

GEOMÁTICA APLICADA A LA CARTOGRAFÍA DE DESASTRES EN EL CANTÓN PORTOVIEJO, MANABÍ, ECUADOR.

Geomatics applied to disaster mapping in the canton of Portoviejo, Manabí, Ecuador.

Recibido: 8/08/2024 – Revisado: 9/09/2024 - Publicado: 09/01/2025
DOI: <https://doi.org/10.56124/ubm.v6i10.018>



ene - jun 2025
Vol. 6 - Núm. 10
e-ISSN 2600-6006

Antonio Gilberto Santana Castro
<https://orcid.org/0009-0004-5422-9537>
anthony_chip_2008@hotmail.com
Universidad Técnica de Manabí.
Portoviejo, Ecuador.

Argenis de Jesús Montilla Pacheco
<https://orcid.org/0000-0001-9739-4971>
argenis.montilla@uleam.edu.ec
Universidad Laica Eloy Alfaro de
Manabí, Ecuador

Emilio José Jarre Castro
<http://orcid.org/0000-0001-8454-6163>
emilio.jarre@utm.edu.ec
Universidad Técnica de Manabí.
Portoviejo, Ecuador.



Resumen

Este trabajo tuvo como objetivo cartografiar las áreas inundadas durante las lluvias extraordinarias provocadas por el fenómeno Niño en el 2016 en el cantón Portoviejo. La metodología para identificar dichas áreas se basó en el uso de imágenes de radar Sentinel-1 por su capacidad de operar en cualquier condición climática. Se emplearon imágenes SAR en modo interferométrico antes, durante y después de la inundación. El trabajo incluyó correcciones radiométricas y geométricas de las imágenes para mejorar la precisión. Se compararon los valores de retrodispersión de las mismas para detectar áreas inundadas, utilizando el Índice de Agua SAR (SWI) y estableciendo un umbral de retrodispersión. Los resultados fueron validados con datos in situ y se generaron mapas integrados en un sistema de información geográfica (SIG) para analizar el impacto y monitorear la evolución de las inundaciones. Se encontró que para el primer trimestre del año 2016 las áreas inundadas tuvieron un impacto significativo en el territorio, con un total de 2.269.969 hectáreas afectadas; el 3% (68.097 hectáreas) se ubica en el área urbana y el 97% (2.201.872 hectáreas) en el área rural. Se concluye que las inundaciones de 2016 en dicho cantón causadas por un evento climático extremo y una gestión territorial insostenible afectaron gravemente la agricultura y la vida urbana, lo cual pone en evidencia la necesidad de mejorar la gestión del espacio, implementar medidas estructurales y fomentar prácticas sostenibles para mitigar el impacto de futuros fenómenos extremos.

Palabras clave: Cartografía de zonas de desastres; fotogrametría digital; sistemas de información geográfica.

Abstract

This work aimed to map the areas flooded during the extraordinary rains caused by the El Niño phenomenon in 2016 in the Portoviejo canton. The methodology to identify these areas was based on the use of Sentinel-1 radar images for their ability to operate in any weather condition. SAR images were used in interferometric mode before, during and after the flood. The work included radiometric and geometric corrections of the images to improve accuracy. Their backscatter values were compared to detect flooded areas, using the SAR Water Index (SWI) and establishing a backscatter threshold. The results were validated with in situ data and maps were generated integrated into a geographic information system (GIS) to analyze the impact and monitor the evolution of floods. It was found that for the first quarter of 2016 the flooded areas had a significant impact on the territory, with a total of 2,269,969 hectares affected; 3% (68,097 hectares) are located in urban areas and 97% (2,201,872 hectares) in rural areas. It is concluded that the 2016 floods in that canton caused by an extreme weather event and unsustainable territorial management seriously affected agriculture and urban life, which highlights the need to improve space management, implement structural measures and promote sustainable practices to mitigate the impact of future extreme events.

keywords: Mapping disaster areas; digital photogrammetry; geographic information systems.

Introducción

A escala global, las áreas urbanas y rurales enfrentan desafíos crecientes debido a la intensificación de fenómenos naturales que provocan desastres con afectación a los grupos humanos, como inundaciones, deslizamientos de tierra en grandes volúmenes y otras alteraciones ambientales (Córdova, 2020). Estos desastres resultan de la combinación de factores naturales y humanos gracias a las modificaciones en el uso del suelo y el impacto del cambio climático, a lo que, en muchas ciudades se suman procesos acelerados de crecimiento urbano sin la debida planificación.

En Ecuador, la vulnerabilidad ante desastres socio-naturales se ve reflejada especialmente en las ciudades de mayor tamaño, a modo de ejemplo, Villavicencio et al. (2024) señalan que la parroquia urbana Calderón, localizada en el Distrito Metropolitano de Quito, muestra una dinámica espacial caracterizada por procesos de expansivos notables que provocan la erosión del suelo y aumentan la vulnerabilidad de la población ante la ocurrencia de eventos naturales adversos.

Así mismo, en Portoviejo, capital de la provincia de Manabí, se han identificado áreas específicas afectadas por desastres naturales. Este centro urbano enfrenta una serie de retos asociados a determinadas características geográficas; por una parte, está atravesada por el río Portoviejo, lo que incrementa el riesgo de inundaciones durante períodos de lluvias intensas (Salazar et al., 2022); pero además, la inestabilidad de sus suelos y la escasa cobertura vegetal aceleran la erosión, y desencadena movimientos de tierra con afectaciones en la red de drenaje y alcantarillado, convirtiéndose en un riesgo significativo para la infraestructura y la seguridad de la población.

