



Cartógrafo.CL/01-2021



**Gilberto Daniel Hermosillo
Camacho**

Ingeniero Topográfico
Máster en Geotecnologías
Cartográficas en Ingeniería y
Arquitectura

México



gildan71@hotmail.com

daniel.hermosillo@cfe.gob.mx

Tecnología radar satelital InSAR para la detección y monitorización de la deformación de la superficie terrestre por procesos geodinámicos y/o actividades antrópicas

RESUMEN

Esta investigación se centra en la aplicación de la técnica de interferometría, es decir, la utilización de datos de radar de apertura sintética transportados espacialmente, para identificar y evaluar la magnitud de la deformación sobre la superficie ocasionada por eventos naturales y/o actividades antrópicas.

El primer caso de estudio se localiza a 2 km al noreste de Crucecita, Oaxaca. En este lugar, el 23 de junio del 2020, un sismo de magnitud 7.4 ocasionó que la superficie sufriera un levantamiento de hasta 42 centímetros en el punto más cercano al epicentro, en dirección a la línea de visión del satélite (LOS). Este movimiento produjo daños en la infraestructura de las localidades cercanas y pérdida de vidas humanas. Se utilizó la técnica de Interferometría Diferencial (DInSAR) con datos del satélite Sentinel-1, obteniendo las franjas interferométricas características de la deformación causada por sismos, así como su magnitud en centímetros.

El segundo caso de estudio se localiza en el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, a 30 km al sureste de Mexicali. Utilizando la técnica Persistent Scatterer Interferometry (PSI), para el análisis de series de tiempo, y mediante el procesamiento de paquetes de múltiples imágenes adquiridas en fechas distintas, se identificó una zona de subsidencia con dirección noreste que se asocia a la extracción de agua y vapor, con lo cual se logró determinar un rango de entre 9 a 10 centímetros de subsidencia acumulada por año.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha visto impulsada la tecnología geodésica debido a un gran número de desarrollos en el ámbito espacial. El mejoramiento de la tecnología de satélites artificiales ha significado un gran avance y proporciona ventajas inigualables en el estudio de la atmósfera y superficie terrestre a gran escala. La llegada de los sensores ópticos transportados espacialmente sobre satélites artificiales detonó la generación de conocimiento de la dinámica de la atmósfera, así como de la superficie, principalmente en el sector medioambiental y oceánico; ya que permitió realizar observaciones sobre amplias extensiones de terreno a un relativo bajo costo y, en conjunto con el desarrollo de la tecnología de posicionamiento global (GNSS) proporcionó las herramientas necesarias para la obtención de datos posicionales ligados a información de origen espectral.

Un segundo desarrollo se dio con la implementación de tecnología de sensores activos como el radar, para la observación, monitorización y mapeo de la dinámica de la superficie asociada a la actividad sísmica-tectónica, el movimiento de los glaciares, inundaciones, deslizamientos de tierra, estudios oceánicos, monitorización de deformación de la superficie por actividades antrópicas como la extracción de agua, petróleo y gas, entre otros. Todos estos fenómenos representan en ocasiones riesgos a la población, por lo cual es de vital importancia su observación, mapeo y monitorización, echando mano de la tecnología de radar satelital, para generar información que contribuya a la comprensión de los fenómenos y a la oportuna toma de decisiones por parte de las autoridades, con el fin de salvaguardar la vida.

En el año 2014, la Agencia Espacial Europea (ESA) desarrolló y puso en órbita el satélite Sentinel-1/A, bajo el programa Copérnico de observación de la Tierra, diseñado para proporcionar información precisa, actualizada y de fácil acceso que permita mejorar la gestión del medio ambiente, comprender y mitigar los efectos del cambio climático y garantizar la seguridad ciudadana. Estos satélites proporcionan un conjunto único de observaciones, comenzando por las imágenes de radar de apertura sintética, capaces de observar la superficie de la Tierra en cualquier condición meteorológica, de día o de noche¹.

La misión Sentinel-1, se compone de dos satélites gemelos (A y B) con una órbita sincrónico solar, casi polar, circular, que operan de día y noche con un sensor de radar de apertura sintética en banda-C, período de revisita de 6, 12 o 24 días (según el sitio), difusión libre y rápida para apoyar a las aplicaciones operativas en las áreas prioritarias de vigilancia marina, vigilancia terrestre y servicios de emergencia².

Interferometría DInSAR aplicada al mapeo de la deformación de la superficie por sismos

La interferometría diferencial DInSAR (por su sigla en inglés de Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar), es una técnica de observación de la Tierra mediante la utilización de sensores activos de radar de apertura sintética, montados sobre satélites, con los que es posible identificar, medir y mapear el movimiento de la superficie y el cálculo de la coherencia relativa, analizando la diferencia en la fase entre dos imágenes con fechas de adquisición distinta.

Una antena de apertura sintética o virtual consiste en un vector de sucesivas y coherentes señales de radar, que son transmitidas y recibidas por una pequeña antena que se mueve a lo largo de un determinado recorrido de vuelo u órbita. El procesamiento de la señal usa las magnitudes y fases de la señal recibida sobre sucesivos pulsos para crear una imagen (Sillerico *et al.*, 2010).

A partir de dicho principio, los datos obtenidos son las distancias entre el satélite y la superficie del terreno, que se calculan mediante la medición de desplazamientos y desfases. La señal se ve afectada por varios parámetros como son la atmósfera, el ruido, la topografía y los movimientos en la superficie. En el caso de movimientos o deformaciones, el cálculo se desarrolla de la siguiente manera: Se tiene un punto P

¹El programa Copérnico.
The European Space Agency.
<https://1bestlinks.net/5v96w>

²Sentinel-1-Missions-Sentinel
Online. ESA - Sentinel-1.
<https://1bestlinks.net/9c6Wi>



sobre la superficie de la Tierra que es observado por un satélite en fechas distintas, si el punto P no tuvo movimiento, las distancias R_s y R_m deberán ser iguales, de haber tenido un movimiento al punto hipotético punto P' , entonces las distancias serán diferentes y la magnitud del movimiento será directamente proporcional a la diferencia en la fase (Sillerico *et al.*, 2010) (Figura 1).

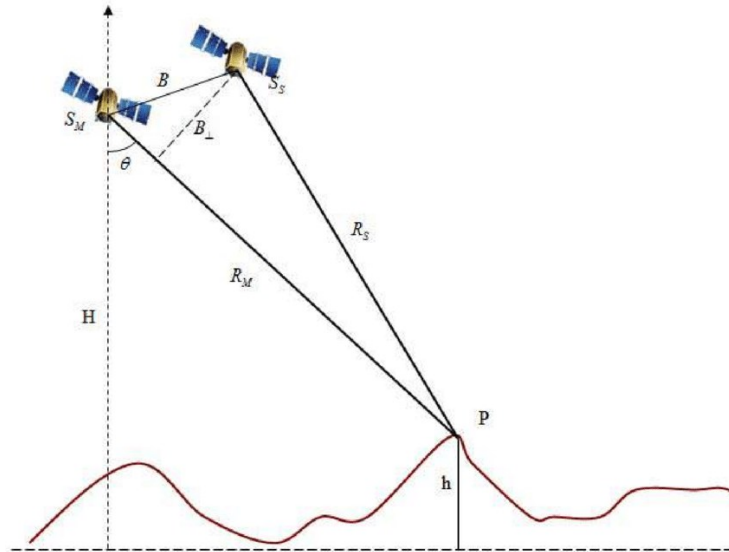


Figura 1. Geometría de adquisición de imágenes SAR (Synthetic Aperture Radar/ Radar de Apertura Sintética).

La fase interferométrica resultante es una contribución de diferentes fuentes que se representa con la ecuación siguiente:

$$\phi_{int} = \phi_s - \phi_m$$

$$\phi_{int} = \frac{SP-MP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \frac{SP'-MP}{\frac{\lambda}{4\pi}} + \phi_{atm} + \phi_{ruido}$$

$$\phi_{int} = \phi_{topo} + \phi_{mov} + \phi_{atm} + \phi_{ruido}$$

Donde:

ϕ_s y ϕ_m son las fases interferométricas de las imágenes esclava y maestra.

