



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

Evaluación de cambios topográficos de taludes carreteros usando la metodología InSAR

Germán Michel Guzmán Acevedo
Juan Antonio Quintana Rodríguez
Héctor Miguel Gasca Zamora
Francisco Javier Carrión Viramontes
Luis Álvaro Martínez Trujano
Jorge Alberto Hernández Figueroa
Miguel Anaya Díaz
Manuel Machorro López

Publicación Técnica No. 606
Sanfandila, Qro.
2020

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Vehicular e Integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte, por M. en C. Germán Michel Guzmán Acevedo, Dr. Juan Antonio Quintana Rodríguez, Ing. Héctor Miguel Gasca Zamora, Dr. Francisco Javier Carrión Viramontes, M. en C. Luis Álvaro Martínez Trujano, Ing. Jorge Alberto Hernández Figueroa, M. en C. Miguel Anaya Díaz y el Dr. José Manuel Machorro López.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna EI 01/20 "Evaluación de cambios topográficos de taludes carreteros usando la metodología InSAR".

Se agradece el apoyo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) para hacer posible esta investigación a través del Programa "Cátedras CONACYT" Proyecto No. 34/2018, y la colaboración de Dr. Martínez Madrid Miguel, Coordinador del Ingeniería Vehicular e integridad Estructural del Instituto Mexicano del Transporte.

Contenido

| | Página |
|-------------------------------------|--------|
| Índice de figuras..... | v |
| Índice de tablas..... | vii |
| Sinopsis..... | ix |
| Abstract..... | xi |
| Resumen Ejecutivo | xiii |
| 1 Introducción..... | 1 |
| 2 Conceptos de InSAR..... | 5 |
| 2.1 Interferograma..... | 5 |
| 2.2 InSAR Diferencial..... | 5 |
| 2.3 InSAR multitemporal | 7 |
| 3 Metodología | 9 |
| 3.1 Descarga de imágenes SAR | 9 |
| 3.2 Procesamiento InSAR..... | 12 |
| 3.3 Procesamiento con SARPROZ | 15 |
| 4 Resultados | 17 |
| 4.1 Toluca-Zitácuaro SNAP..... | 17 |
| 4.2 Cuacnopalan-Oaxaca SNAP | 17 |
| 4.3 SARPROZ..... | 18 |
| 5 Conclusiones..... | 21 |
| Bibliografía | 23 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 Derrumbe en la autopista Toluca-Zitácuaro en el km 50+800..... | 2 |
| Figura 1.2 Derrumbe en la autopista Cuacnopalan-Oaxaca en el km 102+800... | 3 |
| Figura 2.1 Geometría InSAR..... | 6 |
| Figura 3.1 Script de Python..... | 10 |
| Figura 3.2 Script bash de Linux..... | 10 |
| Figura 3.3 Script llamadas al sistema..... | 14 |
| Figura 3.4 Script con archivo xml..... | 14 |
| Figura 4.1 Desplazamiento acumulado Toluca-Zitácuaro..... | 17 |
| Figura 4.2 Desplazamiento acumulado Cuacnopalan-Oaxaca..... | 18 |
| Figura 4.3 Resultado SARPROZ de la autopista Toluca-Zitácuaro..... | 18 |
| Figura 4.4 Desplazamiento acumulado Toluca-Zitácuaro..... | 19 |
| Figura 4.5 Puntos sobre el terreno con información de la autopista Cuacnapalan-Oaxaca..... | 19 |
| Figura 4.6. Desplazamiento acumulado Cuacnapalan-Oaxaca..... | 20 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 3.1. Fechas de adquisición de imágenes que cubren la autopista Toluca-Zitácuaro..... | 11 |
| Tabla 3.2. Fechas de adquisición de imágenes que cubren la autopista Cuacnopalan-Oaxaca..... | 11 |
| Tabla 3.3. Interferograma Toluca-Zitácuaro..... | 12 |
| Tabla 3.4. Interferogramas Cuacnopalan-Oaxaca..... | 13 |

Sinopsis

Esta investigación propone aplicar la metodología InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) en zonas dentro del eje carretero que fueron dañadas por el colapso de un talud, con el objetivo de evaluar las capacidades de la metodología InSAR para detectar movimientos verticales en el talud antes del colapso, utilizando imágenes y software de acceso libre proporcionados por la agencia espacial europea.

Se consideran dos casos de análisis, el primero, en la autopista Toluca-Zitácuaro en el km 50+800 donde se presentó un derrumbe el 25 de septiembre del 2019, y el segundo caso, es la autopista Cuacnopalan-Oaxaca en el km 102+800 donde se derrumbó un cerro el 19 de junio del 2018. Las imágenes SAR provenientes de Sentinel-1 se procesaron con el software SNAP/SNAPHU aplicando InSAR Diferencial. De la autopista Toluca-Zitácuaro se procesaron 9 interferogramas y de la autopista Cuacnopalan-Oaxaca 10. Adicionalmente, se procesaron los dos casos de estudio con el software SARPROZ aplicando la metodología PSI (Persistent Scatterers InSAR) y QSI (Quasi-Scatterers InSAR).

Los resultados presentan una tendencia antes de que sucediera el colapso en los taludes, sin embargo, la aplicación de imágenes con mayor resolución, un software comercial o el desarrollo del mismo, mejoraría la resolución y precisión el estudio.

Abstract

This research proposes to apply InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) methodology in areas within road where previously a slope collapsed. The idea is to assess the capabilities of InSAR for detecting slope's vertical displacements that produced the known collapse using free SAR images and software provided by the European Space Agency.

Two cases of study are considered, the first one is at the 50+800 km in the Toluca-Zitacuaro road, where a collapse took place in September 2019. The second case is the slope at the 102+800 km in the Cuacnopalan-Oaxaca road, where part of a mountain collapsed in June 2018. The SAR images were provided by the satellite mission Sentinel-1 and processed using SNAP/SNAPHU software with the methodology Differential InSAR. For the Toluca-Zitacuaro road, 9 interferograms were processed, while 10 were obtained for the Cuacnopalan-Oaxaca road. Additionally, both cases were determined with SARPROZ using PSI (Persistent Scatterers InSAR) and QSI (Quasi- Scatterers InSAR) methodologies.

The results presented a tendency before the slope's collapse, however, the fact of using SAR images with a better resolution and even a commercial software would improve the accuracy of applying InSAR.

