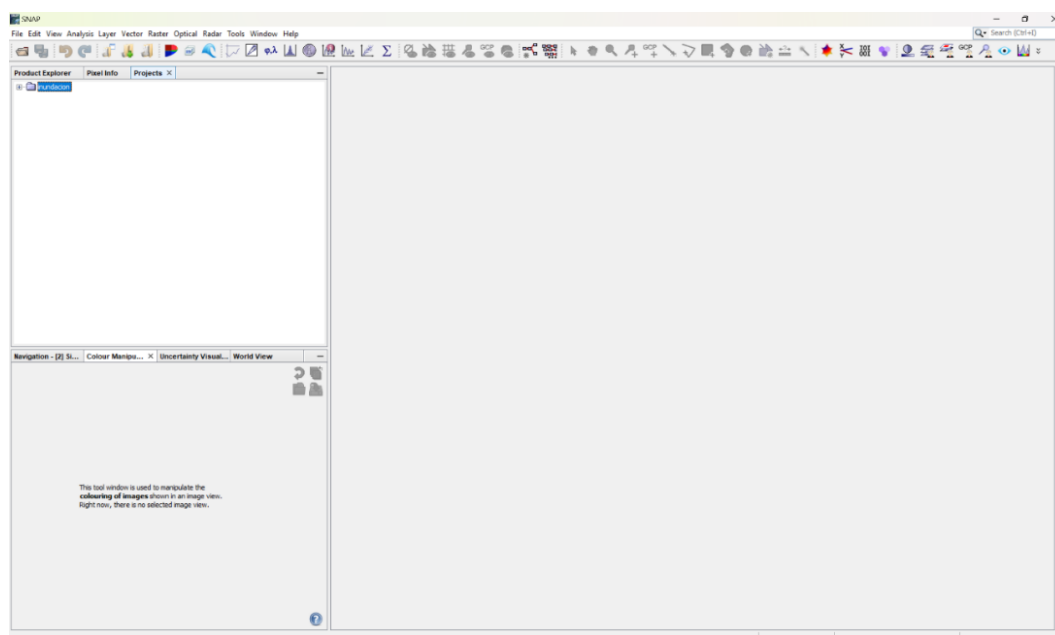
El proceso metodológico se estructura en varias fases detalladas a continuación:

Para el objetivo específico 1 "Detectar los cambios en cuerpos de agua antes y después de los eventos de inundación costera utilizando imágenes SAR" se realizaron las siguientes actividades:

Incluir Las imágenes satelitales fueron obtenidas desde la base de la plataforma Alaska data search, la cual es una plataforma que proporciona imágenes de radar del satélite Sentinel 1 de forma gratuita. Las imágenes se buscaron con una temporalidad de máximo 3 días posteriores al evento de inundación, esto se realizó para los años 2017, 2020 y 2024, estas imágenes cuentan con polarización VV y VH, lo que permitirá una mayor sensibilidad a la presencia de agua superficial.

La selección de estas imágenes se basará en la disponibilidad y en la proximidad temporal al evento de inundación, con el fin de maximizar la precisión de las áreas afectadas. Posterior a la descarga de imágenes, se crea un proyecto en el software SNAP.

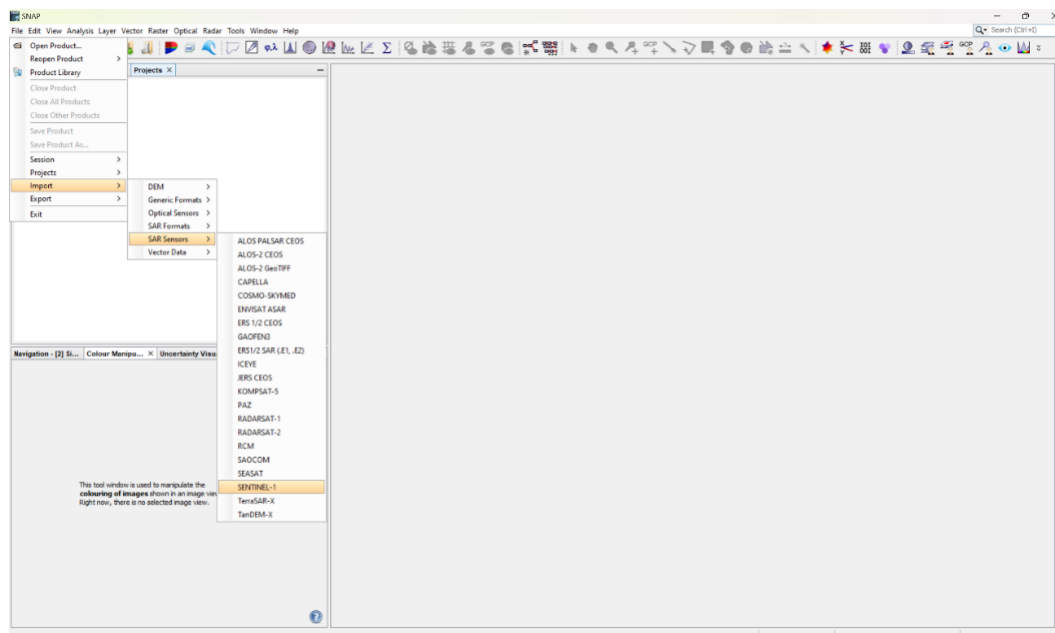
Figura 2 Vista Inicial de SNAP con el Explorador de Productos



Fuente: Autores

Una vez creado el proyecto en SNAP, se procede a cargar las imágenes SAR provenientes del satélite Sentinel, previamente descargadas. Es indispensable cargar las imágenes correspondientes al período previo y posterior al evento de inundación. Al descargar las imágenes SAR desde la plataforma Alaska Data Search, se obtiene un archivo comprimido que contiene una carpeta con extensión '.SAFE', la cual incluye las imágenes satelitales sin procesar. El software SNAP reconoce fácilmente este formato debido a su compatibilidad nativa con imágenes SAR.

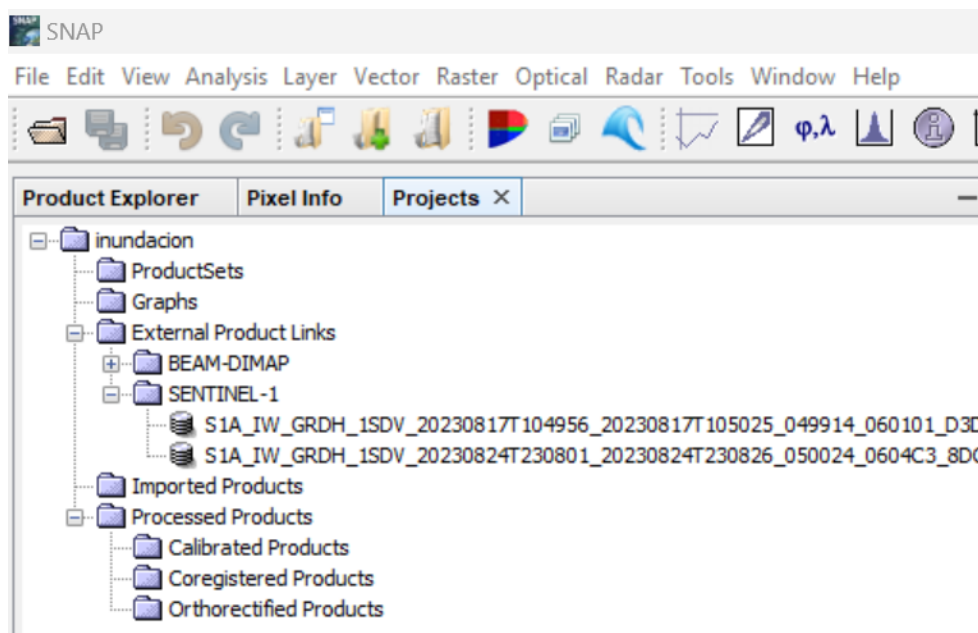
Figura 3 Importación de Imágenes SAR Sentinel-1 en SNAP



Fuente: Autores.

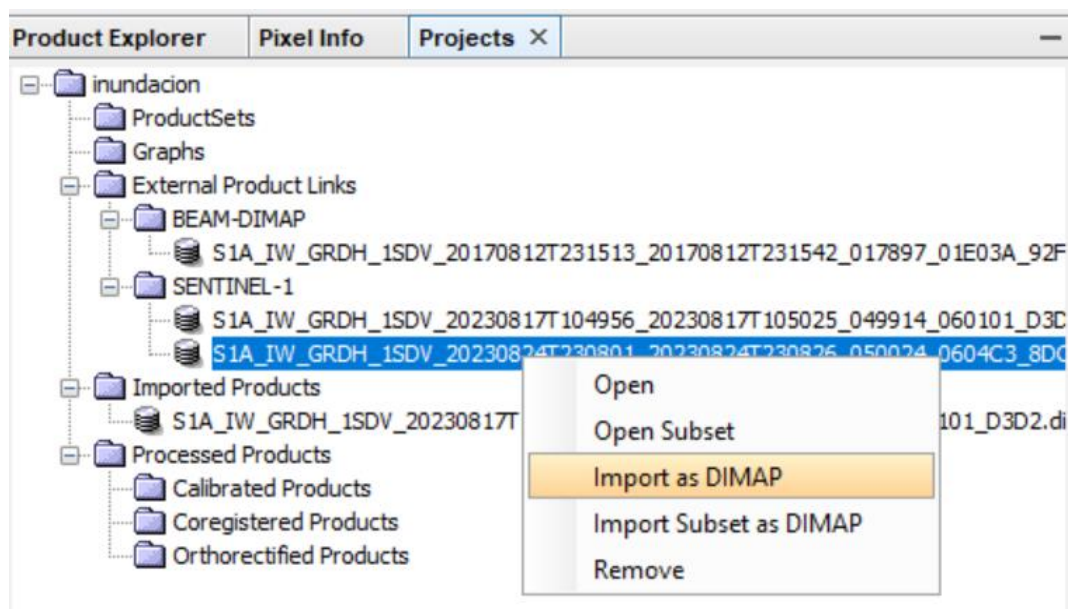
Después de haber realizado correctamente la carga de las imágenes, estas pueden visualizarse claramente en SNAP. (previa y posterior al evento de inundación).

Figura 4 Explorador de Productos en SNAP con Imágenes Sentinel-1 Cargadas



En este punto, las imágenes SAR están cargadas temporalmente en el software SNAP; sin embargo, aún no es posible realizar los preprocesamientos necesarios para evaluar las zonas inundadas. Por tanto, es indispensable almacenar definitivamente estas imágenes en el proyecto. Para lograr esto, se debe hacer clic derecho sobre cada imagen cargada y seleccionar la opción 'Import as DIMAP'. Este paso debe aplicarse tanto a la imagen previa como a la posterior al evento de inundación. Una vez hecho esto, ambas imágenes quedarán almacenadas permanentemente en el proyecto y estarán disponibles en la pestaña 'Product Explorer' para ejecutar adecuadamente los procesos de análisis posteriores.

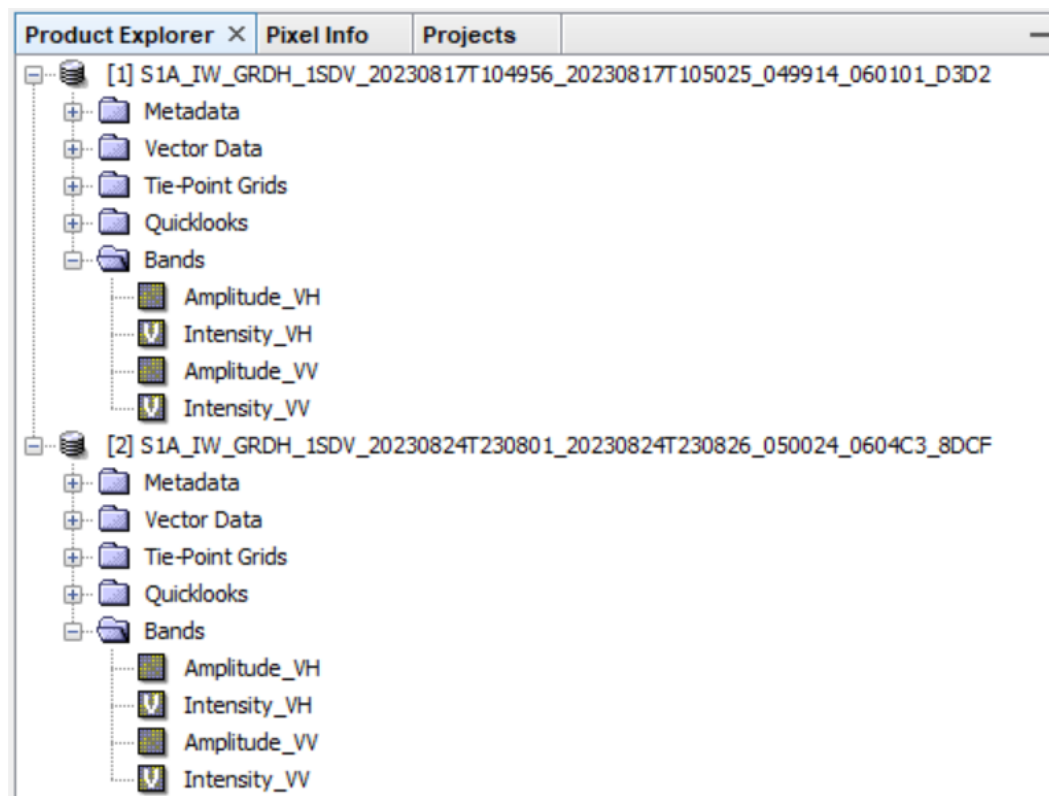
Figura 5 Importación de imágenes Sentinel-1 como DIMAP en SNA



Fuente: Autores.

Una vez realizada la importación definitiva de las imágenes al proyecto, estas estarán disponibles en la pestaña 'Product Explorer' del software SNAP, donde se llevan a cabo los preprocesamientos necesarios. En esta pestaña se observan diferentes carpetas como: 'Metadata', 'Vector Data', 'Tie-Point Grids', 'Quicklooks' y 'Bands'. Para el desarrollo de este estudio nos concentraremos en la carpeta denominada 'Bands', que al desplegarse mostrará los distintos tipos de bandas de polarización disponibles en las imágenes cargadas, particularmente la banda 'amplitud_VH', la cual será utilizada para realizar el análisis visual preliminar y verificar la correcta carga de las imágenes.

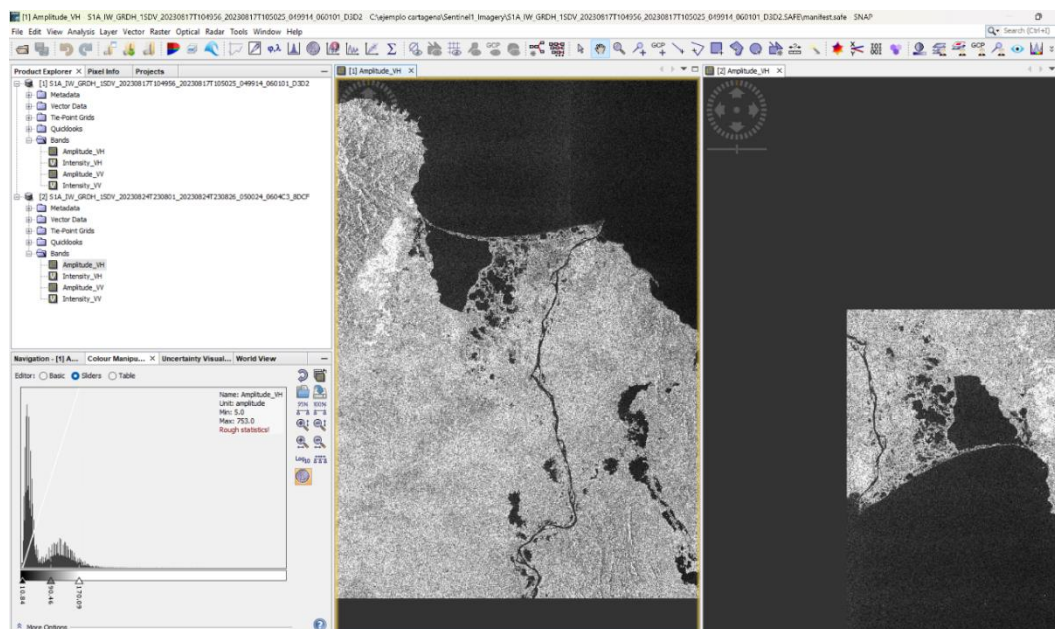
Figura 6 Exploración de bandas de imágenes Sentinel-1 en SNAP



Fuente: Autores.

Para verificar que las imágenes se hayan cargado correctamente en el software SNAP, se debe realizar un doble clic sobre la banda 'amplitude_VH' de cada una de las imágenes SAR previamente cargadas (antes y después del evento de inundación). Posteriormente, se selecciona la opción 'Window' y luego 'Tile Horizontally', lo cual permite visualizar simultáneamente ambas imágenes y comprobar visualmente su correcta carga y alineación espacial. Una vez confirmada esta visualización, es fundamental guardar el proyecto para conservar los cambios y avanzar hacia los procesos de análisis posteriores.

