

Estudio de las deformaciones de la corteza derivadas de la geodinámica a partir de la Interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar): aplicación a la Costa Oriental del Lago de Maracaibo, Venezuela

Study of crustal deformations derived from geodynamics from SAR Interferometry on East Coast of Lake Maracaibo, Venezuela

Gabriela Quintana Sánchez¹

Franck Audemard²

Carlos Reinoza³

Fikret Dogru⁴

Leonardo Alvarado⁵

Recibido 4 de septiembre de 2024; aceptado 17 de diciembre de 2024

RESUMEN

La técnica de Interferometría Diferencial Satelital de Radar de Apertura Sintética (DInSAR por sus siglas en inglés) ha sido usada por más de 20 años por profesionales de las geociencias, para detectar cambios en la topografía terrestre

¹ Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela (UCV). Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Venezuela, correo electrónico: gabrielaquintana77@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-0128-7441>

² Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela (UCV). Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Venezuela, correo electrónico: faudemard@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2046-5916>

³ Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), Baja California, México, correo electrónico: cereinoza@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2347-3161>

⁴ Ataturk University, Oltu Vocational College, Construction, Erzurum, Turquía, correo electrónico: fikretjfm@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6973-1157>

⁵ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), Venezuela, correo electrónico: joleonar@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6836-9515>

a través del tiempo, permitiendo realizar seguimiento a la cinemática de fallas activas, y de otras deformaciones del suelo como consecuencia de actividades antrópicas y/o naturales. El objetivo de este estudio se basó en el dominio de metodologías de procesamiento de datos SAR e interpretación de los resultados obtenidos a través de la aplicación de la técnica PSInSAR Retrodispersores Persistentes Interferométricos (*Persistent Scatterers Interferometry* —PSI); lográndose obtener estimación de desplazamientos corticales en la dirección de vista del sensor (*Line Of Sight* —LOS). Se utilizaron conjuntos de datos de imágenes SAR SENTINEL 1 del Programa Europeo Copernicus, en banda C, con un rango de 5,4 cm de longitud de onda, para los años 2018-2019. Los resultados obtenidos en la COLM Costa Oriental del Lago de Maracaibo, soportan la idea de un proceso de deformación de levantamiento y hundimiento (*uplift y subsidence*) en las ciudades costeras en el este del Lago que van desde 45 mm a⁻¹ a -40 mm a⁻¹, coherentes con estudios de Puntos de Control Terrestres-PCT previos en la zona que indicaron valores de de levantamiento de 5 cm para Ciudad Ojeda y, de subsidencia de -3 cm en Lagunillas.

Palabras clave: *radar, interferometría, deformación, subsidencia, Venezuela.*

ABSTRACT

The Synthetic Aperture Radar Satellite Differential Interferometry (DInSAR) technique has been used for more than two decades to detect changes in the Earth's topography over time, allowing the kinematics of active faults and other ground deformations as a result of anthropic and/or natural activities to be monitored. The objective of this study was based on the mastery of SAR data processing methodologies and interpretation of the results obtained through the application of the PSInSAR Persistent Scatterers Interferometry (PSI) technique; achieving an estimation of crustal displacements in the direction of view of the sensor (*Line Of Sight* —LOS). SENTINEL 1 SAR image datasets from the European Copernicus Programme, in C-band, with a wavelength range of 5.4 cm, were used for 2018-2019. The results obtained on the East Coast of Lake Maracaibo (COLM) support the idea of a process of uplift and subsidence in coastal cities in the east of the Lake ranging from 45 mm a⁻¹ to -40 mm a⁻¹, consistent with previous GPS (Global Positioning System) studies of Ground Control Points-GCP in the area that indicated uplift values of 5 cm for Ciudad Ojeda and, for subsidence values of -3 cm in Lagunillas.

Key words: *Radar, Interferometry, Deformation, Subsidence, Venezuela.*

1. Introducción

Los antecedentes de la percepción remota en Venezuela se remontan a la década de 1930, con la adquisición de las primeras fotografías aéreas por la empresa *Standard Oil of Venezuela* en diciembre de 1935, quienes realizaron la primera

misión de aerografía en el aeropuerto de Cachipo (Caripito, estado Monagas), donde se encontraba el laboratorio fotográfico que junto con la sección de avocación, dependía del departamento de Geología, para obtener un mapa aerofotográfico de gran utilidad en la prospección petrolífera (López, 2012). Los vuelos de reconocimiento para divisar las fallas geológicas, para entonces, se realizaban acompañados de geólogos a 10.000 pies (= 3.000 m) de altura. Las fotografías tomadas en esta misión también eran de utilidad para las cuadrillas que efectuaban estudios magnetométricos y sismográficos (López, 2012).

Para la década de 1970, se comienzan a utilizar las imágenes satelitales, para los estudios sísmicos, las cuales fueron usadas en estudios geomorfológicos, de geología estructural, cartografiado de fallas activas y de estructuras geológicas. No obstante, su limitación en el análisis de series temporales, sin posibilidad de medir procesos de corto período de tiempo, antes y después de un sismo, lo convirtió en una extrapolación del método de interpretación geológica de fotos aéreas a un método de interpretación geológica espacial. En la actualidad, el análisis de la tectónica activa se realiza a través de series temporales con énfasis en las distribuciones de alineamiento en la superficie de la Tierra antes y después de un sismo (e. g., Tronin, 2010).

Hoy en día, los datos de observación terrestre son usados como apoyo en el estudio de las deformaciones de la corteza como consecuencia de la geodinámica terrestre. Diversas misiones satelitales han sido diseñadas para tal fin; con la disponibilidad de imágenes satelitales en diferentes plataformas digitales. Los métodos de observación terrestre son usados para cartografiar los daños después de un sismo, realizar seguimientos a la cinemática de fallas activas, y demás deformaciones de suelo como consecuencia de actividades antrópicas y o naturales (e. g., Wegmüller *et al.*, 2015). La Interferometría Satelital de Radar de Apertura Sintética (InSAR por sus siglas en inglés) es una técnica usada por más de 20 años para detectar dichos cambios en la topografía terrestre.

2. Antecedentes

Las siguientes investigaciones muestran parte de los estudios que hasta la fecha se han realizado con el uso de imágenes SAR en Venezuela.

Cano (2008) realizó una evaluación del potencial de la técnica InSAR para estudiar la subsidencia del terreno debido a la extracción de petróleo en la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM), utilizando imágenes SAR ERS-1, ERS-2, ENVISAT, en banda C. Sin embargo, no obtuvo valores de coherencia adecuados para su interpretación.

Deguchi y Narita (2015) realizaron un seguimiento de la deformación debido a la producción petrolera en la misma zona de la COLM, aplicando la medición de desplazamiento vertical mediante el análisis de series temporales InSAR, utilizando datos PALSAR obtenidos en los modos FBS y ScanSAR, donde se confirmó deformación del suelo en los alrededores de tres yacimientos petrolíferos (Tia Juana, Lagunillas y Bachaquero). La velocidad anual del desplazamiento vertical de la superficie del suelo medida fue de -51 mm a^{-1} , -103

mm a⁻¹ y -58 mm a⁻¹, respectivamente, que confirman el deterioro notable de los yacimientos petrolíferos de la cuenca del Maracaibo junto a la disminución del volumen de producción de petróleo.