ϕ_{atm} es la componente atmosférica.

ϕ_{ruido} es la componente del ruido.

ϕ_{topo} es la componente topográfica.

ϕ_{mov} es la componente del movimiento o deformación.

SP es la distancia del satélite esclavo al punto P.

MP es la distancia del satélite maestro al punto P.

λ es la longitud de onda del radar.

Cuando un sismo deforma la superficie, la distancia entre el terreno y el satélite será mayor o menor con relación a una imagen que se denomina "Máster", previa al evento. Debido a que la señal del radar es emitida a la superficie con un ángulo de incidencia oblicuo, la deformación será en dirección de la línea de visión del satélite LOS (Line Of Sight) (Meng *et al.*, 2012), como se observa en la Figura 2.

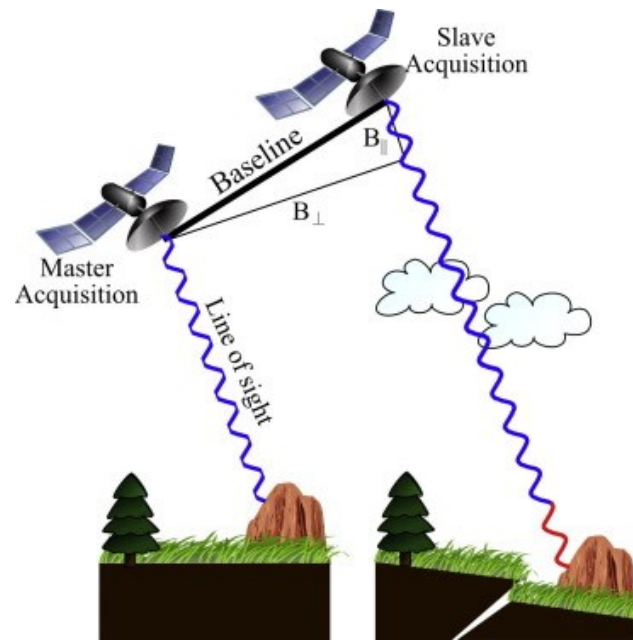


Figura 2. Identificación del movimiento sobre la superficie a través de la medición de la diferencia en la fase entre dos imágenes adquiridas en fechas distintas.

Caso de estudio 1:

Sismo de M 7.4, del 23 de junio del 2020 en Crucecita, Oaxaca

El 23 de junio del 2020 a las 10:29 horas (hora del centro de México), el Servicio Sismológico Nacional reportó un sismo de magnitud 7.4 cercano a la localidad de Crucecita, en la costa del estado mexicano de Oaxaca, con epicentro en las coordenadas Lat. 15.784°, Long. -96.12 y a una profundidad de 22.6 km. La intensidad produjo que se percibiera en los estados de Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Michoacán, Jalisco, Querétaro, Morelos, Tabasco, Veracruz, Puebla, Estado de México y en la Ciudad de México (SSN, agosto 2020) (Figura 3).

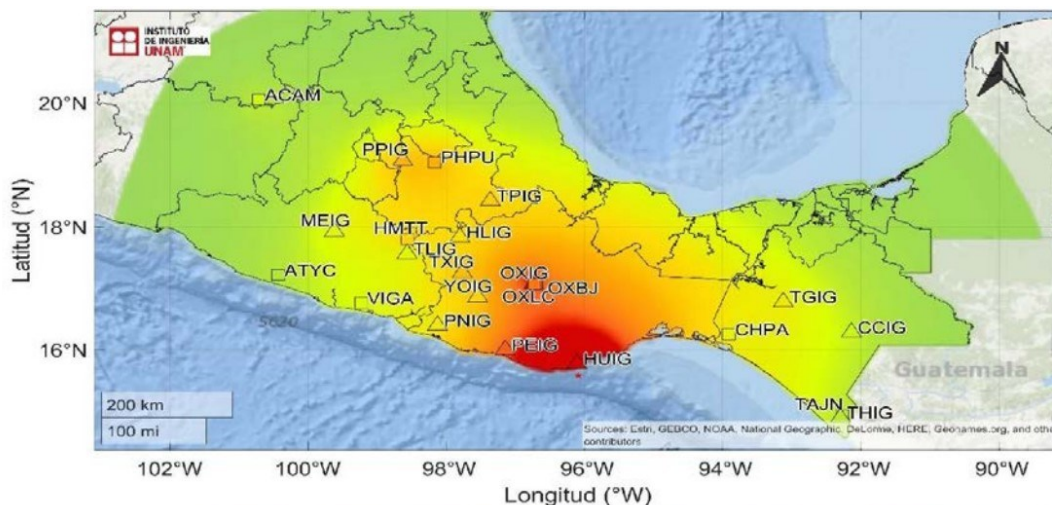


Figura 3. Mapa de intensidades del sismo.

Fuente: Instituto de Ingeniería de la UNAM.

PGA (cm/s ²)	<1	2	4	11	30	90	110	130	>150
Percepción del movimiento	Leve			Moderado			Fuerte		

El origen de la sismicidad en esa zona se debe al contacto convergente entre dos importantes placas tectónicas: la placa de Cocos que subduce bajo la placa de Norteamérica. La interacción entre estas dos placas tiene lugar en la costa del Pacífico desde Chiapas hasta Jalisco (SSN, agosto 2020) (Figura 4).

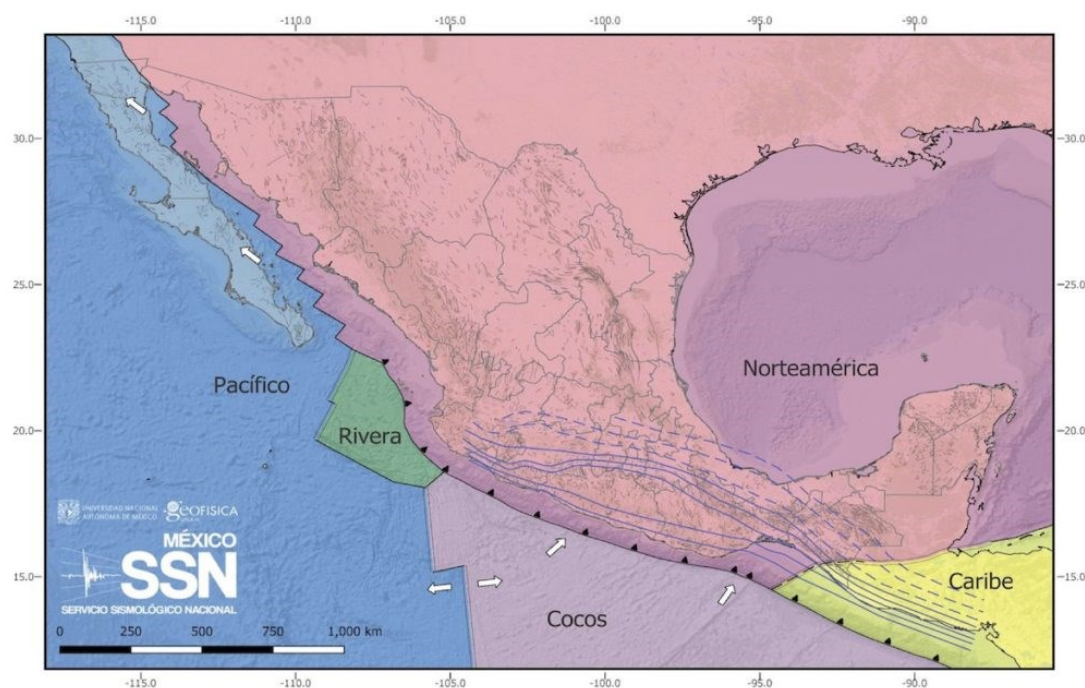


Figura 4. Mapa de interacción de las placas tectónicas en México.

Fuente: Servicio Sismológico Nacional de México.