Resumen ejecutivo

InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) es una metodología que permite calcular la diferencia de fase entre dos o más imágenes SAR de una misma zona, obtenidas en diferentes periodos de tiempo con el propósito de determinar la topografía y/o deformación del terreno. De acuerdo con el estado del arte [4-18], se puede precisar que InSAR es una herramienta eficiente para ser aplicada en el estudio de derrumbes y taludes inestables, monitoreo de estructuras lineales, análisis de estabilidad de estructuras y verificar daños hechos por fenómenos naturales o a causa del hombre.

El objetivo principal de esta investigación es analizar el comportamiento de taludes de la infraestructura carretera en retrospectiva a través de la metodología InSAR, basado en imágenes proporcionadas por la Agencia Espacial Europea de la misión Sentinel-1. Los casos de estudio son dos, el primero en la autopista Toluca-Zitácuaro en el km 50+800 localizado en el municipio de Villa de Allende, donde se presentó un derrumbe el 25 de septiembre del 2019; el segundo lugar es la autopista Cuacnopalan-Oaxaca en el km 102+800, donde se derrumbó un cerro el día 19 de junio del 2018. Para el procesamiento de las imágenes SAR se implementó SNAP/SNAPHU con la metodología InSAR Diferencial y como una prueba de exploración el software SARPROZ con la metodología PSI (Persistent Scatterers InSAR) y QSI (Quasi- Scatterers InSAR).

Los resultados del estudio confirman que esta tecnología es capaz de identificar tendencias de desplazamiento en los taludes antes de que sucediera el colapso; sin embargo, los resultados no son totalmente concluyentes y para ello es necesario contar con imágenes de mayor resolución. Por otro lado, es necesario desarrollar software y aplicaciones para el procesamiento de las imágenes de alta resolución o disponer de software comercial con dicha capacidad. Finalmente, contando con las capacidades ya mencionadas, es necesario establecer las condiciones adecuadas de monitoreo para detectar los movimientos con suficiente tiempo y certidumbre para actuar y evitar situaciones que pongan en riesgo la vida de las personas o comprometan de manera crítica la operación del sistema carretero.

Este trabajo se divide en cinco capítulos, el primero hace énfasis en la motivación para desarrollar el análisis en retrospectiva de un talud aledaño a la carretera que colapsó con InSAR, así como los objetivos del trabajo; el segundo capítulo define algunos conceptos de InSAR; en el tercer capítulo, se describe la metodología de análisis en retrospectiva con imágenes SAR de acceso libre de la misión satelital Sentinel-1; en el cuarto capítulo, se analizan los resultados de los interferogramas de la autopista Toluca-Zitácuaro y Cuacnopalan-Oaxaca, respectivamente y finalmente se presentan las conclusiones obtenidas de la investigación.

1. 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 y efectivos. Adicionalmente al hecho de evitar pérdidas humanas, el monitoreo proporciona información que permite la optimización de recursos financieros para la conservación de la infraestructura carretera. Así, para lograr los objetivos mencionados, es fundamental que el sistema de monitoreo se diseñe fundamentado 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 de ahí resulte.

Si bien, el monitoreo estructural ha demostrado su valor y las ventajas económicas y operativas que puede tener ante contingencias y eventos extraordinarios [1-3], todos los estudios de monitoreo realizados hasta el momento son locales, es decir, se enfocan a un elemento de la infraestructura carretera, como son los puentes, túneles o una sección específica de la carretera, y no a la evaluación global de toda la infraestructura que comprende un eje carretero. Por consecuencia, a pesar de que el monitoreo determine que una estructura particular se está comportando adecuadamente, eso no significa que el resto de la infraestructura carretera lo haga, por lo que es importante recurrir a una metodología global de medición que permita detectar cambios en el comportamiento desde un punto de vista global que incluya a la mayoría de elementos que conforman la infraestructura carretera, especialmente aquellas secciones susceptibles a cambios por efectos ambientales.

Una de las herramientas en la actualidad para recolectar datos de la Tierra a gran escala son los satélites. En el caso del monitoreo estructural, de acuerdo con la literatura científica, InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar) se ha implementado para evaluar diversas estructuras de ingeniería civil. InSAR es una metodología que permite calcular la diferencia de fase entre dos o más imágenes satelitales SAR de una misma zona, pero obtenidas en diferentes periodos de tiempo con el propósito de determinar desplazamientos de los elementos involucrados en la imagen. Los desplazamientos pueden ser calculados 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 [4].

De acuerdo con estudios desarrollados en los últimos años [4] y respaldado por la revisión del estado del arte hecha en el proyecto El 15/19 “Análisis del potencial de tecnología satelital InSAR para el monitoreo de la infraestructura carretera” [4-18],

se puede precisar que la metodología InSAR es una herramienta eficiente para ser aplicada en las siguientes áreas:

- Caracterización de áreas aledañas de derrumbes y taludes inestables: InSAR es eficiente para observar derrumbes lentos que a su vez provocan los rápidos.
- Monitoreo de estructuras lineales: InSAR puede ayudar a evaluar movimientos del terreno provocados por derrumbes, 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 de retrospectiva a partir de daños ocasionados por causas humanas o naturales.

Basado en las capacidades que el estado del arte atribuye a la metodología InSAR, esta investigación propone analizar el comportamiento de taludes de la infraestructura carretera en retrospectiva, basado en imágenes SAR proporcionadas por la Agencia Espacial Europea de la misión Sentinel-1. Los casos de estudio son dos, el primero en la autopista Toluca-Zitácuaro en el km 50+800 localizado en el municipio de Villa de Allende, donde se presentó un derrumbe el 25 de septiembre del 2019 (figura 1.1); el segundo lugar a estudiar es la autopista Cuacnopalan-Oaxaca en el km 102+800, donde se derrumbó un cerro el día 19 de junio del 2018 (figura 1.2).



Figura 1.1 Derrumbe en la autopista Toluca-Zitácuaro en el km 50+800



Figura 1.2 Derrumbe en la autopista Cuacnopalan-Oaxaca en el km 102+800

Las imágenes SAR en las que se basa el procesamiento de datos de la presente investigación son provenientes de la misión Sentinel-1, la cual es una plataforma satelital operada por la Agencia Espacial Europea y proporciona información de manera gratuita. Las principales características de las imágenes del Sentinel-1 que se implementaron son; captura en modo IW (Interferometric Wide), resolución temporal (tiempo para que el satélite repita su órbita) de 12 días, resolución espacial (área del terreno representada en un píxel) de 5x20 metros en banda “C” y un ángulo de incidencia de 29.1°-46.0° [6]. Es importante mencionar que Sentinel-1 es un sistema activo que permite recolectar información durante la noche y el día en cualquier condición climatológica, además de que, debido a la longitud de onda empleada, la cobertura de nubes no afecta la adquisición de datos [7]. Algunas de las bandas usadas por los sensores de radar son “X”, “C”, “S”, “L”, y “P”, teniendo cada una diferente aplicabilidad y características. 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; 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 [5]. El campo de aplicación para las distintas bandas varía debido a que entre más grande es la longitud de onda, mayor es la capacidad de penetración que alcanza la señal en el suelo con vegetación, nieve u otros materiales.