Rojas (2016) realizó una evaluación de los parámetros de fiabilidad de imágenes ALOS PALSAR 1 (16 imágenes) para la aplicación de DInSAR en la COLM. No obstante, los valores de coherencia obtenidos, con el método en serie temporal, no fueron satisfactorios para continuar con el procesamiento de los datos.

Pousse *et al.* (2016) estudian las variaciones espacial y temporal en la tasa de movimiento de la Falla El Pilar (Venezuela), en el límite de placas Caribe-Suramericana con el uso de InSAR. En dicho estudio se realizó un análisis temporal de 18 imágenes ALOS PALSAR 1 aplicando el método NSBAS (New Small Baseline Subset), abarcando el período 2007-2011; donde se evidenció que el deslizamiento asísmico disminuye hacia el este a lo largo de la falla, cuya velocidad de movimiento del segmento occidental es de $25,3 \pm 9,4$ mm a⁻¹ en promedio, en comparación con $13,4 \pm 6,9$ mm a⁻¹ en promedio para el segmento este, lo que indica que los modelos de distribución de deslizamiento se encuentran relacionados con áreas acopladas y no acopladas a niveles someros, aunque los resultados no fueron satisfactorios, entrega un conocimiento de la cinemática de la falla con una resolución espacio-temporal específico.

Arenas *et al.* (2019) determinaron la subsidencia de la COLM, usando imágenes SENTINEL 1, aplicando el método de InSAR simple, donde obtuvieron movimientos verticales entre 2,8 cm/a y -2,8 cm/a en las áreas de Cabimas, Tia Juana y Ciudad Ojeda para un período de tres años.

Al nivel internacional, podemos hacer mención de algunos trabajos recientes, pertinentes a los objetivos de la presente investigación, a continuación.

Mayorga (2011) aplicó DInSAR para el estudio de la deformación de la ladera por los movimientos en masa en Ecuador.

Rucci *et al.* (2012) destacan en su estudio la calidad de los datos de PSInSAR para ser usados en inversión geofísica, con la finalidad de medir la permeabilidad de los yacimientos de petróleo y/o para evaluar las posibilidades y riesgos debidos a fallas sísmicas en el secuestro de CO₂.

De Ruyt (2013) realizó un análisis comparativo entre las técnicas InSAR-PSI y SBAS (por sus siglas en inglés, Small Baselines Subset; método DInSAR donde se construye series temporales) para la medición de las deformaciones del Complejo Volcánico Cordón Caulle en los Andes Sur-Chile, utilizando 48 imágenes de la plataforma ERS 2.

Delgado *et al.* (2015) realizaron un seguimiento al crecimiento urbano de las ciudades de Valencia, España, Roma y Cerdeña Sur, Italia, con el uso de las técnicas DInSAR PSI y SBAS con el fin de determinar las deformaciones de los edificios presentes en las ciudades. Utilizaron un conjunto de datos de ERS y ENVISAT SAR de la ESA.

Liu *et al.* (2015) caracterizaron la cinemática y deformación dentro y fuera de la Falla de San Andrés en los Estados Unidos de América, como punto crucial para mejorar la evaluación del peligro sísmico en la región, para lo cual usaron

banda L de imágenes ALOS PALSAR, datos UAVSAR y mediciones geodésicas para mapear la variación del deslizamiento de la falla.

Merryman Boncori *et al.* (2015) probaron la factibilidad de integrar datos GPS y datos de deformación SAR para el modelo de riesgo sísmico de los Apeninos centrales, Italia, usando datos desde 100 estaciones GPS y 20 años de archivos de imágenes ERS y ENVISAT SAR.

Pinto (2015) realiza una detección de deformaciones superficiales en la mina de manganeso do Azul en Brasil usando InSAR, para lo cual usó 33 imágenes TerraSAR-X, aplicando el método PSI.

Plattner *et al.* (2015) estudiaron la deformación cortical que cruza el canal marino Ballenas en el Golfo de California, México, usando datos InSAR y datos GPS. Las velocidades obtenidas reposan en series temporales en un lapso de cinco años.

Ruiz *et al.* (2015) realizaron un seguimiento de las deformaciones en la Falla Zafarraya y Antiformas de Sierra Tejeda en la Cordillera Bética de España utilizando DInSAR con imágenes ERS 1/2, y ASAR ENVISAT.

Shan *et al.* (2015) unificaron datos geodésicos GPS y datos InSAR para obtener el campo de la deformación vertical en la Falla de Longmenshan durante el sismo de Wechuan en China, en sus tres secciones (Yingxiu, Beichuan y Qingchuan).

Barbero *et al.* (2021) describieron la cinemática macaronésica actual con el uso de 19 estaciones GNSS ubicadas en los cuatro archipiélagos y las costas ibéricas y africanas. El análisis se basó en casi 15 años de adquisición de datos comunes con el objetivo de detectar nuevos efectos de la tectónica intraplaca o eventos locales/regionales similares consistentes con los desplazamientos del suelo calculados.

Raspini *et al.* (2018) estudian la deformación del terreno a escala regional utilizando datos Sentinel 1 de la Región de la Toscana (Italia Central), procesando adquisiciones para crear datos de deformación del suelo. Analizaron series temporales de desplazamiento, para identificar puntos anómalos. Los resultados demostraron como los datos satelitales, adquiridos con tiempos de revisión cortos y procesados rápidamente, pueden contribuir a la detección de cambios en los patrones de deformación del suelo y pueden actuar como una capa de información clave para la mitigación de riesgos.

Díaz *et al.* (2025), en el marco del proyecto GeoRED (Geodesia: Red de Estudios de Deformación) y mediante la utilización de técnicas de geodesia InSAR, han cuantificado el fenómeno de la subsidencia en 13 municipios que hacen parte de la Sabana de Bogotá, empleando imágenes Sentinel-1 (184 de órbita descendente y 225 de órbita ascendente), para el periodo comprendido entre 10-2014 y 12-2021. Generaron 840 interferogramas, de los cuales 345 corresponden a órbitas ascendentes y 495 descendentes, lo que permitió realizar la estimación de los valores de los movimientos a lo largo de la línea de vista LOS para cada conjunto de imágenes, y posteriormente mediante técnicas de combinación se estimaron las velocidades verticales y horizontales este-oeste. Uno de los municipios con mayor subsidencia en el área de estudio es El Rosal, donde se estima una tasa de desplazamiento vertical de hasta 12 cm/año,

3. Área y Contexto Geológico: Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM), estado Zulia, Venezuela

La COLM es una subregión administrativa del estado Zulia, localizada en la región occidental del país; limitando al oeste con el Lago de Maracaibo, al este con los estados Falcón y Lara, al norte con el Golfo de Venezuela y al Sur con el estado Trujillo. En la Figura 1, podemos observar el área seleccionada y los estados límites. Es una zona de producción petrolera, siendo hasta 1980 el centro de producción de hidrocarburos para Venezuela.

