



**GENERACIÓN DE MAPAS DE INTERFEROMETRÍA PARA LA
DETERMINACION DE DEFORMACIÓN DE BLOQUES COSTEROS EN
ANTOFAGASTA**

LINA JOHANA RIVERA CASTRO

Universidad Militar Nueva Granada

Especialización en Geomántica

Bogotá, Colombia

2017

GENERACIÓN DE MAPAS DE INTERFEROMETRÍA PARA LA DETERMINACION DE DEFORMACIÓN DE BLOQUES COSTEROS EN ANTOFAGASTA

Lina Johanna Rivera Castro

Ing. Topográfico, Apoyo técnico de la dirección técnica y geográfica, Acueducto y alcantarillado de Bogotá, Bogotá, Colombia, ljriverac134@gmail.com

RESUMEN

La ciudad de Antofagasta, como otras ciudades de las regiones costeras Chilenas, se ha visto afectada por la ocurrencia de diferentes movimientos sísmicos a lo largo de los últimos años, causando con esto diferentes desplazamientos en sus bloques costeros. Por lo tanto, soportado con nuevas tecnologías y metodologías de adquisición remota de información, se han desarrollado diferentes proyectos de investigación en los cuales el uso de imágenes de RADAR permiten la generación de interferogramas que registran los desplazamientos producidos por los sismos de mayor magnitud luego de elaborar un análisis multitemporal. Dicho esto, el presente proyecto contempla la descripción, análisis y presentación de resultados para un proyecto que relacione la implementación de esta tecnología y sus respectivas metodologías.

Palabras clave: Sismo, Radar, Imágenes de Radar, Interferometria, SAR e InSAR

ABSTRACT

The Antofagasta city, like other cities of the Chilean coastal regions, has been affected by the occurrence of various earthquakes over the years, causing this different offsets in their coastal blocks. Therefore, compatible with new technologies and methodologies for remote data acquisition, have developed different research projects in which the use of images of RADAR allow generation of interferograms that record the displacements produced by earthquakes of greater magnitude after develop a multi-temporal analysis. That said this project includes the description, analysis and presentation of results for a project that relates the implementation of this technology and their respective methodologies.

Keywords: Seismic, Radar, Radar Images, Interferometry, SAR and InSAR

INTRODUCCIÓN

Debido a que la zona costera de Chile, específicamente la ciudad de Antofagasta, ha sido propensa a la ocurrencia de diferentes sismos en los últimos 50 años, se vio la necesidad de estudiar y determinar la deformación y el desplazamiento de los bloques costeros de dicha ciudad, identificando el grado de afectación de los sismos a partir del análisis de desplazamiento que tienen estos, mediante la utilización de Imágenes de RADAR.

Este documento presenta la metodología implementada en el caso específico del proyecto de medición de los desplazamientos de los bloques costeros en la zona de Antofagasta por medio de interferometría de Radar. El proyecto de investigación es desarrollado por la Facultad de Ingeniería civil y Geomática de la Universidad de Antofagasta Chile, quienes con su experiencia han analizado una serie de elementos para realizar una caracterización de variables que permiten cuantificar de manera cuantitativa y cualitativa las consecuencias luego de un evento sísmico.

En síntesis se desprende una descripción conceptual de análisis y presentación de resultados bajo el desarrollo metodológico en un escenario real, trabajando con imágenes de radar de los años 1995 y 1998 de la zona estudiada, finalizando con recomendaciones específicas para aplicar esta tecnología en Colombia

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes y registros históricos de los diferentes movimientos sísmicos ocurridos en la zona de estudio.

1.1.1 Sismicidad en Chile

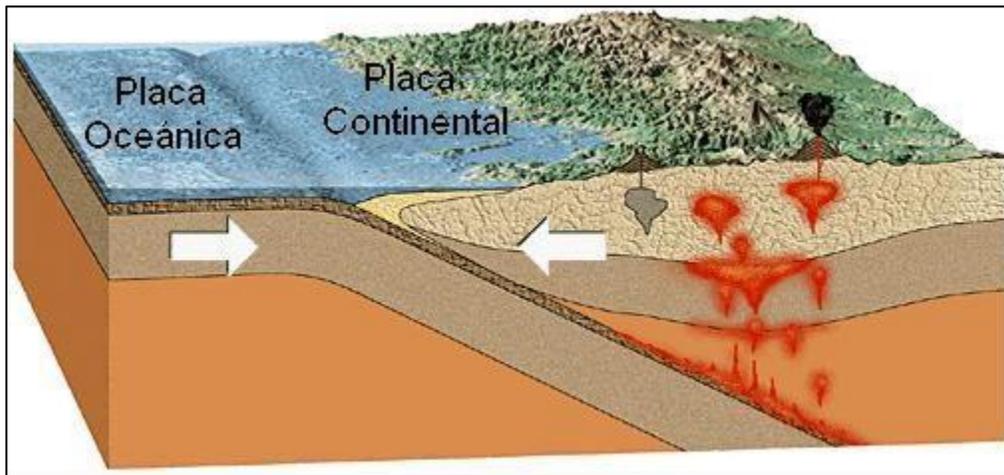
Los terremotos o sismos son provocados por el constante movimiento de las placas tectónicas existentes, en donde el desplazamiento de estas no es unidireccional; sino por el contrario siempre presenta constantes choques, fricción y deformaciones que acumulan esfuerzos. Cuando la capacidad elástica de las rocas es superada por la energía generada se producen rompimientos de manera violenta, provocando ondas sísmicas que se propagan en el interior de la tierra y son percibidas como vibraciones, esto es denominado sismo o terremoto.