El principal software empleado para procesar las imágenes SAR en el análisis en retrospectiva es SNAP (SeNtinel’s Application Platform) y SNAPHU, siendo InSAR Diferencial y el desenvolvimiento de la fase, desarrollados respectivamente. Por otro lado, al conseguirse una prueba gratis del software SARPROZ se realizó procesamiento multitemporal InSAR con todas las imágenes SAR descargadas para

cada caso de estudio, este último software maneja metodología PSI (Persistent Scatterers InSAR) y QPSI (Quasi- Scatterers InSAR).

2. Conceptos de InSAR

La percepción remota estudia el comportamiento de los objetos a través de su interacción con cierto rango específico del espectro electromagnético. Para desarrollar InSAR se requiere imágenes SAR obtenidas en el rango de las microondas, es decir, la señal electromagnética tiene una longitud de onda entre 1 milímetro a 1 metro aproximadamente. Posteriormente a la obtención de las imágenes SAR, es necesario obtener la diferencia de fase de la señal entre dos o más imágenes SAR recolectadas en la misma zona, pero en diferente periodo. En los siguientes subtemas se definirán algunos conceptos básicos de InSAR basados en el capítulo Interferometric SAR multitemporal processing: techniques and applications del libro Multitemporal Remote Sensing [19].

2.1 Interferograma

Los interferogramas se generan a partir de al menos dos imágenes SAR, las cuales están conformadas por información de intensidad y fase de la señal electromagnética que es emitida y capturada por un satélite después de su interacción con los objetos en la Tierra. Para generar los interferogramas, una imagen se considera como maestra y las demás esclavas, todas las imágenes deben de estar alineadas para que los pixeles representen la misma región de terreno, esto se debe a que las imágenes recolectadas con la misma geometría presentan pequeñas diferencias por lo cual deben ser alineadas antes de generar el interferograma. El interferograma se origina por la diferencia de la fase que pertenece a cada imagen, por ejemplo, la fase interferométrica entre dos imágenes i y j puede ser definida como:

$$\Phi_{i,k}(s, l) = \Phi_i(s, l) - \Phi_k(s, l) \quad (2.1)$$

Donde s es la coordenada vertical y l la horizontal. También, la ecuación 2.1 se puede reescribir como:

$$\Phi_{i,k}(s, l) = \frac{4\pi}{\lambda} [R_i(s, l) - R_k(s, l)] \quad (2.2)$$

En este caso, se involucra R que es la distancia del sensor hasta el objetivo y λ es la longitud de onda de la señal emitida por el satélite.

2.2 InSAR Diferencial

Al generar una fase interferométrica en un punto (P) con respecto a uno de referencia (O), la geometría entre los elementos involucrados presentan algunos parámetros (figura 2.1) como las distancias Δx y Δh a partir del punto de referencia (O) a el punto

(P), la distancia entre los dos satélites a lo largo de la dirección normal en relación al rango inclinado de referencia llamada línea base normal (B_n), y el ángulo incidente relativo definido con la siguiente ecuación.

$$\Delta\theta = \frac{B_n}{R_k} \quad (2.3)$$

Donde $R_k = \overline{S_k O}$ es el rango maestro del punto de referencia (O). Por lo que, la fase interferométrica es igual a la ecuación 2.4.

$$\Delta\phi_{i,k} = \Delta\phi_{i,k}(P) - \Delta\phi_{i,k}(O) = \frac{4\pi}{\lambda} [R_{i,k}(P) - R_{i,k}(O)] \quad (2.4)$$

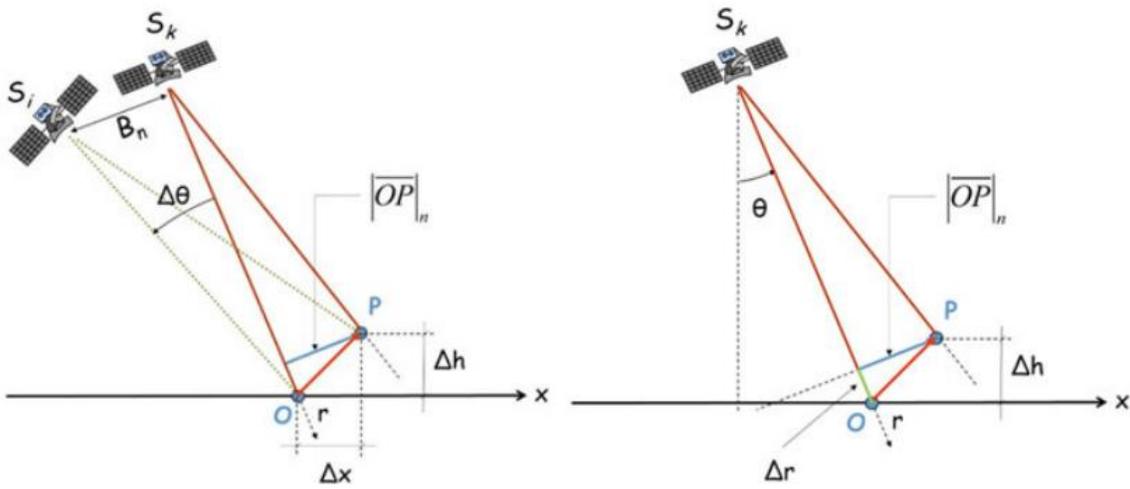


Figura 2.1 Geometría InSAR [19]

La expresión anterior todavía se puede reducir más al considerar que $R_{i,k}(P) = \overline{S_i P} - \overline{S_k P}$ y $R_{i,k}(O) = \overline{S_i O} - \overline{S_k O}$.

$$\Delta\phi_{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n}{R_k} |OP|_n \quad (2.5)$$

Donde $|OP|_n$ es la proyección de $|OP|$ sobre la dirección normal a r y la cual se conforma por una componente inclinada y otra de altura.

$$|OP|_n = \frac{\Delta r}{\tan \theta} + \frac{\Delta h}{\sin \theta} \quad (2.6)$$

Al sustituir la información de la ecuación 2.6 en 2.5 se definen los efectos por curvatura de la tierra (flat) y la topografía (height).