Estudios realizados en Portoviejo (Rodríguez y Hernández, 2023), han encontrado mal funcionamiento de los sistemas de drenaje como consecuencia del cambio climático que ha modificado el régimen de precipitaciones y el incremento de los caudales, con efectos negativos en la integridad de la estructura vial y de la población.

Para conocer con precisión dicha problemática, y contribuir en su mitigación, es posible aplicar la geomática, disciplina que abarca un conjunto de herramientas informáticas apropiadas para manejar datos espaciales relacionados principalmente con la investigación en el campo de las ciencias de la Tierra y el ambiente (Rojas, 2019). Esta ha evolucionado y se ha fusionado a partir de una variedad de programas informáticos que de forma integrada ayudan en el estudio de aspectos sociales y ambientales.

Dentro de la geomática, el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) constituye una innovación. A pesar que sus inicios se remontan al año 1966, es en los últimos 20 años cuando experimentan un rápido crecimiento en términos teóricos, tecnológicos y organizativos, por lo que, han sido ampliamente adoptados tanto para asuntos de planificación, como en los ámbitos académico y científico, y es hoy una herramienta indispensable para la investigación de fenómenos que ocurren en el espacio geográfico.

Gutiérrez et al. (2014) destacan la importancia del uso de técnicas como la fotogrametría, teledetección y LiDAR, para estudios multitemporales y de gestión de riesgos y administración de desastres, entre tanto, Pacheco et al. (s.f), sostienen que la geomática se encarga de la ingeniería aplicada para la recolección y manejo de información geográficamente referenciada, y añaden que su desarrollo ha experimentado un avance significativo con el uso de los Sistemas de Información Geográficos e imágenes remotas.

En concordancia con lo que antecede, las imágenes satelitales provenientes del programa Sentinel de la Agencia Espacial Europea (ESA) se presenta como un recurso apropiado para evaluar y cartografiar áreas susceptibles a desastres. Los satélites Sentinel, equipados con sensores de alta resolución crean imágenes multiespectrales idóneas para monitorear cambios en la cobertura del suelo, evaluar la dinámica de los cuerpos de agua, identificar áreas de erosión, y lugares susceptibles a la ocurrencia de desastres.

Dichas imágenes suministran datos detallados sobre la topografía, la vegetación y el uso del suelo, claves para la identificación de zonas de riesgo y para la elaboración de modelos predictivos. Su capacidad para ofrecer datos periódicos y en tiempo casi real es decisiva para la gestión proactiva de riesgos y la planificación efectiva de medidas preventivas (Donezar et al., 2017; Mercado, 2023).

En este estudio se utilizaron imágenes del satélite Sentinel-1 y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para cartografiar a nivel de detalle los espacios víctima de desastres de inundación en el cantón Portoviejo. Este satélite, como parte del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea, se distingue por su capacidad para producir imágenes mediante la emisión de ondas, al estar equipado con un radar de apertura sintética (SAR, Synthetic Aperture Radar), Sentinel-1 captura imágenes detalladas (Donezar et al., 2017), y constituye, por ello, una ventaja significativa para diversas aplicaciones.

Una de las características más destacadas del radar SAR es su independencia de las condiciones meteorológicas (Barbáchano, 2021). A diferencia de los sensores ópticos, al SAR le es posible operar eficazmente en cualquier condición climática, ya que las ondas de radar tienen la capacidad de penetrar las nubes y no dependen de la luz solar. Esto hace viable la observación continua y confiable sin importar el tiempo o la hora del día.

De igual manera, Sentinel-1 produce imágenes durante el día y la noche, y posibilita el monitoreo constante de fenómenos naturales y cambios en la cobertura del suelo. Esta capacidad de observación nocturna amplía su rango de aplicaciones y facilita una vigilancia ininterrumpida.

El radar SAR de Sentinel-1 también ofrece una alta resolución espacial que puede estar entre 5 y 20 metros (Vidal et al., 2019), de tal manera, detecta detalles pequeños en la superficie terrestre. Esta alta resolución es particularmente útil para la observación

de eventos como deslizamientos de tierra, inundaciones y otras alteraciones del terreno, facilitando una evaluación precisa de los desastres.

Al hacer una integración de los datos de suelo y cobertura vegetal obtenidos con estas imágenes, es viable ofrecer una evaluación detallada de las áreas vulnerables. Los mapas resultantes ponen a disposición del usuario información de interés para la planificación urbana y la gestión de riesgos; y en consecuencia, mejoran la capacidad de las autoridades locales para enfrentar y mitigar los impactos de los desastres.

El objetivo de esta investigación fue generar cartografía de áreas sometidas inundaciones y en Portoviejo durante el evento del Niño Oscilación sur (ENSO, por sus siglas en inglés) del año 2016 a través de la integración de técnicas de fotogrametría digital y sistemas de información geográfica (SIG).