Cada vez que ocurre un sismo de magnitud moderada a fuerte, las rocas que se encuentran cerca de la zona de ruptura sufren desplazamientos y reajustes, ocasionando nuevos sismos a los que se les llama réplicas (SSN, agosto 2020). El reajuste de rocas y la liberación de energía por lo general produce deformación sobre la superficie, que se puede manifestar como subsidencia o levantamiento del terreno, ocasionando daños en la infraestructura urbana, deslizamientos y derrumbes.

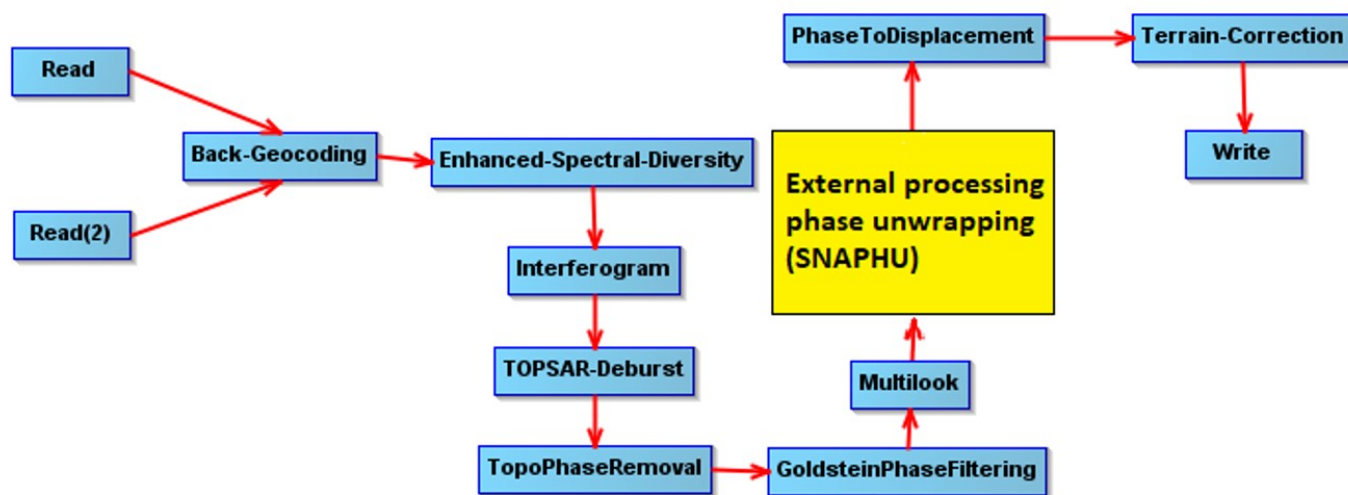
Identificación de la señal de deformación de la superficie a causa del sismo

Se realizó un estudio para identificar la deformación de la superficie en la zona donde ocurrió el sismo, aplicando la técnica DInSAR para evaluar la magnitud y determinar al área de afectación. Los satélites utilizados fueron Sentinel-1A/B de la Agencia Espacial Europea. Se descargaron dos imágenes, una correspondiente al 22 de junio y la segunda al 28 de junio, el PATH utilizado fue el 70, polarización VV y órbita descendente (Figura 5).



Figura 5. Huella de cobertura de las imágenes radar Sentinel-1A/B sobre la zona del sismo.

Las imágenes fueron sometidas al flujo de procesamiento para obtener el interferograma, compuesto por los siguientes pasos (Figura 6):



El interferograma es el resultado del conjugado complejo entre la primera imagen por la segunda, mostrando las franjas en un módulo de 2π radianes (Hanssen, 2001). Cada círculo concéntrico representa aproximadamente 2.8 cm ($\lambda/2$) de deformación del terreno en la línea de visión del satélite. El círculo del centro representa el punto de mayor deformación y es coincidente con el epicentro del sismo. Si se cuenta el número de franjas y se multiplica por la deformación correspondiente a cada una, se obtienen 42 cm (Figura 7).

Figura 6. Flujo básico de procesamiento DInSAR para identificación de deformación por sismos.

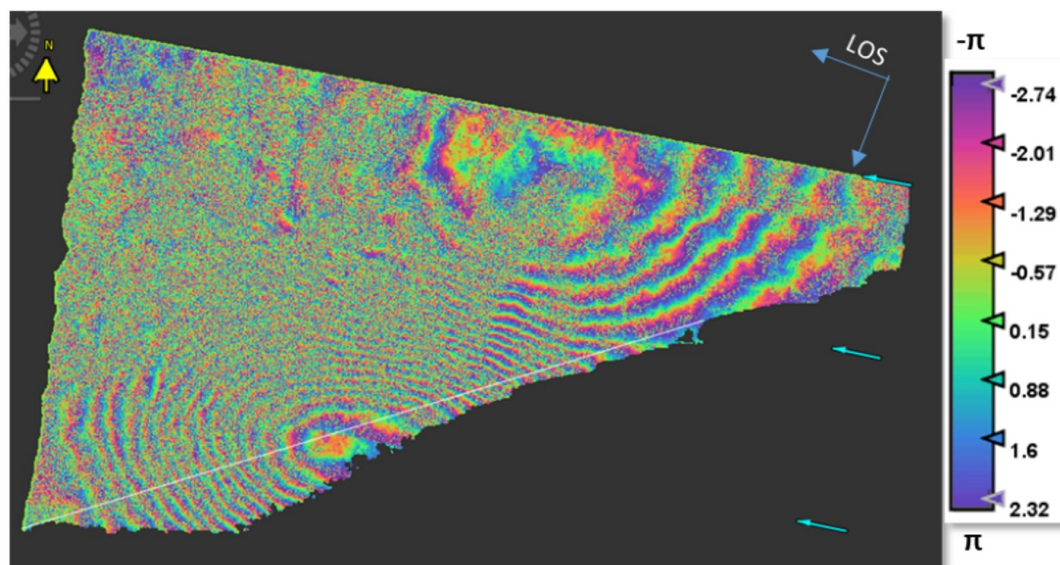


Figura 7. Interferograma diferencial que evidencia la deformación sufrida en la superficie, en el estado de Oaxaca a causa del sismo del 23 de junio del 2020.

Esta es la manera más habitual de representar la deformación por sismos empleando la interferometría, pero si se desea obtener la señal de desplazamiento continua, es necesario realizar el procedimiento llamado "desenvolvimiento de la fase" (phase unwrapping), que consiste en realizar una estimación válida para recuperar la señal original y así obtener un mapa de deformación en metros (Chen & Zebker, 2002) (Figura 8).

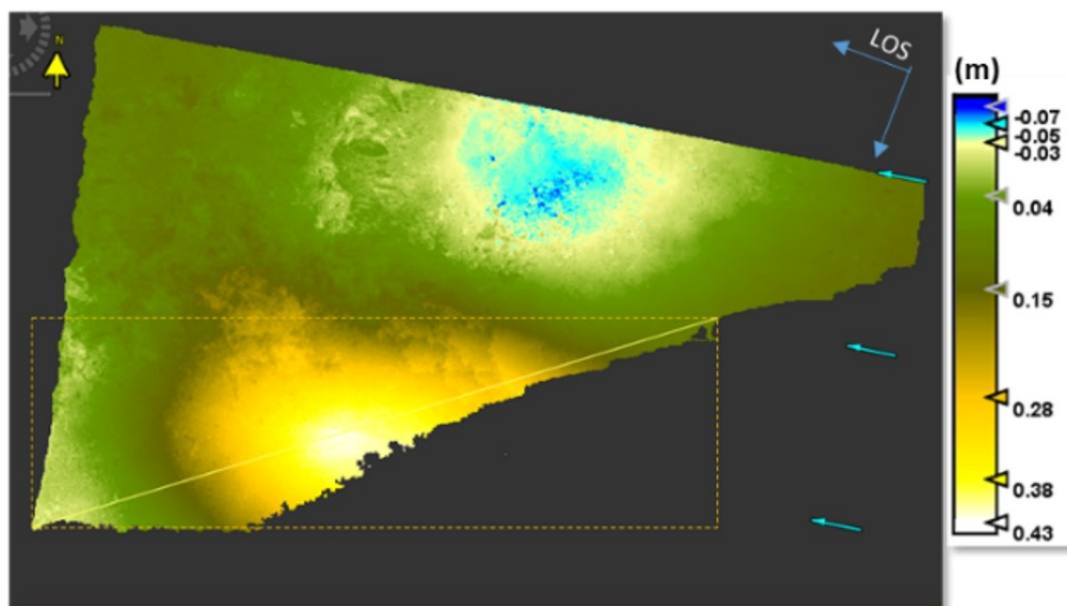


Figura 8. Mapa de deformación de la superficie en metros producto de aplicar el procedimiento de desenvolvimiento de la fase al interferograma, utilizando el algoritmo SNAPHU.