$$\Delta\phi_{i,k}^{flat} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_n}{R_k} \frac{\Delta r}{\tan \theta} \quad (2.7)$$

$$\Delta\phi_{i,k}^{height} = \frac{4\pi B_n \Delta h}{\lambda R_k \sin \theta} \quad (2.8)$$

De igual forma, la fase interferométrica es afectada por el desplazamiento que sufre el terreno durante el lapso entre ambas adquisiciones y que en ocasiones es el elemento de estudio. La fase interferométrica es muy sensible a los desplazamientos, esto se debe a que un movimiento igual que la mitad de la longitud de onda produce una rotación de la fase igual a 2π . Al eliminar efectos producidos por la curvatura de la tierra y la topografía en la fase interferométrica, el resultado se denomina fase interferométrica diferencial.

$$\Delta\phi_{i,k}^{DInSAR} = \Delta\phi_{i,k} - \Delta\phi_{i,k}^{flat} - \Delta\phi_{i,k}^{height} \quad (2.9)$$

Por otro lado, también es necesario aplicar filtros en los interferogramas para reducir su ruido, debido a que al promediar los pixeles vecinos suaviza la fase produciendo una mejora en el rango de ruido de la señal.

Otra cuestión que se debe de considerar son los cambios del terreno durante el tiempo en que se capturan las imágenes involucradas en el proceso InSAR, por ejemplo, cambios de forma geométrica, material, orientación, que afecten la reflectividad del terreno, al igual que modificaciones en el ángulo de visión. Estos cambios en el terreno producen que se pierda correlación y la fase se vuelva ilegible. Para cuantificar la decorrelación entre las imágenes se implementa el término de coherencia, el cual es un valor entre 0 y 1, donde 0 indica decorrelación, ruido e ilegibilidad en la fase, mientras que 1, señala una fase interferométrica confiable.

A pesar de que un interferograma se obtenga con una alta coherencia y un buen desenvolvimiento de la fase, aún es necesario reducir los efectos atmosféricos, estos efectos se producen por la diferencia de condiciones atmosféricas al recolectar las imágenes SAR. El vapor de agua produce un retraso en la señal de radar y sesgos en la fase interferométrica, por lo que, la precisión con la que se miden los desplazamientos pasa de milímetros a centímetros.

2.3 InSAR multitemporal

La fase interferométrica está formada por el efecto producido debido a la topografía (height), curvatura de la tierra (flat), desplazamiento del terreno (disp), retraso atmosférico (atmo) y ruido.

$$\Delta\phi_{i,k}(p) = \Delta\phi_{i,k}^{flat}(p) + \Delta\phi_{i,k}^{height}(p) + \Delta\phi_{i,k}^{disp}(p) + \Delta\phi_{i,k}^{atmo}(p) + \Delta n_{i,k}(p) \quad (2.10)$$

La metodología PSI es capaz de reducir los efectos que minimizan la precisión de InSAR (mencionados en la ecuación 2.10) y proporcionar series de tiempo confiables a partir de imágenes SAR. Sin embargo, la metodología presenta la principal desventaja de que los objetos a estudiar deben de ser coherentes en todos los interferogramas empleados. Por lo que, solamente elementos construidos por el hombre son capaces de cumplir el requisito, pero en el caso de áreas rurales, la

cantidad de información que se puede obtener de la zona disminuye notablemente. Actualmente, ya se han desarrollado otras metodologías que resuelven esta desventaja. En el caso de Quasi-PS (usada por el software SARPROZ) se implementan imágenes multi-maestras, además de que puede brindar información de puntos que en algún periodo fueron coherentes y después lo dejaron de ser por el cambio del clima debido a la temporada del año.

3. Metodología

El objetivo principal de este trabajo de investigación es desarrollar un análisis en retrospectiva con InSAR empleando software e imágenes libres para estudiar cambios en el terreno que provocaron la falla previamente detectada en un talud. Los pasos necesarios para llevar a cabo el estudio se presentan en las siguientes secciones desde la descarga de las imágenes hasta su organización para obtener los interferogramas.

3.1 Descarga de imágenes SAR

Las imágenes SAR son la pieza fundamental para desarrollar la metodología InSAR, por lo que en este trabajo como se mencionó se utilizan imágenes provenientes de la misión Sentinel-1. Las principales características de estas imágenes es que son capturadas en modo IW (Interferometric Wide), resolución temporal (tiempo para que el satélite repita su órbita) de 12 días, resolución espacial (área del terreno representada en un píxel) de 5x20 metros en banda “C” y un ángulo de incidencia de 29.1°-46.0° [6].

Debido a que las imágenes SAR tienen un tamaño de aproximadamente 4 Gb cuando están comprimidas, su descarga es un proceso lento, por lo tanto, las imágenes SAR se descargaron de la plataforma Vertex propiedad de Alaska Satellite Facility a través de un script para hacer el proceso automático. Se realizaron dos scripts, el primero en python y el otro en bash de Linux. Es importante mencionar que ambos ejecutan el mismo trabajo, sin embargo, los parámetros de entrada cambian para cada uno. En el script de python, los parámetros de entrada son el usuario/contraseña de la plataforma Vertex y una lista con las imágenes que se descargan. La figura 3.1 presenta parte del script en python para la descarga de imágenes SAR. Por otro lado, en el script bash de Linux (figura 3.2) se especifican coordenadas que cubren la zona de interés, orbita, fecha de inicio, fecha final y dirección del satélite.

El tiempo de descarga con un script u otro es despreciable, ya que principalmente es afectado por la velocidad de descarga del internet. Sin embargo, ambos scripts cumplen su cometido adecuadamente siendo su principal diferencia el sistema operativo con el que funcionan y sus parámetros de entrada. Además, es importante aclarar que el número de imágenes descargadas para cada caso se basa en tener aproximadamente 3 meses de información antes del colapso del talud y un mes posterior al evento. En total se descargaron 10 y 12 imágenes SAR de la autopista Toluca-Zitácuaro y Cuacnopalan-Oaxaca, respectivamente. En la tabla 3.1 se muestra las fechas de adquisición de imágenes que cubren el área de la autopista Toluca-Zitácuaro y con rojo se remarca la fecha previa y posterior del incidente, en

este caso, el derrumbe ocurrió el 25 de septiembre del 2019 por lo que se tiene datos 10 días antes y dos después del evento.

```
#importing relevant python packages
import sys, os, re
import numpy as np
import datetime
import time
import glob
import csv
import matplotlib.pyplot as plt

#create a working directory
os.chdir ("D:\\SNAP\\SLC")
#os.mkdir ("D:\\Proyecto\\oax\\oax\\SLC")
#os.chdir ("D:\\Proyecto\\oax\\oax\\SLC")
os.getcwd()

#Define a function to download data set from the ASF achives
import requests
from getpass import getpass
def download_file (url,username=None, password=None):
    local_filename=url.split('/')[-1]
    print(local_filename)
    r=requests.get(url,stream=True)
    if r.status_code == 401:
        #pwd=getpass('password for {}'.format(username))
        pwd='Yalublumycity00.7'
        r=requests.get(r.url,stream=True,auth=(username,pwd))
    print('Downloading')
    with open (local_filename,'wb') as f:
        for chunk in r.iter_content (chunk_size=1024):
            if chunk:
                f.write(chunk)
```

