

Metodología y aplicación de Interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) enfocado en deformación superficial. Casos de estudio en Colombia.

Juan Sebastián Gallardo Moreno

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Geólogo

Director

Jose Pedro Mora Ortiz

Geólogo. MSc. Sistemas de información geográfica y
MSc. En Geofísica.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías fisicoquímicas
Escuela de geología
Geología
Bucaramanga

2023

Dedicatoria

A Dios por ser mi guía en todos los momentos y darme la bendición de poder culminar mi carrera universitaria.

A mis papás por haberme apoyado y acompañado durante este largo camino, ya que sin su ayuda y comprensión nada de lo que he conseguido sería posible.

A toda mi familia por haberme alentado en los momentos de dificultad y haberme brindado sus consejos y apoyo incondicional.

A mis amigos, amigas y compañeros que he hecho durante el tiempo de la universidad, que me han apoyado en todo momento y que de una u otra forma sus experiencias y su vida han impactado en la mía.

A los profesores de la universidad que han sido parte de mi formación y que han tenido la voluntad de compartir su conocimiento de la mejor manera para formarme como profesional.

Agradecimientos

Le agradezco al profesor Jose Pedro Mora Ortiz quien con sus conocimientos me orientó y me apoyó en todas las etapas de realización de este proyecto.

También le agradezco a la Universidad Industrial de Santander y en especial a la Escuela de Geología, que me proporcionó los conocimientos y las bases teóricas para desarrollar exitosamente este trabajo de grado.

Muy importante el agradecimiento a todos mis amigos y mi familia por el apoyo incondicional que me brindaron durante todos estos años, en especial en los momentos en que mis ánimos pudieron decaer.

Y a Dios que me mantuvo siempre por el camino correcto para poder alcanzar la meta.

Muchas gracias a todos.

Tabla de contenido

Introducción	11
1. Justificación	13
2. Objetivos.....	14
2.1. Objetivo General.....	14
2.2. Objetivos Específicos	14
3. Localización.....	15
4. Marco Teórico	17
4.1. Detección remota	17
4.2. Radar.....	21
4.2.1. Longitud de onda	22
4.2.2. Polarización	24
4.2.3. Angulo de incidencia	25
4.3. Radar de Apertura Sintética (SAR)	29
4.3.1. Propiedades de una imagen SAR: Fase y Amplitud	31
4.3.2. Satélites de Radar de Apertura Sintética	33
4.3.3. Misión Sentinel-1.....	34
4.4. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)	37
5. Marco Geológico	40
5.1. Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro.....	40
5.2. Municipio de San Eduardo, departamento de Boyacá.....	46
6. Metodología	50
7. Resultados.....	74
8. Interpretación y discusión.....	86
9. Conclusiones y recomendaciones	95
Referencias Bibliográficas	100

Lista de Figuras

Figura 1 Ubicación geográfica del complejo volcánico Chiles – Cerro negro.	15
Figura 2 Ubicación geográfica del municipio de San Eduardo	16
Figura 3 Espectro electromagnético.....	18
Figura 4 Teledetección pasiva y activa	19
Figura 5 Esquema de configuración de un Sistema Radar de Apertura Sintética (SAR)	22
Figura 6 Polarización de radar.	25
Figura 7 Efecto Foreshortening	26
Figura 8 Efecto Layover	27
Figura 9 Efecto Shadow.....	28
Figura 10 Esquema función sinusoidal $\sin \varphi$ transmitida con periodo 2π radianes.	32
Figura 11 Ejemplo Amplitud imagen SAR.....	33
Figura 12 Modos de adquisición de datos Sentinel-1	36
Figura 13 Representación de los fundamentos de la aplicación de InSAR.	38
Figura 14 Representación de la visualización de una imagen InSAR	39
Figura 15 Mapa geológico zona Chiles - Cerro Negro	43
Figura 16 Fallas presentes en la zona del CVCCN.....	46
Figura 17 Mapa geológico municipio de San Eduardo.....	47
Figura 18 Fallas presentes en el municipio de San Eduardo	50
Figura 19 Referencia de la pantalla principal de la plataforma Alaska Satellite Facility	51
Figura 20 Referencia de la pantalla principal del software SNAP	52
Figura 21 Esquema de la metodología aplicada para el procesamiento de las imágenes SAR	53
Figura 22 Referencia pasos para instalación plugin SNAPHU.	55
Figura 23 Referencia pasos para importar las imágenes SAR.....	56

Figura 24 Referencia pasos para el co-registro de imágenes SAR.	58
Figura 25 Referencia pasos para la creación de interferograma.	59
Figura 26 Archivos del interferograma con la carpeta que contiene la fase y coherencia.....	60
Figura 27 Discontinuidad de ráfagas observadas en un interferograma	61
Figura 28 Referencia pasos para la aplicación del filtro Deburst.	61
Figura 29 Referencia pasos para sustraer topografía.	62
Figura 30 Referencia pasos para aplicar filtro Goldstein.....	64
Figura 31 Proceso de Multilooking.....	65
Figura 32 Referencia de pasos para aplicar Multilooking.	65
Figura 33 Referencia pasos para crear bandas de fase e intensidad.	66
Figura 34 Principio de desenrollado de fase	67
Figura 35 Referencia pasos exportar imagen para el desenrollado.....	68
Figura 36 Archivos producto de exportación para el desenrollado.	69
Figura 37 Referencia pasos para el desenrollado de fase.	69
Figura 38 Archivo producto del desenrollado de fase.	70
Figura 39 Referencia pasos para importar fase desenrollada.....	71
Figura 40 Referencia pasos para convertir fase a desplazamiento.	72
Figura 41 Referencia pasos para geocodificación.	73
Figura 42 Ubicación geográfica de las imágenes SAR para CVCCN.	77
Figura 43 Mapa de fase interferometrica [rad], Chiles – Cerro Negro.	78
Figura 44 Mapa coherencia, Chiles – Cerro Negro.	79
Figura 45 Mapa desplazamiento (m), Chiles – Cerro Negro.	80
Figura 46 Ubicación geográfica de las imágenes SAR para municipio de San Eduardo.	82
Figura 47 Mapa de fase interferometrica [rad], San Eduardo.....	83

Figura 48 Mapa coherencia, San Eduardo.....	84
Figura 49 Mapa desplazamiento (m), San Eduardo.....	85
Figura 50 Vista 3D de la deformación en el CVCCN.	87
Figura 51 Mecanismo focal para el sismo en el CVCCN.....	88
Figura 52 Comparación mecanismo focal del SGC, con los resultados obtenidos.	89
Figura 53 Movimiento en masa, San Eduardo.....	92
Figura 54 Escarpe secundario de movimiento en masa en San Eduardo.....	94

Lista de Tablas

Tabla 1 Ventajas y desventajas de los sensores de teledetección activos y pasivos.	20
Tabla 2 Principales bandas de trabajo de radar.....	23
Tabla 3 Especificaciones misiones satélites de SAR	34
Tabla 4 Características generales Sentinel-1	35
Tabla 5 Principales características imágenes SAR CVCCN.	76
Tabla 6 Principales características imágenes SAR Municipio San Eduardo.....	81

Resumen

Título: Metodología y aplicación de Interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) enfocado en deformación superficial. Casos de estudio en Colombia.

Autor: Juan Sebastian Gallardo Moreno

Palabras Clave: Teledetección, Sensores remotos, Radar de apertura sintética, Interferometría de radar, Deformación superficial.

Descripción: La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), es una técnica basada en la comparación de la diferencia de fase de las ondas de dos imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR), obtenidas de una misma zona en momentos diferentes. Los mapas generados por la técnica InSAR son denominados interferogramas a partir de los cuales es posible identificar desplazamiento o deformación en el terreno.

En esta investigación se utilizó la técnica de InSAR para medir la deformación superficial terrestre. Las zonas seleccionadas corresponden al área del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro y el municipio de San Eduardo en el departamento de Boyacá. En la primera zona se buscó estudiar la deformación relacionada al evento sísmico ocurrido el 25 de julio del 2022 con magnitud 5.6 en la escala de Richter y el segundo evento está relacionado a un movimiento en masa que comenzó el 20 de septiembre del 2018 en el municipio de San Eduardo en el departamento de Boyacá.

Los resultados obtenidos para el caso del evento sísmico en el CVCCN, mostraron un levantamiento del terreno con una magnitud de aproximadamente 8 cm a 14 km hacia el SE del volcán Chiles, así como una subsidencia de aproximadamente 3cm al SE del levantamiento encontrado. Para el caso del movimiento en masa en San Eduardo el resultado no fue el esperado, pues no se logró identificar de manera clara la magnitud o dirección de la deformación ocurrida en el área.

Se concluye que la aplicación de la técnica InSAR puede estimar deformación superficial en el terreno, debido a procesos geológicos como terremotos, pero para lograr un resultado confiable se debe tener en cuenta varios factores en el área de estudio tales como la densidad de la capa de vegetación, múltiples factores relacionados con efectos atmosféricos y trayectorias de satélite.

Abstract

Title: Methodology and application of Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) focused on Surface deformation. Case studies in Colombia.

Author(s): Juan Sebastian Gallardo Moreno

Key Words: Remote sensing, Synthetic aperture radar, Radar interferometry, Surface deformation.

Description: Synthetic Aperture Radar (InSAR) Interferometry is a technique based on the comparison of the phase difference of the waves of two Synthetic Aperture Radar (SAR) images, obtained from the same area at different times. The maps generated by the InSAR technique are called interferograms from which it is possible to identify displacement or deformation in the terrain.

In this investigation, the InSAR technique was used to measure the terrestrial surface deformation. The selected zones correspond to the area of the Chiles - Cerro Negro Volcanic Complex and the municipality of San Eduardo in the department of Boyacá. In the first area, we sought to study the deformation related to the seismic event that occurred on July 25, 2022 with magnitude 5.6 on the Richter scale and the second event is related to a mass movement that began on September 20, 2018 in the municipality of San Eduardo in the department of Boyacá.

The results obtained for the case of the seismic event in the CVCCN, showed a ground uplift with a magnitude of approximately 8 cm at 14 km to the SE of the Chiles volcano, as well as a subsidence of approximately 3 cm to the SE of the uplift found. In the case of the mass movement in San Eduardo, the result was not as expected, since it was not possible to clearly identify the magnitude or direction of the deformation that occurred in the area.

It is concluded that the application of the InSAR technique can estimate surface deformation in the ground, due to geological processes such as earthquakes, but to achieve a reliable result, several factors must be taken into account in the study area, such as the density of the layer of vegetation, multiple factors related to atmospheric effects and satellite trajectories.

Introducción

La percepción remota representa una de las ciencias más modernas a nivel mundial, y es una herramienta útil en el análisis y estudio de los numerosos fenómenos que ocurren en la superficie terrestre, la percepción remota permite capturar, procesar y analizar imágenes de la tierra obtenidas a partir de sensores espaciales o aerotransportados, logrando la obtención de información de una manera fácil, en un menor tiempo y con una mayor cobertura espacial dependiendo de la plataforma usada. El desarrollo histórico de la teledetección, la ha convertido en un método aplicable a una gran diversidad de sistemas y fenómenos físicos, incluyendo la geología y la geofísica y puede ser usada para establecer indicadores de prevención y evaluación de cierto tipo de desastres (Lira, 1995).

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) es una técnica de teledetección utilizada para la estimación de la deformación terrestre, que posee las ventajas de la percepción remota respecto a otros métodos tradicionales geodésicos, como lo son un mayor rango de cobertura espacial y una mejor resolución temporal (Santos, 2015). A pesar de que esta técnica ha tenido un gran impacto en este tipo de estudios y ha mostrado una alta eficiencia en muchas zonas del mundo, ha sido poco utilizada y explotada en Colombia, un territorio en el que las posibilidades de aplicación son abundantes, en diversas áreas como la vulcanología, la sismología, el monitoreo ambiental, la gestión del riesgo, la industria petrolera, entre otras (Santos, 2015).

Colombia es un país que cuenta con un relieve muy variado, compuesto por profundos valles y altos nevados, esta característica está dada principalmente por su ubicación en el Cinturón de Fuego del Pacífico, que representa una de las zonas de subducción en donde se condensan algunas de las regiones sísmicas y volcánicas más importantes y activas a nivel mundial, todo esto, debido a la interacción entre las placas tectónicas, en especial las placas de Nazca y Sudamericana.

El territorio colombiano se encuentra atravesado por la Cordillera de los Andes, dividida en tres ramificaciones (occidental, central y oriental); la mayor parte de volcanes activos se encuentran ubicados en la Cordillera Central y algunos en la Cordillera Oriental, albergando un total de 23 volcanes activos. En el país existe una alta sismicidad asociada a la actividad volcánica y a la actividad tectónica presente (Molina, 2022). Debido a todo lo anterior y a la configuración topográfica del territorio, el terreno colombiano es susceptible a fenómenos de remoción en masa, terremotos, inundaciones y otros. Colombia tiene un exposición de amenaza alta y muy alta en más del 80% de la población, según los datos arrojados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) en el año 2018 (UNGRD, 2020).

Este trabajo se realizó con el fin de utilizar una metodología para estimar la deformación superficial en dos eventos específicos de diferente naturaleza. En primer lugar, el evento sísmico del 25 de Julio del año 2022 con una magnitud de 5.6 en la escala de Richter ocurrido en las zonas de influencia del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro y en segundo lugar estimar el desplazamiento del terreno producto de un movimiento en masa sucedido en el municipio de San Eduardo en el departamento de Boyacá. En los dos casos se aplicó la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) utilizando imágenes satelitales de libre acceso de Sentinel – 1 de la European Space Agency (ESA) procesadas con el software de uso libre SNAP (Sentinel Application Platform) obteniendo interferogramas que permitieron estimar la deformación superficial del terreno en las zonas de estudio mencionadas. Finalmente, se presentan las ventajas y desventajas de la aplicabilidad de la técnica InSAR teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la presente investigación.

1. Justificación

La deformación superficial es un evento, que puede originarse por causas naturales como lo son las actividades tectónicas, erupciones volcánicas, deslizamientos, o de origen antropogénico (ej. sobreexplotación de aguas subterráneas, la operación de obras civiles y compactación del suelo por carga) y otras. Dependiendo de la magnitud de la deformación, se pueden generar afectaciones en la cotidianidad y la vida humana, por lo que es necesario identificar como ocurren estos fenómenos, en lo posible estimando la deformación terrestre para llevar a cabo una correcta mitigación del riesgo, basadas en un análisis territorial integral y completo.

La interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) es una técnica de teledetección activa, con la cual se puede identificar la deformación o el desplazamiento del terreno, esta técnica se realiza mediante el procesamiento de imágenes satelitales antes (imagen máster) y después (imagen esclava) de la fecha del evento que se quiere analizar. Por ende, es una técnica que permite realizar un monitoreo continuo de las deformaciones del terreno y poder efectuar un análisis de los posibles fenómenos geodinámicos causantes de las mismas.

Debido a la importancia de la deformación y la afectación posible a múltiples actores en la superficie terrestre existe la necesidad de estudiar e implementar metodologías que faciliten la identificación de dichos fenómenos. Lo anterior presenta la razón por la cual se estudia la técnica InSAR en Colombia; pues es posible identificar las ventajas y beneficios de utilizar dichas técnicas en el análisis de la deformación terrestre y las geociencias.

2. Objetivos

2.1.Objetivo General

- Definir una metodología de análisis de la deformación aplicando la Interferometría de Radar de apertura sintética InSAR y aplicarla a casos de estudio en Colombia.

2.2.Objetivos Específicos

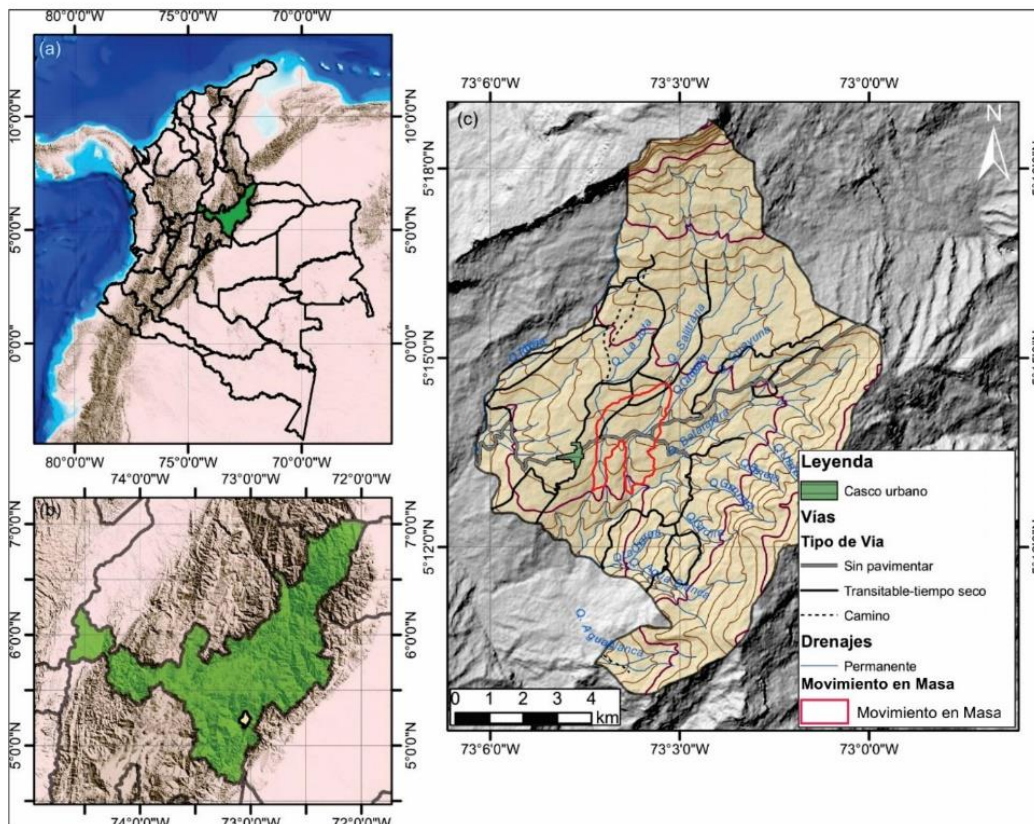
- Establecer una metodología utilizando herramientas especializadas en imágenes para el análisis interferométrico y procesamiento de imágenes satelitales SAR.
- Obtener interferogramas generados mediante la técnica de InSAR utilizando imágenes de radar de apertura sintética de libre acceso.
- Estimar la deformación superficial para los casos de estudio en Colombia en zonas volcánicas y de deformación superficial.
- Identificar ventajas y desventajas de la aplicación de Interferometría de radar de apertura sintética en los casos de estudio en Colombia.

3.2. Municipio de San Eduardo, departamento de Boyacá.

El área de estudio se encuentra en las veredas Villanueva y Cardoso del municipio de San Eduardo. San Eduardo se encuentra localizado en el flanco oriental de la Cordillera Oriental de Colombia, en la parte suroriental del Departamento de Boyacá, aproximadamente a 109 kilómetros de la capital de Boyacá, Tunja (Pérez et al., 2019).

Figura 2

Ubicación geográfica del municipio de San Eduardo.



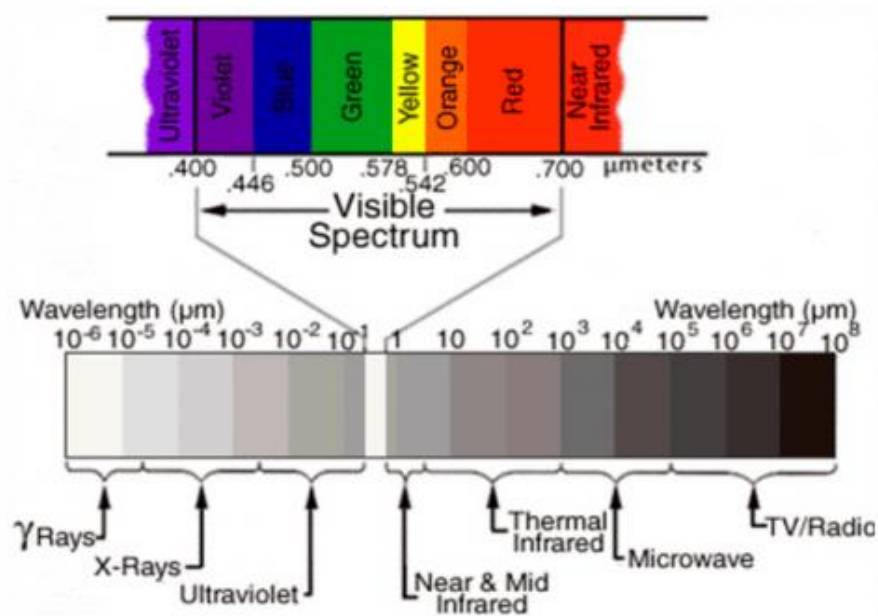
Nota: En la imagen se observa la localización del movimiento en masa ubicado cerca al casco urbano del municipio de San Eduardo. Tomado de (H. García, 2018).

4. Marco Teórico

En este capítulo se exponen los conceptos teóricos necesarios para el entendimiento del proyecto, por lo cual se abarcan términos asociados a teledetección, radar, radar de apertura sintética (SAR) y la interferometría de radar de apertura sintética (InSAR).

4.1. Detección remota

La teledetección (percepción remota o detección remota) se puede definir en términos generales como la ciencia o tecnología que permite identificar, medir y analizar características e información de un objeto que se encuentra sobre la superficie de la tierra, sin que exista un contacto entre los sensores y el material observado (Garcés, 2020). Para que esta observación pueda ser posible, aunque no exista un contacto directo con el material, es necesario que se presente algún tipo de interacción entre el sensor y los objetos, esta interacción se da mediante un flujo de radiación que puede ir desde longitudes de onda corta como las ultravioletas hasta las longitudes de onda larga, como las microondas presentada en la **Figura 3**. Cada objeto o sustancia conocida por el hombre refleja o absorbe diferentes longitudes de onda, haciendo que cada una de ellas tenga una reacción única (Geoinnova, 2016). De esta manera, utilizando sensores que miden las diferentes longitudes de onda emitidas o reflejadas por los materiales en superficie se logra la detección de información y registro de dicho flujo energético y el procesamiento de estas señales (Garcés, 2020).

Figura 3*Espectro electromagnético.*

Nota: Tomado de (Ceupe, 2019).

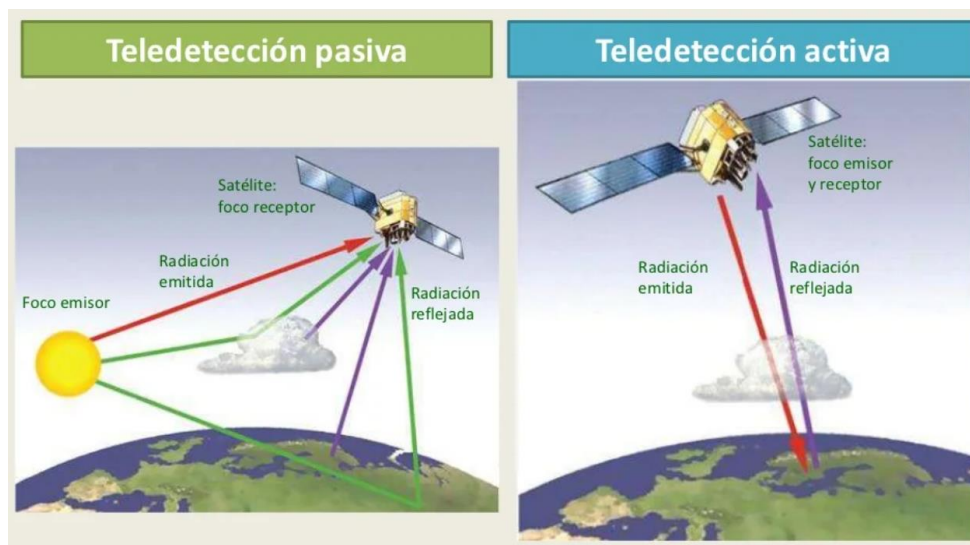
De acuerdo con el tipo de la fuente de energía, se pueden distinguir dos tipos de teledetección; pasiva y activa, de igual forma cada uno de estos sensores posee unas características propias, como puede verse en la **Figura 4**.

Los sensores de teledetección pasiva (**Figura 4**) funcionan detectando la radiación natural emitida o reflejada por el objeto que se está analizando, entonces es el objeto analizado el encargado de emitir la energía que es detectada por el sensor. Los sensores pasivos pueden registrar la energía que va a ser de dos tipos, la primera, radiación solar que es reflejada por el objeto (ópticos) y segunda, radiación terrestre emitida por los objetos (térmicos) (Fourqurean et al., 2019). Algunos ejemplos de sensores pasivos son cámaras fotográficas, exploradores de barrido y

de empuje, cámaras de vidición y por último los sensores pasivos de antena se conocen con el nombre de radiómetros de micro-ondas (Chuvienco, 1990).

Figura 4

Teledetección pasiva y activa.



Nota: Tomado de (Montes de Toledo, 2012).

Los sensores activos (**Figura 4**) emiten sus propios pulsos de energía y miden el tiempo de propagación de la energía, así como la intensidad del pulso que se refleja desde la superficie de vuelta al sensor (Fourqurean et al., 2019). Un sensor de RADAR es un ejemplo de sensor de teledetección activo, ya que este mide y registra el tiempo que tarda la energía propagada en ir y volver a un punto, determinando de esta manera la localización, altura, velocidad y dirección de un objeto determinado (CEUPE, 2019). Puede existir una comparación entre la teledetección activa con la ecolocalización utilizada por algunos animales, como el murciélago, para determinar la ubicación espacial de algunos objetos, en donde por medio de ondas sonoras retornantes puede determinar la ubicación de comida o determinar su ubicación en el espacio (kazilek, 2017).

