

Aplicación de los métodos de detección de cambios con imágenes SAR en las inundaciones costeras



Application of change detection methods with SAR images in coastal flooding

<https://cu-id.com/2377/v30nspe08>

✉Melany Abreu Del Sol^{1*}, ✉Alejandro Rodríguez Pupo¹, ✉Melissa Claudia Abreu Del Sol¹, ✉Dailín Reyes Perdomo¹,
✉Reinaldo Casals Taylor¹, ✉Osvaldo E. Pérez López¹, ✉Frank E. Ortega Pereira¹, ✉Amilcar E. Calzada Estrada²

¹Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología de Cuba, Cuba.

²Laboratory of Physical, Coastal and Estuarine Oceanography (LOFEC), Department of Oceanography (DOCEAN), Federal University of Pernambuco, Recife, PE, Brazil.

RESUMEN: Las inundaciones costeras más severas registradas en Cuba fueron provocadas por el paso de Huracanes. La implementación de modelos oceánicos para el análisis de las inundaciones puede insertar errores en los pronósticos; algunos de estos errores son el resultado de la escasez de datos provenientes del océano, de igual forma la detección de zonas inundadas se realiza mediante reportes realizados por las localidades afectadas, así como los análisis de su extensión mediante expediciones lo que se hace desfavorable por la existencia de zonas inaccesibles. Por lo tanto, se hace necesario la implementación de la tecnología SAR para la identificación de áreas inundadas. Se muestra la implementación de los métodos de detección de cambios, basados en la amplitud (ACD), y en la coherencia interferométrica (CCD), a partir de imágenes SAR; tomando como caso de estudio las inundaciones provocadas por el Huracán Ian tras su paso por el Occidente del país entre los días 26 y 27 de septiembre del año 2022, causó inundaciones costeras que persistieron hasta el día 28; utilizando el SNAP para realizar el mapeo de las inundaciones costeras, y analizar el alcance de las mismas. La extensión de la inundación costera obtenida con ambos métodos, mostró excelentes resultados; a pesar de las limitaciones para lograr un mejor análisis.

Palabras Clave: Radar de apertura sintética, Métodos de detección de cambio, amplitud, coherencia, inundación costera.

ABSTRACT: The most severe coastal flooding recorded in Cuba was caused by Hurricanes. The implementation of ocean models for flood analysis can insert errors in the forecasts; Some of these errors are the result of the scarcity of data coming from the ocean, likewise the detection of flooded areas is carried out through reports made by the affected localities, as well as the analysis of their extension through expeditions, which is made unfavorable by the existence of inaccessible areas. Therefore, the implementation of SAR technology is necessary for the identification of flooded areas. The implementation of change detection methods based on amplitude (ACD) and interferometric coherence (CCD) from SAR images is shown; Taking as a case study the floods caused by Hurricane Ian after it passed through the west of the country between September 26 and 27, 2022, causing coastal flooding that persisted until the 28th; using SNAP to map coastal floods and analyze their extent. The extent of coastal flooding obtained with both methods showed excellent results; despite the limitations to achieve a better analysis.

Keywords: Synthetic Aperture Radar, change detection methods, amplitude, coherence, coastal flooding.

*Autor para correspondencia: Melany Abreu Del Sol. E-mail: melanyabreu1699@gmail.com

Recibido: 02/10/2023

Aceptado: 12/12/2023

Conflicto de interés: Declaramos, no tener ningún conflicto de interés.

Contribución de los autores: **Concepción de la idea:** Melany Abreu Del Sol, Alejandro Rodríguez Pupo. **Diseño de la investigación:** Dailín Reyes Perdomo, Melissa C. Abreu Del Sol, Amilcar E. Calzada Estrada. **Descarga y Procesamiento de las imágenes SAR:** Melany Abreu Del Sol, Alejandro Rodríguez Pupo, Dailín Reyes Perdomo, Melissa C. Abreu Del Sol, Amilcar E. Calzada Estrada. **Análisis de los resultados:** Reinaldo Casals Taylor, Frank E. Ortega Pereira, Osvaldo E. Pérez López. **Manuscrito:** Melany Abreu Del Sol

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

El dispositivo SAR es un radar activo que emite la energía en el intervalo de frecuencias de microondas (pocos cm) en un período pequeño de tiempo y recibe los ecos provenientes de reflexiones de la señal en los objetos dando lugar a una apertura sintética, porque el sensor del dispositivo SAR se convierte en una antena virtual de mayor tamaño, debido a la gran velocidad de desplazamiento del satélite (7,5 Km/s aproximadamente) (Chan & Koo, 2008). Las imágenes SAR del mar proporcionan evidencia de un gran conjunto de fenómenos geofísicos: además de las características oceanográficas relacionadas con las olas del viento y el oleaje, las olas internas del océano y las corrientes marinas, los fenómenos atmosféricos relacionados con los vientos y las ondas de gravedad atmosférica, no todos relacionados localmente entre sí. Estos fenómenos tienen diferentes escalas espaciales y diseños espaciales, además de estar ubicados en diferentes áreas y, a menudo, están todos presentes en una imagen SAR (Li *et al.*, 2022).

De esta manera, se hace necesario el uso de las tecnologías satelitales para obtener imágenes que, al ser procesadas digitalmente, provean la información hidrológica para los análisis detallados, el monitoreo operacional y la evaluación de los daños producidos por fenómenos atmosféricos, como es el caso de las inundaciones costeras (Zamparelli *et al.*, 2016).

Lo anterior conduce a que el objetivo de la presente investigación radique en aplicar, mediante un caso de estudio, los métodos de detección de cambio basados en la amplitud (ACD) y en la coherencia interferométrica (CCD), para el procesamiento de imágenes de inundaciones costeras a partir de la tecnología SAR (Abreu & Rodríguez, 2023).