Chile se encuentra asociado directamente a las placas mayores: Pacífica y Sudamericana, en donde se encuentra la placa menor de Nazca, la cual se desplaza a una velocidad relativa de aproximadamente 9 cm por año, con respecto a la placa mayor Sudamericana; esta se introduce en la parte de abajo por la placa de Nazca en un plano inclinado.

A continuación se muestra en la Figura 1 el esquema que representa el choque entre la placa de Nazca con la placa Sudamericana.

Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

Figura 1: Encuentro entre placa de Nazca (oceánica) y Sudamericana (Continental).
Fuente: Adaptación de (Portal de los siete mares, Mar de Chile .2001)



Inmediatamente antes de la ruptura sólo una pequeña área, resiste el movimiento de las placas. Cuando el acoplamiento en la última zona de resistencia es sobrepasado, el esfuerzo acumulado es liberado bruscamente, enviando ondas de choque a través de la tierra. La ruptura comienza en el hipocentro¹ del terremoto, luego se propaga a lo largo de una zona, la cual depende de la intensidad del evento.

Debido a que la zona de contacto entre las placas está sometida a grandes presiones a causa del movimiento convergente, ambas placas están mutuamente acopladas y previo a la ruptura se deforman elásticamente a lo largo de su interface común.

Según el Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile, debido a la posición con respecto a las placas tectónicas que se encuentra Chile, las cuales en el borde convergen y generan zonas de subducción (placa de Nazca y Antártica); mientras que la placa de Scotia se desliza horizontalmente respecto a la placa Sudamericana; en un borde de placas transcurrente. Por lo tanto Chile es propenso a la ocurrencia constante de sismos con grados de magnitud diferentes que dependen de la región, de las condiciones de la superficie terrestre o de la cercanía que tiene la zona como tal a la parte costera del país.

A partir de la implementación de tecnologías entre las cuales se encuentra el uso de imágenes de radar, a partir de un análisis interferométrico. Siendo este una

¹ Es el punto interior de la Tierra donde se inicia un movimiento sísmico o terremoto.

Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

herramienta que permite el estudio multi-temporal de los desplazamientos producidos luego de un evento sísmico se obtuvieron los registros de los últimos sismos y terremotos que han afectado la zona norte del país como se muestra en la Tabla 1

Tabla 1: Registro Sismológico Zona Norte de Chile.
Fuente: Elaboración Propia. 2015

REGISTROS SISMOLOGICOS EN EL NORTE DE CHILE			
LUGAR	TIPO	FECHA	MAGNITUD (Grados en escala de Richter)
Iquique	Terremoto	9 de Mayo de 1877	8.5
Iquique	Terremoto	08 de Agosto de 1987	7.3
Antofagasta	Terremoto/ Maremoto	30 de Julio de 1995	7.3
Zona Norte	Terremoto	01 de Abril del 2014	8.2

1.2 Introducción a las imágenes de RADAR

El sistema de RADAR², es un conjunto de elementos físicos y electrónicos mediante los cuales es posible identificar objetos ubicados distantes al sensor³. El sistema de RADAR es considerado un sistema "activo" y trabaja determinando la distancia a la que se encuentra el sensor al objeto identificado, proyectando ondas de radio; las cuales son reflejadas por el objeto y que al ser recibidas nuevamente por la antena del sensor (RADAR), se calcula la distancia a la que se encuentra el objeto al sensor, por medio del tiempo que tardó la señal en retornar. (GeoForschungsZentrumPotsdam & Germany, 2005)

Las imágenes de Radar controlan su propia fuente de iluminación, lo cual le permite a este sistema capturar las imágenes a cualquier hora; puesto que la longitud de onda empleada en cada región se hace factible al estudio de la superficie en diferentes condiciones atmosféricas, sin afectar la precisión y calidad de la información que tome la imagen. Esta característica, es lo que hace tan novedosa la tecnología de sistemas

² Del acrónimo inglés *radio detection and ranging*, "detección y medición de distancias por radio".

³ Es el satélite con el cual se captura la información de terreno desde un punto específico del espacio

Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

de RADAR, puesto que a diferencia de otros sensores ópticos, el Radar es independiente a la iluminación solar, penetra nubes, hasta cierta medida alcanza a penetrar algunos centímetros de superficies como suelo, vegetación, nieve; entre otras, las cuales depende de la frecuencia a la que operé cada sensor. Sin embargo para el análisis de estas imágenes debe considerarse la complejidad en el procesamiento de la información.