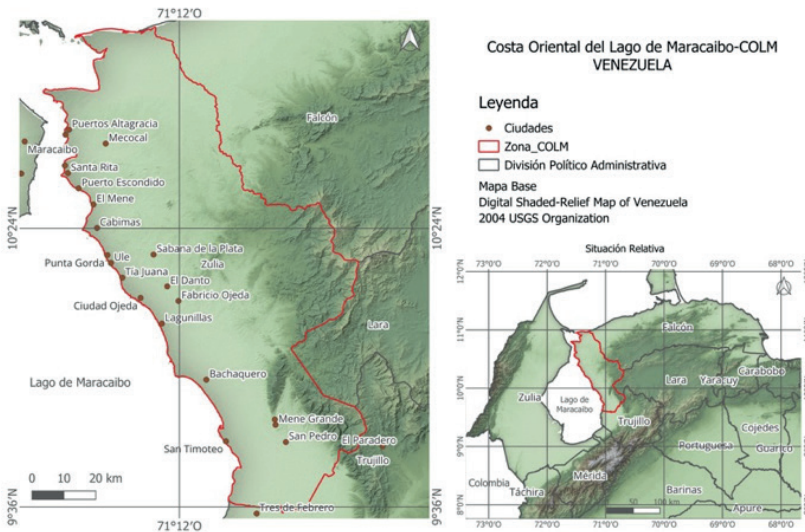


Figura 1. Costa Oriental del Lago de Maracaibo (en rojo).

Fuente: autores.

En la actualidad existen varios campos petroleros deteriorados. La profundidad de reservorio de tres campos petroleros, Tía Juana, Lagunillas y Bachaquero, es relativamente superficial, alrededor de 300 a 1000 m (Murria, 1992; Cano, 2008). Como resultado de un estudio de nivelación llevado a cabo entre 1926 a 1986, arrojó que la cantidad de subsidencia acumulada es aproximadamente de 5 m. La altura actual de los tres campos petroleros es cada vez más baja que el espejo de agua del Lago de Maracaibo, presentando graves problemas por subsidencia a través de los años (Cano, 2008). Desde el punto de vista sismotectónico, la COLM se caracteriza por la presencia de numerosas fallas con potencial sísmico. Las ciudades de Tía Juana, Ciudad Ojeda, Lagunillas y Bachaquero están rodeadas por seis sistemas de fallas, como son Oca-Ancón (transcurrente dextral), Pueblo Viejo (sinistral inversa), Valera (sinistral), Mene Grande (inversa), Icotea (sinistral inversa), Flanco Norandino (inversa) y Boconó

(dextral) (Figura 2), siendo esta última falla la más importante del contexto (Audemard *et al.*, 2000).

En cuanto a la geología de la COLM, la zona se caracteriza por presentar sedimentos no consolidados de aluviones del Pleistoceno a Holoceno y rocas sedimentarias del Cenozoico (Figura 2). La zona con problemas de subsidencia a evaluar está asentada sobre depósitos cuaternarios poco consolidados o compactados y limitada por las fallas Pueblo Viejo al oeste y Mene Grande al este, etiquetadas como 2 y 3 en la Figura 2, respectivamente.

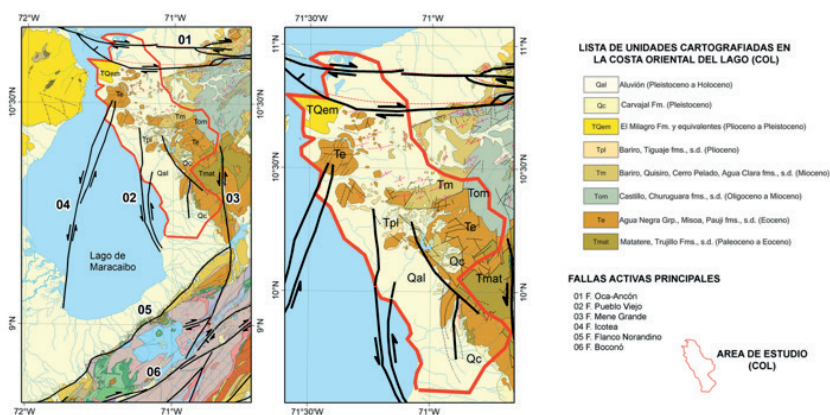


Figura 2. Sistemas de fallas de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo. Falla Oca-Ancón (dextral), Pueblo Viejo (sinistral inversa), Valera (sinistral), Mene Grande (inversa), Icotea (sinistral inversa), Flanco Norandino (inversa), Boconó (dextral) (Audemard *et al.*, 2000, 2006). Geología de superficie de la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM; tomado de Hackley *et al.*, 2006).

4. Principios Básicos de Radar de Apertura Sintética “SYNTHETIC APERTURE RADAR—SAR”

El SAR registra la detección de la energía retrodispersada de un objeto, lo que requiere que el sensor SAR transmita pulsos electromagnéticos con cierta frecuencia de repetición. Los ecos sucesivos del área observada, convenientemente procesados, se almacenan en una matriz 2D de números complejos cuya amplitud proporciona una imagen de reflectividad conocida como imagen SAR. Del mismo modo, la fase ϕ de la matriz compleja está relacionada con la distancia (*range*, R) entre el radar y cada punto de la escena observada y un término asociado a la dispersión (*scattering*) de la señal en el objeto. El radar registra la retrodispersión de los elementos de la superficie, formando un viaje de ida y de regreso. Debido a la naturaleza sinusoidal de la señal transmitida, el retraso T es equivalente al cambio de la fase entre la señal transmitida y la señal recibida. El cambio de la fase es así proporcional a

la distancia de ida y vuelta $2R$ de la radiación dividida por la longitud de la onda transmitida λ , teniendo así la Ecuación 1 (Ferreti *et al.*, 2007; Pinto, 2015):

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi}{\lambda} R \quad (1)$$

Donde: ϕ = fase; λ = longitud de onda; 2π = período en radianes; $2R$ = distancia (range) desde el sensor al objetivo y de regreso al sensor.

Por su parte, Hanssen (2015) define la Ecuación 2, como la contribución geométrica de la fase dependiente de la distancia. En este mismo sentido, la contribución de dispersión es dependiente de la interacción de la energía electromagnética con el objeto sobre la superficie, siendo entonces la fase observada la sumatoria de ambos componentes:

$$\psi_{1,obs} = \psi_{1,geom} + \psi_{1,scat} \quad (2)$$

La fase de la señal SAR es una medida de la última fracción de la distancia ida y vuelta que es más pequeña entonces que la longitud de la onda transmitida.

Esta magnitud de la fase es la que se utiliza en las técnicas InSAR. Si S_1 y S_2 son las matrices complejas, contentivas en cada imagen SAR, correspondientes a la imagen maestra (imagen de referencia) e imagen esclava, respectivamente, se denomina interferograma I a la matriz compleja resultante de multiplicar la primera matriz por la compleja conjugada de la segunda (Ecuación 3; Ferreti *et al.*, 2007; Pinto, 2015; Braun *et al.*, 2016):

$$I = S_1 * S_2^* \quad (3)$$

Donde: I = interferograma; S_1 = primera matriz; S_2^* = compleja conjugada de la segunda matriz.

