

Identificación precisa y sistemática de zonas inundadas en El Salvador mediante análisis multitemporal con sensores satelitales

Villalobos Velásquez, A. M, ORCID: 0009-0004-1738-2436;

Dirección General del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, San Salvador, El Salvador.

avillalobos@ambiente.gob.sv

Resumen – Este estudio aplica un enfoque multitemporal para detectar y analizar inundaciones en El Salvador originadas por lluvias extremas entre 2018 y 2024, utilizando imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética) de Sentinel-1 y datos ópticos de Sentinel-2, Landsat 8 y SPOT 1-5. El análisis abordó cuatro componentes principales: (i) mapeo de zonas inundadas, (ii) reconstrucción de eventos históricos mediante detección de sedimentos, (iii) estimación de la duración del anegamiento y (iv) delimitación de áreas con inundaciones recurrentes. La integración de datos SAR y ópticos mejoró la precisión de la detección, permitiendo identificar ocho zonas con recurrencia alta de inundaciones, localizadas principalmente en la planicie costera y en cuencas hidrográficas mayores, así como en tierras bajas adyacentes a cuerpos de agua. El análisis también evidenció subregistros en bases de datos oficiales, lo que refuerza el valor del monitoreo satelital como herramienta complementaria en la gestión del riesgo y planificación territorial.

Palabras clave: – mapeo de inundaciones, SAR, duración de anegamientos, sedimentos, lluvias extremas

Abstract – This study applied a multitemporal approach to detect and analyze floods in El Salvador caused by extreme rainfall events between 2018 and 2024, using SAR (Synthetic Aperture Radar) imagery from Sentinel-1 and optical data from Sentinel-2, Landsat, and SPOT. Four main components were addressed: (i) mapping of flooded areas, (ii) reconstruction of historical events through sediment mapping, (iii) estimation of flood duration, and (iv) identification of recurrent flood-prone zones.

The integration of SAR and optical data improved detection accuracy, enabling the identification of eight recurrently flooded areas, mainly located in the coastal plain and major river basins, as well as in low-lying lands around water bodies. The analysis also revealed underreporting in official databases, underscoring the value of satellite-based monitoring as a complementary tool for risk management and territorial planning.

Keywords: flood mapping, SAR, flood duration, sediments, extreme rainfall.

I. INTRODUCCIÓN

Cada año en El Salvador se registran inundaciones provocadas por lluvias intensas asociadas a diversos sistemas atmosféricos. Estas afectan a personas, cultivos y viviendas, por lo que es esencial conocer la extensión y localización de las áreas inundadas. Durante eventos meteorológicos, la nubosidad densa limita el uso de sensores ópticos, mientras que las imágenes SAR, gracias a su longitud

de onda (varios centímetros), pueden penetrar las nubes y adquirir información sin depender de la luz solar, lo que las hace especialmente valiosas para el mapeo de inundaciones.

Este estudio emplea un enfoque multitemporal combinando imágenes SAR del satélite Sentinel-1 y datos ópticos de Sentinel-2, Landsat y SPOT para detectar y analizar inundaciones ocurridas entre 2018 y 2024. Se desarrollaron cuatro líneas de trabajo: mapeo de zonas inundadas, reconstrucción de eventos históricos mediante mapeo de

sedimentos, estimación de la duración del anegamiento e identificación de áreas máximas y zonas recurrentemente afectadas por inundaciones.

II. MARCO CONCEPTUAL

A. Eventos de lluvia extremos

El Salvador ha enfrentado históricamente una alta exposición a fenómenos meteorológicos extremos, en particular lluvias intensas asociadas a tormentas tropicales (TT), huracanes (H), depresiones (DT) y bajas presiones (BP). En las últimas décadas, se ha observado un incremento sostenido en la frecuencia y la intensidad de estos eventos, con impactos sociales, económicos y ambientales de gran escala (MARN, 2017).

Desde el huracán Francelia (1969) hasta el reciente Giro Centroamericano de junio de 2024, se han documentado más de 30 eventos de gran magnitud con acumulados de lluvia superiores a 300 mm en distintos puntos del país (Figura 1). Entre los más extremos destacan (MARN, 2017; MARN, 2024):

- Depresión Tropical 12E (2011): más de 1,500 mm en 9 días, considerando el evento más lluvioso registrado.
- Amanda-Cristóbal (2020): acumulado superior a 1,000 mm, que causó graves inundaciones y deslizamientos.
- Agatha (2010) y Mitch (1998): más de 800 mm, que dejaron un saldo catastrófico en pérdida de vidas y daños a infraestructura.
- Stan (2005): 320 mm en 24 horas y 805 mm acumulados, afectando la región central y occidental del país.

Número de eventos por sistemas (1969-2024)

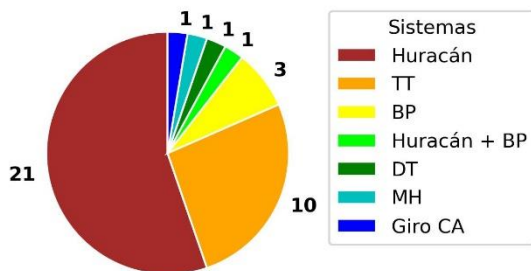


Fig. 1. Número de eventos por tipo de sistema que han afectado El Salvador entre 1969 y junio de 2024. TT (Tormenta Tropical), BP (Baja Presión), DT (Depresión Tropical), MH (Mega Huracán) y Giro CA (Giro Centroamericano).

La temporada de lluvias no solo ha incrementado su severidad, sino que los sistemas meteorológicos han

mostrado una evolución más rápida, pasando de tormentas a huracanes mayores en cortos periodos, como ocurrió con Patricia (2015) y Julia (2022). Asimismo, se ha identificado una tendencia a la ocurrencia de eventos (como en 2020 con Amanda, Marco, Laura, Zeta, Eta e Iota), lo que reduce el tiempo de recuperación entre uno y otro (Figura 2).

Este patrón de lluvias extremas ha situado a El Salvador en posiciones críticas en índices internacionales de riesgo climático. Por ejemplo, el Índice Global de Riesgo Climático 2009 de Germanwatch ubicó al país en el primer lugar tras el impacto de la baja presión E96, asociada al huracán Ida (2009).

Entre 2009 y 2011 se registraron tres años consecutivos con eventos lluviosos históricos, seguidos por cuatro años de sequía severa (2012–2015). Esta alternancia entre inundaciones extremas y déficit hídrico, es un reflejo de la elevada variabilidad climática, agravada por el cambio climático global, con profundas implicaciones para la seguridad alimentaria, la salud alimentaria, infraestructura y los medios de vida (MARN, 2017).

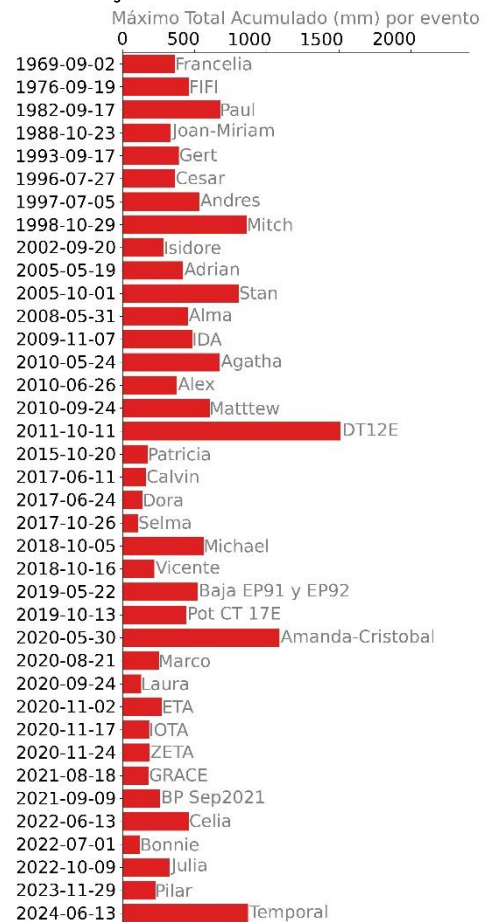


Fig. 2. Eventos meteorológicos extremos que han afectado a El Salvador actualizado hasta junio de 2024 con el máximo acumulado por evento y el nombre del sistema. (modificado de MARN,2024).

En el período 2018-2024, El Salvador fue nuevamente impactado por múltiples eventos meteorológicos extremos, entre ellos Amanda-Cristóbal (2020), Julia (2022) y el Giro centroamericano (2024), que en algunos casos han superado los 1,000 mm de lluvia acumulada por evento. Estos sistemas generaron inundaciones severas, desbordamientos fluviales y daños significativos en infraestructura y comunidades de alta vulnerabilidad (MARN, 2024).