Figura 3.1 Script de Python

```
#!/bin/bash
#cd asc/data
descarga=' -c https://datapool.asf.alaska.edu/SLC/SA/'
final1='.zip'
cmda="https://api.daac.asf.alaska.edu/services/search/param?
Platform=Sentinel-1&polygon=-99.3895,17.9054,-99.3299,17.9054,-
99.3299,17.9717,-99.3895,17.9717,-99.3895,17.9042&processingLevel=SLC
&relativeOrbit=143&start=jan+1+2020&end=now&flightDirection=DESCENDING&output=csv"
Echo $cmda | xargs curl > asf.csv
Cut -d ',' -f1 asf.csv > asf1.csv
Tail -n +2 asf1.csv > asf2.csv
Filea=$(cat asf2.csv)
Rm asf.csv asf1.csv asf2.csv|
```

Figura 3.2 Script bash de linux

La tabla 3.2 contiene las fechas de adquisición de las imágenes SAR descargadas para evaluar la autopista Cuacnopalan-Oaxaca; el evento sucedió el 19 de junio del 2018, por lo tanto, se tiene información 8 días antes y 4 días después.

Tabla 3.1 Fechas de adquisición de imágenes que cubren la autopista Toluca-Zitácuaro

| Número de imagen | Fecha |
|------------------|------------|
| 1 | 05/07/2019 |
| 2 | 17/07/2019 |
| 3 | 29/07/2019 |
| 4 | 10/08/2019 |
| 5 | 22/08/2019 |
| 6 | 03/09/2019 |
| 7 | 15/09/2019 |
| 8 | 27/09/2019 |
| 9 | 09/10/2019 |
| 10 | 21/10/2019 |

Tabla 3.2 Fechas de adquisición de imágenes que cubren la autopista Cuacnopalan-Oaxaca

| Número de imagen | Fecha |
|------------------|------------|
| 1 | 07/03/2018 |
| 2 | 19/03/2018 |
| 3 | 31/03/2018 |
| 4 | 12/04/2018 |
| 5 | 06/05/2018 |
| 6 | 18/05/2018 |
| 7 | 30/05/2018 |
| 8 | 11/06/2018 |
| 9 | 23/06/2018 |
| 10 | 05/07/2018 |
| 11 | 17/07/2018 |
| 12 | 29/07/2018 |

3.2 Procesamiento InSAR

Cada una de las imágenes SAR descritas en la tabla 3.1 y 3.2 se procesó en pares, por ejemplo, la primera con la segunda, la segunda con la tercera, tercera con la cuarta, y así sucesivamente. Las tablas 3.3 y 3.4 describen los pares formados para hacer interferogramas y las fechas que cubren, es necesario mencionar que los desplazamientos verticales resultantes de cada interferograma son producto del cambio del terreno desde la fecha inicial hasta la final y que la imagen maestra de cada par es la más antigua. Cada uno de estos pares se procesó con InSAR Diferencial utilizando el software SNAP y SNAPHU. El resultado final está establecido en desplazamiento vertical georeferenciado al elipsoide de revolución WGS84 (World Geodetic System 1984). Sin embargo, para disminuir los efectos atmosféricos y errores en el desenvolvimiento de la fase y tener un resultado más confiable, se debe utilizar varios interferogramas, sumar su desplazamiento y dividirlo entre el número de interferogramas. Al promediar los desplazamientos de varias fechas el patrón del desplazamiento se ve con mayor definición, pero se está asumiendo que el cambio tiene una tendencia lineal entre el primer y último par de imágenes [20].

Para automatizar el procesamiento de los dos casos de estudio se desarrollaron dos scripts en python para ejecutar las funciones del software SNAP. Al igual que los realizados para descargar las imágenes SAR, ambos scripts realizan el mismo procesamiento, pero sus parámetros de entrada varían.

Tabla 3.3 Interferograma Toluca-Zitácuaro

| Interferograma | Pares de imágenes | Fecha Inicial | Fecha Final |
|-----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|
| 1 | 1-2 | 05/07/2019 | 17/07/2019 |
| 2 | 2-3 | 17/07/2019 | 29/07/2019 |
| 3 | 3-4 | 29/07/2019 | 10/08/2019 |
| 4 | 4-5 | 10/08/2019 | 22/08/2019 |
| 5 | 5-6 | 22/08/2019 | 03/09/2019 |
| 6 | 6-7 | 03/09/2019 | 15/09/2019 |
| 7 | 7-8 | 15/09/2019 | 27/09/2019 |
| 8 | 8-9 | 27/09/2019 | 09/10/2019 |
| 9 | 9-10 | 09/10/2019 | 21/10/2019 |

Tabla 3.4 Interferogramas Cuacnopalan-Oaxaca

| Interferograma | Pares de imágenes | Fecha Inicial | Fecha Final |
|-----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------|
| 1 | 1-2 | 07/03/2018 | 19/03/2018 |
| 2 | 2-3 | 19/03/2018 | 31/03/2018 |
| 3 | 3-4 | 31/03/2018 | 12/04/2018 |
| 4 | 4-5 | 12/04/2018 | 06/05/2018 |
| 5 | 5-6 | 06/05/2018 | 18/05/2018 |
| 6 | 6-7 | 18/05/2018 | 30/05/2018 |
| 7 | 7-8 | 30/05/2018 | 11/06/2018 |
| 8 | 8-9 | 11/06/2018 | 23/06/2018 |
| 9 | 9-10 | 23/06/2018 | 05/07/2018 |
| 10 | 10-11 | 05/07/2018 | 17/07/2018 |
| 11 | 11-12 | 17/07/2018 | 29/07/2018 |

El primer script, descrito en la figura 3.3, maneja por llamadas al sistema la ejecución del software SNAP, dando órdenes al ejecutable GPT con sus correspondientes instrucciones, por otro lado, el segundo, expuesto en la figura 3.4, utiliza un archivo xml generado en SNAP con los comandos predefinidos y también emplea la dirección de los archivos de entrada a los comandos previamente establecidos.