Consecuentemente, la fase del interferograma es igual a la resta de las fases de las imágenes maestra y esclava (ver Ecuación 4; Hanssen, 2015; Pinto, 2015; Braun *et al.*, 2016):

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} R_1 + \phi_{scattering_1} - \left(-\frac{4\pi}{\lambda} R_2 + \phi_{scattering_2} \right) \quad (4)$$

Donde: ϕ = fase, ϕ_1 = fase 1; ϕ_2 = fase 2; λ = longitud de onda; R_1 = distancia (range).

Bajo la hipótesis de que las características del objeto no cambian significativamente de una imagen a la otra, se puede asumir, $\phi_{scattering_1} \sim \phi_{scattering_2}$, de manera que (Ecuación 5):

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda} (R_1 - R_2) \quad (5)$$

Donde: ϕ = fase; ϕ_1 = fase 1; ϕ_2 = fase 2; λ = longitud de onda; R_1 = distancia (range).

La técnica DInSAR se centra en su capacidad para medir de forma precisa la distancia (range), utilizando la fase de una imagen SAR, donde esta precisión es una fracción de la longitud de la onda empleada (Frontera *et al.*, 2012). Esta técnica permite extraer movimientos superficiales de la escena observada con precisiones de centímetros a milímetros (Frontera *et al.*, 2012; Pinto, 2015).

Ahora bien, en un interferograma, el desplazamiento ρ (referido a cuánto ha cambiado la altura del área entre las dos imágenes adquiridas) incluye, además de la topografía de la escena h , la diferencia de cambios en el terreno, debido al fenómeno de deformación. El desplazamiento ρ está referido a la deformación en la distancia (range), lo que implica que sólo es posible medir la deformación en la dirección de vista del radar (*Line of sight* —LOS), la expresión general de la fase interferométrica es la expresada por la Ecuación 6 (Ferreti *et al.*, 2007; Frontera *et al.*, 2012; Pinto, 2015; Braun *et al.*, 2016):

$$\Phi = \Phi_{topo} - \Phi_{defor} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{Bn}{R \sin\theta} h - \frac{4\pi}{\lambda} \rho \quad (6)$$

Donde: ϕ = fase; ϕ_{topo} = fase topográfica; ϕ_{defor} = fase deformación; λ = longitud de onda; R distancia (range); θ ángulo de incidencia de la observación; Bn línea base espacial; h = topografía de la escena; ρ = desplazamiento.

Los errores introducidos por efectos volumétricos y atmosféricos, fueron atenuados con el uso del análisis de series temporales y, la aplicación de un filtro de fase adaptativa combinado con filtro paso bajo, para suprimir la fase de ruido en el dominio de la frecuencia, derivada de la siguiente Ecuación 7 (Hooper *et al.*, 2007):

$$\Psi_{x,i} = W\{\Phi_{D,x,i} + \Phi_{A,x,i} + \Delta\Phi_{S,x,i} + \Delta\Phi_{\theta,x,i} + \Phi_{N,x,i}\} \quad (7)$$

Donde: $\phi_{D,x,i}$ = fase de cambio debido al movimiento del píxel en el satélite; $\Delta\phi_{\theta,x,i}$ = fase residual al error de ángulo de vista; $\phi_{A,x,i}$ = fase debido a la diferencia de retraso atmosférico; $\Delta\phi_{S,x,i}$ = fase residual debido a imprecisiones de órbita.

5. Metodología

De acuerdo a De Ruyt (2013), InSAR es una de las principales aplicaciones del sistema de Radar de Apertura Sintética (SAR), técnica que tiene la capacidad de medir desfase causado por la diferencia de fase entre dos o más imágenes, pudiendo así determinar diferencias angulares y distancias relativas con un gran detalle (en una fracción de la longitud de onda), en la geometría conformada entre las plataformas y la superficie terrestre. Ésta consiste en utilizar una antena individual, que pasa por el área de interés en reiteradas ocasiones, con la restricción de emular lo máximo posible la geometría orbital de la toma

anterior. DInSAR es un método por el cual se pueden detectar deformaciones superficiales, tanto de origen natural como antrópico, en grandes escalas, tanto temporales y espaciales, con una precisión que puede alcanzar un nivel subcentimétrico.

La búsqueda y selección de las imágenes y programas de procesamiento fueron determinados por su disponibilidad, distribución espacial, distribución temporal, características técnicas del sensor, las características del fenómeno a ser modelado y el costo de adquisición.

Se trabajó con la técnica avanzada de procesamiento DInSAR-PSI, siendo la más recomendada por diversos especialistas (Ferretti *et al.*, 2007; Hanssen, 2015; Seppi, 2016) para el estudio de subsidencia en áreas urbanas. Por lo cual, se utilizaron 20 imágenes SENTINEL 1 en modo ascendente, con base en la metodología propuesta por Hooper (2018). A continuación, el flujograma adoptado para tal fin (Figura 3).

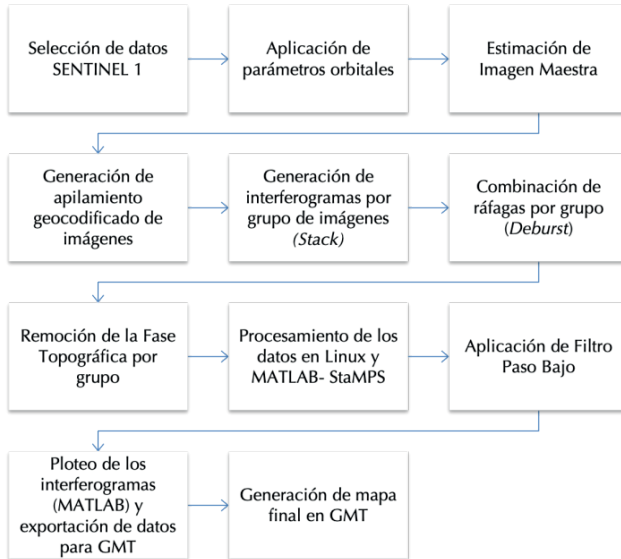


Figura 3. Flujograma para aplicación DInSAR PSI.

Se estimaron valores de desplazamiento corticales en la dirección de vista del sensor (*Line Of Sight* —LOS) que van desde metros hasta milímetros.

Los errores introducidos por efectos volumétricos y atmosféricos, fueron atenuados con el uso del análisis de series temporales y, la aplicación de un filtro de fase adaptativa combinado con filtro paso bajo, para suprimir la fase de ruido en el dominio de la frecuencia.

Para la zona de la COLM, Costa Oriental del Lago de Maracaibo, se utilizó la cantidad mínima de imágenes recomendada por Ferretti *et al.* (2007), 20 imágenes SENTINEL 1. Las mismas se descargaron, igualmente, de la plataforma ASF Data Search Vertex, en modo ascendente (Figura 4).