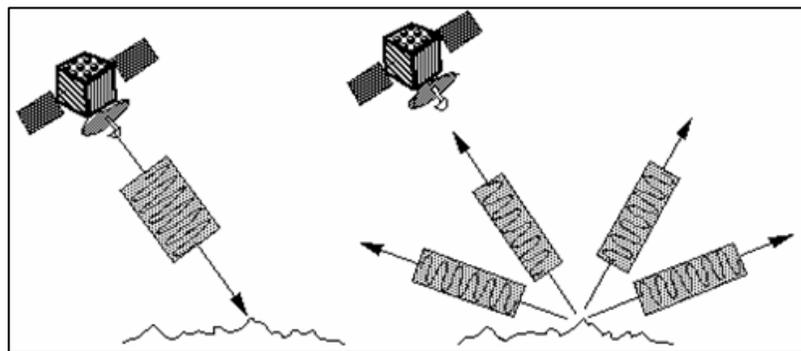
A continuación se muestra una revisión bibliográfica y técnica como fundamento y apoyo teórico en el desarrollo de este trabajo, el cual comprende una introducción a imágenes de Radar y a los principios básicos de interferometría.

1.3 Conceptos básicos de Interferometría

1.3.1 Synthetic Aperture Radar (SAR)

Son sistemas de radares coherentes que generan imágenes de alta resolución, es un sistema activo donde existe una antena en una plataforma satelital que recibe y transmite señales cuando se mueve a lo largo de un vuelo u orbita. El procesamiento de la señal usa las magnitudes y fases de la señal recibida sobre sucesivos pulsos para crear una imagen. La Figura 2 muestra la forma en que el sensor captura la información de la superficie terrestre

Figura 2: RADAR.
Fuente: (Ketelaar, 2009)

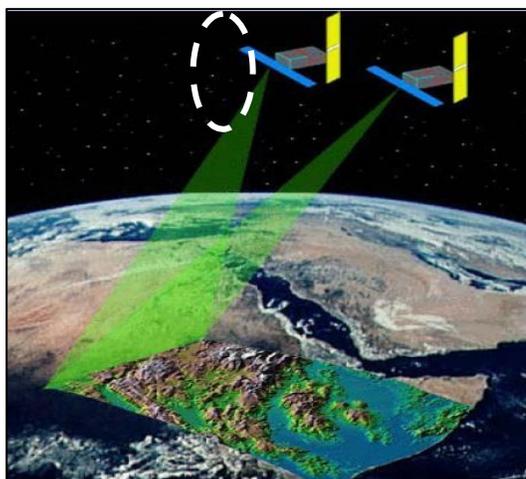


El sistema SAR genera una imagen de radar, escaneando la superficie de la tierra desde una plataforma espacial, usando una antena de radar anexa.

1.4 Interferometría de Radar de Síntesis de Apertura “SAR Interferometry InSAR”

Esta técnica, es un método usado en teledetección, el cual usa dos o más imágenes SAR (Síntesis de Apertura de Radar), las cuales permiten generar nuevas imágenes de deformación de superficie y modelos digitales de elevación (A. Martínez,2005). Para que esta técnica funcione requiere de por lo menos la toma de dos imágenes de radar las cuales registren exactamente la misma área en puntos temporales diferentes. Dichas imágenes deben ser tomadas con un único satélite o usando dos que van uno tras otro; como lo indica la Figura 3, circulando por la misma órbita para que así la información pueda ser comparada y detectar cualquier cambio presentado durante ese periodo de tiempo en particular.

Figura 3: Satélites SAR, captura de imágenes.
Fuente: (A. Martínez,2010)



Por lo tanto para producir modelos digitales de elevación se requiere de imágenes generadas al mismo tiempo, mientras que para interpretar y medir cambios en la zona de estudio se hace necesario que las imágenes sean tomadas en tiempos diferentes, pero con las características geométricas iguales.

En el primer caso, para terrenos que no presentan cambios; es decir Interferometría de una sola observación, la precisión y coherencia de la información puede verse afectada por:

- El contenido de speckle⁴.

⁴ Consiste en el análisis de patrones de intensidad producidos por la interferencia mutua entre frentes de onda coherentes que son sujetos a diferencias de fase o fluctuaciones de intensidad

Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

- La topografía del terreno tal como pendientes pronunciadas, zonas de sombra y cuerpos de reflexión especular donde la señal retrodispersada es pequeña.
- Movimientos de objetos del terreno, tales como flujos de agua (ríos, avenidas), desplazamiento de hielo y cambio en la vegetación.
- Errores en la trayectoria de la plataforma radar.
- Ambigüedad en el desarrollo de la fase.
- Registro incorrecto del par interferométrico.

2. DATOS Y METODOS

En este capítulo se planteó una metodología de trabajo de acuerdo a las necesidades del proyecto de investigación, en donde se garantizó la validez y consistencia de los resultados del proyecto. A continuación se registra la metodología utilizada en el proyecto de investigación, la cual se desarrolló por medio de 3 fases fundamentales:

2.1. Fase I: Recolección de información e identificación de imágenes a utilizar.

Para el inicio de la investigación se recolectó diferentes registros históricos referentes a los movimientos sísmicos ocurridos a lo largo de los últimos 400 años en la zona norte de Chile (Antofagasta). Sin embargo, se hace énfasis en los sismos más considerables en esta zona ocurridos en el año de 1995 y 1998.