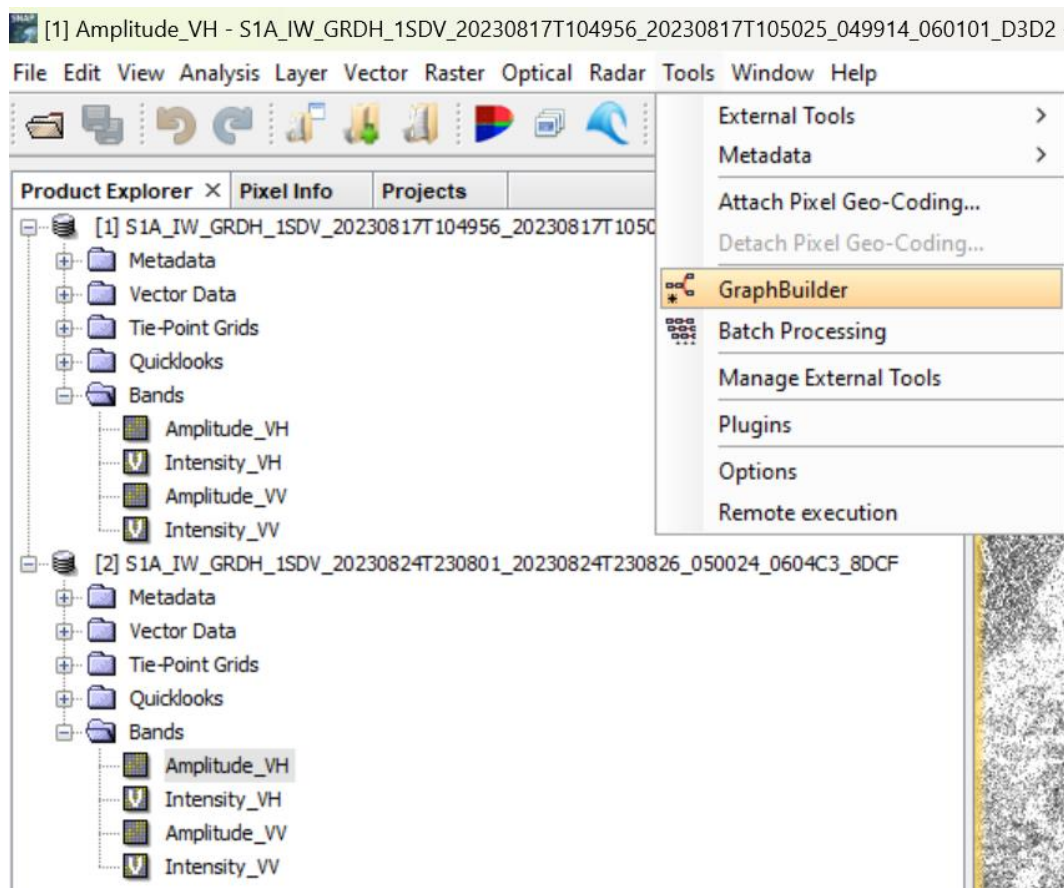
Figura 7 Visualización de imágenes SAR Sentinel-1 en SNAP



Fuente: Autores

Para realizar el preprocesamiento de las imágenes SAR, se empleará la herramienta 'Graph Builder' disponible en el software SNAP, la cual permite automatizar tareas repetitivas mediante la creación y almacenamiento de secuencias de procesamiento. Para acceder a esta herramienta, se debe ingresar al menú 'Tools' y seleccionar la opción 'Graph Builder'. Esto abrirá una ventana en blanco donde se podrá configurar, organizar y visualizar claramente cada uno de los procesos requeridos para realizar un preprocesamiento completo y sistemático de las imágenes SAR.

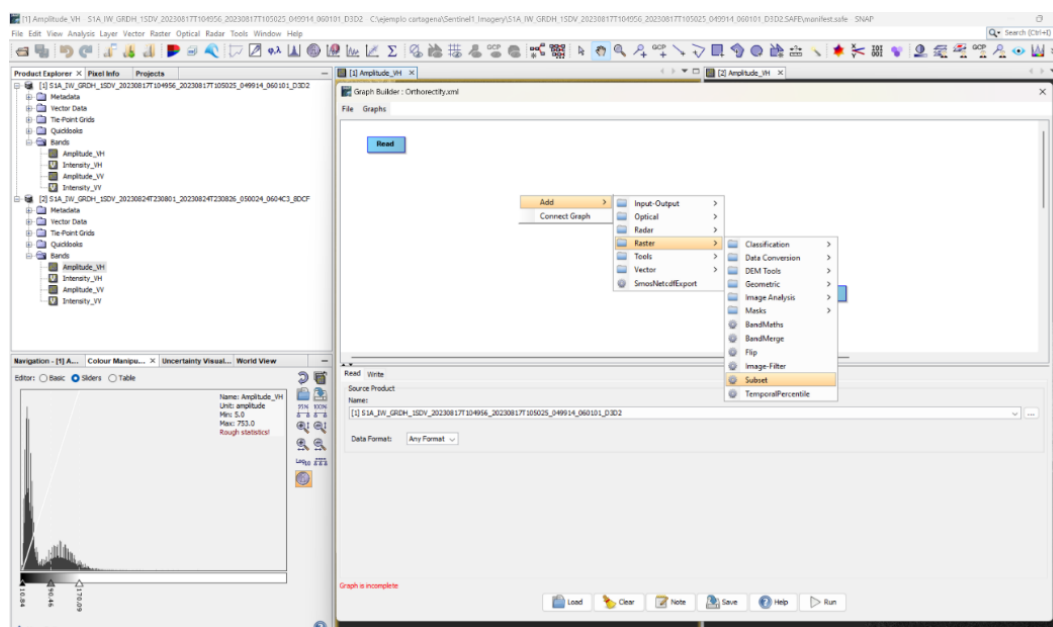
Figura 8 Acceso a “Graph Builder” en SNAP para preprocesamiento de imágenes SAR



Fuente: Autores.

Al seleccionar la herramienta 'Graph Builder' desde el menú 'Tools', aparecerá una ventana en blanco destinada a construir el flujo de trabajo requerido para el preprocesamiento de las imágenes SAR. Para añadir procesos específicos, se debe hacer clic izquierdo sobre cualquier área libre dentro de la ventana y seleccionar la opción 'Add'. Esto desplegará una lista completa de las herramientas disponibles en SNAP. Inicialmente se debe agregar el proceso 'Subset', que permite definir claramente los límites espaciales correspondientes a la zona de estudio. Posteriormente, se incorporan, uno a uno, los procesos de preprocesamiento necesarios según la metodología propuesta en la literatura revisada.

Figura 9 Configuración del flujo de preprocesamiento en “Graph Builder” de SNAP



Fuente: Autores.

Una vez abierto el 'Graph Builder', se añaden en secuencia los procesos de geoprocésamiento requeridos para la corrección de las imágenes SAR, según la configuración recomendada por la literatura revisada. Estos procesos son:

Apply Orbit File: Aplicación de los archivos de órbita precisos para mejorar la exactitud geométrica de las imágenes. Esto asegura que las imágenes estén correctamente alineadas y georreferenciadas, lo cual es crucial para la coherencia del análisis espacial.

Thermal Noise Removal: Eliminación del ruido térmico inherente a las imágenes SAR, lo cual es crucial para obtener datos de alta calidad y reducir las posibles interferencias que puedan afectar la detección de agua superficial.

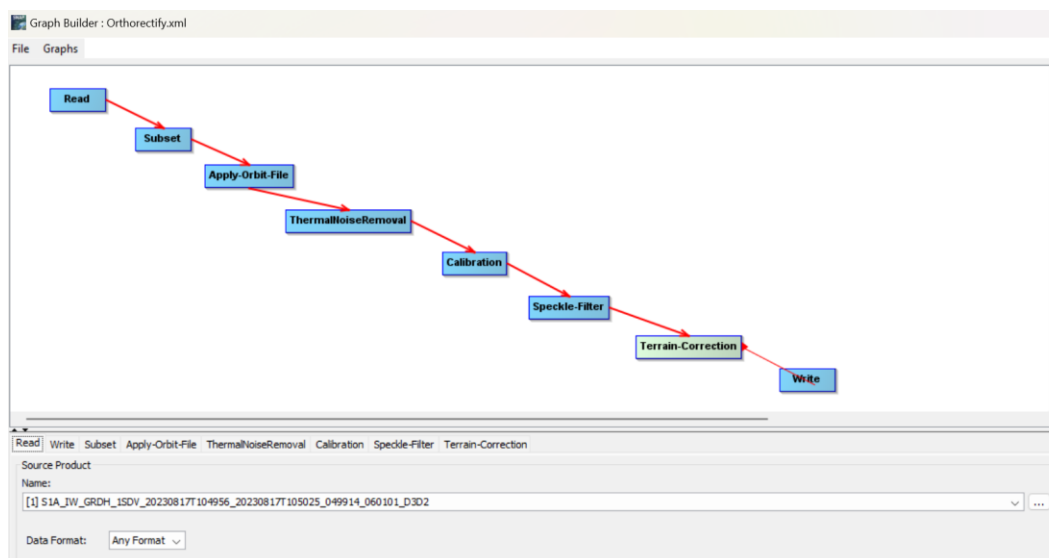
Calibration: Calibración radiométrica para convertir los valores de intensidad de retrodispersión a unidades físicas en decibelios (dB). La calibración es fundamental para que los datos sean comparables entre diferentes imágenes y para asegurar la consistencia en la interpretación de los resultados.

Speckle Filtering: Aplicación del filtro Gamma Map para reducir el ruido speckle sin comprometer la integridad de la información relevante. El ruido speckle es un efecto característico

de las imágenes SAR que puede dificultar la identificación precisa de las áreas inundadas si no se filtra adecuadamente.

Terrain Correction: Corrección de terreno mediante un Modelo Digital de Elevación (DEM), garantizando así la correcta georreferenciación y eliminación de distorsiones geométricas causadas por la topografía. Esto es particularmente importante en áreas con variaciones topográficas significativas, como es el caso de algunas zonas de Cartagena.

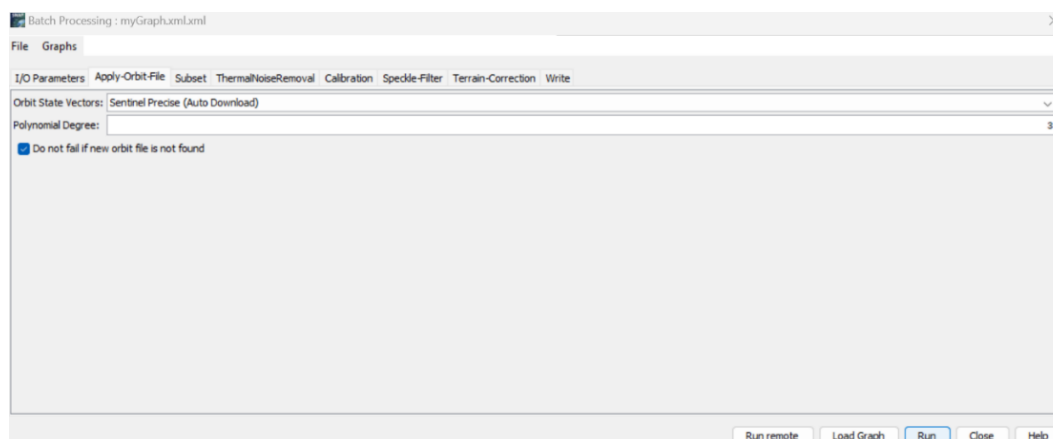
Figura 10 Flujo de preprocesamiento en Graph Builder de SNAP



Fuente: Autores.

Una vez configurados los procesos en el 'Graph Builder', se procede a guardar el gráfico creado. Para ello, se da clic en el menú 'File', luego se selecciona la opción 'Save Graph', y finalmente se almacena el archivo en la carpeta de trabajo correspondiente. Esto permitirá ajustar o ejecutar fácilmente la secuencia de procesos definida. Posteriormente, para configurar los parámetros específicos del preprocesamiento de las imágenes, se debe acceder desde el menú principal 'Tools' y seleccionar la herramienta 'Batch Processing'.

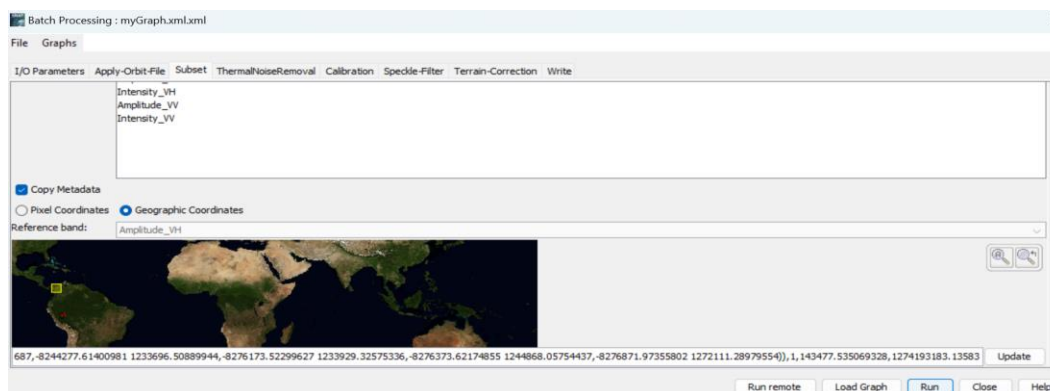
Figura 13 Configuración de parámetros de Apply Orbit File en Batch Processing de SNAP



Fuente: Autores.

En el paso correspondiente al proceso 'Subset', se deben definir claramente los límites espaciales de la zona de estudio. Para ello, se selecciona la opción 'Geographic Coordinates' y, posteriormente, se ingresan las coordenadas geográficas específicas (latitud y longitud) que delimitan el área objeto de análisis. Esto garantizará que las imágenes SAR procesadas se ajusten adecuadamente a la ubicación precisa requerida para el estudio.

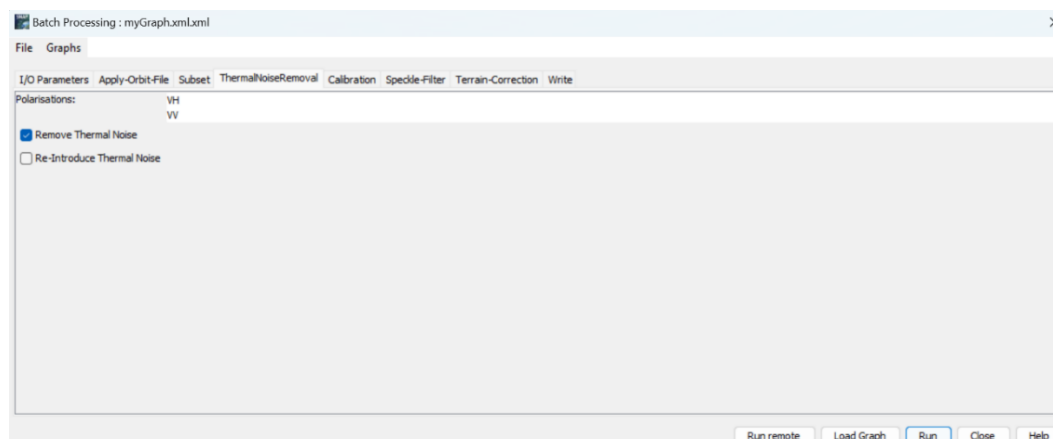
Figura 14 Definición de Subset y coordenadas geográficas en Batch Processing de SNAP



Fuente: Autores.

En la sección 'Thermal Noise Removal', no es necesario realizar modificaciones adicionales. Se mantiene seleccionada la opción predeterminada con el mismo nombre, lo cual asegurará la eliminación adecuada del ruido térmico presente en las imágenes SAR, mejorando así la calidad de los datos para la detección precisa de las áreas inundadas.

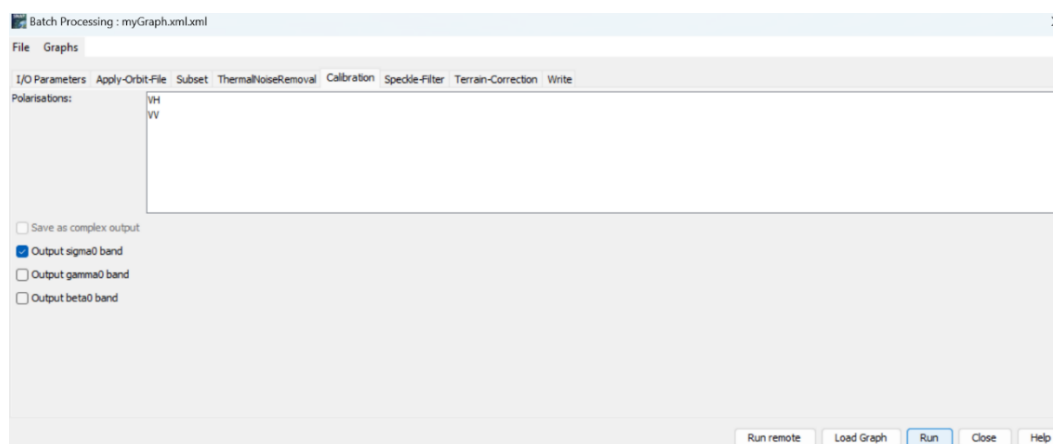
Figura 15 Configuración de eliminación de ruido térmico en Batch Processing de SNAP



Fuente: Autores.