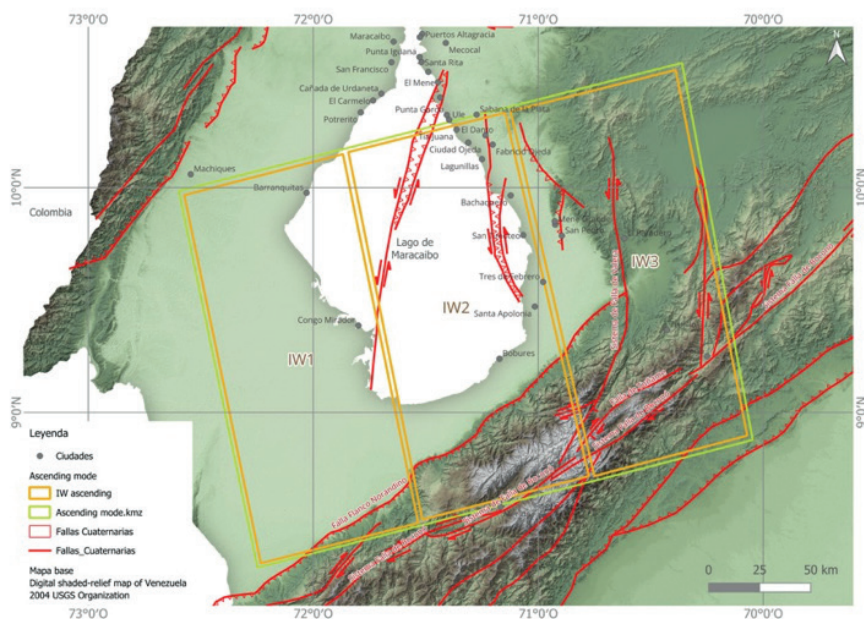


Figura 4. Cobertura de la franja seleccionada de Imágenes SENTINEL 1 (IW2), modo ascendente, para la Costa Oriental del Lago de Maracaibo (COLM).

Los datos SLC (Single Look Complex) seleccionados abarcan el espacio temporal entre septiembre de 2018 y junio de 2019 (unos nueve meses), con temporalidades de 12 días entre cada imagen. El cálculo de la línea base mostraron que en su mayoría (19 imágenes) poseen líneas base menores a los 100 m, donde sólo una imagen tiene una línea base de 104 m con respecto a la imagen maestra (véase Tabla 1).

Para el procesamiento de este conjunto de datos SLC se utilizaron los programas: Plataforma de Aplicación Sentinel (*Sentinel Application Platform* —SNAP) desarrollada con una arquitectura común para Sentinel: El Algoritmo de Flujo de Red de Costo Estadístico para el Desenrollado de la Fase (SNAPHU, 2019).¹

El Método de Retrodispersores Persistentes de Stanford (Stanford Method for Persistent Scatterers-StaMPS-) extrae los desplazamientos del terreno de series temporales de adquisiciones SAR (Hooper, 2018). El Laboratorio de Matrices (MATrix LABoratory-MATLAB)-² permite la manipulación de matrices (MathWork, 2019). Y por último, la herramienta para el Mapeo Genérico (*The Generic Mapping Tools* —GMT, 2019) con una línea de comandos para manipular conjuntos de datos geográficos.

¹ SNAPHU: *Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping* (2019). Disponible: <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>

² MathWork (2019) MATLAB. Disponible en: <https://www.mathworks.com/products/matlab>

Tabla 1. Datos SLC modo ascendente para la Costa Oriental del Lago de Maracaibo

<i>Nombre del archivo</i>	<i>MST/ESC</i>	<i>Adquisición</i>	<i>Track</i>	<i>Órbita</i>	<i>BPERP (m)</i>	<i>BTEMP (días)</i>
S1A_IW_SLC__1SDV_20190112T225842_20190112T225912_025451_02D1EA_BA78.zip	Maestra	12-ene-19	4	25451	0	0
S1A_IW_SLC__1SDV_20180926T225844_20180926T225914_023876_029B14_63E8.zip	Esclava	26-sep-18	4	23876	23,05	108
S1A_IW_SLC__1SDV_20181008T225844_20181008T225914_024051_02A0D6_89DB.zip	Esclava	08-oct-18	4	24051	42,66	96
S1A_IW_SLC__1SDV_20181020T225844_20181020T225914_024226_02A689_F9FB.zip	Esclava	20-oct-18	4	24226	-13,94	84
S1A_IW_SLC__1SDV_20181101T225844_20181101T225914_024401_02AC44_9C8B.zip	Esclava	01-nov-18	4	24401	-29,93	72
S1A_IW_SLC__1SDV_20181113T225844_20181113T225914_024576_02B2AF_7A40.zip	Esclava	13-nov-18	4	24576	-31,34	60
S1A_IW_SLC__1SDV_20181125T225843_20181125T225913_024751_02B91E_1FCA.zip	Esclava	25-nov-18	4	24751	36,25	48
S1A_IW_SLC__1SDV_20181207T225843_20181207T225913_024926_02BEF7_BF8A.zip	Esclava	07-dic-18	4	24926	-15,04	36
S1A_IW_SLC__1SDV_20181219T225843_20181219T225912_025101_02C550_0DE5.zip	Esclava	19-dic-18	4	25101	92,49	24
S1A_IW_SLC__1SDV_20181231T225842_20181231T225912_025276_02CBA2_EA4D.zip	Esclava	31-dic-18	4	25276	18,54	12
S1A_IW_SLC__1SDV_20190124T225841_20190124T225911_025626_02D84E_8A00.zip	Esclava	24-ene-19	4	25626	-44,21	-12
S1A_IW_SLC__1SDV_20190301T225841_20190301T225911_026151_02EB1A_C745.zip	Esclava	17-feb-19	4	26151	-52,39	-48
S1A_IW_SLC__1SDV_20190217T225841_20190217T225911_025976_02E4D4_C943.zip	Esclava	01-mar-19	4	25976	19,81	-36
S1A_IW_SLC__1SDV_20190418T225842_20190418T225911_026851_0304BD_F836.zip	Esclava	13-mar-19	4	26851	-92,35	-96
S1A_IW_SLC__1SDV_20190313T225841_20190313T225911_026326_02F180_C0B1.zip	Esclava	06-abr-19	4	26326	11,38	-60
S1A_IW_SLC__1SDV_20190430T225842_20190430T225912_027026_030B18_AD7C.zip	Esclava	18-abr-19	4	27026	-104,05	-108
S1A_IW_SLC__1SDV_20190406T225841_20190406T225911_026676_02FE61_1C3E.zip	Esclava	30-abr-19	4	26676	-39,42	-84
S1A_IW_SLC__1SDV_20190512T225843_20190512T225912_027201_031102_E5C1.zip	Esclava	12-may-19	4	27201	8,9	-120
S1A_IW_SLC__1SDV_20190605T225844_20190605T225914_027551_031BE4_29ED.zip	Esclava	05-jun-19	4	27551	26,95	-144
S1A_IW_SLC__1SDV_20190617T225844_20190617T225914_027726_032128_44B7.zip	Esclava	17-jun-19	4	27726	58,64	-156

6. Resultados

En este orden de ideas, se procedió a estimar las tasas de desplazamiento anual en la dirección de vista del sensor para los años 2018 y 2019 (Figura 5) con el método PSInSAR, donde se observó, para el área costera oriental, zonas puntuales con continuos procesos de levantamiento (*uplift*) y hundimiento (*subsidence*).

