



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Análisis del terreno aledaño al puente El Carrizo mediante InSAR

Germán Michel Guzmán Acevedo
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Guadalupe Esteban Vázquez Becerra
Héctor Miguel Gasca Zamora
Luis Álvaro Martínez Trujano
Jorge Alberto Hernández Figueroa
Mario Alberto Montes Zea
Oscar Flores Centeno
Jorge García Armenta
Francisco Javier Carrión Viramontes
Adriana Guadalupe Porres López
José Manuel Machorro López

Publicación Técnica No. 720
Querétaro, México
2022

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por Germán Michel Guzmán Acevedo, Juan Antonio Quintana Rodríguez, Héctor Miguel Gasca Zamora, Mario Alberto Montes Zea, Luis Álvaro Martínez Trujano, Jorge Alberto Hernández Figueroa, José Manuel Machorro López, Adriana Guadalupe Porres López, Oscar Flores Centeno y Miguel Anaya Díaz.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 02/22 “Análisis del terreno aledaño al puente El Carrizo mediante InSAR”.

Se agradece el apoyo a Caminos y Puentes Federales (CAPUFE) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por hacer posible esta investigación, así como la colaboración de Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, Jefe de División de la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte; Dr. G. Esteban Vázquez Becerra, investigador de la Universidad Autónoma de Sinaloa; Dr. Jorge García Armenta, investigador de la Universidad Heriot-Watt (campus Reino Unido).

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	1
1. Marco Teórico.....	11
1.1 Geometría de adquisición.....	11
1.2 Bandas de sensores de radar.....	12
1.3 InSAR.....	13
1.4 Coherencia.....	14
1.5 DInSAR.....	14
1.6 SBAS.....	14
1.7 Líneas base.....	15
1.8 Línea base temporal.....	15
1.9 Línea base crítica.....	16
2. Metodología.....	17
2.1 Instalación de la librería MintPy.....	17
2.2 Descarga de Imágenes.....	17
2.3 Generar lista de interferogramas.....	19
2.4 Organización de la información.....	20
2.5 Procesamiento.....	21
2.6 Visualización de los resultados.....	21

3. Resultados.....	23
3.1 Coherencia temporal.....	23
3.2 Velocidad.....	23
3.3 Series del tiempo.....	26
Conclusiones.....	31
Bibliografía	33

Sinopsis

La presente investigación tiene el objetivo de establecer y desarrollar un algoritmo que permita determinar el desplazamiento del terreno natural cercano al puente El Carrizo aplicando las técnicas SBAS (short baseline subset) InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) con datos de acceso libre. La fuente de información utilizada fue la misión Sentinel-1, mientras que la programación se desarrolló en el lenguaje de Python implementando MintPy (Miami InSAR Time-series in Python). El proceso que sigue el algoritmo se inicia con la descarga de imágenes SAR y concluye con la visualización de las series de tiempo resultantes. Al establecer el procedimiento InSAR utilizando MintPy, se llevó a cabo un procesamiento con información del área donde se ubica el puente El Carrizo, los datos resultantes muestran velocidades anuales de desplazamiento desde -0.62 cm hasta -1.4 cm, lo cual se puede definir como un comportamiento estable de la zona.

Abstract

The main aim of this investigation is to define an algorithm that determines the ground displacements near El Carrizo Bridge considering SBAS (short baseline subset) InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) with free access information. The source of data was the satellite mission Sentinel-1, meanwhile, the software was MintPy (Miami InSAR Time-series in Python) for Python. The steps included in the algorithm start with the download of the SAR images and finish with the time series visualization. In the end, a processing experiment was carried out with information on El Carrizo Bridge area, where displacements from -0.62 to -1.4 mm per year were obtained, which can be defined as a stable behavior.

Introducción

El monitoreo de estructuras ha tomado un gran impulso en los últimos años debido a su utilidad para la evaluación de la integridad estructural y la detección de daño de manera oportuna, con lo cual se logra garantizar la seguridad de los usuarios y la implementación de programas de mantenimiento más eficientes (Quintana, 2015). Para lograr los objetivos mencionados, es fundamental que el sistema de monitoreo se diseñe basado en una estrategia que esté adecuada a las características mismas de la estructura y su problemática, así como, del manejo e interpretación de la información que resulte (Martínez,2016) (Quintana, 2016).

Actualmente, los sistemas satelitales han incursionado como una estrategia alternativa para el monitoreo de la salud estructural al permitir recolectar datos de la Tierra a gran escala y de manera remotamente. De acuerdo con la literatura científica, InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) se ha implementado para evaluar diversas estructuras de ingeniería civil y problemas geofísicos. Esta metodología, permite calcular la diferencia de fase entre dos o más imágenes satelitales SAR de una misma zona, pero obtenidas en diferentes periodos de tiempo y con el propósito de determinar desplazamientos relativos de los elementos involucrados en la imagen. Los desplazamientos pueden ser calculados con una precisión de milímetros a centímetros, dependiendo de la longitud de onda de la señal utilizada (Ferreti, 2014). Considerando los estudios desarrollados en los últimos años (Ferreti, 2014), (Flores-Anderson, 2019), (Agencia Espacial Europea, 2022), (Woodhouse, 2017), (Alaska Satellite Facility, 2022), (Devanthéry, 2016), (Bozzano, 2011), (Roccheggiani, 2019), (Lazecky, 2015), (Foroughnia, 2019), (Ciampalini, 2014), (Selvakumaran, 2019), (Milillo, 2019), (Sousa, 2013), (Hooper, 2012), se puede precisar que la metodología InSAR es una herramienta eficiente para ser aplicada en las siguientes áreas:

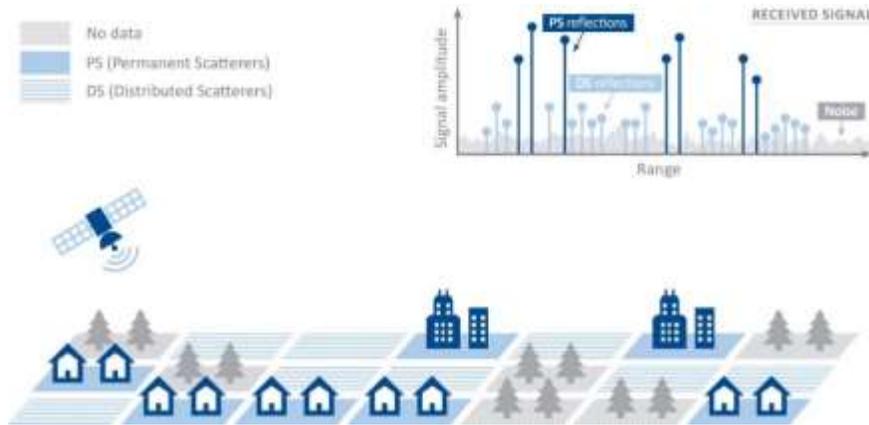
- Monitoreo de taludes: InSAR es eficiente para estudiar desplazamientos lentos del terreno que a su vez provocan derrumbes.
- Monitoreo de estructuras lineales: InSAR puede ayudar a evaluar movimientos del terreno provocados por socavación y subsidencia, los cuales afectan líneas de tuberías, carreteras y vías férreas.

- Aplicaciones de minería: InSAR puede describir el comportamiento de los taludes, y el movimiento del terreno por la extracción de material, aumentando la seguridad y sirviendo como una alarma previa a desastres.
- Análisis de la estabilidad de estructuras: InSAR puede ayudar a monitorear desde un simple edificio hasta una ciudad completa y proporciona una identificación temprana de cambios en la altura del terreno.
- Verificación de daños causados por construcción: basado en información histórica de algunas misiones SAR, se puede desarrollar un estudio retrospectivo a partir de daños ocasionados por causas humanas o naturales.

InSAR ha sido aplicada exitosamente en el análisis de desplazamientos en superficies; sin embargo, uno de los logros más notorios fue realizado en la universidad politécnica de Milán, ya que se desarrolló la técnica PS (Permanent scatterer) InSAR (Ferreti, 2001), en la cual se analizan varias imágenes SAR para dar seguimiento a posibles objetivos que no cambian su firma electromagnética, dentro de todo el conjunto de datos. La obtención de desplazamiento a lo largo del tiempo es llevada a cabo mediante el análisis de un arreglo de puntos PS (Hoppe, 2019).

La metodología PSI es capaz de reducir los efectos que afectan la precisión de InSAR (topografía, curvatura de la tierra, retraso atmosférico y ruido) y proporcionar series de tiempo confiables a partir de imágenes SAR. A pesar de las ventajas antes mencionadas, la metodología presenta la desventaja de que los objetos a estudiar no deben presentar cambios en su firma espectral en todos los interferogramas empleados, por lo que, los elementos construidos por el hombre son los que principalmente pueden cumplir con este requisito; pero cuando el análisis se realiza en una zona rural, la cantidad de información que se puede obtener disminuye (Perissin, 2016).

Por otro lado, la metodología de reflejantes distribuidos (DS) es otra herramienta que permite incrementar la precisión de InSAR al utilizar un conjunto de imágenes caracterizadas por la posición del satélite y la diferencia de tiempo al momento de ser capturadas, lo cual permite definir el comportamiento de zonas no urbanas con mayor detalle (figura 1.1).



Fuente: Tre Altamira (2022).

Figura I.1 Relación de la metodología de medición y las zonas propicias a estudiar.