Por otra parte, los pasos que se necesitaron para obtener cada interferograma se mencionan a continuación [20].

En el primer paso del proceso se selecciona el sub-swath (las imágenes están divididas en tres franjas o sub-swath, las cuales son denominadas como IW1, IW2 e IW3) y el número de burst (cada sub-swath es conformado por nueve bursts o sub-franjas) que cubren el área de estudio, en este caso se eligió el sub-swath IW2 y los bursts tres al siete.

Las imágenes utilizadas se co-registran, donde una imagen es seleccionada como la maestra y las demás como esclavas, de esta forma, cada objetivo en el terreno contribuyó al mismo píxel en ambas imágenes debido a que los píxeles de las imágenes esclavas son alineados con respecto a la imagen maestra. Para el caso práctico, la imagen del 5 de julio es considerada como la maestra, mientras que la esclava es la del 8 de agosto. Por último, se realizan correcciones en rango y azimut para las zonas de traslape entre los bursts previamente seleccionados.

```

print('\n\n')
print (nombre)
nombre.pop(nombre.index(master.replace('.zip', '_TS_08.dim')))
nombre.insert(0, master.replace('.zip', '_TS_08.dim'))
print(nombre)

geocod=''
for n in nombre:
    geocod=geocod+'s\s ' %(direorbit,n)

print(geocod)
geo=backgeocoding(master.replace('.zip', '_TS_08.dim'),geocod,diregeocod, '')
geo=applyESD(geo,direesd,diregeocod)
inter=createinrferogram(geo,direinter,direesd)
debu=topsardebust(inter,diredeb,direinter)
debu=topophaseremoval(debu,diretopo,diredeb )

fecha='Phase_ifg_srd_VV_'+valor1[1]+'_'+valor1[0]+'_'+i_ifg_VV_'+valor1[1]+'_'+valor1[0]+'
fecha1='coh_IW2_VV_'+valor1[1]+'_'+valor1[0]
valor1=[]
mlout=applyML(debu,direml,diretopo,fecha,fecha1)
gfout=goldestfilter(mlout,direg,direml)
SEout=snaphuE(gfout,direSE,direg)
SWout=snaphuW(gfout,direSE,direg)

```

Figura 3.3 Script llamadas al sistema

```

f1= open("inputfile1.txt","w+")
f2= open("inputfile2.txt","w+")
print(lugar)

nombre=os.scandir(lugar)
i=0
valor=''
for b in nombre:
    if b.is_file() and b.name.endswith('.zip'):
        valor1='product'+str(i+1)+'='+str(lugar)+'\\'+b.name+'\n'
        valor=valor+valor1
        print(i+1)
        print(valor)
        i=i+1
valor=valor+'outputFile=Resultadointer.dim'
valor2='product1=Resultadointer.dim'+'\n'+'outputFile1=Resultadogold.dim'+'\n'+'outputFile2='+s
f1.write(valor)
f2.write(valor2)
print('HELLOS')
print(valor)
f1.close()
f2.close()

os.system('gpt '+str(lugar)+'\\'+INTER.xml -e -p '+str(lugar)+'\\'+inputfile1.txt')
print('gpt '+str(lugar)+'\\'+INTER.xml -e -p '+str(lugar)+'\\'+inputfile1.txt')
os.system('gpt '+str(lugar)+'\\'+GOLD.xml -e -p '+str(lugar)+'\\'+inputfile2.txt')
print('gpt '+str(lugar)+'\\'+GOLD.xml -e -p '+str(lugar)+'\\'+inputfile2.txt')

```

Figura 3.4 Script con archivo xml

La interferometría se genera a través de la multiplicación cruzada de la imagen maestra con la conjugación compleja de las esclavas. La fase de ambas imágenes es restada para formar el interferograma (Franz, 2018) y de manera automática se remueve el efecto de la fase provocado por Tierra plana.

Para destacar la fase por deformación, se remueve la topografía empleando un MDE (Modelo Digital de Elevaciones), posteriormente, para reducir el ruido y mejorar la visualización de los indicadores de deformación, se aplica la opción multilooking, la cual realiza un promedio espacial de un número de píxeles vecinos para suprimir el ruido, afectando la resolución espacial. Por último, se aplica el filtro Goldstein Phase.

Este paso se efectúa para tener los cambios en valores de desplazamiento y no de fase. Con el propósito de proyectar los resultados en un sistema de coordenadas geográfico se geo-codifica el interferograma ya desenvuelto y para tener una mejor visualización de los resultados, se crea un archivo en la plataforma Google Earth con la finalidad de tener una mejor perspectiva de la zona a estudiar.

3.3 Procesamiento con SARPROZ

Con el software SARPROZ [21] se realizó procesamiento multi-temporal InSAR con todas las imágenes SAR presentadas en la tabla 3.1 y 3.2. La metodología con la que se procesaron fue PSI y QPSI mencionados en el subtema 2.3 para obtener tanto desplazamientos lineales como no lineales.

4. Resultados

Los resultados que se presentan en esta sección se dividen en las obtenidas por el software SNAP para cada caso de estudio y los arrojados por el software SARPROZ.

4.1 Toluca-Zitácuaro SNAP

Los resultados de los 9 interferogramas que cubren el km 50+800 de la carretera Toluca-Zitácuaro muestran una tendencia del desplazamiento vertical antes del derrumbe en el talud y una recuperación después del suceso. Previo a la tendencia negativa desde el tercer al séptimo interferograma de 12 centímetros, existió un desplazamiento creciente desde el primer hasta el tercer interferograma de 8 centímetros. La gráfica 4.1 define el comportamiento desde el 5 de Julio hasta el 21 de octubre del 2019 del área donde se presentó el derrumbe. Se puede suponer por falta de información, que en el interferograma 7 se derrumbó material, por lo que la acumulación de este arrojó un desplazamiento vertical positivo acumulado en el interferograma 3.