Debido a que en este proyecto se realiza el estudio, en esta zona se obtuvo dos imágenes de RADAR de periodos diferentes para medir el desplazamiento ocurrido.

Las Figuras 4 y 5 muestran las imágenes capturadas por los satélites ERS-1 y ERS-2, 9,5 horas después del terremoto ocurrido el 30 de julio de 1995 y después del terremoto del 30 de Enero de 1998 en la zona Norte de Chile respectivamente

Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

Figura 4: Zona norte de Chile, después de terremoto del 30 de julio de 1995.
Fuente: Universidad de Antofagasta, Ingeniería Civil en Geomática

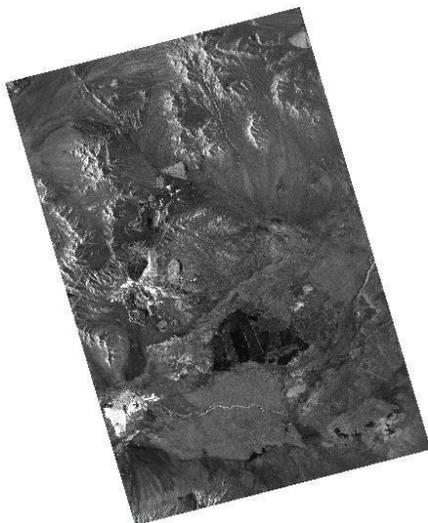
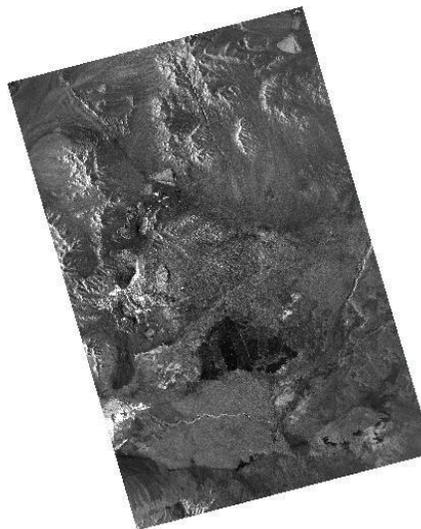


Figura 5: Zona norte de Chile, después de terremoto del 30 de Enero de 1998.
Fuente: Universidad DE Antofagasta, Ingeniería Civil en Geomática



2.2. Fase II: Procesamiento

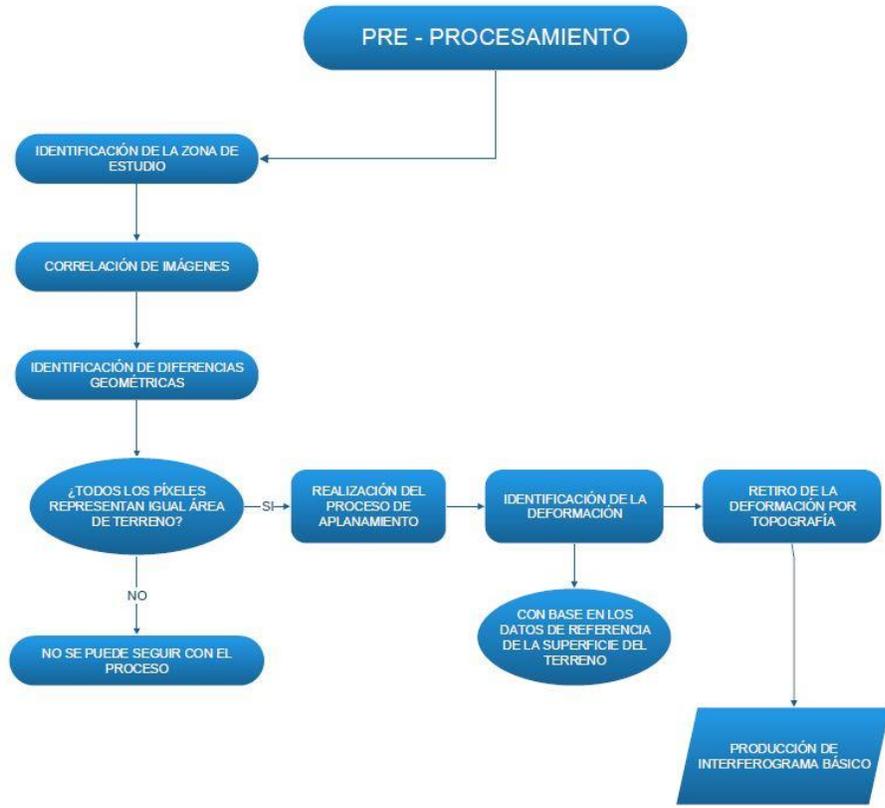
Esta fase se tiene en cuenta los procesos a los que son sometidos las imágenes de radar. Dichos procesos se sintetizan en:

1. Pre-procesamiento de datos crudos por parte de las agencias espaciales respectivas, en este caso la información fue suministrada por Pitchard.
2. Procesamiento de la información obtenida, esta fue procesada en el software (ROI_PAC)⁵.
3. Análisis de los datos obtenidos en la fase relativa en radianes, determinando el desplazamiento del terreno de la zona, en una serie de tiempo específica.