Con fundamento en lo anterior, el objetivo principal de la investigación es determinar los desplazamientos que sufre la zona cercana al puente El Carrizo considerando el principio SBAS (short baseline subset) InSAR y utilizando información de acceso libre. Se plantea desarrollar el procesamiento a través de un algoritmo que implemente imágenes SAR de la misión Sentinel-1 y la librería MintPy en Python.



Fuente: Propia (2022).

Figura I.1. Puente El Carrizo.

Como se mencionó, el caso de estudio es el puente El Carrizo (figura I.2), localizado en el municipio de Concordia, Sinaloa, sobre la autopista Durango-Mazatlán. La estructura tiene una longitud total de 487 metros,

con un claro principal de 217.30 metros y está compuesto por tres tipos de estructuras, una con traveses Nebraska, otra con vigas tipo cajón y la tercera de tipo atirantado. El puente tiene un ancho total de 18.4 metros y una altura de 226 metros desde el desplante hasta la parte superior de la pila.

En esta sección de la introducción se describe algunas investigaciones relacionadas con la aplicación de la metodología InSAR en el monitoreo estructural de puentes y del terreno natural cercano. El primer trabajo (Selvakumaran, 2018), desarrolló una evaluación en retrospectiva del comportamiento del puente Tadcaster localizado en Reino Unido, la estructura tiene una longitud aproximada de 100 metros de largo por 10 metros de ancho, con 2 carriles, uno para cada sentido vehicular, además de un paso peatonal (figura I.3); la estructura sufrió un colapso debido a problemas de socavación en una de sus pilas el 29 de diciembre del 2015. El estudio desarrollado con InSAR cubrió el periodo desde el 9 de marzo del 2014 hasta el 26 de noviembre del 2015, considerando 48 imágenes satelitales de la misión TerraSAR-X (resolución de 3 x 3 metros). Se realizaron dos procesamientos, uno con el principio de PSI y el segundo basado en SBAS, obteniendo mejores resultados el segundo proceso al determinar un total de 8 DS sobre el puente.

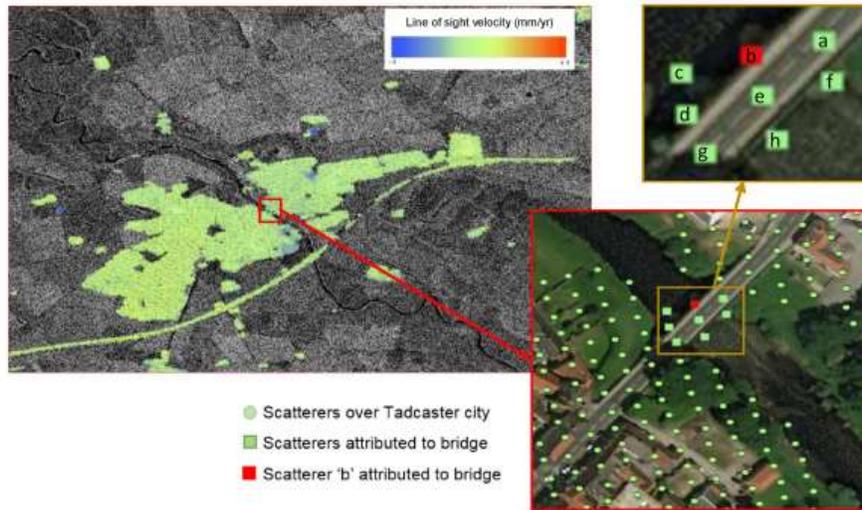


Fuente: Selvakumaran (2018)

Figura I.3. Puente Tadcaster

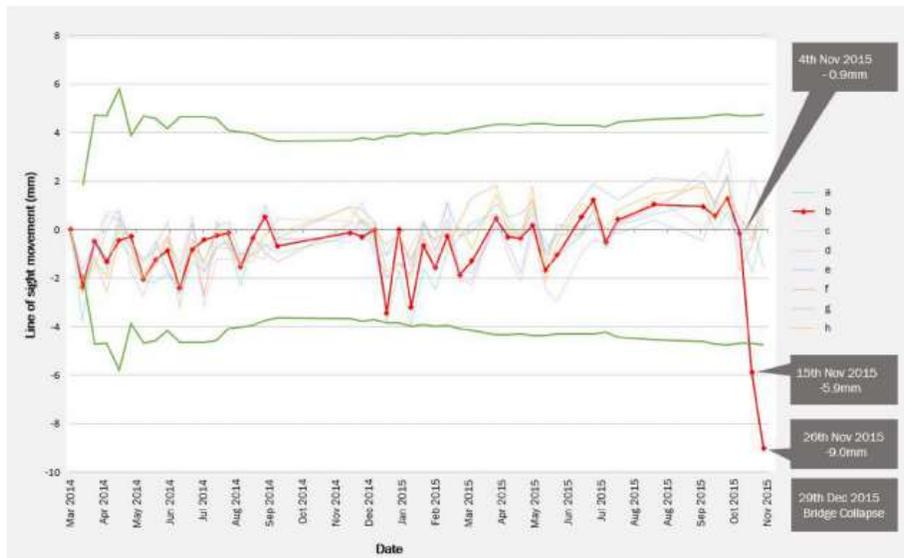
En la figura I.4 se ilustran los DS obtenidos durante el procesamiento SBAS y los 8 elementos dentro del puente Tadcaster (a-h), siendo b la zona que colapsó. El comportamiento a través del tiempo de esta zona del puente se define en la figura I.5, donde claramente se aprecia que, después del 4

de noviembre del 2015, el puente presentó un desplazamiento fuera de lo normal con un cambio súbito y significativo (línea roja).



Fuente: Selvakumaran (2018)

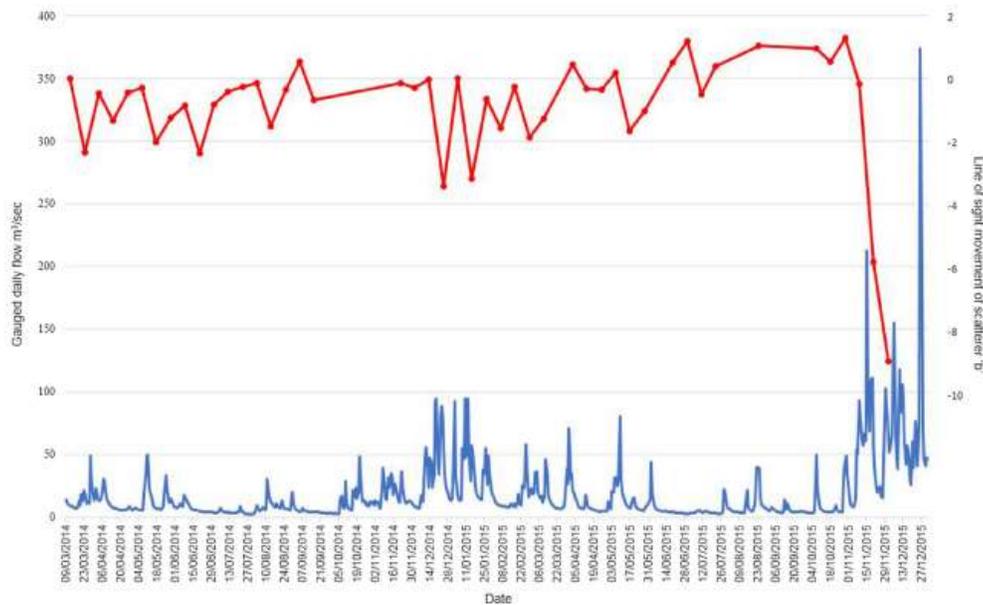
Figura I.4. DS definidos sobre la estructura



Fuente: Selvakumaran (2018)

Figura I.5. Series del tiempo del punto b en el puente Tadcaster

Del análisis se encontró que los desplazamientos observados a partir del 4 de noviembre del 2015 se debieron al aumento del caudal del río, lo cual se ilustra en la siguiente figura y en la que la línea roja representa el desplazamiento de la zona *b* del puente, mientras que la línea azul señala el valor del caudal del río (figura I.6).



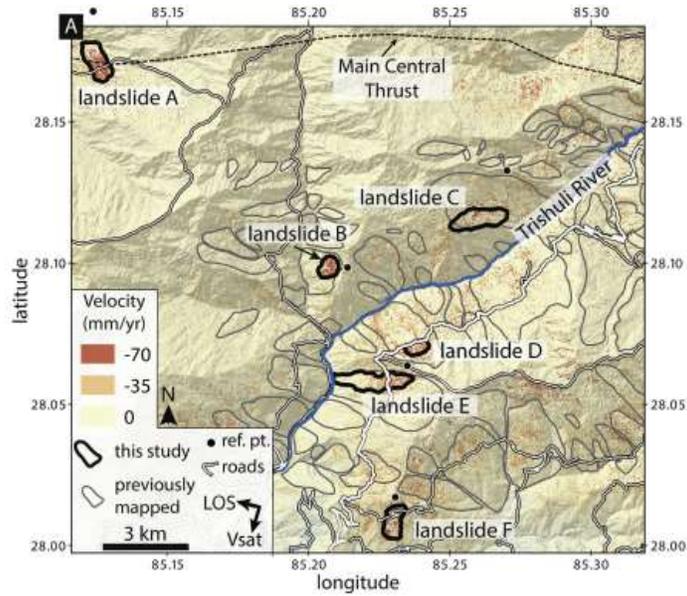
Fuente: Selvakumaran (2018)

Figura I.6. Relación del caudal del agua y los desplazamientos del puente Tadcaster

Al final, la investigación concluye que InSAR puede ser implementado para determinar posibles fallos en puentes por socavación.