Cada uno de los tipos de teledetección que se mencionaron anteriormente presentan unas ventajas y desventajas en la tabla 1, estas características están dadas por las diferencias en sus características propias (**Tabla 1**). Es posible combinar estos dos tipos de teledetección y de esta manera se podría llegar a obtener información relevante que no pudo llegar a ser detectable mediante un solo método.

Tabla 1

Ventajas y desventajas de los sensores de teledetección activos y pasivos.

	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Pasivas	Generalmente los datos son más fáciles de interpretar, dado que se producen imágenes similares a las de una cámara. El reflejo de las distintas bandas del espectro se puede utilizar para clasificar tipos de cobertura del suelo y especies vegetales. El estado de la vegetación se puede inferir a partir de reflejos del infrarrojo y del infrarrojo cercano.	Necesitan la energía del sol para generar imágenes. Se deben tener en cuenta los cambios de estación (por ejemplo, regiones polares con grandes variaciones en la duración de la luz diurna según la estación). La nubosidad según el clima puede limitar la capacidad de obtención de estas imágenes porque las nubes dispersan y absorben la luz (se puede tener mayor afectación en las regiones ecuatoriales que suelen presentar nubosidad de manera constante durante todo el año).
Activas	Transmiten sus propios pulsos de energía por lo cual no dependen del tiempo ni de la luz diurna. Se pueden comparar las imágenes directamente con los mismos parámetros (modo, ángulo de incidencia, polarización y nivel de procesamiento).	Este método puede ser más costoso. Las imágenes obtenidas son más difíciles de analizar y pueden diferir drásticamente en función de los parámetros utilizados.

Nota: Adaptado de (Fourqurean et al., 2019).

4.2. Radar

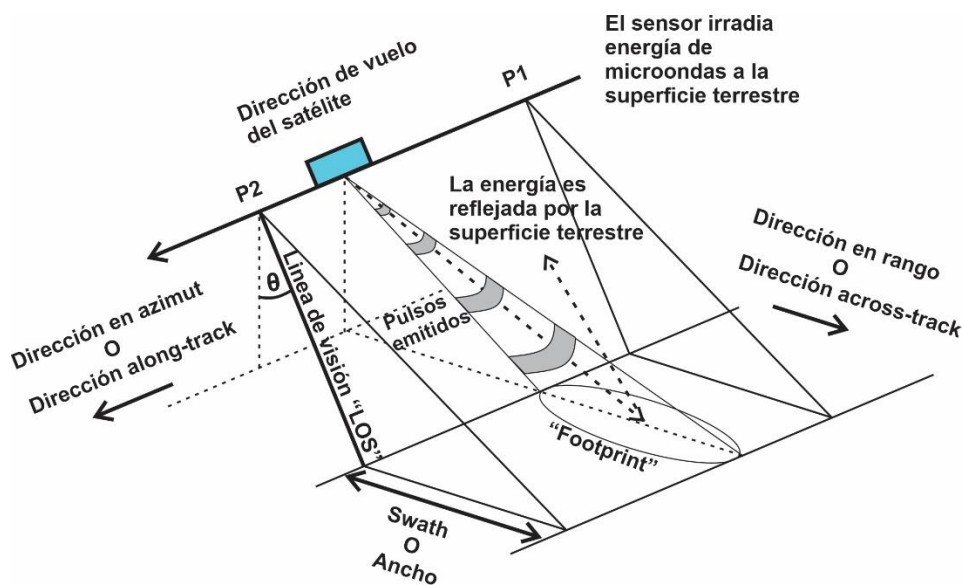
Un radar (acrónimo en inglés Radio Detection And Ranging-Detección de radio y alcance) se puede clasificar como una técnica de detección activa. En principio, este sistema es capaz de emitir energía electromagnética de microonda (1mm – 1m) y detectar la señal de onda que regresa reflejada (señal retrodispersada) por el medio y deducir información del objetivo (Garcés, 2020). Su funcionamiento está basado en el uso de una antena transmisora y una receptora, la primera emite una secuencia de pulsos de microondas y la segunda, posee un sensor capaz de detectar la energía que recibe la cual es procesada para obtener los datos del objeto de interés. Estos pulsos emitidos llegan a la superficie iluminando un área concreta que se conoce como “Footprint”, área de la cual se recoge toda la información que llega al sensor, la resolución del sensor está dada en función del rango y del azimut. El rango o alcance es la distancia entre el radar y el objeto en dirección perpendicular al vuelo y el azimut es la distancia a lo largo del trayecto. La distancia al objeto es medida según el tiempo que tarda el pulso de radiación en llegar al objeto y volver, dado que la radiación electromagnética se propaga a la velocidad de la luz, esta distancia es calculada mediante la siguiente formula (Gómez, 2022):

$$R = \frac{ct_R}{2}$$

En donde “R” es el rango o distancia al objetivo, “c” es la velocidad de la luz $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ y “ t_R ” es el tiempo de retorno del pulso. Como el pulso realiza un viaje de ida y vuelta al objeto, el resultado es dividido entre 2 para obtener así la distancia al objeto (Gómez, 2022).

Figura 5

Esquema de configuración de un Sistema Radar de Apertura Sintética (SAR).



Nota: La dirección azimut corresponde a la trayectoria de vuelo del satélite y el rango es perpendicular a este. La línea de visión "LOS" es la dirección de los pulsos electromagnéticos emitidos, los cuales posteriormente se reflejan hacia el sensor. El ángulo formado entre la línea de "LOS" y la vertical corresponde al ángulo de incidencia o ángulo de visión. P1 y P2 corresponden a las posiciones donde inicia y finaliza el barrido de la imagen. Adaptado de (Santos, 2015).

Las características de la señal retrodispersada están influenciadas por parámetros del radar y de la superficie terrestre, tres parámetros del radar que tienen influencia sobre las características de dicha señal son la longitud de onda, la polarización y el ángulo de incidencia.

4.2.1. Longitud de onda

La interacción entre la superficie y la señal está definida por la longitud de onda, esta brinda información sobre si la superficie es lisa o rugosa. En función de la longitud de onda, un radar va a trabajar en una determinada banda como se ve en la **Tabla 2**. Estas frecuencias de operación van

a estar relacionadas con dos características que son la resolución espacial y la penetración del frente de onda. A mayor longitud de onda, mayor será la penetración y por tanto menor la resolución espacial (Gómez, 2022).

Tabla 2

Principales bandas de trabajo de radar.

BANDA	LONGITUD DE ONDA (CM)	FRECUENCIA (GHz)
Ku	1.7 – 2.4	18 – 12.5
X	2.4 – 3.8	12.5 – 8
C	3.8 – 7.5	8 – 4
S	7.5 – 15	4 – 2
L	15 – 30	2 – 1
P	30 – 100	1 – 0.3

Nota: Tomado de (Gómez, 2022).

Las diferentes bandas en las que trabajan los radares están definidas por letras, Villegas (2018) realiza la siguiente descripción de las más utilizadas:

Banda X: Comprende una faja de longitud de onda entre 2.4 y 3.8 cm (12.5 a 8 GHz). Es normalmente la frecuencia más alta (longitud de onda menor) utilizada por radares de apertura sintética aerotransportados. En este rango de longitud de onda, aunque los rasgos geomorfológicos son aun visibles, la mayoría de las superficies aparecen uniformemente rugosas, razón por la cual no es posible la discriminación mediante contrastes de rugosidad. Como los satélites tienen una capacidad limitada de energía, esta es insuficiente para generar y transmitir radiación en el rango X sobre una faja de terreno lo suficientemente ancha, razón por la cual esta banda aún no está disponible en los radares satelitales (Villegas, 2018) (p.44).

Banda C: 3.8 a 7.5 cm (8 a 4GHz). Es empleada por muchos satélites orbitales como ERS-1 y RADARSAT. Por ser la banda intermedia entre X y S, tiene propiedades de las dos (Villegas, 2018) (p.44).

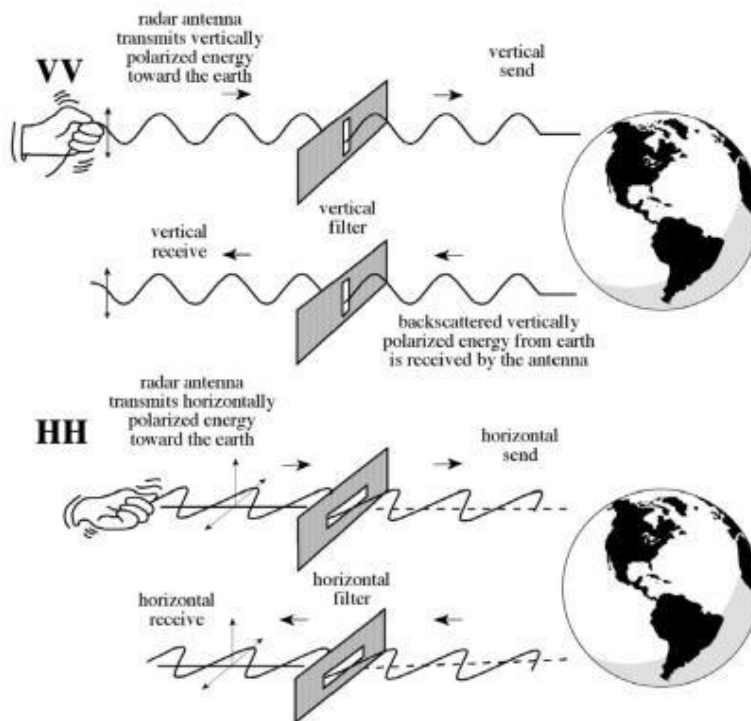
Banda S: 7.5 a 15 cm (4 a 2GHz) (Villegas, 2018)(p.44).

Banda L: 15 a 30 cm (2 a 1 GHz). Es empleada por el satélite JERS-1 y el SEASAT. Por corresponder con longitudes de onda largas, tiene la capacidad de penetrar algunos materiales superficiales, siempre y cuando estén secos e inconsolidados, razón por la cual se espera sea muy útil cuando se utiliza en áreas desérticas. Esta banda ha demostrado ser útil para propósitos geológicos, a pesar de mostrar fuerte dispersión en terrenos altamente vegetados (Villegas, 2018)(p.45).

Banda P: 30 a 100 cm (1 a 0.3 GHz). Tiene propiedades similares a las de la banda L, pero aún no ha sido probada con propósitos geológicos (Villegas, 2018)(p.45).

4.2.2. Polarización

La polarización a grandes rasgos clasifica las imágenes satelitales según la orientación de la onda emitida por el sensor y que regresa al satélite, la clasificación se puede dar de 4 posibles maneras HH (transmitida horizontalmente y recibida horizontalmente), HV (transmitida horizontalmente y recibida verticalmente), VH (transmitida verticalmente y recibida horizontalmente), VV (transmitida verticalmente y recibida verticalmente). La polarización depende de la configuración de cada satélite y es posible combinarse con el fin de determinar las propiedades físicas del objeto observado (Pinto, 2018). La polarización provee información relacionada a los componentes verticales y horizontales de la superficie.

Figura 6*Polarización de radar.*

Nota: Tomado de (Gómez, 2022).

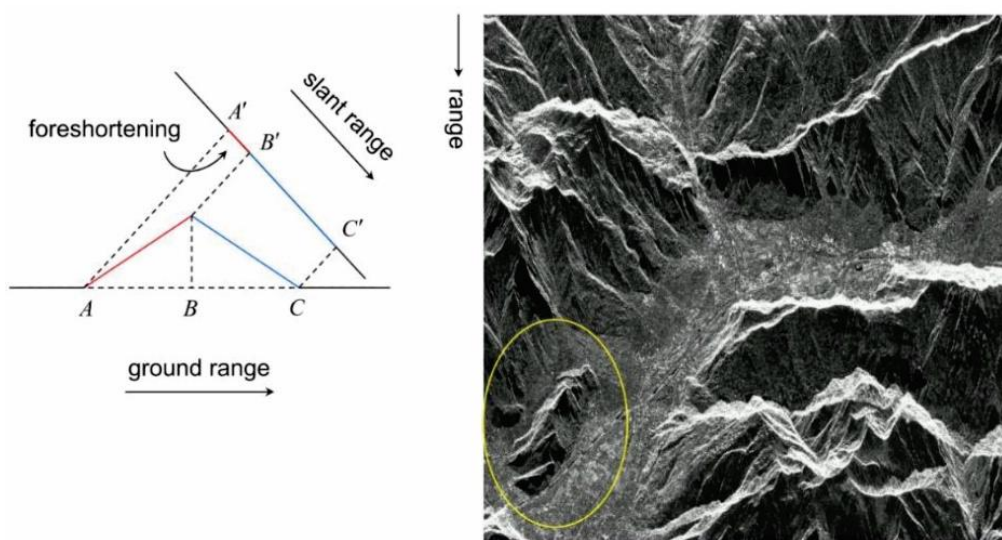
4.2.3. Angulo de incidencia

El ángulo de incidencia (**Figura 5**), es el ángulo formado entre la dirección de observación con la perpendicular al objetivo, este ángulo va a variar según la altura del sensor sobre el horizonte del lugar (Fonseca, 2020), por esta razón la geometría de la imagen puede llegar a variar de un punto a otro en la dirección de alcance. Las distorsiones geométricas son provocadas por la captura lateral de las imágenes que son afectadas por la misma topografía del terreno (Gómez, 2022), entre estas distorsiones están el efecto Escosor Foreshortening, el plegado o Layover y el efecto Sombra o Shadow.

En la **Figura 7** se observa un ejemplo de la distorsión geométrica por efecto Foreshortening, que ocurre en terrenos donde la cara apunta hacia la iluminación lateral del radar, lo que genera que la imagen se comprima en pocos píxeles. Si el ángulo de incidencia aumenta disminuye la distorsión (Garcés, 2020). Este efecto se reduce durante el proceso de Geocodificación (Guzman et al., 2020). El Slant range (dirección de rango inclinado) se refiere a la dirección a lo largo de la línea de visión “LOS” (Restrepo, 2020).

Figura 7

Efecto Foreshortening.

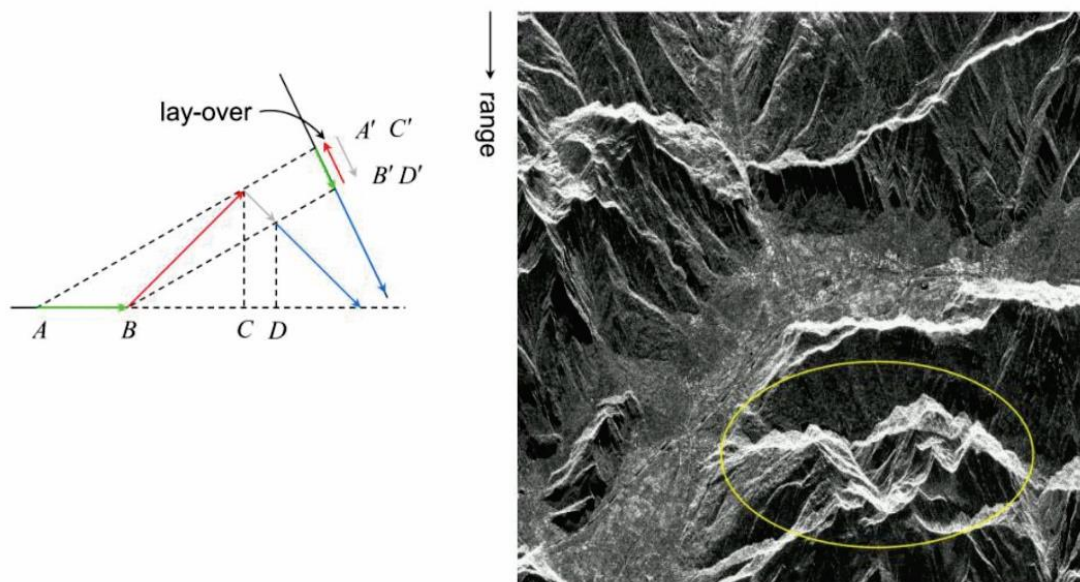


Nota: Tomado de (Garcés, 2020).

En la **Figura 8** se observa un ejemplo de la distorsión geométrica por efecto Layover o inversión por relieve, que se genera cuando el pulso electromagnético del radar llega primero al pico de la montaña y después a su base, resultado de esto se observa que la cima de la montaña se desplaza de su posición original hacia la dirección de visión del radar. Si el ángulo de incidencia o visión es más pequeño que la pendiente del terreno se genera dicha distorsión (Garcés, 2020).

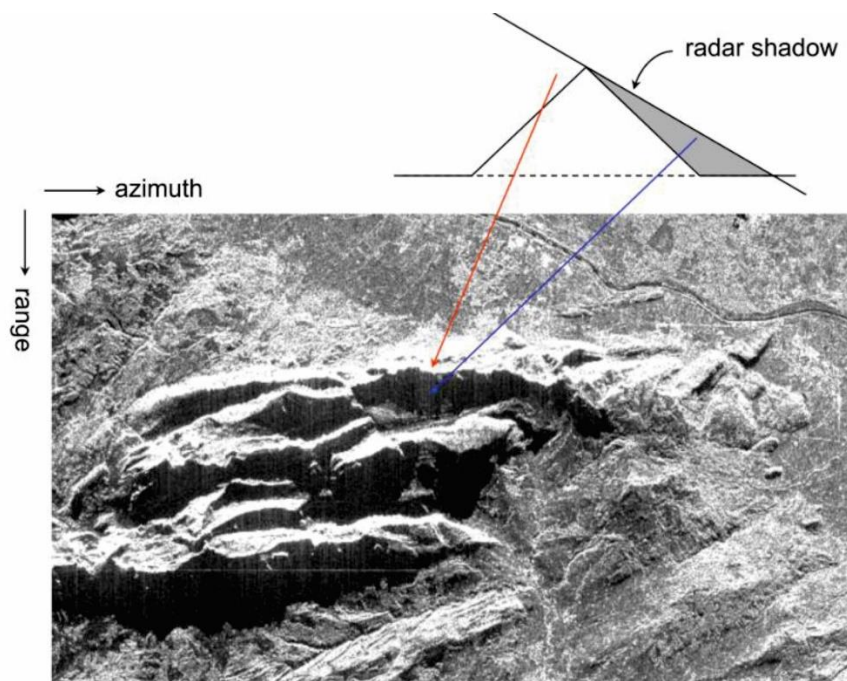
Figura 8

Efecto Layover.



Nota: Tomado de (Garcés, 2020).

En la **Figura 9** se observa un ejemplo de la distorsión geométrica por efecto Shadow o Sombra, este sucede cuando hay un objeto cuya pendiente tiene un ángulo mayor al de incidencia, entonces parte de la información de este objeto no puede ser vista por el sensor, teniendo como resultado zonas negras en la imagen dado que el paso de los pulsos electromagnéticos es obstruido (Garcés, 2020).

Figura 9*Efecto Shadow.*

Nota: Tomado de (Garcés, 2020).

En un principio el principal problema del radar era su baja resolución espacial, la cual puede calcularse bajo la siguiente ecuación (Duarte, 2017):

$$R_s = \frac{\lambda H}{\phi}$$

Donde R_s es la resolución, λ la longitud de onda, H la altura de observación y ϕ el diámetro de la antena.

Si el radar es colocado sobre un avión la altura se reduce obteniéndose resoluciones adecuadas, contrario a lo que sucedería si la plataforma de transporte del radar es un satélite. Se ha encontrado una solución a ese problema con el uso de Radar de Apertura Sintética (SAR) el

cual se basa en el efecto Doppler que surge en la observación cuando se genera un movimiento relativo entre objeto – sensor y la resolución que se alcanza es equivalente a la que se lograría con una antena de tamaño igual a la distancia entre ambas observaciones (Duarte, 2017).

4.3.Radar de Apertura Sintética (SAR)

Según Hanssen (2001) el Radar de Apertura sintética es un sistema avanzado que usa técnicas de procesamiento de imágenes con el fin de simular una antena virtual de mayor tamaño, esto es posible por medio de la simulación de una tomografía (desplazamiento de la fuente y el receptor, en este caso es la antena del radar), este proceso provee una mayor resolución espacial en comparación de un sistema de Radar de apertura convencional (Santos, 2015).

La adquisición de imágenes de radar inicia cuando se transmiten una serie de pulsos electromagnéticos cortos y conformes al suelo produciendo una huella o “footprint” de la cual su tamaño es inversamente proporcional al de la antena principal (este concepto refiere a la apertura), debido entonces a que la antena es pequeña, el rastro es grande y los objetos allí son iluminado por cientos de pulsos electromagnéticos (Garcés, 2020).

Hay un nivel de procesamiento de la señal tal que permite determinar cambios como resultado del efecto Doppler en las señales que se reflejan desde los objetivos iluminados por el radar en movimiento lo que produce imágenes de mayor resolución como si estas hubieran sido tomadas por un radar de mayor apertura (Garcés, 2020).

A este aumento de apertura se le conoce como “apertura sintética” de aquí el nombre y por definición se tiene que es igual a la distancia que es recorrida por la plataforma espacial mientras la antena del radar recopila información sobre el objetivo, esta técnica SAR depende de la precisión

al momento de medir la posición relativa y la velocidad que tiene el radar con relación al objeto (Garcés, 2020).

A continuación, se muestra un ejemplo de Fonseca (2020), en donde se realiza un ejercicio planteado por la Agencia Espacial Mexicana. Se realiza el procedimiento de calcular el diámetro de la antena que requeriría un radar ubicado en un satélite a 800 kilómetros de la superficie de la tierra, altura donde según la ESA (European Space Agency) orbita Sentinel 2, para que de una resolución espacial de 30 metros y que opere a una frecuencia de 7 GHz (frecuencia banda C) que según la misma ESA es el rango donde opera Sentinel 2. Se realiza el procedimiento para calcular la longitud de onda emitida para dar una frecuencia a 7 GHz (7×10^9 Hz) a continuación:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/seg}}{7 \times 10^9 \text{ Hz}} = 0.0428 \text{ m}$$

Esto quiere decir que la longitud de onda de la señal de radar es de 4.28 centímetros. Luego de esto se procede a calcular el diámetro de la antena para garantizar las condiciones anteriormente descritas, donde R es la resolución escogida:

$$d = \frac{\lambda H}{R} = \frac{0.0428 \text{ m} \times 800.000 \text{ m}}{30 \text{ m}} = 1141.33 \text{ m}$$

Esto es un tamaño poco práctico si se considera una antena estacionaria, por lo que quedaría demostrado la gran ventaja y la solución a este problema que supone el Radar de Apertura Sintética (SAR), el cual se basa en el efecto Doppler que se muestra cuando se produce un movimiento relativo entre el objeto y el sensor, representando el cambio de frecuencia de las ondas electromagnéticas que percibe un observador con respecto a la frecuencia que emite una fuente en movimiento relativo al observador (Duarte, 2017).

4.3.1. Propiedades de una imagen SAR: Fase y Amplitud

Se puede ver la imagen SAR como un compuesto de diferentes elementos que conforman la imagen, llamados píxeles. Cada uno de estos píxeles se asocia a una determinada área sobre la superficie terrestre, que definen la resolución de celda y representan cada uno un número complejo que describe una fase y amplitud, brindando así información sobre el campo de las microondas y sobre la dispersión que ha ocurrido por cada uno de los elementos dispersores que bien pueden ser edificaciones, vegetación, agua, rocas, entre otros, dentro de la resolución de cada celda correspondiente (Hermosilla, 2016).

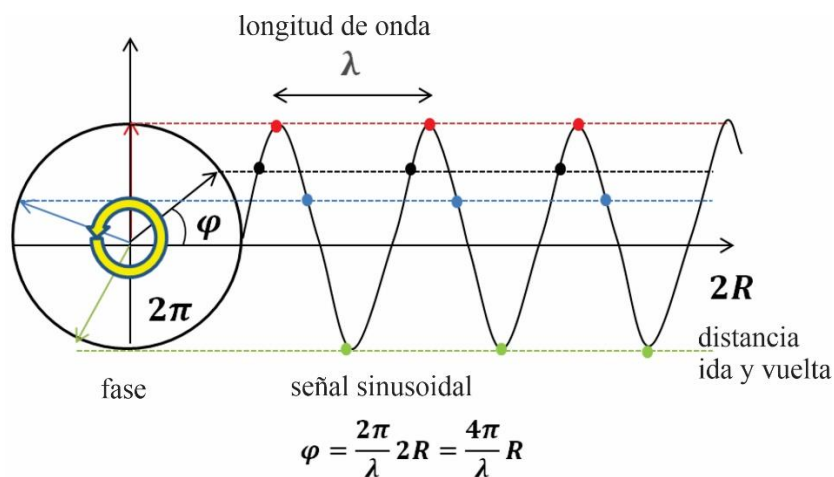
4.3.1.1.Fase

El elemento de fase en la señal irradiada, es muy importante ya que este es decisivo para la información relacionada a las diferencias del relieve del terreno, con lo cual se desarrolla la técnica de Interferometría. Teniendo en cuenta que se trabaja con ondas electromagnéticas que van a la velocidad de la luz, es válido hacer la afirmación de que dichas ondas están compuestas por partículas (esto debido a la dualidad onda-partícula de la luz) que muestran un movimiento sinusoidal el cual cuando una partícula recorre una distancia igual a la longitud de onda (λ), entonces se dice que recorrió un ciclo de 2π (Hermosilla, 2016).

Debido a las diferentes distancias de los dispersores o reflectores al radar, se presentarán retrasos entre la transmisión y la recepción de la señal emitida. La fase es proporcional a la distancia que recorre la señal de ida y de regreso ($2R$). Esta imagen de fase no es útil sin antes hacer uso de alguna técnica de Interferometría de Radar de apertura Sintética (InSAR)(Santos, 2015).

Figura 10

Esquema función sinusoidal $\sin \varphi$ transmitida con periodo 2π radianes.