Este proceso se modeló por medio de un diagrama dividido en dos partes, que dependiendo de las condiciones y características específicas en las que se encuentren las imágenes, se realiza un procedimiento u otro.

⁵ Paquete de software de código abierto para el procesamiento de datos de diversos satélites de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR),

Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta



Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

2.3. Fase III: Programación en software Matlab

Se desarrolló un código de programación matemática que obtiene como resultado final los respectivos interferogramas. Se realizó para la obtención de un par de interferogramas, entendiendo que este proyecto genere una metodología que muestre los procesos correspondientes al realizar mediciones con InSAR.

De los archivos obtenidos del software ENVI, se generó un código programado que permitió visualizar las imágenes con los interferogramas respectivos. En el desarrollo de este proyecto se empleó el software Matlab, generando el código de referencia. Por medio de este código se realizaron diversos procesos para finalmente obtener los interferogramas preliminares y el final, el cual brinda la información de desplazamiento vertical y horizontal.

En la Figura 6 se representa de forma gráfica la matriz con los datos capturados, en la mitad superior se encuentra la información de la magnitud, mientras que en la inferior la fase. Los ejes representan los números de fila y columna del matiz, en otras palabras en esta ubicación se encuentra el desplazamiento.

La Figura 7 representa la fase de los datos con el arreglo matricial aplicado en todo el proceso. Se puede evidenciar que la magnitud es excluida porque los datos requeridos están representados solo en la fase. En donde la escala de colores indica el grado de desplazamiento del terreno; mas no la posición X y Y del mapa. Los colores que se encuentran entre rojo y amarillo indican el desplazamiento vertical del terreno. Mientras que los colores azules registran el desplazamiento horizontal.

Figura 6: Interferograma matricial.
Fuente: Elaboración propia, 2016

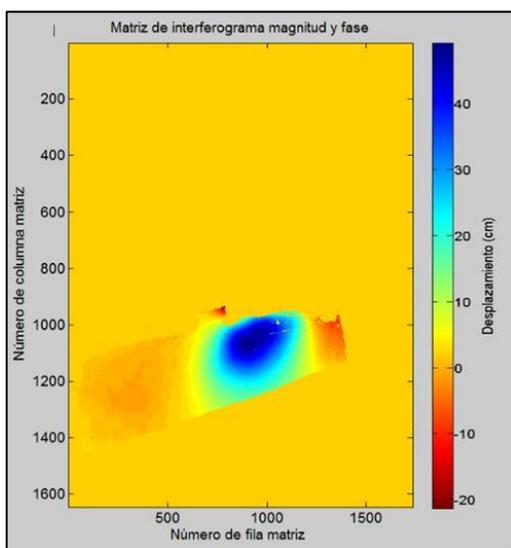
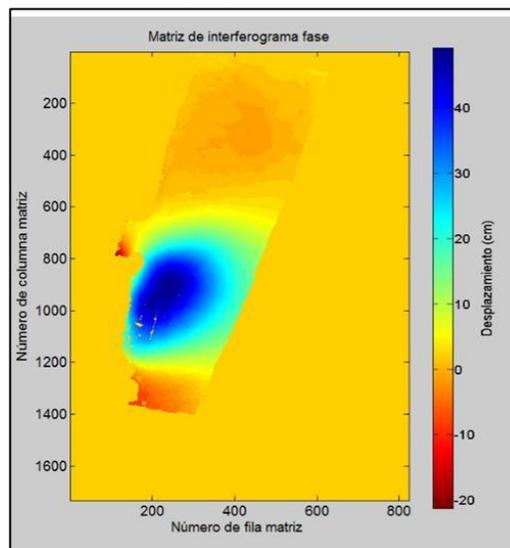


Figura 7: Interferograma reflejado. Fuente: Elaboración propia, 2016



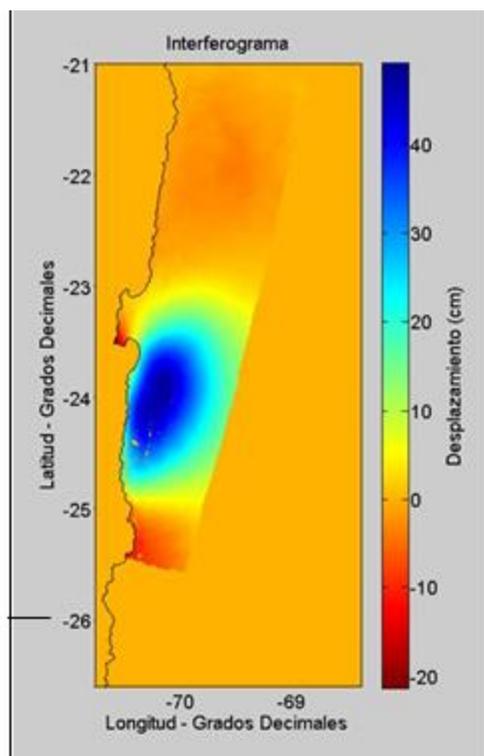
Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