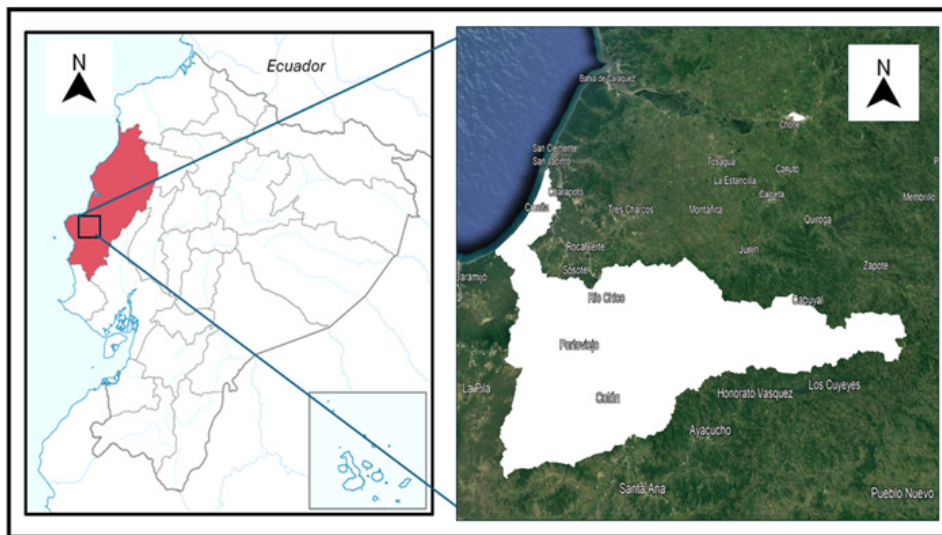
Metodología

Características del área de estudio

El área de estudio fue el cantón Portoviejo, provincia de Manabí, Ecuador. Este forma parte de la región costera del país y se localiza en ambos márgenes del río del mismo nombre, entre las coordenadas 1° 0' 36" y 1° 5' 41" S de latitud; y 80° 25' 21" y 80° 29' 29" W de longitud. Una porción de su territorio se encuentra en la franja costera del océano Pacífico (Figura 1), lo que le confiere una ubicación estratégica en el espacio ecuatoriano.

Figura 1.

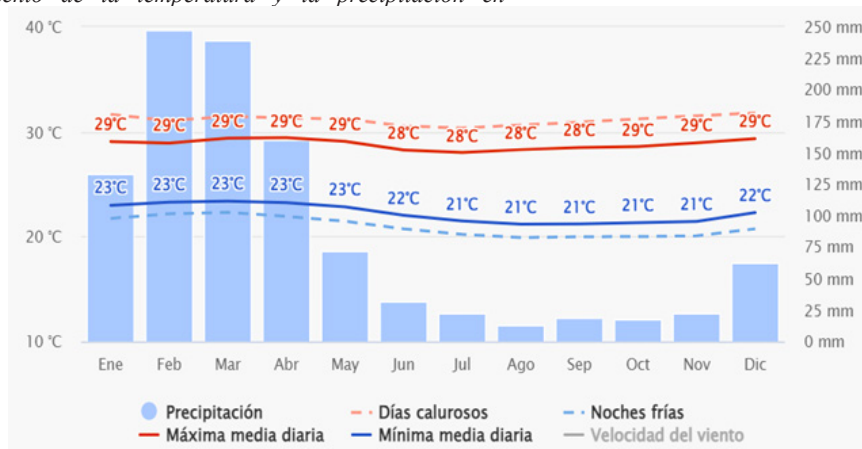
Localización del cantón Portoviejo, provincia de Manabí, Ecuador.



Portoviejo posee un clima tropical caracterizado por temperaturas cálidas durante todo el año, con promedios que rondan los 25-30°C (Figura 2). Las precipitaciones se producen en una temporada que se extiende de diciembre a abril, mientras que de mayo a noviembre se produce el periodo de sequía (Mendoza et al., 2019).

Figura 2.

Comportamiento de la temperatura y la precipitación en Portoviejo.



Fuente: https://www.meteo-blue.com/es/tiempo/history-climate/climatemodelled/portoviejo_ecuador_3652941

Según Chávez et al. (2008) el cantón Portoviejo se sitúa en una cuenca sedimentaria cuyo eje anticlinal se extiende en dirección de noreste a suroeste. Agregan que en el límite sur-suroeste de esta cuenca, se observa un cambio estructural significativo por la presencia de diversas fallas geológicas. En el valle del río que atraviesa el cantón se han acumulado depósitos aluviales con espesor de entre 10 y 40 metros, producto de la sedimentación que ocurre en el curso del río, están compuestos principalmente de fragmentos de lutitas y limonitas que se han desprendido en las pendientes y se ha acumulado posterior a procesos de erosión (Aguilar y Mieles, 2016).

Procesamiento y análisis de las imágenes de satélite

La metodología utilizada para identificar áreas inundadas con imágenes de radar Sentinel-1 se fundamentó en la capacidad que tiene este satélite para capturar datos en cualquier condición climática (Donezar-Hoyos et al., 2017), debido a que opera mediante microondas y permite observar la superficie terrestre con cielos nublados e incluso durante la noche. Se emplearon imágenes en modo interferométrico de apertura sintética (SAR), obtenidas antes, durante y después del evento de inundación, lo que facilitó el análisis de la evolución del fenómeno.

El proceso comenzó con el preprocesamiento de las imágenes, una etapa determinante para garantizar la precisión de los resultados. En primer lugar, se aplicó una corrección radiométrica para el ajuste de los datos del radar y su transformación en coeficientes de retrodispersión (σ^0). Posteriormente, para mejorar la precisión espacial se llevó a cabo la corrección geométrica, necesaria para ajustar las distorsiones causadas por la geometría del satélite (Cerrillo, 2020) utilizando un modelo de elevación digital (DEM). Además, se aplicó un filtro con la intención de reducir el ruido característico de dichas imágenes y mejorar su calidad visual. Después, las imágenes fueron proyectadas a un sistema de coordenadas geográficas para su correcta interpretación cartográfica.