Varios estudios internacionales han demostrado que la CCD SAR es una información valiosa para el mapeo de inundaciones urbanas y puede reducir el efecto de doble rebote. En (Li *et al.*, 2019) se pueden encontrar más detalles sobre la intensidad del SAR y la respuesta coherente del agua de inundación sobre diferentes tipos de terrenos en el entorno urbano. Chini y colaboradores interpretaron las características de intensidad y coherencia de la inundación de Sendai (Japón) relacionada con el tsunami de 2011 con datos COSMO-SkyMed de alta resolución y encontró una menor coherencia de las áreas urbanas inundadas que de las no inundadas (Chini *et al.*, 2017). Además, con datos COSMO-SkyMed de alta resolución, en la investigación de Pulvirenti y colaboradores, se utilizó la coherencia de forma complementaria a la intensidad y se redujeron sustancialmente las alarmas en áreas urbanas inundadas por la inundación del río Secchia de 2014 (Italia) (Pulvirenti *et al.*, 2015).

En Cuba el uso de la tecnología SAR es incipiente y en la mayoría de las publicaciones relacionadas al tema, se basan en investigaciones en el mar. Un

ejemplo de lo antes mencionado, lo constituyen las investigaciones llevadas a cabo por Gómez Herrera y colaboradores del Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET) en 2008, en las exploraciones gasopetrolíferas en la Zona Económica Exclusiva de Cuba en el Golfo de México (Gómez, 2021; Gómez *et al.* 2007).

Con la ejecución del proyecto internacional “Fortalecimiento del sistema meteorológico marino cubano”, financiado por el Ministerio de Ambiente y Seguridad Energética de Italia en colaboración con la compañía e-GEOS y el Centro de Meteorología Marina (CMM) del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), se desarrolló un curso de entrenamiento en la tecnología del SAR (Montenegro & Rodríguez, 2022) y el software SNAP-ESA (proviene del acrónimo Sentinel Application Platform) (Foumelis *et al.*, 2018).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El Huracán Ian, tras su paso por el Occidente del país entre los días 26 y 27 de septiembre del año 2022, causó inundaciones costeras que persistieron hasta el día 28. Con la aproximación del organismo ciclónico, las condiciones del tiempo se fueron deteriorando, primero en la Isla de la Juventud y luego en el resto del occidente cubano, particularmente en la provincia de Pinar del Río. A medida que Ian avanzó hacia el Sur de Pinar del Río se fue intensificando y con ello la invasión del mar hacia la costa notándose sus efectos especialmente en el municipio la Coloma, y provocando mar de leva en el golfo de Batabanó provocando inundaciones en Playa Guanímar, Playa Caimito y el Surgidero de Batabanó. Al trasladarse a la costa norte de Pinar del Río se registraron inundaciones costeras en la costa del golfo de Guanahacabibes, en Bajos de Santa Ana y en la capital del país específicamente en el malecón habanero, persistiendo la inundación en el sur del golfo de Batabanó (Capote & Gómez, 2023).

2.1 Área de estudio. Características Generales

El área de estudio comprende la región occidental de Cuba desde el punto de vista político-administrativo e incluye las actuales provincias de Pinar del Río, Artemisa, Mayabeque, La Habana, Matanzas y el municipio especial Isla de la Juventud (Figura 1). Se encuentra aproximadamente ubicada entre los 21° 30' y 23° 10' de latitud Norte y los 80° 30' y 84° 55' de longitud Oeste. Esta región presenta una extensión superficial de 29 160 km², su límite Norte lo constituye el estrecho de La Florida, el Este las provincias de Villa Clara y Cienfuegos, al Sur limita con el mar Caribe, y al Oeste con el estrecho de Yucatán.

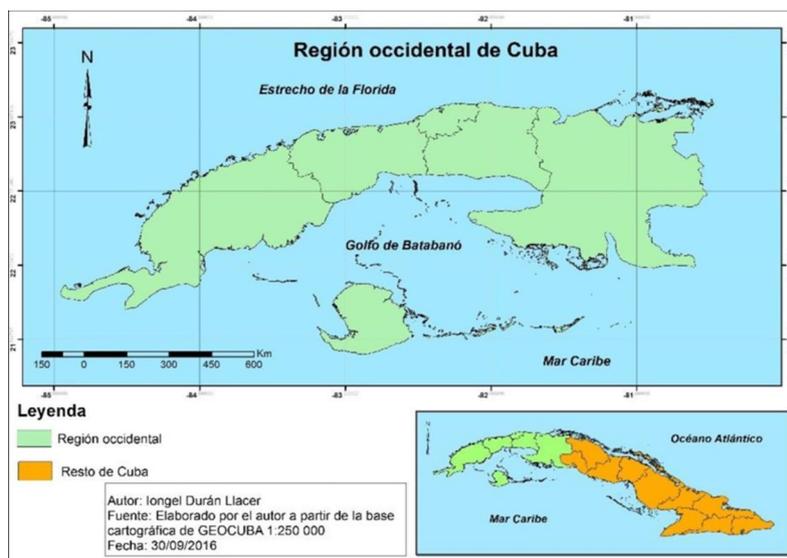


Figura 1. Ubicación geográfica de la región Occidental de Cuba (Durán, 2017)

Su clima se clasifica como “tropical estacionalmente húmedo con influencia marina y rasgos de semi-continentalidad”. Predominan los vientos del primer cuadrante (NNE, NE, ENE, E), con velocidad media general de 2.8 m/s, mientras que en la dirección predominante es de 3.8 m/s. La temperatura de la superficie marina presenta un curso medio anual bien marcado, con el mínimo (del orden de 25°C) en febrero y el máximo (entre 30°C y 24°C) en septiembre, en las cercanías en la costa noroccidental. Como resultado, habitualmente hay condiciones de buen tiempo, con olas de menos de 2 m (Mitrani, 2017).