Luego de excluir la magnitud y generar el interferograma con datos de la fase, es necesario realizar un reflejo de la imagen verticalmente; esto permite que la imagen se adapte a la forma de terreno real. Seguido de esto se utilizó el comando `Botton`, el cual asigna coordenadas reales a la zona, definiendo una malla final para generar una matriz con el interferograma y con las respectivas coordenadas empleadas. Esta malla se inicia en latitud y longitud de referencia.

Culminando el proceso se realiza un arreglo para asignar el tamaño de la letra, colores, límites del interferograma con valores de coordenadas. Se adjunta el límite creado en la primera etapa del código y el título.

Por último se repite el mismo proceso con otro archivo generado por ENVI, dando como resultado el interferograma final con el límite de la zona y coordenadas geográficas en grados decimales; La escala de color simboliza el desplazamiento ocurrido en la zona norte de Chile, específicamente en la ciudad de Antofagasta. Véase en las Figura 8. La gama de colores azules representa el desplazamiento vertical positivo en centímetros del proceso realizado y la gama de colores entre rojos y amarillos indica el desplazamiento vertical negativo (movimiento de subducción⁶).

Figura 8: Interferograma Resultante.
Fuente: Elaboración Propia, 2016



3. RESULTADOS

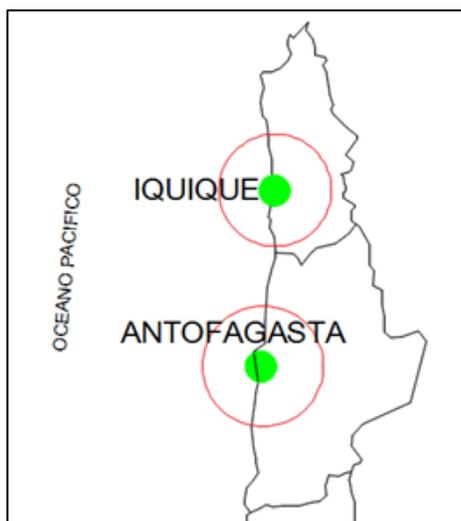
3.1. Determinación de parámetros para la ubicación de puntos geodésicos

De acuerdo con Pitchard, los parámetros que deben ser tenidos en cuenta para la ubicación de los puntos geodésicos están relacionados con que estructuralmente estos puntos abarquen un radio de por lo menos 100 km, para así lograr dar respuesta a las investigaciones que requieran el uso de esta red geodésica.

Sin embargo alrededor de Chile se encuentra la red geodésica básica, distribuida estratégicamente alrededor del país, la cual cuenta con 500 puntos debidamente monumentados en terreno. Estos puntos cuentan con 15 estaciones GPS de monitoreo continuo, adecuados para la recolección de datos en forma permanente durante 24 horas. La red se empezó a conformar desde el año 2001, aun así debido a los fines investigativos que abarca este proyecto se planea la ubicación en la zona norte de otros 10 nuevos puntos geodésicos distribuidos en la zonas costeras de Antofagasta e Iquique.

La Figura 9 localiza las ciudades en donde se proyecta ubicar los puntos geodésicos, es decir que para un óptimo cubrimiento del terreno es necesario monumentar por lo menos 10 puntos geodésicos a lo largo de las dos ciudades.

Figura 9: Distribución Geográfica de puntos geodésicos para el proyecto de investigación.
Fuente: Adaptación Centro Sismológico Nacional, Universidad de Chile, 2011.



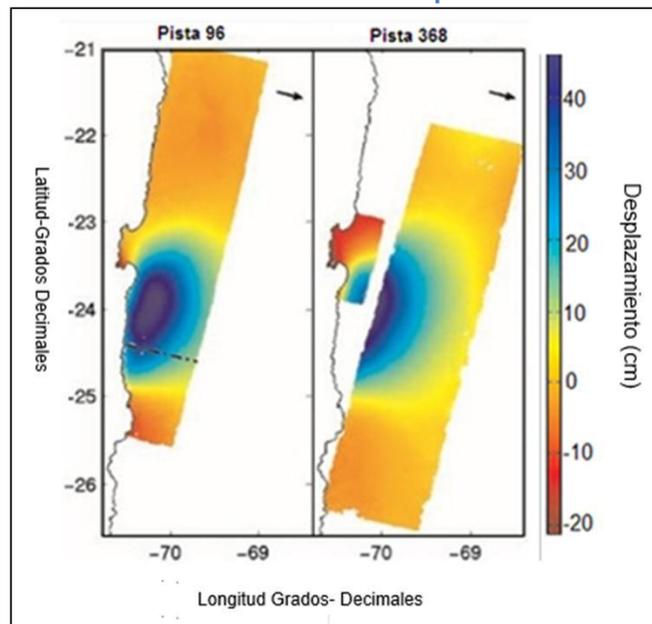
Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

3.2. Generación de modelo interferométrico

De acuerdo con la información obtenida, mediante el análisis de las imágenes de radar de los periodos de estudio y una vez realizados los procesos correspondientes para el despliegue de los interferogramas se utilizaron métodos para comparar los datos obtenidos empleando técnicas de interferograma, teniendo en cuenta los siete sismos que han ocurrido en la ciudad de Antofagasta Chile. Estudios realizados en esta área de la ciudad han demostrado que los métodos geodésicos convencionales, no son capaces de caracterizar completamente la deformación de la superficie.