Una vez finalizado el preprocesamiento, se procedió a la detección de las áreas inundadas. Para ello, se compararon los valores de retrodispersión de las imágenes obtenidas antes y después del evento de inundación, observándose que las superficies cubiertas por agua reducían notablemente los valores de retrodispersión. Para refinar esta detección, se calculó el Índice de Agua SAR (SAR Water Index, SWI), que combinaba ambas bandas para resaltar las áreas inundadas. Adicionalmente, se estableció un umbral de retrodispersión que ayudó a diferenciar automáticamente las áreas anegadas de las áreas secas, utilizando en algunos casos el método de Otsu, que a criterio de García-Martínez et al. (2020) resulta apropiado para determinar de forma precisa este umbral. Los resultados fueron validados mediante la comparación con datos in situ y otras fuentes de información, como imágenes ópticas de alta resolución (Sentinel-2) y registros hidrológicos locales. Esta validación fue fundamental para garantizar la precisión del análisis en zonas con vegetación densa, donde la detección del agua mediante radar podía presentar dificultades.

Adicionalmente, se generó la cartografía que muestra la superficie

de áreas inundadas; esta se integró en un sistema de información geográfica (GIS) para su análisis espacial y la evaluación del impacto, y fue utilizada para monitorear la evolución temporal de las inundaciones, y con ello, entender la dinámica del fenómeno y ofrecer información clave para la toma de decisiones en la gestión de riesgos.

En esta investigación se trabajó en la plataforma Google Earth Engine, con el código de programación descrito en el anexo 1. Este está estructurado para realizar la detección de áreas inundadas utilizando imágenes de radar Sentinel-1. El uso de polarización, junto con el suavizado y la aplicación de umbrales ayuda a identificar los cambios en el terreno debido a inundaciones (Morrill-Monzó y Garófano-Gómez, 2022).

Adicionalmente dicho código implicó el cálculo de la diferencia entre las imágenes suavizadas antes y después de la inundación, dividiendo las imágenes en pre-evento y post-evento. Se estableció un umbral de diferencia para identificar las áreas que han cambiado significativamente; aquellas con un valor de diferencia mayor a 1.25 son consideradas inundadas y se visualizan en color azul. El umbral establecido (1.25) permitió resaltar las áreas con mayor probabilidad de haber experimentado un aumento en la humedad superficial o la acumulación de agua, mientras que la actualización de la máscara (updateMask) asegura que solo las áreas que cumplen con el umbral sean visibles, lo que facilita la interpretación visual.

Finalmente, la exportación de los resultados facilitó un análisis más profundo o su integración en otros sistemas de información geográfica (SIG), lo que deja entender que las áreas que superan el umbral definido resultan las más afectadas por la acumulación de agua; hecho particularmente útil en regiones donde la nubosidad impide el uso de imágenes ópticas.

Resultados

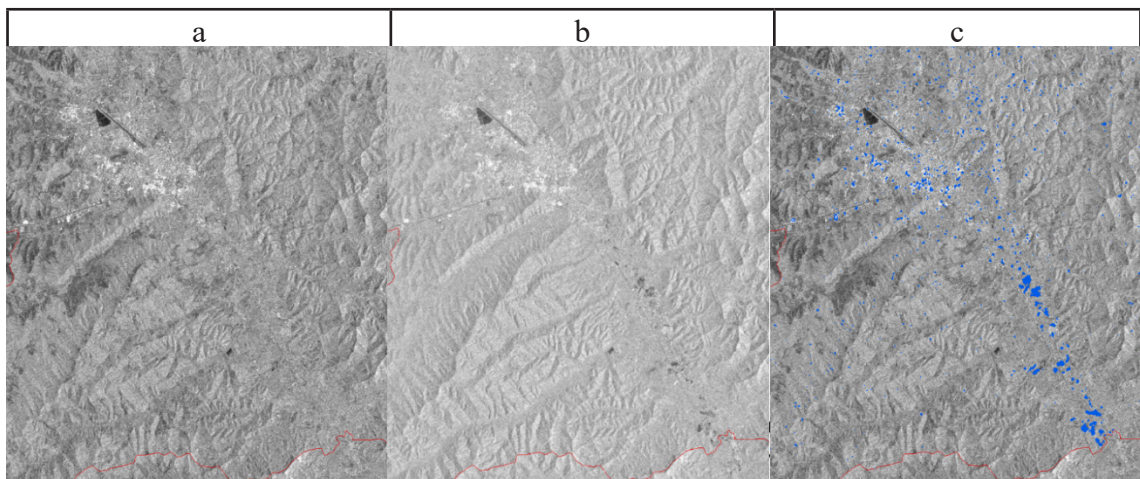
Las imágenes de radar de apertura sintética (SAR) proporcionadas por los satélites Sentinel-1 son valiosas para estimar áreas inundadas, especialmente en situaciones de nubes densas y precipitaciones intensas (Martínez, 2023), como las registradas en Portoviejo durante el primer trimestre de 2016. La utilización de estas imágenes posibilita la cuantificación precisa de las áreas afectadas por inundaciones. En este caso, el uso de las mismas con tecnología radar de apertura sintética (SAR) es particularmente útil, ya que las condiciones de nubosidad asociadas a las lluvias intensas no interfieren con la adquisición de datos, a diferencia de las imágenes ópticas.

Este tipo de análisis facilita la identificación de cuerpos de agua en expansión y aporta información de interés para la toma de decisiones en tiempo real durante eventos extremos, y facilitan la identificación rápida de áreas afectadas y la optimización de respuesta ante desastres.