Las tasas estimadas de desplazamiento encontradas en COLM, arrojaron un proceso de descenso de la corteza (*subsidence*) de -40 mm en la zona de Lagunillas. Por el contrario, en Ciudad Ojeda se evidencia un proceso de levantamiento (*uplift*) de 45 mm a^{-1} , Tia Juana con 35 mm a^{-1} y Bachaquero con zonas que se levantan hacia el centro de la ciudad con 30 mm a^{-1} y zonas que se hunden hacia el NO con -20 mm a^{-1} . Igualmente se destaca una zona de hundimiento entre las ciudades de Lagunillas y Bachaquero; pudiéndose inferir que se ha generado una compactación del suelo, lo que podría haber producido la contención de la subsidencia en algunas zonas y levantamiento del suelo en otras, según Arenas (2019).

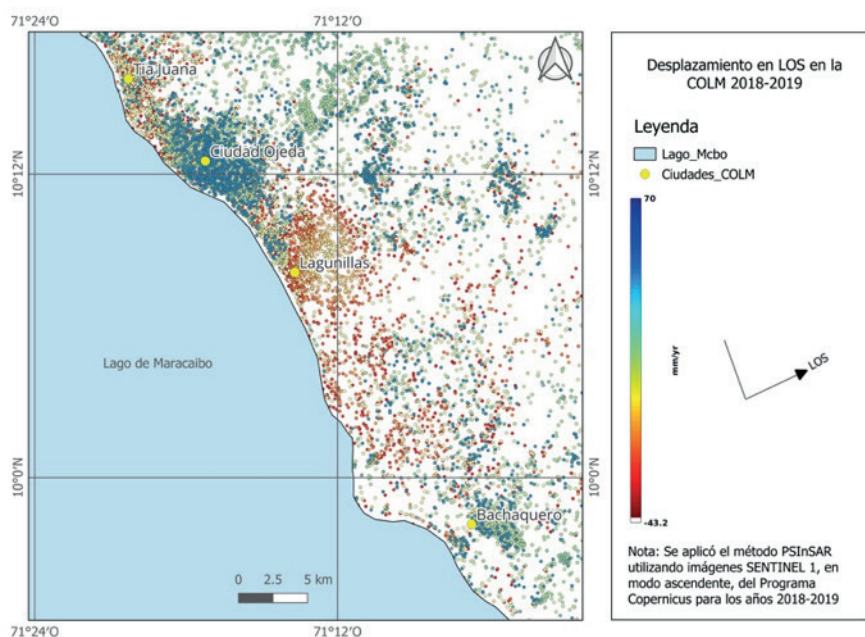


Figura 5. Tasas estimadas de desplazamientos corticales en la dirección de vista del sensor LOS de la COLM durante el período (2018-2019), aplicando el método PSInSAR y utilizando imágenes SENTINEL 1, en modo ascendente, polarización VV, del Programa Copernicus.

Sin embargo, sólo se puede hablar de procesos de subsidencia cuando la deformación en la componente horizontal es igual a cero. La determinación de la cantidad de subsidencia, puede ser obtenida desde la relación geométrica entre el ángulo de incidencia (ángulo entre la dirección vertical (nadir o off nadir) del satélite y la dirección de vista (*Line of Sight* —LOS) de la onda de radio a la superficie, que para este caso es desde el oeste, y la dirección de la deformación superficial. Por tal motivo, los análisis deben estar dirigidos a la identificación de procesos de levantamiento y hundimiento de la corteza.

Fue necesario comparar con resultados de estudios previos con datos GNSS. Arenas *et al.* (2019) afirma que las observaciones geodésicas más recientes en la zona, evidenciaron a través de algunos Puntos de Control Terrestres (PCT) una tasa de levantamiento promedio de ± 5 cm en las zonas aledañas a Ciudad Ojeda, notando así un fenómeno de deformación totalmente contrario al histórico medido en la región. Por su parte, Aguilar *et al.* (2006) realizó un estudio en la zona con el uso de tecnología GNSS, determinando que el valor de subsidencia para el año 2005 era de ± 3 cm por año (véase Tabla 2).

Tabla 2. Cuadro comparativo de valores obtenidos en la COLM en los diferentes estudios realizados

<i>Zona</i>	<i>2021 (PSI) Quintana</i>	<i>2019 (DInSAR) Arenas et al.</i>	<i>2015 (DInSAR) Deguchi y Narita</i>	<i>2019 2006 (PCT)</i>
Lagunillas	- 4 cm		-10,3 cm	-3 cm
Ciudad Ojeda	4,5 cm	3 cm		5 cm
Tia Juana	3,5 cm	-3 cm	5,1 cm	-3 cm
Bachaquero	3 cm		-5,8 cm	-3 cm

Cano (2008) intentó realizar el cálculo de deformación aplicando DInSAR, para lo que utilizó imágenes ERS-2 y ENVISAT, teniendo que casi todos los pares de interferogramas generados, obtuvieron coherencias muy bajas, por lo que fue difícil medir la tasa promedio de hundimiento en toda el área de estudio.

En contraste, Deguchi y Narita (2015), quienes realizaron un seguimiento de la deformación de la zona, aplicando la medición de desplazamiento vertical utilizando datos PALSAR obtenidos en los modos FBS y ScanSAR, obtuvieron deformaciones corticales en Tia Juana, Lagunillas y Bachaquero, con los valores de desplazamiento de -51 mm, -103 mm y -58 mm por año, respectivamente.

Es importante destacar que Deguchi y Narita utilizaron imágenes en banda L (24,6 cm de longitud), cuya longitud permite mejor penetración de la superficie. Los autores aplicaron el método DInSAR serie temporal, sin embargo, no queda claro si realizaron correcciones atmosféricas para este conjunto de datos.

Arenas *et al.* (2019) calculó la tasa de deformación para una subsidencia menor a -2,8 cm/año en el sector de Tia Juana, y un levantamiento de 2,8 cm/año en Ciudad

Ojeda. Los movimientos verticales calculados en los mapas de desplazamiento vertical arrojaron un valor máximo de hundimiento de -3 cm en la Ciudad de Tia Juana y un valor máximo de levantamiento de +3 cm en Ciudad Ojeda. El método utilizado fue DInSAR simple (dos imágenes SAR) sin aplicación de correcciones atmosféricas en los datos, por lo que pudiesen estar afectados por ruido troposférico.

7. Conclusiones

Para el caso de la zona COLM, Costa Oriental del Lago de Maracaibo, se aplicó el método de DInSAR-PSI. Los resultados soportan la idea de un proceso de deformación de levantamiento y hundimiento (*uplift* y *subsidence*) en las ciudades costeras en el este del Lago, siendo estos resultados coherentes con estudios de toma de GCP (*Ground Control Points*) previos en la zona, realizados por Aguilar (2006) y mencionado por Arenas et al. (2019) cuyas observaciones GPS más recientes del área (ejecutadas en el año 2005) determinó una tasa anual de hundimiento de -3 cm.

Se recomienda continuar el estudio, ampliando el espacio temporal del mismo, incluir el procesamiento del modo descendente para esta zona, y aplicar correcciones basadas en modelos climáticos, manteniendo el método, con el fin de mitigar efectos atmosféricos y mejorar las precisiones de los valores. Cabe destacar que el procesamiento en modo descendente de esta zona no fue realizado por el aislamiento impuesto por la pandemia de la COVID-19 desde mediados de marzo de 2020, que limitó el acceso a las plataformas informáticas necesarias para la descarga y procesamiento de las imágenes.