En la sección 'Calibration', es necesario ajustar los parámetros específicos. Para ello, se selecciona únicamente la banda 'Sigma0 band', lo que permitirá realizar la calibración radiométrica adecuada, convirtiendo así los valores originales de retrodispersión en unidades físicas de decibelios (dB). Esto asegura la comparabilidad y consistencia en el análisis de las imágenes SAR.

Figura 16 Configuración de calibración radiométrica en Batch Processing de SNAP

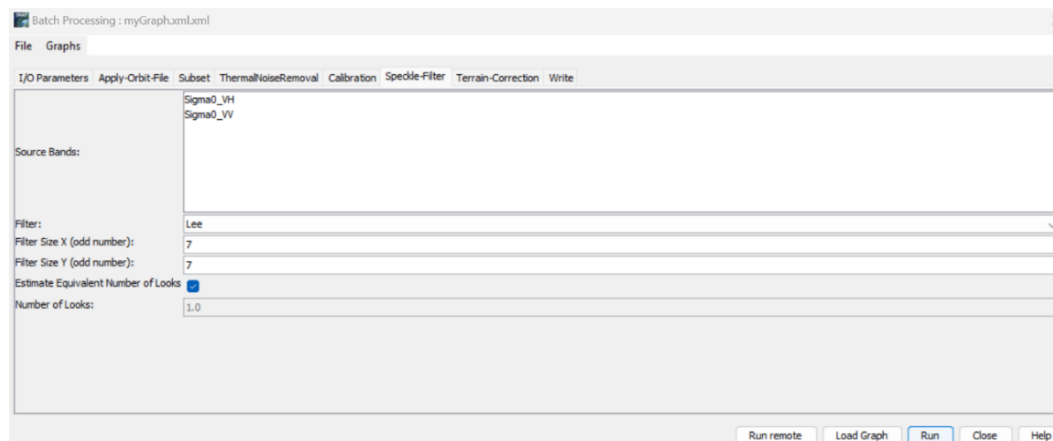


Fuente: Autores

En la sección correspondiente a 'Speckle Filtering', se debe seleccionar el filtro 'Lee' con un tamaño definido de 7 x 7 píxeles para los ejes X y Y. De acuerdo con la literatura especializada revisada, esta configuración es óptima para reducir efectivamente el ruido speckle presente en las

imágenes SAR, facilitando así una identificación precisa de las áreas inundadas sin comprometer la integridad y calidad de la información relevante.

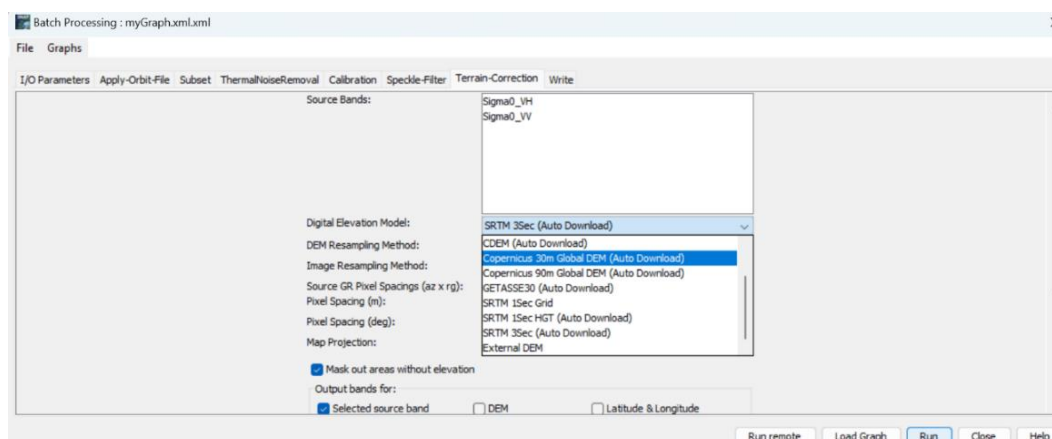
Figura 17 Configuración de filtro Speckle en Batch Processing de SNAP



Fuente: Autores.

En la sección de 'Terrain Correction', únicamente se modificará el parámetro 'Digital Elevation Model (DEM)'. Se debe seleccionar específicamente la opción 'Copernicus 30m Global DEM', asegurando así la correcta corrección topográfica y georreferenciación precisa de las imágenes SAR, indispensable para eliminar distorsiones causadas por la variabilidad del terreno en la zona de estudio.

Figura 18 Configuración de corrección de terreno en Batch Processing de SNAP

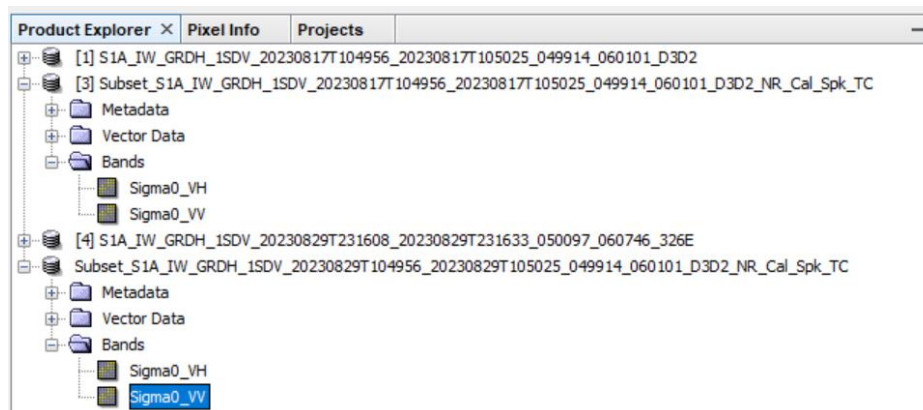


Fuente: Autores.

Una vez configurados todos los parámetros mencionados anteriormente, la imagen SAR estará lista para iniciar el proceso de preprocesamiento. Finalmente, para ejecutar el flujo completo de tareas definidas, se debe hacer clic en el botón 'RUN'. Al finalizar este paso, el software SNAP generará automáticamente las imágenes preprocesadas, que quedarán almacenadas dentro del proyecto, listas para ser utilizadas en el análisis posterior.

Este procedimiento se repite exactamente para ambas imágenes SAR Sentinel (antes y después del evento de inundación). Al finalizar el proceso de preprocesamiento mediante la herramienta 'Batch Processing', deberán aparecer dos nuevas imágenes corregidas en la pestaña 'Product Explorer' del software SNAP, claramente identificadas y listas para ser utilizadas en los análisis posteriores del estudio.

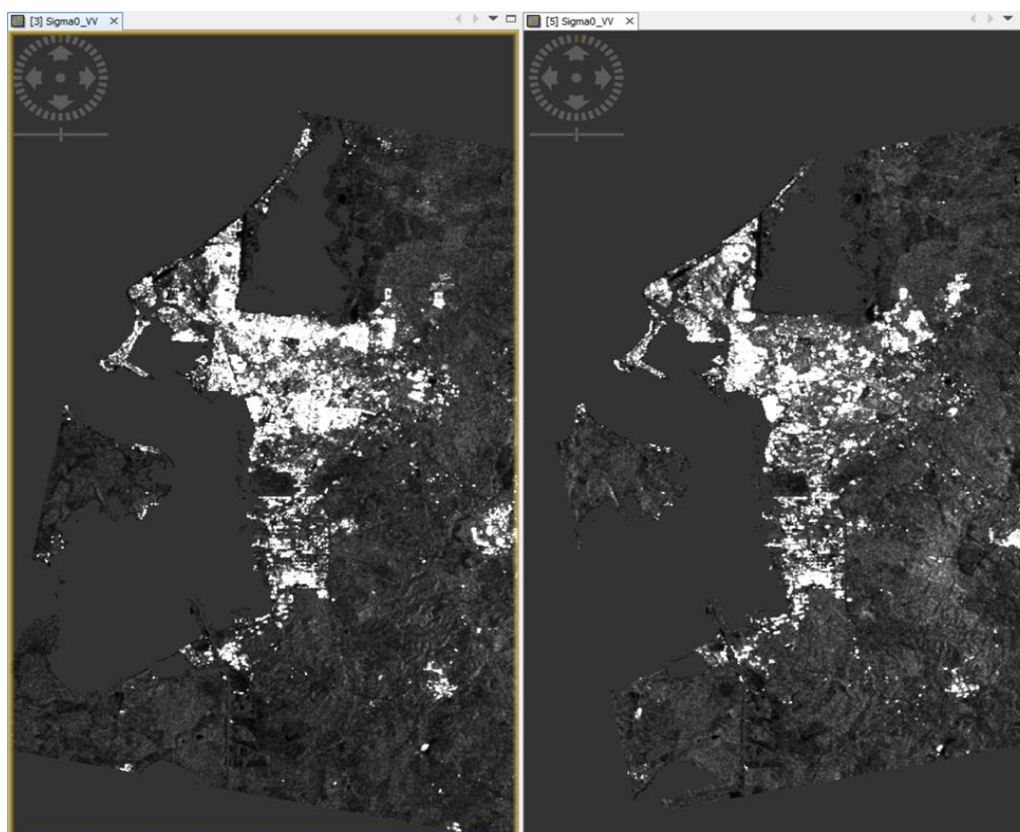
Figura 19 Explorador de productos en SNAP con imágenes SAR preprocesadas



Fuente: Autores.

En este punto del procedimiento, se cuenta ya con las imágenes SAR completamente preprocesadas y corregidas, correspondientes a los periodos anterior y posterior al evento de inundación. Estas imágenes se encuentran listas para iniciar la fase de análisis detallado y detección de las zonas afectadas por el evento.

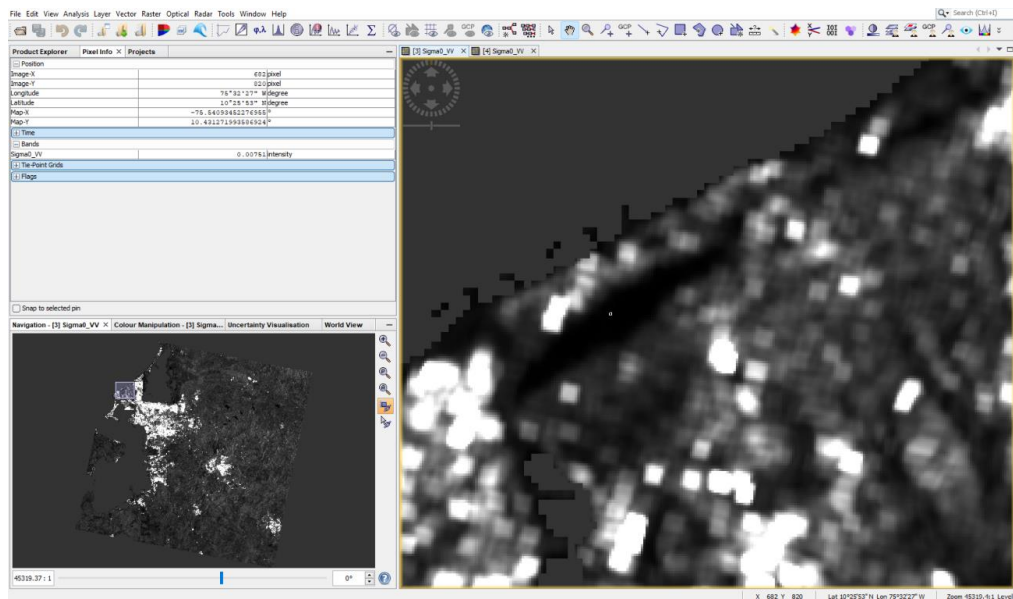
Figura 20 Comparación de imágenes SAR Pre y Post inundación en SNAP



Fuente: Autores.

Una vez preprocesadas las imágenes SAR, se generan los polígonos de entrenamiento para identificar las zonas inundadas. Estos polígonos se crearán a partir de la información obtenida de píxeles específicos y de áreas de referencia con cuerpos de agua permanentes, como se pueden observar en la Figura 22; estos servirán como patrones confiables para diferenciar las áreas realmente inundadas durante el evento analizado.

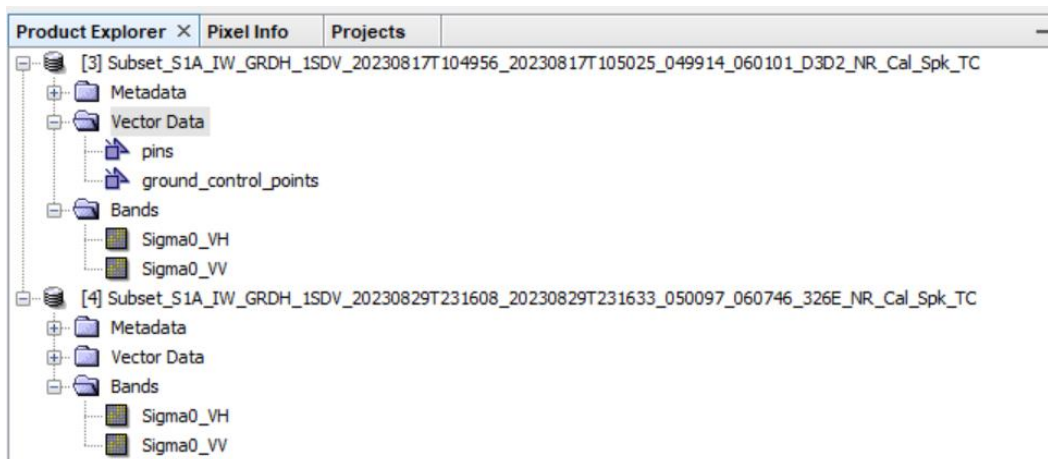
Figura 21 *Análisis de valores de retrodispersión en imágenes SAR con SNAP*



Fuente: Autores.

A partir del análisis preliminar, se identificó que los valores de píxel menores a 0.01 corresponden a zonas con presencia de agua. Posteriormente, se procede a generar polígonos en las áreas que cumplan con este criterio. Para realizar esta tarea, se debe ingresar a la pestaña 'Product Explorer' del software SNAP, seleccionar la imagen preprocesada, y luego dirigirse a la carpeta denominada 'Vector Data', donde se crearán los polígonos correspondientes a las zonas inundadas claramente identificadas.

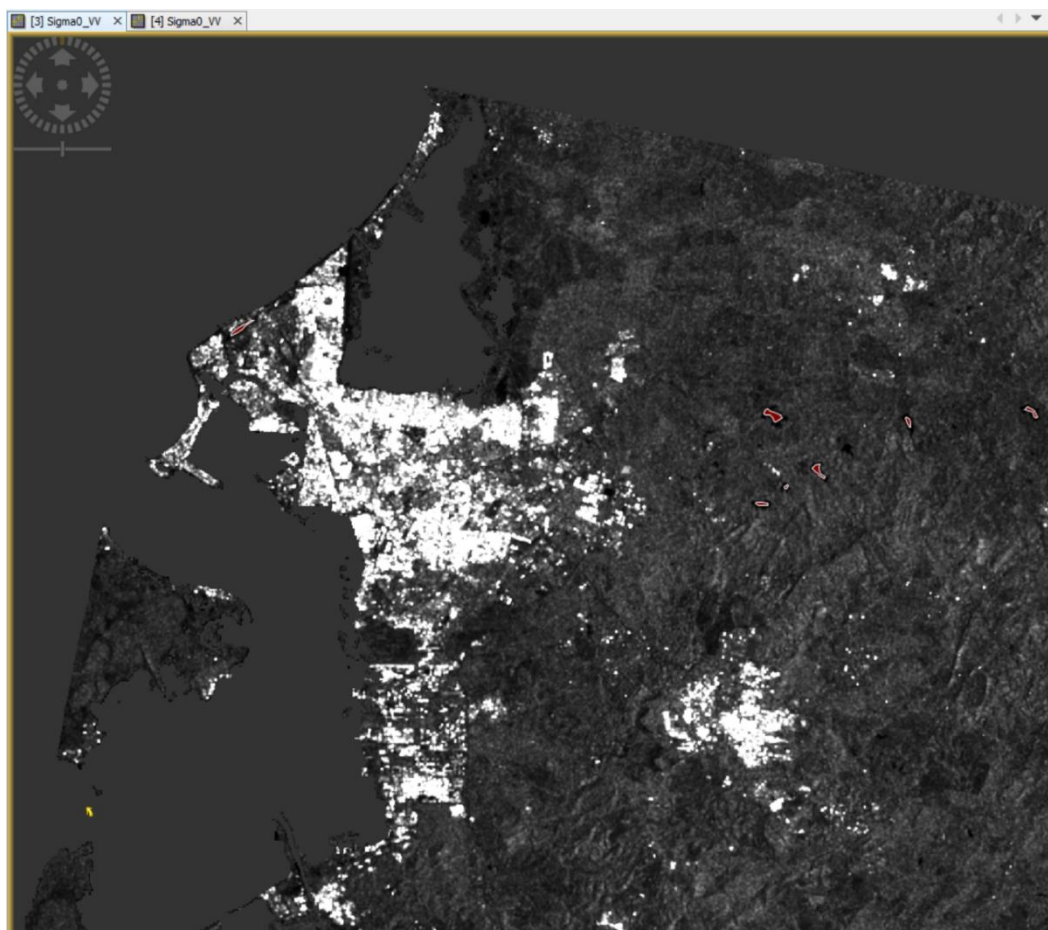
Figura 22 Explorador de productos en SNAP con datos vectoriales y bandas procesadas



Fuente: Autores.