Nota: La ecuación representada para definir la fase φ , muestra que la primera fracción es el resultado de la distancia recorrida en unidades de longitud de onda, siendo una medida adimensional que es convertida en radianes por el factor 2π ; de igual forma sugiere que cada vez que la partícula recorre la distancia de 2π , la fase es de nuevo la misma completando de esta manera un ciclo. Entonces infiere que la fase corresponde a la medida de la última fracción del recorrido ida-vuelta, siendo a su vez más pequeña que la longitud de onda. Tomado de (Hermosilla, 2016).

4.3.1.2. Amplitud

Una imagen SAR está constituida por las mediciones de la amplitud de la radiación retrodispersada nuevamente hacia el radar por los objetos dispersores. Esta amplitud depende de varios factores como la rugosidad del terreno, las propiedades dieléctricas y composición química del mismo. Entonces las superficies planas van a tener pequeñas amplitudes debido a que la radiación se refleja lejos del radar mientras que las zonas urbanas y rocas expuestas muestran grandes amplitudes (Hermosilla, 2016).

Figura 11

Ejemplo Amplitud imagen SAR.



Nota: Imagen de alta resolución SAR tomada por un satélite TerraSAR-X, como se observa en la figura las áreas de retro-dispersión fuerte, como las edificaciones o rocas, están representadas por los pixeles más brillantes, mientras las zonas con bajos niveles de retro-dispersión, como el agua, están representadas por pixeles más oscuros. Tomado de (Hermosilla, 2016).

4.3.2. Satélites de Radar de Apertura Sintética

A continuación, se presenta una tabla con las misiones que poseen sensores operando en el espectro de las microondas y trabajan en la adquisición de imágenes SAR. Sin embargo, para competencia de esta investigación solo se tocará más a profundidad y se dará especial enfoque al que beneficia los objetivos del proyecto (Sentinel-1).

Tabla 3*Especificaciones misiones satélites de SAR.*

Nombre satélite	Agencia espacial	Banda	Fecha operación
US Seasat	National Aeronautics and Space Administration (NASA)	L	Jun-Oct 1978
European Remote-sensing Satellite 1 (ERS-1)	European Space Agency (ESA)	C	1991-2000
Japanese Earth Resources Satellite 1 (JERS-1)	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	L	1992-1998
European Remote-sensing Satellite 2 (ERS-2)	European Space Agency (ESA)	C	1995-2011
Canadian Radar Satellite 1 (Radarsat-1)	Canadian Space Agency (CSA)	C	1995-2013
European Environmental Satellite (Envisat)	European Space Agency (ESA)	C	2002-2012
Japanese Advanced Land Observing Satellite (ALOS)	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	L	2006-2012
Canadian Radar Satellite 2 (Radarsat-2)	Canadian Space Agency (CSA)	C	2007-presente
TerraSAR-X	German Aerospace Center (DLR)	X	2007-presente
COSMO-SkyMed constellation	Italian Space Agency (ASI)	X	2007-presente
TerraSAR add-on for DEM (TanDEM-X)	German Aerospace Center (DLR)	X	2010-presente
Sentinel-1	European Space Agency (ESA)	C	2014-presente

Nota: Tomado de (Santos, 2015).

4.3.3. Misión Sentinel-1

Esta misión operada y desarrollada por la European Space Agency (ESA) recolecta datos en la banda C en cuatro distintos modos (**Figura 12**), tiene una resolución de 5m y cobertura arriba de los 400km. Adicionalmente la misión Sentinel-1 posee la capacidad de proporcionar una alta resolución temporal, polarización dual y una rápida entrega de datos. Esta misión se compone de una constelación de dos satélites, Sentinel-1A y Sentinel-1B (lanzados respectivamente el 3 de

abril de 2014 y el 25 de abril de 2016), los que comparten el mismo plano orbital y realizan un cubrimiento terrestre total cada dos semanas (Guzman et al., 2020).

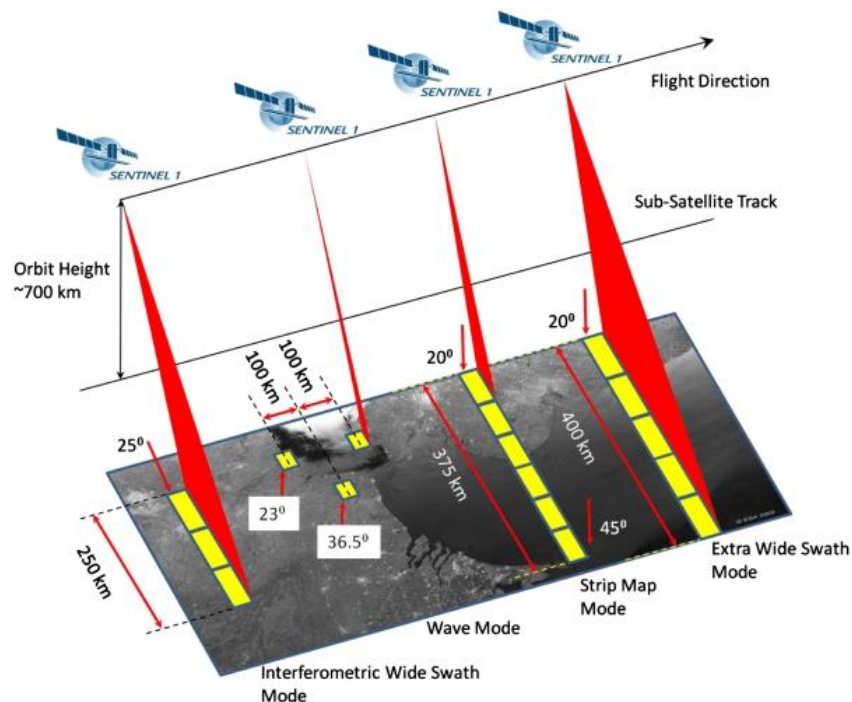
Tabla 4

Características generales Sentinel-1.

Inclinación	98.18°
Instrumento	Banda C SAR (5.4GHz)
Angulo de incidencia	Vista lateral, 15-45° off nadir
Polarización	VV y VH o HH y HV
Altura de órbita	693km
Órbita	Sincronización solar, cuasi-polar
Repetición de la órbita	12 días por satélite

Nota: Tomado de (Guzman et al., 2020).

Sentinel-1 es un satélite de Radar de Apertura Sintética que tiene la capacidad de obtener imágenes sin importar cuales sean las condiciones climáticas. Estos datos son de gran importancia y uso tanto para el sector privado como público, contribuyendo con el estudio de los cambios en la superficie terrestre, el entorno marino y también como apoyo en la ayuda de situaciones de crisis humanitaria (Fonseca, 2020).

Figura 12*Modos de adquisición de datos Sentinel-1.*

Nota: En la imagen se observan los modos de adquisición de datos de Sentinel-1. Extra Wide Swath (EW) sirve para el monitoreo de costas y mares, su franja de cobertura es de 400km con una resolución espacial de 25x100m; Strip Map (SM) su franja de cobertura es de 80km con una resolución espacial de 5x5m, la adquisición de estos datos es por pedido en circunstancias especiales; Wave Mode (WM) sirve para hacer observaciones de rutina marítimas, su franja de cobertura es de 20x20km con una resolución espacial de 5x5m (Guzman et al., 2020). El Interferometric Wide Swath (IW) tiene una franja de cobertura de 250km y una resolución espacial de 5x20m, este se caracteriza por dividirse en tres subfranjas (IW1, IW2, IW3) que se adquieren mediante la técnica Terrain Observation With Progressive Scans SAR (TOPSAR) lo cual entrega como resultado una imagen con mejor calidad (Hermosilla, 2016). Tomado de (ESA, s. f.).

4.4. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética hace referencia a técnicas con las que se realizan los procedimientos que son utilizados en el análisis de diferencia de fase que presenta un interferograma obtenido a partir de imágenes de radar de distintos tiempos. Teniendo como principio el hecho de que si en determinado punto sobre la superficie terrestre, ocurre una deformación, la medición para un segundo tiempo sobre el mismo punto va a tener un desfase, al realizar la gráfica para esta diferencia de fase, se obtiene lo que se denomina interferograma (Fonseca, 2020).

La interferometría es generada por medio de la multiplicación cruzada de la imagen maestra (master) con la conjugación compleja de las imágenes esclavas (slaves). Se multiplica la amplitud de ambas imágenes y se restan las fases para formar el interferograma (Guzman et al., 2020). Esta diferencia de fase es afectada por diversas fuentes de error como lo indica la siguiente ecuación:

$$\Delta\phi = \Delta\phi_{flat} + \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{def} + \Delta\phi_{atm} + \Delta\phi_{ruido}$$

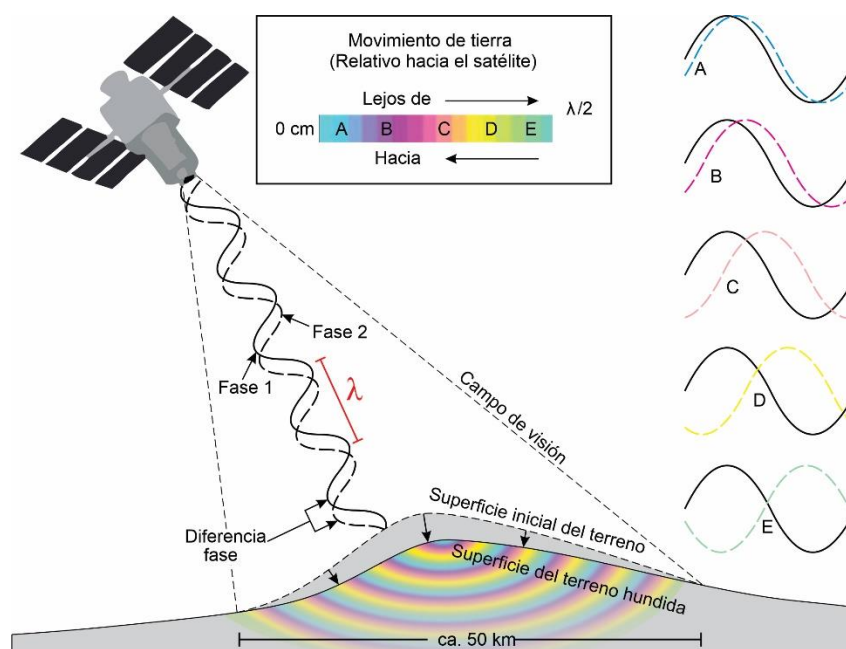
En donde $\Delta\phi_{flat}$ corresponde a la contribución en el cambio de fase producto de la curvatura de la tierra, $\Delta\phi_{topo}$ producto de la topografía, $\Delta\phi_{def}$ producto de la deformación, $\Delta\phi_{atm}$ producto de la diferencia en la humedad, presión y temperatura de la atmosfera en cada adquisición, $\Delta\phi_{ruido}$ es el ruido de fase o decorrelación (Guzman et al., 2020).

El satélite realiza un primer recorrido sobre la superficie terrestre, obteniendo las ondas de radar que son reflejadas por el terreno. Posterior a esto y dependiendo del intervalo de tiempo en que son tomadas las imágenes por las diferentes plataformas espaciales, el satélite procede a hacer un segundo recorrido, obteniendo de nuevo las señales reflejadas por el terreno. Si existen cambios en dicha superficie terrestre entre estos dos periodos de recolección de datos, lo más probable es

que se observe una diferencia de fase en las ondas de radar comparando las señales que se obtuvieron entre los dos recorridos del satélite como se observa en la **Figura 13** (Mora et al., 2019). La diferencia en fase de las ondas es utilizada para calcular el componente de movimiento de la superficie terrestre a lo largo de la línea de visión del satélite (desde o hacia el satélite), la cual se representa por medio de un ciclo de franjas de colores. Como esta técnica está basada en la diferencia de fase de múltiples ondas, su precisión se limita por las fracciones detectables de la longitud de onda (λ) del radar que se utiliza (Mora et al., 2019).

Figura 13

Representación de los fundamentos de la aplicación de InSAR.



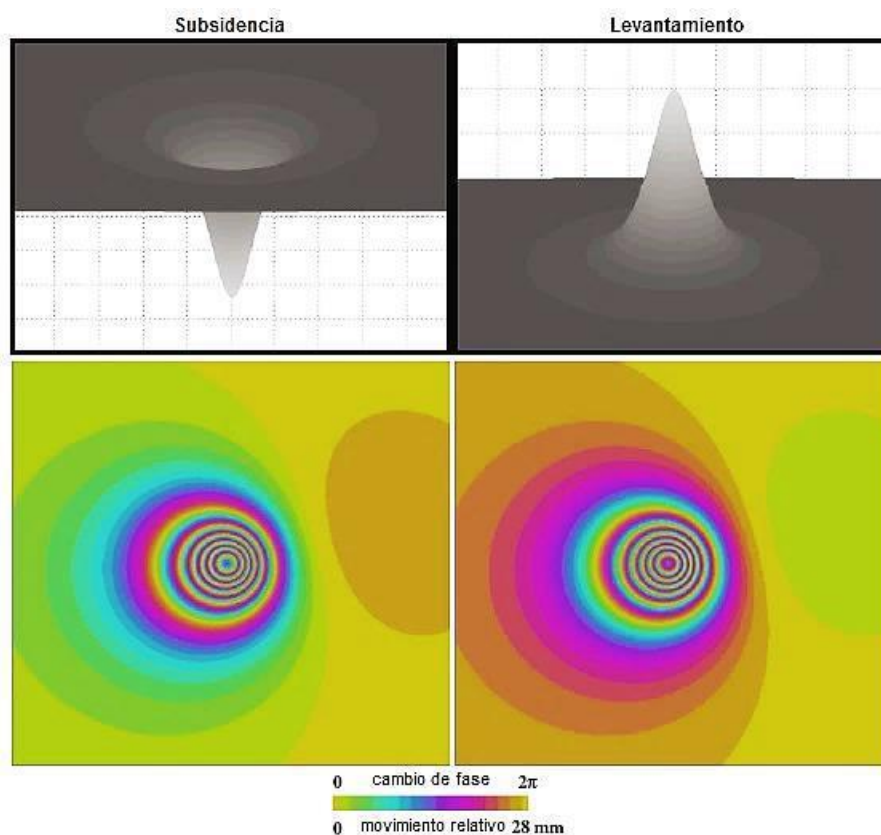
Nota: Ejemplo de representación de los fundamentos de la aplicación técnica InSAR en un caso de subsidencia. Tomado de (Mora et al., 2019).

Un interferograma el cual muestra la deformación superficial del terreno, se visualiza con un mapa de pseudo – colores. Cada franja que es representada por un color del espectro que puede ir desde azul – violeta a rojos – amarillos y verdes o viceversa, corresponde a un cambio de fase

en cierto rango (casi siempre el equivalente a una fase 2π) o a deformación en la superficie terrestre en la dirección de alcance con cierta magnitud (casi siempre la mitad del ancho de banda del SAR) (Hermosilla, 2016).

Figura 14

Representación de la visualización de una imagen InSAR.



Nota: En la imagen se observa un ejemplo de la representación y como se visualiza una imagen InSAR. Cada franja de color corresponde a 28mm de cambio en la dirección de alcance, esto corresponde a la mitad de longitud de onda en que trabaja el ERS de Envisat. Es notable que la progresión de los colores para movimientos de levantamiento es opuesta al movimiento de subsidencia. Tomado de (Hermosilla, 2016).

Una manera de realizar la interpretación del movimiento en un interferograma es observando la progresión de colores (**Figura 14**) y así discriminar la dirección del movimiento (ascendente o descendente). Entonces observando el patrón de colores desde el anillo más externo hacia el más interno; si este patrón se mueve en dirección opuesta al cambio de fase (se acorta la fase de $2\pi \rightarrow 0$) se puede decir que la superficie se está acercando al sensor, lo que se interpretaría como un movimiento ascendente (levantamiento), contrario a esto si el patrón de colores se mueve en la misma dirección que el cambio de fase (se alarga la fase $0 \rightarrow 2\pi$), se puede decir que la superficie se está alejando del sensor, lo que se interpretaría como un movimiento descendente (hundimiento)(Hermosilla, 2016).

5. Marco Geológico

En este capítulo se presenta la geología correspondiente a las áreas de estudio seleccionadas para la investigación:

5.1.Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro

Geología local

Los volcanes Chiles y Cerro Negro se encuentran sobre un sustrato del Plioceno que está afectado fuertemente por la erosión y sobre un volcán más antiguo del Plioceno inferior en el territorio de Colombia; en el área y los alrededores de ambos volcanes el basamento se encuentra muy transformado por diversos procesos hidrotermales (Sierra, 2015).

La historia de evolución de estos volcanes presenta grandes similitudes, se componen de 3 episodios cada uno, por lo que es posible sugerir que se alimentan de una misma cámara magmática; la base de cada uno de los edificios es un estratovolcán de productos que son poco

diferenciados (andesitas piroxénicas), al parecer son de edades diferentes, pero que pertenecen al Plioceno Medio (Sierra, 2015).

Los edificios volcánicos de Chiles y Cerro Negro presentan distintos episodios de actividad eruptiva efusiva, están separados por largos periodos de inactividad con actividad glacial entre estos episodios que va erosionando de forma parcial el edificio volcánico antecesor (ICEL, 1983).

Chiles I & Cerro Negro I

Este nivel se encuentra disectado por la actividad glacial, es posible observarlo hacia los bordes del edificio volcánico tanto en carretera ecuatoriana como colombiana. Los productos efusivos que pertenecen a este nivel vulcanológico corresponden a lavas con una restringida variación composicional, incluyendo solamente andesitas piroxénicas. Ocasionalmente se observa una leve desvitrificación de la matriz, una transformación mineralógica a arcilla de las plagioclasas o un leve estado de silicificación esto debido a alteración hidrotermal (ICEL, 1983).

En cuanto a Cerro Negro I, los productos lávicos se encuentran en menor cantidad que para Chiles I, estos depósitos están situados sobre una secuencia lávica del Plioceno a través de una fuerte discordancia erosiva, los materiales que predominan los andesitas piroxénicas (ICEL, 1983).

Chiles II

La formación de Chiles II tiene lugar después de un largo periodo de inactividad volcánica la cual generó erosión de Chiles I (Sierra, 2015). Este edificio volcánico se constituye por productos emitidos en la siguiente secuencia: a) Lavas dacíticas con estructura fluidal b) Lavas de composición daciandesíticas con anfíbol con estructura fluidal que indica gran viscosidad c) Lavas piroxénicas d) Lavas de composición andesíticas con olivino (ICEL, 1983).

Cerro Negro II

La emisión de los productos de Cerro Negro II tiene lugar después de un largo periodo de inactividad en donde por actividad glacial se generó erosión que ensanchó el cráter de Cerro Negro disponiéndolo hacia el norte. Los productos emitidos no se encuentran presentes en las cercanías del edificio volcánico, pero se han reportado depósitos de “ash-flow” hacia el flanco occidental, estos son de naturaleza dacítica y corresponderían aparentemente a los primeros productos emitidos; sobre este depósito “ash-flow” se encontraron lavas de composición dacítica a dacianandesítica con anfíbol (ICEL, 1983).

Es muy probable que la cámara magmática tanto para Chiles II como Cerro Negro II sea compartida ya que la composición de los productos de ambos episodios tiene un grado semejante de diferenciación (ICEL, 1983).

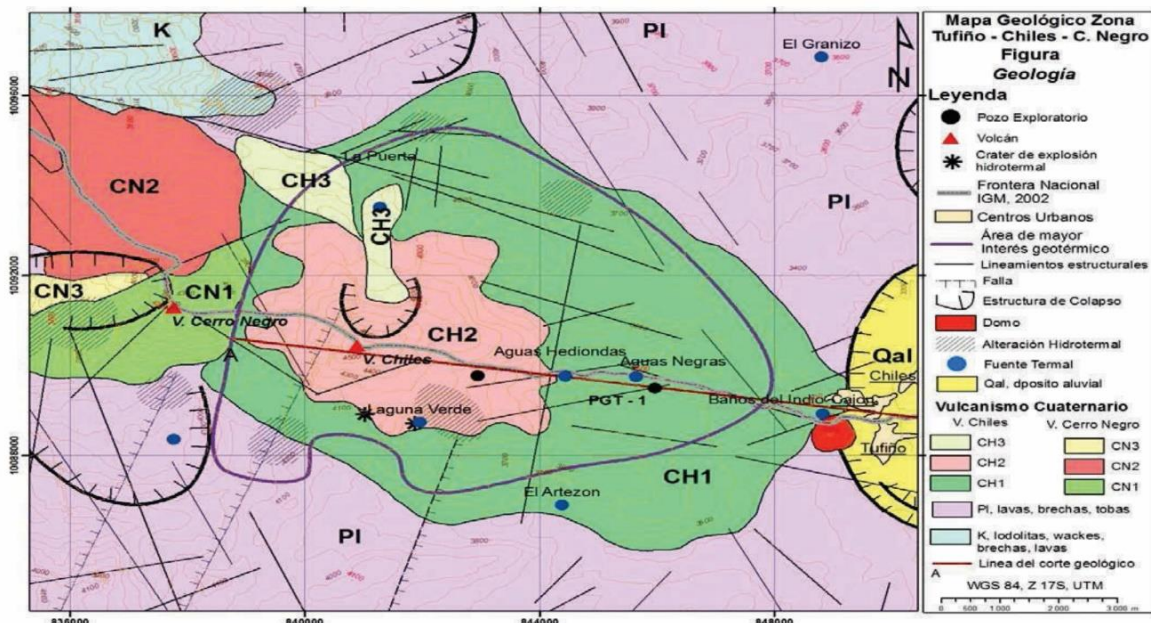
Chiles III & Cerro Negro III

Después de los eventos de Chiles II y Cerro Negro II la actividad eruptiva fue limitada a depósitos piroclásticos freatomagmáticos. En Chiles III ocurrieron pequeñas explosiones cerca a la cumbre que dieron lugar a pequeños cráteres de fondo plano constituidos principalmente por fragmentos de rocas persistentes y alguna cantidad de escoria juvenil dentro de una matriz arenolimsa, también depósitos de “ash-flow” se observan sobre el flanco sur de Chiles que están dispuestos discordantemente sobre flujos lávicos de Chiles II (ICEL, 1983).

Cerro Negro III se constituye principalmente por un flujo de bloques que descendió por el valle de salida del volcán, producto de una actividad explosiva. Los materiales observados allí son predominantemente lavas del Plioceno con una leve alteración hidrotermal (ICEL, 1983).

Figura 15

Mapa geológico zona Chiles - Cerro Negro.



Nota: Tomado de (Chancusig, 2017).

Tectónica Local

La tectónica del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro está influenciada por el proceso de subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Suramericana que ocurre hacia el occidente, parte de esta deformación presente en la región es causada por dos sistemas de fallas, una que se alinea en dirección de la cordillera y la otra en dirección transversal. Estas fallas son inferidas a partir de zonas de fracturamiento de rocas, zonas con actividad hidrotermal, cambios topográficos fuertes, lineamiento de fuentes hidrotermales, lineamiento de volcanes y lineamientos fotogeológicos (Angarita, 2016).

Varias fallas se encuentran en las cercanías de la zona de interés, tanto en parte de territorio colombiano como territorio ecuatoriano (**Figura 16**). La configuración morfológica de la zona está

controlada por un grupo de fallas de tipo inverso y transcurrente dextral con componente inverso que tienen una tendencia NNE-SSW, que están controladas por la cinemática regional de los Andes (fallas Cauca-Patía/Pallatanga-Calacalí y Romeral/Peltepec) (Telenchana, 2017). A continuación, se mencionan algunas fallas presentes en las cercanías de la zona de estudio:

Falla de San Isidro

Esta estructura corresponde a la prolongación en Ecuador del sistema de fallas Cauca – Patía la cual se extiende hasta la parte norte de Medellín en el territorio colombiano y se amortigua hacia el sur por numerosas ramificaciones en “Cola de caballo” en la región de Otavalo (Soulas et al., 1991).

La falla presenta un movimiento probable transcurrente dextral, longitud de ~11.7 km, rumbo de $N36^{\circ}E \pm 5^{\circ}$, con un desplazamiento aproximado de 0.2-1.0 mm/año. La falla se encuentra desplazando morrenas glaciares del Plioceno tardío y otros depósitos cuaternarios. Su reconocimiento se hizo mediante fotointerpretación y controles de campo (Egüez et al., 2003).

Falla El Ángel

Es una prolongación en el territorio ecuatoriano del sistema de fallas Cauca – Patía en Colombia (Soulas et al., 1991). Se puede asociar a la falla de San Isidro aunque están separadas por de 15 km (Egüez et al., 2003).

La falla presenta un movimiento probable inverso dextral, una longitud de ~26.3 km, rumbo de $N43^{\circ}E \pm 3^{\circ}$, buzando hacia el NE con ángulo desconocido, desplazamiento desconocido, pero se estima de >1 mm/año. La falla se encuentra desplazando morrenas glaciares del Pleistoceno tardío y otros depósitos cuaternarios (Egüez et al., 2003).

Falla Gauchal

Según París et al, 2000 esta estructura tiene una tendencia NE-SW y corresponde en Ecuador a la continuación del sistema de fallas Silvia – Pijao y Cauca – Almaguer que son parte del sistema Romeral en el territorio colombiano (Telenchana, 2017).

La falla presenta un movimiento probable transcurrente dextral con componente inverso, tiene una longitud de ~35 km, buzamiento alto hacia el este. La falla desplaza morrenas glaciares del Pleistoceno tardío y otros depósitos cuaternarios (Telenchana, 2017).

Falla Chiles – Cerro Negro

Es una estructura transversal que pasa por el cráter de los volcanes Chiles y Cerro Negro. Es muy probable que siga el curso del Río Chilma hacia el W y se asocia a las fuentes termales del sector de “Aguas Hediondas” en Ecuador (Bocanegra & Sánchez, 2017).