En la Figura 10 la escala de color visualizada en las imágenes se refiere al cambio de dirección en centímetros e indican como varia la topografía a lo largo de la escena. Las flechas negras muestran la dirección del vector LOS desde el suelo hasta el satélite que proyecta la superficie. Los colores representan tanto el desplazamiento vertical como horizontal ocurrido en la zona, en donde los colores entre rojos y amarillos indican desplazamiento vertical, mientras que los colores azules muestran el comportamiento del terreno en sentido horizontal. El desplazamiento máximo observado LOS es de 50 cm de distancia, de forma vertical.

Figura 10: Combinación de Interferogramas.
Fuente Elaboración Propia. 2016.



Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

3.3. Aplicabilidad en Colombia:

La implementación de este tipo de metodologías en territorio colombiano, y al mismo tiempo, la determinación de su eficiencia, partiendo de que Chile es un país que se encuentra altamente desarrollado tanto en tecnología como en investigación en lo referente a la medición y afectación de los movimientos sísmicos. Es posible decir que el uso de estas metodologías y tecnologías pueden serle de gran utilidad a Colombia para medir desplazamientos en zonas propensas a movimientos sísmicos o derrumbes.

Como ejemplo específico se puede emplear el uso de esta tecnología para controlar el posible fenómeno de subducción que actualmente presenta Bogotá. Este fenómeno es definido por el U.S. Geological Survey como al hundimiento del terreno debido a cambios que ocurren en profundidad, principalmente a la extracción de fluidos de fuentes subterráneas, a la disolución de rocas como calizas y dolomitas debido al flujo de acuíferos, al colapso de minas subterráneas, al drenaje de suelos orgánicos, y al humedecimiento de suelos secos. Gracias a la formación geológica de Bogotá y a que sus suelos están compuestos considerablemente por material arcilloso, se establece que esta ciudad es bastante susceptible a que se presente dicho fenómeno de subducción. Por lo que es posible el hundimiento progresivo del terreno, viéndose expuesto a condiciones particulares, afectando la estabilidad de la ciudad, generando situaciones de riesgo para la comunidad en sí.

La subsidencia es un fenómeno que abarca grandes áreas de terreno, aun así las zonas que se ven en su mayoría afectadas son las zonas urbanas. Gracias a movimientos fuertes, las infraestructuras pueden verse perjudicadas en menores extensiones de terreno. En Bogotá este fenómeno ha sido estudiado desde los años 90, siendo INGEOMINAS, una de las entidades que presentó mayores avances frente a este estudio.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES:

En los últimos 50 años la adquisición de información y de imágenes apoyados en el uso de sensores remotos, ha significado un gran avance en el desarrollo de proyectos de investigación orientados hacia el análisis de variables cuantitativas y cualitativas. La caracterización de estas variables ha permitido la consecución de proyectos en varias ramas del conocimiento y de la ingeniería.

Se empleó un par de imágenes de radar de los años 1995 y 1998 de la zona norte de Chile, sin embargo se evidencia que el número de imágenes empleadas no fueron suficientes, pese a que dos imágenes es un número pequeño para obtener resultados de deformación temporal con un alto grado de precisión; para esto se hubiese

Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

requerido franjas de imágenes de mínimo 6 de estas en cada zona, en periodos de tiempos distintos. Además, los periodos de estudio no fueron los deseados desde el inicio de la investigación debido a que no se registra información actualizada.

Las imágenes fueron sometidas a una serie de tratamientos y filtros, los cuales permitieron mejorar la calidad de estas para los procesamientos posteriores. Estos tratamientos fueron el mejoramiento de los componentes de topografía, ruido y las variables atmosféricas. Variables que interfieren con la calidad de las imágenes e imposibilitan obtener resultados con precisión, de no realizarse este proceso es imposible la obtención de los interferogramas finales.

Al analizar el resultado del desplazamiento presentado en los bloques costeros de la zona norte de Chile en los periodos de estudio (1995 y 1998), se evidenció una deformación 50 cm. Concluyendo que esta zona tiene movimientos tectónicos influyentes en las placas contenidas en Antofagasta, se evidencia que en periodos futuros puede presentarse una falla en una de las placas debido a que el espacio entre ellas no es suficiente para que se siga presentando el movimiento de subducción, por el contrario estas dos placas están en constante choque, en donde la energía que debe ser liberada está acumulada. Por lo anterior se espera que haya un gran terremoto en el momento de que alguna de las dos placas ceda, dejando que la otra libere toda su energía.