En abril de 2016 se produjeron lluvias extraordinarias en Manabí (Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, 2017), que sumadas

a la topografía del cantón Portoviejo y la expansión urbana sin planificación adecuada, provocaron graves inundaciones con afectación en áreas rurales y urbanas. La figura 3 muestra imágenes de radar antes y después del evento de inundaciones, las áreas inundadas corresponden a las manchas de color azul que se observan en esta figura, generadas por el algoritmo en la plataforma Google earth engine.

Figura 3. Imágenes de radar antes y después del evento de inundaciones (a y b), y las áreas inundadas como consecuencia del mismo (c).



El análisis de las áreas inundadas (Tabla 1), correspondiente al primer trimestre del año 2016, reveló un impacto significativo en el territorio, con un total de 2.269.969 hectáreas afectadas, de las cuales, apenas el 3% (68.097 hectáreas) se ubican en el área urbana, mientras que el 97% (2.201.872 hectáreas.) corresponden a espacios rurales.

Tabla 1. Áreas rurales y urbanas inundadas en Portoviejo durante el año 2016.

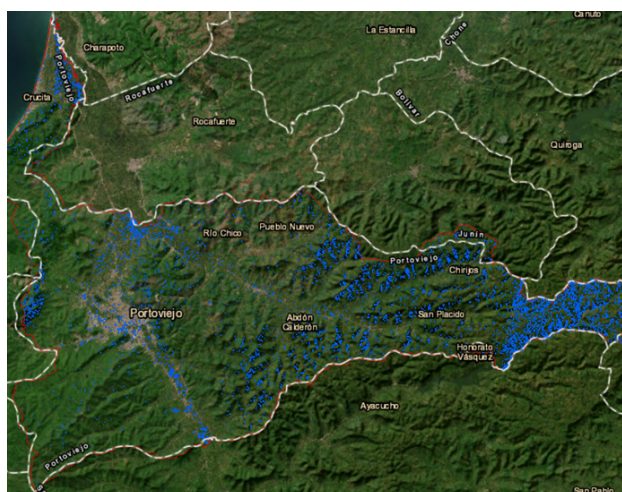
Cantón	Total superficie inundada (ha)	Área urbana inundada (ha)	%	Área rural inundada (ha)	%
Portoviejo	2.269.969	68.097	3,00	2.201.872	97,00

Fuente: elaboración propia.

Este fenómeno está directamente relacionado con las lluvias extraordinarias registradas en el primer trimestre de 2016, como parte de los efectos del ENSO, que intensificó las precipitaciones en la región y consecuentemente provocaron desbordamientos de ríos, con afectaciones principalmente en las zonas rurales y agrícolas, debido a varios factores socioambientales y de planificación territorial.

La figura 4 muestra las áreas afectadas por inundaciones en el cantón Portoviejo como consecuencia de las lluvias extraordinarias ocurridas durante el primer trimestre de 2016, atribuidas al mencionado ENSO. Las manchas azules que se observan en la figura representan las zonas afectadas por los desbordamientos de cuerpos de agua, destacándose las áreas rurales en las cercanías de los principales ríos de la provincia.

Figura 4. Distribución espacial de las inundaciones en el cantón Portoviejo en el 2016.



Fuente: elaboración propia. Cartografía base cortesía de Google earth.

El cantón Portoviejo, cuya capital homónima se identifica en el centro de la imagen, presenta un patrón de inundaciones concentrado en sus zonas rurales, particularmente al sur y este de la ciudad. Las áreas urbanas, aunque también afectadas, presentan una menor concentración de manchas azules en comparación con los espacios rurales.

Los ríos Chico y Portoviejo son los principales cuerpos de agua de la provincia, y a lo largo de sus márgenes se observan extensas zonas inundadas. Estas áreas, generalmente dedicadas a la actividad agropecuaria, fueron severamente afectadas por el desbordamiento de los cursos de agua, resultado directo de la elevada pluviometría registrada durante el evento meteorológico. El mapa (Figura 4) pone en evidencia que las inundaciones siguen el curso de estos ríos, afectando valles y planicies aluviales que carecen de protecciones naturales o artificiales suficientes.

Hacia el noroeste, en las cercanías de la parroquia Crucita, ubicada en la costa, se aprecia una notable concentración de áreas inundadas. La geografía de Crucita determina una zona de baja altitud cercana a la desembocadura del río Portoviejo, y la hace particularmente vulnerable a este tipo de fenómenos, sumado a la anárquica expansión urbana y agrícola en áreas próximas a las riberas de ese curso de agua.

Por otro lado, las zonas rurales, particularmente en los sectores de San Plácido, Junín, y Honorato Vásquez, localizadas en la parte oriental del cantón muestran una alta incidencia de áreas inundadas. Estas áreas, predominantemente agrícolas, destacan por su ubicación en las proximidades de ríos y en superficies planas, lo que facilitó la acumulación de aguas pluviales y fluviales. Este impacto fue significativo para la economía rural, pues afectó directamente a las tierras dedicadas al cultivo y la ganadería, resultando en pérdidas considerables en la producción. La mayor parte del área inundada se concentra en la zona rural, donde las actividades agropecuarias predominan, mas que todo en las riveras de los afluentes de los ríos Chico y Portoviejo. Las prácticas agrícolas intensivas en estas áreas, combinadas con la deforestación (López, 2024), y la consecuente expansión de la frontera agrícola, han reducido notablemente la capacidad del suelo y la vegetación para absorber el agua de lluvia. Esto incrementa la escorrentía superficial, acelera la saturación de los suelos y aumenta el caudal de agua que los ríos debieron drenar durante el evento de lluvia intensa.