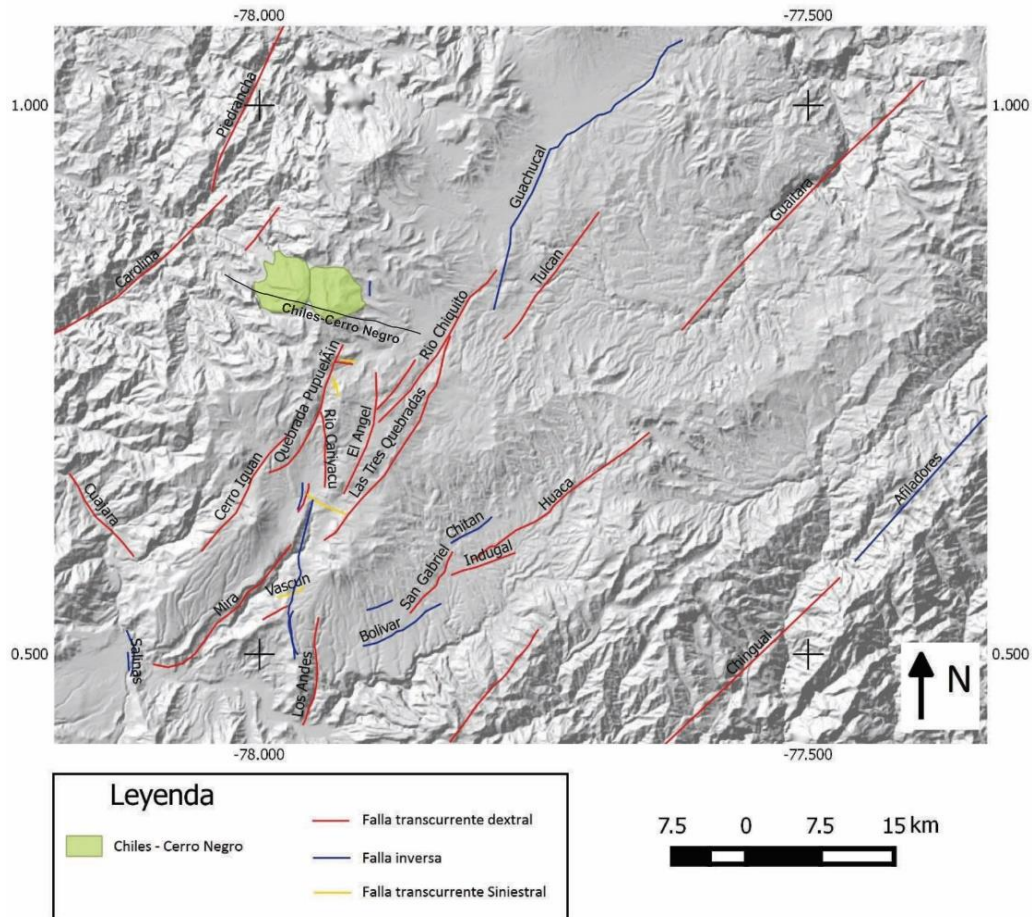
La falla no tiene una tendencia clara de movimiento, tiene una longitud de ~20 km (Telenchana, 2017). Afecta al domo de Tufiño y a las rocas del Plioceno y cuaternarias (Chancusig, 2017).

Falla Papuelán

Según Alvarado, 2012 esta estructura presenta una tendencia NE-SW y corresponde en Ecuador a la continuación del sistema de fallas Cauca – Patía en el territorio colombiano, el movimiento probable de la estructura es transcurrente dextral con componente inverso, presenta una longitud de ~15 km y se encuentra activa (Telenchana, 2017).

Figura 16

Fallas presentes en la zona del CVCCN.



Nota: En la imagen se observan los lineamientos presentes en la zona de estudio. Tomado de (Sierra, 2015).

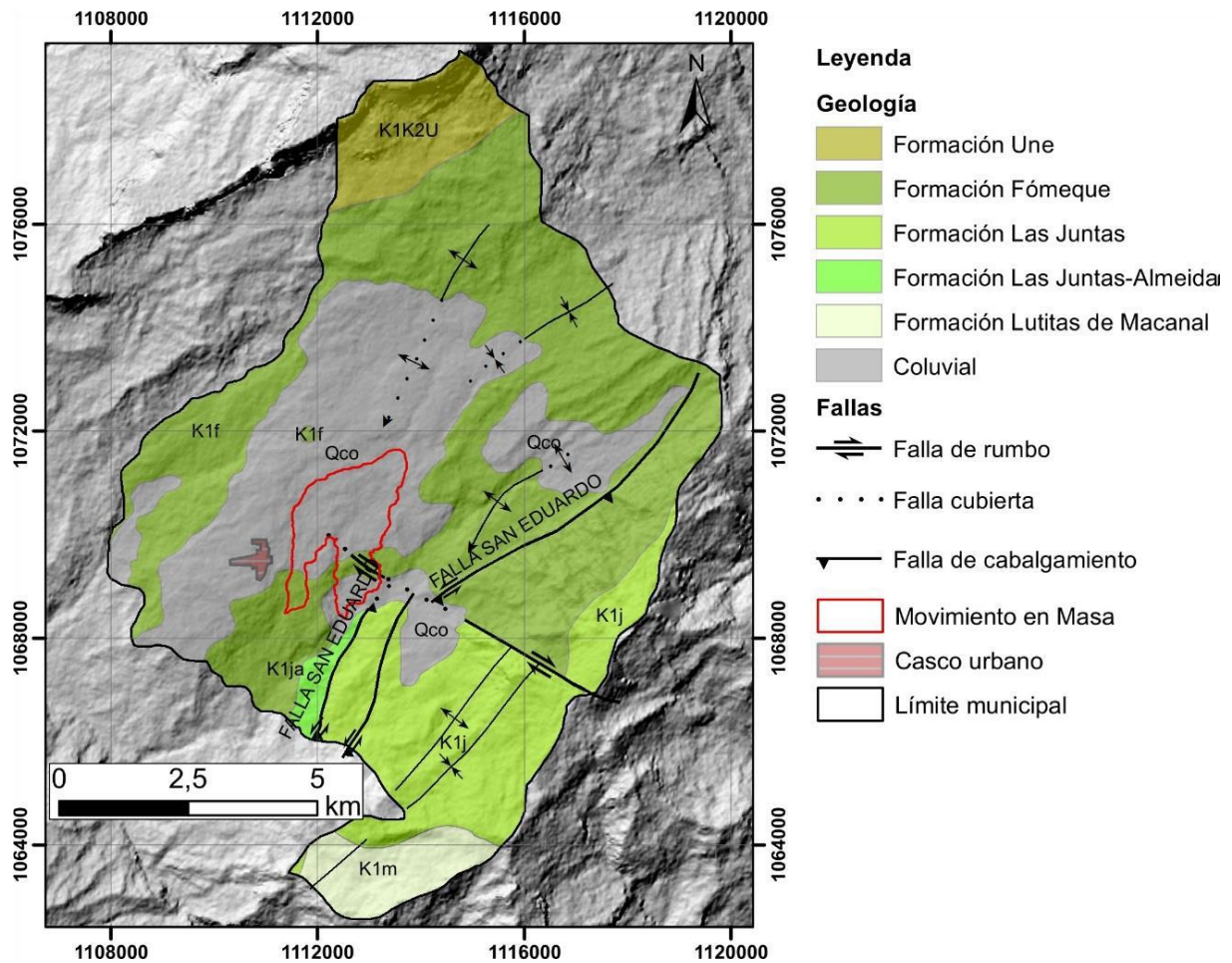
5.2. Municipio de San Eduardo, departamento de Boyacá.

La zona de San Eduardo localizada en el piedemonte oriental de la Cordillera Oriental, es una zona tectónicamente activa que muestra rocas Cretácicas debido al levantamiento y el avance de la deformación hacia los llanos orientales durante el Mioceno – Plioceno y también muestra la

acumulación de depósitos recientes producto de procesos exógenos (H. García, 2018). A continuación, se describe la estratigrafía del municipio San Eduardo:

Figura 17

Mapa geológico municipio de San Eduardo.



Nota: Mapa geológico escala 1:100 000 del municipio de San Eduardo. Tomado de (H. García, 2018).

Formación Lutitas de Macanal (K1m)

Unidad inicialmente descrita por Ulloa y Rodríguez (1975) como una secuencia de lutitas negras con esporádicas intercalaciones de calizas, areniscas y bolsones de yeso. Las lodolitas suelen estar laminadas en capas tabulares de medianas a gruesas, intercaladas con cuarzoarenitas de color gris oscuro, de grano fino a muy fino. La edad de la unidad queda en parte restringido al lapso Valanginiano – Hauteriviano (Terrazas et al., 2010).

Formación Las Juntas (K1j)

Unidad inicialmente descrita por Ulloa y Rodríguez (1975) como unos niveles arenosos separados por unos niveles lutíticos. La unidad está conformada por cuarzoarenitas gruesas a muy gruesas con presencia de moscovita. La edad de la formación las Juntas deducida de su posición estratigráfica es Hauteriviano (Terrazas et al., 2010).

Formación Fόμεque (K1f)

Lutitas gris oscuro a negras, intercaladas con margas, limolitas grises y lentes de calizas grises oscuras que a su vez están frecuentemente intercaladas con areniscas cuarzosas de grano fino a medio. La edad de la formación Fόμεque fue establecida por Hubach, E. (en Kehrer, 1993) como del Barremiano medio hasta el Aptiano Superior (Ulloa, 1975).

Formación Une (Kiu)

Areniscas cuarzosas, grises claras, de grano fino a grueso, localmente conglomeraticas; presentan estratificación cruzada fina a maciza; dentro de esta unidad se presentan intercalaciones delgadas con lutitas negras, las cuales se hacen más frecuentes hacia el techo. La edad de la formación ha sido considerada por Burgl, H (1975) y Campbell, c. (1962) como Albiano – Cenomaniano (Ulloa, 1975).

Depósitos Coluviales (Qc0)

Depósitos clasto – soportados, heterogéneos, con armazón de cantos y bloques de areniscas cuarzosas con matriz arenosa sin embargo en algunos sectores muestra tener algún contenido arcilloso. Estos suelos se encuentran distribuidos ampliamente por el municipio de San Eduardo, especialmente hacia el casco urbano. Su origen está asociado a procesos lentos de ladera y/o antiguos movimientos en masa que han transportado grandes volúmenes de material ladera abajo (H. García, 2018).

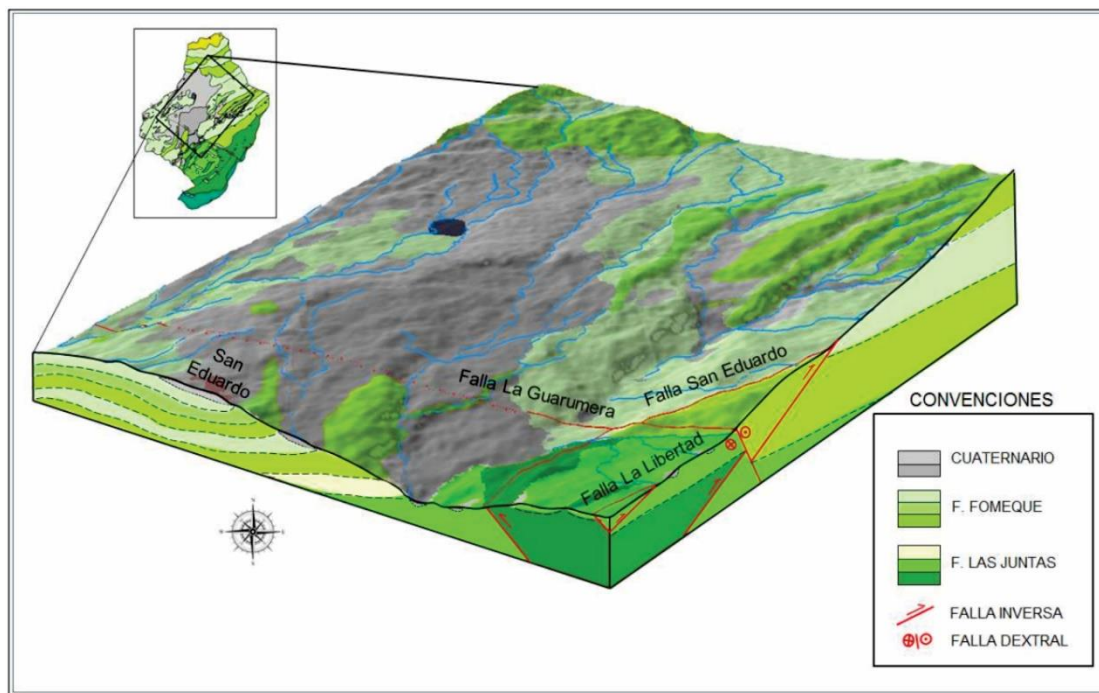
Geología estructural

Las estructuras principales presentes en el municipio son la Falla de San Eduardo, La Libertad y Guarumera:

La Falla San Eduardo corresponde en algunos sectores a una falla sinistral inversa y en otros a una falla inversa de alto ángulo, con dirección N40°E y vergencia hacia el noroccidente. Esta falla se encuentra desplazada por una falla dextral de rumbo NW – SE, moviendo dos bloques y poniendo en contacto las formaciones Lutitas de Macanal y Las Juntas. La Falla la Libertad es una falla inversa, que es considerada como una bifurcación de la falla de San Eduardo, tiene una dirección N40° -50°E. La Falla La Guarumera es una falla de rumbo dextral con dirección W-E, que se encuentra travesando al norte del municipio de San Eduardo, su trazo está cubierto por depósitos coluviales (Pérez et al., 2019).

Figura 18

Fallas presentes en el municipio de San Eduardo.



Nota: En la imagen se observa en bloque esquemático, de las fallas asociadas al municipio de San Eduardo. Tomado de (Pérez et al., 2019).

6. Metodología

En el presente capítulo se muestran los pasos que se realizaron para el procesamiento de las imágenes SAR y obtención de resultados en el desarrollo de la investigación. Inicialmente se presenta la descarga de información, seguido del procesamiento y finalmente el despliegue en software de sistemas de información geográfica.

La plataforma Alaska Satellite Facility se presenta en la **Figura 19**, esta plataforma del Instituto Geofísico de la Universidad de Alaska Fairbanks permite descargar imágenes satelitales

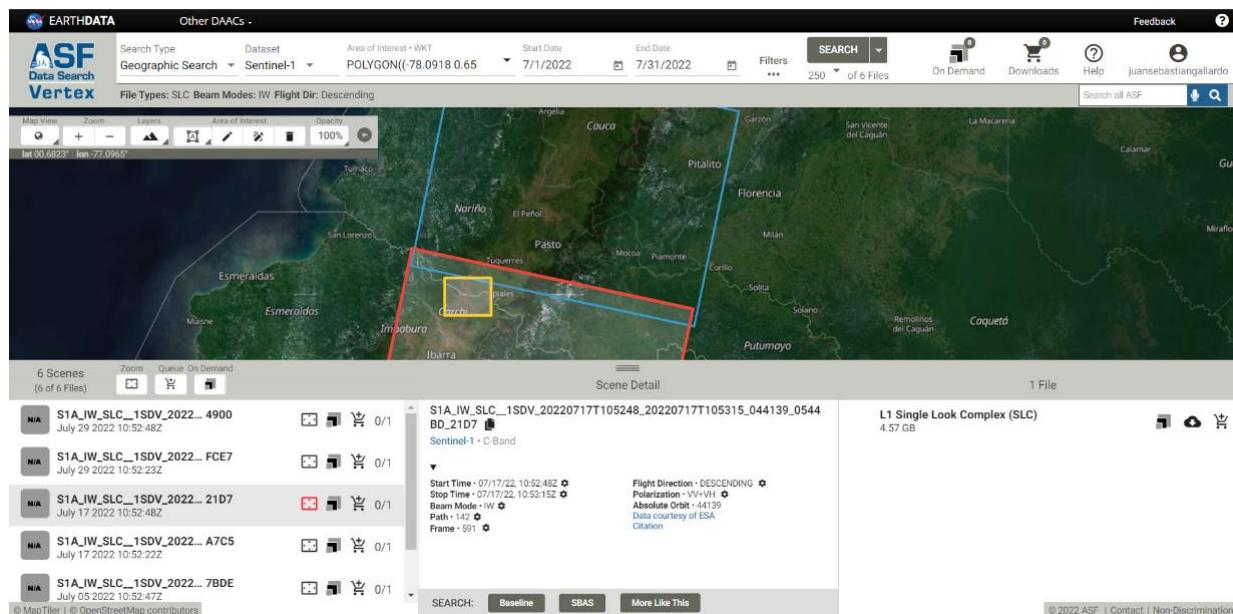
de Sentinel-1 desde el año 2014. Las imágenes descargadas pueden ser procesadas mediante el software de uso libre SNAP (Sentinel Application Platform) presentado en la **Figura 20**.

El procesamiento de los datos se realizó en un ordenador con la siguiente ficha técnica:

- Modelo del sistema: Acero Nitro AN515-54
- Sistema operativo: Windows 10 pro 64 bits
- Procesador: Intel® Core™ i5-9300H CPU @ 2.40GHz, 2400 Mhz
- Tarjeta gráfica: NVIDIA GeForce GTX 1050
- Memoria RAM: 8.00 GB

Figura 19

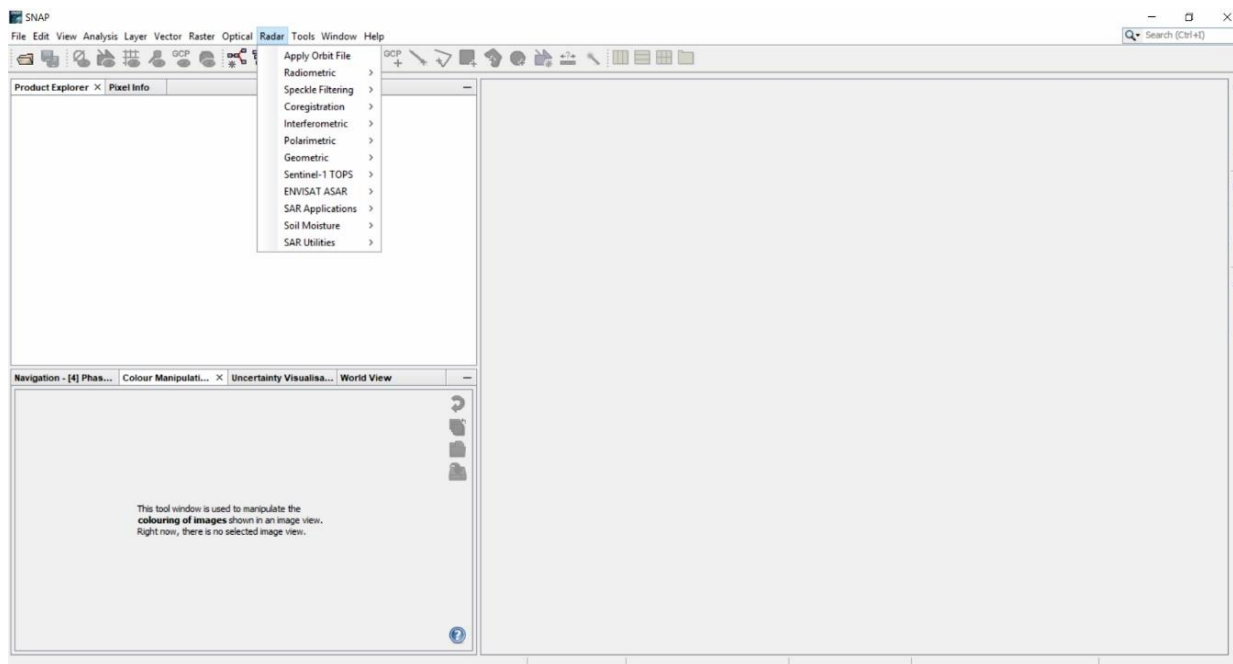
Referencia de la pantalla principal de la plataforma Alaska Satellite Facility.



Nota: En la figura se observa el visor de la página Alaska de donde serán descargadas las imágenes SAR para su posterior procesamiento.

Figura 20

Referencia de la pantalla principal del software SNAP.

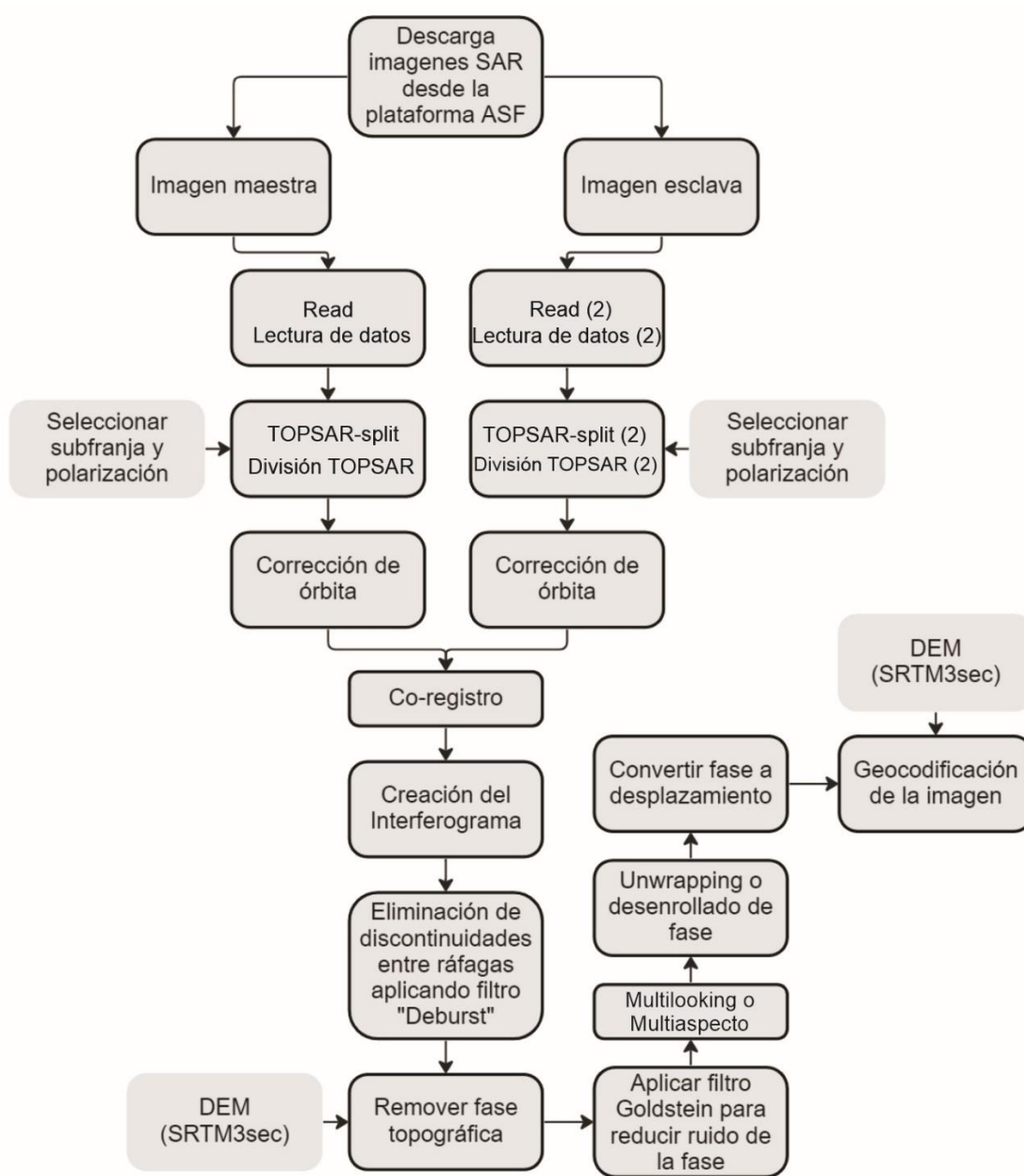


Nota: En la figura el visor del software SNAP, se observa la pestaña “Radar” desplegada ya que por allí se realizan todos los pasos necesarios para el procesamiento de las imágenes.

El procesamiento de las imágenes se realizó con la guía del manual de la ESA (2021), Sentinel-1 Toolbox Tops Interferometry Tutorial (Veci, 2015) y con la serie de seminarios de Radar de Apertura Sintética producidos por la NASA en su programa ARSET (Applied Remote Sensing Training). En la **Figura 21** se muestran los pasos que deben ser realizados en el procesado de las imágenes SAR:

Figura 21

Esquema de la metodología aplicada para el procesamiento de las imágenes SAR.



Nota: En la figura se observa el paso a paso aplicado para realizar el procesamiento y la obtención de resultados de las imágenes SAR en el software libre SNAP de la European Space Agency (ESA). Adaptado de (Alpala & Erazo, 2021).

6.1. Obtención de datos

La descarga de las imágenes SAR se realiza en la plataforma Alaska Satellite Facility, es necesario registrarse para poder realizar las descargas. Una vez hecho el registro se debe ubicar en el mapa del visor el área de interés, posterior a esto en la sección de filtros se procede a poner las fechas dentro de las cuales ocurrió el evento de interés. Para el evento del sismo ocurrido el 25 de julio del 2022 en el área del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro, se seleccionó el par de imágenes correspondientes al 17 de julio del 2022 como la fecha antes del evento y el 29 de julio del 2022 como la fecha posterior al evento. Para el evento que corresponde al movimiento en masa en el municipio de San Eduardo en Boyacá se seleccionaron el par de imágenes correspondientes al 26 de octubre del 2018 y 07 de noviembre del 2018.