Por otro lado es importante resaltar que la adquisición de las imágenes de radar presenta un costo muy elevado, por esta razón los periodos empleados en este trabajo no son actuales. Para fines académicos fue posible adquirir las imágenes de 1995 y 1998, con el fin de desarrollar una metodología de trabajo que pueda ser empleada en investigaciones futuras de interferometría de radar.

La geodesia convencional representa menores costos en procesos de adquisición de información, sin embargo para desarrollar este tipo de estudios se ha convertido en un problema, puesto que este método requiere establecer puntos de control en lugares cercanos donde se halla presentado el evento sísmico. Por otro lado, partiendo de estudios similares realizados en Alemania este método difiere en precisión en un rango de 3 cm aproximadamente con respecto a los métodos planteados en este proyecto, por lo cual se sigue recomendando para el monitoreo de desplazamientos y deformaciones de terreno realizarlos por medio de tecnología InSAR. Teniendo en cuenta que es necesario implantar una red geodésica completa que permita comparar los datos de campo, con respecto a los resultados obtenidos haciendo uso de interferometría de radar.

El uso de esta tecnología en territorio colombiano es bastante conveniente, puesto que en varias ciudades del país se presentan fenómenos de subsidencia, por lo tanto, se

Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de Bloques costeros en Antofagasta

reconoce que esta técnica tiene un alto potencial para un uso futuro en el país. En aplicaciones relacionadas con el movimiento de tierras, control de expansión urbanística, determinación de densidades de vegetación, entre otras. Es necesario que Colombia continúe con la implementación de tecnología InSAR y al mismo tiempo invierta en el desarrollo de investigaciones que permitan mejorar las técnicas de medición y análisis

Bibliografía

- (2009)., R. J. (2009). *Remote Sensing with Imaging Radar. The Australian National University. Canberra Australia, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. .*
- A. Martinez, V. M. (s.f.). Analisis de Imagenes SAR y su aplicacion a estudios Oceanograficos. *Instituto de Ciencias del Mar.*
- A., R. J. (2009). *Remote Sensing with Imaging Radar. . The Australian National University. Canberra Australia, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. .*
- Avalo, Gabriel Alvarez. (2012). *Red base para la determinacion de Bloques Costeros en Antofagasta, utilizando geodesia satelital y validacion de analisis a traves, de la generacion de mapas de interferometria imagenes de RADAR . ANTOFAGASTA.*
- Berardino Paolo, F. G. (2002). *A new Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Smal Baseline Differential SAR Interferograms . IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.*
- Carlo, C. (2006).
- Centro de Sismologia, U. D. (2008). *Intensidad y Magnitud de los Sismos.*
- Centro Sismologico Nacional, Universidad de Chile. (s.f.). *Sismicidad y Terremotos en Chile.*
- Chavez, J. L. (2011). *Introduccion a la percepcion Remota.*
- Colesanti, C., & Wasowski, J. (2006). Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering geology, 88(3), 173-199.*
- F., H. R. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Delft University of Technology, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers. .*
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonet, D. (2007). *InSAR Principles-Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation (Vol. 19).*
- Fire, A. (2009). *Terremotos y Otros desastres Naturales.*

Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de bloques costeros en Antofagasta

- Gabriel A. K., G. R. (1989). *Mapping small elevation changes over large areas: Differential interferometry*.
- GeoForschungsZentrumPotsdam, T. A.-I., & Germany. (2005). Bam earthquake: Surface deformation measurement using radar interferometry . *Acta Sismologica*.
- Huurneman, G. C. (2000). *Principles of remote sensing*. L. L. Janssen (Ed.). . ITC, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences.
- Janusz, W. (2006). *Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry*. Engineering Geology.
- Ketelaar, G. (2009). *Remote Sensing and Digital Image Processing*. Freek D.
- Lorena Quecan, L. R. (2014). *Procesamiento imagenes resultantes ENVI*. Antofagasta.
- Lutgens, E. J. (2008). *Introduccion a la Geologia Fisica* .
- Massonnet D., R. M. (1993). *The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry*.
- Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36(4), 441-500.
- Morgan, W. J. (s.f.). La tectonica de placas, los principios clave. *Union americana de Geofiica*.
- Portal de los siete mares, Mar de Chile . (s.f.). Placas tectonicas .
- Pritchard, M. E., Simons, M., Rosen, P. A., Hensley, S., & Webb, F. H. . (2002). Co-seismic slip from the 1995 July 30 Mw= 8.1 Antofagasta, Chile, earthquake as constrained by InSAR and GPS observations. *Geophysical Journal International*, 150(2), 362-376.
- Quecan, L. R. (2014). *Procesamiento resultante Imagenes ENVI*. Antofagasta.
- Ramon, H. (2005). *Satellite radar interferometry for deformation monitoring: a priori*.

Generación de mapas de interferometría para la determinación de deformación de bloques costeros en Antofagasta