Una vez seleccionada la carpeta 'Vector Data' en la pestaña 'Product Explorer', se debe utilizar la herramienta 'Polygon Drawing Tool', ubicada en la barra de herramientas del software SNAP, para delimitar y dibujar los polígonos correspondientes a aquellas áreas que presenten valores de píxel menores a 0.01, asegurando así una correcta identificación de las zonas inundadas en las imágenes analizadas.

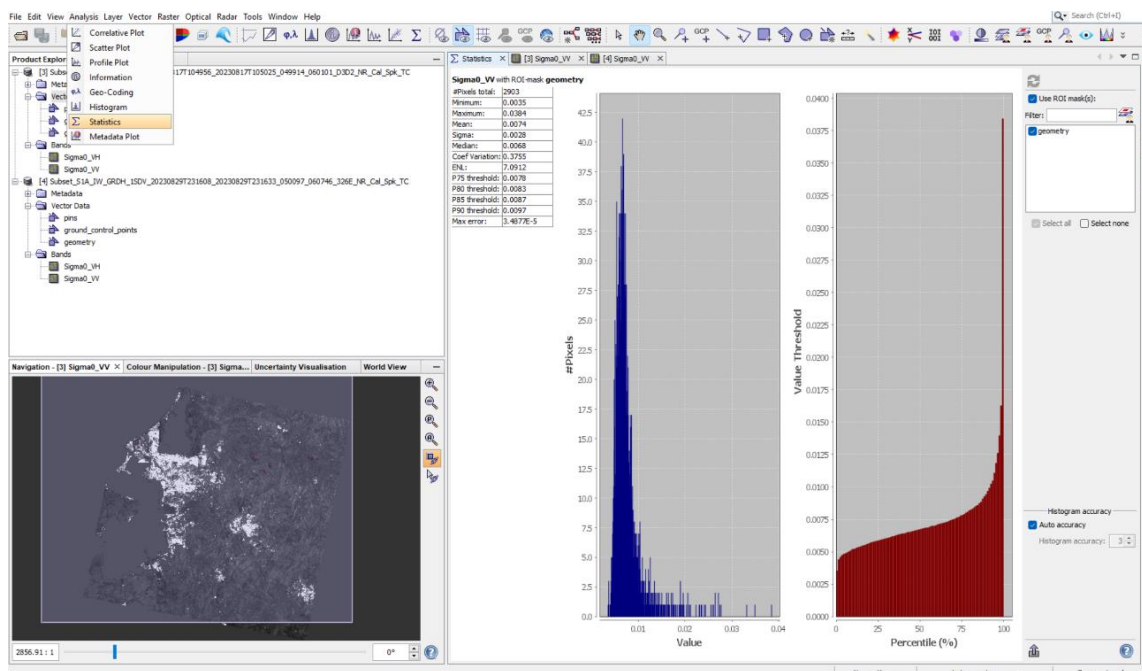
Figura 23 Identificación de áreas inundadas mediante polígonos de entrenamiento en SNAP en imagen anterior del evento de inundación.



Fuente: Autores.

En esta etapa del proceso, es posible visualizar claramente las zonas identificadas con valores de píxel menores a 0.01 en la imagen previa al evento de inundación. A continuación, se procede a calcular las estadísticas correspondientes a los polígonos generados, con el propósito de obtener valores de referencia para análisis posteriores. Para ello, se debe ingresar a la pestaña 'Analysis' del software SNAP y seleccionar la opción 'Statistics', que proporcionará indicadores útiles como la media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación, fundamentales para caracterizar y validar las áreas identificadas como zonas inundables.

Figura 24 Análisis estadístico de retrodispersión en SNAP mediante histogramas de imagen anterior al evento de inundación



Fuente: Autores.

Tabla 1 Análisis estadístico de retrodispersión en SNAP Parámetros y valores obtenidos

Parámetro	Valor
#Pixel total	2903
Minimum	0.0035
Maximum	0.0074
Mean	0.0074
Sigma	0.0028
Median	0.0068
Coef variation	0.3755
ENL	7.0912
P75 threshold	0.0078
P80 threshold	0.0083
P85 threshold	0.0087
P90 threshold	0.0097
Max error	3.488 E-5

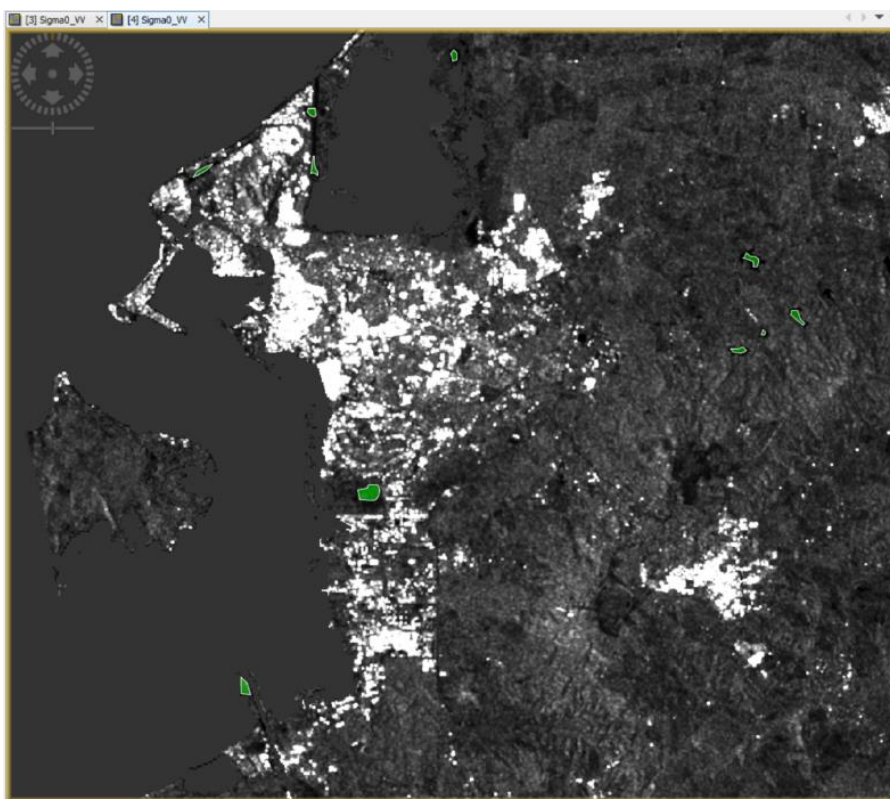
Fuente: Autores.

Dentro de las estadísticas obtenidas, es importante analizar detalladamente ciertos valores específicos. La media representa el valor promedio de retrodispersión, útil para identificar con

precisión áreas inundadas frente a superficies secas. La mediana aporta una medida más confiable del valor central, especialmente útil cuando los datos presentan sesgos o distribuciones asimétricas. Otro parámetro fundamental es la desviación estándar, que mide la dispersión o variabilidad de los valores dentro de cada polígono. Una desviación estándar baja indica homogeneidad en la retrodispersión, facilitando la identificación precisa de cuerpos de agua. Finalmente, el coeficiente de variación y el error máximo permiten evaluar la confiabilidad de las mediciones; valores bajos en estos indicadores sugieren resultados altamente confiables para la diferenciación efectiva entre superficies inundadas y secas.

Posteriormente, se repite el procedimiento anteriormente descrito, pero esta vez para la imagen correspondiente al período posterior al evento de inundación. Se generarán nuevamente los polígonos utilizando el mismo criterio de valores de píxel menores a 0.01, y se obtendrán las estadísticas asociadas, con el fin de identificar claramente las áreas que resultaron inundadas y realizar una comparación efectiva con la situación previa al evento.

Figura 25 *Delimitación de polígonos de entrenamiento para la detección de inundaciones en SNAP en imagen posterior al evento de inundación*

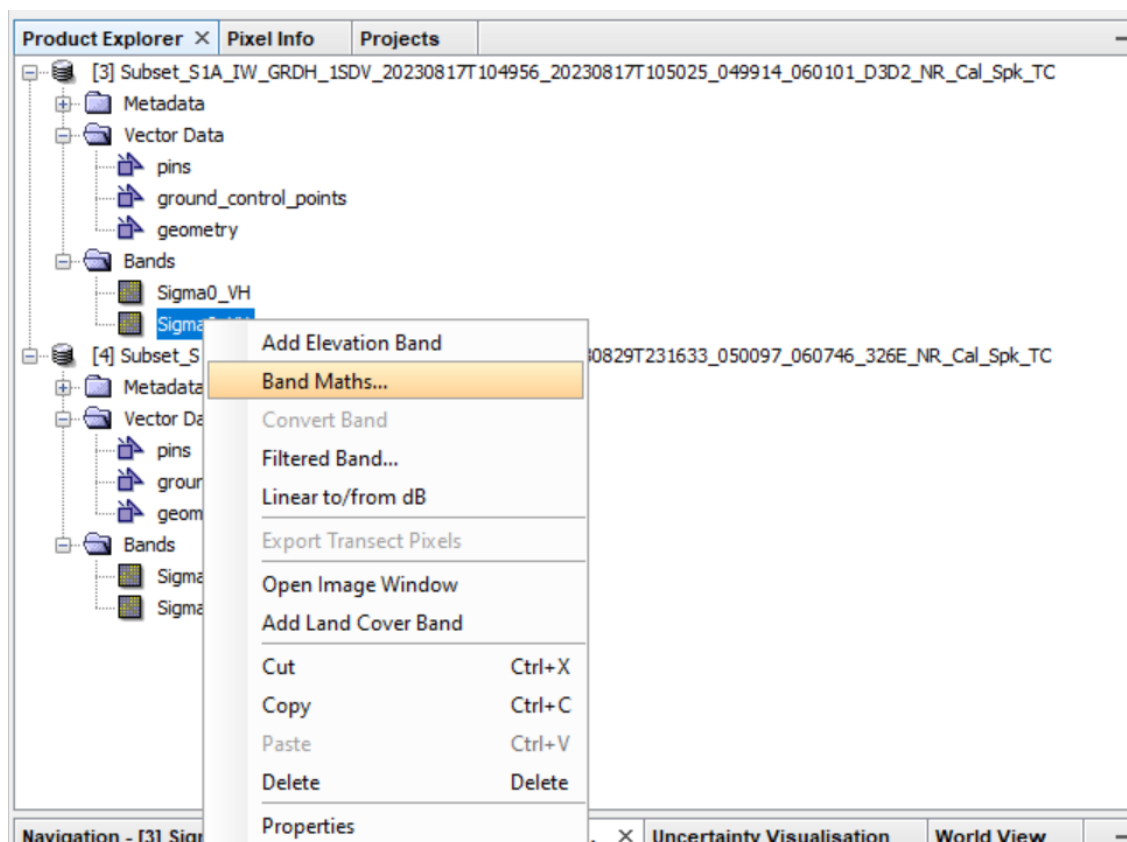


Fuente: Autores.

En este punto del procedimiento es posible visualizar claramente las áreas correspondientes a valores de píxel menores a 0.01 en la imagen posterior al evento de inundación debido a la nueva cantidad de polígonos. Como resultado, se observa un incremento en la cantidad y extensión de los polígonos generados debido a la mayor presencia de superficies cubiertas por agua dentro del área de estudio luego del evento inundable. Seguidamente, se generan las estadísticas correspondientes para estos polígonos, con el objetivo de analizar los valores obtenidos y confirmar la confiabilidad de los resultados del análisis.

Posteriormente, **para desarrollar el objetivo específico 2 " Establecer y definir las áreas afectadas por las inundaciones costeras utilizando los datos SAR."**, se procede a generar las máscaras de agua. Para ello, se debe ingresar a la carpeta 'Bands' en la pestaña 'Product Explorer' y seleccionar la banda 'Sigma0_VV'. Haciendo clic derecho sobre esta banda, se escoge la opción 'Band Maths'. Esta herramienta permitirá definir claramente las áreas inundadas mediante una expresión matemática basada en los valores previamente identificados de retrodispersión.

Figura 26 Aplicación de Band Maths en SNAP para generación de máscaras de agua



Fuente: Autores.

En “Band Maths” se cambia el nombre, después se selecciona “edit expresión” en el campo expresión se coloca

$$\text{Edit expression} = \text{If } \mathbf{\Sigma_{VV}} < \mathbf{VR} \text{ then } 1 \text{ else NaN}$$

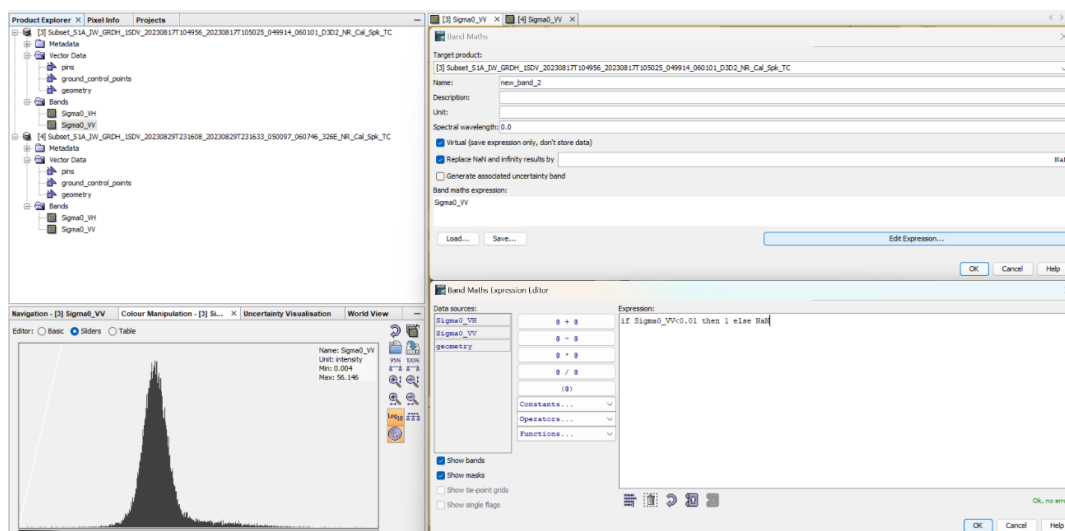
Donde:

Σ_{VV} : Banda de la imagen SAR que será utilizada para el análisis.

VR: Valor de retrodispersión, este valor depende de lo realizado en las estadísticas dependiendo si es evento de inundación.

Para generar la máscara de agua correspondiente al periodo previo al evento de inundación, se utiliza como umbral el valor de retrodispersión (VR) de 0.01, obtenido previamente del análisis estadístico. Este valor permite identificar con precisión las zonas con presencia constante de agua en el área de estudio, asegurando así una representación adecuada de las condiciones iniciales antes del evento inundable.

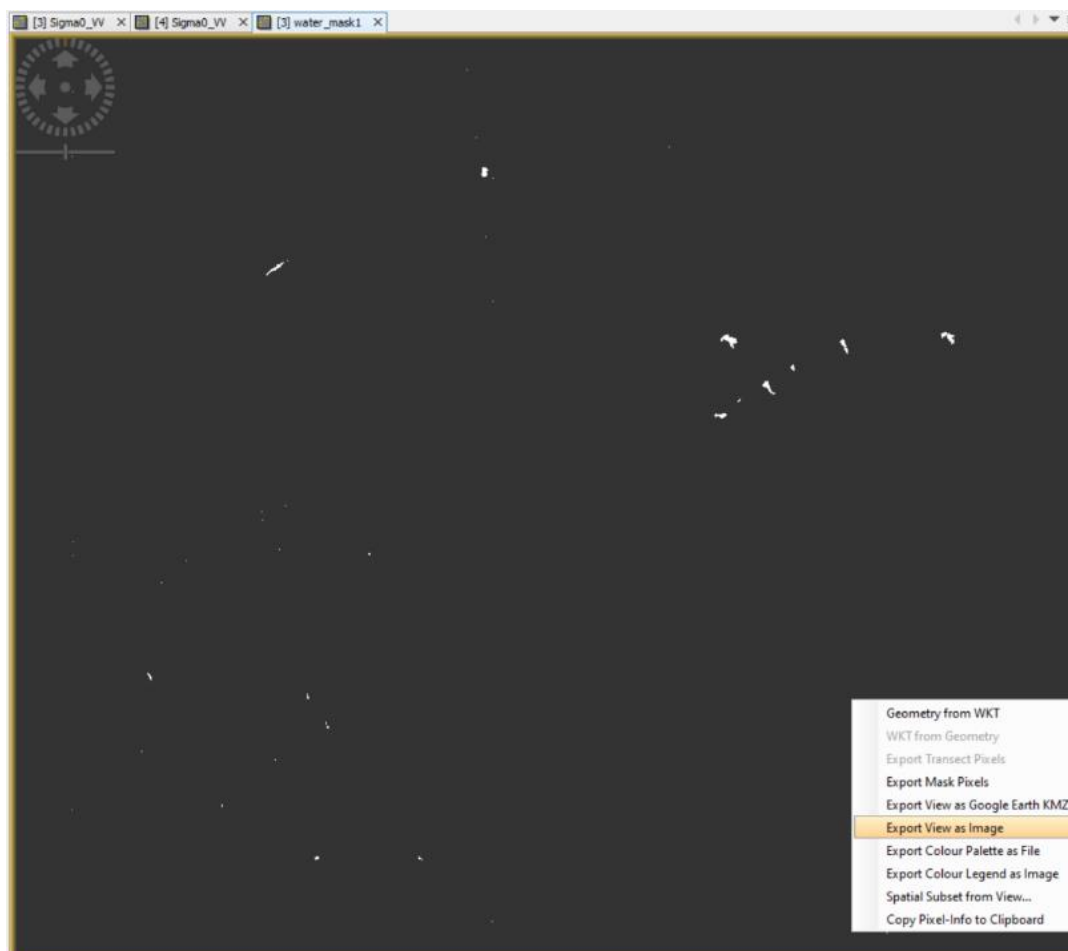
Figura 27 Creación de máscara de agua en SNAP usando Band Maths



Fuente: Autores.