2.2 Técnicas inSAR empleadas en el mapeo de inundaciones

El monitoreo y mapeo de inundaciones puede ayudar a las organizaciones y autoridades en la gestión de desastres. Las imágenes satelitales permiten un monitoreo rápido, confiable y rentable de grandes coberturas, por lo que brindan información geoespacial para respaldar el monitoreo y la gestión de desastres de manera efectiva (Amadio *et al.*, 2016). Muchos estudios han demostrado que los sistemas SAR son herramientas muy efectivas y confiables para el mapeo de inundaciones, especialmente en áreas con vegetación y también en el suelo desnudo, al beneficiarse de su sensibilidad a la rugosidad de la superficie y los cambios de humedad del suelo (Schlaffer *et al.*, 2015).

En lugar de usar una sola imagen, los métodos basados en la detección de cambios tienen la ventaja de enmascarar falsas alarmas como áreas de aguas permanentes y similares. Especialmente en suelos desnudos, una observación SAR puede ser suficiente para el mapeo de inundaciones. Sin embargo, en áreas urbanas y agrícolas, al menos una imagen previa a la

inundación y una imagen posterior a la inundación proporcionan resultados más confiables en un enfoque de detección de cambio (Papila *et al.*, 2020).

Se pueden realizar dos tipos de enfoques de detección de cambios mediante el uso de datos SAR. La ACD, que compara la retrodispersión entre dos escenas y descubre los cambios en la región. La capacidad de detectar los cambios es muy limitada con este método. El segundo, es la CCD, que calcula la coherencia de fase entre las dos escenas. Dado que la fase es muy sensible a cambios menores, cualquier anomalía en la correlación dará como resultado un cambio de coherencia (Papila *et al.*, 2020).

ACD

Se han investigado varios algoritmos que utilizan diferencia de intensidad, coeficientes de correlación, histogramas o información colorimétrica para detectar y analizar píxeles de cambio y las aplicaciones de los algoritmos de detección de cambios se han estudiado en diversos campos, como ciudad, inundación, incendio forestal y vegetación (Hong *et al.*, 2023).

Los productos Ground Range Detected (GRD) se emplean en este método porque presentan mejor visualización. El diagrama que se muestra en la figura 2, muestra los pasos a seguir en el procesamiento de la imagen SAR para este caso.

Para la composición de imagen RGB se asignó el color rojo a la primera imagen procesada, que en este caso fue el día del suceso. Para el color verde y azul, se seleccionó la imagen de un día de régimen de tiempo normal, mostrándose así los cambios generados en el estudio de color rojo.

CCD

Para la CCD se han utilizado datos COSMO-SkyMed de alta resolución, cómo en la investigación



Figura 2. Procesamiento para la ACD

de Pulvirenti y colaboradores, que se utilizó la coherencia de forma complementaria a la intensidad para reducir sustancialmente las alarmas en áreas urbanas inundadas por la inundación del río Secchia de 2014 (Italia) (Pulvirenti *et al.*, 2015).

Para aplicar esta técnica se emplean imágenes SAR del producto de tipo Single Look Complex (SLC), donde debe tenerse en cuenta que la órbita y el ángulo de inclinación de estas imágenes se corresponda. La figura 3 muestra las fases del procesamiento de imágenes SLC.

Aplicando esta técnica, en la composición de la imagen RGB, se le asignó el color rojo al producto de coherencia que se obtuvo a partir del procesamiento de las dos imágenes. El color verde, para la banda de retrodispersión promedio creada con la herramienta matemática de banda; y el color azul a la banda de diferencia de retrodispersión calculada con la antes mencionada.

La imagen compuesta de color multitemporal muestra los cambios que ocurren durante el período de cobertura, quedando de esta forma los azules en la imagen representando los fuertes cambios en los cuerpos de agua; los amarillos representando los centros urbanos, los campos y bosques aparecen verde y los rojos y naranjas representan las características que no cambian, como los suelos desnudos y las rocas.

2.3 Herramientas informáticas empleadas en el mapeo de la inundación

SNAP

Responde a un programa gratuito ofrecido por la Agencia Espacial Europea para procesar y analizar las imágenes satelitales provenientes de la flota de satélites Sentinel. Al igual que las cajas de

herramientas Sextante y Arc ToolBox de gvSiG y ArcGIS, SNAP también dispone de un repertorio de herramientas (denominadas Sentinel Booxes) específicas para trabajar las imágenes en función del modelo de satélite, ya sean las imágenes multibandas de Sentinel 2 y Sentinel 3 (SNAP Download, 2022).

QGIS

Uno de los primeros proyectos de la Fundación OSGeo, anteriormente llamado Quantum GIS, es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de software libre y de código abierto para plataformas GNU/Linux, Unix, Mac OS, Microsoft Windows y Android. Permite manejar formatos raster y vectoriales a través de la biblioteca GDAL (GADL/OGR), así como bases de datos (Qgis, 2019). Se puede descargar gratuitamente en el sitio: <http://qgis.org/es/site/forusers/download.html>.