La falta de prácticas sostenibles en el uso del suelo y la tala en las riveras también contribuyeron al deterioro de las zonas de amortiguamiento natural que normalmente ayudan a mitigar el impacto de precipitaciones intensas. Estas áreas deforestadas, al no poder frenar ni absorber el agua, se convirtieron en puntos vulnerables a las inundaciones. Además, la infraestructura rural, compuesta principalmente de caminos y canales de drenaje rudimentarios, no estuvo preparada para manejar un volumen tan elevado de agua, lo que exacerbó la magnitud de las inundaciones. Las parcelas agrícolas se vieron afectadas, con lo que generó pérdidas económicas y problemas de seguridad alimentaria, sobre todo porque estas tradicionalmente contribuyen a la producción

de alimentos básicos para el consumo local.

En contraste, el área urbana, aunque menos afectada en términos de extensión (solo el 3%), también experimentó consecuencias significativas. Las 68.097 hectáreas urbanas inundadas se concentran en sectores bajos o cercanos a las riveras de los ríos que atraviesan el cantón. Las deficiencias en el urbanismo y la falta de planificación del crecimiento de la ciudad contribuyeron a estas inundaciones.

Durante las últimas décadas, el rápido crecimiento urbano ha llevado a la construcción de viviendas e infraestructuras en áreas de riesgo, cercanas a los cursos fluviales y sin un adecuado sistema de drenaje. La impermeabilización del suelo urbano, a través de la pavimentación y la construcción de edificaciones, ha reducido la capacidad de infiltración del agua de lluvia, lo que agravó las inundaciones en la ciudad. A pesar de que las áreas urbanas solo representaron una pequeña parte del total de la superficie inundada, el impacto fue considerable para la población debido a la elevada densidad demográfica y el número de propiedades afectadas.

Discusión

El urbanismo deficiente, la falta de un sistema de drenaje adecuado y la expansión urbana hacia zonas vulnerables aumentaron la susceptibilidad de Portoviejo a las inundaciones, entre tanto, en el área rural, la deforestación y las prácticas agropecuarias sin medidas de conservación de suelo y de agua agudizaron el problema. La combinación de estos factores creó un entorno propicio a las inundaciones en ambas áreas, exacerbado por las lluvias intensas.

Para abordar de cara al futuro el problema de las inundaciones en Portoviejo, debido a las lluvias extraordinarias y agravado por prácticas insostenibles en áreas rurales y urbanas, es fundamental implementar una serie de alternativas orientadas tanto a la mitigación de riesgos como a la adaptación sostenible. A continuación, se proponen varias soluciones estructurales y no estructurales para reducir la vulnerabilidad ante futuros eventos de precipitaciones intensas:

1. Reforestación y manejo sostenible de cuencas hidrográficas
Una de las causas principales de las inundaciones en las áreas rurales es la deforestación en las riveras de ríos y cuencas altas, esta reduce la capacidad del suelo para absorber y retener agua. Para mitigar este efecto, es esencial promover la reforestación en las áreas críticas, utilizando especies nativas que favorezcan la infiltración y controlen la erosión. Igualmente, debe implementarse un manejo sostenible de las cuencas que incluya prácticas de conservación ambiental, como la agricultura de conservación (uso de terrazas, cultivos de cobertura, rotación de cultivos) y la restauración de humedales para actuar como zonas de amortiguamiento natural, capaces de almacenar agua durante eventos de lluvias extraordinarias.

2. Mejoras en la infraestructura agrícola y rural

La infraestructura rural, principalmente los sistemas de drenaje en zonas agrícolas, requiere mejoras sustanciales. Se pueden implementar sistemas de drenaje subterráneo o zanjas filtrantes para manejar de manera más eficiente el exceso de agua en épocas de lluvias, evitando la saturación de los suelos y las consecuentes inundaciones. También es importante diseñar y construir canales de desviación que redirijan el flujo de agua lejos de áreas agrícolas y poblaciones vulnerables, en combinación con la creación de reservorios o embalses de captación, que sirvan para mitigar inundaciones y almacenar agua para riego en temporadas secas.

3. Regulación del uso del suelo y planificación urbana

En el ámbito urbano, una de las medidas clave es la regulación del uso del suelo. Esto implica prohibir la construcción en áreas propensas a inundaciones, sobre todo en las cercanías de ríos y terrenos bajos, y establecer zonas de protección a lo largo de las riveras. Es fundamental que las nuevas construcciones se realicen considerando estudios de riesgo ambiental y la capacidad del terreno para manejar la escorrentía superficial. Se debe fomentar un crecimiento urbano planificado, que incluya la creación de parques y áreas verdes que actúen como esponjas naturales para el agua de lluvia. Del mismo modo, es prioritario que las futuras expansiones urbanas incluyan sistemas de drenaje pluvial sostenible, como los techos verdes y pavimentos permeables.

4. Fortalecimiento de la infraestructura de drenaje urbano

En las zonas urbanas afectadas, se requiere una revisión integral de la infraestructura de drenaje. El sistema actual es insuficiente para manejar grandes volúmenes de agua de lluvia, por lo que es necesario construir y modernizar los sistemas de drenaje pluvial. Esto incluye la instalación de colectores pluviales más grandes y eficientes, así como la creación de tanques de retención que almacenen el agua de lluvia en las horas pico y la liberen de manera controlada.