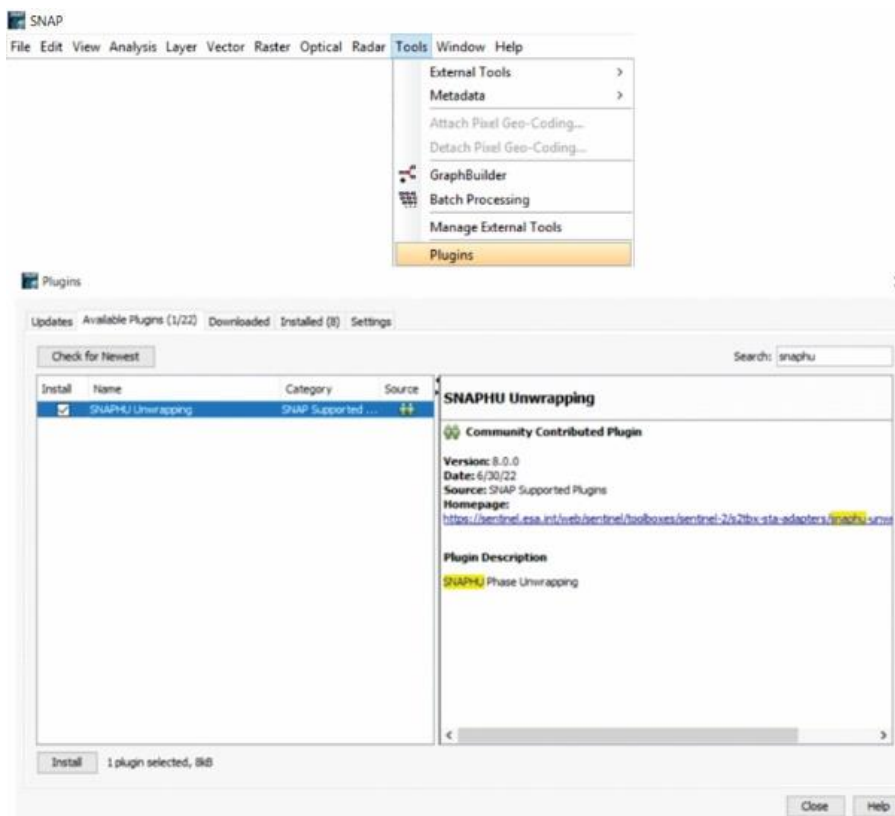
Otros filtros adicionales que se tienen en cuenta son el tipo de archivo que debe ser SLC (Single Look Complex) pues es el formato de procesamiento del software y el que contiene información acerca de la fase; el “modo de barrido” para adquirir los datos que debe ser IW (Interferometric Wide Swath), el cual captura tres subfranjas por medio del método TOPSAR o Método de Observación del Terreno con Escáner SAR Progresivo (Gómez, 2022); y un último filtro corresponde a la dirección de órbita descendente. Es importante tener en cuenta que ambas imágenes tengan el mismo “Path” y “Frame” adicional a las características ya mencionadas.

6.2. Descarga e instalación de SNAP y SNAPHU

El software SNAP en su versión 9.0.0 se puede descargar directamente desde la plataforma de la ESA, allí se encuentran las opciones necesarias para descargar en distintos sistemas operativos, en este caso se utilizó la versión para Windows 64-Bit junto con la herramienta Sentinel Toolboxes. Dentro del software en la sección de complementos se debe instalar el plugin SNAPHU

ya que este facilitara el paso de unwrapping o desenrollado de la fase en el procesamiento de las imágenes, terminada la instalación del complemento se procede a reiniciar el programa.

Figura 22
Referencia pasos para instalación plugin SNAPHU.



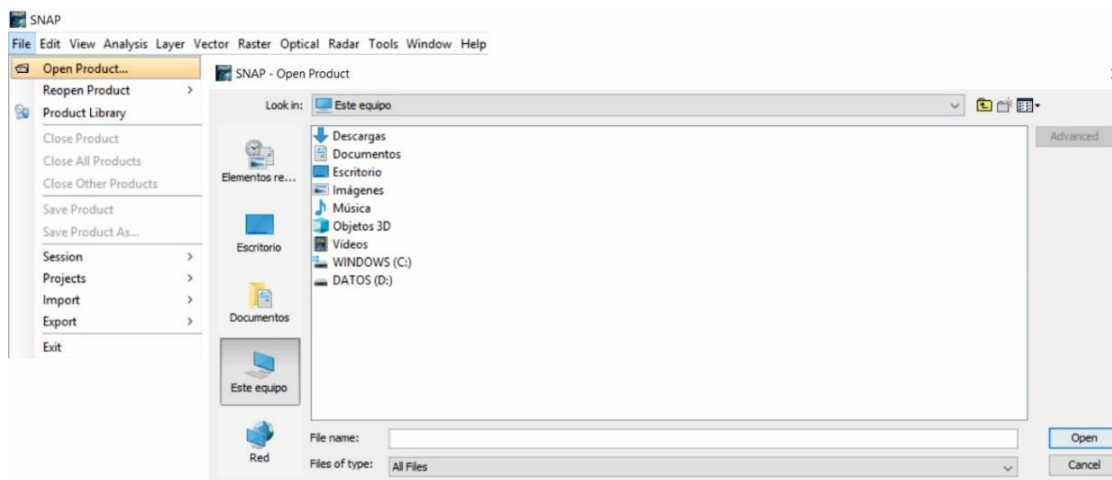
Nota: En la figura se observa la referencia del visor del software de como se debe realizar la instalación del plugin SNAPHU.

6.3.Importar Imágenes SAR

Para comenzar con el procesamiento de las imágenes en el software SNAP primero se debe cargar el par de imágenes seleccionadas para el estudio, como se ve en la **Figura 23**.

Figura 23

Referencia pasos para importar las imágenes SAR.



Nota: Las imágenes se abren desde la sección file → open product y se debe explorar en el equipo el lugar donde fueron guardadas. Se debe abrir el archivo comprimido tal cual como se descargó.

6.4.Co-registro de imágenes

Para la formación de un interferograma y poder aprovechar la diferencia de fase de cada adquisición primero se debe crear un producto o “stack” que contenga ambos archivos. Este registro en conjunto alinea ambos archivos con una precisión de subpíxeles utilizando estadística de imágenes (Veci, 2015). Una vez abierta la ventana de co-registro se deben configurar los siguientes parámetros:

Read: Primero es necesario ubicar el par de imágenes. En el apartado “Read” se debe cargar la imagen maestra es decir la imagen que tiene fecha antes del evento de interés; luego en el apartado “Read (2)” se carga la imagen esclava la cual corresponde a la fecha después del evento.

TOPSAR-Split: Luego en los apartados “TOPSAR- Split” y “TOPSAR- Split (2)”, como se hizo mención anteriormente el “modo de barrido” IW captura tres subfranjas (IW1, IW2, IW3)

con el método TOPSAR o Método de Observación del Terreno con Escáner SAR Progresivo (Gómez, 2022). y aquí se debe elegir la subfranja de la imagen en donde se encuentra ubicada la zona de interés y la polarización (cada subfranja y tipo de polarización depende del objetivo y la zona de cada estudio en específico) como se muestra en la **Figura 24**.

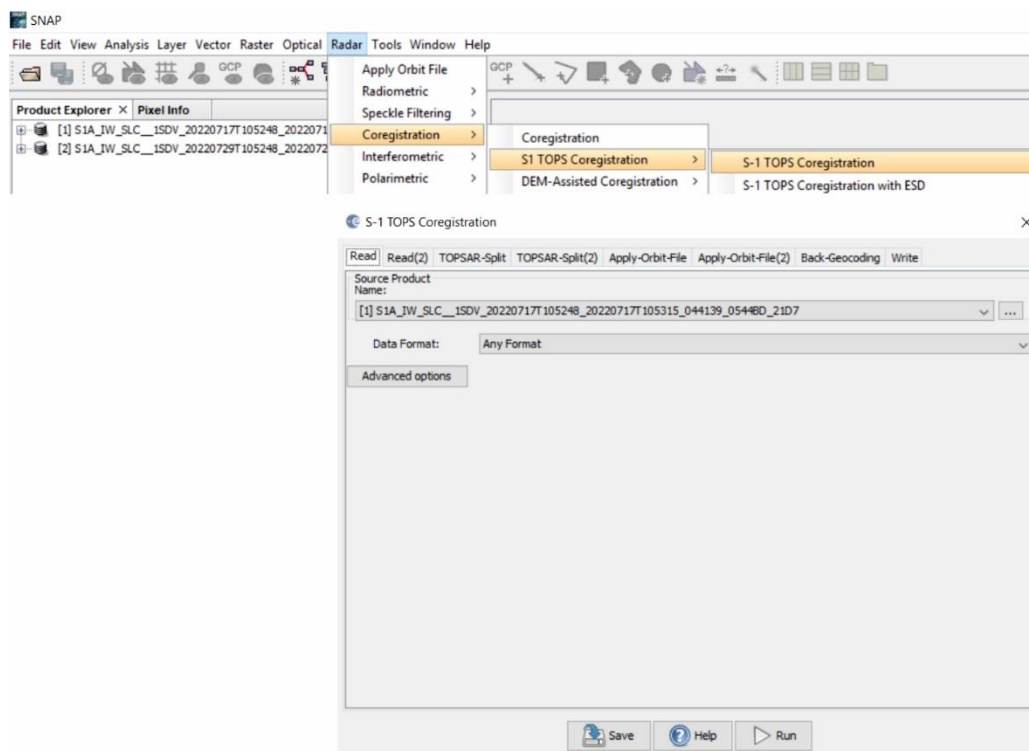
Apply-Orbit-File: Es necesario descargar datos complementarios de orbita que contienen información relacionada a la posición del satélite durante la captura de los datos de las imágenes. El software SNAP realiza esta descarga de forma automática por lo que es recomendable dejar los parámetros en este apartado como están por defecto (Veci, 2015).

Back-Geocoding: En este apartado se tiene el registro de los dos productos que están en conjunto divididos en función de la información de la órbita que fue incorporada en el paso anterior, además de la información de un DEM (Modelo de Elevación Digital), es recomendable dejar estos parámetros como están por defecto.

Write: Finalmente se procede a ubicar en el directorio el lugar en donde será guardado el archivo al terminar el procesamiento. Archivo el cual tendrá al final del nombre la extensión “Orb_Stack”.

Figura 24

Referencia pasos para el co-registro de imágenes SAR.



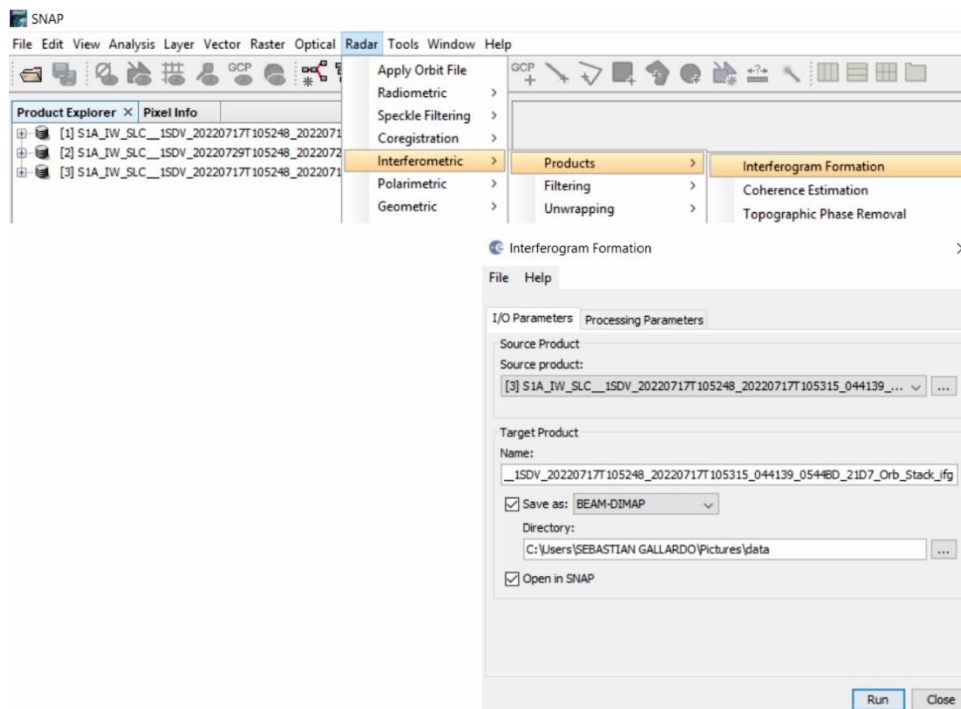
Nota: Para el co-registro es necesario ingresar a Radar→Coregistration→S1 TOPS Coregistration→S-1 TOPS Coregistration tal cual se observa en la figura de referencia del visor del software SNAP.

6.5. Creación del Interferograma y Coherencia

La formación de un interferograma se da al multiplicar en cruz la imagen maestra con el complejo conjugado de la imagen esclava. La coherencia entre la imagen maestra y esclava es un indicador de la calidad de la información de la fase, indica esencialmente si estas imágenes tienen grandes similitudes y, por consiguiente, son aptas para el procesamiento interferométrico (Veci, 2015) el proceso descrito está en la **Figura 25**.

Figura 25

Referencia pasos para la creación de interferograma.

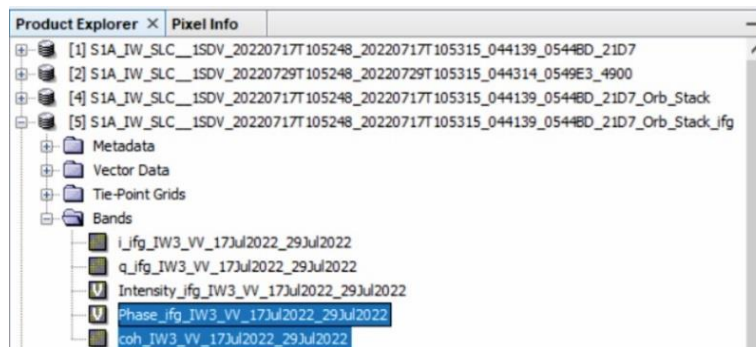


Nota: Para la formación del interferograma es necesario ingresar a Radar→Interferometric→Products→Interferogram Formation, una vez allí en “Source Product” se selecciona el archivo creado en el paso anterior, se dejan los demás parámetros como están por defecto y se procede a iniciar con el procesamiento; el archivo resultante tendrá al final del nombre la extensión “ifg” y dentro de este archivo, abriéndolo en el navegador de productos del software encontraremos una carpeta llamada “Bands” en la cual estará la fase y la coherencia formada.

La **Figura 26** presenta el explorador de los productos obtenidos con las carpetas organizadas en donde se crearon los elementos interferograma y coherencia.

Figura 26

Archivos del interferograma con la carpeta que contiene la fase y coherencia.



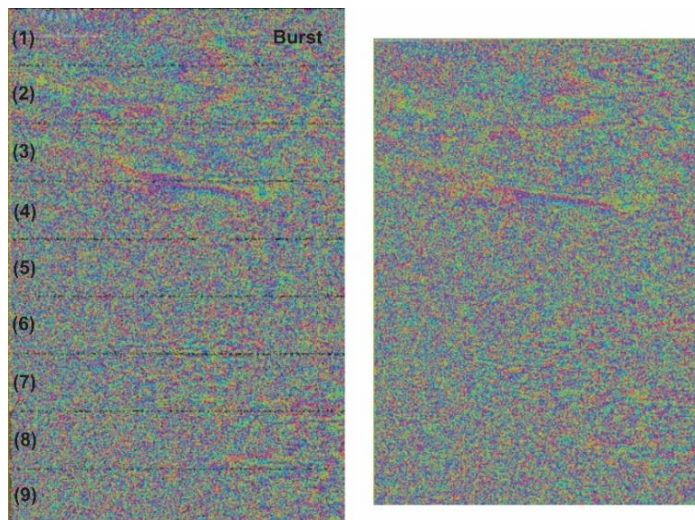
Nota: En la figura se observa la referencia del visor del software SNAP en la sección de “product explore” que contiene las carpetas y subcarpetas en donde se van exportando los productos obtenidos con cada paso del procesamiento.

6.6. Aplicación filtro “Deburst”

Al momento de hacer la adquisición de datos con el modo Interferometric Wide Swath (IW), se generan nueve ráfagas o burst, como se observa en la **Figura 27**. Entre una y otra de las ráfagas aparecen discontinuidades o poco acoplamiento, esta anomalía se debe a movimientos en el satélite al momento de capturar los datos o a variaciones ocurridas durante la misma captura de la información provocada por alteraciones de frecuencia a causa del efecto doppler (Garcés, 2020). En la **Figura 28** se presenta el proceso para aplicar el filtro “Deburst”.

Figura 27

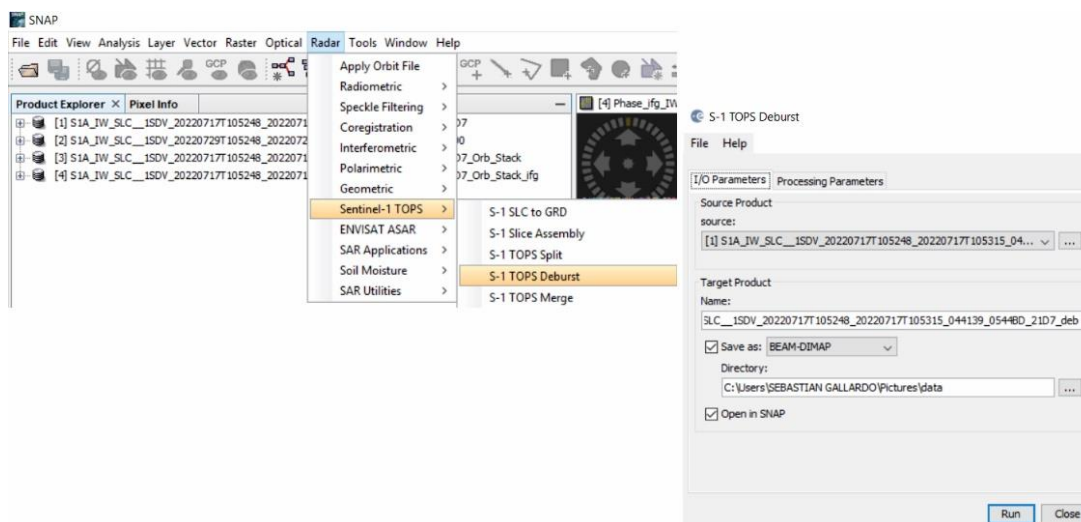
Discontinuidad de ráfagas observadas en un interferograma.



Nota: En la imagen izquierda se observan las discontinuidades entre las ráfagas y a la derecha la imagen procesada después de aplicar el filtro Deburst.

Figura 28

Referencia pasos para la aplicación del filtro Deburst.



Nota: Para aplicar el filtro Deburst es necesario ingresar a Radar→Sentinel-1 TOPS→S-1 TOPS Deburst, una vez allí en “Source Product” se selecciona el archivo creado en el paso anterior, no

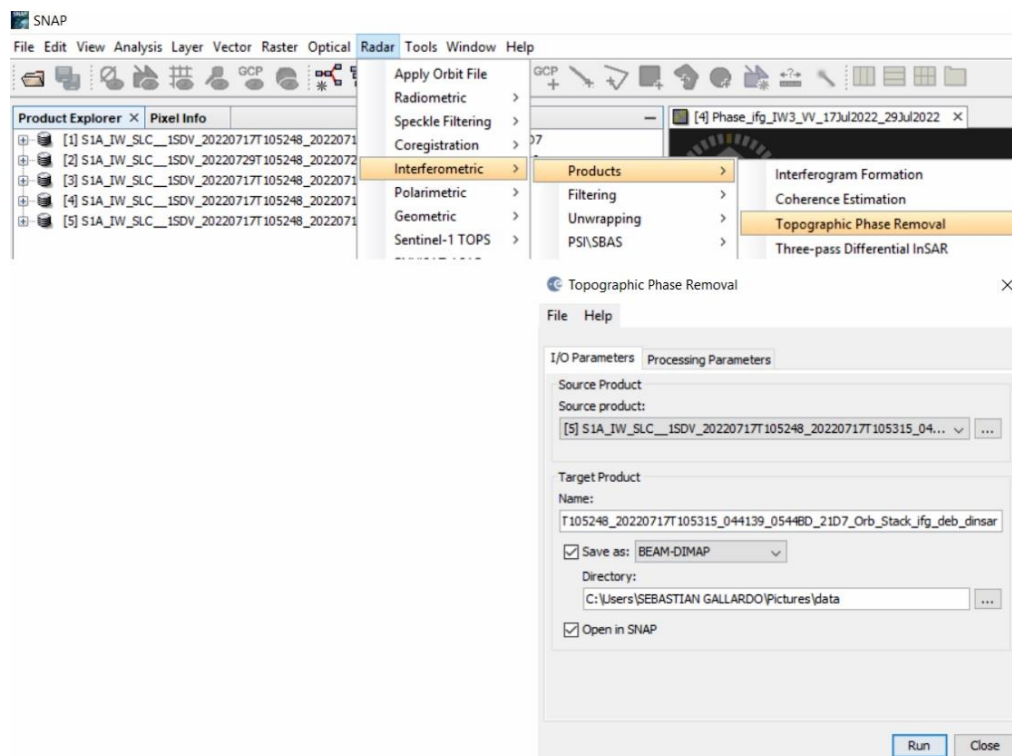
hay parámetros para modificar y se procede a iniciar con el procesamiento; el archivo resultante tendrá al final del nombre la extensión “deb”.

6.7. Sustraer topografía

La fase interferométrica está compuesta de distintos factores a los cuales es sensible, entre estos la fase topográfica (ϕ_{topo}). Esta fase que se genera por la topografía del terreno es removida en esta etapa del procesamiento para aislar el movimiento inducido entre ambas imágenes; mediante un Modelo de Elevación Digital, que es descargado automáticamente por el software, se calcula y se modela esta fase topográfica (Hermosilla, 2016), en la **Figura 29** se presenta el proceso para sustraer la topografía.

Figura 29

Referencia pasos para sustraer topografía.



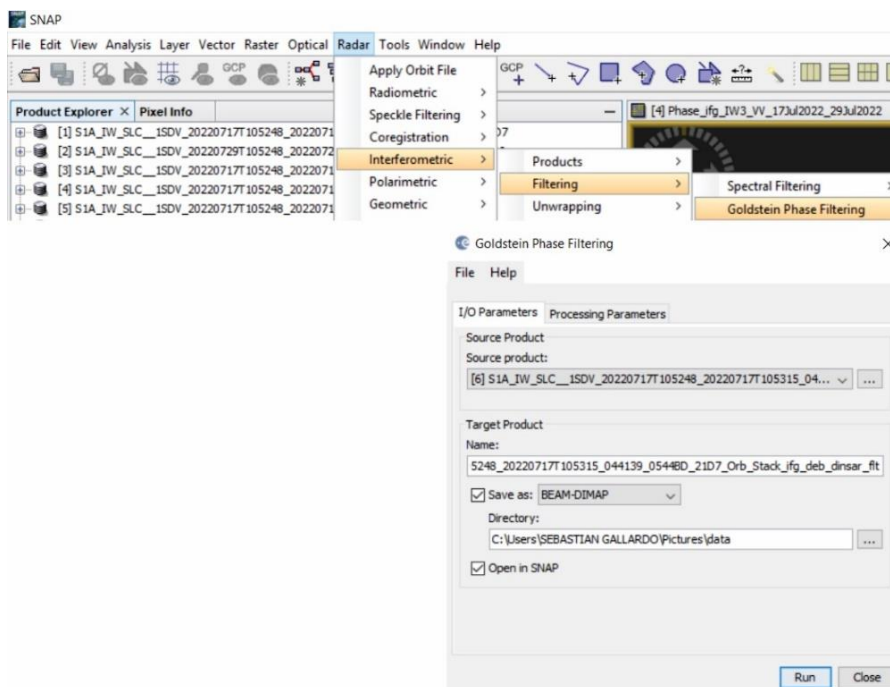
Nota: Para sustraer la fase topográfica es necesario ingresar a Radar→Interferometric→Products→Topographic Phase Removal, una vez allí en “Source Product” se selecciona el archivo creado en el paso anterior; en la sección de “Processing Parameters” es posible elegir otro DEM de descarga automática por el software o importar uno desde un archivo extern. Se dejan los parámetros como vienen por defecto y se procede a iniciar con el procesamiento; el archivo resultante tendrá al final del nombre la extensión “dinsar”.

6.8.Aplicar filtro Goldstein

La fase interferometrica obtenida hasta ahora puede verse afectada por ruido o distorsiones producto de la decorrelacion temporal, geometría de la línea base, entre otros errores aleatorios posiblemente generados en los procesos anteriores. La información de la fase en las áreas que presentan esta decorrelacion no se puede reponer, pero si es posible aumentar la calidad de las franjas existentes en el interferograma por medio de la aplicación de filtros de fase especializados como el filtro de Goldstein (Veci, 2015). Este filtro adaptativo, reduce de forma drástica el ruido de la fase y de esta manera mejora la precisión de la medición, así como también facilita el desenvolvimiento de la fase para los pasos siguientes, demostrando al tiempo una degradación significativa en las regiones de ruido puro (Goldstein & Werner, 1998), en la **Figura 30** se presenta el proceso para aplicar el filtro Goldstein.

Figura 30

Referencia pasos para aplicar filtro Goldstein.



Nota: Para aplicar el filtro de Goldstein es necesario ingresar a Radar→Interferometric→Filtering→Goldstein Phase Filtering, una vez allí en “Source Product” se selecciona el archivo creado en el paso anterior; se dejan los demás parámetros como están por defecto y se procede a iniciar con el procesamiento; el archivo resultante tendrá al final del nombre la extensión “flt”.