2.4 Selección de las imágenes SAR

Se descargaron productos Sentinel 1 SLC y GRD del día 28 de septiembre del 2022 con resolución espacial de 100 m respectivamente con polarización VV, garantizando el análisis de la inundación con imágenes de la misma órbita (Abreu & Rodriguez, 2023). Para aplicar las técnicas ACD y CCD, fueron descargadas gratuitamente desde el sitio Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>) las imágenes de los días 16 y 28 de septiembre (antes del evento y día del evento) a las 6:28 am; no fue posible la obtención de la imagen del día 27 de septiembre dado que el satélite Sentinel-1 no se encontraba orbitando sobre esa zona. Las imágenes tienen 12 días de diferencia que es el tiempo que el radar Sentinel demora en detectar la misma región.



Figura 3. Procesamiento para la CCD

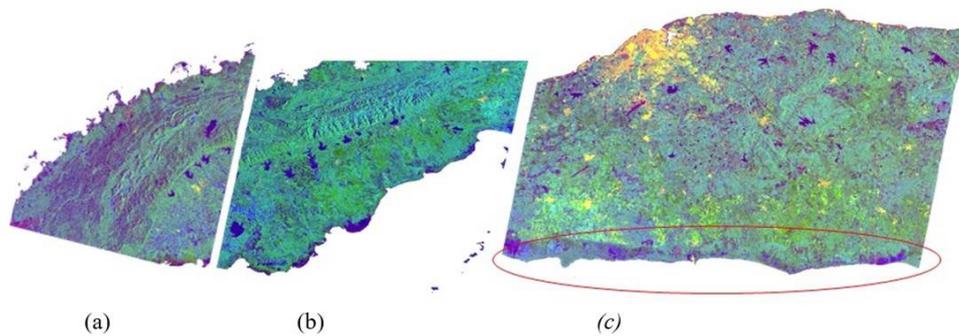


Figura 4. Resultados de la aplicación del método de CCD

3. RESULTADOS

3.1 Aplicación del método CCD

Luego de realizar el corregistro y la coherencia a los pares de imágenes sin procesar, se creó un compuesto RGB con las imágenes procesadas anteriormente y la imagen de coherencia. En la figura 4 (a,b,c) se muestran los resultados de los productos obtenidos al aplicar la técnica CCD para las provincias de Pinar del Río, Artemisa, Mayabeque, y la Habana; la vegetación se muestra en color verde, las zonas urbanas en amarillo y las inundaciones o cuerpos de agua en azul. Al apreciar las imágenes se puede ver que el día 28 de septiembre a las 7:00 am (fecha de la adquisición) el dispositivo SAR captó inundaciones costeras en el golfo de Batabanó en zonas de Guanímar, Playa Cajío, Surgidero de Batabanó, Playa Mayabeque y Playa Tasajera (Zonas enmarcada en el rojo). Se debe destacar que a la hora de la adquisición de las imágenes el Huracán Ian estaba saliendo de Cuba dejando a su paso inundaciones provocadas por la invasión del mar a la costa, aunque el momento de máxima inundación en la costa sur había transcurrido.

Analizando cada zona de las inundaciones detectadas al aplicar la técnica CCD, se tiene primeramente la zona de Guanímar del municipio Alquizar perteneciente a la provincia de Artemisa, la cual está en una franja costera situada al sur de La Habana que, junto con la costa norteña de la capital, conforma la zona más susceptible a inundaciones por ciclones.

Los procesamientos realizados con las imágenes SAR muestran el alcance de la inundación costera provocada por el Huracán Ian donde la herramienta de medición de distancia en kilómetros, que contiene el software SNAP, señala una extensión de la inundación de unos 4.20 km desde la línea costera con un error aproximado de 0.014 km (Figura 5), según consta en los reportes realizados por los investigadores del CMM del INSMET (comunicación personal). Cuando se acercaron a la zona para realizar la estimación de la inundación, llegaron a la conclusión de que ésta tuvo

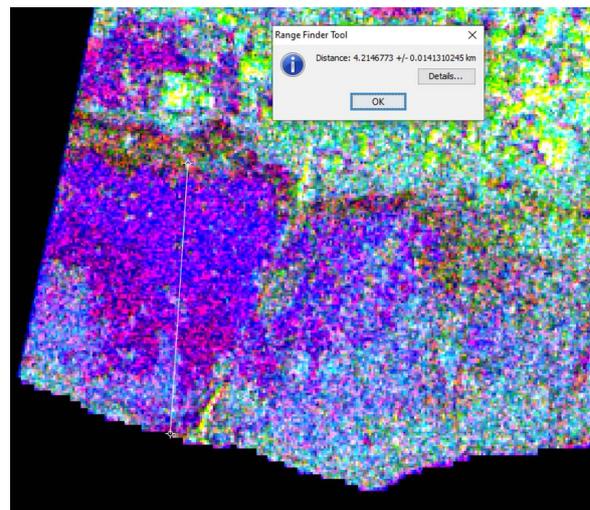


Figura 5. Extensión de la inundación mediante el método CCD para la zona de Guanímar

una extensión de 5 km aproximadamente en su punto más alto.

Otra de las zonas afectadas por la intrusión del mar fue Playa Cajío, perteneciente al municipio de Güira de Melena en Artemisa. La inundación en este lugar se extendió hasta los 3.80 Km aproximadamente con un error de 0.012 km según la herramienta de medición que contiene el software Snap (Figura 6). Según el reporte realizado por los investigadores del CMM del INSMET la inundación en Playa Cajío tuvo una extensión de 4.00km.

La zona de Playa Mayabeque afectada por Ian según la aplicación del método CCD estimó una extensión de la inundación de unos 2.20 km aproximadamente con error de 0.007 km (Figura 7). Según el reporte realizado por los investigadores del CMM del INSMET la inundación en esta zona tuvo una extensión de 2.50 km.

El Surgidero de Batabanó perteneciente al municipio de Mayabeque mostró una extensión de la inundación de 2.00 km con un error de 0.006km (Figura 8). Según el reporte realizado por los investigadores del CMM del INSMET la inundación en esta zona tuvo una extensión de 2.00 km.