5. Sistemas de alerta temprana y educación comunitaria

Un sistema de alerta temprana ante lluvias intensas y desbordamientos de ríos podría reducir significativamente el impacto de las inundaciones, permitiendo a la población tomar medidas preventivas antes de que el agua alcance niveles críticos. Este sistema debe estar integrado con el pronóstico meteorológico y contar con canales de comunicación efectivos para advertir a la población a tiempo. A nivel comunitario, es esencial implementar programas de capacitación y concienciación para que la población rural y urbana conozca los riesgos de inundaciones y las medidas preventivas que pueden adoptar. Esto incluye la enseñanza de técnicas de protección del suelo en las áreas agrícolas y la difusión de información sobre cómo prepararse ante emergencias.

6. Promoción de la agricultura resiliente al clima

Para reducir la vulnerabilidad de las actividades agropecuarias frente a las inundaciones, es fundamental promover una agricultura resiliente al clima. Esto implica introducir prácticas agrícolas más adaptadas a las condiciones locales y menos dependientes de la alteración del entorno natural. El uso de variedades de cultivos tolerantes a inundaciones, la diversificación de cultivos y el manejo integrado de los recursos hídricos contribuyen

a que los agricultores sean más resistentes ante eventos climáticos extremos. Al mismo tiempo, es pertinente promover la construcción de sistemas de riego eficientes que optimicen el uso del agua, evitando tanto su exceso como su déficit, y que puedan ser gestionados durante y después de episodios de lluvias extraordinarias.

Por otra parte, para optimizar el uso de radar en la gestión de inundaciones, el desarrollo de sistemas de monitoreo continuo es fundamental, a tales efectos se debe implementar un sistema de monitoreo permanente basado en imágenes de radar para anticiparse a futuros eventos de inundación. Esto incluye el desarrollo de algoritmos automatizados capaces de analizar imágenes SAR en tiempo real y alertar a las autoridades y comunidades sobre posibles desbordamientos.

En consonancia con lo que señala Rey (2022), la integración de imágenes radar con otras fuentes de datos permitiría desarrollar un sistema integral de alerta temprana que cuantifique el agua acumulada y que proyecte el impacto de futuras precipitaciones, para lo cual, se requiere capacitar a los técnicos locales en el uso de esas imágenes y en análisis satelital, de tal manera que sean capaces de realizar estudios de campo y validaciones en tiempo real. Esto fortalecerá la capacidad de respuesta ante desastres naturales y conducirá a una gestión más efectiva de los recursos hídricos.

Conclusiones

Las inundaciones de 2016 en Portoviejo fueron el resultado de un evento climático extraordinario, pero su magnitud se vio amplificada por una gestión insostenible del territorio, tanto en áreas rurales como urbanas. Los efectos fueron devastadores para la agricultura, que sufrió las mayores pérdidas en el área rural, mientras que, en la zona urbana, aunque el área inundada fue menor, el impacto en la vida de los habitantes fue significativo.

A través de la aplicación de umbrales específicos para diferenciar las áreas inundadas de las no inundadas, se pudo realizar una clasificación precisa. En este caso, las imágenes antes del evento (marzo 2016) fueron comparadas con las obtenidas después de las lluvias (abril 2016), identificando cambios en las superficies afectadas por el agua.

Tras procesar las imágenes y aplicar los índices se generó la cartografía que muestra la extensión exacta de las áreas inundadas en el cantón Portoviejo. Se determinó que un total de 2.269.97 hectáreas fueron afectadas por las inundaciones, de estas, la mayor parte se ubica en áreas rurales destinadas a la agricultura,

El análisis espacial de las inundaciones en Portoviejo durante el 2016 pone de manifiesto la necesidad de mejorar la gestión territorial en las áreas urbanas y rurales. Ante ello, es fundamental implementar medidas estructurales, como la construcción de diques y la mejora de la infraestructura de drenaje, con énfasis en las zonas agrícolas que han mostrado ser las más vulnerables.