Para conocer la dirección de la deformación y su comportamiento respecto del entorno que se asume, no tuvo movimiento, se trazó una línea de perfil para visualizar de mejor manera el comportamiento de la superficie.

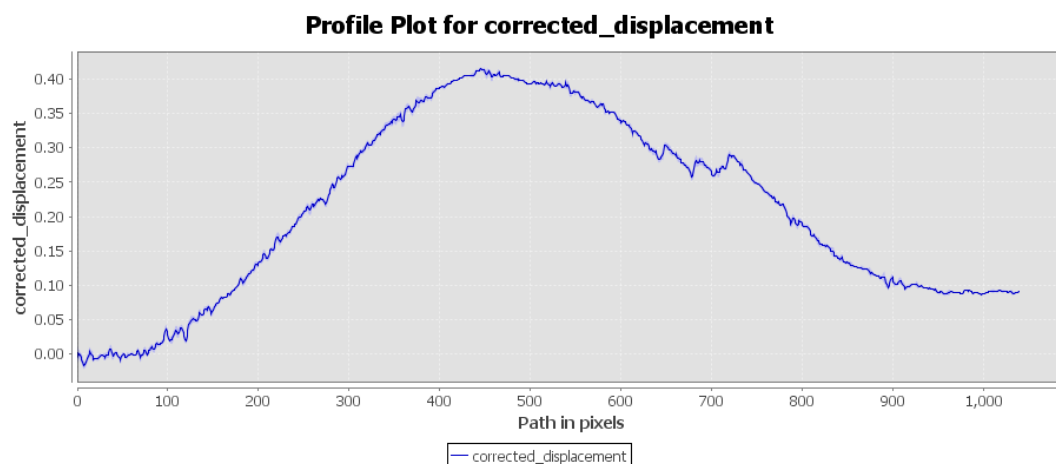


Figura 9. Perfil de deformación de la superficie a causa del sismo.

Se observa en la Figura 9 que el movimiento fue positivo, indicando levantamiento del terreno en la línea de visión del satélite con hasta 42 cm. La NASA (National Aeronautics and Space Administration) realizó el mismo estudio utilizando imágenes del satélite japonés ALOS PALSAR -2, que opera en banda L (24cm de longitud de onda) encontrando el mismo patrón de deformación y con una magnitud similar a la determinada en este estudio (Nasa, June 2020) (Figura 10).

Finalmente, se tuvo acceso a datos de observación de la estación OXUM GNSS, perteneciente a la red TLALOCNet (Cabral-Cano & Salazar-Tlaczani, 2015). Los datos indican que en el momento del sismo hubo movimiento horizontal y vertical en el sitio. Aunque la estación se localiza fuera del área de influencia de las franjas interferométricas, es interesante observar que inicialmente el movimiento vertical fue positivo, es decir, levantamiento de la superficie, para posteriormente regresar, incluso, un poco más bajo de la elevación donde se encontraba previo al sismo (Figura 11).

Los productos obtenidos del estudio DInSAR pueden ser visualizados en cualquier medio de representación de información geográfica para una mejor interpretación. En la Figura 12, se observa que la deformación llega incluso a la localidad de Santa María Huatulco y San Miguel del Puerto.

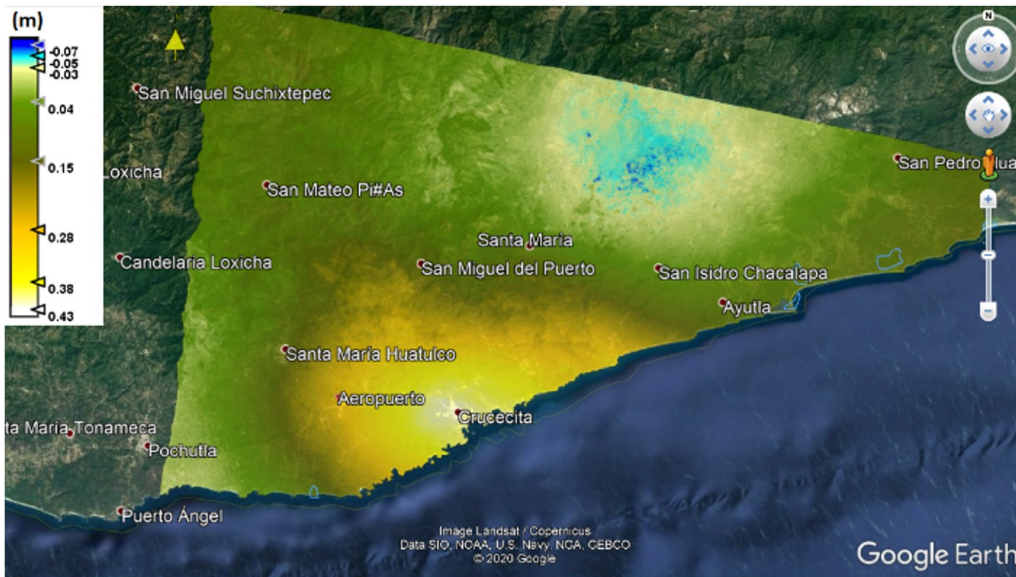


Figura 12. Mapa de deformación sobre plataforma de Google Earth.

PSI para la evaluación de la deformación de la superficie por actividades antrópicas

Persistent Scatterer Interferometry (PSI) es una técnica desarrollada para el procesamiento de interferometría radar, que ofrece una manera de reducir los principales errores que se producen en las metodologías convencionales como DInSAR; logrando disminuir la decorrelación temporal y geométrica, así como el ruido atmosférico. Esto se consigue a través del análisis de la fase interferométrica de dispersores individuales y coherentes en el tiempo, en una pila de decenas de interferogramas diferenciales con una imagen maestra (Figura 13).

Las principales características de este método de procesamiento de múltiples imágenes son el uso de una sola pila de interferogramas diferenciales con un máster único y que solo los píxeles coherentes en el tiempo, es decir, "dispersores permanentes", son considerados. Además, esta técnica se distingue de otros métodos de procesamiento interferométrico comunes por el hecho de que se pueden utilizar todas las imágenes adquiridas, incluidas aquellas con líneas de base grandes. Este es el caso, ya que los píxeles con dispersión puntual no sufren decorrelación geométrica como lo hacen los objetivos con un mecanismo de dispersión distribuida, y dichos píxeles permanecen coherentes en todos los interferogramas (Kampes, 2006) (Figura 14).

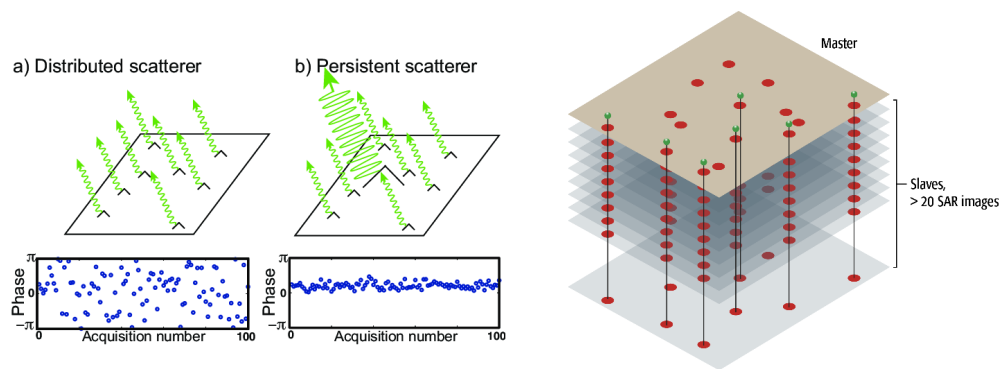


Figura 13. Mecanismo de dispersión distribuida y puntual dominante persistente.