Finalmente, se detectó con la técnica CCD inundaciones costeras en la zona de la Playa Tasajera, perteneciente a la provincia de Mayabeque, donde la entrada del mar ocupó extensiones en algunas zonas de 2.60 km (Figura 9a), 2.90 km (Figura 9b), 2.30 km (Figura 9c) desde la línea de costa aproximadamente. Según el informe, la inundación alcanzó los 3.00 km de extensión.

3.2 Aplicación del método de ACD

Al abrir las imágenes en modo GRD, después de un procesamiento a estos productos donde se le aplicaron al par de imágenes la calibración, el filtrado de manchas y la corrección correspondiente del terreno, se crea el compuesto RGB, designando las características del día 16 de septiembre al color rojo, la imagen del día 28 color azul y al verde; esto propició que las diferencias entre las imágenes, que en este caso es la inundación, quedó representado en color rojo. La figura 10, muestra el producto resultante.

Al apreciar el mapa, se puede visualizar que el día 28 de septiembre a las 7:00 am (fecha de la adquisición) el dispositivo SAR captó inundaciones costeras en el golfo de Batabanó en zonas de Guanímar, Playa Cajío, Surgidero de Batabanó, Playa Mayabeque y Playa Tasajera. Se debe destacar que a la hora de la adquisición de las imágenes el Huracán Ian estaba saliendo de Cuba dejando a su paso inundaciones provocadas por la invasión del mar a la costa, aunque el momento de máxima inundación en la costa sur había transcurrido.

Analizando cada zona de las inundaciones detectadas al aplicar la técnica ACD, se tiene primeramente la zona de Guanímar del municipio Alquizar perteneciente a la provincia de Artemisa, la cual está en una franja costera situada al sur de La Habana que, junto con la costa norteña de la capital, conforma la zona más susceptible a inundaciones por ciclones. Los procesamientos realizados con las imágenes SAR muestran el alcance de la inundación costera provocada por el Huracán Ian.

La herramienta de medición de distancia en km, que contiene el software SNAP, señala una extensión de la inundación de unos 4.20 Km desde la línea costera con un error aproximado de 0.015 km (Figura 11), según consta en los reportes realizados por los investigadores del CMM del INSMET (comunicación personal). Cuando se acercaron a la zona para realizar la estimación de la inundación, llegaron a la conclusión de que ésta tuvo una extensión de 5.0 km aproximadamente en su punto más alto. Esto puede corresponderse perfectamente con la imagen obtenida, puesto que el sensor escaneó la zona a las 6:00 am el día 28 de septiembre y la zona estaba siendo afectada desde el día anterior.

Otra de las zonas afectadas por la irrupción del mar fue Playa Cajío (Figura 12), perteneciente al

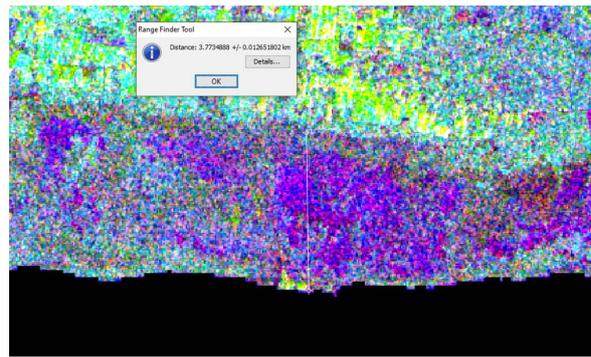


Figura 6. Extensión de la inundación mediante el método CCD para la zona de Playa Cajío

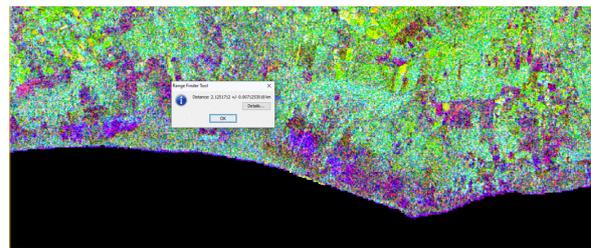


Figura 7. Extensión de la inundación mediante el método CCD para la zona de Surgidero de Batabanó

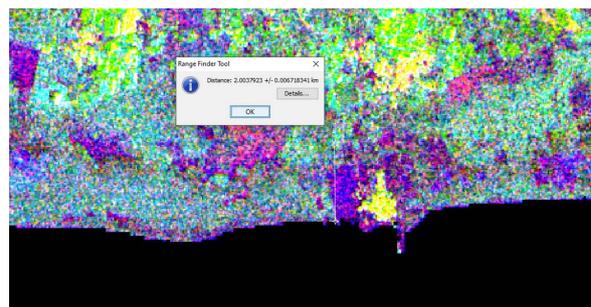


Figura 8. Extensión de la inundación mediante el método CCD para la zona de Playa Mayabeque

municipio de Güira de Melena en Artemisa. La inundación en este lugar se extendió hasta los 3.60 km aproximadamente con un error de 0.011 km según la herramienta de medición que contiene el software SNAP. Según el reporte realizado por los investigadores del CMM del INSMET tuvo una extensión de 4.00 km (Comunicación Personal).

El surgidero de Batabanó se encuentra en el municipio de Mayabeque, con una superficie que abarca un extenso humedal costero cubierto de mangle, pero a pesar de esta característica no fue ajeno a los estragos causados por Ian, dejando una inundación de 2.0 km aproximadamente según los expertos en el CMM. El SNAP indicó una extensión de la misma de 1.60 km a las 6:00 am aproximadamente considerando el pequeño error de la herramienta del software (Figura 13).