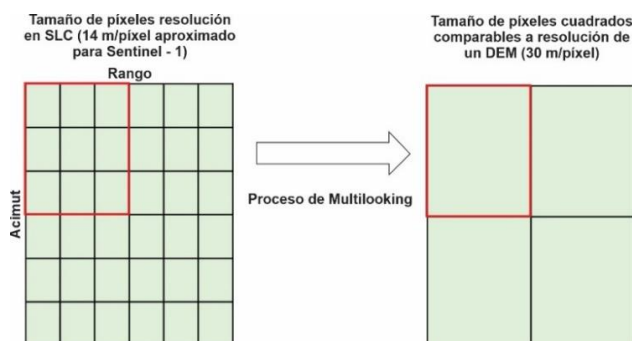
6.9. Aplicación de Multilooking

El “Multilooking” se refiere a hacer el cálculo del promedio a varios pixeles en cada dirección, los ingenieros de radar suelen llamarlo “darle varias miradas” o varios “looks”. Esto se realiza generando múltiples “looks”, haciendo el promedio del rango con las celdas en el rango acimutal mejorando así la resolución radiométrica, pero disminuyendo la resolución espacial. El resultado de este proceso son pixeles de mayor tamaño, como se observa en la **Figura 31** y esto

va a reducir la cantidad de ruido significativamente. La cantidad de multilooking que se debe aplicar depende de la resolución espacial que se necesita para cada caso en particular (Garcés, 2020; Pinto, 2018), en la **Figura 32** se presenta el proceso para realizar el Multilooking.

Figura 31

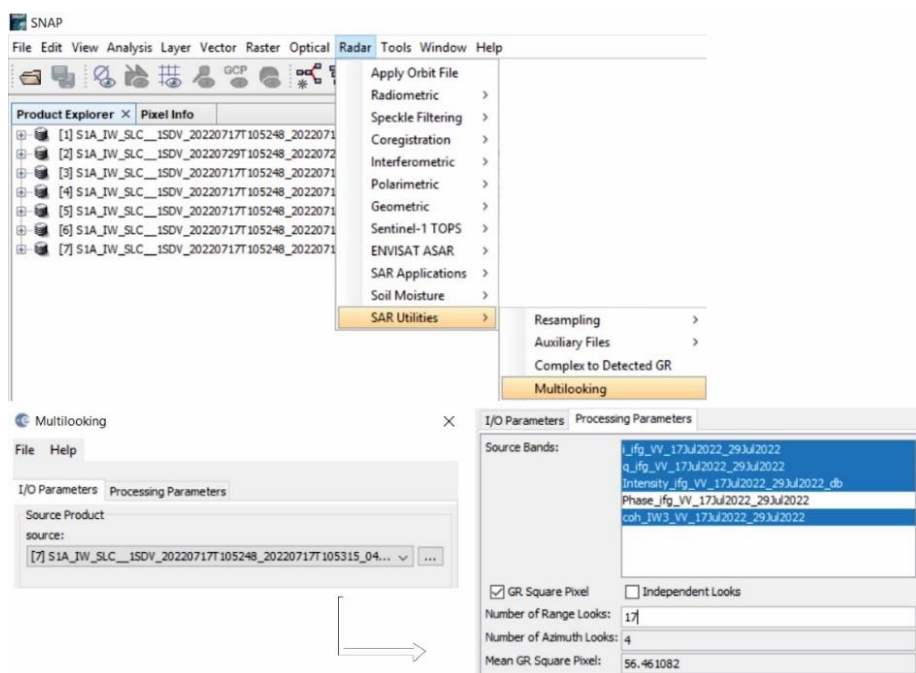
Proceso de Multilooking.



Nota: Adaptado de (Garcés, 2020).

Figura 32

Referencia de pasos para aplicar Multilooking.

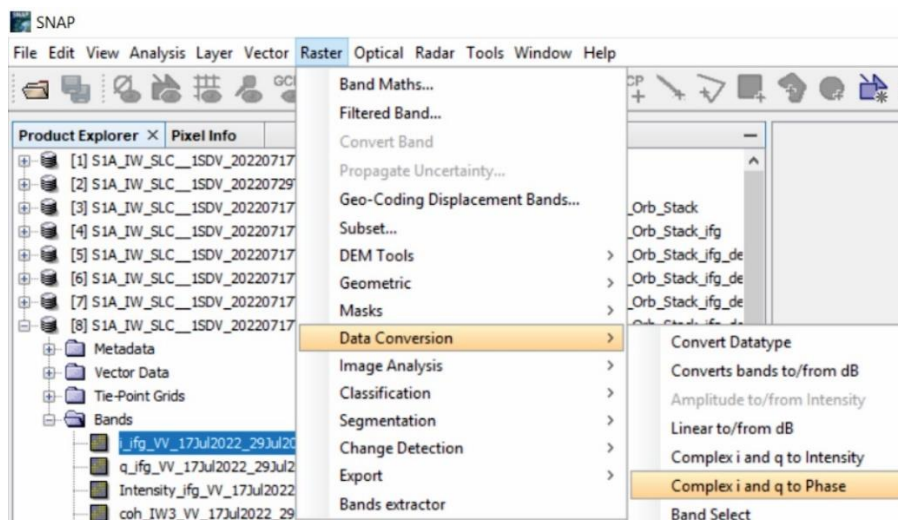


Nota: Para aplicar el Multilooking es necesario ingresar a Radar→ SAR Utilities→Multilooking, una vez allí en “Source Product” se selecciona el archivo creado en el paso anterior; en la sección de Processing Parameters se deben seleccionar todos los archivos menos el de la fase, ya que no se obtendrán buenos resultados al aplicar el Multilooking a la fase enrollada, de igual manera el número de “Looks” en la dirección del rango para el caso de estudio será de 17, automáticamente el software calcula el número de “Looks” en la dirección del acimut para obtener pixeles cuadrados; posterior a esto se procede a iniciar con el procesamiento; el archivo resultante tendrá al final del nombre la extensión “ML”.

Al finalizar el procesamiento del Multilooking, es necesario crear las bandas de fase e intensidad como se observa en la **Figura 33**, ya que en el archivo con extensión “ML” formado en este paso, en la carpeta de bandas no se encuentran la fase y la intensidad.

Figura 33

Referencia pasos para crear bandas de fase e intensidad.



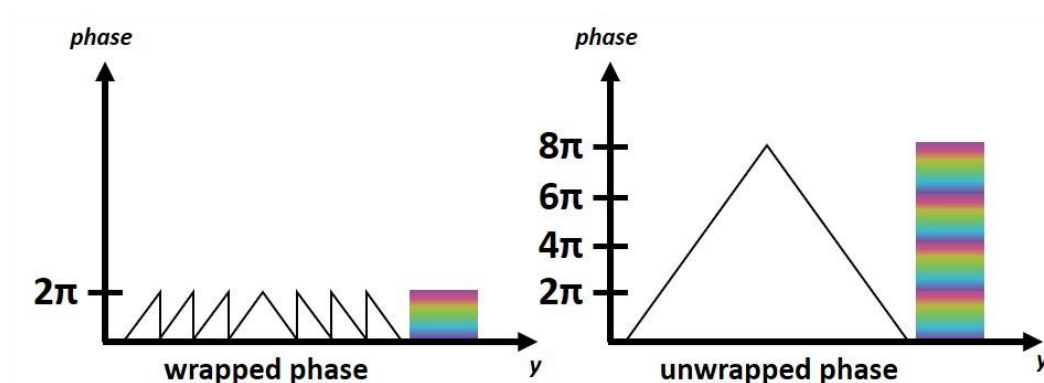
Nota: Para la creación de las bandas es necesario ir a Raster→Data Conversion→Complex i and q to Phase y automáticamente se creará la fase (repetir el procedimiento para convertir la intensidad).

6.10. Unwrapping o desenrollado de fase

La fase interferométrica enrollada es ambigua ya que solo se conoce dentro de la escala 2π como se observa en la **Figura 34**. Para hacer la relación de la altura topográfica con la fase interferométrica primero se debe hacer el procedimiento de “Unwrapping” o desenrollado de fase. Este procedimiento de desenrollar la fase resuelve esta ambigüedad ya que integra la diferencia de fase entre los pixeles vecinos (Veci, 2015).

Figura 34

Principio de desenrollado de fase.



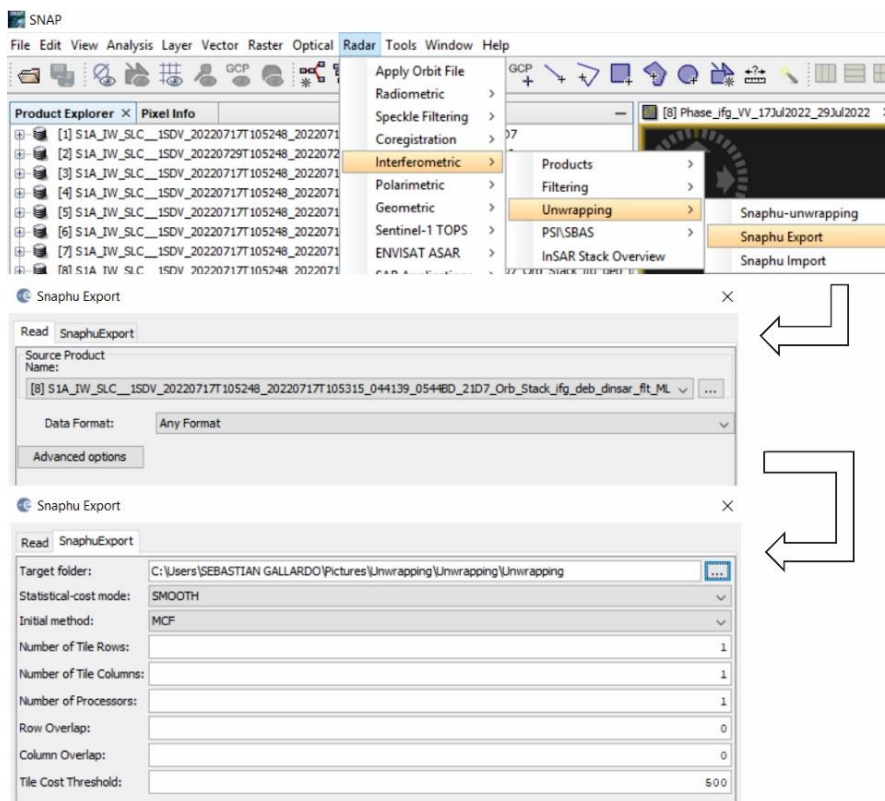
Nota: Tomado de (Veci, 2015).

Exportar

Para realizar el desenrollado de fase se necesita tener instalado el plugin de SNAPHU (procedimiento explicado al principio del capítulo). Primer paso para el desenrollado es exportar la imagen, este proceso se observa en la **Figura 35**.

Figura 35

Referencia pasos exportar imagen para el desenrollado.



Nota: Para exportar la imagen es necesario ingresar a Radar→Interferometric→Unwrapping→Snaphu Export, una vez allí en “Source Product” se selecciona el archivo creado en el paso anterior (Multilooking); en la sección “SnaphuExport” se modifican los parámetros de “Statistical-cost-mode” a SMOOTH y en “Number of the Rows, Columns y Processors” se asignan valores de 1.

Al finalizar el procesamiento en la carpeta que seleccionamos para guardar, se exportaran los archivos como se observan en la **Figura 36**. Se tiene solo un archivo de “UnwPhase...” ya que el archivo con extensión “imagen de disco” se creará en el siguiente paso al realizar el desenrollado de fase.

Figura 36

Archivos producto de exportación para el desenrollado.

Nombre	Tipo
coh_IW3_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo HDR
coh_IW3_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo de imagen de disco
Phase_ifg_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo HDR
Phase_ifg_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo de imagen de disco
snaphu	Archivo CONF
UnwPhase_ifg_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo HDR

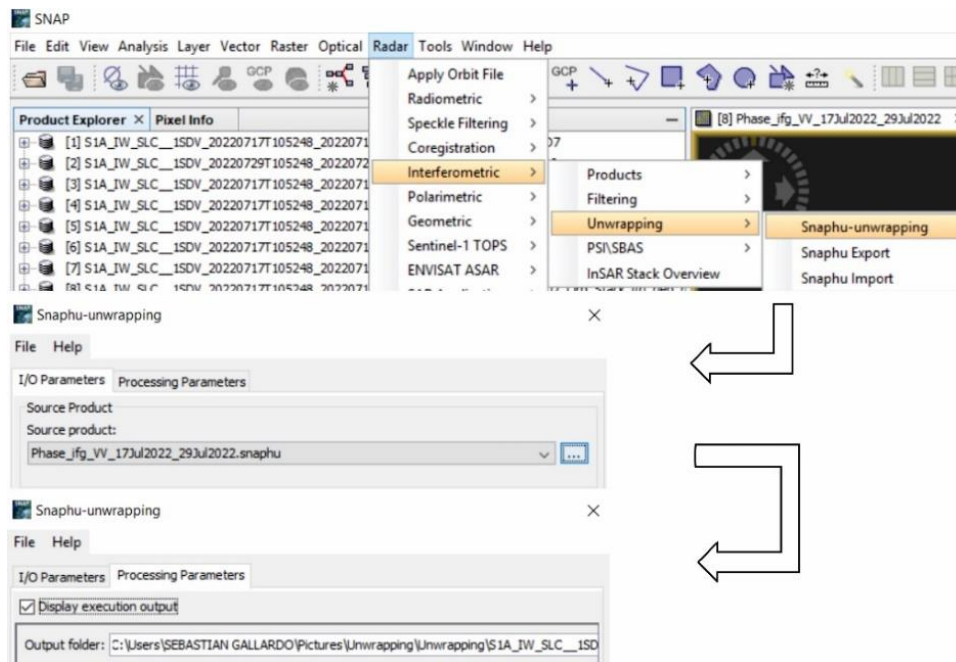
Nota: En la figura se observan los archivos obtenidos en el proceso de exportar la imagen tal cual como se guardan en la carpeta del sistema seleccionada.

Desenrollar (Unwrapping)

Con la imagen exportada se puede iniciar el segundo paso del procesamiento de desenrollado como se observa en la **Figura 37**.

Figura 37

Referencia pasos para el desenrollado de fase.










Nota: Para realizar el “Unwrapping” es necesario ingresar a Radar→Interferometric→Unwrapping→Snaphu-unwrapping, una vez allí en la sección “I/O Parameters” se debe buscar la carpeta en donde están los archivos exportados en el paso anterior y seleccionar el archivo de la fase con extensión “HDR”, en la sección “Processing Parameters” debemos seleccionar como carpeta de salida la misma en donde están los archivos exportados anteriormente, para finalizar se procede a correr el procesamiento.

Al finalizar el proceso tendremos el archivo de la fase desenvuelta con extensión “imagen de disco” como se observa en la **Figura 38**.

Figura 38

Archivo producto del desenrollado de fase.

Nombre	Tipo
 coh_IW3_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo HDR
 coh_IW3_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo de imagen de disco
 Phase_ifg_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo HDR
 Phase_ifg_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo de imagen de disco
 snaphu	Archivo CONF
 UnwPhase_ifg_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo HDR
 UnwPhase_ifg_VV_17Jul2022_29Jul2022.snaphu	Archivo de imagen de disco

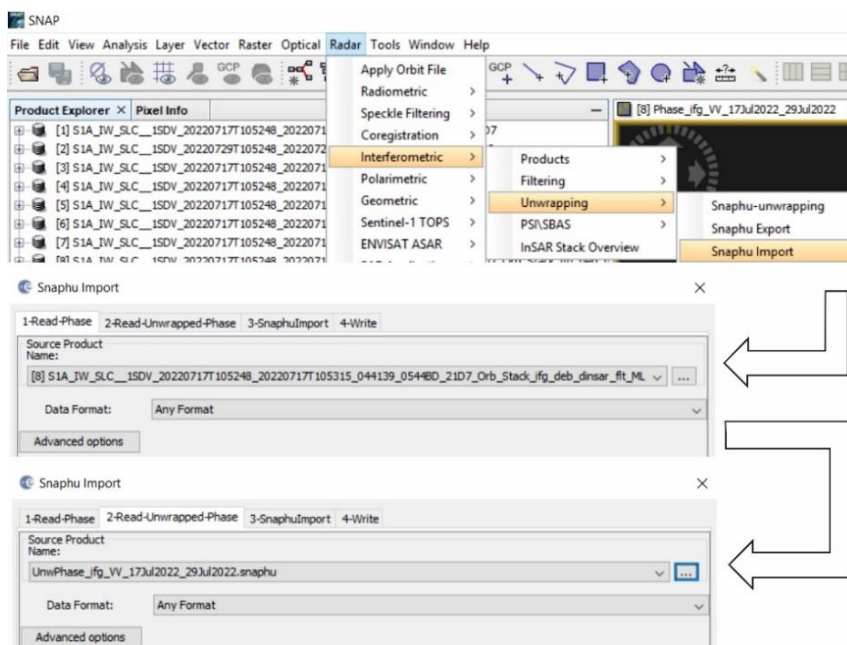
Nota: En la figura se observa el archivo de la fase desenrollada obtenido en el proceso de “Unwrapping” como es guardado en la carpeta del sistema seleccionada.

Importar

Por último, el tercer paso del “Unwrapping” es importa el archivo con la fase desenrollada siguiendo el proceso mostrado en la **Figura 39**.

Figura 39

Referencia pasos para importar fase desenrollada.



Nota: Para importar la imagen es necesario ingresar a Radar→Interferometric→Unwrapping→Snaphu Import, en la sección “Read-Phase” se selecciona el archivo con el Multilooking; en “Read-Unwrapped-Phase” se selecciona el archivo “Unwphase...” con extensión “HDR” (es importante que tanto el archivo de la fase desenrollada con extensión .hdr como el archivo con extensión .img estén en la misma carpeta); en la sección “Write” es aconsejable agregar al nombre del archivo final la extensión “unw” y se procede a importar la imagen.

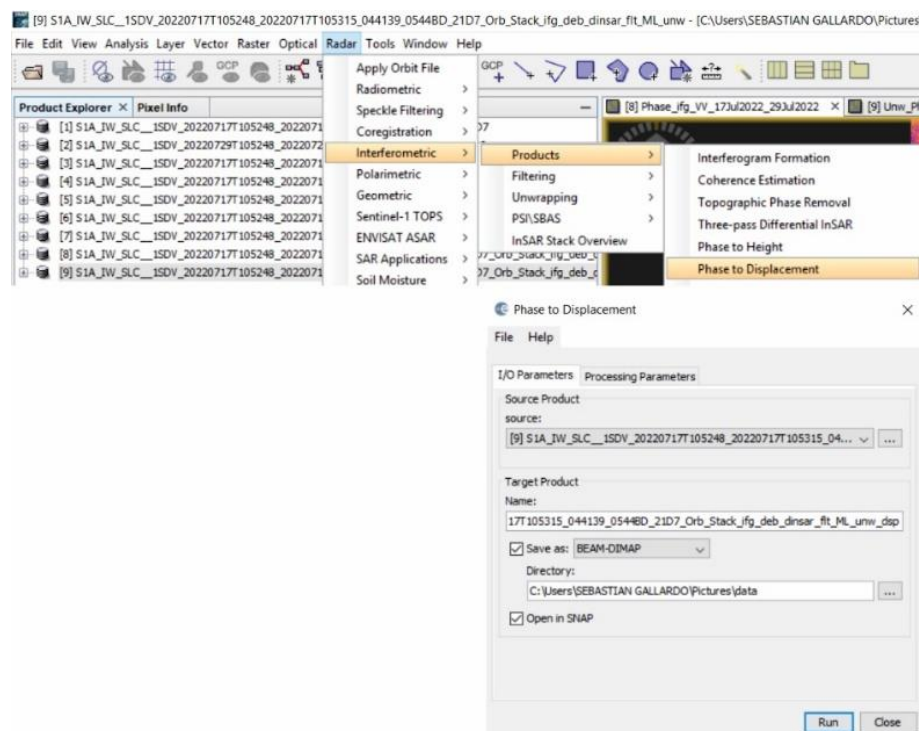
6.11. Fase a desplazamiento

Ahora se tiene la fase desenrollada producto del procesamiento anterior, esta fase ahora es un ráster continuo, pero aún no es una medida métrica. Para esto el siguiente paso es convertir la fase a desplazamiento, este proceso traduce la fase en cambios de superficie a lo largo de la línea de visión (line of sight-LOS) a metros. Esta es una línea entre un pixel y el sensor, por ende, se va

a tener que los valores negativos significan hundimientos y los positivos levantamientos de la superficie (Veci, 2015), en la **Figura 40** se observa el proceso para convertir la fase a desplazamiento.

Figura 40

Referencia pasos para convertir fase a desplazamiento.



Nota: Para convertir la fase a desplazamiento es necesario ingresar a Radar→Interferometric→Products→Phase to Displacement, una vez allí en “Source Product” se debe seleccionar el archivo con la fase desenrollada; no hay parámetros por modificar y se inicia con el procesamiento; el archivo resultante tendrá al final del nombre la extensión “dsp”.

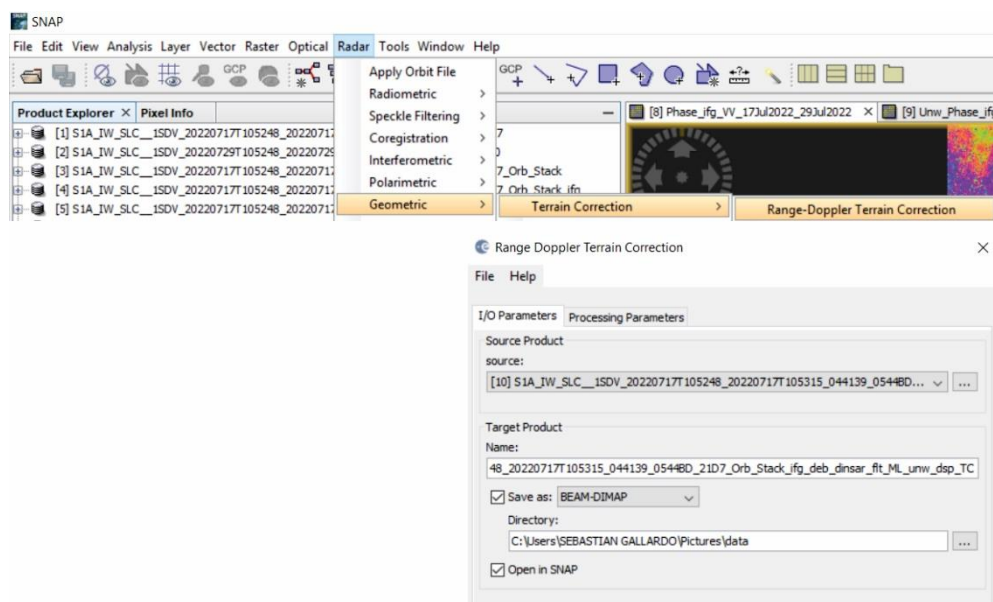
6.12. Geocodificación

El interferograma es una imagen generada con coordenadas de radar (Garcés, 2020) y se necesita pasar a un sistema de coordenadas de mapa, la geocodificación del terreno usa un Modelo

de Elevación Digital para corregir las distorsiones geométricas SAR, en la **Figura 41** se muestra el proceso para realizar la geocodificación.

Figura 41

Referencia pasos para geocodificación.



Nota: Para realizar el proceso de geocodificación es necesario ingresar a Radar→Terrain Correction→Range-Doppler Terrain Correction, una vez allí en “Source Product” se debe seleccionar el archivo generado en el paso anterior; el archivo resultante tendrá al final del nombre la extensión “TC”.

6.13. Exportar a software GIS

El último paso de la metodología consiste en exportar los resultados obtenidos a un software GIS. Aquí es donde se realiza gran parte de la interpretación, ya que es posible comparar los resultados con información adicional de área estudiada. De igual manera se configuran parámetros en algunos mapas, como la escala de colores utilizada, lo cual ayuda a resaltar el

objetivo de análisis. En esta investigación se utilizó ArcGIS, para generar los mapas que se muestran en el capítulo de resultados.

Para aplicar la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética, es posible utilizar otras herramientas que son especializadas en el tratamiento de datos obtenidos a partir de imágenes SAR, como es el caso de la herramienta online “HyP3” del Alaska Satellite Facility (ASF, misma plataforma de donde son descargadas las imágenes SAR para esta investigación). Esta herramienta permite realizar el procesamiento interferométrico de manera online, llegando a reducir el tiempo de procesado, pero teniendo como principal desventaja, el hecho de no poder manipular parámetros de procesamiento entre las etapas del desarrollo interferométrico, parámetros en los que su modificación puede llegar a ser necesaria, dependiendo del evento analizado, el área de estudio, entre otros factores.

7. Resultados

En este capítulo, se presentan los resultados obtenidos para cada caso de estudio seleccionado en esta investigación. Son tres los mapas que ayudan en la interpretación de la deformación superficial del terreno y que representan el movimiento de la superficie, evaluando la calidad de los resultados obtenidos. Los cuales son los siguientes:

El mapa con la fase enrollada: Este mapa es relevante porque es posible observar la diferencia de fase entre dos imágenes SAR, lo que representa señal de deformación. Cuando el satélite realiza el recorrido sobre la superficie, obtiene los datos de las ondas de radar reflejadas por el terreno en un tiempo específico, en una adquisición posterior y según el intervalo de tiempo de cada satélite, al momento de realizar una adquisición en el mismo sitio, si hay cambios en dicha superficie, lo más probable es que se observe la diferencia de fase entre las ondas de radar comparadas entre adquisiciones de datos previas (**Figura 13**) y esta diferencia de fase es la

utilizada para estimar el componente de movimiento de la superficie terrestre, la cual se representa por medio de un ciclo de franjas de colores (Mora et al., 2019).