El resultado obtenido tras aplicar la expresión matemática muestra claramente las zonas con presencia de agua resaltadas en color blanco, confirmando así que el valor umbral seleccionado (0.01) es adecuado y se ajusta a las condiciones reales observadas en la zona de estudio. Posteriormente, esta imagen debe exportarse en formato '.TIFF' para ser importada y analizada en el software ArcGIS Pro."

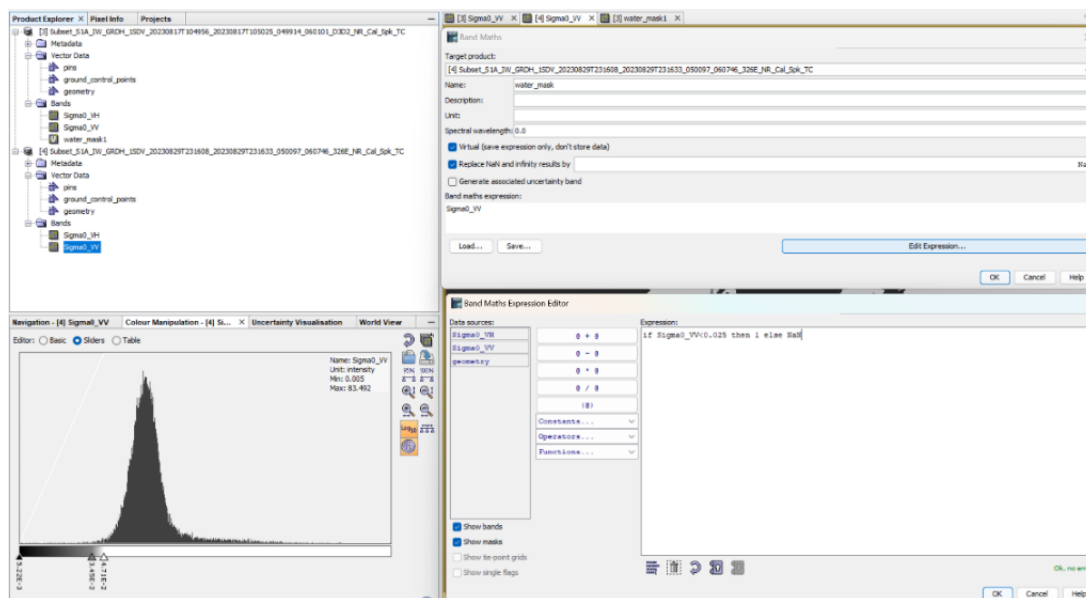
Figura 28 Exportación de máscara de agua generada en SNAP



Fuente: Autores.

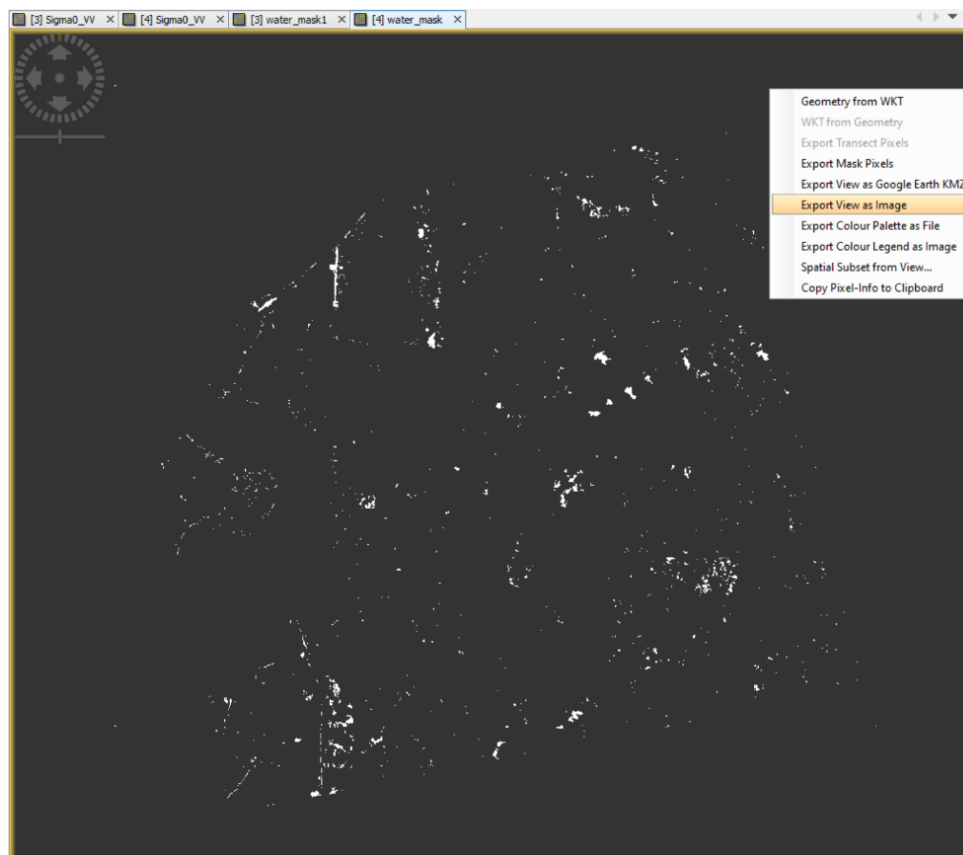
Este procedimiento se repite exactamente para la imagen posterior al evento de inundación, modificando únicamente el valor del umbral de retrodispersión a 0.025. Este valor corresponde al promedio obtenido entre las estadísticas generadas anteriormente y ha sido ajustado tras la revisión y análisis de resultados previos, con el objetivo de optimizar la identificación precisa de las zonas afectadas por la inundación.

Figura 29 Generación de máscara de inundación en SNAP usando Band Maths



Fuente: Autores.

Figura 30 Exportación de máscara de inundación generada en SNAP



Fuente: Autores

A continuación, se procede a importar en ArcGIS Pro las dos imágenes previamente procesadas y exportadas desde SNAP (pre y post evento de inundación) en formato .TIFF. Esto permitirá utilizar la herramienta 'Raster Calculator', con la cual se efectuará un análisis espacial basado en la diferencia entre ambas imágenes para identificar claramente las áreas afectadas por la inundación.

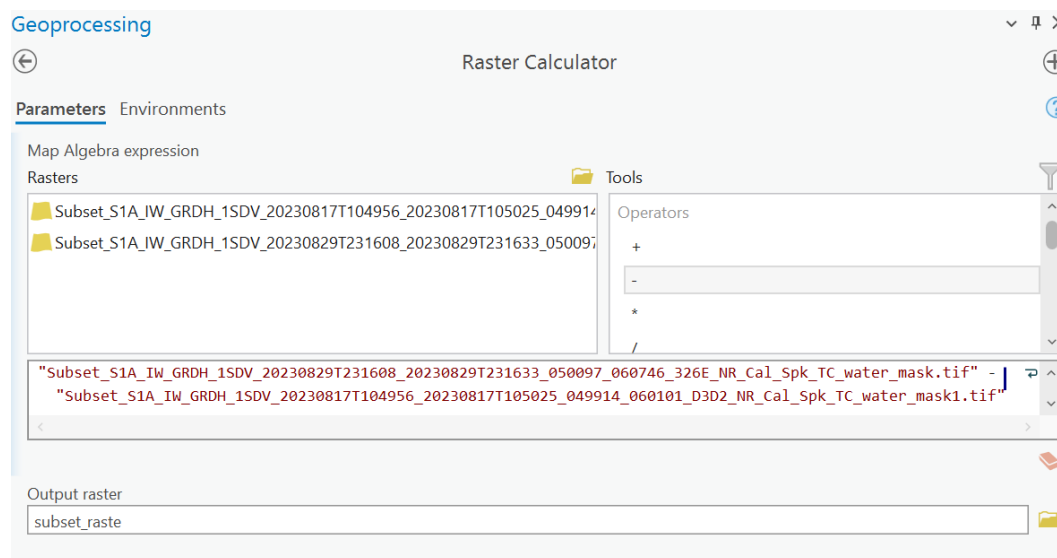
Figura 31 Visualización de máscaras de agua en ArcGIS Pro



Fuente: Autores

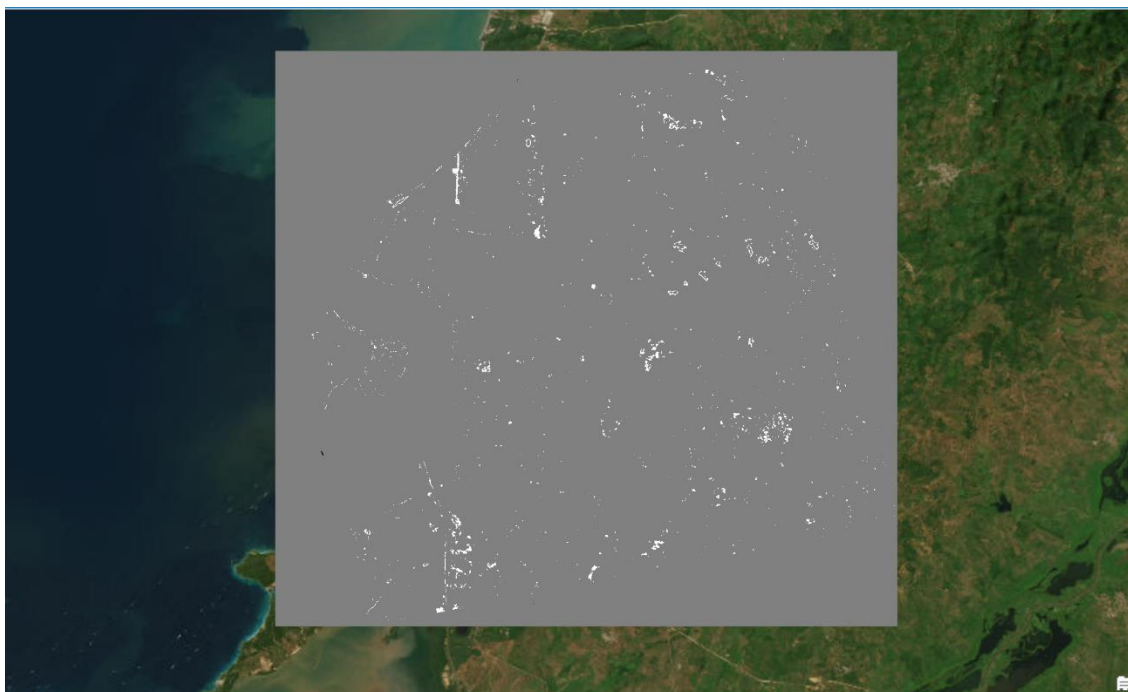
Mediante la herramienta 'Raster Calculator' en ArcGIS Pro se realiza una operación matemática que consiste en restar la imagen obtenida después del evento de inundación menos la imagen correspondiente al periodo previo al evento. Este procedimiento permite destacar claramente las áreas inundadas al mostrar la diferencia espacial entre ambas imágenes.

Figura 32 *Análisis de diferencias de inundación con Raster Calculator en ArcGIS Pro*



Fuente: Autores.

Figura 33 *Resultado del análisis de inundación con Raster Calculator en ArcGIS Pro*

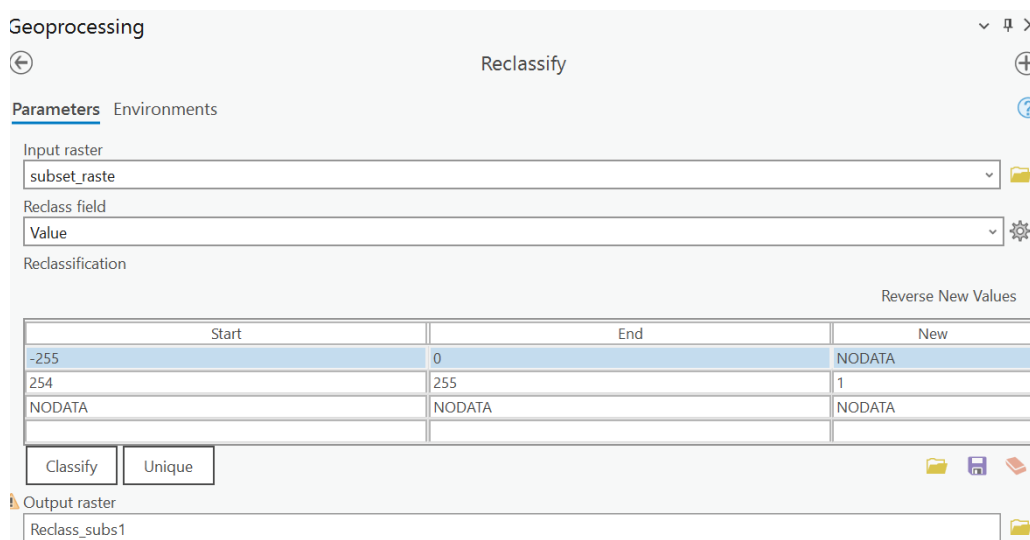


Fuente: Autores.

Como resultado del cálculo anterior, las áreas visualizadas en color gris representan valores iguales a 0, mientras que las áreas blancas tienen asignado por defecto un valor de 255, resultado predeterminado del procesamiento en el software SNAP. Para corregir esta escala y facilitar la

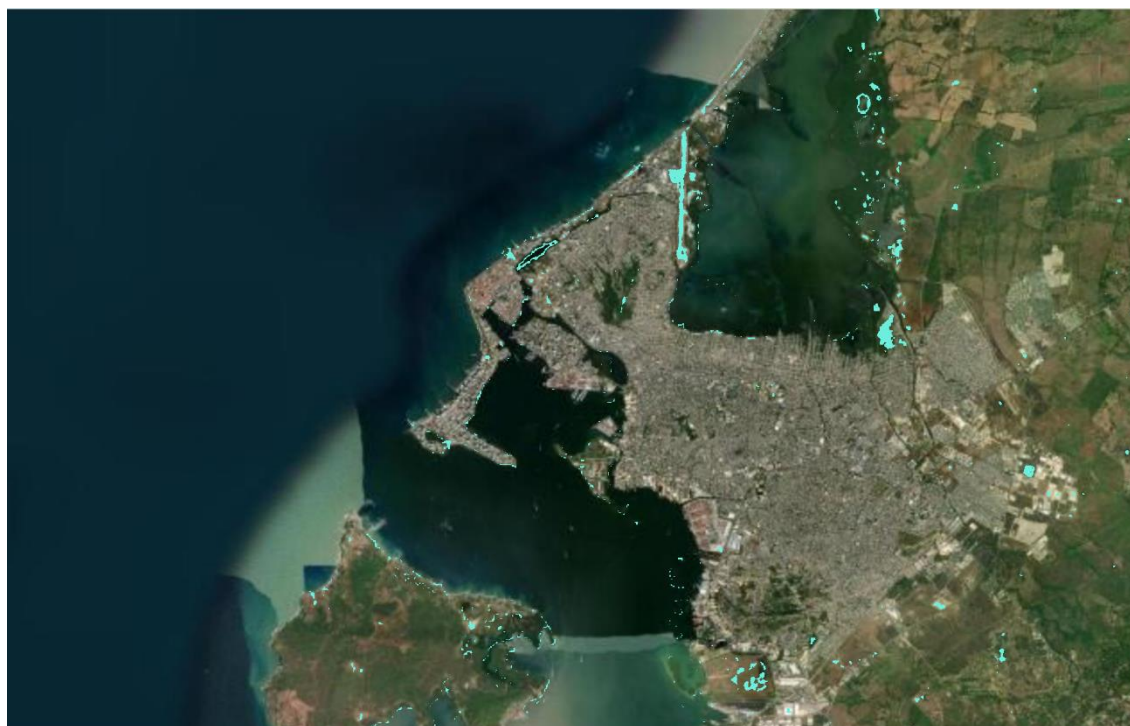
interpretación de los resultados, es necesario realizar una reclasificación utilizando la herramienta 'Reclassify' disponible en ArcGIS Pro, ajustando así los valores a una representación clara y precisa de las zonas inundadas.