La última zona analizada, donde se detectó con la técnica ACD inundaciones costeras, fue la zona de la Playa Tasajera, perteneciente a la provincia de

Mayabeque, donde la entrada del mar ocupó extensiones en algunas zonas de 2.20 km (Figura 14a), 1.60 km (Figura 14b) y 1.90 km (Figura 14c) desde la línea de costa aproximadamente.

Además de las zonas ya mencionadas, también ocurrieron inundaciones costeras en otras zonas del Golfo de Batabanó como en la Playa de Majana, lo mismo ocurrió en la zona costera de La Coloma en Pinar del Río y los Bajos de Santa Ana. En el caso de estas zonas no se pudo obtener imágenes del día 27 de septiembre, fecha correspondiente con las mayores afectaciones ocasionadas por Ian, solo estaban disponibles de manera gratuita en el portal del Copernicus Open Access Hub el día 28 de septiembre. Para el caso del análisis de la inundación en el Golfo de Guanahacabibes, se tuvo que esta zona no quedó dentro de la zona de visibilidad del sensor SAR.

Al analizar los resultados con los procedimientos CCD y ACD se tiene que: a pesar de ser CCD un método más detallado (subpíxel) se hace complicado diferenciar los cuerpos de agua fijos de las inundaciones por la gama de colores que representa, por este motivo el método ACD es visualmente más satisfactorio para determinar estos cuerpos de agua fijos (Figura 15), sin embargo, fue capaz de detectar inundaciones que no fueron apreciables al aplicar el método ACD como fue el caso de Playa Mayabeque; por lo que se recomienda la utilización de ambos métodos para evaluar las extensiones de las inundaciones costeras.

En la aplicación de ambos métodos para estimar la extensión de la inundación (CCD, ACD) se tiene que en las zonas urbanas se pudo observar que las inundaciones costeras no fueron detectadas, por la limitación de la baja resolución espacial de las imágenes empleadas (100 m), ya que las edificaciones provocan una dispersión de la señal, por lo tanto, en la figura aparecen como zonas muy brillantes. Además, que por su media resolución imposibilita observar con detalle estas zonas. Esta limitación de los métodos propuestos es conocida por los expertos en este tema, por lo cual la consideración que ellos toman es trabajar con satélites de mucha más alta resolución (VHR) como el COSMO-SkyMed, el cual ha demostrado un alto potencial para estos casos (Natsuaki & Nagai, 2020).

CONCLUSIONES

A partir de la aplicación de las técnicas inSAR para el mapeo de inundaciones costeras en el caso de estudio del Huracán Ian, se puede concluir que:

1. Con la determinación del alcance máximo de la inundación en las diferentes localidades con las técnicas ACD y CCD, fueron comparadas las respectivas distancias con los datos in situ obteniéndose resultados satisfactorios.

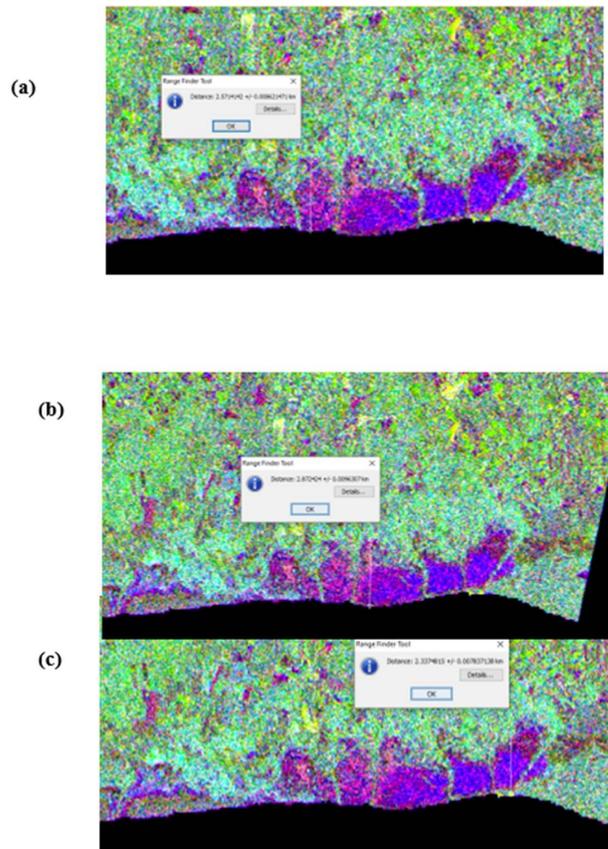


Figura 9. Extensión de la inundación mediante el método CCD para las zonas de Playa Tasajera (a, b y c)

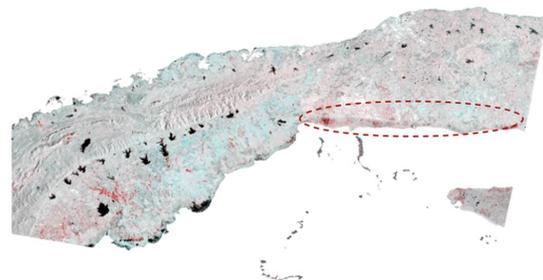


Figura 10. Compuesto RGB de las inundaciones provocadas por Ian el día 28 de septiembre del año 2022

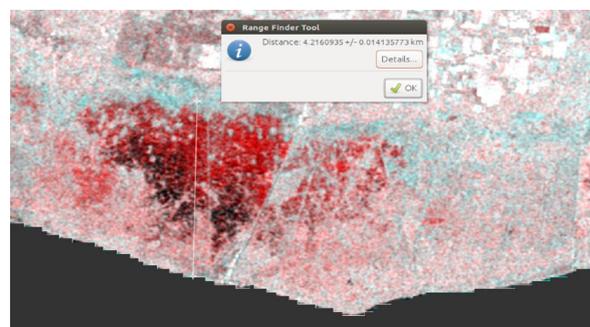


Figura 11. Extensión de la inundación detectada por el satélite Sentinel-1 para la zona de Guanímar, Artemisa

2. Se compararon las técnicas para el mapeo de inundaciones costeras, arrojando que el método ACD es útil para localizar los cuerpos de agua

presente en las zonas afectadas mientras que CCD es más preciso en la estimación de la extensión de la inundación.