El presente trabajo tuvo el objetivo de conocer las ventajas de la interferometría de radar diferencial como una herramienta de apoyo en la gestión del riesgo.

Los resultados obtenidos en cada método demostraron ventajas y limitaciones que podrían obtenerse de cada uno, aunque la ubicación geográfica del área de interés es determinante en ciertas características que contribuyen significativamente en la decorrelación de los interferogramas, sobre todo cuando se usan datos en banda C. No obstante, el desarrollo de la técnica en el tiempo, ha permitido la generación de nuevos métodos y algoritmos para series temporales que atenúan dichas limitantes.

Para la fecha de publicación del presente trabajo, el método que arrojó mejores resultados para nuestro contexto geográfico fue el de Interferometría de Radar Diferencial con el uso de Retrodispersores Persistentes en el tiempo (DInSAR-PSI). No obstante, es necesario mejorar las precisiones de los valores obtenidos a fin de poder ser comparados con los valores obtenidos previamente a partir de PCT en la zona de COLM.

Es importante elogiar la estrategia usada por el Programa Copernicus y la Agencia Espacial Europea para poner a disposición las imágenes SAR, y los diferentes métodos y metodologías de procesamiento de los datos, así como la gran cantidad de instituciones de investigación en el área que han contribuido

a cristalizar la masificación del uso de estas técnicas, que ya llevan décadas en su aplicación para el estudio de las deformaciones corticales. El acceso libre, gratuito y continuo de los datos SENTINEL-1 benefician a los gestores en respuesta de emergencia, en situaciones por inundaciones, sismos, erupciones volcánicas y deslizamientos de tierra.

Es claro que el procesamiento, interpretación y análisis de los resultados obtenidos requieren de personal especializado en la temática, por lo que se espera se continúen las investigaciones en esta área del conocimiento.

Bibliografía

- Aguilar, J.; Bacaicoa, L.; Camarillo, D.; Chille, J.; DeBourg, S.; Díaz, J.; Elneser, L.; Pachano, S.; Portillo, W.; Pozo, L.; Rodríguez, D. & Silva, C. (2006). Mediciones geodésicas en la red de subsidencia de PDVSA en la COLM 2005. Trabajo Práctico Profesional. Universidad del Zulia, Venezuela.
- Arenas, I.; Hernández, B.; Royero, G.; Cioce, V. & Wildermann, E. (2019). Detección de subsidencia por efecto de extracción petrolera aplicando la técnica DInSAR en Venezuela. *Revista Mapping*, 28 (195).
- Audemard, F. A.; Machette, M.; Cox, J.; Hart, R. & Haller, K. (2000). Map of Quaternary Faults of Venezuela. Scale 1:2,000,000. Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and Offshore regions (USGS Open-File Report 00-18, 78 p). A project of the International Lithosphere Program Task Group II-2: Major active Faults of the World (Regional Coord.: Carlos Costa, Univ. San Luis-Argentina, ILP II-2 co-chairman Western Hemisphere: Michael Machette, USGS-Colorado).
- Audemard, F. A.; Singer, A.; Soulas, J. P. & the Neotectonics section of the FUNVISIS Earth Sciences Department. (2006). Quaternary faults and stress regime of Venezuela. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 61(4): 492-503.
- Barbero, I.; Torrecillas, C. & Páez, R. (2021). Recent Macaronesian kinematics from GNSS ground displacement analysis. *Stud Geophys Geod* 65, 15-35.
<https://doi.org/10.1007/s11200-020-1122-x>
- Braun, A., Veci, L. (2016). Sentinel-1 Toolbox. TOPS Interferometry Tutorial. ARRAY Systems Computing INC., ESA. Recuperado de:
https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf
- Cano, V. (2008). Potential of SAR Interferometry for studying Land Subsidence due to Petroleum Extraction in East Coast of Maracaibo Lake, Venezuela (Diploma course). Indian Institute of Remote Sensing (IIRS), National Remote Sensing Agency (NRSA), India.
- De Ruyt, R. (2013). Análisis comparativo de las técnicas InSAR Persistent Scatterers Interferometry (PSI) y Small Baseline Subset (SBAS) aplicadas en la medición de las deformaciones del Complejo Volcánico Cordón Caulle (40.5°s) - Andes del Sur (Tesis de maestría). Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich, Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), Universidad de Córdoba (UNC), Argentina.
- Deguchi, T. & Narita, T. (2015). Monitoring of land deformation due to oil production by InSAR time series analysis using PALSAR data in Bolivarian Republic of Venezuela. In Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR

- Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop. Frascati, Italy: ESA Publication SP-731. Recuperado de: <http://proceedings.esa.int/files/331.pdf>
- Delgado, J.; Cuccu, R. & Rivolta, G. (2015). Monitoring ground deformation using Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Small Baselines (SBAS) techniques integrated in the ESA RSS SERVICE: the case study of Valencia, Rome and South Sardinia. Progressive Systems Srl. In L. Ouwehand (Ed.), Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop. Frascati, Italy: ESA Publication SP-731. Recuperado de: https://proceedings.esa.int/page_paper263.php
- Díaz-Mila, F.; Escobar-Rey, L. K. & Mora-Páez, H. (2025). Análisis cuantitativo de la subsidencia en la zona suroccidental de la Sabana de Bogotá mediante geodesia InSAR. *Revista de Teledetección*, 65, 21345. <https://doi.org/10.4995/raet.2025.21345>
- Ferreti, A.; Monti-Guarnieri, A.; Prati, C.; Rocca, F. & Massonnet, D. (2007). InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. Politecnico di Milano. Italy. CNES, Toulouse, France. European Space Agency. Recuperado de <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/InSAR-Principles-Guidelines-for-SAR-Interferometry-Processing-and-Interpretation.pdf>
- Ferreti, A.; Monti-Guarnieri, A.; Prati, C., Rocca, F. & Massonnet, D. (2007). Part C- InSAR processing: a mathematical approach. Politecnico di Milano. Italy. CNES, Toulouse, France. European Space Agency. Recuperado de: https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptC.pdf
- Frontera Genovard T.; Blanco Sánchez P.; Concha Dimas, A.; Goula Suriñach, X.; Perez Aragües F. & Maturià Alavedra J. (2012). Medidas de deformaciones cosísmicas con DInSAR para el terremoto de Lorca del 11 de mayo de 2011. *Física de la Tierra*, 24, 151-169. http://dx.doi.org/10.5209/rev_FITE.2012.v24.40136
- Hackley, P.; Urbani, F.; Karisen, A. & Garrity, C. (2006). *Mapa Geológico de Venezuela a Escala 1:700.000*. USGS-UCV. Recuperado de: <https://pubs.usgs.gov/of/2006/1109/>
- Hanssen, R. (2015). SAR interferometry. Delft University of Technology. Netherlands. 6th ESA Advanced Training Course on Land Remote Sensing. Recuperado de: https://seom.esa.int/landtraining2015/files/Day_4/D4T1a_LTC2015_Hanssen.pdf
- Hooper, A. (2018). STAMPS. Stanford University. Recuperado de: <https://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/>
- Hooper, A.; Segall, P. & Zebker, H. (2007). Persistent Scatterer Interferometry Synthetic Aperture Radar for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos. Geodesy and Gravity/Tectonophysics. *Journal of Geophysical Research, Solid Earth, An AGU Journal*, 112, B7. <https://doi.org/10.1029/2006JB004763>
- Liu, Z.; Lundgren, P. & Hensley, S. (2015). Mapping Fault Slip in Central California using Satellite, Airborne InSAR and GPS. Jet Propulsion Laboratory. In L. Ouwehand (Ed.), Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop. Frascati, Italy: ESA Publication SP-731. Recuperado de: <https://proceedings.esa.int/files/187.pdf>
- López, C. (abril 26, 2012). *Fotografía aérea geológica en Venezuela*. Aviación Venezolana. <https://www.aviacioncivil.com.ve/fotografia-aerea-geologica-en-venezuela/>
- Mayorga, T. (2011). *[Uso de interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar) en la ladera occidental del Cerro Iguazo, comunidad Tumba, parroquia Quimiag, cantón Riobamba, provincia de Chimborazo-Ecuador, para determinar la deformación*