Para la interpretación de esta secuencia se debe tener en cuenta lo siguiente: Si se tiene que el color de los anillos viendo la secuencia desde el más externo hacia el más interno, el valor de la fase va de valores positivos a negativos, esto quiere decir que ocurre un acercamiento hacia el radar, lo que se interpreta como un levantamiento del terreno; mientras que si la secuencia de colores, desde el más externo hacia el más interno, el valor de fase va desde valores negativos a positivos, esto quiere decir que ocurre un alejamiento del radar, lo que se interpreta como un hundimiento o subsidencia del terreno (Fielding, 2018).

Estas interpretaciones son válidas debido a que la fase de la imagen después de realizar el proceso interferométrico explicado con anterioridad en el capítulo de metodología, es una medida de la distancia entre la superficie analizada y el sensor encargado de capturar la imagen. Si se toma la longitud de onda y se divide entre dos, se obtendría el número de centímetros por franja de color, ya que cada franja es 2π rad. Teniendo en cuenta lo anterior, Sentinel-1 tendría que el valor de cada una de estas franjas es ≈ 2.8 cm (Fielding, 2018).

El mapa de Coherencia: Este mapa es relevante pues establece, que tanta calidad y que tan confiables son los resultados obtenidos con los interferogramas. La coherencia es relacionada con la desviación estándar de la fase diferencial, y esta información es la que determina que tan apropiado es el interferograma. Dado que la calidad de un interferograma depende del grado de correlación que presenten los pares de imágenes obtenidos en cada intervalo de tiempo seleccionado, la correlación es menor o mayor de acuerdo a la similitud de píxeles entre los datos comparados (Alpala & Erazo, 2021). En las imágenes de coherencia, las áreas que presentan ruido de decorrelación o baja coherencia, se encuentran representadas con valores cercanos a cero,

mientras que las áreas con mejor correlación o mayor coherencia, se encuentran representadas con valores cercanos a uno (Santos, 2015).

El mapa con el desplazamiento: Este mapa es relevante porque presenta información de distancia al convertir las fases medidas. Al convertir la fase en desplazamiento, se convierten los cambios o diferencias de fases que hay en la superficie a unidades métricas (m) (Gómez, 2022). En este documento los valores positivos representados por tonalidades rojizas muestran inflación o levantamiento del terreno, mientras que los valores negativos representados por tonalidades azules muestran hundimiento del terreno.

7.1. Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro

Los pasos seguidos en el capítulo de metodología generaron como productos las siguientes imágenes que indica la deformación ocurrida en el área de estudio a raíz del evento del 25/Jul/2022, también se presentan el par de imágenes seleccionadas del CVCCN:

Tabla 5

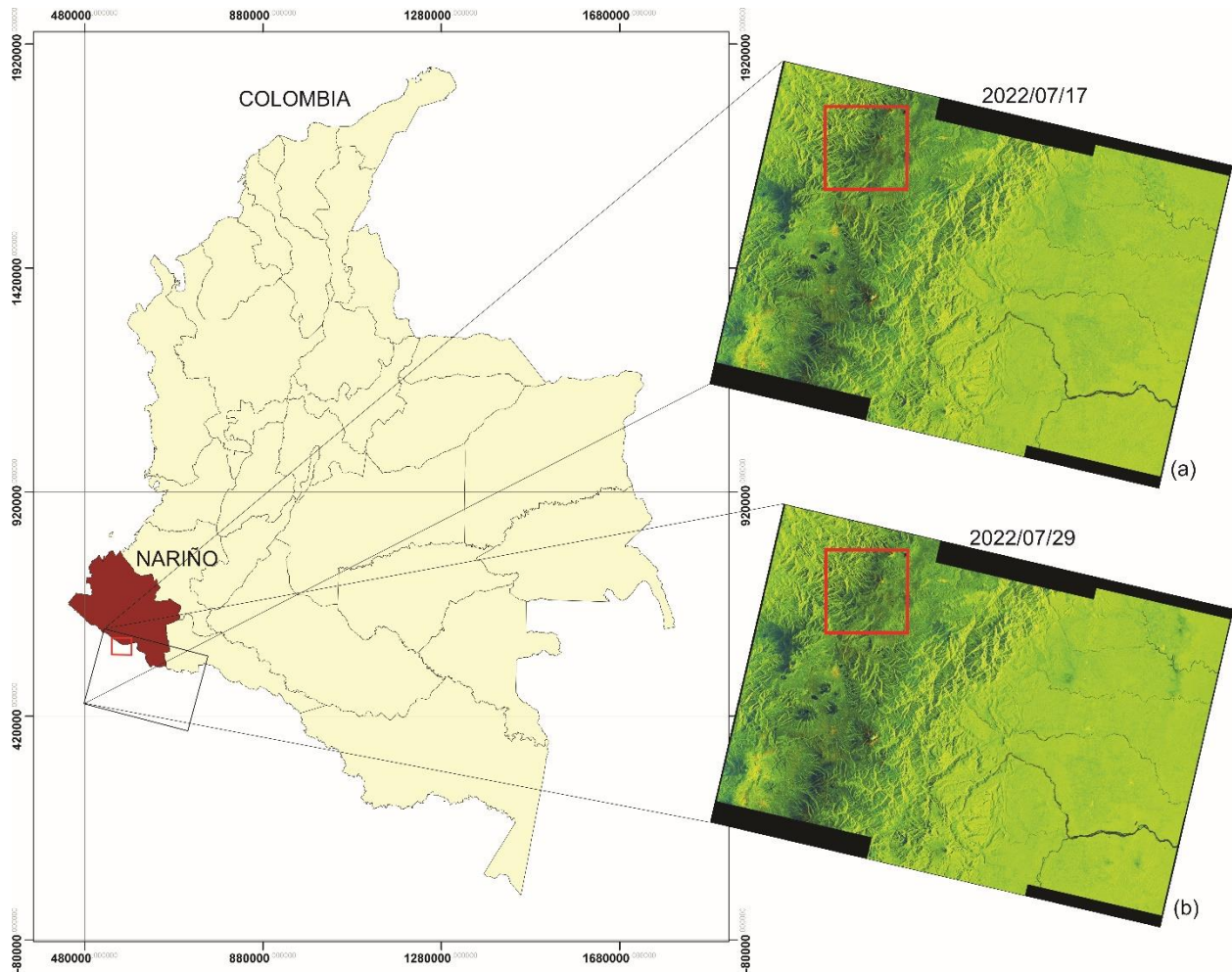
Principales características imágenes SAR CVCCN.

Imagen	Asignación	Modo	Path	Frame	Dirección	Polarización	Banda
17/07/2022	Maestra	IW	142	591	Descendente	VV+HH	C
29/07/2022	Esclava	IW	142	591	Descendente	VV+HH	C

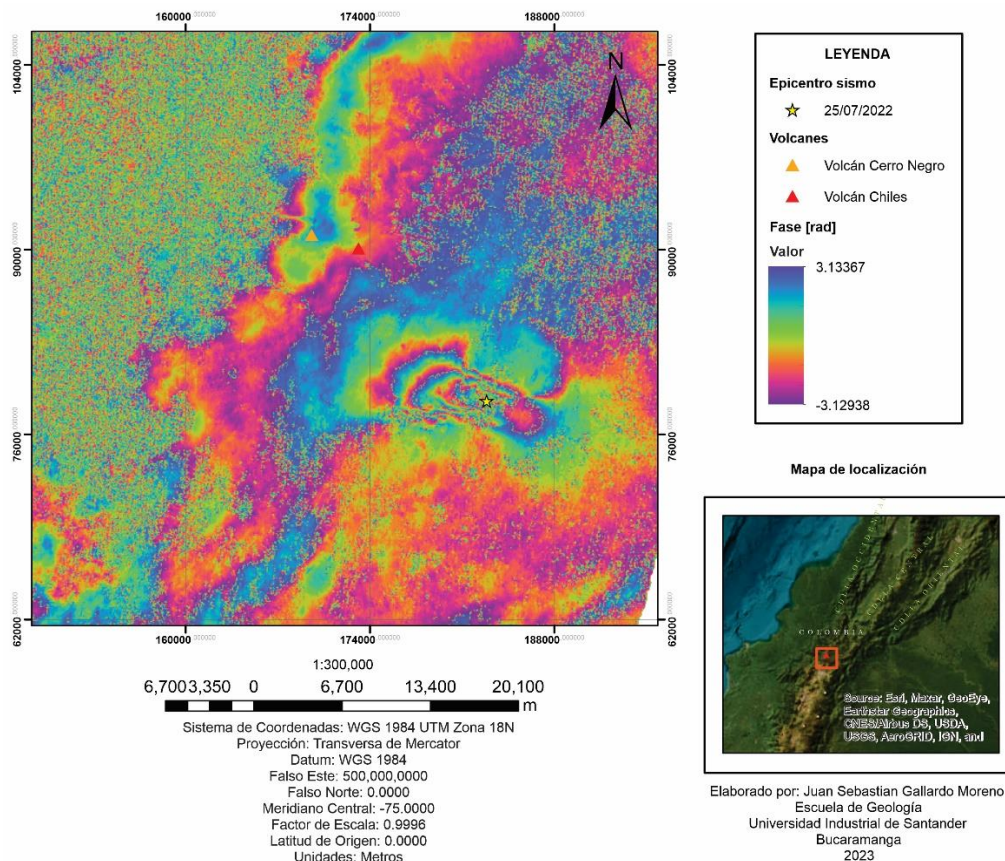
Nota: En la tabla se muestran las principales características de las imágenes utilizadas para el procesamiento interferométrico en el área del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro.

Figura 42

Ubicación geográfica de las imágenes SAR para CVCCN.



Nota: La figura muestra la ubicación del par de imágenes SAR seleccionadas para realizar el procesamiento interferométrico en el evento del sismo ocurrido en el CVCCN, ubicado en el departamento de Nariño. (a) corresponde a la imagen maestra (antes del evento). (b) corresponde a la imagen esclava (después del evento). El cuadro rojo representa el recorte del área de interés mostrada en los mapas resultantes.

Figura 43*Mapa de fase interferométrica [rad], Chile – Cerro Negro.*

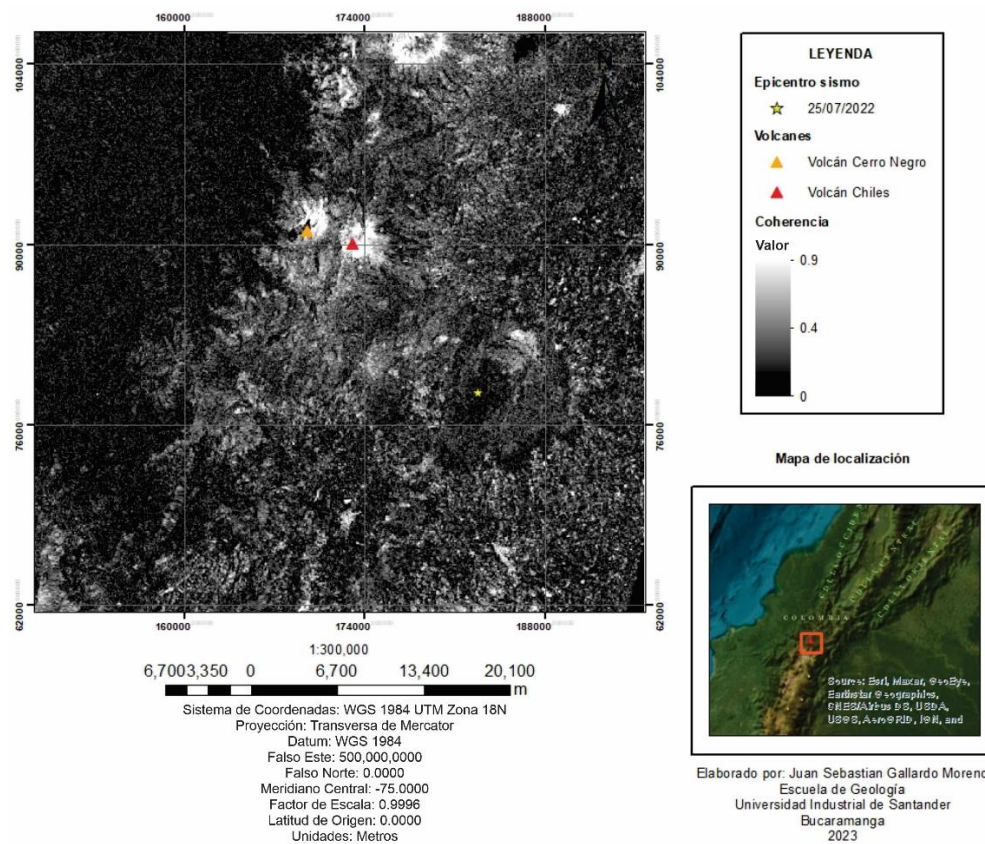
Nota: En la figura se observa la fase interferométrica antes de aplicar el “Unwrapping”.

En el mapa de fase resultante del procesamiento interferométrico realizado, mostrado en la **Figura 43**, es posible observar hacia el noroeste del epicentro del sismo, un patrón que representa una señal de deformación, la escala de fase está dada en radianes, por lo que cada set de colores de franja en el interferograma va de $-\pi$ a $+\pi$. Si se analiza detenidamente el patrón de franjas de la señal, resulta en que la secuencia de colores que representan la fase, desde el más externo a el más interno pasa de valores positivos a negativos, lo que significa que hay un acercamiento hacia el radar, esto traduce que en la zona está ocurriendo un levantamiento del terreno. De igual manera

es posible identificar que hay 3 franjas presentes en la señal de la deformación por lo que al multiplicarlas por el valor de cada una para el caso de Sentinel-1 ($\approx 2.8\text{cm}$) la magnitud de la deformación es de aproximadamente 8 centímetros.

Figura 44

Mapa coherencia, Chiles – Cerro Negro.

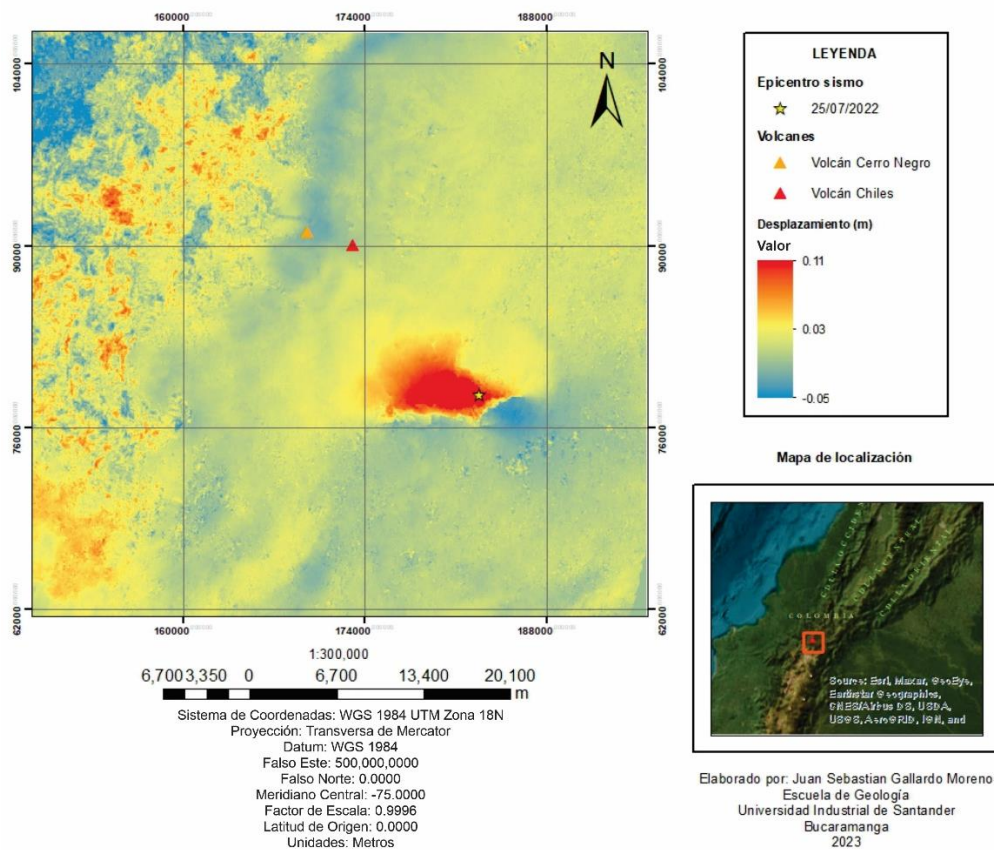


Cuando la magnitud de la coherencia es 0, significa que no hay coherencia; valores entre 0.3 y 0.5, es ruidosa pero utilizable; valores entre 0.5 y 0.7 es buena; de 0.7 a 1 se dice que son completamente coherentes (Alpala & Erazo, 2021). En la imagen de coherencia resultante del procesamiento interferométrico, es posible notar que en la zona en donde se encuentra la señal de la deformación, los valores de coherencia se encuentran en un rango de 0.3 a 0.5 lo que la hace algo ruidosa pero utilizable.

Los bajos valores en la coherencia que se observan en general en toda la **Figura 44**, es posible que sean resultado de la vegetación presente en la zona, ya que el satélite Sentinel-1 trabaja con la banda C, la cual no tiene un buen desempeño en áreas con abundante presencia de vegetación, esta característica se debe a la baja penetración que la onda tiene en este tipo de material, lo que impide que ocurra retrodispersión suficiente de la señal hacia el radar generando baja coherencia.

Figura 45

Mapa desplazamiento (m), Chiles – Cerro Negro.



Hacia la parte oeste y noroeste de la imagen de desplazamiento se observan patrones de colores aleatorios, aparentemente sin una forma identificable, esta zona concuerda con los valores

más bajos de coherencia mostrados por el mapa de coherencia en la **Figura 44**, siendo esta la razón de la incongruencia en esta zona del mapa de desplazamiento en la **Figura 45**. También en el mapa de desplazamiento se observa que alrededor del epicentro del sismo, hay un cambio abrupto en las tonalidades (siguiendo un posible lineamiento), pasando de un tono amarillo con valores de aproximadamente 0.03m (3cm) a una tonalidad rojiza con valores cercanos a los 0.11m (11cm), cambio de tonalidades que se extiende hacia el noroeste del epicentro del sismo, lo que estaría indicando que en esa zona sucedió una elevación o levantamiento del terreno de aproximadamente 0.08m (8cm) que concuerda con la señal de fase observada en la **Figura 43**. También es posible observar que junto al cambio de tonalidades rojizas que indican elevación, hacia el sureste del epicentro del sismo, hay un cambio a tonalidades azules que indica hundimiento en la zona de aproximadamente 0.03m (3cm).

7.2. Municipio de San Eduardo, departamento de Boyacá.

A continuación, se presentan las imágenes resultado del procesamiento seguido en el capítulo de metodología para el municipio de San Eduardo en Boyacá, así como el par de imágenes seleccionadas para la investigación:

Tabla 6

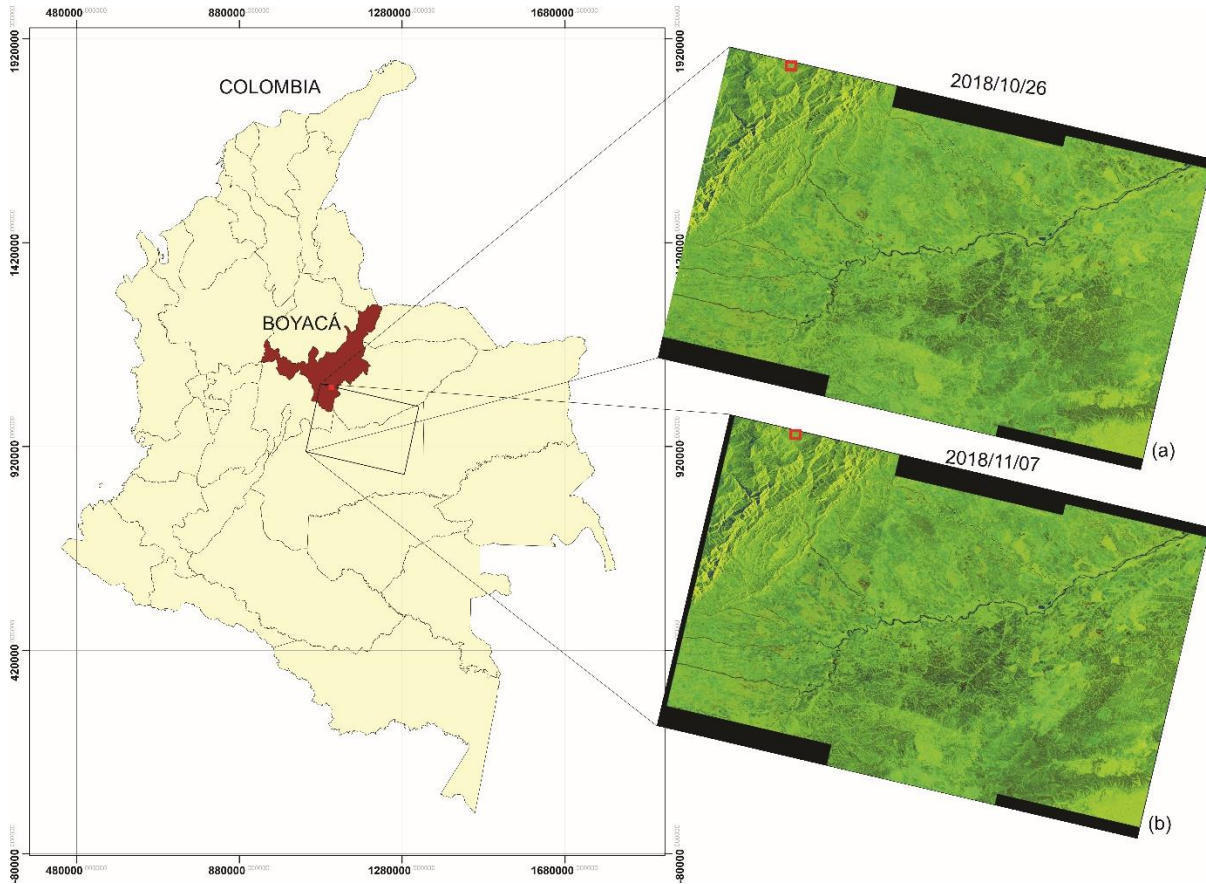
Principales características imágenes SAR Municipio San Eduardo.

Imagen	Asignación	Modo	Path	Frame	Dirección	Polarización	Banda
26/10/2018	Maestra	IW	171	577	Descendente	VV+HH	C
07/11/2018	Esclava	IW	171	577	Descendente	VV+HH	C

Nota: En la tabla se muestran las principales características de las imágenes utilizadas para el procesamiento interferométrico en el área del municipio de San Eduardo.

Figura 46

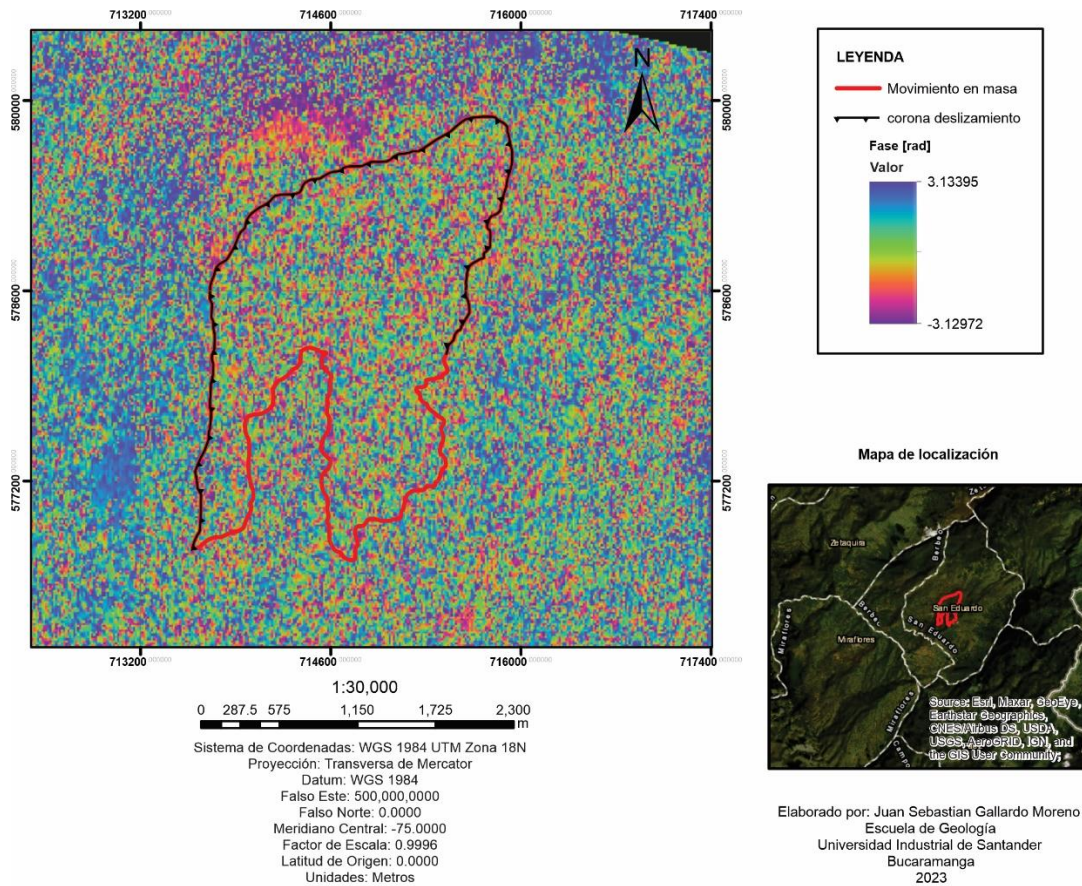
Ubicación geográfica de las imágenes SAR para municipio de San Eduardo.