B. Inundaciones en El Salvador

Durante la estación lluviosa, que se extiende de mayo a noviembre, El Salvador enfrenta con frecuencia fenómenos meteorológicos extremos como huracanes, tormentas tropicales y depresiones tropicales. Estos eventos generan impactos variados, entre ellos deslizamientos de tierra, caída de árboles y estructuras, así como afectaciones hidrológicas significativas. Entre estas últimas, se distinguen:

1) Inundaciones urbanas:

Se presentan en áreas densamente construidas, donde superficies impermeables -asfalto, concreto-combinadas con sistemas de drenaje insuficientes, provocan acumulación de agua en calles y viviendas durante lluvias intensas (EcoExploratorio, s.f.)

2) Crecidas repentinas o súbitas

Corresponden a incrementos rápidos del nivel del agua en ríos, torrentes o quebradas, desencadenados por lluvias intensas y breves. El caudal puede incrementarse en pocos minutos u horas.

3) Desborde de ríos

Ocurren cuando un río excede la capacidad de su cauce y se extiende por sus márgenes o planicie de inundación. Pueden desarrollarse gradualmente por lluvias prolongadas y persistir durante varios días.

4) Anegamientos de terreno

Se refieren a la inundación de un terreno agrícola ya sea por un aumento del nivel freático (capa superior del agua subterránea) o por una lluvia excesiva (GreenFacts, 2023). Su duración puede extenderse desde varios días hasta meses, dependiendo de la intensidad y persistencia de las lluvias.

En términos generales, las inundaciones constituyen un fenómeno recurrente en el país, cuyo nivel de daños y pérdidas se ha intensificado en los últimos años. Este incremento se vincula a la transformación de la morfología del territorio, el cambio de uso del suelo y el crecimiento urbanístico desordenado, factores que han intensificado la problemática y

ampliado el alcance de las zonas afectadas (MARN, 2017).

La población más vulnerable corresponde, en gran medida, a los sectores de escasos recursos que habitan en asentamientos precarios o en cercanías de ríos y quebradas. El informe también señala impactos recurrentes en la producción agrícola y ganadera, así como daños a infraestructura esencial, incluyendo puentes, carreteras, viviendas, centros educativos y unidades de salud (MARN, 2017).

C. Mapeo de inundaciones con datos satelitales de alta resolución espacial

El desarrollo de sensores de alta resolución espacial para la observación de la tierra ha facilitado el uso de datos satelitales para la gestión de riesgo como el mapeo de las inundaciones (UN-SPIDER, s.f.).

En este ámbito, los sensores de radar de apertura sintética (SAR), como Sentinel-1, constituyen la herramienta más adecuada para la detección y delimitación de áreas inundadas. Su ventaja principal radica en la capacidad de penetración de las nubes, lo cual resulta esencial dado que los eventos de inundación suelen coincidir con condiciones de cielo cubierto asociadas a sistemas meteorológicos intensos.

Por otra parte, los sensores ópticos de alta resolución, como Sentinel-2 y Landsat o SPOT pueden ser útiles para el mapeo de inundaciones en ciertos casos, por ejemplo: inundaciones de gran duración, ya que se pueden encontrar imágenes libres de nubes en algún momento, o en casos en que las inundaciones no se originan directamente por precipitaciones extremas, sino por procesos como la ruptura de bordas o fallas en obras de infraestructura hidráulica.

En la tabla 1 se muestran las principales características de estos sensores de alta resolución espacial mencionados.

TABLA 1

SENSORES DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL USADOS PARA MAPEO DE INUNDACIONES.

Satélite	Agencia	Tipo de sensor	Resolución espacial
Sentinel-1	ESA	Radar (SAR)	~10 m
Sentinel-2	ESA	Óptico multispectral	10-60 m
Landsat	NASA / USGS	Óptico multispectral	15-30 m
SPOT (1-5)	CNES (Francia)	Óptico pancrom. y multiesp.	10-20 m

a) SAR

SAR es un sensor activo con bandas en el rango de la microondas. La señal de SAR proporciona información sobre la superficie terrestre a través de la retrodispersión de la onda electromagnética. Esta interacción depende de las características del radar - la frecuencia, polarización y ángulo de incidencia- y de las propiedades de la superficie -constante dieléctrica, aspereza, orientación de los objetos, estructura.

Una superficie puede reflejar más o menos energía según cuán áspera o lisa sea en relación con la longitud de onda, lo que influye directamente en el brillo observado en la imagen (Figura 3). Asimismo, longitudes de onda más largas permiten una penetración más profunda en la vegetación (NASA ARSET, 2017; Meyer, 2019).

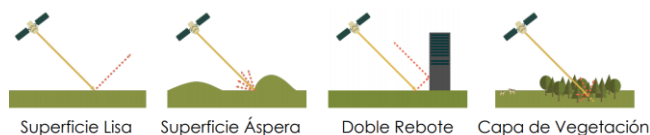


Fig. 3. Esquemas de interacción de la señal de radar con el objetivo y tipos de retrodispersión (NASA ARSET, 2017)

La polarización de una onda electromagnética describe la orientación del campo eléctrico mientras viaja, y puede ser horizontal (H), vertical (V) o una combinación de ambas. Para obtener información detallada con radar, se utilizan distintas combinaciones de transmisión y recepción (ejemplo de Quad-pol: HH, HV, VH, VV). Estas combinaciones permiten identificar características físicas del terreno, especialmente cuando se emplea polarización cuádruple (Quad-Pol), que capta más variabilidad estructural del objetivo (NASA ARSET, 2017).

La dirección de mirada de un radar SAR depende de hacia dónde apunta su antena con respecto a la trayectoria del satélite. En órbitas polares, se distinguen dos tipos: ascendente (cuando el satélite se mueve de sur a norte) y descendente (de norte a sur). Las imágenes adquiridas en ambas trayectorias presentan diferencias en retrodispersión, sombra e inversión de relieve. Combinar ambas permite obtener información más completa del terreno (Meyer, 2019).

En la actualidad existen varios sensores SAR en órbita que adquieren imágenes del espacio con alta resolución temporal, alguno de los cuales cuenta con acceso libre a sus datos. Entre ellos destaca la constelación Sentinel-1 A y B, que operan en banda C y que han sido desarrollados por la Agencia Espacial Europea (ESA). Sentinel-1^a fue lanzado en abril de 2014 (ESA, 2007), mientras que Sentinel-1B se

incorporó en abril de 2016. Sin embargo, este último dejó de operar en diciembre de 2021 (ESA, 2014; ESA, 2016).

b) *Mapeo de inundaciones con SAR con la técnica de umbral del histograma.*

Las imágenes SAR se utilizan para detectar inundaciones debido al bajo retorno de señal del agua, que se observa en un contraste alto con respecto a otras coberturas. Para su delimitación, se aplican métodos como detección de cambios, umbral de histograma, clasificación supervisada y análisis de coherencia para delimitar áreas inundadas, incluso en presencia de vegetación o nubosidad (Lanfri, 2011; Oberstadler et al., 1997; Schumann et al., 2010).

Los resultados que se exponen, se han generado aplicando la metodología de umbral del histograma. La técnica, se basa en analizar el histograma de la imagen, generalmente compuesto por dos distribuciones gaussianas (Figura 4).

En este estudio, la técnica se aplicó a imágenes Sentinel-1 en escala de grises, con el propósito de segmentarlas y reclasificarlas en dos categorías: "agua" y "no agua". La identificación de los píxeles clasificados como agua resulta fundamental para la detección de áreas inundadas.

Su ventaja es que solo requiere la imagen y su histograma.

Entre las principales ventajas de este método destaca su simplicidad, ya que únicamente requiere la imagen y su histograma. No obstante, su desempeño puede verse limitado cuando la superficie cubierta por agua es reducida o el contraste radiométrico es bajo, lo que puede ocasionar errores en la segmentación. Para mitigar esta limitación, la imagen se subdivide en mosaicos, seleccionando únicamente aquellos que contienen al menos un 10% de cada clase y presentan un nivel de contraste suficiente para garantizar la precisión en la clasificación.