Utilizando esta técnica es posible generar series de tiempo largas sobre sitios que favorecen la retrodispersión y la coherencia como centros urbanos, desiertos, zonas rocosas y áreas con escasa vegetación. Aunque la técnica está desarrollada para obtener información altamente precisa y baja en ruido de algunos sitios con características específicas, es posible implementarla en zonas que no cumplen con las características requeridas, ya que los dispersores permanentes pueden ser tanto naturales como artificiales (Figura 15).



Figura 14. Reflector triédro para retrodispersión persistente de la señal radar en un sitio con alta decorrelación.



Figura 15. Aunque las minas son estructuras hechas por el hombre, funcionan como reflectores naturales ya que no es necesario instalar ningún dispositivo para obtener información coherente de la fase y amplitud, debido a su composición, condiciones y orientación.

Caso de estudio 2:

Identificación de subsidencia de la superficie en el campo geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México

El campo geotérmico Cerro Prieto (CGCP) está localizado a 30 km al sureste de Mexicali, Baja California, México (Figura 16). Centrado entre la falla Imperial de deslizamiento lateral derecho y la falla de Cerro Prieto, el área es una cuenca de separación en la parte sur de la depresión Salton. La extracción de agua y vapor del sistema geotérmico, a una profundidad de 1500–3000 m, provoca una tasa máxima de hundimiento del orden de 8 cm/año (Hanssen, 2001; Fabriol y Glowacka, 1997).



Figura 16. Localización geográfica del campo geotérmico de Cerro Prieto. Elaboración propia.

El golfo de California es el resultado de la actividad tectónica que creó una serie de centros de expansión y fallas transformadoras. Como resultado, en Cerro Prieto, la corteza terrestre se está abriendo ("cuenca de separación"). Un afloramiento de magma de la astenosfera, combinado con intrusiones en forma de diques, son la principal fuente de calor del depósito. Esto provoca que el agua subterránea en las areniscas y las lutitas grises del delta del río Colorado se caliente en profundidad. Las temperaturas a 2500 m se estiman en 350 °C. Una de las manifestaciones más notables de la actividad termal en la zona es el volcán Cerro Prieto, con una elevación de unos 210 m. El área este presenta una alta actividad agrícola, mientras el área al oeste es seca y muestra manifestaciones geotérmicas en la superficie como volcanes de lodo y fumarolas. El clima de la zona es extremo: las temperaturas varían de -2 °C en invierno a 47 °C en verano. Las precipitaciones son muy escasas, con una media anual de 80 mm (Hanssen, 2001).

Datos

Con la finalidad de conocer la tasa de subsidencia asociada a la extracción de agua y vapor del sitio, se aplicó la técnica de interferometría para series de tiempo PSI. Se adquirieron mediante el portal Alaska Satellite Facility, 38 imágenes del satélite Sentinel-1A/B, en modo de adquisición IW, Path 173, dirección de vuelo descendente y polarización VV. El período de estudio es de dos años, desde enero del 2018 a diciembre del 2019 (Figura 17).

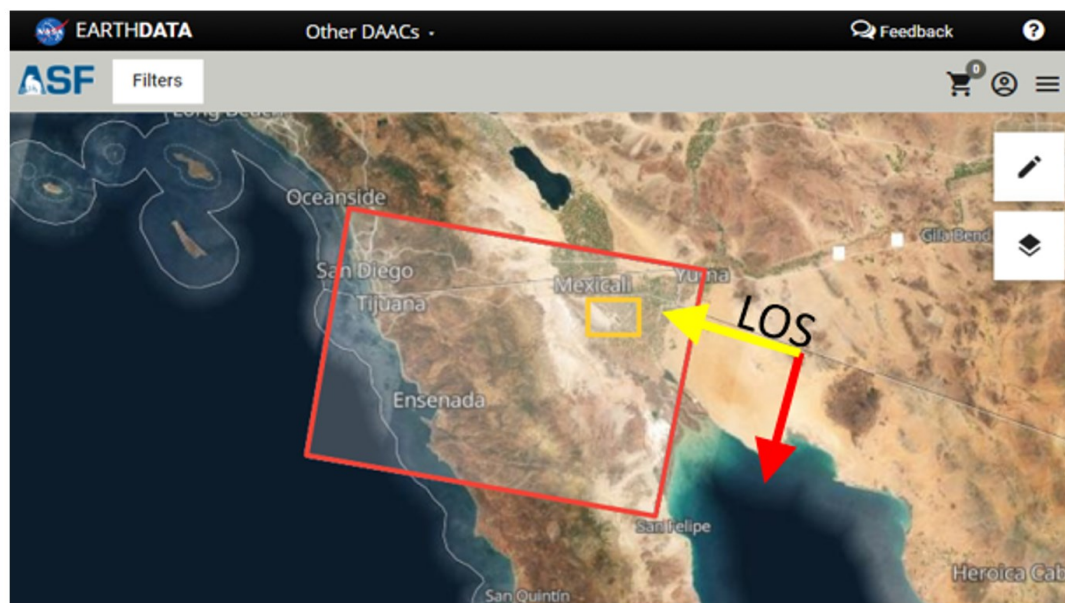


Figura 17. Portal Alaska Satellite Facility de la NASA, del cual se descargaron las imágenes necesarias para el estudio.

Date	Base line (m)	Date	Base line (m)
05-01-18	5.00	01-03-19	71.00
29-01-18	11.00	25-03-19	63.00
10-02-18	21.00	30-04-19	119.00
06-03-18	-48.00	24-05-19	44.00
30-03-18	83.00	17-06-19	16.00
23-04-18	-57.00	11-07-19	-38.00
17-05-18	42.00	04-08-19	10.00
10-06-18	44.00	22-08-19	21.00
04-07-18	-91.00	03-09-19	16.00
28-07-18	8.00	15-09-19	22.00
21-08-18	-22.00	27-09-19	144.00
14-09-18	8.00	09-10-19	-50.00
08-10-18	10.00	21-10-19	-10.00
01-11-18	-7.00	02-11-19	-40.00
25-11-18	25.00	14-11-19	72.00
19-12-18	-53.00	26-11-19	49.00
31-12-18	-16.00	08-12-19	2.00
12-01-19	-29.00	20-12-19	-18.00
05-02-19	0.00	26-12-19	82.00

Figura 18. Tabla de fechas de adquisición y línea base perpendicular en metros para cada imagen adquirida.

METODOLOGÍA

Se utilizó el método SNAP-StaMPS, un procesamiento en conjunto entre el software SNAP de la ESA y Stanford Method for Persistent Scatterers (StaMPS) que fue desarrollado inicialmente en la Universidad de Stanford, EE.UU. y continuado posteriormente en la Universidad de Leeds, Inglaterra, por un equipo de investigadores liderado por el Dr. Andy Hooper. El método consiste en realizar el corrección de todas las imágenes respecto de la imagen maestra, que fue determinada a partir del análisis de líneas base temporales y perpendiculares, y corresponde a la del 5 de febrero del 2019 (Hooper, 2006) (Figura 18).