Figura 34 *Reclasificación de datos de inundación en ArcGIS Pro*



Fuente: Autores

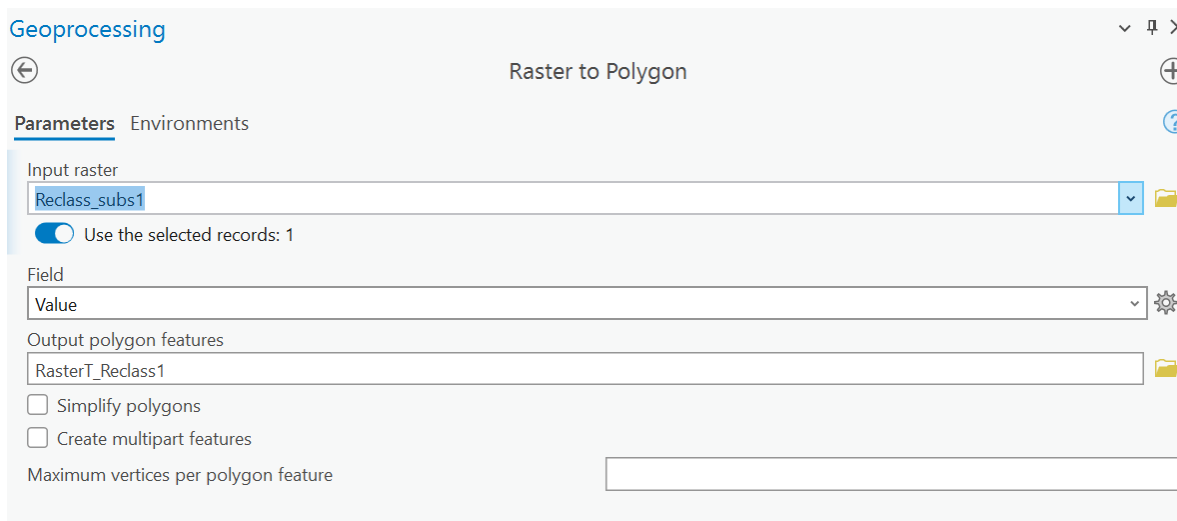
Figura 35 *Mapa de zonas inundadas en Cartagena generado en ArcGIS Pro*



Fuente: Autores

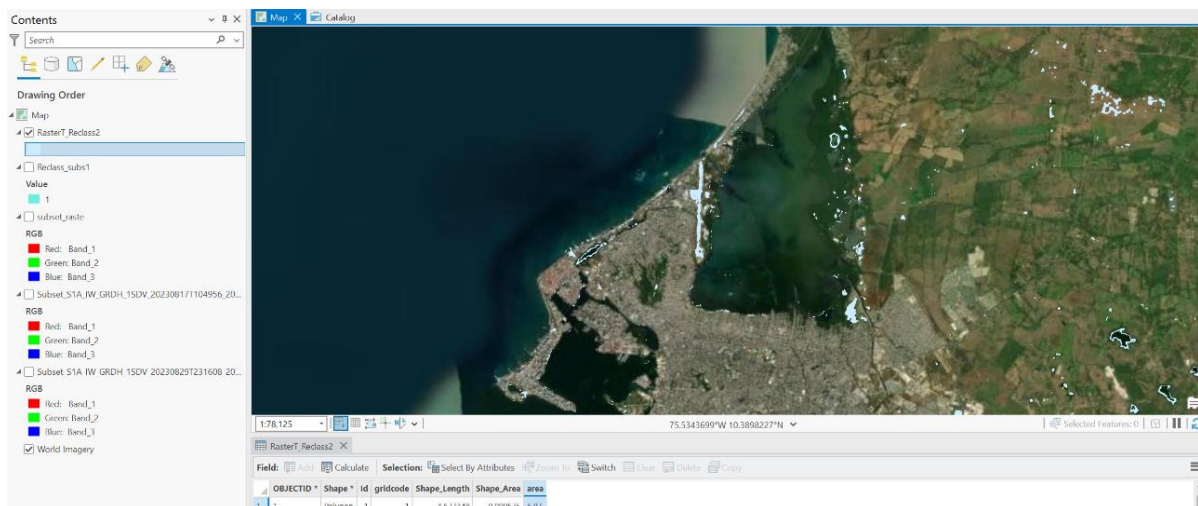
Posteriormente, se realiza la conversión del archivo reclasificado desde formato ráster a formato vectorial utilizando la herramienta 'Raster to Polygon' de ArcGIS Pro. Este procedimiento permite obtener polígonos definidos espacialmente que facilitan la cuantificación exacta y precisa del área afectada por las inundaciones.

Figura 36 Conversión de datos de inundación de Ráster a Polígono en ArcGIS Pro



Fuente: Autores.

Figura 37 Visualización y cuantificación de áreas inundadas en ArcGIS Pro



Fuente: Autores.

Finalmente, se generaron los polígonos correspondientes a las zonas afectadas por un evento específico de inundación. Este procedimiento metodológico fue replicado sistemáticamente para cada uno de los años analizados. Posteriormente, los polígonos resultantes fueron recortados

específicamente a la extensión urbana de Cartagena y proyectados al sistema de coordenadas 'Origen Nacional', asegurando así precisión espacial en los cálculos del área afectada.

Una vez determinados los polígonos de inundación mediante el procedimiento previamente descrito y contando con una capa vectorial del Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) proporcionada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) para la ciudad de Cartagena, se utiliza la herramienta "Intersect" para identificar las zonas de IPM que coinciden con las áreas afectadas por los eventos de inundación. A partir de esta información, se realiza un análisis estadístico que permite determinar qué tipos de población son más afectados por las inundaciones y en qué proporción. De esta forma se da respuesta al **objetivo específico 3 "Analizar la relación existente entre el área inundada y el índice de pobreza multidimensional (IPM)."**la metodología se establecen los enfoques de investigación, esto es, cuantitativo, cualitativo o mixto.

7. Resultados

En esta sección se presentan los hallazgos obtenidos a partir del desarrollo metodológico propuesto, en coherencia con los objetivos específicos del estudio. Los resultados comprenden el análisis espacial de las áreas inundadas durante tres eventos significativos (2017, 2020 y 2024), la caracterización de la vulnerabilidad socioeconómica de los barrios de Cartagena según el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) y la relación entre ambos fenómenos. De otra parte, se comparan estos hallazgos con información proveniente de reportes oficiales y noticias recientes sobre eventos de inundación en la ciudad, con el fin de contrastar los patrones identificados a nivel de barrios y localidades. Los productos cartográficos y gráficos generados permiten una mejor comprensión de la distribución espacial del riesgo por inundaciones y de las condiciones sociales de las zonas más afectadas.

Los hallazgos de la revisión de literatura indicaron que las imágenes SAR son eficaces para la detección de cambios en cuerpos de agua debido a su capacidad de adquirir datos en condiciones meteorológicas de alta nubosidad y durante la noche. Esta característica las hace particularmente útiles para monitorear eventos de inundación en Cartagena, donde las condiciones climáticas dificultan la adquisición de datos por sensores ópticos.

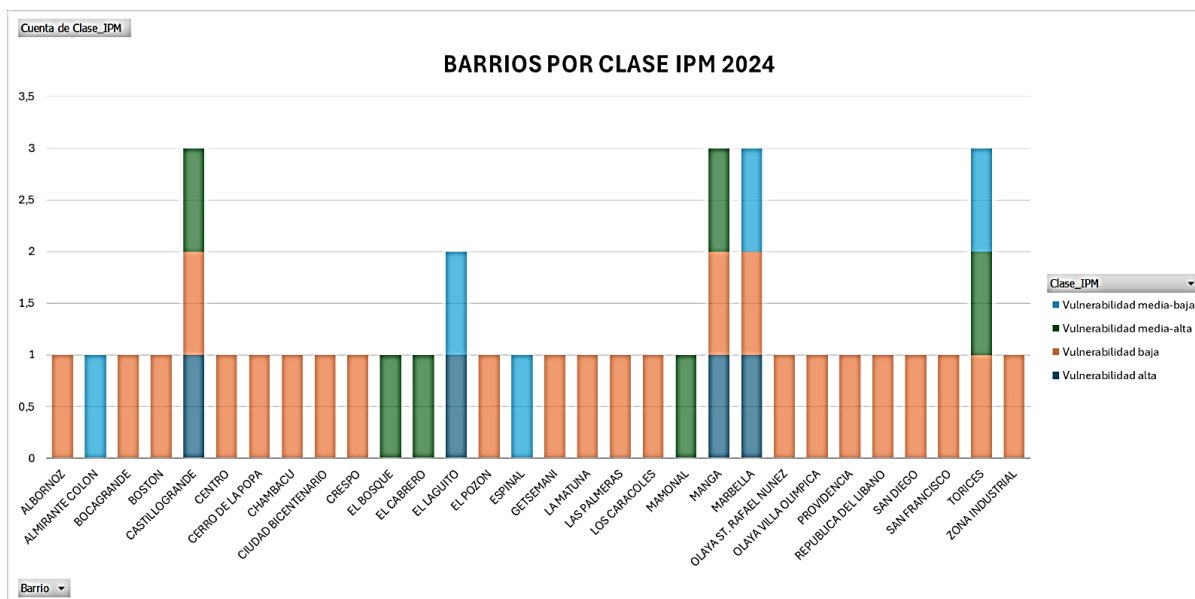
En relación con los cambios en cuerpos de agua antes y después de los eventos de inundación costera detectados mediante imágenes SAR, a continuación, se presentan los resultados obtenidos en cumplimiento del objetivo específico 1, el cual consistió en identificar dichos cambios a partir del análisis multitemporal.

Los resultados indicaron un incremento en la extensión de los cuerpos de agua durante los eventos de inundación. La comparación entre imágenes SAR adquiridas antes y después de las inundaciones permitió una delimitación precisa de las áreas afectadas, así como una cuantificación de la magnitud de los cambios. Estos hallazgos respaldan la pertinencia del uso de imágenes SAR para el monitoreo de fenómenos hidrometeorológicos en zonas urbanas costeras como Cartagena.

Como parte del proceso de vectorización, fue posible estimar el área total afectada por inundaciones en cada uno de los eventos estudiados. En el año 2017, Cartagena registró una superficie inundada de 1.90 km², mientras que en el año 2020 el área disminuyó a 1.15 km² y en el año 2024, se identificó un repunte hasta los 1.88 km², como se puede observar en la Tabla 2.

sobresalen: Crespo (41,0%), San Diego (29,7%), Chambacú (27,5%), Centro (16,1%), Olaya Villa Olímpica (15,5%), Espinal (13,4%), El Cabrero (12,3%), El Laguito (11,9%), Cerro de la Popa (11,9%) y Castillogrande (11,6%). Estas cifras representan la suma total de área inundada como porcentaje del área de cada barrio durante los tres eventos de referencia.

Figura 39 Clasificación de barrios de Cartagena según el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) - 2024.



Fuente: Autores.

Al comparar estos resultados con la clasificación por niveles de vulnerabilidad del IPM, se observa, que la mayoría de los barrios de mayor afectación por inundación pertenecen a la categoría de vulnerabilidad baja; casos como Crespo, San Diego, Chambacú, Centro y Olaya Villa Olímpica, lo anterior, hace referencia a que las zonas más expuestas físicamente a la amenaza de inundación no siempre coinciden con las áreas de mayor vulnerabilidad socioeconómica. No obstante, también se identifican barrios que combinan mayores niveles de afectación con vulnerabilidad media-alta o alta, como El Cabrero, El Laguito y Castillogrande, lo cual indica un mayor nivel de riesgo.

Estos resultados también fueron comparados con información cualitativa procedente de informes de prensa y boletines institucionales de la Oficina Asesora para la Gestión del Riesgo de Desastres de Cartagena (OAGRD). Se identificó coincidencia con las localidades señaladas como más afectadas por eventos recientes:

En la Localidad 1, se relaciona la afectación significativa del Centro Histórico, así como de San Diego y Chambacú, sectores con alta exposición física y valor patrimonial.

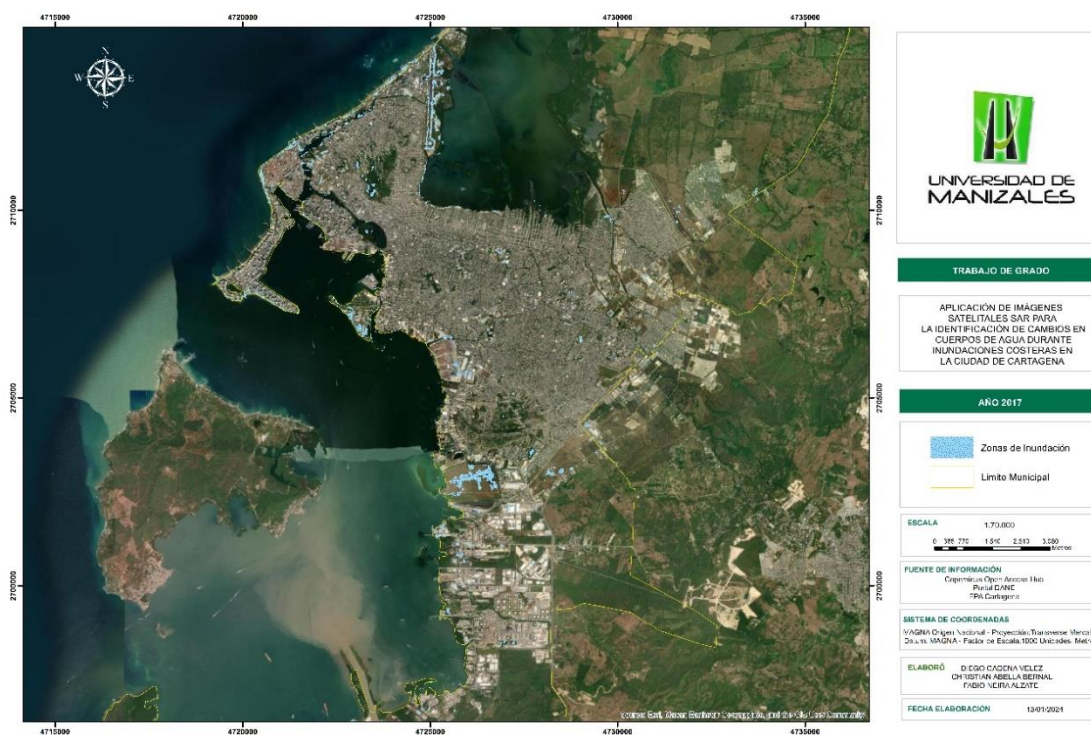
En la Localidad 2, barrios como Olaya, Fredonia, Boston y Nuevo Paraíso presentan presencia reiterada de eventos de inundación; entre ellos, Olaya Villa Olímpica muestra un valor destacado en el análisis cuantitativo.

En la Localidad 3, aunque el principal riesgo es por deslizamientos, se identificaron altos porcentajes de inundación en sectores como Espinal y Cerro de la Popa.

Las áreas afectadas fueron establecidas a partir del análisis de datos SAR, como se puede apreciar en las, **Figura 40**, **Figura 41**, **Figura 42**, correspondientes a los años 2017, 2020 y 2024. Para la detección de cuerpos de agua, se utilizó la banda VV, seleccionada por su capacidad para distinguir superficies acuáticas en contextos urbanos y costeros complejos como Cartagena, incluso en presencia de vegetación o estructuras construidas. Esta elección se respalda en estudios previos realizados por Clement y Garg.

Las siguientes figuras presentan los mapas de inundación generados para cada año de estudio. Estas delimitaciones se encuentran georreferenciadas con el sistema de referencia MAGNA Origen Nacional y corresponden a los resultados obtenidos mediante el desarrollo metodológico previamente descrito.

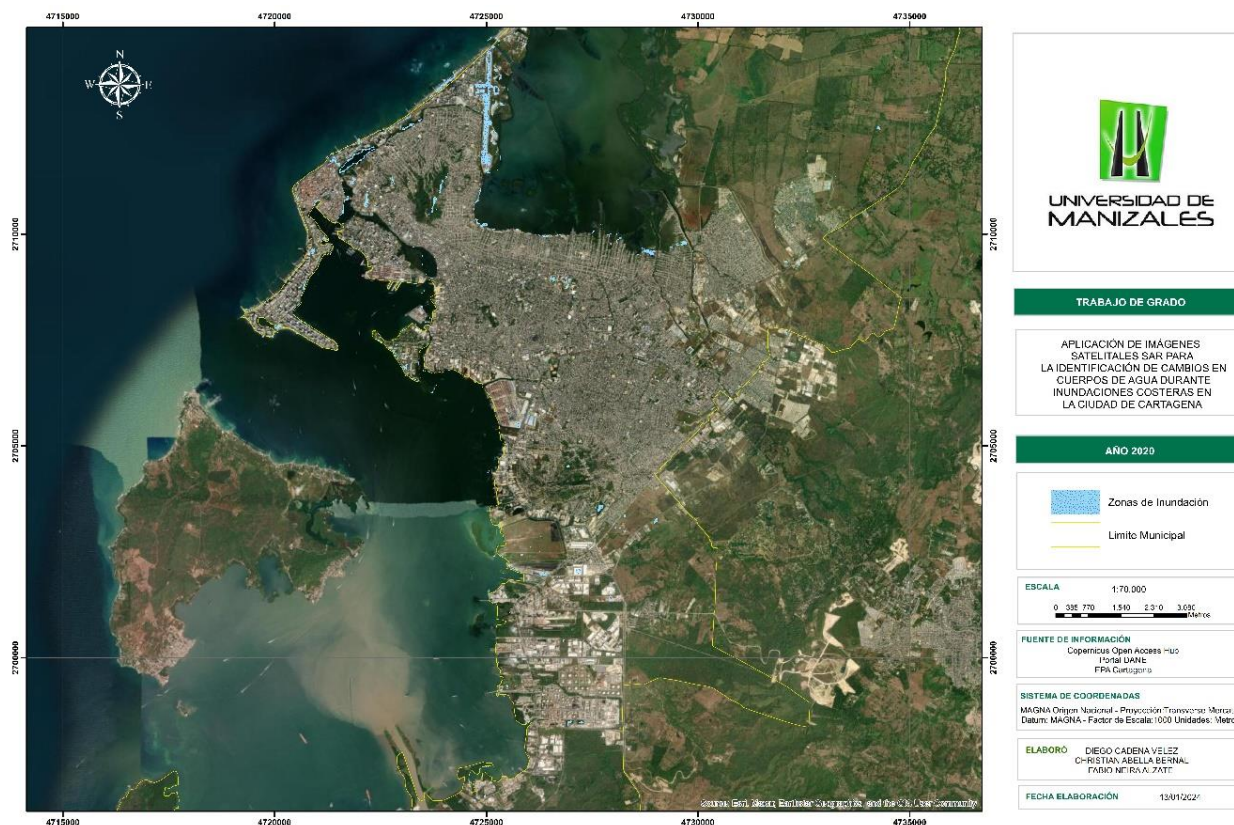
Figura 40 Mapa de inundaciones año 2017 de la ciudad de Cartagena.