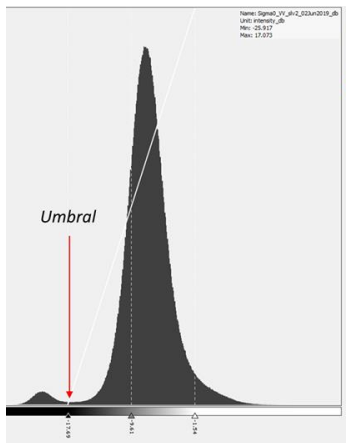


Fig. 4. Histograma de datos de imagen Sentinel-1

III. MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se abordan 4 aspectos relacionados con la detección de inundaciones como: (i) mapeo de zonas inundadas, (ii) mapeo de inundación histórica de gran impacto mediante detección de sedimentos, (iii) análisis de duración de las inundaciones e (iv) identificación de áreas máximas y zonas con inundaciones recurrentes, los cuales se describen a continuación:

A. Mapeo de zonas inundadas

Se utilizan las imágenes sentinel-1 y sentinel-2 [para el mapeo de zonas inundadas. Con las imágenes de Sentinel 1 se aplica la técnica del umbral del histograma a imágenes SAR requiere como mínimo de dos escenas. La primera que corresponda a una fecha previa a la ocurrencia del evento (pre-evento) y mientras que la segunda debe coincidir con el momento en que la inundación es observable o posterior al inicio de esta (post-evento). Dicho procedimiento se desarrolla en tres etapas principales (Figura 5):

- **Preprocesamiento:** incluye los procesos relacionados con la descarga de las imágenes en nivel GRD, la calibración radiométrica, corrección geométrica (corregistro) y filtrado de las imágenes para reducir el ruido llamado Speckle (presente en las imágenes SAR).
- **Mascara de zonas inundadas:** etapa en la que se convierten los datos a Decibelios (DB) y luego se aplica un umbral sobre las imágenes pre y post inundación (utilizando datos SAR transformados de geometría SAR a coordenadas geográficas) para detectar áreas cubiertas por agua y calcular la diferencia.
- **Post-procesamiento:** Filtrado de píxeles que no corresponden a la clase 'agua'. Dicho filtrado considera que las zonas inundadas

son aquellas que han sido clasificadas como "agua" en la imagen posterior y como "no agua" en la imagen previa a la inundación y que además se encuentren en zonas con topografía menor 20°.

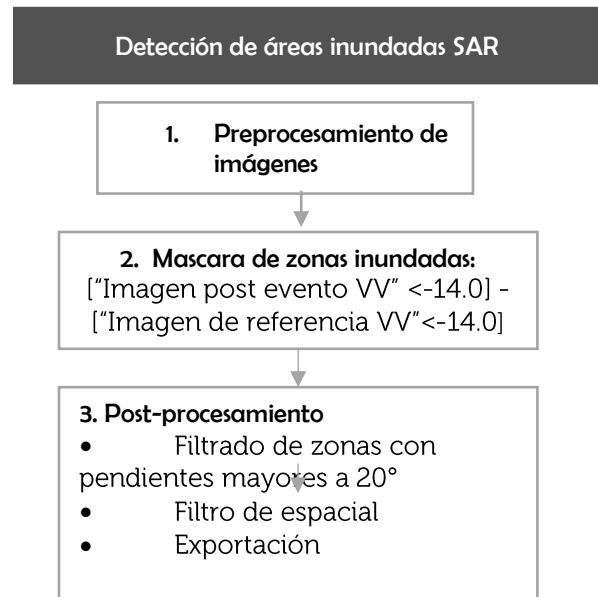


Figura 5. flujograma del procesamiento de imagen para obtención de área inundada con SAR.

De manera paralela, y a partir de las imágenes de Sentinel-2, se realiza el cálculo de índices espectrales como el Índice de Agua de Diferencia Normalizada (NDWI), ya que son útiles en resaltar el aspecto de las masas de agua en una imagen de satélite (EOS, 2023).

Para su cálculo se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{NDWI} = (\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$$

Los valores del NDWI que corresponden a la clase de agua varían generalmente entre 0,2 – 1 – Superficie del agua, y los valores entre 0,0 – 0,2 corresponden a inundación o humedad (EOS, 2023).

Siendo, el proceso para la obtención de las zonas inundadas los siguientes pasos:

- Descarga de imágenes y visualización
- Cálculo de NDWI
- Generación de máscara de agua a partir de clasificación binaria
- Filtrado de ruido
- Exportación a Shapefile

B. Mapeo de sedimentos o marcas dejados por inundaciones

Este mapeo implica la comparación de una de imagen antes y otra después de la inundación y generar una máscara con los cambios generados por la inundación como el arrastre y deposición de sedimentos por un río en las llanuras de inundación cercanas al cauce.

C. Duración de zonas inundadas

La duración de una inundación se define como el tiempo durante el cual una zona permanece cubierta por agua, restringiendo las actividades que normalmente se realizaban antes del evento.

Para determinar la persistencia de estas áreas se procesarán múltiples imágenes SAR correspondientes a regiones con alta frecuencia de inundaciones, como la parte baja del río Grande de San Miguel y el departamento de La Paz. Dichas imágenes corresponderán al periodo posterior al evento, con el objetivo de observar el tiempo de respuesta de los terrenos hasta retornar a su condición no inundada, una vez que las precipitaciones dejan de ser significativas en la zona.

D. Identificación de Áreas Máximas y Zonas con Inundaciones Recurrentes

La identificación de áreas máximas y de zonas con recurrencia de inundaciones se llevará a cabo mediante un análisis comparativo entre diferentes eventos. Este procedimiento permitirá distinguir las zonas que presentan afectaciones reiteradas de aquellas que han sido impactadas de manera ocasional o puntual.

La evaluación se basará en la interpretación visual y espacial de los mapas de inundación generados para cada evento. A través de la superposición y comparación de las áreas afectadas, será posible señalar las regiones con mayor tendencia a inundarse de forma recurrente y aquellas con afectaciones esporádicas. Esta información constituye un insumo relevante para reconocer patrones de afectación en el territorio y apoyar la toma de decisiones en la gestión del riesgo.

E. Datos

Para el análisis de eventos de inundación se utilizaron imágenes provenientes de diferentes sensores

satelitales, dependiendo de la disponibilidad de datos y las condiciones atmosféricas durante cada evento:

- **Sentinel-1 (SAR)**: utilizado para detectar cuerpos de agua bajo condiciones nubosas o de noche, especialmente en eventos de lluvias extremos desde 2018.
- **Sentinel-2 y Landsat (sensores ópticos)**: empleados en eventos donde se dispuso de imágenes sin nubosidad significativa, permitiendo una observación detallada del uso del suelo y cambios por inundación.
- **SPOT**: utilizado únicamente para eventos históricos previos a 2015 (como **Stan** e **Ida**), ya que los datos gratuitos disponibles de este sensor se limitan aproximadamente hasta ese año.

F. Eventos de lluvia analizados

En este análisis se seleccionaron los eventos ocurridos entre 2018 y 2024, que generaron impactos significativos en el territorio, así como los eventos de **Ida** y **Stan** únicamente en la zona del río Jiboa.

Además, el análisis se enfocó en delimitar las áreas afectadas por acumulación de agua superficial a causa del desborde fluvial. Para ello se consideraron únicamente, los eventos vinculados al desbordamiento de ríos y al anegamiento de terrenos rurales o agrícolas. Se excluyeron las inundaciones urbanas, crecidas repentinas en zonas montañosas o de difícil acceso.

Los eventos considerados se muestran en la tabla 2, así como el tipo de satélite que se utilizó para el mapeo de las zonas inundadas.

TABLA 2.

EVENTOS DE LLUVIAS EXTREMOS ANALIZADAS PARA EL MAPEO DE LAS ZONAS INUNDADAS CON IMÁGENES SATELITALES.

Evento	Fecha	Satélite utilizado
Tormenta tropical Stan	Octubre 2005	SPOT
Huracán Ida	Noviembre 2009	SPOT
Huracán Michael	Octubre 2018	Sentinel-1
Potencial Ciclón Tropical 17E	Octubre 2019	Sentinel-1
TT Amanda-Cristóbal	Mayo-Junio 2020	Sentinel-1
TT Julia	Octubre 2022	Landsat-8
Giro centroamericano	Junio 2024	Sentinel-1 y Sentinel-2

Las imágenes fueron procesadas con el software SNAP de la ESA. La validación de las zonas inundadas se realizó a partir de reportes de afectaciones recopiladas por instituciones nacionales.

En el caso de Sentinel-2, se utilizaron imágenes con correcciones atmosféricas de nivel L2A; para Landsat también se usaron imágenes de nivel 2. SPOT presentó un único nivel disponible en la plataforma de descarga, por lo que únicamente se efectuaron procesos de co-registro y georreferenciación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Mapeo de zonas inundadas con Sentinel-1

a) Baja EP91 y EP92 (mayo 2019)

En este evento, se seleccionaron imágenes de época seca como referencia (marzo–abril 2019) y se compararon con imágenes antes y después del evento, con imágenes de trayectorias ascendentes y descendentes. Las imágenes adquiridas en órbita descendente evidenciaron un mejor desempeño en la detección de zonas inundadas, ya que en la composición RGB fue posible discriminar con mayor claridad los cuerpos de agua respecto a otras coberturas superficiales.

Evaluación de Umbral de histogramas

En este caso se evaluó el umbral óptimo para la detección de agua, considerando el cálculo del histograma para toda la imagen y para recortes de diferentes zonas. Donde, se encontró que para la polarización VV: el umbral varía entre -15.0 y -17.0 dB por zona específica, y -14.0 dB para toda la imagen. Mientras que en la polarización VH, entre -20.0 y -22.5 dB por zona, y -22.0 dB para toda la imagen.