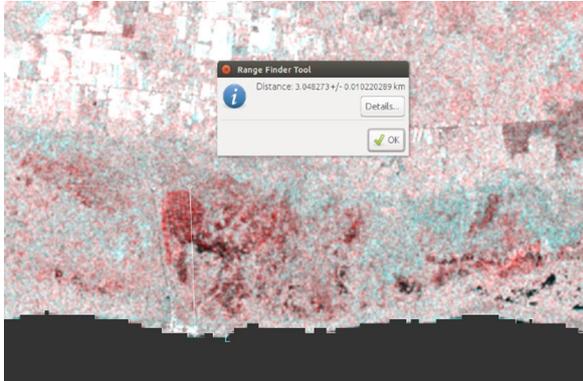


Figura 12. Extensión de la inundación en Playa del Cajío en Artemisa, el día 28 de septiembre del 2022 a las 6:00 am

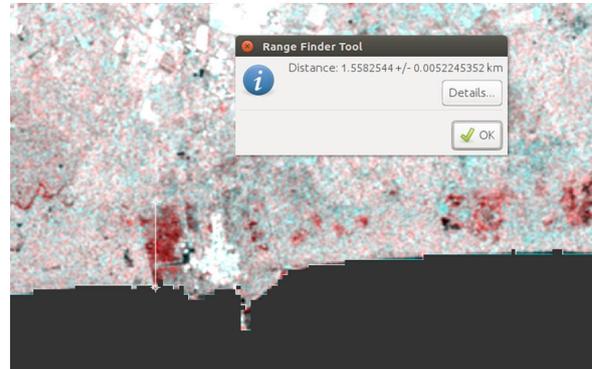


Figura 13. Extensión de la inundación en el Surgidero de Batabanó en Artemisa, el día 28 de septiembre del 2022 a las 6:00 am

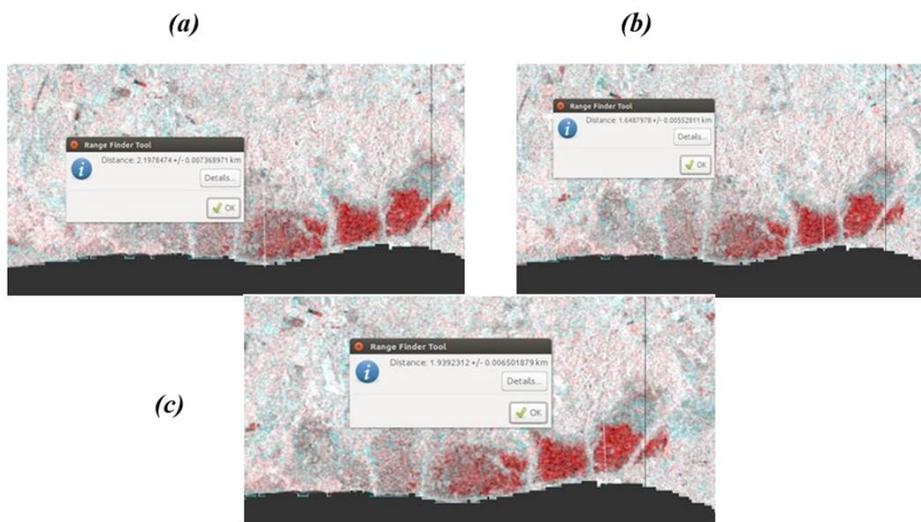


Figura 14. Extensión de la inundación en Playa Tasajera (a, b y c)

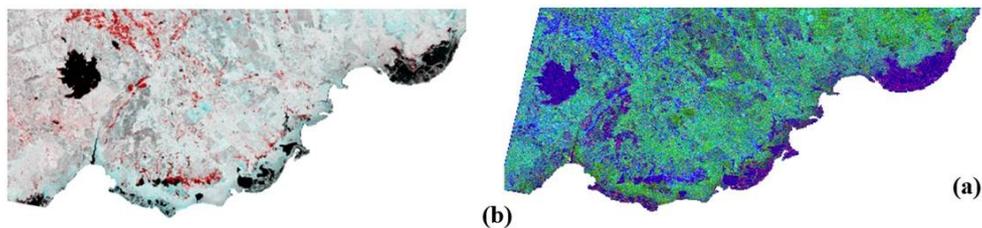


Figura 15. Diferencia entre los métodos ACD (a) y CCD (b) para determinar los cuerpos de agua fijos