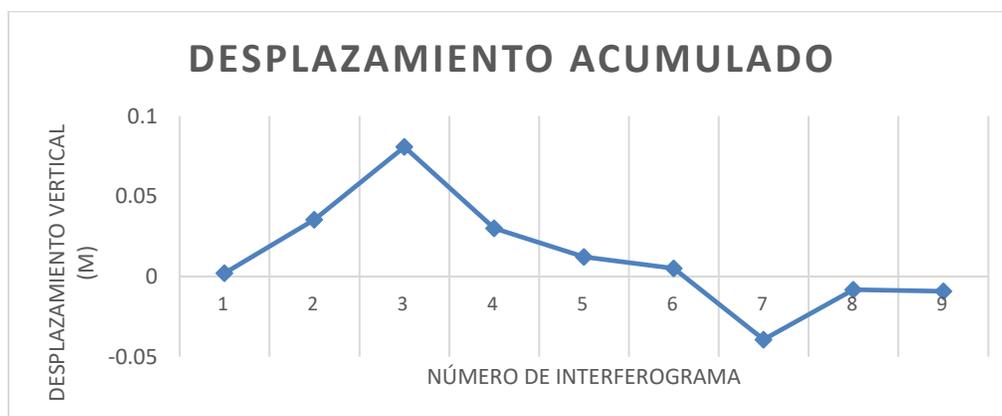


Figura 4.1 Desplazamiento acumulado Toluca-Zitácuaro

4.2 Cuacnopalan-Oaxaca SNAP

El área afectada en la autopista Cuacnopalan-Oaxaca alrededor del km 102+800, tiene un comportamiento definido con 11 interferogramas, los cuales cubren el desplazamiento vertical presentado desde el 7 de marzo del 2018 hasta el 17 de junio del 2018. El comportamiento en la zona de interés se muestra en la figura 4.2, donde claramente se define una tendencia negativa en el desplazamiento acumulado entre cada una de las fechas analizadas. El derrumbe ocurrió en el periodo cubierto por el interferograma número 8, en este punto se aprecia un

desplazamiento acumulado de aproximadamente 5 centímetros, posteriormente, en el interferograma número 9 el cambio es despreciable, pero a continuación se observa un cambio muy drástico en los interferogramas 10 y 11. Uno de los problemas de analizar este comportamiento, es que no se sabe que sucede después del derrumbe para corroborar el resultado arrojado por los interferogramas 9, 10 y 11.

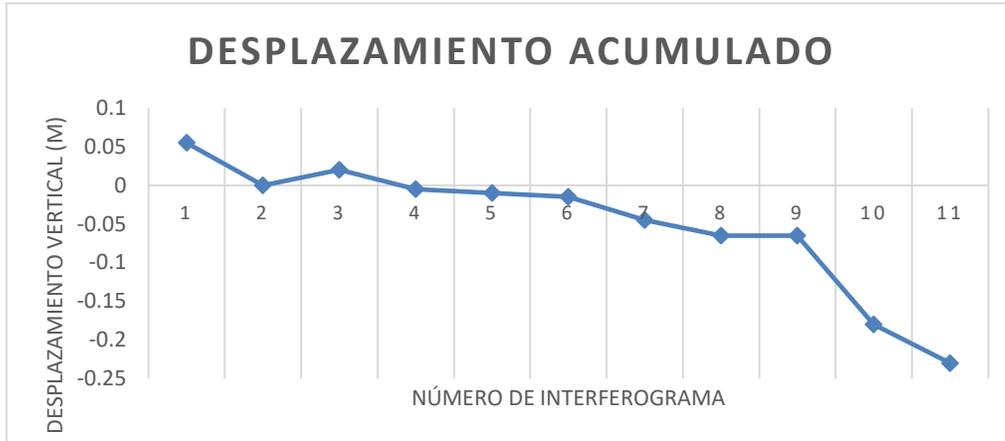


Figura 4.2 Desplazamiento acumulado Cuacnopalan-Oaxaca

4.3 SARPROZ

Utilizando el software SARPROZ se realizaron dos análisis considerando todas las imágenes de cada caso de estudio. La figura 4.3 muestra los puntos con información obtenidos en la zona de interés de la autopista Toluca-Zitácuaro y la figura 4.4 presenta la serie del tiempo de un punto cercano al área de interés, el desplazamiento que se observa está dentro del rango de 2 centímetros y tiene una tendencia de incremento.



Figura 4.3 Resultado SARPROZ de la autopista Toluca-Zitácuaro



Figura 4.4 Desplazamiento acumulado Toluca-Zitácuaro

La figura 4.5 muestra el mismo comportamiento que la figura 4.2 en el número de objetivos con información sobre el terreno, pero es el área de la autopista Cuacnopalan-Oaxaca. En el caso de la figura 4.6, no se aprecia ninguna tendencia que describa el desplazamiento previo al derrumbe.

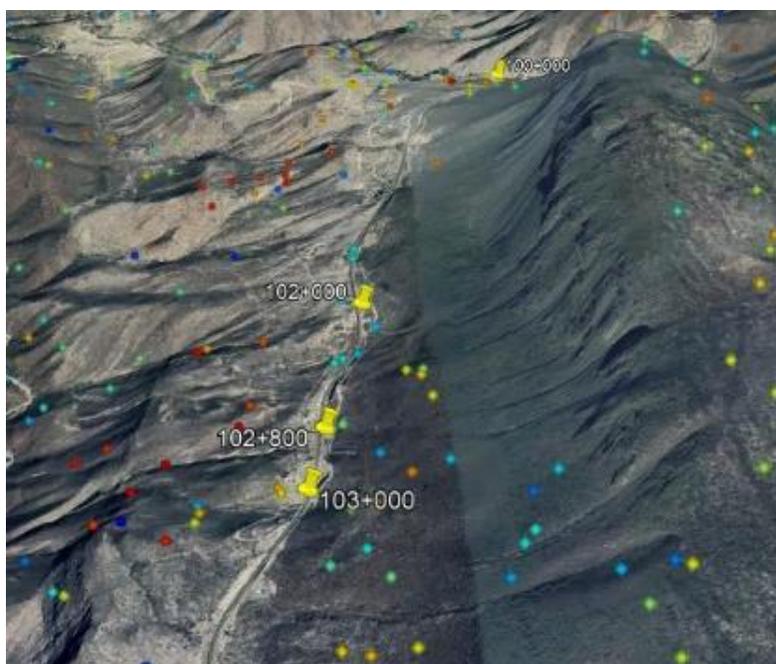


Figura 4.5 Puntos sobre el terreno con información de la autopista Cuacnopalan-Oaxaca