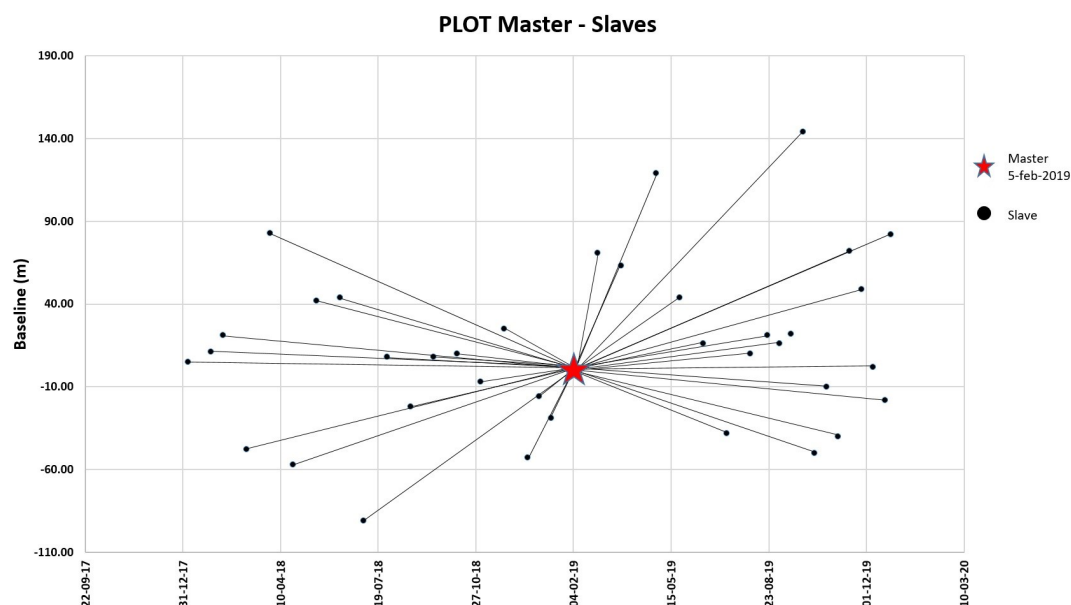


Figura 19. Grafico de pares interferométricos con base en la línea base temporal y perpendicular.

Posteriormente, se generan los interferogramas diferenciales de cada imagen esclava contra el Máster común, obteniendo como resultado una pila de interferogramas que debe ser exportado para su procesamiento en el algoritmo StaMPS (Figura 19). El algoritmo se compone de 8 etapas que, en general, consisten en la preselección de los puntos candidatos, estimación del ruido de fase, selección de los puntos persistentes, eliminación de los puntos que no cumplen con los parámetros de calidad, corrección de la fase, desenvolvimiento de la fase, estimación del error del ángulo de visión espacialmente correlacionado y filtrado de aportaciones atmosféricas (Hooper, 2006).

RESULTADOS

El resultado del flujo general del algoritmo StaMPS proporciona los PSI en su contribución completa. Se observan franjas onduladas correspondientes a las aportaciones atmosféricas y ruido asociado al DEM. Debido a que en los pasos anteriores fue calculada la atmósfera sintética y el error por DEM, es posible extraerlos de las estimaciones, generando los PSI correspondientes solo al movimiento y ruido aleatorio que se puede considerar despreciable (Figura 20).

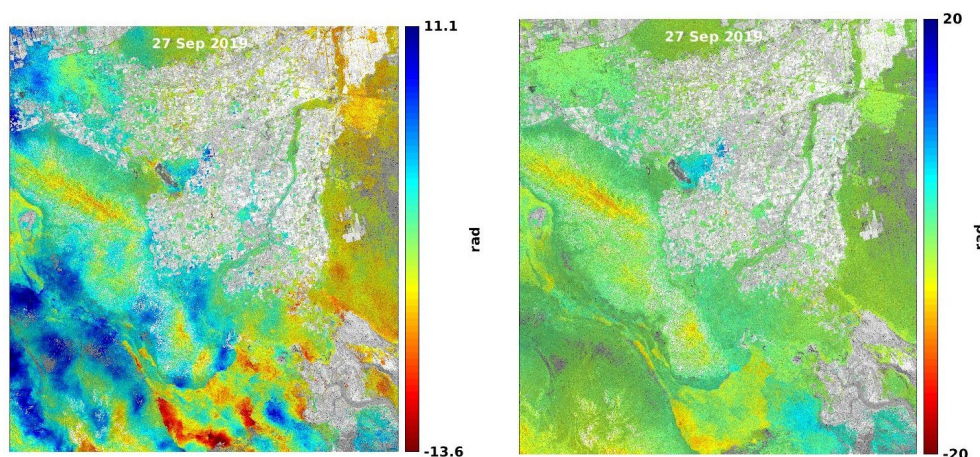


Figura 20. PSI con aportaciones atmosféricas, ruido aleatorio y asociado el DEM (izquierda) y PSI corregido por aportaciones atmosféricas, ruido aleatorio y asociado el DEM (derecha).

Se calcula la desviación estándar para evaluar la calidad de la solución para cada punto observando que, en la zona del campo geotérmico, la desviación estándar es aproximadamente de 1 mm. Finalmente, se calculó la velocidad media de subsidencia en términos de milímetros por año, evidenciando que en la zona del campo geotérmico, se está presentando subsidencia con una velocidad de hasta 80 mm/año (Figura 21).

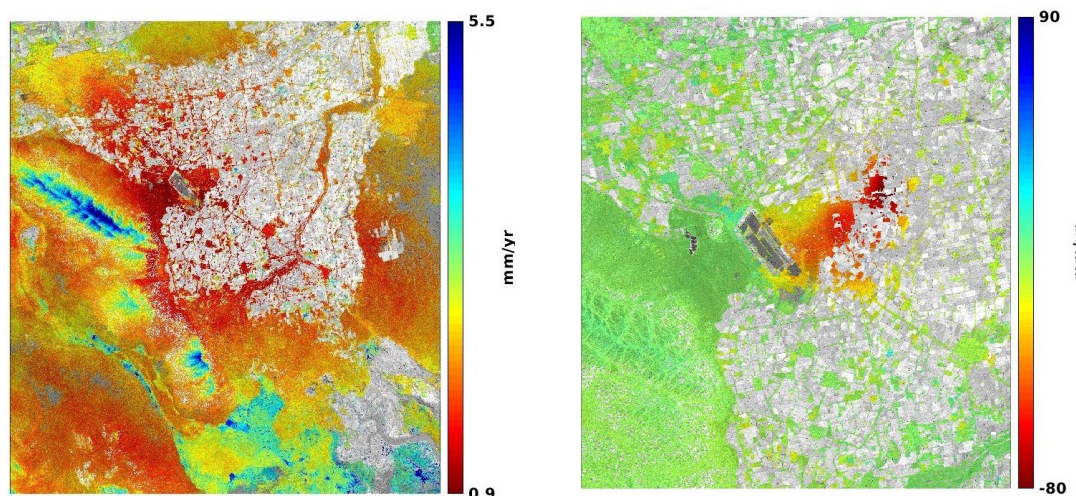


Figura 21. Desviación estándar de la solución para cada punto PSI (izquierda), velocidad media de subsidencia en mm/año (derecha).

Finalmente, es posible observar el desplazamiento acumulado para cada punto. Los datos fueron cargados al sistema de información geográfica QGIS y se utilizó el complemento PS Time Series Viewer, el cual permite graficar el comportamiento en el tiempo de los valores de subsidencia para cada punto. Se realizó un análisis para identificar el punto con mayor subsidencia acumulada para el periodo completo. Es interesante observar cómo el patrón de subsidencia tiene una orientación al noreste (Figura 22).