Respecto a las máscaras obtenidas en cada polarización, la polarización VH extrajo mejor la máscara de agua en Jiquilisco que VV. Sin embargo, el umbral único en VV generó mejor la identificación de píxeles con agua en casi todos los casos evaluados (toda la imagen y por zonas).

b) Huracán Michael (octubre 2018)

Se identificaron ocho áreas inundadas, principalmente en: San Francisco Menéndez, Ahuachapán, la zona costera de Acajutla, zona de riego de Zapotitán, embalses Cerrón grande y 5 de noviembre, La Paz, represa 15 de septiembre, la Bahía de Jiquilisco y la zona baja de la cuenca del Río grande de San Miguel (RGSM).

En la mayoría de las zonas, las máscaras de zonas inundadas coinciden con los reportes oficiales de afectación, lo que valida la detección satelital. Aunque en algunos lugares no se encontró un reporte como el embalse Cerrón Grande que se observaron cambios en el nivel de agua.

c) Potencial Ciclón Tropical 17-E

Las imágenes del 20 de octubre permitieron detectar áreas anegadas tras el evento, especialmente en la zona oriental (lagunas El Jocotal y Olomega, cuenca baja del RGSM, Jiquilisco, Zacatecoluca).

En algunas zonas, como La Canoa, se observaron anegamientos previos al evento, lo que indica condiciones preexistentes de vulnerabilidad. Se identificaron áreas inundadas sin reportes, sugiriendo subregistro en las bases de datos de afectaciones.

d) Tormentas Amanda y Cristóbal

Se detectaron inundaciones generalizadas en todo el país, con énfasis en la zona oriental y litoral central.

Las áreas más afectadas incluyen la baja del RGSM, lagunas El Jocotal y Olomega, Jiquilisco, Tecoluca, Zacatecoluca, San Luis La Herradura y zonas del embalse Cerrón Grande. Un ejemplo de zonas inundadas en la zona del departamento de La Paz se muestra en la Figura 6.

La validación con reportes de afectación fue consistente en muchas áreas, aunque también se detectaron inundaciones en lugares no documentados. Sin embargo, limitaciones en la cobertura de imágenes (especialmente en occidente) impidieron una detección completa.

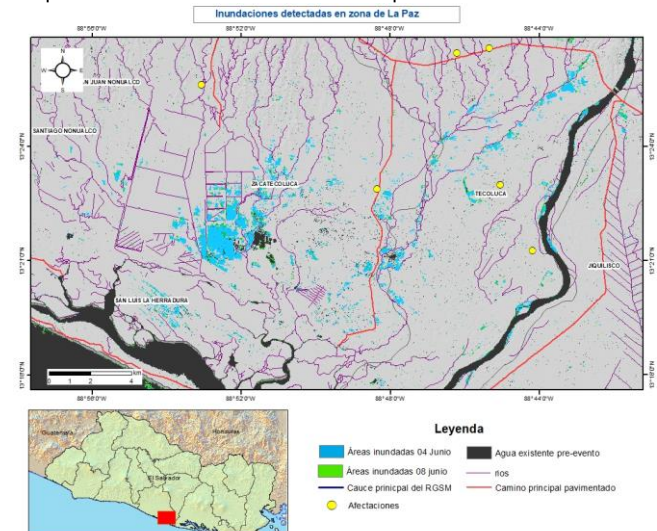


Fig. 6. mapa de áreas inundadas detectadas con Sentinel 1, debido a las lluvias generadas por la influencia de las tormentas tropicales Amanda y Cristóbal en los municipios de San Luis La Herradura, Zacatecoluca y Tecoluca.

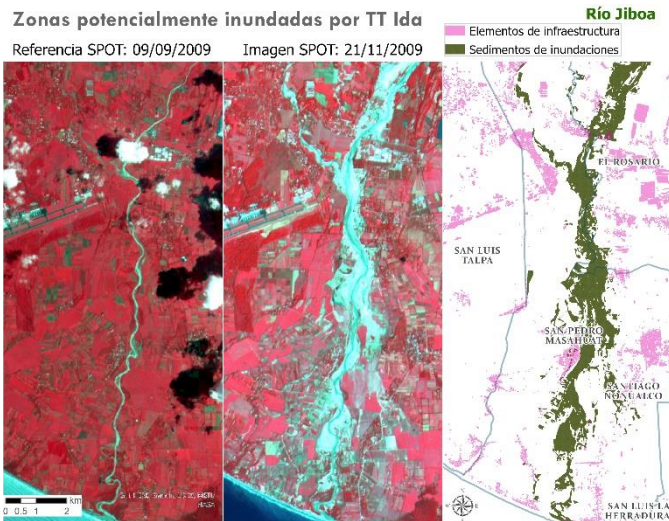


Fig. 9. Imágenes en composición RGB de falso color de SPOT sobre el río Jiboa y máscara de sedimentos mapeados con detección de cambios entre las fechas del 09 de septiembre y 21 de noviembre de 2009.

C. Análisis de duración de las inundaciones

Se presenta la estimación de la duración del anegamiento del terreno en distintos eventos de inundación, entre ellos: las inundaciones ocurridas en la cuenca baja del río Grande de San Miguel (RGSM) durante la Tormenta Tropical Amanda-Cristóbal, las registradas en la zona de Zacatecoluca-Tecoluca, así como el caso de la ruptura de la borda del RGSM asociada al Giro Centroamericano en 2024.

Para estimar la duración de las zonas inundadas, se utilizaron imágenes satelitales posteriores al evento (Sentinel-1 o Sentinel-2), comparándolas con imágenes de referencia previas a la inundación. A partir del análisis de una serie temporal de imágenes, se identificaron los cambios en la superficie del terreno relacionados con la presencia de agua.

Se asumió una fecha de inicio de la inundación con base en los registros de lluvia y reportes de afectaciones. A partir de esa fecha, se contabilizaron los días en que una misma área permaneció con indicios de anegamiento, según la información visible en las imágenes. El análisis consideró la fecha y hora de adquisición de cada imagen (en UTC), y se identificó cada zona en distintos momentos para determinar cuánto tiempo permaneció inundada.

Para estimar la duración de las inundaciones generadas por las lluvias de junio de 2020, se analizaron once imágenes Sentinel-1, evaluando los cambios en el paisaje desde el inicio del evento hasta más de un mes después.

Los resultados indican que, en términos generales, las zonas permanecieron inundadas entre 10 y 20 días. No obstante, algunas áreas, como las ubicadas en las proximidades de la laguna Olomega, presentaron anegamientos superiores a 50 días (Figura 10). En contraste, otras regiones se vieron afectadas únicamente por pocos días, principalmente durante los primeros días de junio.

Por otra parte, en el caso de la ruptura de la borda del RGSM en 2024, con imágenes S2 evidenció que la duración de las inundaciones fue superior a dos meses, debido a las lluvias continuas que impidieron el descenso del nivel del río tras la ruptura de la borda (Figura 11)

En la zona de Zacatecoluca-Tecoluca, las inundaciones generadas por el Giro Centroamericano fueron evaluadas principalmente durante las primeras semanas, periodo en el cual alcanzaron su mayor extensión. El análisis determinó que las áreas inundadas no mostraron una disminución significativa en un lapso de al menos 10 días (Figura 12). Además, reportes de observadores locales señalaron que el anegamiento persistió durante varias semanas después del inicio del evento.