REFERENCIAS

- Abreu, M., & Rodríguez, A. (2023). *Aplicación de Detección de Cambios De Imágenes SAR en las inundaciones costeras*. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32291.02089>
- Alvarez, N., & Gómez, Y. (2023). Resumen del paso del huracán Ian por la provincia de Artemisa. *Revista Cubana De Meteorología*, 29(1), e05. <https://cu-id.com/2377/v29n1e05>
- Amadio, M., Mysiak, J., Carrera, L., & Koks, E. (2016). Improving flood damage assessment models in Italy. *Natural Hazards*, 82(3), 2075–2088. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2286-0>
- Chan, Y. K., & Koo, V. C. (2008). An introduction to synthetic aperture radar (SAR). *Progress In Electromagnetics Research B*, 2, 27–60. <https://doi.org/10.2528/PIERB07110101>
- Chini, M., Hostache, R., Giustarini, L., & Matgen, P. (2017). A Hierarchical Split-Based Approach for Parametric Thresholding of SAR Images: Flood Inundation as a Test Case. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(12), 6975–6988. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2737664>
- Durán, I. (2017). Circulación atmosférica y días con lluvia durante eventos significativos de sequía en el occidente de Cuba. *Revista Cubana De Meteorología*, 23(3), 349–362. <http://rcm.insmet.cu/index.php/rcm/article/view/251>
- Foumelis, M., Delgado Blasco, J. M., Desnos, Y.-L., Engdahl, M., Fernandez, D., Veci, L., Lu, J., & Wong, C. (2018). Esa Snap—Stamps Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. In *IGARSS 2018—2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 1364–1367). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519545>
- Gómez, J. E. (2021). Exploración petrolera en Cuba. Nuevo enfoque a la metodología del análisis de riesgo. *Anales de La Academia de Ciencias de Cuba*, 11(2). <https://revistaccuba.sld.cu/index.php/revacc/article/view/957/1640>
- Gómez, J. E., Álvarez, O., & Pellón, F. (2007). Metodología para la exploración gasopetrolífera costa afuera mediante imágenes satelitales. In *I Congreso cubano de petróleo y gas (PETROGÁS2007), IV Taller Internacional de Geología y Potencial de Petróleo del SE del Golfo de México* (pp. 13–18). Centro de Investigaciones del Petróleo. http://www.redciencia.cu/geobiblio/paper/2007_petrogas.pdf
- Hong, S., Chae, S., Oh, K., & Yang, H. (2023). A Case Study of Amplitude-Based Change Detection Methods Using Synthetic Aperture Radar Images. *Korean Journal of Remote Sensing*, 39(6_3), 1791–1799. <https://doi.org/10.7780/KJRS.2023.39.6.3.11>
- Li, Q., Zhang, Y., Wang, Y., Bai, Y., Zhang, Y., & Li, X. (2022). Numerical Simulation of SAR Image for Sea Surface. *Remote Sensing*, 14(3), 439. <https://doi.org/10.3390/rs14030439>
- Li, X., Long, D., Huang, Q., Han, P., Zhao, F., & Wada, Y. (2019). High-temporal-resolution water level and storage change data sets for lakes on the Tibetan Plateau during 2000–2017 using multiple altimetric missions and Landsat-derived lake shoreline positions. *Earth System Science Data*, 11(4), 1603–1627. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1603-2019>
- Mitrani, I. (2017). *Meteorología Marina*. CITMA^{TEL} (Empresa de Tecnologías de la Información y Servicios Telemáticos Avanzados). <https://www.libreriavirtual.cu/libreria/meteorologia-marina>
- Montenegro, S., & Rodríguez, A. (2022). Cursos de entrenamiento, colaboración internacional Cuba-Italia. *Revista Cubana de Meteorología*, 28(3), e04. <https://cu-id.com/2377/v28n3e04>
- Natsuaki, R., & Nagai, H. (2020). Synthetic Aperture Radar Flood Detection under Multiple Modes and Multiple Orbit Conditions: A Case Study in Japan on Typhoon Hagibis, 2019. *Remote Sensing*, 12(6), 903. <https://doi.org/10.3390/rs12060903>
- Papila, I., Alganci, U., & Sertel, E. (2020). Sentinel-1 based flood mapping using interferometric coherence and intensity change detection approach. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLIII-B3-2020*, 1697–1703. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1697-2020>
- Pulvirenti, L., Chini, M., Pierdicca, N., & Boni, G. (2016). Use of SAR Data for Detecting Floodwater in Urban and Agricultural Areas: The Role of the Interferometric Coherence. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(3), 1532–1544. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2482001>
- Qgis. (2019). *A Free and Open Source Geographic Information System*. Documentación y Descarga. <https://qgis.org/en/site/>
- Schlafler, S., Matgen, P., Hollaus, M., & Wagner, W. (2015). Flood detection from multi-temporal SAR data using harmonic analysis and change detection. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.12.001>
- SNAP Download. (2022). *Science Toolbox Exploitation Platform*. Documentación y Descarga. <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>
- Zamparelli, V., Jackson, G., Cucco, A., Fornaro, G., & Zecchetto, S. (2016). SAR based sea current estimation in the Naples coastal area. In *IGARSS 2016—2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 4665–4668). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7730217>

Melany Abreu Del Sol. Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología de Cuba. E-mail:
melanyabreu1699@gmail.com

Alejandro Rodríguez Pupo. Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología de Cuba. E-mail:
alejandro.rodriguez@insmet.cu

Melissa Claudia Abreu Del Sol. Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología de Cuba. E-mail:
melissa.abreu98@icloud.com

Dailín Reyes Perdomo. Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología de Cuba. . E-mail:
dailin.reyes@insmet.cu

Reinaldo Casals Taylor. Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología de Cuba. . E-mail:
reinaldo.casals@insmet.cu

Osvaldo E. Pérez López. Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología de Cuba. . E-mail:
osvaldo.perez@insmet.cu

Frank E. Ortega Pereira. Centro de Meteorología Marina, Instituto de Meteorología de Cuba. . E-mail:
frank.ortega@insmet.cu

Amilcar E. Calzada Estrada. Laboratory of Physical, Coastal and Estuarine Oceanography (LOFEC),
Department of Oceanography (DOCEAN), Federal University of Pernambuco, Recife, PE, Brazil. E-mail:
amilcar.calzada@ufpe.br