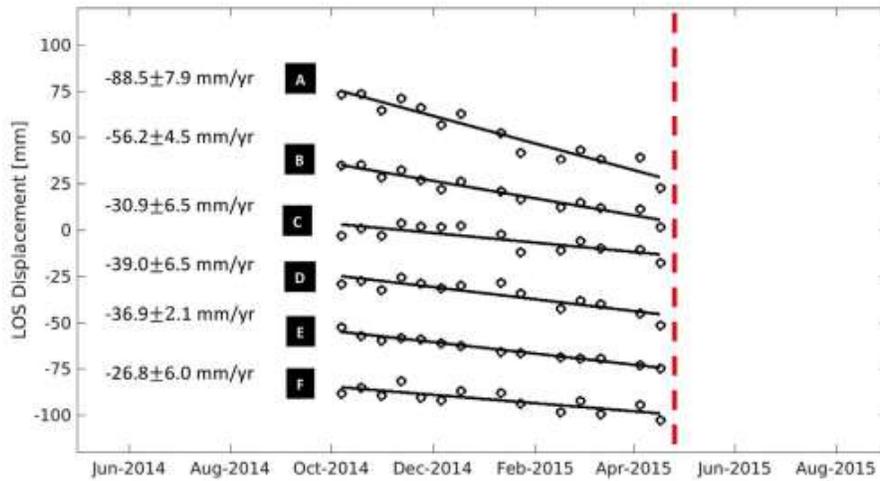
La segunda investigación (Bekaert, 2020) fue realizada tomando como caso de estudio la zona cercana al río Trishuli, en el oeste de Nepal, con la finalidad de determinar movimientos lentos del terreno antes y después de un sismo.

La fuente de información para desarrollar el procesamiento InSAR fue la misión Sentinel-1 con datos del 2014 al 2017. Se identificaron 6 zonas de deslizamiento (figura I.7) caracterizadas por movimientos lentos previa y posteriormente al evento sísmico, el rango de los desplazamientos en la dirección de la línea de vista (LOS, por sus siglas en inglés) del satélite fue, antes del sismo, desde -26.8 hasta -88.5 mm al año (figura I.8) y, después del sismo, de -21.1 a 66.5 mm al año (figura I.9), es decir, la velocidad del terreno disminuyó después del sismo. Adicionalmente, el autor hace énfasis en que los desplazamientos del terreno pueden ocasionar daños en la infraestructura, por ejemplo, en las zonas denominadas como A, D, E y F, ya que tienen interacción con la red de carreteras. Por último, una de las conclusiones señala que InSAR tiene la ventaja de poder ser empleada para el monitoreo de deformaciones de un terreno en un área aislada.



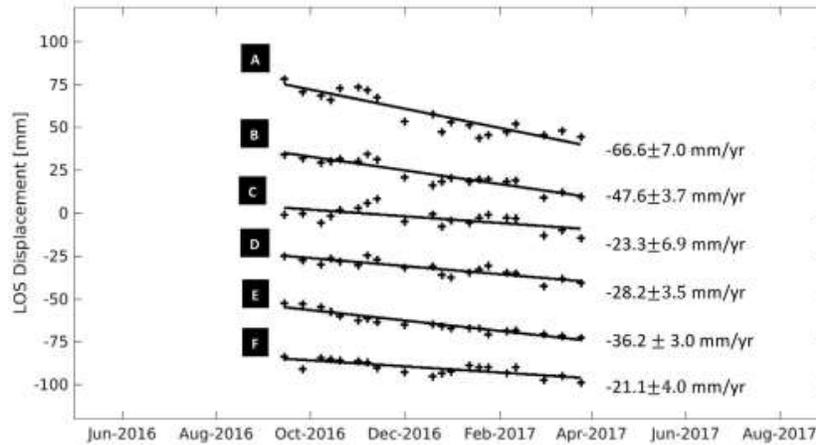
Fuente: Bekaert (2020)

Figura I.7. Zona de estudio en el oeste de Nepal



Fuente: Bekaert (2020)

Figura I.8. Series del tiempo de las 6 zonas localizadas en el estudio antes del sismo



Fuente: Bekaert (2020)

Figura I.9. Series del tiempo de las 6 zonas localizadas en el estudio después del sismo

Otras dos investigaciones (Drougkas, 2020), (Andreas, 2018), evaluaron el impacto que tiene el movimiento del terreno sobre la infraestructura civil. (Drougkas, 2020) propuso utilizar información a escala nacional de Bélgica para desarrollar un método que permite determinar los daños en edificaciones por desplazamientos del terreno. La información de los desplazamientos fue calculada a partir del monitoreo InSAR, la determinación de los tipos de edificación se generó considerando información patrimonial y los efectos producidos por los movimientos del terreno fueron analizados con un modelo analítico de daños.



Fuente: Andreas (2018)

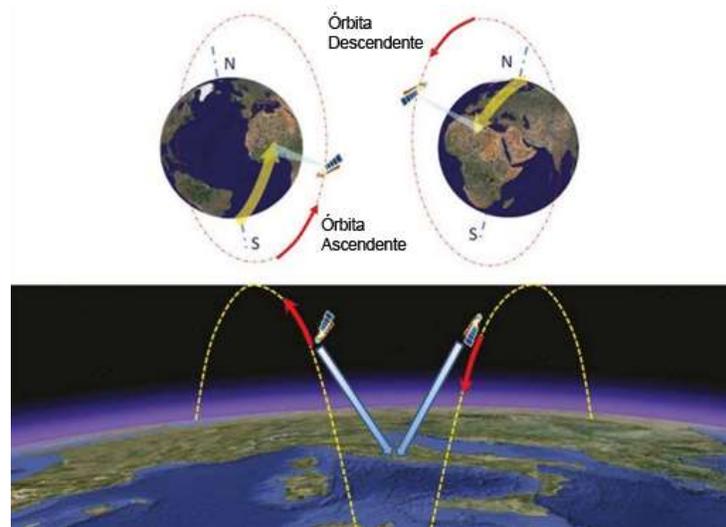
Figura I.10. Daños en las carreteras de la ciudad de Jakarta

Por otro lado, (Andreas, 2018) muestra el impacto que tiene la subsidencia en la ciudad de Jakarta (capital de Indonesia), por ejemplo, inundaciones, agrietamiento en los edificios y daños en la carretera (figura I.10). En este caso los desplazamientos históricos presentados fueron obtenidos a partir de nivelación, mediciones con Sistemas Globales de Navegación Satelital (GNSS, por sus siglas en inglés) e InSAR (figura I.10).

1. Marco Teórico

1.1 Geometría de adquisición

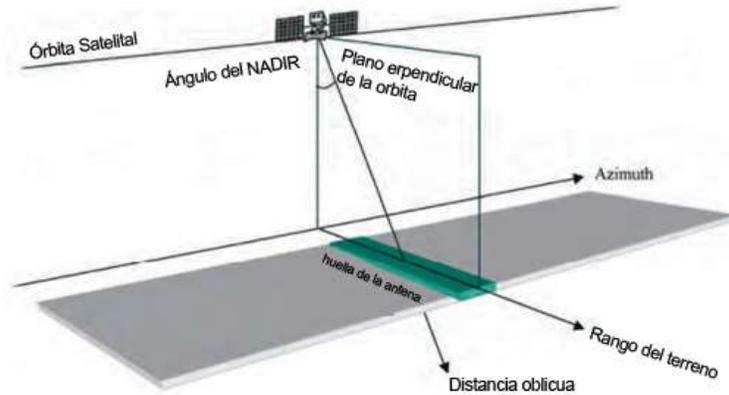
La adquisición de datos por medio de los satélites SAR puede ser desde una órbita ascendente o descendente (figura 1.1). La órbita ascendente parte del polo sur hacia el polo norte, mientras la órbita descendente viaja del polo norte al polo sur.



Fuente: Ferretti (2014)

Figura 1.1. Órbitas de satélites SAR

Los satélites SAR orbitan la Tierra a una altura entre 500 a 800 km de una manera cuasi-polar. El ángulo entre el Norte-Sur verdadero y la órbita del satélite varía en un rango de 10° (Ferretti, 2014). La antena radar descansa sobre el satélite y apunta a la Tierra en el plano perpendicularmente a la órbita. El ángulo que se forma entre el nadir y la antena se denomina Off-nadir y se puede encontrar en un rango de 20° a 50° , es importante mencionar que el ángulo de incidencia es diferente al off-nadir por la curvatura de la Tierra. Por otro lado, debido a que es un sistema activo, parte del terreno que en la figura 1.2 está denominado como huella de la antena (antena footprint) es iluminado en dos direcciones, azimuthal (azimuth) y en rango de terreno (Ground range); la dirección de la línea de vista de la antena se denomina rango inclinado (slant range direction) (Ferretti, 2007).