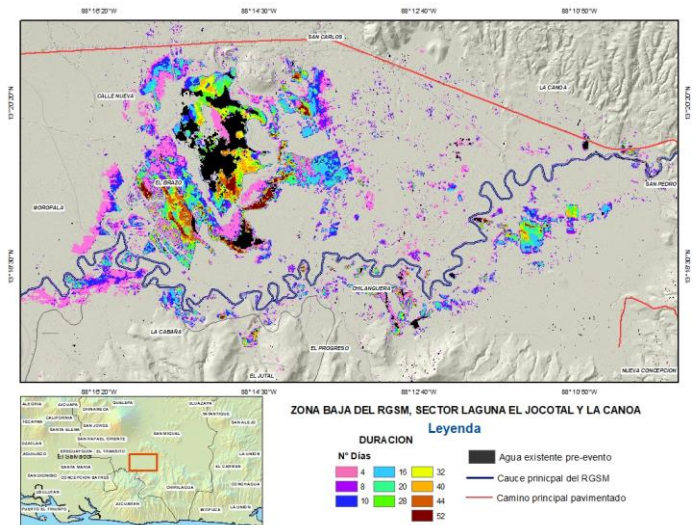
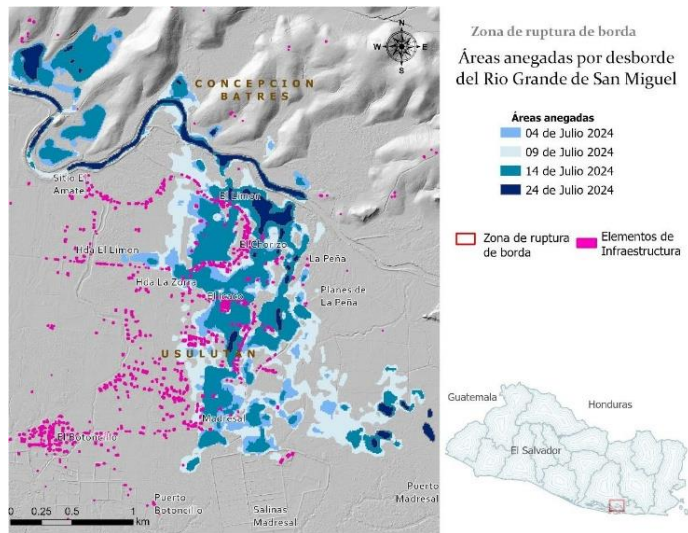
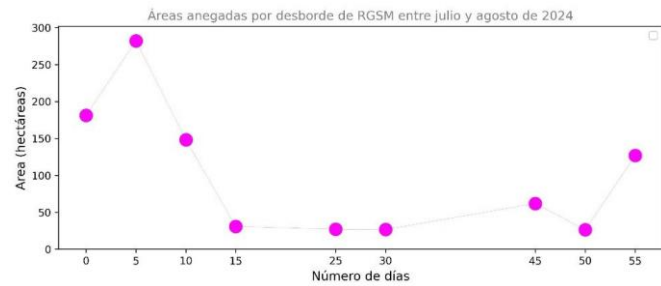


Fig. 10. Duración en días de las zonas inundadas o anegadas en la zona de la laguna El Jocotal y en potreros y zonas de cultivo en La Canoa.



A



B

Fig. 11. A. Mapa de áreas inundadas entre 04 y 24 de Julio de 2024 debido al colapso de la borda del RGSM mapeados con S2. B. Gráfico de las áreas inundadas con entre julio y agosto del 2024. Se observa en el grafico el número de días transcurridos a partir de la primera imagen del 04 de julio.

D. Identificación de Áreas Máximas y Zonas con Inundaciones Recurrentes

Las zonas inundadas detectadas mediante imágenes de radar Sentinel-1 entre 2018 y 2020 (Villalobos Velásquez, 2020) se localizan principalmente en la planicie costera del país. Estas áreas han sido afectadas de manera recurrente durante eventos meteorológicos extremos, lo que indica una alta susceptibilidad a futuras inundaciones. Por esta razón, han sido clasificadas como zonas con recurrencia de inundación.

Las zonas identificadas se presentan en el mapa de la Figura 13, y comprenden:

- Embalse Cerrón Grande
- Municipio de San Francisco Menéndez, Ahuachapán
- Municipio de Acajutla, Sonsonate (zona de muy poca extensión)
- Zacatecoluca y San Luis La Herradura, La Paz
- Bahía de Jiquilisco, Usulután
- Puerto El Triunfo y zona central de Usulután
- Río Grande de San Miguel, alrededores de las lagunas El Jocotal y Olomega
- Municipio de Pasaquina, La Unión

La mayoría de estas zonas se encuentran en el oriente del país, donde predominan terrenos con pendientes muy suaves, lo que favorece la acumulación de agua.

Duración de Áreas inundadas por el Giro CA Zacatecoluca-Tecoluca

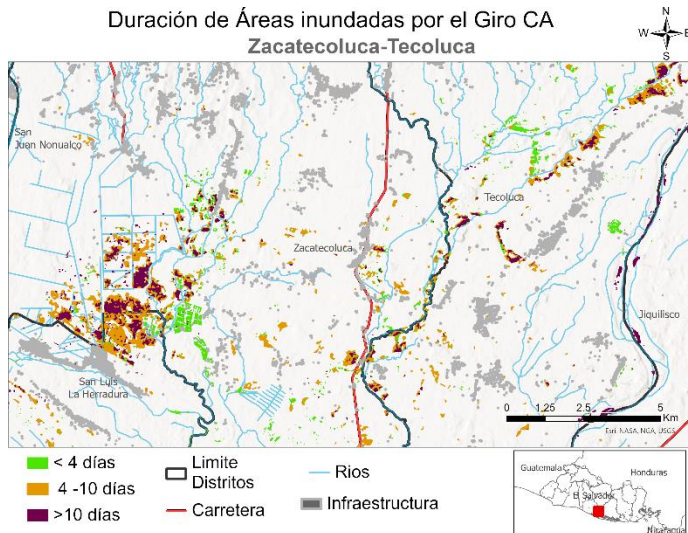


Fig. 12. Zonas inundadas entre Zacatecoluca y Tecoluca por lluvias del Giro CA en 2024 y duración de las inundaciones con imágenes hasta el 01 de Julio de 2024.

Además, con el análisis de imágenes ópticas (Sentinel-2 y Landsat) correspondientes a eventos de lluvias extremas desde 2022, se han identificado nuevas áreas de inundación, como la zona del río Lempa, entre los distritos de Berlín y San Vicente (Ver Apéndice B).

También se han registrado inundaciones recurrentes asociadas a las variaciones de los cuerpos de agua como: lago de Guija, 15 de septiembre y el **embalse Cerrón Grande**, las cuales podrían afectar principalmente tierras agrícolas ubicadas en sus orillas, conocidas como **tierras fluctuantes**. En el caso del embalse cerrón Grande, estas áreas quedan expuestas durante la estación seca y poseen un alto valor productivo debido a su fertilidad y humedad. A pesar de este potencial, solo el 25% de estas tierras (equivalente a 1,891 parcelas) se utiliza para actividades agrícolas, mientras que el 75% restante se dedica a la ganadería (Escobar, 2011).

El análisis de imágenes Sentinel-2 entre 2018 y 2023 demuestra que estas tierras fluctuantes presentan una variabilidad que depende de la temporada de lluvias. Por ejemplo, en marzo de 2022, en el embalse cerrón grande, durante la estación seca, se registró una inundación no prevista que provocó pérdidas en los cultivos (PLAN Internacional, 2020).

Finalmente, se ha realizado un análisis integrado que incluye: las zonas inundadas durante eventos extremos (detectadas con Sentinel-1, Sentinel-2 y Landsat), el evento histórico del río Jiboa en 2005 (mapeado con imágenes SPOT) y las variaciones entre los niveles mínimos y máximos de los cuerpos de agua (extraídas de imágenes Sentinel-2, 2018–2023)

A partir de esta información, se han generado máscaras compuestas de inundaciones que permiten identificar las **áreas máximas de inundación**, es decir, los límites superiores mapeados por sensores satelitales. Un ejemplo se muestra en la Figura 14, y las demás zonas están disponibles en el Apéndice B.

E. Estadísticas de Afectaciones por inundaciones

Al realizar la intersección espacial entre: (i) las capas de delimitación de zonas de inundación máxima generadas a partir de Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat y SPOT y, (ii) la capa de coberturas del suelo 2018 de El Salvador; se estimó que un total de 22,375 hectáreas han sido afectadas por eventos de inundación en El Salvador (Figura 15).



Fig. 13. mapa de zonas recurrentes a inundaciones detectadas con Sentinel-1

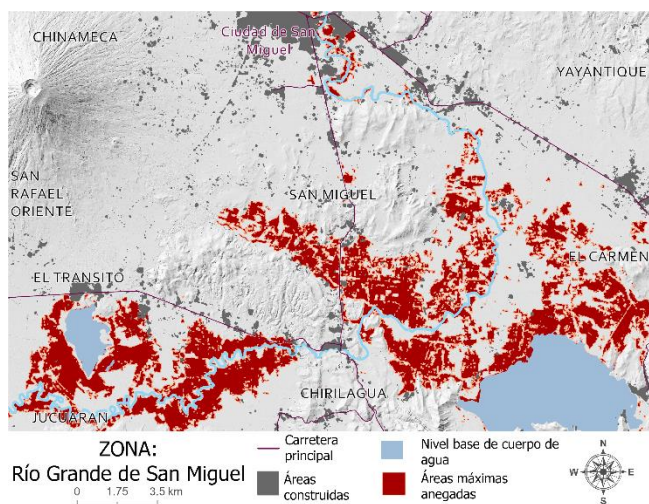


Fig. 14. Áreas máximas inundadas en la zona baja del RGSM obtenida a partir de la superposición de máscaras de zonas inundadas mapeadas desde 2018 a 2024.