de la ladera por los movimientos en masa, Tesis de maestría. Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich], Comisión Nacional de Actividades Espaciales-CONAE, Universidad de Córdoba, Córdoba, Argentina. Recuperado de: https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/11534/2013_Mayorga-Torres-Tania.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Merryman Boncori, J.; Devoti, R.; Visini, F.; Carafa, M.; Pezzo, G.; Fornaro, G.; Berardino, P.; Atzori, S.; D'Amico, V.; Kastelic, V.; Meletti, C.; Pietrantonio, G.; Riguzzi, F.; Salvi, S. y Fernández Prieto, D. (2015). Mid-Term Review Results of the ESA STSE Pathfinder CHARMING Project (Constraining Seismic Hazard Models with InSAR and GPS). FRINGE 2015, Proceedings of the workshop held 23-27 March, 2015 in Frascati, Italy. Edited by L. Ouwehand. ESA-SP 731 (16) Recuperado de: <https://www.earth-prints.org/entities/publication/f50c63b3-1ce7-431c-b0dc-807f6244f02b/details-paper>
- Murria, J. & Saab, J. A. (1992). Problems and solutions in emergency planning for Western Venezuela oilfields. Presented at the Earthquake Engineering, Tenth World Conference, Rotterdam. Recuperado de: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/10_vol10_5917.pdf
- Pinto, C. (2015). [*Deteção de Deformações Superficiais na Mina do Manganês do Azul através da Interferometria de Radar Orbital*, Tesis de maestría, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)], Brasil. Recuperada de: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/INPE_90029ba4698d25d71f1465432dea81a0
- Plattner, C.; Fattahi, H.; Malservisi, R.; Verdecchia, A. & Dixon, T. (2015). Earthquake cycle deformation at the Ballenas Transform, Gulf of California, Mexico, from InSAR and GPS measurements. In L. Ouwehand (Ed.), *Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop*. ESA Publication SP-731. Frascati, Italy. Recuperada de: <https://proceedings.esa.int/files/366.pdf>
- Pousse, L.; Pathier, E.; Jouanne, F.; Vassallo, R.; Reinoza, C.; Audemard, F.; Doin, M. P. & Volat, M. (2016). Spatial and temporal variations in creep rate along the El Pilar Fault at the Caribbean South American Plate boundary (Venezuela), from InSAR, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121, 8276-8296. <https://doi.org/10.1002/2016JB013121>
- Przylucka, M.; Graniczny, M. & Kowalski, Z. (2015). Identification and Changes of Subsidence Basins Caused by Coal Mining Activity in Upper Silesia Using Satellite Interferometric Data. Polish Geological Institute - National Research Institute. In *Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop*, ESA Publication SP-731. Frascati, Italy. Recuperado de: https://proceedings.esa.int/page_paper51.php
- Quintana, G. (2021). [*Estudio de las deformaciones de la corteza derivadas de la geodinámica a partir de la Interferometría SAR (Synthetic Aperture Radar): Ejemplos de aplicación (Kumamoto-Japón, Valencia y Costa Oriental del Lago de Maracaibo-Venezuela)*, Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela-UCV], Venezuela.
- Raspini, F.; Bianchini, S. & Ciampalini, A. (2018). Continuous, semi-automatic monitoring of ground deformation using Sentinel-1 satellites. *Sci Rep*, 8, 7253. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-25369-w>
- Rojas, Y. (2016). Evaluación de parámetros de fiabilidad de imágenes ALOS PALSAR para la aplicación de técnicas de Interferometría Diferencial en la Costa Oriental

- del Lago de Maracaibo. Jornadas de Investigación y Encuentro Académico Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela. Agencia Bolivariana para Actividades Espaciales-ABAE, Venezuela.
- Rucci, A., Ferretti, A., Monti Guarnieri, A. y Rocca, F. (2012). Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sensing of Environment*, 120, 156-163. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.030>
- Ruiz-Armenteros, A.; Delgado, J.; Sousa, J.; Caro, M.; Gil, A.; Galindo-Zaldívar, J. & Sanz de Galdeano, C. (2015). Deformation monitoring in Zafarraya Fault and Sierra Tejeda Antiform (Betic Cordillera, Spain) using satellite radar interferometry. Universidad de Jaén, Progressive Systems Srl, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Department of Radar Technology, TNO, The Hague, Universidad de Granada and Instituto and Andaluz de Ciencias de la Tierra, CSIC-Universidad de Granada. In Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop, ESA Publication SP-731. Frascati, Italy.
Recuperado de: <https://proceedings.esa.int/files/75.pdf>
- Seppi, S. (2016). [Uso de Interferometría Diferencial para Monitorear Deformaciones de Terreno en la Comuna de Corvara, Provincia de Bolzano, Italia, Tesis de magister, Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich (CONAE), Universidad Nacional de Córdoba], Argentina. Recuperada de: <https://www.famaf.unc.edu.ar/documents/1350/42-Seppi.pdf>
- Shan, X.; Qu, C.; Guo, L.; Song, X.; Jian, Y.; Wen, S.; Wang, C.; Xu, X. & Liu, Y. (2015). The Vertical Coseismic Deformation Field of the Wenchuan Earthquake Based on the Combination of GPS and InSAR. Institute of Geology, China Earthquake Administration, China University of Petroleum (Huadong) and State Key Laboratory of Earthquake Dynamics of Geology, CEA, Institute of Geology and Seismological Bureau of Xinjiang Uyger Autonomous Region, Institute of Geology and Shen Zhen University, Institute of seismology, Wuhan. In Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop, ESA Publication SP-731. Frascati, Italy. Recuperado de: <https://proceedings.esa.int/files/281.pdf>
- Tronin, A. (2010) Satellite Remote Sensing in Seismology. A Review. *Remote Sens.*, 2, 124-150. <https://doi.org/10.3390/rs2010124>
- Wegmüller, U.; Strozzi, T. & Werner, C. (2015). Earthquake Damage Mapping using the Coherence of Persistent Scatterers. Gamma Remote Sensing AG. In Proceedings of FRINGE'15: Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry and Sentinel-1 InSAR Workshop, ESA Publication SP-731. Frascati, Italy. Recuperado de: https://proceedings.esa.int/page_paper45.php