Fuente: Ferretti (2007)

Figura 1.2. Sistema de imagen SAR

1.2 Bandas de sensores de radar

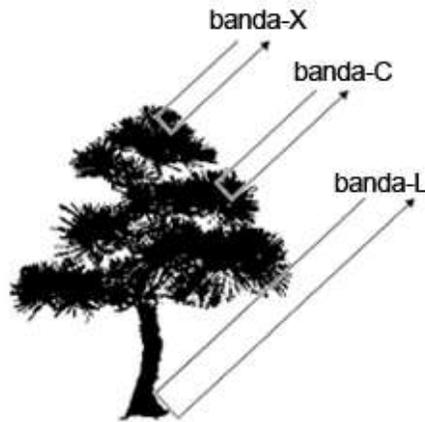
Algunas de las bandas usadas por los sensores de radar son “X”, “C”, “S”, “L”, y “P”, teniendo cada una diferente aplicabilidad y características como se muestra en la tabla 1.1. La banda “X” sirve para monitoreo urbano, zona con hielo y nieve, así como áreas con poca vegetación; la banda “C” se usa para mapeo global, detección de cambios, monitoreo de áreas con moderada vegetación y navegación marítima; la banda “S” se implementa en observaciones terrestres y monitoreo de agricultura; la banda “L” tiene funcionalidad para monitoreo geofísico, de biomasa y mapeo de vegetación; y la banda “P” para estudios de biomasa (Flores-Anderson, 2019).

Tabla 1.1. Características de las bandas usadas por sensores de radar

Banda	Frecuencia (GHz)	Longitud de onda (cm)
X	8-12	3.8-2.4
C	4-8	7.5-3.8
S	2-4	15-7.5
L	1-2	30-15
P	0.3-1	100-30

Fuente: (Flores-Anderson, 2019).

Una de las razones por la que el campo de aplicación de las bandas varía es debido a que entre más grande sea la longitud de onda, mayor es la penetración que alcanza la señal en el suelo con vegetación, nieve u otros materiales, tal como lo presenta la figura 1.3.



Fuente: Unavco (2018)

Figura 1.3. Ejemplo de penetración de la señal emitida por un sensor SAR

1.3 InSAR

InSAR es una metodología que permite calcular la diferencia de fase entre dos o más imágenes SAR de una misma zona, pero obtenidas en diferentes periodos de tiempo con el propósito de determinar la topografía y/o deformación del terreno. La deformación del terreno puede ser calculada con una precisión de milímetros a centímetros debido a que las mediciones son llevadas a cabo con una fracción de la longitud de onda de la señal. Por otro lado, la calidad con la que se determina la topografía de la superficie depende de la geometría empleada para recolectar los datos por el sensor SAR (Flores-Anderson, 2019).

La interferometría se genera a través de la multiplicación cruzada de la imagen maestra con la conjugación compleja de las esclavas. La amplitud de ambas imágenes es multiplicada, y las fases son restadas para formar un interferograma (Franz, 2018). La diferencia de fase es afectada por otras fuentes de error que se deben de eliminar como lo indica la ecuación 1.1 (Veci, 2016).

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{elevación} + \Delta\varphi_{desplazamiento} + \Delta\varphi_{atmósfera} + \Delta\varphi_{ruido} \quad (1.1)$$

Donde $\Delta\varphi_{flat}$ es la contribución en el cambio de fase producido por la curvatura de la tierra, $\Delta\varphi_{elevación}$ producido por la topografía, $\Delta\varphi_{desplazamiento}$ generado por la deformación, $\Delta\varphi_{atmósfera}$ es por la diferencia en la humedad temperatura y presión de la atmósfera en cada adquisición, y $\Delta\varphi_{ruido}$ es el ruido ocasionado por cambio temporal, diferentes ángulos de vista y el volumen del reflejante.

1.4 Coherencia

Para determinar la similitud entre la imagen maestra/esclava y conocer si son buenas candidatas para establecer un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) se emplea el valor de coherencia, el cual se define en el rango de cero a uno. Las áreas de alta coherencia aparecen brillantes en las imágenes como edificios, mientras que las zonas de baja coherencia se ilustran oscuras como áreas con vegetación (Veci, 2016).

La pérdida de coherencia se debe al tiempo transcurrido de una adquisición a otra (temporal), errores de órbita (geométrico), por vegetación (volumétrico) y por el procesamiento (Veci, 2016).

$$\gamma = \gamma_T * \gamma_G * \gamma_V * \gamma_P \quad (1.2)$$

Donde γ_T es el efecto temporal, γ_G efecto geométrico, γ_V es el efecto volumétrico y γ_P es la pérdida de coherencia por el procesamiento. Las consecuencias por los efectos volumétrico y temporal no pueden ser evitados, sin embargo, el efecto por procesamiento puede ser evitado y el efecto geométrico parcialmente eliminado (Franz, 2018).

1.5 DInSAR

DInSAR (Differential InSAR) es una técnica interferométrica donde se elimina la contribución de la topografía en la diferencia de fase. El efecto de la topografía se reduce aplicando un MDE y arroja la fase del interferograma igual a la ecuación 1.3 (Acton, 2015).

$$\varphi_{dist} = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_{disp} \quad (1.3)$$

Donde Δr_{disp} es el desplazamiento en la línea de vista del satélite que se busca.

La desventaja de DInSAR es que se ve afectada por los efectos atmosféricos, tiene una precisión centimétrica y no diferencia entre movimientos lineales y no lineales (Acton, 2015).

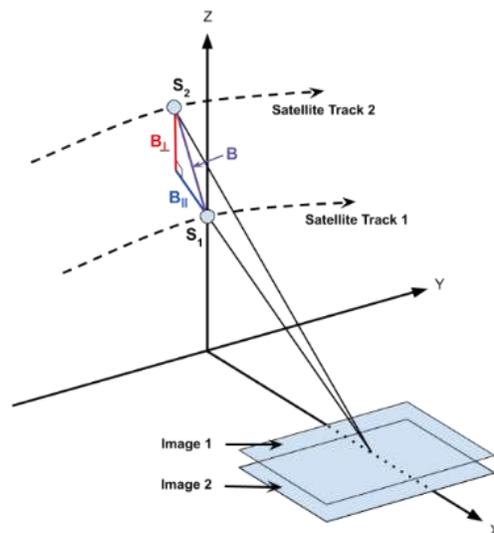
1.6 SBAS

SBAS (short baseline subset) es una metodología multi-temporal de InSAR que funciona bien en ambientes naturales y en áreas de terreno amplias, además, implementa un conjunto de interferogramas con el objetivo de analizar cambios en el tiempo.

Los interferogramas empleados se seleccionan buscando separaciones tanto espaciales y temporales cortas entre la adquisición de información para reducir la falta de correlación (Lanari, 2007).

1.7 Líneas base

La línea base es la distancia física entre los dos puntos, donde cada una de las imágenes utilizadas para generar el interferograma fueron recolectadas. Esta distancia se puede descomponer en un elemento perpendicular (B_{\perp}), el cual coincide con la dirección azimutal (Y) y otro paralelo (B_{\parallel}) que es la diferencia en la dirección de rango (X) (Alaska Satellite Facility (b), 2022). La figura 1.4 ilustra los términos mencionados respecto a las líneas base.



Fuente: Alaska Satellite Facility (b) (2022)

Figura 1.4. Líneas base InSAR

1.8 Línea base temporal

La diferencia en tiempo entre la captura de las imágenes utilizadas para formar el interferograma es denominado como línea base temporal, y dependiendo de su valor es la aplicación a la que se puede someter (Alaska Satellite Facility (b), 2022). De acuerdo con la misión satelital Sentinel-1 la línea base temporal mínima sería de 6 días con ambos satélites (A y B) y 12 días utilizando datos de un solo satélite (A), no obstante, en agosto del 2022, el satélite B finalizó su vida debido a una falla en el sistema, por lo que, hasta que no se instale el nuevo satélite C en el año 2023, la línea base temporal mínima de la misión Sentinel-1 será de 12 días.

1.9 Línea base crítica

Debido a que el valor de coherencia disminuye con respecto al aumento de la línea base, se propone un valor crítico donde no se puede generar un interferograma por la falta de correlación. En el caso de Sentinel-1 la línea base crítica es aproximadamente de 5 kilómetros, incluso con $\frac{3}{4}$ de este valor, el desarrollo del interferograma es complicado por el nivel de ruido (Alaska Satellite Facility (b), 2022).

2. Metodología

En esta sección se describe la secuencia de pasos necesarios para desarrollar el procesamiento denominado como SBAS InSAR.

2.1 Instalación de la librería MintPy

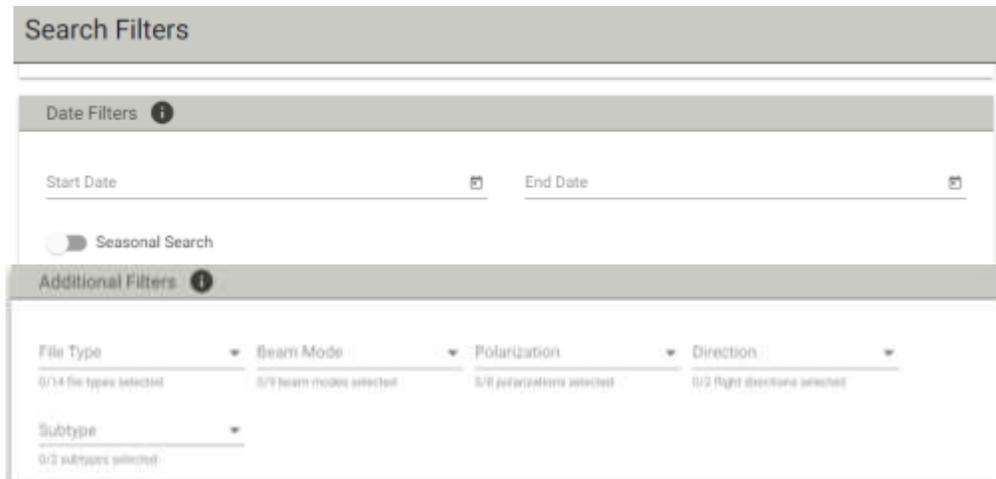
MintPy (Miami INsar Time-series in PYthon) es un software desarrollado por la universidad de Miami, siendo proporcionado a los usuarios de manera gratuita como una librería en el lenguaje Python. Su finalidad es aplicar InSAR multi-temporal basado en el principio de SBAS; de igual forma tiene la capacidad de aceptar como entrada interferogramas (corregidos y desenvueltos) obtenidos a través de los softwares ISCE, SNAP, HyP3, FRInGE, ARIA, GMTSAR, GAMMA y ROI_PAC, generar desplazamientos del terreno con respecto a la dirección LOS y rutinas para evaluar series de tiempo (Mintpy, 2022).