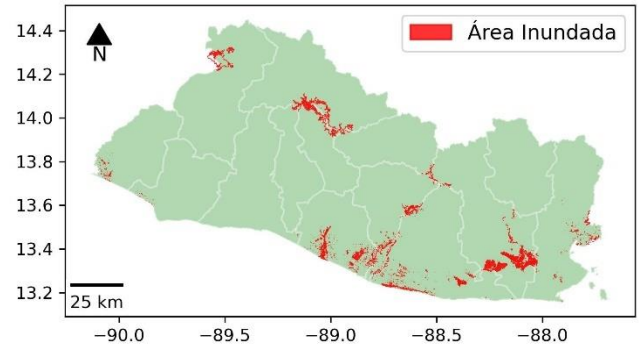


Fig. 15. Áreas máximas inundadas en El Salvador obtenidas a partir de la superposición de las máscaras de zonas inundadas de todos los eventos analizados.

La cobertura más impactada fue el pasto, con aproximadamente 7,447 ha (33.3%), concentrada en zonas ganaderas de planicies inundables. Le sigue la categoría de Tierra fluctuantes, con 6,102 ha (27.3%), que refleja tanto la expansión natural de los cuerpos de agua durante crecidas en la época lluviosa que generalmente son tierras agrícolas, respecto a el espejo de agua del mapa de coberturas del 2018 (ver fig. 16), y en algunos casos puntuales como laguna de Olomega y Jocotal que se debe a la vegetación flotante presente en movimiento. La cobertura forestal representa a 3,919 ha (17.5). En cuanto a la agricultura, destaca la caña de azúcar con 2,473 ha (11.1%), cultivo de alto valor económico ubicado en tierras bajas fértiles del país, y los cultivos generales, con 719 ha (3.2%), que incluyen parcelas mixtas, como granos básicos u hortalizas, vulnerables a inundaciones. Finalmente, coberturas como matorral, mangle, suelo desnudo y café suman cerca del 8% restante, afectando zonas ecológicamente sensibles, principalmente en regiones costeras y bajas (Figura 17 y 18).

Tierras fluctuantes en embalse Cerrón Grande

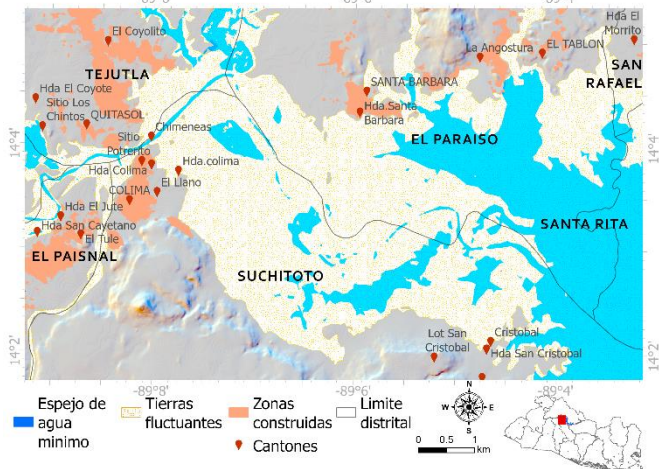


Fig. 16. Tierras fluctuantes en zona alta del embalse Cerrón Grande.

Áreas de coberturas del suelo inundada

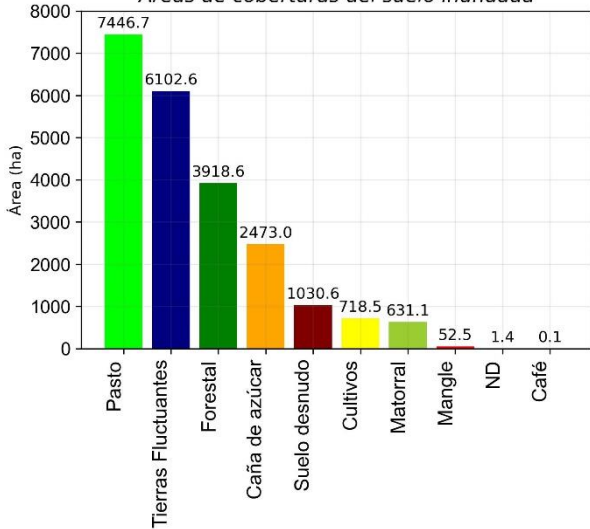


Fig. 17. Áreas de coberturas de suelo inundadas considerando las máximas inundaciones mapeadas.

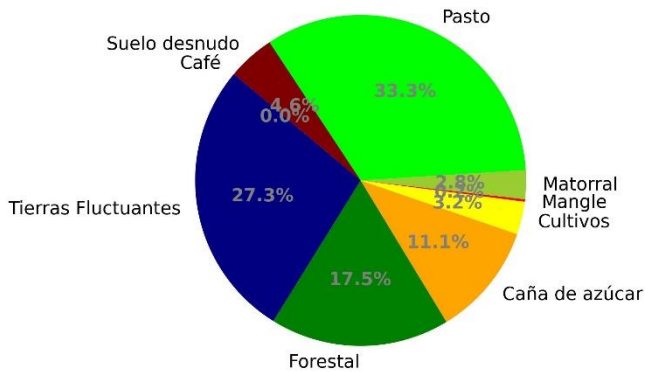


Fig. 18 Porcentaje de coberturas de suelo inundadas considerando las máximas inundaciones mapeadas.

Se identificaron aproximadamente 4,600 elementos de infraestructura expuestos, cuyas afectaciones se distribuyen geográficamente en 53 distritos ubicados en los 14 departamentos del país (tabla 3). Siendo los mas afectados por las inundaciones los distritos de San Miguel, Suchitoto, San Pedro Masahuat, Metapán, Chirilagua, Tecoluca, Jiquilisco, Zacatecoluca, El Paraíso y Chalatenango (Ver gráfico de Fig. 19).

Distritos con mayor área inundada

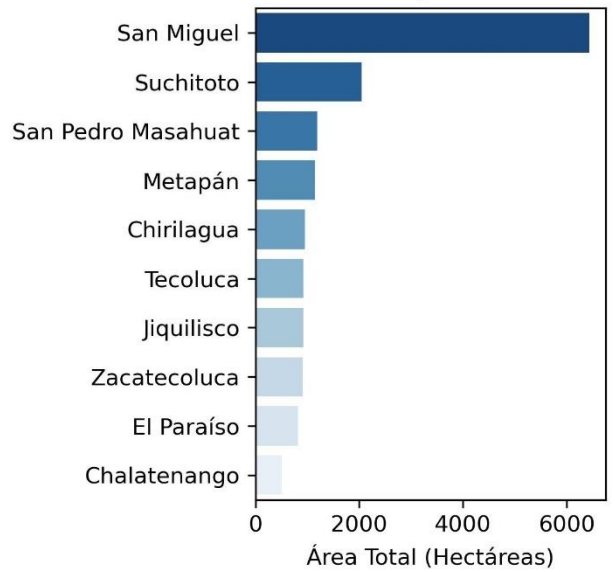


Fig. 19. Los 10 distritos con mayor área inundada considerando las máximas inundaciones mapeadas.

TABLA 3

DISTRITOS AFECTADOS POR INUNDACIONES DEBIDO A LLUVIAS DE EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS DURANTE LOS ÚLTIMOS AÑOS.

Departamento	Distrito
AHUACHAPAN	SAN FRANCISCO MENENDEZ
CABAÑAS	CINQUERA
	DOLORES
	JUTIAPA
CHALATENANGO	CHALATENANGO
	EL PARAISO
	LA REINA
	NUEVA CONCEPCION
	POTONICO
	SAN FRANCISCO LEMPA
	SAN LUIS DEL CARMEN
	SAN RAFAEL
	SANTA RITA
	TEJUTLA
CUSCATLAN	SUCHITOTO
LA LIBERTAD	LA LIBERTAD
LA PAZ	EL ROSARIO
	SAN LUIS LA HERRADURA
	SAN LUIS TALPA
	SAN PEDRO MASAHUAT
	SANTIAGO NONUALCO

Departamento	Distrito
	ZACATECOLUCA
LA UNION	CONCEPCION DE ORIENTE
	CONCHAGUA
	EL CARMEN
	LA UNION
	PASQUINA
	SAN ALEJO
	SANTA ROSA DE LIMA
MORAZAN	EL DIVISADERO
SAN MIGUEL	CHIRILAGUA
	EL TRANSITO
	NUEVO EDEN DE SAN JUAN
	SAN MIGUEL
	SESORI
SAN SALVADOR	EL PAISNAL
SAN VICENTE	SAN ILDEFONSO
	SAN VICENTE
	TECOLUCA
SANTA ANA	METAPAN
	SAN ANTONIO PAJONAL
SONSONATE	ACAJUTLA
USULUTAN	BERLIN
	CONCEPCION BATRES
	ESTANZUELAS
	JIQUILISCO
	JUCUARAN
	MERCEDES UMANA
	NUEVA GRANADA
	PUERTO EL TRIUNFO
	SAN AGUSTIN
	SAN DIONISIO
	USULUTAN

V. CONCLUSIONES

La combinación de imágenes de radar (Sentinel-1) y ópticas (Sentinel-2, Landsat-8 y SPOT 1-5) permitió el mapeo más robusto de las áreas inundadas durante eventos de lluvia extremos en todo el territorio. Donde, el radar fue clave para eventos con alta nubosidad y los sensores ópticos complementaron el análisis en condiciones climáticas con menos nubosidad permitiendo evaluar detalles como la presencia de sedimentos o rupturas de bordas.