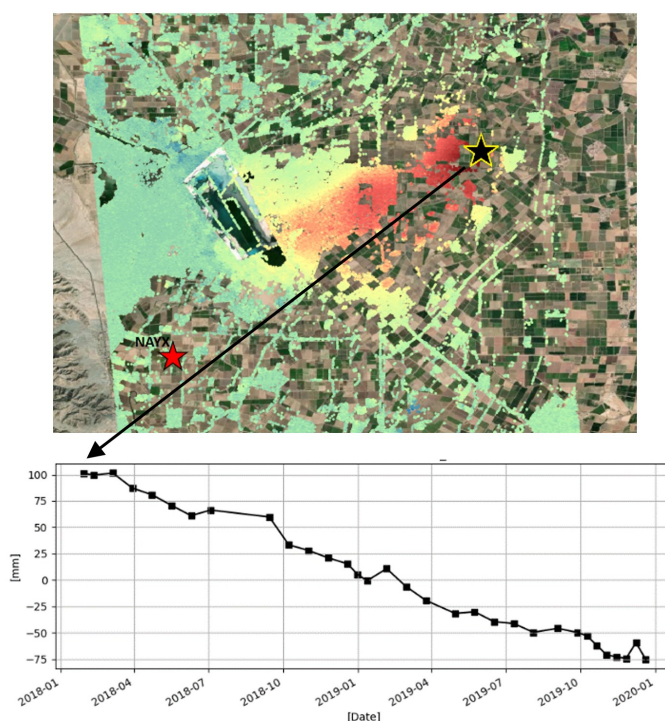


Figura 22. Desplazamiento acumulado mayor identificado al Este de la mancha de deformación de subsidencia en el campo geotérmico Cerro Prieto.

Las zonas con puntos en color verde-azul representan áreas estables, mientras que el rojo oscuro representa la mayor subsidencia acumulada en el período de estudio (Figura 23).

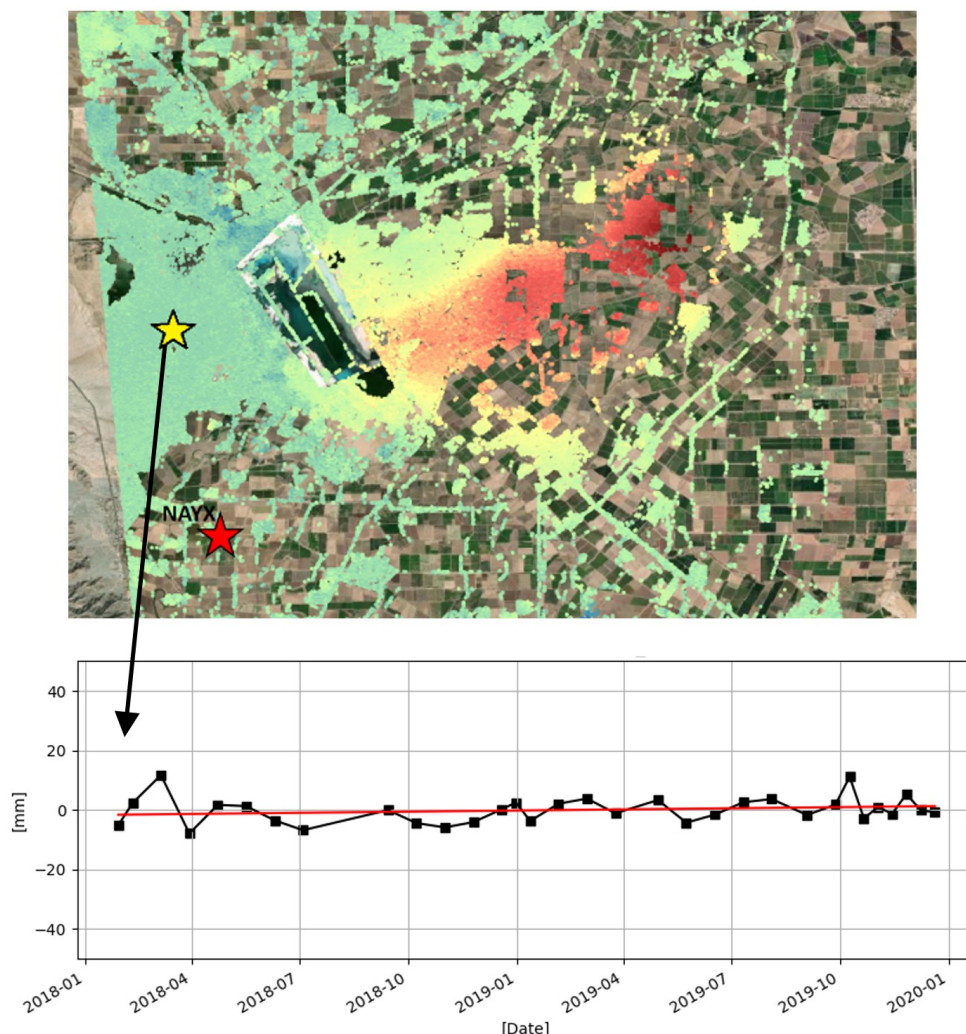


Figura 23. Zona que se considera estable al no presentar subsidencia acumulada en el período de estudio.

Finalmente, se compararon los resultados con los datos de observación de la estación GNSS llamada NAYX, localizada a 7km al sur del campo geotérmico. Se graficaron las observaciones de la estación GNSS, así como del punto más cercano observando que presentan una tendencia similar. Aunque las observaciones GNSS corresponden solo al período de agosto del 2018 a diciembre de 2019, es posible observar la similitud en la tendencia entre los resultados de la técnica PSI y el GNSS (González-Ortega, 2018) (Figuras 24 y 25).

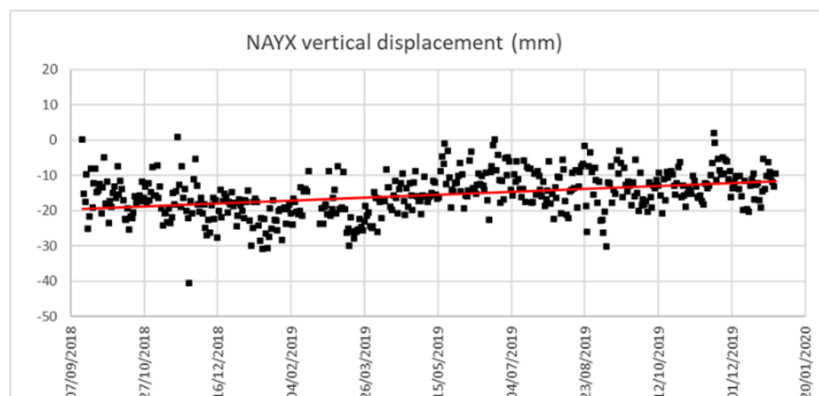


Figura 24. Observaciones GNSS de la estación NAYX a 7 km al sur del campo geotérmico de agosto del 2018 a diciembre del 2019.

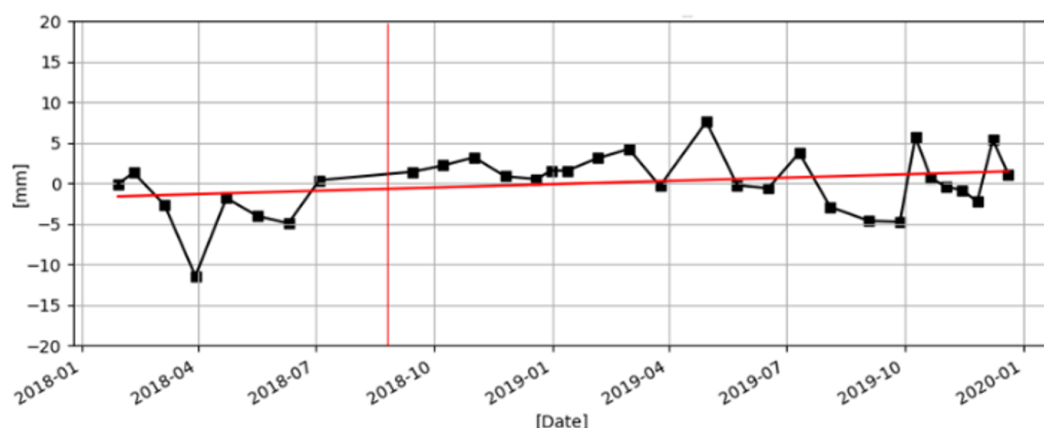


Figura 25. Comportamiento y línea de tendencia del punto más cercano a la estación GNSS, NAYX, se observa un comportamiento similar comparado con las observaciones GNSS.