Fuente: Autores.

La **Figura 40** representa la delimitación de áreas inundadas correspondientes al evento del 18 de agosto de 2017, obtenidas mediante el análisis de imágenes SAR. Este resultado refleja la extensión espacial de las zonas afectadas, identificadas a partir de la comparación multitemporal entre imágenes previas y posteriores al evento.

Figura 41 Mapa de inundaciones año 2020 de la ciudad de Cartagena



Fuente: Autores.

La **Figura 41** representa la delimitación de áreas inundadas correspondientes al evento del 15 de noviembre de 2020, obtenidas mediante el análisis de imágenes SAR. Este resultado refleja la extensión espacial de las zonas afectadas, identificadas a partir de la comparación multitemporal entre imágenes previas y posteriores al evento.

Figura 42 Mapa de inundaciones año 2024 de la ciudad de Cartagena



Fuente: Autores.

La **Figura 42** representa la delimitación de áreas inundadas correspondientes al evento del 24 de abril de 2024, obtenidas mediante el análisis de imágenes SAR. Este resultado refleja la extensión espacial de las zonas afectadas, identificadas a partir de la comparación multitemporal entre imágenes previas y posteriores al evento.

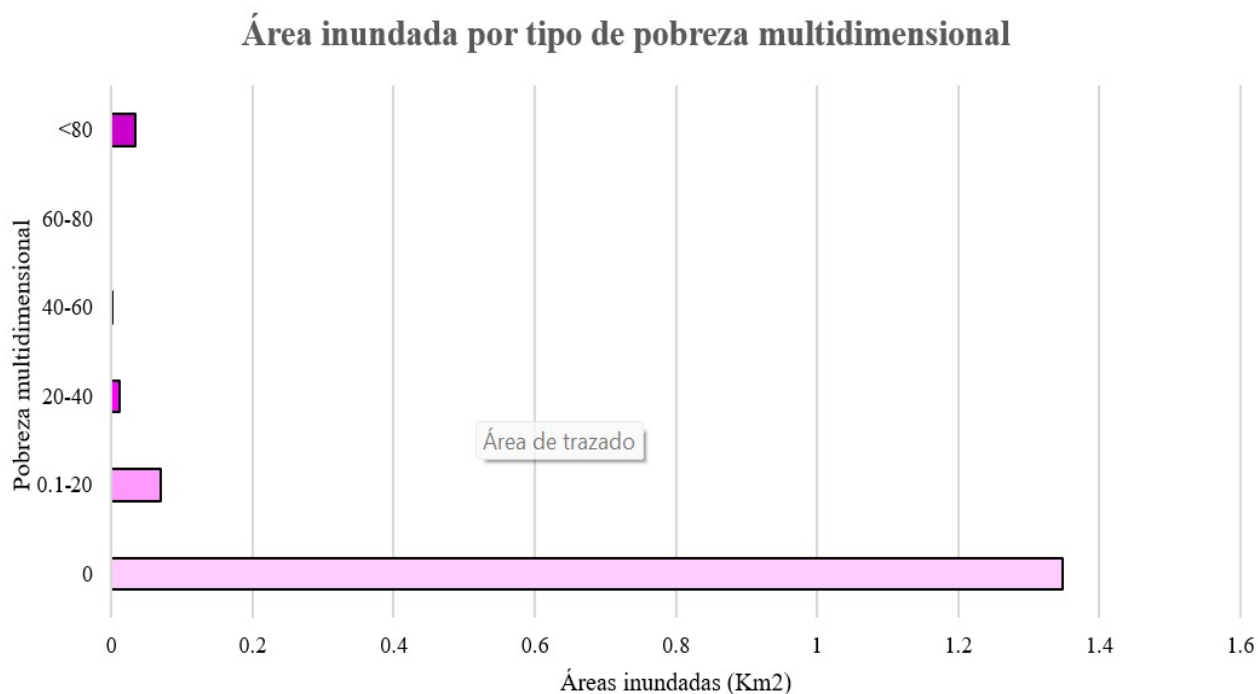
El análisis geoestadístico realizado sobre las áreas afectadas por inundaciones evidenció una relación inversa entre el área inundada y los niveles de vulnerabilidad socioeconómica, medidos mediante el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM). Los resultados muestran que los barrios clasificados con menor vulnerabilidad ($IPM < 20$) concentraron las mayores áreas afectadas, lo cual puede explicarse por su localización en zonas costeras o en áreas más bajas de la ciudad, más expuestas a este tipo de fenómenos. En contraste, las zonas con mayor vulnerabilidad

(IPM \geq 80), generalmente situadas en sectores más alejados del litoral, registraron niveles significativamente menores de afectación.

Este hallazgo sugiere que las áreas con mejores condiciones económicas no necesariamente están menos expuestas a los riesgos de inundación; por el contrario, pueden enfrentar un mayor nivel de amenaza debido a su ubicación geográfica. Esta observación queda representada en la **Figura 43**, que ilustra la relación entre el área total inundada y los diferentes niveles de pobreza multidimensional.

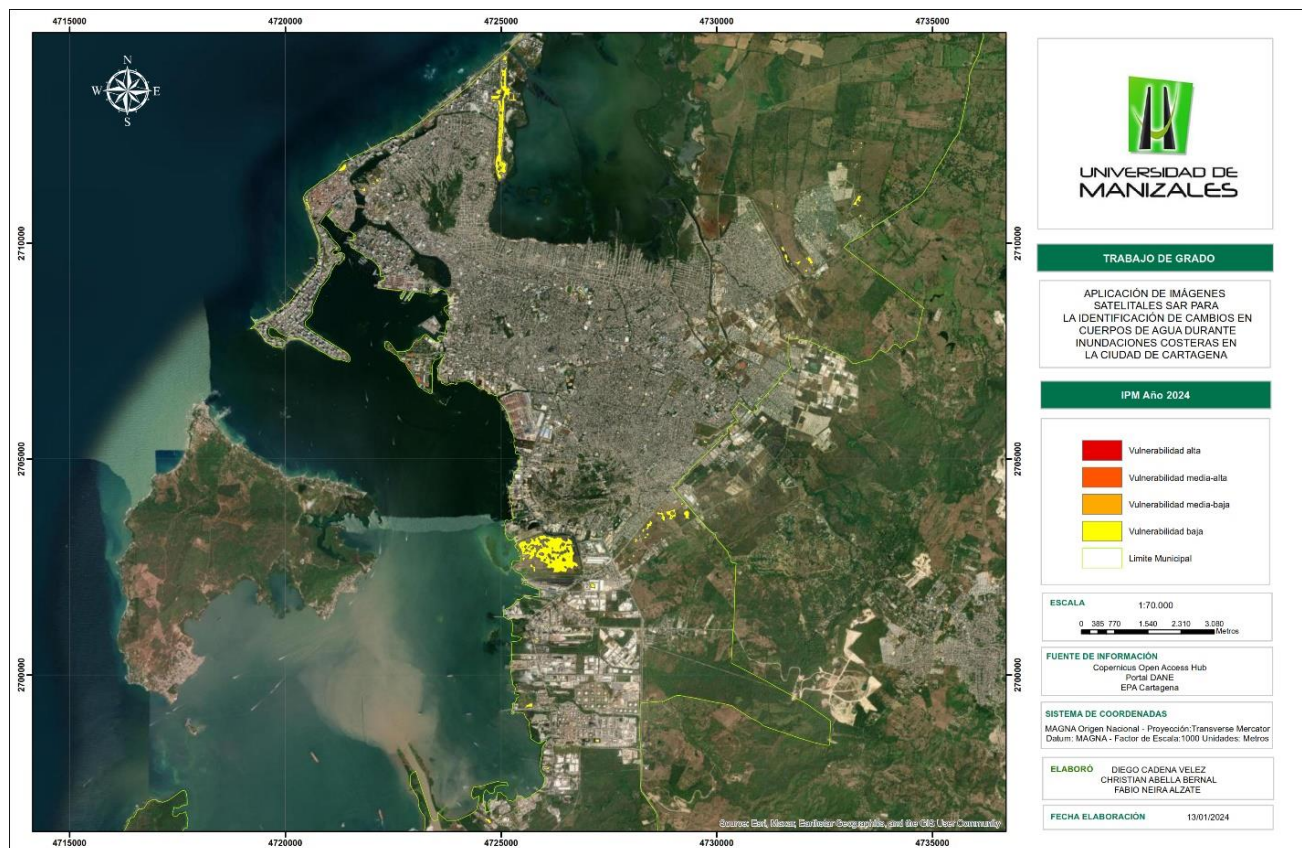
Asimismo, el cumplimiento del objetivo específico 3 se materializó con la generación de productos visuales que integran variables socioeconómicas y físicas. La Figura 44 presenta el mapa de áreas inundadas clasificadas según su nivel de vulnerabilidad, constituyendo un insumo clave para la formulación de estrategias de gestión del riesgo y planificación urbana orientadas a la mitigación del impacto de futuros eventos.

Figura 43 Área inundada por tipo de pobreza multidimensional.



Fuente: Autores.

Figura 44 Mapa de áreas inundadas por índice de vulnerabilidad año 2024



Fuente: Autores.

Finalmente, representa el mapa que integra la delimitación de las áreas inundadas con la localización nominal de los barrios afectados, permitiendo una visualización más precisa de la distribución espacial del impacto por inundaciones. Esta representación facilita la identificación directa de los sectores urbanos más comprometidos y sirve como una herramienta de apoyo para la toma de decisiones en gestión del riesgo, planeación territorial y priorización de intervenciones. La **Figura 45** muestra el mapa resultante con los nombres de los barrios superpuestos sobre las zonas afectadas.

Figura 45 Mapa de Cartagena con áreas de inundación



Fuente: Autores.

8. Discusión

Los resultados obtenidos a partir del análisis de imágenes satelitales SAR permitieron identificar con claridad las áreas afectadas por inundaciones costeras en la ciudad de Cartagena durante los años 2017, 2020 y 2024. Estas zonas inundadas, una vez espacializadas y cuantificadas, fueron contrastadas con los niveles del Índice de Pobreza Multidimensional (IPM) de 2024, permitiendo abordar la pregunta de investigación principal: ¿Cómo pueden las imágenes satelitales SAR ser utilizadas para detectar y monitorear los cambios en la extensión de la presencia de agua superficial durante eventos de inundación en la ciudad de Cartagena?

En efecto, se evidenció que las imágenes SAR constituyen una herramienta robusta para el monitoreo de cuerpos de agua en contextos costeros, ya que permiten la detección precisa de cambios en la superficie terrestre incluso en condiciones de nubosidad o escasa visibilidad, lo cual es especialmente relevante en Cartagena, ciudad caracterizada por una alta cobertura nubosa durante la temporada de lluvias. El uso de esta tecnología facilitó la creación de mapas de inundación de alta resolución espacial, que sirvieron como base para el análisis posterior con información socioeconómica.

En cuanto a la relación entre la afectación por inundaciones y el IPM, los resultados contradicen parcialmente la hipótesis inicial. Se esperaba que las zonas con mayor vulnerabilidad social presentaran también mayor afectación por inundaciones, sin embargo, los datos revelaron que los barrios con menores niveles de pobreza multidimensional ($IPM < 20$) fueron los más afectados por las inundaciones. Esta aparente contradicción se explica por factores geográficos: estos barrios se ubican más cerca de la costa, donde la exposición al ascenso del nivel del mar y a los cuerpos de agua vulnerables es mayor. En cambio, muchas de las zonas con alto IPM se encuentran tierra adentro o en zonas elevadas, lo que reduce su exposición directa a las inundaciones costeras.

Estos hallazgos permiten matizar la relación entre pobreza y vulnerabilidad. Si bien la pobreza sigue siendo un factor determinante en la capacidad de recuperación y adaptación ante desastres, no necesariamente implica una mayor exposición geográfica al riesgo de inundación. Así pues, la vulnerabilidad debe entenderse como un fenómeno multidimensional, donde la ubicación geográfica, la planificación urbana y la infraestructura juegan un papel tan importante como las condiciones socioeconómicas.

Por consiguiente, se reafirma la utilidad de la teledetección por radar como instrumento de análisis espacial para la gestión del riesgo, y se subraya la importancia de integrar variables sociales y físicas en los modelos de evaluación de amenazas. La implementación de esta metodología en otros contextos urbanos costeros podría fortalecer los sistemas de alerta temprana y los planes de ordenamiento territorial orientados a la reducción del riesgo de desastres.

9. Conclusiones

Gracias a las imágenes tomadas por satélites SAR, fue posible identificar las zonas de inundación en la ciudad de Cartagena durante los eventos registrados en los años 2017, 2020 y 2024. A través del uso de los softwares SNAP y ArcGIS Pro, y la integración de imágenes SAR con bases de datos sobre población, infraestructura y recursos proporcionadas por el Establecimiento Público Ambiental de Cartagena (EPA), se logró avanzar en la comprensión de los factores asociados a las condiciones de inundación, permitiendo el cumplimiento de los objetivos planteados en esta investigación.

Se identificaron las áreas afectadas por las inundaciones costeras, lo cual permitió la generación de mapas que destacan las zonas con mayor impacto. Estos mapas no solo facilitaron la identificación de zonas críticas, sino que también pueden constituir una herramienta útil para la planificación de futuras medidas de mitigación.

Utilizando el análisis geoestadístico, se exploró la relación entre las áreas inundadas y el Índice de Pobreza Multidimensional (IPM). Los resultados mostraron que las zonas con menor nivel de vulnerabilidad según el IPM (es decir, con mejores condiciones socioeconómicas) fueron más frecuentemente afectadas. Esto podría estar relacionado con su localización geográfica, principalmente en sectores cercanos a la costa o de baja altitud; que con factores socioeconómicos propiamente dichos. Sin embargo, también se observaron barrios con niveles altos o medios de vulnerabilidad como El Laguito y Castillogrande, que presentaron niveles elevados de inundación.

El análisis de las áreas inundadas a partir de la vectorización de imágenes SAR evidenció que en 2017, aproximadamente el 2.5% del área de Cartagena (1.90 km²) se vio afectada. Para 2020, este valor se redujo al 1.51% (1.15 km²), posiblemente como resultado de variaciones climáticas o acciones de mitigación implementadas. En 2024, sin embargo, el área afectada aumentó nuevamente al 2.47% (1.88 km²), lo cual sugiere que las inundaciones continúan siendo una amenaza recurrente. Otro de los hallazgos indica que muchas de las zonas impactadas corresponden a sectores urbanos densamente poblados o estratégicos en términos de infraestructura, lo que incrementa significativamente el impacto social y económico de estos eventos.

A nivel general, la comparación por ubicación de localidades mostró una coincidencia considerable con lo reportado en medios de comunicación y fuentes locales, lo que es coherente con el análisis espacial realizado.

La metodología implementada en esta investigación (basada en imágenes SAR y herramientas como SNAP y ArcGIS Pro) ha sido y puede ser replicable en otras regiones costeras propensas a inundaciones. La combinación de datos espaciales y socioeconómicos (como el IPM) ofrece una aproximación integral para evaluar la vulnerabilidad ante las condiciones socioeconómicas y demográficas, aportando al campo de la teledetección en el enfoque a la gestión de riesgos.

Los resultados obtenidos cumplieron con los objetivos formulados al inicio del estudio. Se generó información relevante sobre los cambios en cuerpos de agua durante eventos de inundación, las áreas afectadas y su relación con factores socioeconómicos. Estos hallazgos pueden servir como base para futuras estrategias de planificación, gestión del riesgo y desarrollo urbano sostenible en la ciudad de Cartagena, localizada en el Departamento de Bolívar.