La evaluación de series temporales de imágenes satelitales evidenció que algunas áreas permanecen inundadas por largos períodos (hasta más de 50 días), como en el caso de la laguna Olomega y las zonas afectadas por la ruptura de la borda del RGSM. Además, se identificaron zonas recurrentes a inundaciones, zonas que son frecuentemente afectadas por inundaciones durante un evento de lluvia extremo, lo cual es importante para la planificación territorial y estrategias de mitigación. La delimitación de las áreas máximas inundadas

permitió identificar las coberturas de suelo que son afectadas como el pasto, tierras fluctuantes, forestal y cultivos de caña de azúcar, siendo el distrito con mayor área afectada San Miguel, en el oriente del país, seguido por Suchitoto, Cuscatlán por las tierras fluctuantes del embalse cerrón grande y San Pedro Masahuat en el departamento de La Paz por desbordamientos del río Jiboa.

En varios eventos analizados, se identificaron los distritos más afectados por inundaciones, así como, el mapeo de zonas inundadas que no aparecían en los reportes oficiales, lo que sugiere que el monitoreo satelital puede ser una herramienta poderosa para complementar y mejorar los sistemas de alerta temprana y bases de datos de afectación.

REFERENCIAS

- CESAL. (2009). Emergencia en El Salvador - Tormenta Ida. https://www.cesal.org/ong/ong-cesal/emergencia-en-el-salvador---tormenta-ida_828_0_0_1_162_in.html
- EcoExploratorio. (s.f.). Tipos de Inundación. EcoExploratorio Museo de Ciencias de Puerto Rico. <https://ecoexploratorio.org/amenazas-naturales/inundaciones/tipos-de-inundacion/>. Accedido el 28 de julio de 2025.
- Escobar, E., et al. (2011). Estudio agroambiental de las tierras fluctuantes del Humedal Cerrón Grande. Documento de Trabajo. Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente.
- EOS. (2023, 7 de noviembre). Normalized Difference Water Index (NDWI). <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndwi/>
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). (2007, febrero). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation.
- Germanwatch. (2010). Global Climate Risk Index 2010: Who suffers most from extreme weather events? <https://germanwatch.org/en/cr>
- MARN. (2017). Informe Nacional del Estado y la Variabilidad del Recurso Hídrico (INERV) 2024. Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://www.marn.gob.sv>
- Joyce, K. E., Belliss, S. E., Samsonov, S. V., McNeill, S. J., & Glassey, P. J. (2009). A review of the status of satellite remote sensing and image processing techniques for mapping MARN. (2025). Eventos meteorológicos extremos que han afectado a El Salvador (datos actualizados hasta junio de 2024). Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- MARN, comunicación personal, 2024.
- Meyer, F. (2019). SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest. En N. SERVIR.
- NASA ARSET. (2017, noviembre). arset.gsfc.nasa.gov. Obtenido de https://arset.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/water/Brazil_2017/Day1/S1P2-span.pdf
- Oberstadler, R., Hönsch, H., & Huth, D. (1997). Assessment of the mapping capabilities of ERS 1 SAR data for flood mapping: A case study in the Rhine valley, Germany. Hydrological Processes, 11(10), 1415-1431. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199708\)11:10<1415::AID-HYP532>3.0.CO;2](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199708)11:10<1415::AID-HYP532>3.0.CO;2)
- PLAN Internacional,(2020). Reporte personal
- Schumann, G., Baldassarre, G. D., Alsdorf, D., & Bates, P. D. (2010). Thresholding histogram techniques for mapping inundations using SAR backscatter: Application to major

flood events. Remote Sensing of Environment, 114(7), 1369–1380.

UN-SPIDER. (s.f.). Recommended practice: Flood mapping – Step-by-step. United Nations Platform for Space-based Information for Disaster Management and Emergency Response. <https://www.un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-flood-mapping/step-by-step>

Villalobos Velásquez, A. M. (2020). Desarrollo de metodología para estimación de áreas afectadas por inundaciones utilizando Sentinel-1. Área de Investigación para la Gestión de Riesgos, Gerencia de Investigación, Desarrollo e Innovación, Dirección del Observatorio de Amenazas y Recursos Naturales, Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN).

GreenFacts. (2023, julio 13). Anegamiento. <https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/anegamiento.htm> natural hazards and disasters. International Journal of Remote Sensing, 30(7), 1627–1656.

Janfri, A. (2011). High contrast backscatter of water bodies in SAR imagery for flood detection. Journal of Remote Sensing Studies, 8(2), 45–53.

N	Fecha (UTC)	Trayectoria de adquisición de imagen
1	04 de junio 2020	Ascendente
2	08 de junio 2020	Descendente
3	10 de junio 2020	Ascendente
4	16 de junio 2020	Ascendente
5	20 de junio 2020	Descendente
6	28 de junio 2020	Ascendente
7	02 de julio 2020	Descendente
8	10 de julio 2020	Ascendente
9	14 de julio 2020	Descendente
10	22 de julio 2020	Ascendente
11	03 de agosto 2020	Ascendente

APÉNDICES

A. Tabla de imágenes Sentinel-1 utilizadas

TABLA A1:

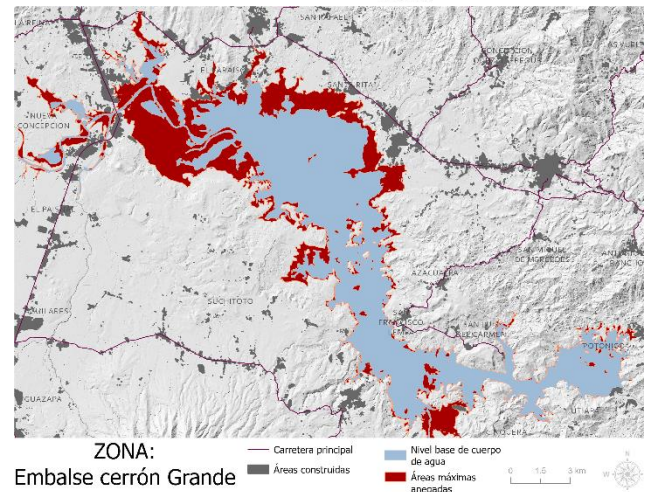
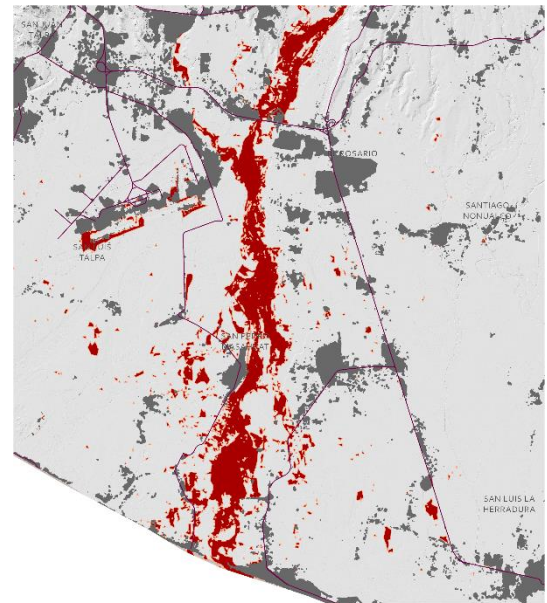
IMÁGENES SENTINEL-1 UTILIZADAS PARA ANÁLISIS DE INUNDACIONES (2018–2020).