Ambos set de datos fueron sobrepuestos en un gráfico de series temporales. La línea azul corresponde a los valores de desplazamiento acumulado del punto producto del análisis PSI más cercano a la estación GNSS-NAYX; mientras que la línea naranja corresponde a la media móvil del mismo set de datos calculada a un periodo de $n=7$.

El gráfico de línea en color verde corresponde a los valores que la estación GNSS-NAYX observó durante el periodo de estudio, mientras que la línea en color rojo representa la media móvil calculada a un periodo de $n=50$.

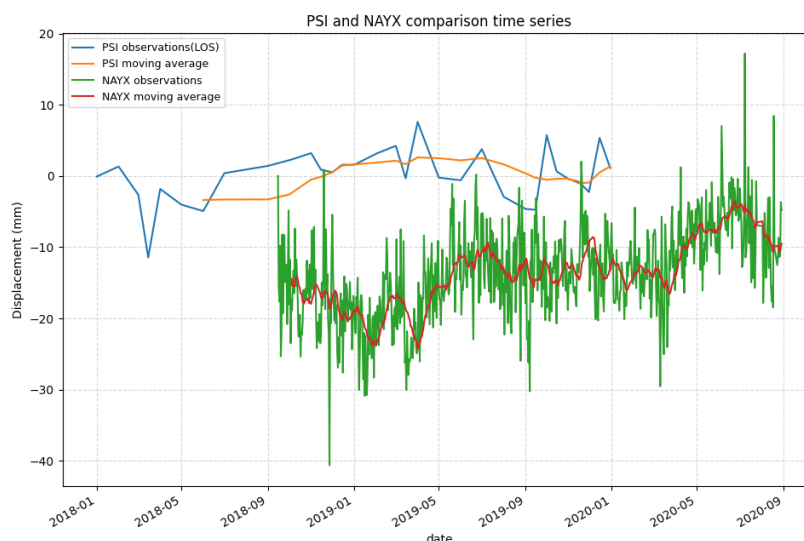


Figura 26. Sobreposición de los valores de desplazamiento del estudio PSI y las observaciones GNSS de la estación NAYX en el mismo punto.

CONCLUSIONES

Gracias a la implementación de la interferometría satelital mediante la técnica DInSAR, se logró determinar que el sismo del 23 de junio de 2020, con magnitud 7.4, produjo un levantamiento de la superficie en la zona de Crucecita, Oaxaca de hasta 42 cm en la línea de visión del satélite.

Con base en los resultados del estudio, y de la bibliografía existente para otros casos, se concluye que la técnica DInSAR es altamente confiable, proporciona información útil y oportuna para la evaluación de los daños y la toma de decisiones, con el fin de prevenir riesgos a la población.

Con la implementación de la técnica PSI, fue posible identificar, medir y mapear la subsidencia que se presenta en el campo geotérmico Cerro Prieto con hasta 18 cm de subsidencia acumulada por el período de dos años y una velocidad media anual de 80 mm/año. Las técnicas de interferometría de grandes paquetes de imágenes para el análisis de series de tiempo como PSI, proporcionan una metodología de alta fiabilidad, alta precisión y bajo costo, para el estudio de las deformaciones lentas y prolongadas de la superficie, permitiendo realizar estudios históricos y monitorizaciones programadas por largos períodos de tiempo.

La integración de metodologías como el GPS y la interferometría robustecen los resultados obtenidos, incrementando su fiabilidad.

Se hace evidente como la tecnología espacial ha contribuido en la generación de conocimiento sobre nuestro planeta. En los próximos años, se pondrán en órbita nuevos satélites, cada vez con mejores capacidades, de manera que permitirán obtener información a menor costo y con mayor tiempo de anticipación. Para ello, los profesionales debemos estar preparados para desarrollar y operar dichos sistemas.

REFERENCIAS

1. Cabral-Cano, E. , & L. Salazar-Tlaczani (2015). TLALOCNet - OXUM-oxum_tnet_mx2001 P.S., The GAGE Facility operated by UNAVCO, Inc., GPS/GNSS Observations Dataset. <https://doi.org/10.7283/T5J964RP>
2. Chen, C. W. & H. A. Zebker (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 40, pp. 1709-1719.
3. Fabriol, H., & E. Glowacka (1997, January). Seismicity and fluid reinjection at Cerro Prieto geothermal field: Preliminary results. In Proceedings of 22nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA (Vol. 1117).
4. González-Ortega, A., J. E. Galetzka, & J. González (2018). CICESE REGNOM GPS Network - NAYX-nayxREGNOMmx2010 P.S., The GAGE Facility operated by UNAVCO, Inc., GPS/GNSS Observations Dataset. <https://doi.org/10.7283/W2YN-FX25>
5. Hanssen, R. (2001). Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis. 10.1007/0-306-47633-9.
6. Hooper, A. J. (2006). Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation (PhD). University of Stanford, United States. <https://1bestlinks.net/AOw9K>
7. Kampes, B. (2006). Radar Interferometry - Persistent Scatterer Technique. 10.1007/978-1-4020-4723-7.
8. Meng, G. J., L. L. Ge, J. C. Wu, & Y.Q. Dai (2012). Application of DInSAR in Earthquake Deformation Studies [J]. Earthquake. Hanssen, Ramon. (2001). Radar Interferometry Data Interpretation and Error Analysis. 10.1007/0-306-47633-9
9. NASA. Earth Science Disasters Program (2020, June). Mexico Earthquake June 2020. <https://1bestlinks.net/AOw9K>
10. Servicio Sismológico Nacional – SSN (2020, agosto). “Sismo del 23 de junio de 2020, costa de Oaxaca” (M 7.4). <https://1bestlinks.net/AOw9K>
11. Sillerico, E., M. Marchamalo, J. G. Rejas, & R. Martínez (2010). La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. *Informes de la Construcción*, 62(519), 47-53.

12. Xu, X., D. T. Sadwell, E. Tymofyeyeva, A. González-Ortega, & X. Tong (2017). Tectonic and anthropogenic deformation at the Cerro Prieto geothermal step-over revealed by Sentinel-1A InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(9), 5284-5292.
13. Young, N. (2018). Detecting the Impact of an Earthquake using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) with Sentinel-1A TOPS Data: A case study of the May 2015, Nepalese earthquake.

Gilberto Daniel Hermosillo Camacho

Egresado en Ingeniería Topográfica de la Universidad de Guadalajara, México, en 2012. Obtuvo el grado de Máster en Geotecnologías Cartográficas para la Ingeniería y Arquitectura por la Universidad de Salamanca, España, en 2018. Ha cursado los diplomados en Geomática y Gestión del Territorio por la Universidad de Guadalajara y CONABIO, en 2014, y el diplomado en Fotogrametría en el CITAC, en 2016.

Egresado del programa “Geotechnical Radar Monitoring” de la Universidad de Arizona y del programa “Synthetic Aperture Radar” de la Universidad de Alaska, Fairbanks, EE.UU., en 2020. Posee entrenamiento en el uso del algoritmo GMTSAR en UNAVCO, EE.UU, en 2020, y diversas capacitaciones en tecnología Radar-SAR en el NASA-Jet Propulsion Laboratory (JPL), en el período 2018 - 2020.

En el 2021, cursa el entrenamiento “Computer Vision with Artificial Intelligence WATSON and Open CV IBM”, la carrera en “Data Science, Machine Learning and Artificial Intelligence”, Diplomado en Estabilidad de Taludes y estancia semestral en Microwave Remote Sensing en la Universidad de Alaska Fairbanks, EE.UU.

Trabaja en la Comisión Federal de Electricidad como especialista en geotecnologías, donde ha participado en proyectos de relevancia nacional e internacional en el campo de las geociencias.

Se sugiere citar:

Hermosillo, G. (2021). Tecnología radar satelital InSAR para la detección y monitorización de la deformación de la superficie terrestre por procesos geodinámicos y/o actividades antrópicas. *Revista Cartógrafo.CL* 1(1), pp. 15-32-



Bajo Licencia Creative Commons
Atribución 4.0 Internacional.