10. Recomendaciones

Los resultados muestran que la exposición a la amenaza de inundación en Cartagena está influenciada principalmente por la localización geográfica y las condiciones físicas del entorno, más que exclusivamente por indicadores de pobreza multidimensional. Sin embargo, la coincidencia entre algunos barrios con altos niveles de afectación y vulnerabilidad, como Espinal, El Laguito y Castillogrande, resalta la necesidad de priorizar estos sectores en los planes de adaptación al cambio climático y en estrategias de gestión del riesgo.

Los mapas temáticos generados durante esta investigación constituyen una herramienta útil para la toma de decisiones en el ámbito de la planificación urbana y ambiental. Su utilización por parte de las autoridades locales puede facilitar la identificación de zonas críticas y orientar inversiones en infraestructura resiliente y programas sociales en las áreas más expuestas a inundaciones.

Se recomienda fortalecer las políticas públicas mediante el uso de evidencia espacial, integrando variables físicas y socioeconómicas en los procesos de ordenamiento territorial. Este enfoque permitiría diseñar intervenciones más precisas y focalizadas, contribuyendo a una gestión del riesgo más eficaz y equitativa.

Si bien el uso de imágenes SAR resultó efectivo para el monitoreo de inundaciones, se sugiere que futuras investigaciones exploren la incorporación de datos con mayor resolución espacial, así como el uso complementario de drones u otras tecnologías. Esto permitiría mejorar la precisión de los análisis en escalas locales o de barrio.

También sería útil ampliar la serie temporal de análisis, incluyendo otros eventos de inundación ocurridos en años distintos a los abordados en este estudio. Esta ampliación permitiría identificar patrones de recurrencia, evaluar tendencias a largo plazo y valorar la efectividad de las medidas de mitigación que hayan sido implementadas en el territorio.

La metodología propuesta puede adaptarse y aplicarse a otros contextos urbanos y rurales expuestos a inundaciones, especialmente en regiones costeras con características similares. Esta replicabilidad favorece la construcción de líneas base comparables y fortalece las capacidades locales de monitoreo y respuesta ante eventos extremos.

Con el fin de garantizar un uso sostenido de tecnologías como las imágenes SAR, se recomienda fomentar procesos de capacitación en teledetección para personal técnico de entidades

gubernamentales, centros de investigación y organizaciones vinculadas a la planificación territorial y la gestión del riesgo.

Por último, se sugiere que futuros estudios integren enfoques interdisciplinarios que combinen modelos ambientales, sociales y económicos. Esta articulación podría enriquecer la comprensión de los impactos de las inundaciones y facilitar el diseño de soluciones sostenibles en contextos vulnerables.

Los resultados muestran que la exposición a la amenaza de inundación en Cartagena está influenciada en gran medida por la localización geográfica y condiciones físicas del entorno, más que exclusivamente por indicadores de pobreza. Sin embargo, la coincidencia entre barrios vulnerables por IPM y con altos niveles de afectación, como Espinal y El Laguito, evidencia la urgencia de priorizar estos sectores en los planes de adaptación al cambio climático y en la gestión integral del riesgo.

Los mapas generados y el análisis de las áreas afectadas proporcionan información valiosa para la formulación de políticas públicas orientadas a la mitigación de riesgos y la planificación urbana; en futuros escenarios de investigación podrían explorar el uso de imágenes SAR de mayor resolución o la integración con datos de drones para mejorar la precisión en escalas más detalladas.

Al realizar esta investigación la cual nos permitió detectar áreas de inundación, se encuentran posibilidades de aplicar este estudio a diferentes escenarios, para lo cual recomendamos: áreas que utilicen modelos ambientales y sociales, obteniendo una visión global entre otras variables. Así mismo, se podrán comunicar a entes gubernamentales y académicos que lo requieren. Para estos escenarios se pueden recurrir a procesos de capacitación en el manejo de imágenes SAR.

Con este análisis se sugiere aplicarlo en escenarios de análisis de gestión del riesgo, podría recurrirse a la construcción de barreras naturales y artificiales para reducir la vulnerabilidad de las zonas costeras, siendo un mecanismo de alerta y preventivo.

Para la planificación urbana este análisis puede ser útil para incorporar datos estadísticos espaciales que generen indicadores que fortalezcan y se correlacionen con el Índice de pobreza multidimensional, fomentando la protección a los diferentes escenarios vulnerables.

11 Referencias

- Ajadi, O. A., Meyer, F. J., & Webley, P. W. (2016). Change detection in synthetic aperture radar images using a multiscale-driven approach. *Remote Sensing*, 8(6), 482.
- Alcaldia de Cartagena de Indias (2024) <https://www.cartagena.gov.co/noticias/oagrd-implemento-11-medidas-mitigacion-monitoreo-respuesta-emergencias-lluvias-el-distrito>
- Anusha, N., & Bharathi, B. (2020). Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 23(2), 207–219. <https://doi.org/10.1016/J.EJRS.2019.01.001>
- ArcGIS Documentation (2024). Explorar imágenes satelitales SAR. <https://learn.arcgis.com/es/projects/explore-sar-satellite-imagery/>
- ARSET (2024). <https://appliedsciences.nasa.gov/get-involved/training/spanish/arset-procesamiento-de-imagenes-satelitales-para-el-monitoreo-de-la>
- Bajo Piura, C., Pira TESIS, R., & Alejandro RODRIGUEZ LA CRUZ Maribel MORENO ARQUE ASESOR Francisco Alejandro, J. DE. (2023). Detección y mapeo de inundaciones mediante imágenes SAR, usando el método K-Means Clustering para la evaluación de impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño. Caso.
- Chen, F., Zhang, M., Zhao, H., Guan, W., & Yang, A. (2024). Pakistan’s 2022 floods: Spatial distribution, causes and future trends from Sentinel-1 SAR observations. *Remote Sensing of Environment*, 304, 114055. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2024.114055>
- CISSE, C. O. T., BREMPONG, E. K., ALMAR, R., ANGNUURENG, B. D., & SY, B. A. (2024). The Potential Impact of Rising Sea Levels and Subsidence on Coastal Flooding Along the Northern Coast of Saint-Louis, Senegal. <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202403.1468.V1>
- Clement, M. A., Kilsby, C. G., & Moore, P. (2018). Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management*, 11(2), 152–168.
- Copernicus Europe’s eyes on earth. (2019, March 15). EMSR348: Tropical Cyclone IDAI in Mozambique. 1.
- Dhanabalan, S. P., Abdul Rahaman, S., & Jegankumar, R. (2021). FLOOD MONITORING USING SENTINEL-1 SAR DATA: A CASE STUDY BASED ON AN EVENT OF 2018 AND 2019 SOUTHERN PART OF KERALA. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-M-3–2021, 37–41. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-3-2021-37-2021>
- Dhawale, R., Schuster-Wallace, C. J., & Pietroniro, A. (2024). Assessing the multidimensional nature of flood and drought vulnerability index: A systematic review of literature.

International Journal of Disaster Risk Reduction, 112, 104764.
<https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2024.104764>

DANE (2018), Pobreza Monetaria y Multidimensional en Colombia 2018. Fecha de Consulta 16 de enero del 2025. Fuente de consulta <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/pobreza-y-desigualdad/pobreza-monetaria-y-multidimensional-en-colombia-2018>

DANE (2023), Pobreza multidimensional. Fecha de consulta 16 de enero del 2025. Fuente de Consulta <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/pobreza-y-condiciones-de-vida/pobreza-multidimensiona>

Edwing, D., Meng, L., Lv, S., & Yan, X. (2025). Characterizing storm-induced coastal flooding using SAR imagery and deep learning. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18, 5619–5632.
<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3530255>

El Espectador. (2023a, June 18). Inundaciones en la región Caribe: un desafío constante. 1.

El Espectador. (2023b, November 2). Inundaciones en Cartagena dejaron más de 10.000 familias afectadas. 1.

El Tiempo. (2023, May 16). Crece la emergencia en La Mojana sucreña por las inundaciones. 1.

El Tiempo. (2024, June 7). ¿Dónde ocurren con mayor frecuencia las inundaciones? 1.

El Tiempo (2023), Videos de emergencias por lluvias: más de 10.200 familias damnificadas en Cartagena. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/emergencias-por-lluvias-mas-de-10-200-familias-damnificadas-en-cartagena-822313>

Establecimiento Público Ambiental de Cartagena (EPA Cartagena) & Universidad de Cartagena. (2015). Diseño del sistema inteligente de monitoreo de la calidad ambiental del Distrito de Cartagena: Informe técnico (Convenio Interadministrativo 0133–2015). Cartagena de Indias, Colombia.

Establecimiento Público Ambiental de Cartagena – EPA. (2015). Lineamientos para el control de inundaciones del sistema. Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias – EPA Cartagena. Cartagena, Colombia.

Faster Capital. (2024, June 10). Deteccion de cambios SAR monitoreo de transformaciones ambientales con el tiempo. 1.

Fernández-Ordóñez, Y., Soria-Ruiz, J., Leblon, B., Macedo, A., Elva, M., Ramírez-Guzmán, M. E., & Escalona-Maurice, M. (2020). Imágenes de radar para estudios territoriales, caso: Inundaciones en Tabasco con el uso de imágenes SAR Sentinel-1A y Radarsat-2. *Realidad, Datos y Espacio. Revista Internacional de Estadística y Geografía*, 11(1).

- Gambo, J., binti Roslan, S. N. A., Zulhaidi Mohd Shafri, H., Che Ya, N. N., Ahmed Yusuf, Y., & Ang, Y. (2024). Unveiling and modelling the flood risk and multidimensional poverty determinants using geospatial multi-criteria approach: Evidence from Jigawa, Nigeria. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 106, 104400. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2024.104400>
- Garg, S., Dasgupta, A., Motagh, M., Martinis, S., & Selvakumaran, S. (2024). Unlocking the full potential of Sentinel-1 for flood detection in arid regions. *Remote Sensing of Environment*, 315, 114417. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2024.114417>
- Henry, J.-B., Chastanet, P., Fellah, K., & Desnos, Y.-L. (2006). Envisat multi-polarized ASAR data for flood mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 27(10), 1921-1929. doi: 10.1080/01431160500486724
- Hernández, J. V. S., Pech-May, F., Jacinto, H. G. S., & Magana-Govea, J. (2021). Mapeo de inundaciones utilizando imágenes satelitales SAR en Google Earth Engine. *Res. Comput. Sci.*, 150(4), 83–95.
- Hong, Y., & Gourley, J. J. (2017). *Radar Hydrology*. Taylor & Francis Limited Oxford, UK:
- Horritt, M. S., & Bates, P. D. (2002). Evaluation of 1D and 2D Numerical Models for Predicting River Flood Inundation. *Journal of Hydrology*, 268(1-4), 87-99. doi: 10.1016/S0022-1694(02)00121-X
- Huang, M., & Jin, S. (2022). Backscatter characteristics analysis for flood mapping using multi-temporal Sentinel-1 images. *Remote Sensing*, 14(15), 3838. <https://doi.org/10.3390/rs14153838>
- Indian Space Research Organisation. (2020, June 30). *Flood Monitoring Using SAR Imagery*. 1.
- Infobae (2023). Emergencia en Colombia: estas son las zonas más afectadas en el país por la temporada de lluvias. Johan Manuel Largo. Fecha de Consulta 16 de enero del 2025. Fuente de Consulta <https://www.infobae.com/colombia/2023/11/04/emergencia-en-colombia-estas-son-las-zonas-mas-afectadas-en-el-pais-por-la-temporada-de-lluvias/>
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. (2024, October 16). *Caracterización General del Escenario de Riesgo por Inundación*. 1.
- Isia, I., Hadibarata, T., Hapsari, R. I., Jusoh, M. N. H., Bhattacharjya, R. K., & Shahedan, N. F. (2023). Assessing social vulnerability to flood hazards: A case study of Sarawak's divisions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 97, 104052. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2023.104052>
- Kim, J. W., Lu, Z., Jones, J. W., Shum, C. K., Lee, H., & Jia, Y. (2014). Monitoring Everglades freshwater marsh water level using L-band synthetic aperture radar backscatter. *Remote Sensing of Environment*, 150, 66–81. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2014.03.031>

- Lahsaini, M., Albano, F., Albano, R., Mazzariello, A., & Lacava, T. (2024). A Synthetic Aperture Radar-Based Robust Satellite Technique (RST) for Timely Mapping of Floods. *Remote Sensing*, 16(12), 2193.
- Lee, S., Kim, D. jin, Li, C., Yoon, D., Song, J., Kim, J., & Kang, K. mook. (2024). A new model for high-accuracy monitoring of water level changes via enhanced water boundary detection and reliability-based weighting averaging. *Remote Sensing of Environment*, 313, 114360. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2024.114360>
- Lee, J.-S., Wen, J.-H., Ainsworth, T. L., Chen, K.-S., & Chen, A. J. (2009). Improved Sigma Filter for Speckle Filtering of SAR Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(1), 202-213. doi: 10.1109/TGRS.2008.2002881
- Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E., & Moran, E. (2004). Change Detection Techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12), 2365-2401. doi: 10.1080/0143116031000139863
- Martinis, S., Twele, A., & Voigt, S. (2015). Towards Operational Near Real-Time Flood Detection Using a Split-Based Automatic Thresholding Procedure on Synthetic Aperture Radar Data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(4), 1041-1050. doi: 10.5194/nhess-15-1041-2015
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar Interferometry and its Application to Changes in the Earth's Surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4), 441-500. doi: 10.1029/97RG03139
- McCormack, T., Companyà, J., & Naughton, O. (2022). A methodology for mapping annual flood extent using multi-temporal Sentinel-1 imagery. *Remote Sensing of Environment*, 282, 113273. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2022.113273>
- Naciones Unidas. (2024a, June 4). El mar se calienta a una velocidad alarmante y constante. 1.
- Naciones Unidas. (2024b, August 26). ¿Qué es el aumento del nivel del mar y por qué afecta a nuestro futuro? 1.
- NASA. (2011, April 19). Mississippi Flooding 2011. 1.
- NASA. (2017, July 6). ARSET - Introducción al Radar de Apertura Sintética. 2.
- Nature Communications. (2023, December 18). Integrating climate change induced flood risk into future population projections. 1.
- Observatorio Ambiental de Cartagena. (s.f.). Cambio climático. Recuperado el [fecha en que accediste al enlace], de [https://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/generalidades-de-cartagena/aspectos-ambientales/cambio-climatico/#:~:text=Las%20zonas%20m%C3%A1s%20amenazadas%20corresponden,y%20Bar%C3%BA%20\(costado%20sur\)](https://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/generalidades-de-cartagena/aspectos-ambientales/cambio-climatico/#:~:text=Las%20zonas%20m%C3%A1s%20amenazadas%20corresponden,y%20Bar%C3%BA%20(costado%20sur).).

- Office for Coastal Management. (2021, October 10). National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023). Sunny day flooding. . 1.
- Prasad, P., Mandal, S., Naik, S. S., Loveson, V. J., Borah, S., Chandra, P., & Sudheer, K. (2024). Integration of multi-temporal SAR data and robust machine learning models for improvement of flood susceptibility assessment in the southwest coast of India. *Applied Computing and Geosciences*, 24, 100189. <https://doi.org/10.1016/J.ACAGS.2024.100189>
- Rodríguez y Moreno (2023), Detección y mapeo de inundaciones mediante imágenes SAR, usando el método K-Means Clustering para la evaluación de impactos de desastres ocasionados por el fenómeno El Niño. Caso: Cuenca Bajo Piura, Región Piura. Baishideng Publishing Group Inc. <https://core.ac.uk/download/574532289.pdf>
- Science Direct (2025). Consulta realizada en página web de revista científica 06/01/2025. <https://www.sciencedirect.com/>
- Sharma, N. K., & Saharia, M. (2025). DeepSARFlood: Rapid and automated SAR-based flood inundation mapping using vision transformer-based deep ensembles with uncertainty estimates. *Science of Remote Sensing*, 11, 100203. <https://doi.org/10.1016/J.SRS.2025.100203>.
- Shen, X., Anagnostou, E. N., Allen, G. H., Brakenridge, G. R., & Kettner, A. J. (2019). Near-real-time non-obstructed flood inundation mapping using synthetic aperture radar. *Remote Sensing of Environment*, 221, 302–315.
- Small, D. (2011). Flattening Gamma: Radiometric Terrain Correction. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(8), 3081-3093. doi: 10.1109/TGRS.2011.2120616
- Sun, X., Mein, R. G., Keenan, T. D., & Elliott, J. F. (2000). Flood estimation using radar and raingauge data. *Journal of Hydrology*, 239(1–4), 4–18. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00350-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00350-4)
- THE EUROPEAN SPACE AGENCY. (2018, August 21). Sentinel-1 maps floods in Southeast Asia. 1.
- Torres, R., Snoeij, P., Geudtner, D., Bibby, D., Davidson, M., Attema, E., ... & Rommen, B. (2012). GMES Sentinel-1 Mission. *Remote Sensing of Environment*, 120, 9-24. doi: 10.1016/j.rse.2011.05.028
- Uddin, K., Matin, M. A., & Meyer, F. J. (2019). Operational flood mapping using multi-temporal Sentinel-1 SAR images: A case study from Bangladesh. *Remote Sensing*, 11(13), 1581.
- UN-SPIDER. (2015). *Práctica Recomendada: Mapeo de Inundaciones*. Recuperado de <https://www.un-spider.org/es/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-flood-mapping/in-detail>