La instalación de MintPy es un proceso que no se definirá en este documento, pero la descripción detallada se encuentra en el siguiente enlace (Mintpy, 2022):

<https://github.com/insarlab/MintPy/blob/main/docs/installation.md>.

2.2 Descarga de Imágenes

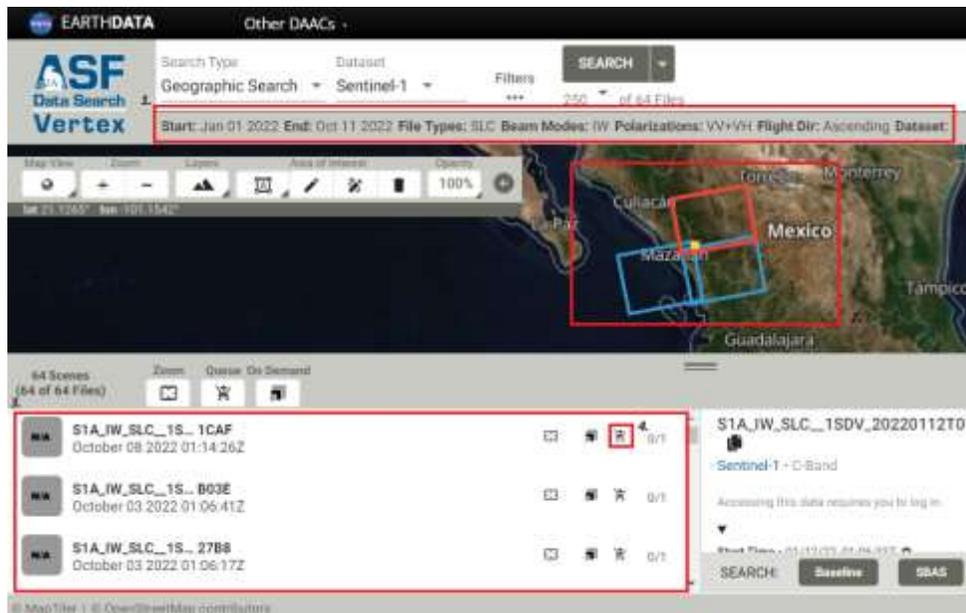
El primer paso para desarrollar el procesamiento InSAR es descargar las imágenes SAR de la misión satelital Sentinel-1, éstas son obtenidas a través de la plataforma Vertex (<https://search.asf.alaska.edu/#/>) de manera libre, solamente es necesario ingresar fecha inicial, fecha final, satélite, tipo de archivo, modo de adquisición, dirección de la órbita, y la zona de interés (figura 2.1).



Fuente: Alaska Satellite Facility (c) (2022)

Figura 2.1. Información necesaria para buscar las imágenes SAR

Al ingresar los parámetros de las imágenes SAR requeridas, en pantalla se despliega la información presentada en la figura 2.2, donde la zona con el número 1, describe las características de las imágenes; el área número 2, indica el terreno que cubre la escena; el número 3 señala las imágenes disponibles, y el número 4 es el icono que se debe seleccionar para agregar las imágenes a una lista de descargas.



Fuente: Alaska Satellite Facility (c) (2022)

Figura 2.2. Resultado de búsqueda en Vertex

La lista de las imágenes seleccionadas está disponible en la esquina superior derecha en el icono de “Downloads” (figura 2.3), al dar clic se despliega la información seleccionada para descargar. Existen diferentes formas de obtener las imágenes, por ejemplo, de manera manual, mediante un archivo ejecutable en la pestaña “Data Download”, y por medio de un scrip propio.



Fuente: Alaska Satellite Facility (c) (2022)

Figura 2.3. Resultado de búsqueda en Vertex

Todas las opciones para descargar la información tienen sus ventajas y desventajas, considerando que la manera manual es lenta y en ocasiones el archivo ejecutable no descarga toda la información, la mejor opción es desarrollar un algoritmo que permita desarrollar la tarea de manera automatizada.

2.3 Generar lista de interferogramas

El procesamiento para generar interferogramas a partir de las imágenes SAR utilizando el software SNAP se encuentra en la publicación técnica No.593 del Instituto Mexicano del Transporte, por lo que, no se describe en esta sección de manera detallada.

2.4 Organización de la información

Para ejecutar las funciones de la librería de MintPy se debe de organizar los interferogramas generados, para esto, su manual (Mintpy, 2022) pone a disposición los siguientes algoritmos para facilitar el proceso:

En la figura 2.4 se exhibe una función para crear dos carpetas, la primera llamada “hyp3” y la segunda “mintpy”. En la carpeta “hyp3” se tienen que colocar todos los interferogramas descomprimidos. Por otro lado, la figura 2.5 presenta parte del algoritmo para crear el archivo de configuración, el cual se coloca en la carpeta “mintpy” previamente creada. En este punto, se puede desarrollar el procesamiento SBAS con la librería MintPy.

```
In [9]: %matplotlib inline
import os
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

# utils function
def configure_template_file(outName, CONFIG_TXT):
    """Write configuration files for MintPy to process Hyp3 product"""
    if os.path.isfile(outName):
        with open(outName, "w") as fid:
            fid.write(CONFIG_TXT)
            print('write configuration to file: {}'.format(outName))
    else:
        with open(outName, "a") as fid:
            fid.write("\n" + CONFIG_TXT)
            print('add the following to file: \n{}'.format(outName))

# define the work directory
#work_dir = os.path.abspath(os.path.join(os.getcwd(), 'mintpy')) #OpenSARLab at ASF
proj_name = "Carrizo"
proj_dir = os.path.join("D:\\SMALLBASE\\pruebas", proj_name) #Local
hyp3_dir = os.path.join(proj_dir, 'hyp3')
work_dir = os.path.join(proj_dir, 'mintpy') #Local

if not os.path.isdir(proj_dir):
    os.makedirs(proj_dir)
    print('Create directory: {}'.format(proj_dir))

if not os.path.isdir(hyp3_dir):
    os.makedirs(hyp3_dir)
    print('Create directory: {}'.format(hyp3_dir))

if not os.path.isdir(work_dir):
    os.makedirs(work_dir)
    print('Create directory: {}'.format(work_dir))

os.chdir(work_dir)
print('Go to work directory: {}'.format(work_dir))
```

Fuente: Propia (2022)

Figura 2.4. Creación de carpetas

```
In [10]: CONFIG_TXT = f'''# vim: set filetype=cfg:
mintpy.load.processor      = hyp3
##-----interferogram datasets:
mintpy.load.unwFile        = {hyp3_dir}/**/*unw_phase.tif
mintpy.load.corFile        = {hyp3_dir}/**/*corr.tif
##-----geometry datasets:
mintpy.load.demFile        = {hyp3_dir}/**/*dem.tif
mintpy.load.incAngleFile   = {hyp3_dir}/**/*lv_theta.tif
mintpy.load.waterMaskFile  = {hyp3_dir}/**/*water_mask.tif
'''

print(CONFIG_TXT)
configName = os.path.join(work_dir, "{}.txt".format(proj_name))
configure_template_file('Carrizo.txt', CONFIG_TXT)
```

Fuente: Propia (2022)

Figura 2.5. Generación de archivo de configuración

2.5 Procesamiento

Para desarrollar el procesamiento InSAR es suficiente con la siguiente función desarrollada en la figura 2.6, donde se ingresa la dirección de la carpeta “mintpy” y del archivo de configuración.

```
In [ ]: smallbaselineApp.py --work-dir "D:\\SMALLBASE\\prueba1\\Carrizo\\mintpy" "D:\\SMALLBASE\\prueba1\\Carrizo\\mintpy\\Carrizo.txt"
```

Fuente: Propia (2022)

Figura 2.6. Generación de archivo de configuración

2.6 Visualización de los resultados

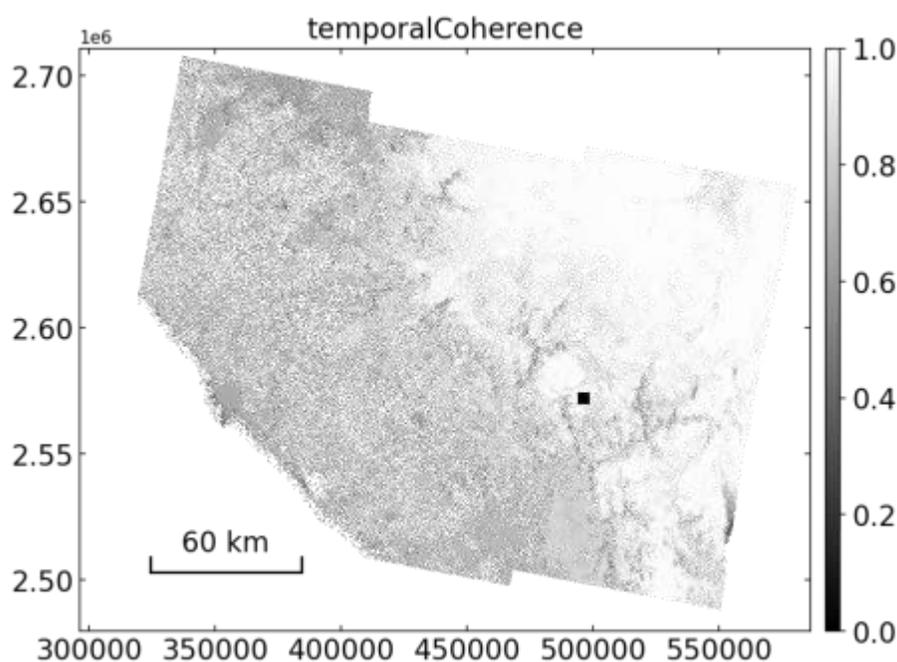
Existen algunas funciones de MintPy para visualizar los resultados obtenidos, por ejemplo, “tsview” y “view”, para observar información en 1 y 2 dimensiones.