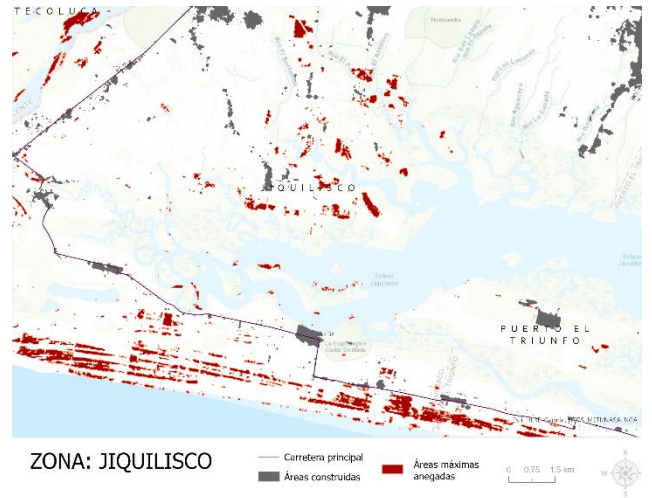
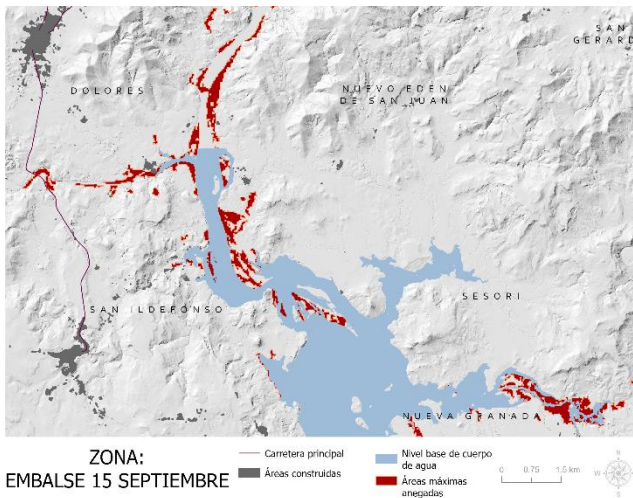
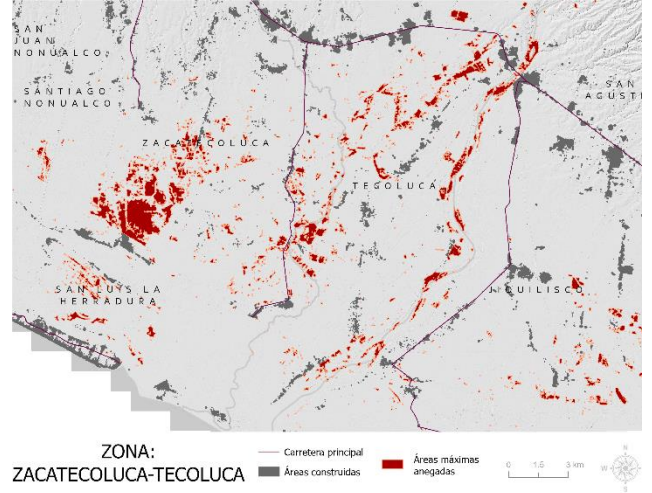
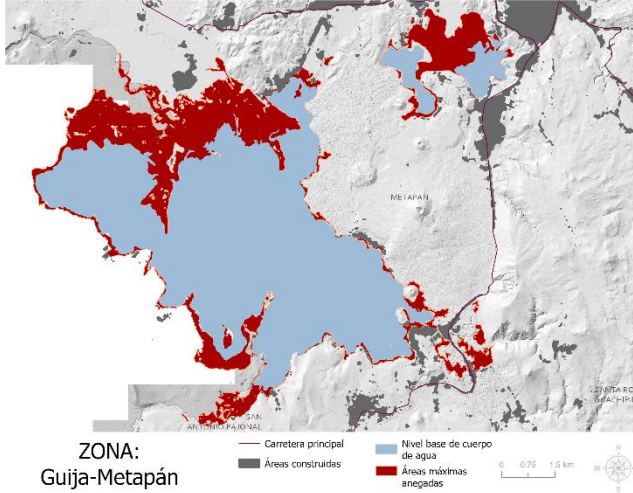
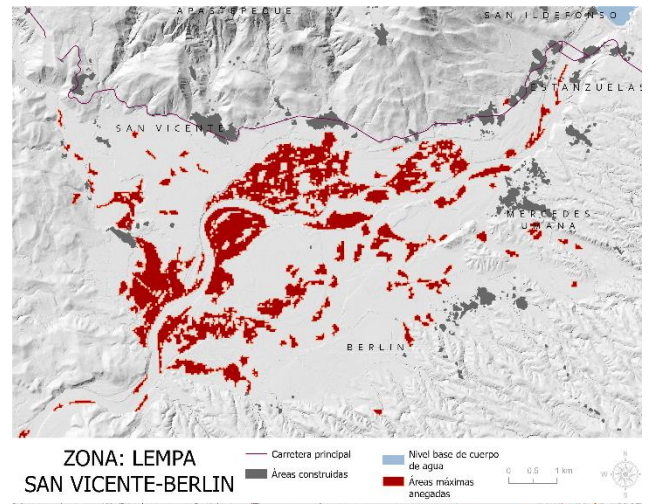
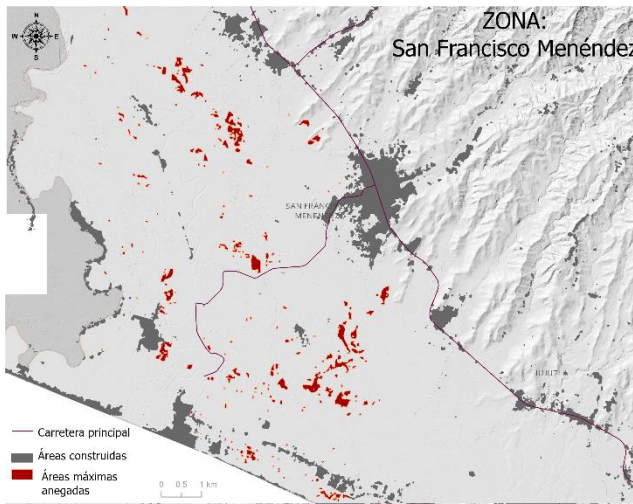
Evento	Fecha de imagen	Trayectoria	Observaciones
Mayo 2019 (EP91 y EP92)	10 marzo 2019	Ascendente	referencia
	03 abril 2019	Ascendente	referencia
	18 marzo 2019	Descendente	referencia
	30 marzo 2019	Descendente	referencia
	17 mayo 2019	Descendente	antes del evento
	21 mayo 2019	Ascendente	antes del evento
	29 mayo 2019	Descendente	durante el evento
Octubre 2018 (Michael)	04 de abril de 2018	Ascendente	antes del evento
	17 octubre 2018	Ascendente	durante el evento
Octubre 2019 (EP96 y EP97)	08 octubre 2019	Ascendente	antes del evento
	20 octubre 2019	Ascendente	durante el evento
Mayo-Junio 2020 (Cristóbal)	27 mayo 2020	Ascendente	antes del evento
	29 mayo 2020	Descendente	antes del evento
	04 junio 2020	Ascendente	después del evento
	08 junio 2020	Descendente	después del evento

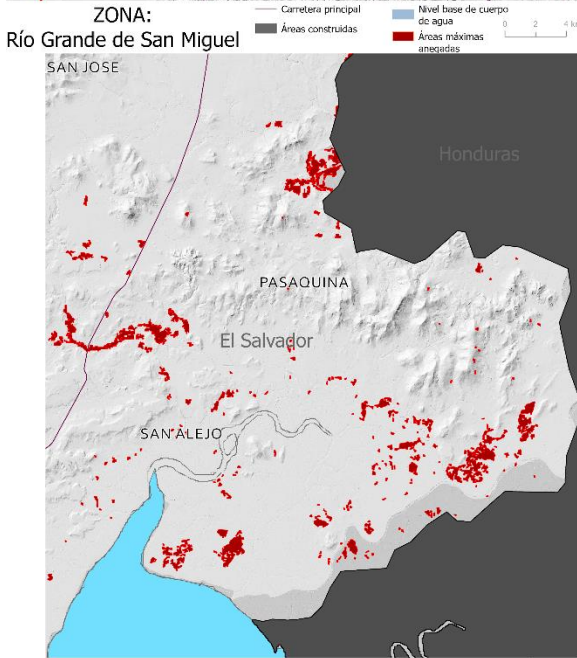
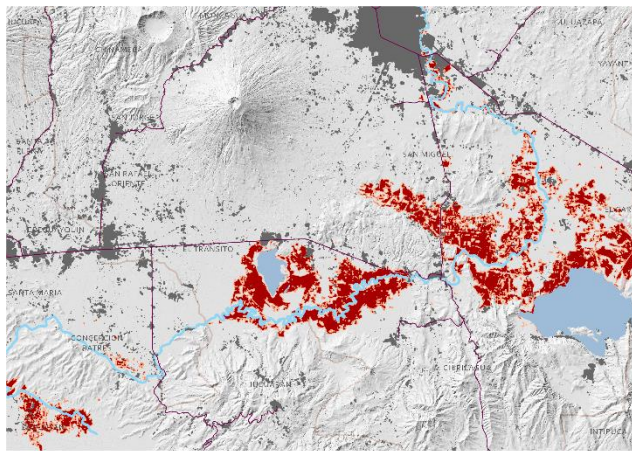
TABLA A2.

DETALLES DE LAS IMÁGENES UTILIZADAS PARA IDENTIFICAR LA DURACIÓN DE LA INUNDACIÓN O ANEGAMIENTO DE TERRENO PARA LA ZONA DE ORIENTE POR EVENTO DE AMANDA-CRISTÓBAL EN 2020.

B. Mapas de áreas máximas







C. Otros eventos

Inundaciones en río Jiboa, STAN 2005