Referencias

- Aguiar, R., & Miele, Y. (2016). Análisis de los edificios que colapsaron en Portoviejo durante el terremoto del 16 de abril de 2016. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 21(3), 257-282. <https://doi.org/10.24133/riie.v21i3.601>
- Barbáchano, R. M. (2021). Estimación de la subsidencia en el Valle Central (Costa Rica) mediante interferometría diferencial con radar de apertura sintética. *Investigaciones Geográficas*, (62), 106-116. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9057697>
- Cerrillo, R. M. N., Martínez, M. Á. V., & Salamanca, A. J. A. (2020). Sensores, acceso y procesamiento de imágenes multispectrales y térmicas de interés forestal. *Geociencias aplicadas a la gestión forestal*, 137. <https://acortar.link/WK1uML>
- Chávez-Moncayo, M. Á., Blanco-Torrens, R., & Watson-Quesada, R. (2008). Estabilización de taludes en el río Portoviejo, Ecuador. *Minería y Geología*, 24(3), 9-9. <https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/61>
- Córdova Aguilar, H. (2020). Vulnerabilidad y gestión del riesgo de desastres frente al cambio climático en Piura, Perú. *Semestre económico*, 23(54), 85-112. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0120-63462020000100085&script=sci_arttext
- Donezar-Hoyos, U., Larrañaga-Urien, A., Tamés-Noriega, A., Sánchez-Gil, C., Albizua-Huarte, L., Ciriza-Labiano, R., & del Barrio-Arellano, F. (2017). Aplicación de imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 en la detección y delimitación de información de crisis de desastres naturales en el marco de los servicios Copernicus EMS. *Revista de Teledetección*, (50), 49-57. <https://polipapers.upv.es/index.php/raet/article/view/8896/9123>
- García-Martínez, H., Flores-Magdaleno, H., Khalil-Gardezi, A., Ascencio-Hernández, R., Tijerina-Chávez, L., Vázquez-Peña, M. A., & Mancilla-Villa, O. R. (2020). Estimación de la fracción de cobertura de la vegetación en maíz (*Zea mays*) mediante imágenes digitales tomadas por un vehículo aéreo no tripulado (UAV). *Revista fitotecnología mexicana*, 43(4), 399-409. https://scholar.google.es/scholar?as_ylo=2020&q=m%C3%A9todo+otsu&hl=es&as_sdt=0,5
- Gutiérrez, A. J., Peña, J. V. P., & Carrillo-Rosúa, J. (2014). Integración de las Tecnologías Geoespaciales como herramientas docentes de Ciencias de la Tierra en Enseñanza Secundaria. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 22(3), 239-239. <https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as>
- López Álava, G. A., Cedeño Sacón, A. F., Párraga Palacios, Á. G., Cedeño García, G. A., Reyna Bowen, J. L., & del Rocío Velásquez Cedeño, S. (2024). Percepción remota en las cuencas hidrográficas de Portoviejo-Chone para el estudio de la deforestación. *Ciencia y Tecnología*, 17(2), 47-54. <https://openurl.ebsco.com/EPDB%3Agcd%3A2%3A30487026/>
- Martínez Barbáchano, R. (2023). Estimación de la superficie afectada por inundaciones mediante polarimetría con imágenes radar de apertura sintética (SAR) Sentinel 1A en la cuenca hidrográfica del río Frío (Costa Rica). *Revista Geográfica de América Central*, (70), 273-296. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S2215-25632023000100273&script=sci_arttext
- Mendoza, J., García, K., Salazar, R., & Vivanco, I. (2019). La Economía de Manabí (Ecuador) entre las sequías y las inundaciones. *Espacios*, 40(16), 10.25. <http://es.revistaespacios.com/a19v40n16/a19v40n16p10.pdf>
- Mercado, F. (2023). Zonas susceptibles a remoción en masas en el municipio de Tenango del Valle (México 2023). *Revista Humanismo y Cambio Social: revista electrónica de humanidades y ciencias sociales*, (22), 89-108. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9513706>
- Morell-Monzó, S., & Garófano-Gómez, V. (2022). Investigación del abandono de tierras en la comarca de La Safor (Comunitat Valenciana) utilizando datos Sentinel-2. *CDR La Safor, Beniarjó, Valencia*. <https://www.coceder.org/wp-content/uploads/2023/01/Abandonament-terres-Safor-Marc-MorellMonzo-Virginia-Garofano-Gomez.pdf>
- Pacheco, H., Cartaya, S., Méndez, W., Carrera, J., & Suárez, C. (s.f). La Geomática en la enseñanza de las ciencias en el Instituto Pedagógico de Caracas. https://www.researchgate.net/profile/Williams-Mendez-Mata/publication/266265046_La_Geomatica_en_la_ensenanza_de_las_ciencias_en_el_Instituto_Pedagogico_de_Caracas/links/545f9bd20cf27487b450a895/La-Geomatica-en-la-ensenanza-de-las-ciencias-en-el-Instituto-Pedagogico-de-Caracas.pdf
- Rey, M. C. (2022). La información espacial aplicada en la gestión de riesgo de desastre. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 58(2). <https://www.revistaterraaustralis.cl/index.php/rgch/article/view/133>
- Rodríguez, M. A. V., & Hernández, D. O. A. (2023). Evaluación de la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático de las estructuras de drenaje en carreteras. *Revista Ciencia y Construcción*, 4(1), 37-47. <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/172/120>
- Rojas, M. (2019). Los sistemas de información geográfica como recurso pedagógico para el fortalecimiento del proceso de enseñanza aprendizaje de las ciencias sociales en la universidad La Gran Colombia. [Tesis de grado, Universidad la Gran Colombia, Colombia]. Repositorio institucional de la UGC. <https://repository.ugc.edu.co/items/b6d4ac6e-809e-47d0-800e-31e1bbeb5c20>
- Salazar, V. E. L., Camacho, J. A. P., & Rosillo, N. G. B. (2022). Percepción del riesgo de la población ante amenazas de sismo, inundación y deslizamiento del cantón Portoviejo. *Revista San Gregorio*, 1(50), 1-18. http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?pid=S2528-79072022000200001&script=sci_abstract
- Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos (2017). Informe de Situación 11/04/2017. Época lluviosa en Ecuador. Secretaría de Gestión de Riesgos. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112019000100003&script=sci_arttext#B56
- Vidal Páez, P. J., Pérez Martínez, W., & Fernández-Sarría, A.

(2019). Evaluación de Modelos Digitales de Elevación (MDEs) obtenidos a partir de imágenes Sentinel-1 en la Región Metropolitana de Chile. Teledetección. Hacia una visión global del cambio climático: libro de actas, 373-376. <https://riunet.upv.es/handle/10251/183580>

Villavicencio-Ordóñez, J. E., López-Guzmán, D. R., & Velásquez-Cajas, Á. P. (2024). Crecimiento urbano y vulnerabilidad al cambio climático de Calderón en el distrito Metropolitano de Quito, Ecuador. Urbano, 94-107. <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RU/article/view/6195>