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar un análisis multi-temporal de InSAR siguiendo los principios de SBAS contemplando información que cubre el área del puente El Carrizo desde enero del 2020 hasta el 2022.

3.1 Coherencia temporal

La figura 3.1 muestra los valores de coherencia temporal en toda la zona de estudio, mientras que la figura 3.2 hace énfasis en el área donde se localiza el puente El Carrizo, con un rango entre 0.8 y 0.9.



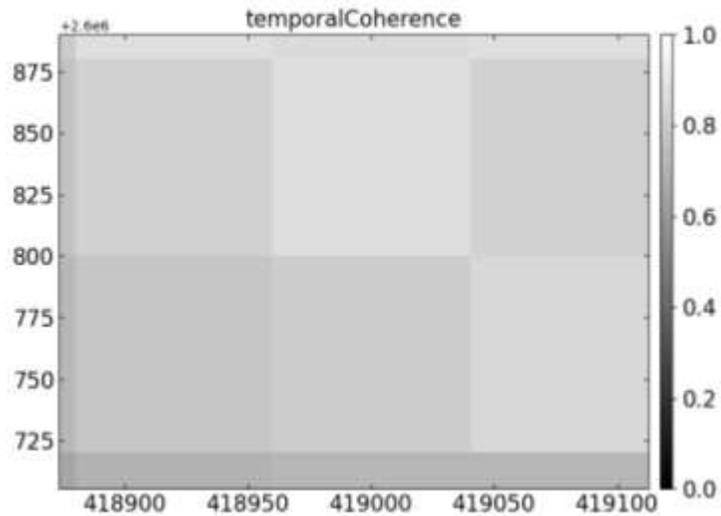
Fuente: Propia (2022)

Figura 3.1. Coherencia temporal de la zona de estudio

3.2 Velocidad

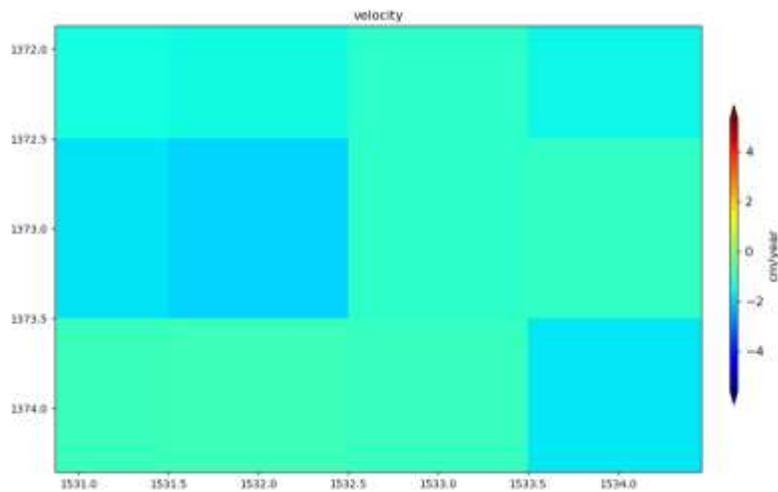
La velocidad indica la tendencia de los desplazamientos que ha sufrido el terreno en un determinado periodo. La velocidad de desplazamiento alemana al puente se encuentra dentro de 0 a -2 cm por año (figura 3.3),

con una desviación estándar entre 0 a 0.5 cm (figura 3.4). Por otro lado, también se puede apreciar la velocidad global de toda la zona que se analizó en las figuras 3.5 y 3.6.



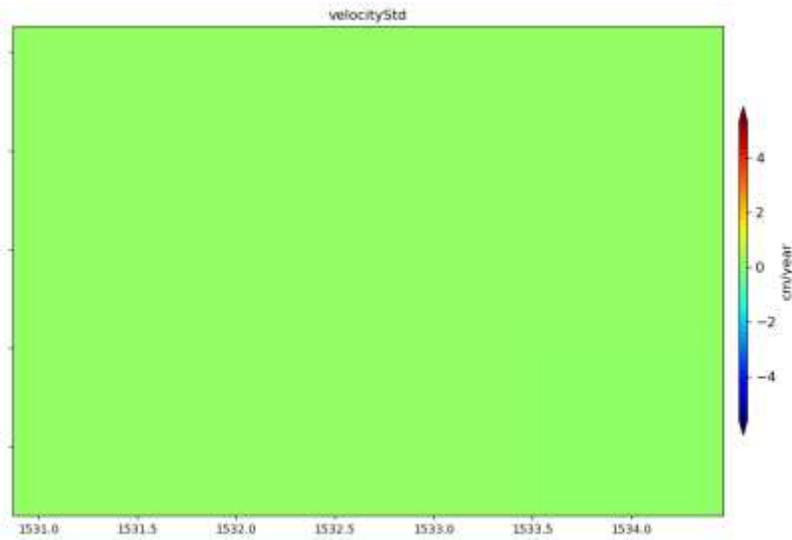
Fuente: Propia (2022)

Figura 3.2. Coherencia temporal de la zona de estudio



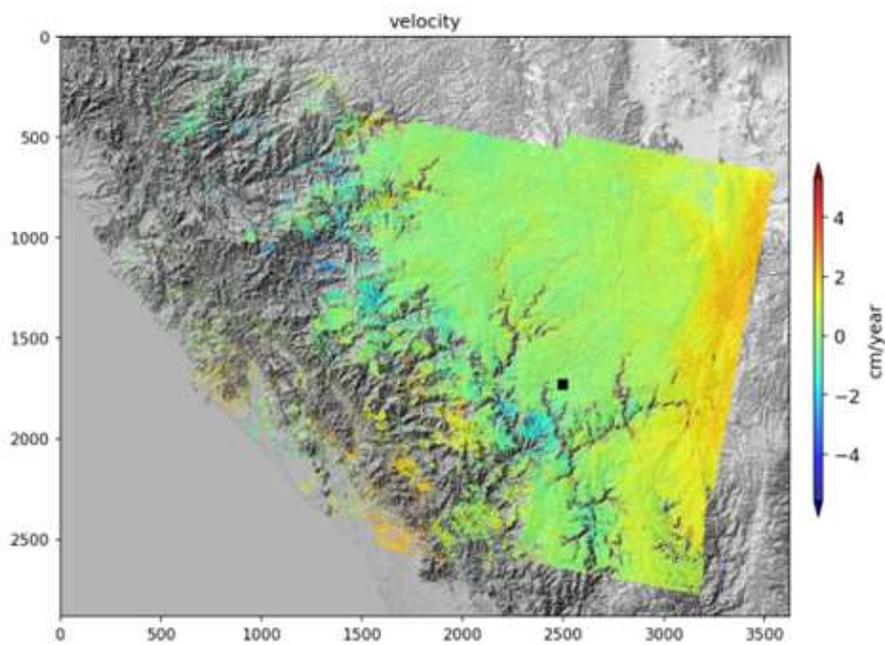
Fuente: Propia (2022)

Figura 3.3. Velocidad de la zona del puente El Carrizo



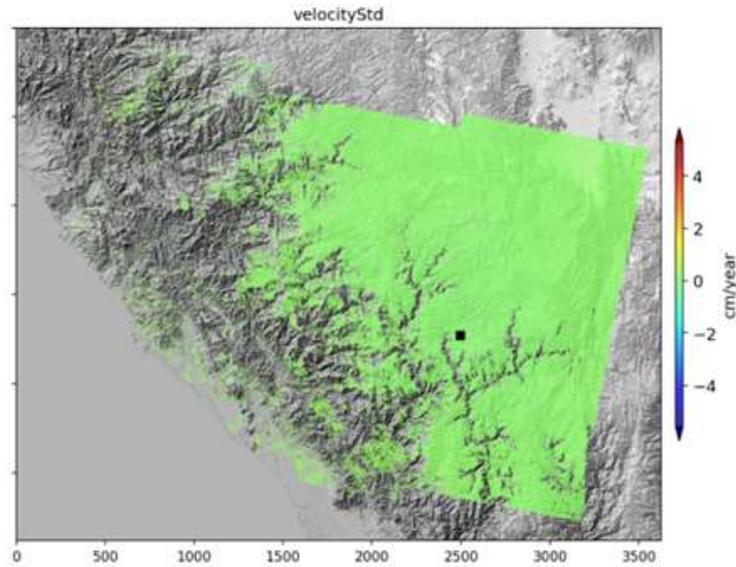
Fuente: Propia (2022)