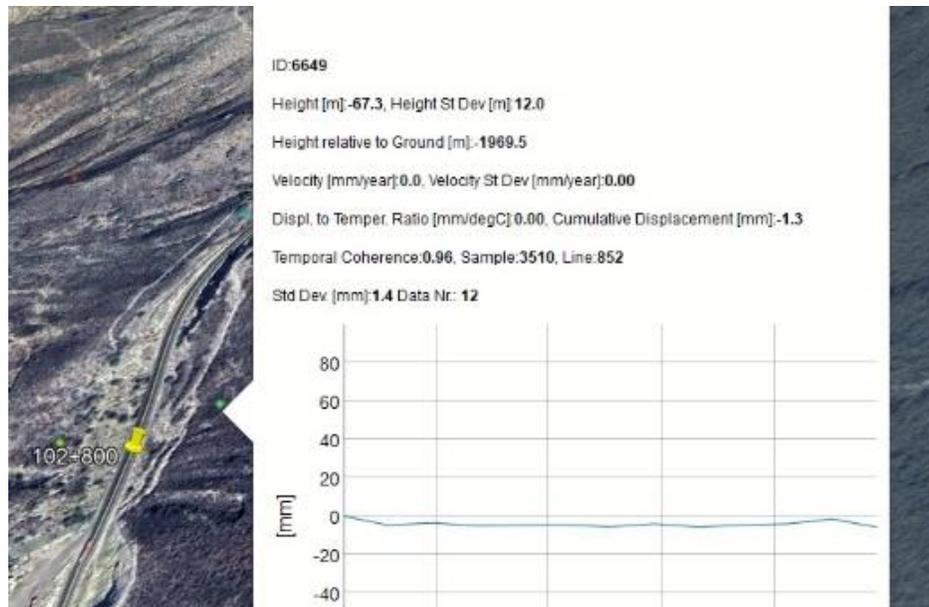


Figura 4.6 Desplazamiento acumulado Cuacnapalan-Oaxaca

En ambos casos se puede observar información por cada punto marcado en el archivo de formato Google Earth (KMZ), sin embargo, a pesar de que las series de tiempo dan una idea detallada del comportamiento del terreno, debido a los pocos puntos con información, no se puede definir una tendencia sobre toda la zona de interés. Para mejorar el análisis se propone implementar imágenes SAR con una mejor resolución.

5. Conclusiones

En ambos casos de estudio presentados en esta investigación, los resultados muestran una tendencia antes del derrumbe del talud; sin embargo, la información no es contundente para concluir que los desplazamientos resultarán en un derrumbe. Adicionalmente, la evaluación del comportamiento del terreno después de la catástrofe es difícil de analizar al no disponer de información sobre cómo se rehabilitó la zona afectada.

Se puede concluir que de acuerdo a la literatura científica y la industria privada de países con mayor experiencia en el análisis y procesamiento de imágenes satelitales, InSAR es una herramienta eficaz para estudiar la infraestructura carretera, sin embargo, para mejorar y validar los resultados de la investigación, se propone estudiar un talud de una carretera, del cual se tenga información de lo que sucede después del derrumbe, así como, cuando sea posible, complementar los datos de la zona con información de otros instrumentos de medición, investigar y analizar el uso de imágenes capturadas en ambas direcciones (antes y después del accidente), aplicar la metodología InSAR multitemporal, usar imágenes con una mejor resolución, emplear software comercial para comparar las capacidades y alcances con respecto al software de uso libre o desarrollar un software con las capacidades requeridas para el análisis de imágenes.

Para mejorar el procesamiento de imágenes, se propone realizar pruebas controladas en el laboratorio con la metodología PSI, utilizando una esquina reflejante artificial con el objetivo de determinar las capacidades de InSAR con imágenes libres y de costo, además de conocer su resolución y exactitud en el cálculo de desplazamientos verticales. De igual manera, dadas las limitaciones que tiene el software SARPROZ por la carencia de puntos con información, es necesario analizar la forma de generar puntos de información adicionales e incrementar la capacidad del procesamiento y análisis de la información con este software. Finalmente, contando con las capacidades ya mencionadas, es necesario establecer las condiciones adecuadas de monitoreo para detectar los movimientos con suficiente tiempo y certidumbre para actuar y evitar situaciones que pongan en riesgo la vida de las personas o comprometan de manera crítica la operación del sistema carretero

Bibliografía

[1] Juan Antonio Quintana Rodríguez, Francisco Javier Carrión Viramontes, Saúl Enrique Crespo Sánchez, Daniel Rodríguez Naranjo, Luis Álvaro Martínez Trujano, Héctor Miguel Gasca Zamora, Daniel Arceo Mariñelarena; Andrés Hernández Guzmán, Jorge Hernández Figueroa, "Estrategias de evaluación y análisis del monitoreo del puente Río Papaloapan", Publicación Técnica 441, Sanfandila, Qro., 2015.

[2] Luis Álvaro Martínez Trujano, Juan Antonio Quintana Rodríguez, Benjamín Arroyo Ramírez, Francisco Javier Carrión Viramontes, Saúl Enrique Crespo Sánchez, Jorge Alberto Hernández Figueroa, Víctor Manuel Bonilla Ureña, Héctor Miguel Gasca Zamora, Guzmán Andrés Hernández, "Sistema inteligente y protocolos de actuación para monitoreo remoto de puentes", Publicación Técnica 464, Sanfandila, Qro., 2016

[3] Juan Antonio Quintana Rodríguez, Francisco Javier Carrión Viramontes, Saúl Enrique Crespo Sánchez, Víctor Manuel Bonilla Ureña, Paul Garnica Anguas, José Alfonso Perez Salazar, "SHM and evaluation of a continuous reinforced concrete pavement", *Journal of Civil Structural Health Monitoring* (2016) 6:681–689.

[4] Ferretti, A. (2014). Satellite InSAR data: reservoir monitoring from space. EAGE publications.

[5] Flores-Anderson, A. I., Herndon, K. E., Thapa, R. B., & Cherrington, E. (2019). *The SAR Handbook: Comprehensive Methodologies for Forest Monitoring and Biomass Estimation*.

[6] Agencia Espacial Europea,
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1>

[7] Woodhouse, I. H. (2017). *Introduction to microwave remote sensing*. CRC press.

[8] Alaska Satellite Facility, <https://radar.community.uaf.edu/files/2017/03>

[9] 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, 1121-1126.

[10] 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.

- [11] 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.
- [12] Lazecky, M., Perissin, D., Bakon, M., de Sousa, J. M., Hlavacova, I., & Real, N. (2015, March). Potential of satellite InSAR techniques for monitoring of bridge deformations. In 2015 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE) (pp. 1-4). IEEE.
- [13] 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, 248-258.
- [14] 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, 166-180.
- [15] 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* (pp. 639-648). ICE Publishing.
- [16] Milillo, P., Giardina, 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.
- [17] Sousa, J. 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.
- [18] Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1-13.
- [19] Perissin, D. (2016). Interferometric SAR multitemporal processing: Techniques and applications. In *Multitemporal Remote Sensing* (pp. 145-176). Springer, Cham.
- [20] Luis Veci. (2020). TOPS Interferometry Tutorial. <http://step.esa.int>
- [21] Perissin, D. (2014). SARPROZ software. Official Product Web Page: www.sarproz.com.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

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