Figura 3.4. Desviación estándar de la velocidad de la zona del puente El Carrizo



Fuente: Propia (2022)

Figura 3.5. Velocidad de la zona de estudio



Fuente: Propia (2022)

Figura 3.6. Desviación estándar de la velocidad en la zona de estudio

3.3 Series del tiempo

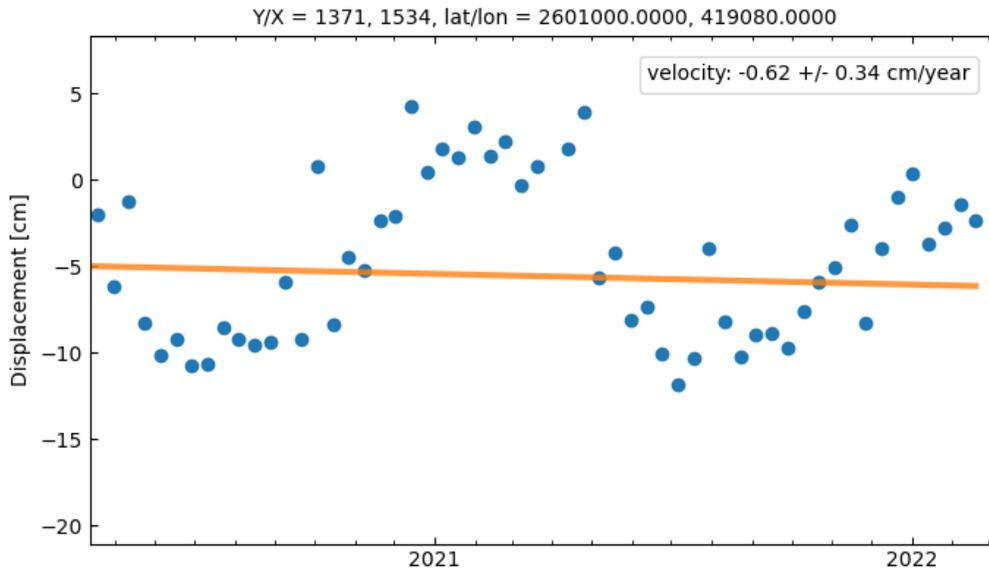
Se dio seguimiento a algunos puntos específicos cercanos a la estructura, los cuales se pueden apreciar en la figura 3.7. El punto número 1 cubre el área de la pila del puente El Carrizo, número 2 y 3 coinciden con la parte lateral de un cerro, mientras que el punto número 4 es el estribo del puente.



Fuente: Propia (2022)

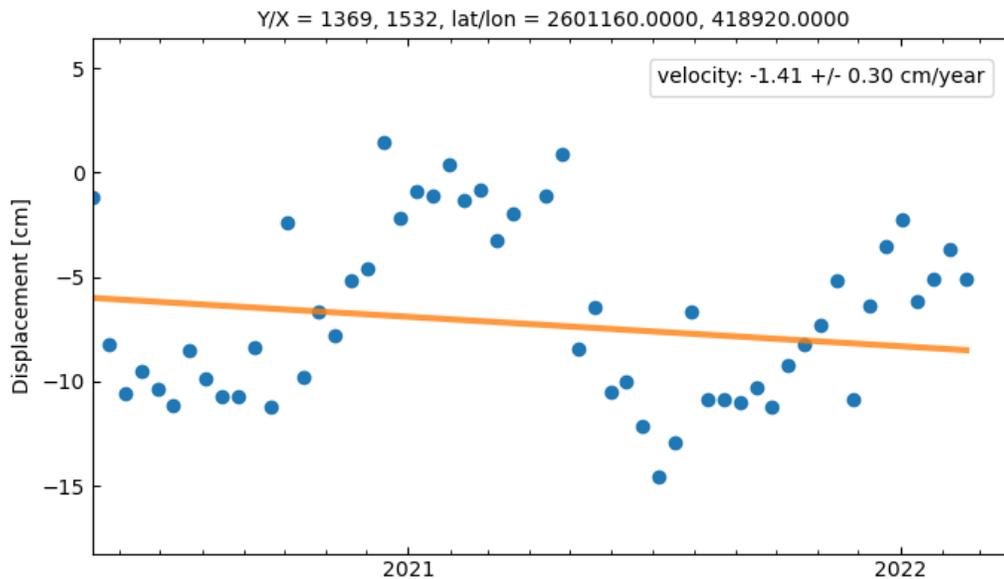
Figura 3.7. Zonas relacionadas a series de tiempo

Las series en el tiempo de cada punto ilustrado en la figura 3.7 se expone en las figuras 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11 para la zona 1, 2, 3 y 4, respectivamente.



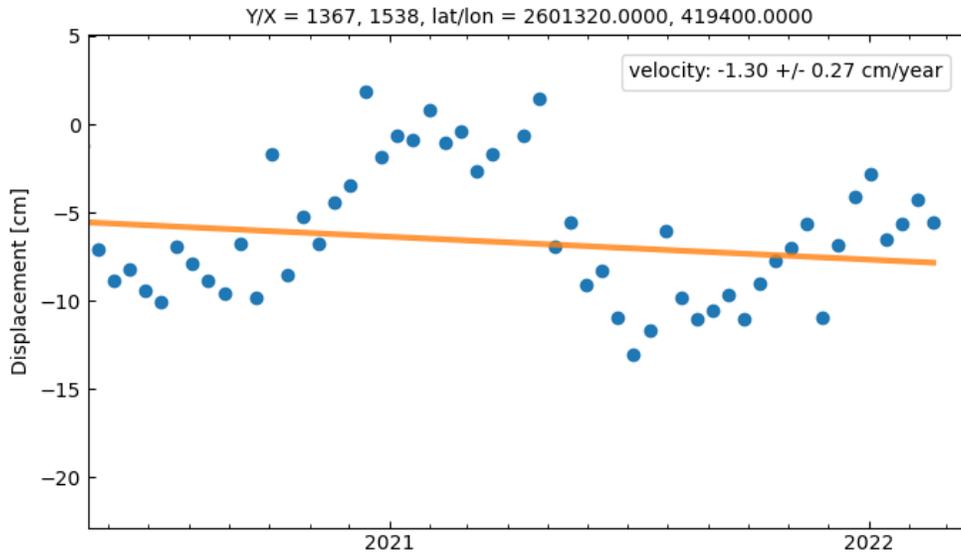
Fuente: Propia (2022)

Figura 3.8. Series del tiempo de la zona 1



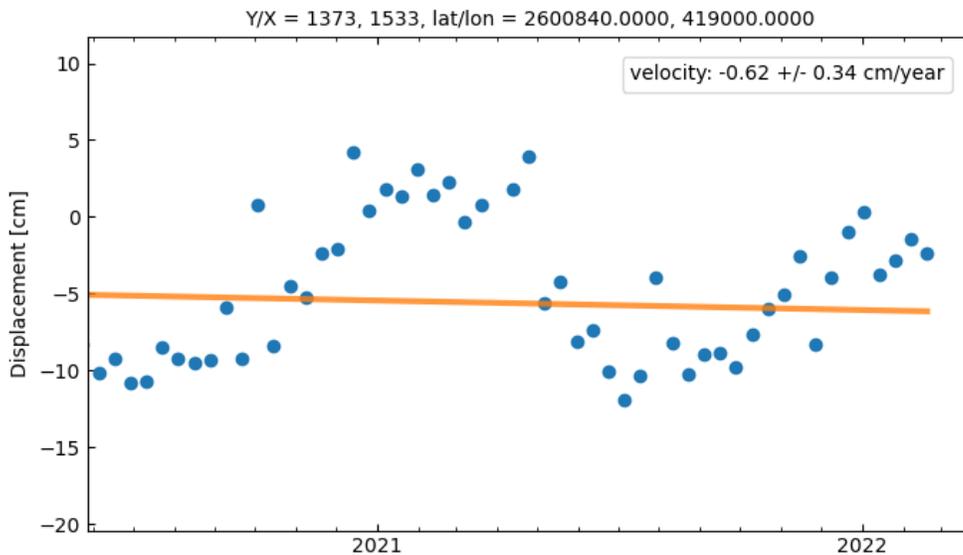
Fuente: Propia (2022)

Figura 3.9. Series del tiempo de la zona 2



Fuente: Propia (2022)

Figura 3.10. Series del tiempo de la zona 3



Fuente: Propia (2022)

Figura 3.11. Series del tiempo de la zona 4

Las series del tiempo cubren un periodo desde inicios del año 2020 y termina en el año 2022, durante este tiempo, se puede apreciar los cambios periódicos probablemente producidos por carga y descarga de agua subterránea en el terreno, lo cual se denota como oscilaciones menores a 15 centímetros. Por otro lado, cada una de las gráficas tiene una tendencia que indica la velocidad a la que se mueve la zona de interés; para el número 1 y 4, que son el estribo y la pila, respectivamente, el puente

El Carrizo se desplaza en la dirección LOS -0.62 cm al año; mientras que la zona 2 tuvo velocidades de -1.41 cm/año y la zona 3, -1.3 cm/año, siendo de mayor magnitud que las del puente El Carrizo.

Conclusiones

En este trabajo se describen todas las etapas a través de las cuales se aplica la metodología InSAR multi-temporal, considerando los principios de SBAS, para definir los desplazamientos que ha sufrido una zona específica de terreno durante un determinado periodo. La información y el software utilizados son de libre acceso y únicamente es necesario crear un usuario para descargar las imágenes e instalar la librería de MintPy para realizar el análisis del desplazamiento. El caso de estudio fue la zona aledaña al puente El Carrizo, localizado en el municipio de Concordia, Sinaloa; donde los datos cubrieron el periodo desde enero del 2020 hasta el 2022. Es importante mencionar que el procesamiento InSAR con el software MintPy se desarrolló a partir de la configuración estándar recomendada; sin embargo, es posible mejorar la calidad de los resultados a través de la optimización de dichos parámetros de configuración, lo cual requiere un estudio de sensibilidad complementario que se prevé para el futuro.

Del análisis de los resultados se concluye que el terreno cercano al puente El Carrizo, específicamente en uno de sus estribos (lado Durango) y pila, tiene una velocidad de desplazamiento en la dirección LOS (dirección a la línea de vista del satélite) de -0.62 cm/año con una desviación estándar de 0.34 cm/año, lo cual se puede catalogar como un comportamiento estable. Por otra parte, las zonas definidas con los números 3 y 4 (figura 3.7), presentan velocidades de -1.41 ± 0.30 cm/año y -1.3 ± 0.27 cm/año, respectivamente, lo cual se puede clasificar como estable de acuerdo con las características de la zona analizada y el corto periodo de tiempo contemplado.

En el área del monitoreo y evaluación de la salud estructural de los puentes, esta información puede ser utilizada para complementar las mediciones que se efectúan localmente con sensores permanentes, como acelerómetros, inclinómetros, extensómetros, entre otros. El aplicar InSAR permite obtener un panorama de los posibles problemas de subsidencia y desplazamiento del entorno que afectan directamente a una estructura, lo cual se puede realizar con periodicidad de 12 días, sin necesidad de colocar sensores permanentes o temporales ni realizar una inspección visual in situ.

Bibliografía

- Acton, S. (2015). *Sinkhole detection, landslide and bridge monitoring for transportation infrastructure by automated analysis of interferometric synthetic aperture radar imagery* (No. RITARS-11-H-UVA). Estados Unidos: National Transportation Library.
- Agencia Espacial Europea [ESA]. (2022). *Sentinel-1*. [Consulta en línea]. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>
- Agencia Espacial Europea [ESA]. (2022). *Sentinel-1*. [Consulta en línea]. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>.
- Alaska Satellite Facility [ASF] (a) (2022). *How to Create an Interferogram Using ESA's Sentinel-1 Toolbox*. [Consulta en línea]. <https://asf.alaska.edu/how-to/data-recipes/create-an-interferogram-using-esasentinel-1-toolbox/>.
- Alaska Satellite Facility [ASF] (b) (2022). *SBAS Search Type*. [Consulta en línea]. <https://docs.asf.alaska.edu/vertex/sbas/>.
- Alaska Satellite Facility [ASF] (c) (2022). *Vertex*. [Consulta en línea]. <https://search.asf.alaska.edu/#/>
- Andreas, H., Abidin, H. Z., Pradipta, D., Sarsito, D. A. & Gumilar, I. (2018). Insight look the subsidence impact to infrastructures in Jakarta and Semarang area; Key for adaptation and mitigation. *MATEC Web of Conferences*, 147(1), 4005-8001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199404005>
- Bekaert, D., Handwerger, A., Agram, P. & Kirschbaum, D. (2020). InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote regions with steep and mountainous terrain: An application to Nepal. *Remote Sensing of Environment*, 249 (1), 111-983. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111983>
- Bozzano, F., Cipriani, I., Mazzanti, P. & Prestininzi, A. (2011). Displacement patterns of a landslide affected by human activities: insights from ground-based InSAR monitoring. *Natural hazards*, 59(3), 1377-1396. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9840-6>

- Ciampalini, A., Bardi, F., Bianchini, S., Frodella, W., Del Ventisette, C., Moretti, S. & Casagli, N. (2014). Analysis of building deformation in landslide area using multisensor PSInSAR™ technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33 (1), 166-180. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.011>
- Devanathéry, N., Crosetto, M., Cuevas-González, M., Monserrat, O., Barra, A. & Crippa, B. (2016). Deformation monitoring using Persistent Scatterer Interferometry and Sentinel-1 SAR data. *Procedia Computer Science*, 100(1), 1121-1126. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.09.263>
- Drougkas, A., Verstryngge, E., Van Balen, K., Shimoni, M., Croonenborghs, T., Hayen, R. & Declercq, P. (2020). Country-scale InSAR monitoring for settlement and uplift damage calculation in architectural heritage structures. *Structural Health Monitoring*, 20 (5), 7-24. <https://doi.org/10.1177/147592172094212>
- Ferretti, A. (2014). *Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space*. Estados Unidos: EAGE publications.
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. & Massonet, D. (2007). *InSAR Principles-Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. Países bajos: ESA Publications.
- Ferretti, A., Prati, C. & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, 39(1), 8-20. DOI: 10.1109/36.898661.
- Flores-Anderson, A., Herndon, K., Thapa, R. & Cherrington, E. (2019). *The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*. Global Science. Estados Unidos: National Space Science and Technology Center.
- Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y. & Perissin, D. (2019). An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation. *International Journal Of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74(1), 248-258. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.018>
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K. & Arikan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514(517), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- Hoppe, E., Novali, F., Rucci, A., Fumagalli, A., Del Conte, S., Falorni, G. & Toro, N. (2019). Deformation monitoring of posttensioned bridges using

- high-resolution satellite remote sensing. *Journal of Bridge Engineering*, 24(12), 712. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001479](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001479)
- Lanari, R., Casu, F., Manzo, M., Zeni, G., Berardino, P., Manunta, M. & Pepe, A. (2007). An overview of the small baseline subset algorithm: A DInSAR technique for surface deformation analysis. *Deformation and Gravity Change: Indicators of Isostasy, Tectonics, Volcanism, and Climate Change*, 164(1), 637-661. DOI 10.1007/s00024-007-0192-9.
- Lazecky, M., Perissin, D., Bakon, M., de Sousa, J. M., Hlavacova, I. & Real, N. (2015). Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations. *Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)*, 1(1), 1-4. DOI 10.1109/JURSE.2015.7120506
- Martínez, L., Quintana, J., Arroyo, B., Carrión, F., Crespo, S., Hernández, J., Bonilla, V., Gasca, H., y Hernández, A. (2016). *Sistema inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes* (Publicación Técnica No. 464). México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt464.pdf>
- Meyer, F. (2018). *Sentinel-1 InSAR processing using the Sentinel-1 Toolbox*. Alaska Satellite Facility. [Consulta en línea]. https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/05/generate_insar_with_slrbx_v5.4.pdf
- Milillo, P., Giardino, G., Perissin, D., Milillo, G., Coletta, A. & Terranova, C. (2019). Pre-Collapse Space Geodetic Observations of Critical Infrastructure: The Morandi Bridge, Genoa, Italy. *Remote Sensing*, 11(12), 1403. <https://doi.org/10.3390/rs11121403>
- Mintpy. (2022). *insarlab/MintPy*. [Consulta en línea]. <https://github.com/insarlab/MintPy>.
- Perissin, D. (2016). Interferometric SAR multitemporal processing: Techniques and applications. *In Multitemporal Remote Sensing*, 1(1), 145-176). DOI:10.1007/978-3-319-47037-5_8
- Quintana, J., Carrión, F., Crespo, S., Bonilla, V., Garnica, P. & Pérez, J., (2016) SHM & evaluation of a continuous reinforced concrete pavement, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 6(4), 681-689. <https://doi.org/10.1007/s13349-016-0189-0>
- Quintana, J., Carrión, F., Crespo, S., Rodríguez, D., Martínez, L., Gasca, H., Arceo, D., Hernández, A. y Hernández, J., (2015). *Estrategias de evaluación y análisis del monitoreo del puente Río Papaloapan*

(Publicación Técnica No. 441). México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt441.pdf>

Roccheggiani, M., Piacentini, D., Tirincanti, E., Perissin, D. & Menichetti, M. (2019). Detection and monitoring of tunneling induced ground movements using Sentinel-1 SAR Interferometry. *Remote Sensing*, 11(6), 639. <https://doi.org/10.3390/rs11060639>

Selvakumaran, S., Plank, S., Geiß, C., Rossi, C. & Middleton, C. (2018). Remote monitoring to predict bridge scour failure using Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) stacking techniques. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 73(1), 463-470. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.004>

Selvakumaran, S., Webb, G. T., Bennetts, J., Middleton, C. R. & Rossi, C. (2019). Waterloo Bridge Monitoring: Comparing Measurements from Earth and Space. In International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC) Driving data-informed decision-making. *ICE Publishing*, 1(1), 639-648. <https://doi.org/10.1680/icsic.64669.639>

Sousa, J. & Bastos, L. (2013). Multi-temporal SAR interferometry reveals acceleration of bridge sinking before collapse. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(3), 659-667. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-659-2013>

Tre Altamira (2022). *InSAR at a Glance*. [Consulta en línea]. <https://site.tre-altamira.com/insar/>.

Unavco. (2018). *InSAR errors and noise*. [Consulta en línea]. <https://www.unavco.org/education/professional-development/short-courses/course-materials/insar/2018-insar-course-materials/2018-insar-course-materials.html>.

Veci, Luis. (2016). *TOPS Interferometry Tutorial*. [Consulta en línea]. <http://step.esa.int>.

Woodhouse, I. (2017). *Introduction to microwave remote sensing*. Edinburgo, Escocia: CRC press.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>