Nota: La figura muestra la ubicación del par de imágenes SAR seleccionadas para realizar el procesamiento interferométrico en el evento ocurrido en el municipio de San Eduardo, ubicado en el departamento de Boyacá. (a) corresponde a la imagen maestra (antes del evento). (b) corresponde a la imagen esclava (después del evento). El cuadro rojo representa el recorte del área de interés mostrada en los mapas resultantes.

Figura 47

Mapa de fase interferométrica [rad], San Eduardo.

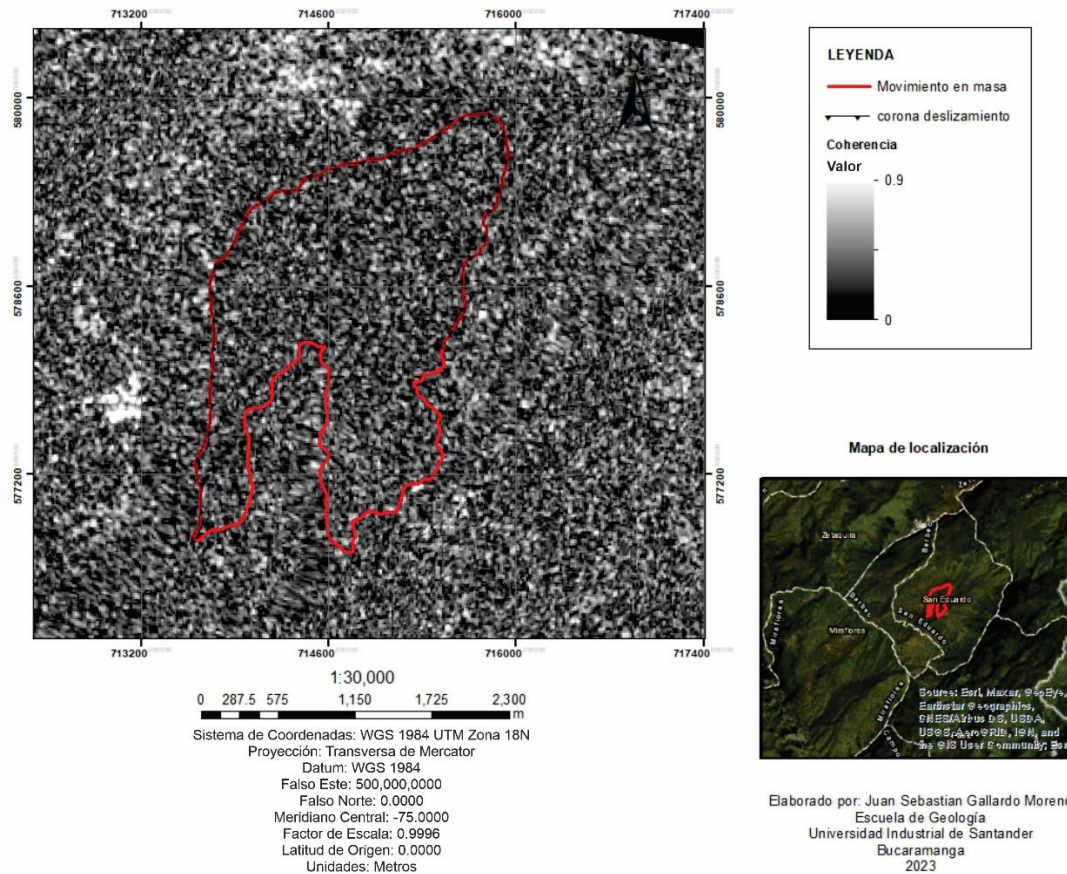


Nota: En la figura se observa la fase interferométrica antes de aplicar el “Unwrapping”.

En el mapa de fase resultante del procesamiento interferométrico realizado sobre el área del municipio de San Eduardo no se presenta ningún patrón identificable de deformación, a diferencia del que sí muestra en el resultado de la **Figura 43** sobre el área del CVCCN. Esto es debido a que la mayor información presente en el interferograma es ruido producto de factores que afectan la correlación y coherencia de las imágenes SAR como se observa y se menciona en la **Figura 48** de coherencia obtenida. Este ruido que afecta la señal de fase de las ondas que vuelven al sensor, no permite que se represente el estado real de la deformación en el interferograma.

Figura 48

Mapa coherencia, San Eduardo.



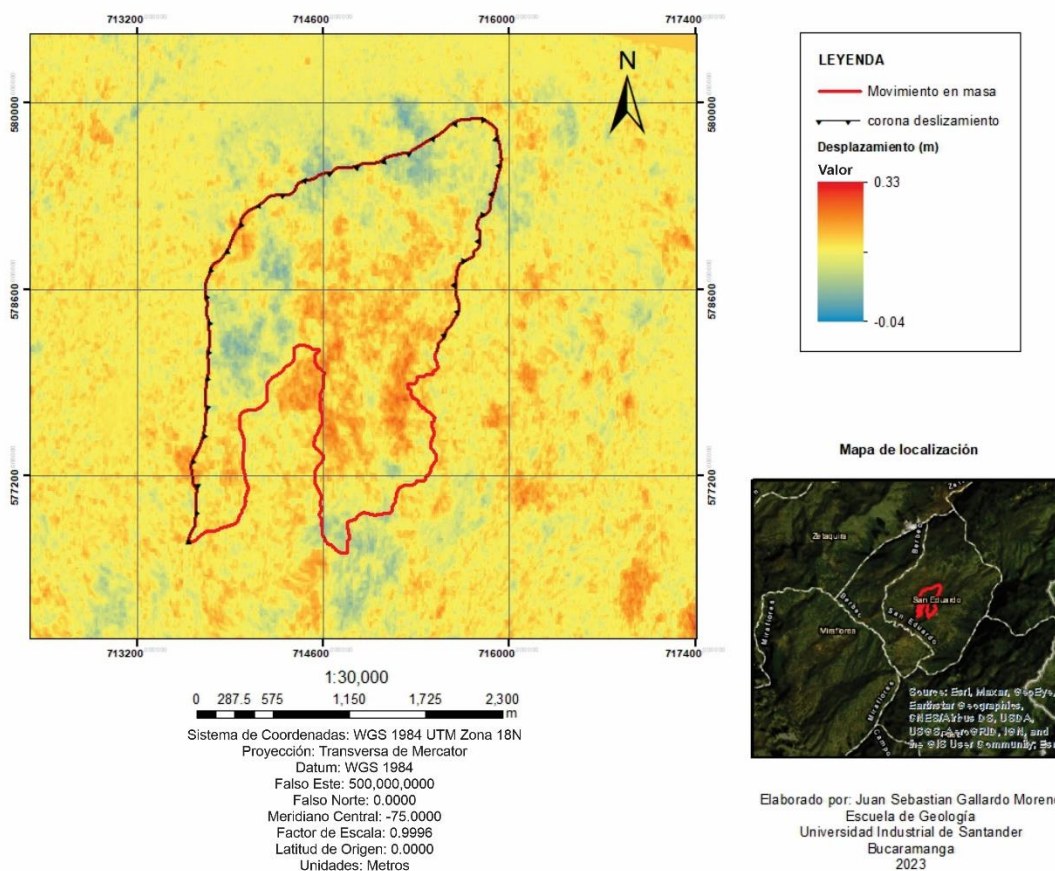
En la imagen se observan los valores de coherencia, hacia el área roja que representa el movimiento en masa ocurrido en la zona hay una alta concentración de valores de coherencia menores a 0.5. Según Alpala & Erazo, 2021, a través de la coherencia se determina la calidad y fiabilidad del interferograma, para este caso los valores tienen una magnitud que estarían en un rango de 0.3 a 0.5 lo que la hace ruidosa.

Así como en el resultado obtenido en la imagen de coherencia para el CVCCN (**Figura 44**), en San Eduardo la vegetación es un factor influyente en los bajos valores de coherencia mostrado en los resultados; además otro aspecto causante de esta coherencia es el componente

atmosférico, las malas condiciones climáticas de lluvias presentes en el área de estudio como lo menciona (Pérez et al., 2019) pueden afectar la señal que regresa al sensor, generando ruido en la fase interferométrica y afectando la calidad de los resultados.

Figura 49

Mapa desplazamiento (m), San Eduardo.



En la imagen se observa el mapa final de desplazamiento en metros, el área en rojo corresponde al movimiento en masa descrito y caracterizado por García-Delgado, 2018. En la **Figura 49** se puede observar que en la zona que muestra el movimiento, hay una presencia de tonalidades hacia colores rojizos, los que representan una variación de la fase que se acerca hacia el radar, lo que se traduce en una deformación ascendente, es decir un levantamiento del terreno,

el cual no concuerda con lo descrito por García-Delgado, 2018 en la caracterización del evento ocurrido en el municipio de San Eduardo. Esta incongruencia observada entre el resultado obtenido con respecto a lo descrito por García-Delgado, 2018, es producto de la baja coherencia vista en la **Figura 48** que disminuye la calidad de los resultados.

8. Interpretación y discusión

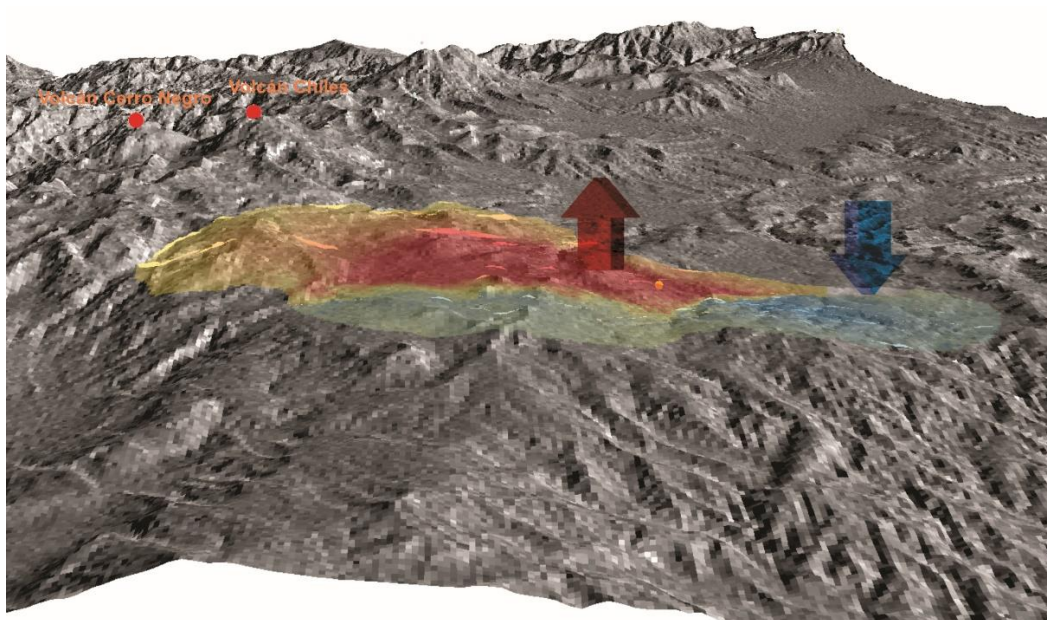
En este capítulo se presenta la interpretación de los resultados obtenidos, así como la discusión en torno a las causas de estos resultados.

8.1. Complejo volcánico Chiles – Cerro Negro

Como se puede observar en los resultados de la técnica de InSAR para el sismo ocurrido el 25 de julio del año 2022 con magnitud de 5.6 en la escala de Richter, en la zona del complejo volcánico Chiles – Cerro Negro, la fase interferométrica (**Figura 43**) muestra en su patrón de colores un movimiento que describe un levantamiento del terreno, con una magnitud de aproximadamente 8cm, deformación ubicada a unos 14 kilómetros hacia el sureste del volcán Chiles. Así como también se pudo observar un hundimiento, hacia el sureste de la fuente de inflación de mayor magnitud, de aproximadamente 3cm, como se muestra en el mapa de desplazamiento en la **Figura 45**. En la **Figura 50** se muestra una representación de la deformación que está sucediendo en el área.

Figura 50

Vista 3D de la deformación en el CVCCN.



Nota: En la figura se observa una vista 3D de la deformación que ocurrió en el CVCCN a causa del evento sísmico del 25 de julio de 2022. Las flechas indican el sentido del movimiento.

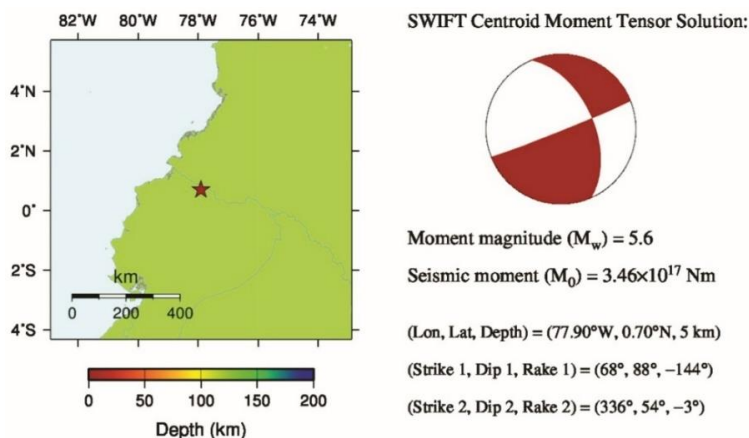
Un informe técnico, fue generado debido al incremento de la actividad sísmica volcánica del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro y fue realizado el día 26 de julio de 2022 por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto del Servicio Geológico Colombiano junto con el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional en Ecuador (OVSP-SGC & IG-EPN, 2022). El informe, detalló el aumento de actividad sísmica desde el 27 de mayo del 2022 en esta zona y sus alrededores. La actividad sísmica alcanzó su máximo punto con el evento analizado en esta investigación ocurrido el 25 de Julio del 2022. Esta actividad sísmica ha venido acompañada de una deformación vertical del suelo y también en cambios en la composición de los fluidos superficiales asociados al sistema hidrotermal de esta zona según este informe (OVSP-SGC & IG-EPN, 2022).

El enjambre sísmico presente en la zona del CVCCN, que comenzó con el aumento de actividad desde el 27 de mayo hasta el 26 de julio de 2022 con alrededor de 17.738 sismos, que incluye el evento analizado, ocurrido el 25 de julio (siendo el de mayor magnitud) (OVSP-SGC & IG-EPN, 2022). Este evento del 25 de julio del 2022 trajo como consecuencia cambios en la superficie terrestre del área, tal como se representa en la **Figura 50** de los resultados obtenidos en la presente investigación.

El estudio del mecanismo focal en los terremotos, consiste en estimar cuál es el tipo de falla que da origen a un sismo o a un grupo de sismos que se localizan en una misma zona (Passaron, 2021). En la página web del Servicio Geológico Colombiano hay disponible un catálogo de mecanismos focales y tensores de momento, en donde se encuentra el registro observado en la **Figura 51**, para el evento sísmico analizado, ocurrido el 25 de julio del 2022.

Figura 51

Mecanismo focal para el sismo en el CVCCN.



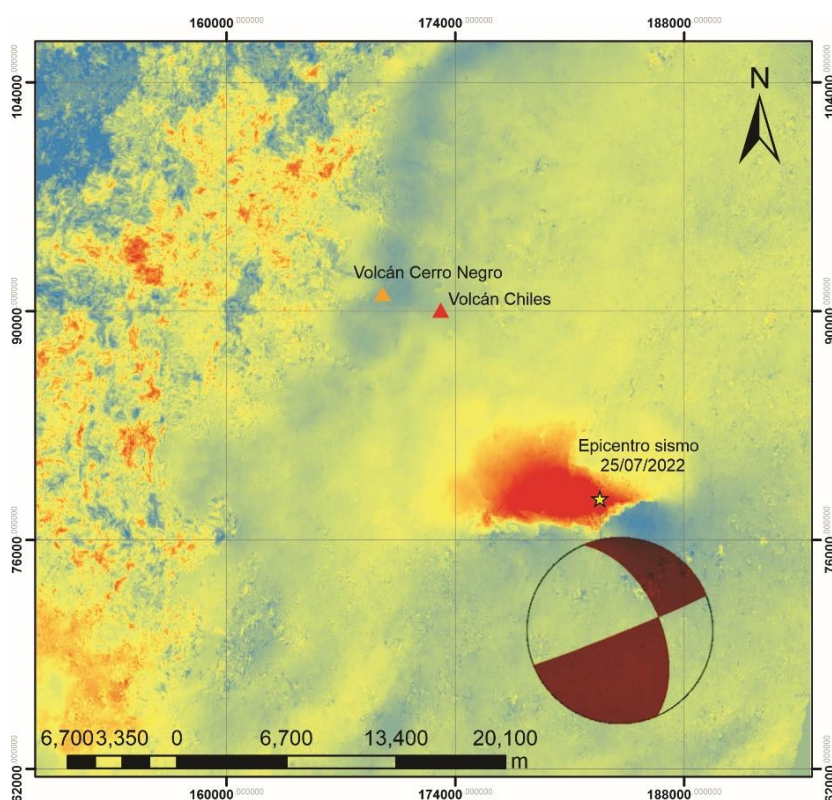
Nota: Mecanismo focal del sismo ocurrido en el CVCCN. Obtenido en el catálogo de mecanismos focales y tensores de momento, del Servicio Geológico Colombiano.

Del mecanismo focal, también llamado “pelota de playa” observado en la **Figura 51**, se puede analizar que la dirección de rumbo de la falla que dio origen al sismo del 25 de julio de

2022, se asemeja a la dirección seguida por el lineamiento observado en los resultados, que da origen a la deformación en el área del CVCCN, ya que el plano de este mecanismo focal obtenido por el SGC, concuerda parcialmente con el plano de la deformación que se observó en los resultados obtenidos en la investigación como se muestra en la **Figura 52**. Así como es posible identificar en el mecanismo focal, en cuanto a su movimiento, que representa una falla oblicua, cuyo componente principal es el desplazamiento horizontal en el rumbo, pero que también presenta un componente de desplazamiento vertical en menor medida, siendo parcialmente consecuente con el desplazamiento vertical observado en los resultados al aplicar la técnica InSAR para estimar la deformación en el CVCCV a causa del evento sísmico del 25 de julio del 2022.

Figura 52

Comparación mecanismo focal del SGC, con los resultados obtenidos.



Nota: En la figura se observa el mecanismo focal obtenido por el SGC.

En el trabajo realizado por Alpala & Erazo, 2021, en donde aplicaron la técnica de InSAR para monitorear la deformación ocurrida en el Complejo Volcánico Chiles – Cerro negro, a raíz de un sismo en el área, el 20 de octubre del 2014 con una magnitud de 5.6 en la escala de Richter. Identificaron que ocurrió un desplazamiento vertical ascendente en la zona del CVCCN, a causa del evento sísmico analizado en dicho trabajo. El proyecto de Alpala & Erazo, 2021, realizado en la misma área que se analizó en esta investigación (el Complejo Volcánico Chile – Cerro Negro), donde monitoreó un sismo de igual magnitud al estudiado en esta investigación (5.6 en la escala de Richter) y que identificó deformación asociada al sismo, es un antecedente que sirve para demostrar que si es posible que ocurra una deformación a causa de un evento sísmico tal como sucedió con la deformación observada en los resultados obtenidos en esta investigación sobre el sismo del 25 de julio del 2022 en el CVCCN.

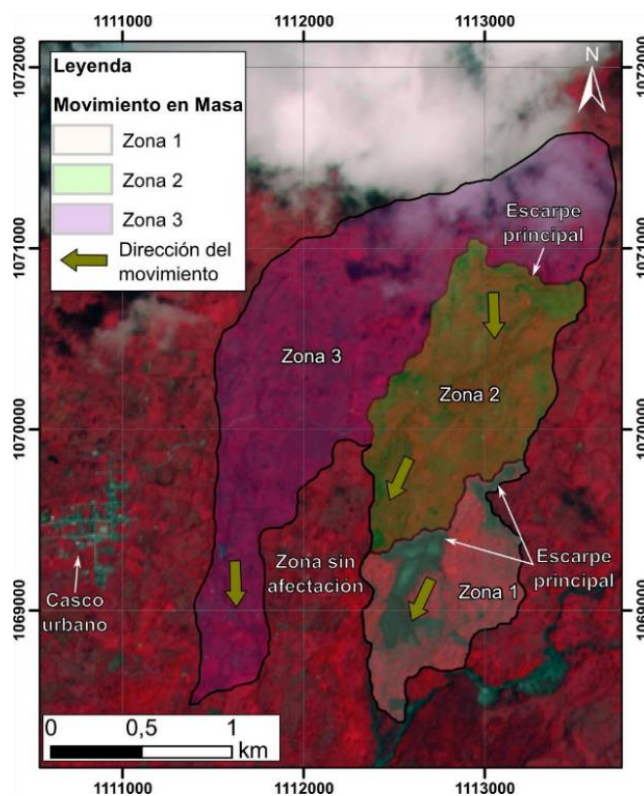
Aunque la deformación observada en los resultados obtenidos con InSAR, no es de gran magnitud es evidente que, existe un patrón distintivo de deformación y dicho patrón es posible de inferir gracias a que en el mapa de fase observado en la **Figura 43** se puede ver la deformación en el patrón cíclico de franjas de colores que sale del sismo. En cuanto a los valores de coherencia resultantes, que no fueron muy altos y que no permiten tener el 100% de certeza de lo que ocurre en el área, es posible que se deban a dos factores: primero a que la deformación observada se encuentra en las proximidades de la reserva ecológica “El ángel” que se caracteriza por contener una densa capa vegetal, lo que según Alpala & Erazo, 2021, es un hecho desfavorable para la aplicación de dicha técnica por la banda en la que opera Sentinel-1; segundo a un factor atmosférico. Un par interferométrico se compone de dos imágenes SAR tomadas en diferentes fechas, las condiciones atmosféricas no son las mismas para ambas y esos cambios pueden afectar los datos de fase de cada imagen y por ende la diferencia de fase del interferograma, cuando la señal de radar pasa la atmosfera tanto de ida como de regreso, sufre retrasos que provocan la

perdida de exactitud y que genera ruido en la señal, una humedad relativa del 20% puede comenzar a causar este efecto de pérdida en la señal (D. García, 2021). El área donde se ubica la deformación encontrada en el CVCCN tiene una humedad relativa con un valor mayor al 60% (D. García, 2021), por lo que este podría ser un factor importante que genera ruido en la señal.

El informe técnico realizado en conjunto por el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto del Servicio Geológico Colombiano (OVSP – SGC) junto con el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (IG-EPN) en Ecuador, que describe una deformación del terreno en el CVCCN a raíz del evento sísmico del 25 de julio del 2022 analizado en esta investigación, además del registro del mecanismo focal del Servicio Geológico Colombiano, que muestra patrones de dirección de rumbo de falla y movimiento de falla, concordantes a los obtenidos en esta investigación como se observa en la **Figura 52**, son evidencia que fortalece los resultados de este proyecto, que identificó deformación vertical ocurrida en la zona del CVCCN a causa del sismo del 25 de julio del 2022.

8.2. Municipio de San Eduardo, departamento de Boyacá.

Según García-Delgado, 2018 en un informe técnico del 4 de octubre del 2018 realizado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), detallaron que el movimiento en masa detonado principalmente por las lluvias en el área, comenzó el 20 de septiembre del 2018 afectando en su inicio 69 ha. El deslizamiento inicial denominado zona 1 es de tipo traslacional y presentó una longitud de ~1 km y un ancho de ~1.3 km.

Figura 53*Movimiento en masa, San Eduardo.*

Nota: En la imagen se observa las diferentes zonas de afectación del movimiento, así como también las direcciones de los flujos. Tomado de (H. García, 2018).

La zona 2 surgió a raíz de la pérdida de estabilidad de un depósito coluvial presente en el área, producto del deslizamiento inicial, esta zona presentó una extensión de ~113 ha donde dado su complejo proceso, se evidenciaron áreas con basculamientos, deslizamientos traslacionales y rotacionales. Las zonas 1 y 2 se mantuvieron activas desde el primer día del evento hasta por lo menos la fecha en que se realizó dicho informe (4 de octubre del 2018), presentando movimientos diarios que pudieron alcanzar valores de metros en algunos sectores. La zona 3 se generó a partir del ensanchamiento de la zona 2 desde el día 29 de septiembre del 2018 hasta la fecha de realización del informe, esta zona siguió invadiendo terreno hasta llegar a 400 m del casco urbano

de San Eduardo, lo que provocó la evacuación de por lo menos 60 familias, impactando la actividad comercial, social y económica del municipio (H. García, 2018).

Según este informe el mecanismo detonante considerado la causa del movimiento en masa ocurrido, fueron las fuertes lluvias presentadas en todo el sector y también como mecanismos contribuyentes, aspectos tales como la meteorización física, química, el tipo de material presente en la zona y permeabilidad de este (H. García, 2018).

En el informe técnico del Servicio Geológico Colombiano se menciona que la deformación superficial ocurrida en el área de San Eduardo a causa del deslizamiento fue de metros (m), pero las imágenes obtenidas como resultado al aplicar la técnica InSAR, no reflejan esa deformación en la zona. La falta de coherencia en los resultados de InSAR puede ser principalmente a causa de tres aspectos importantes, que en conjunto resultan en la pérdida de confiabilidad del resultado obtenido. Dichos aspectos son los siguientes:

Contribución de fase atmosférica: El ruido en la fase generado por efectos atmosféricos. Como el informe de García-Delgado, 2018 sustenta, las fuertes lluvias presentes en la zona fueron mecanismos detonantes de este movimiento, teoría que refuerza Pérez et al., 2019, donde considera la lluvia como principal causante de este tipo de movimientos en masa. Entonces esta condición de vapor de agua encontrado en la atmosfera en el área de estudio, genera una alteración en el índice de refracción, esto significa, que se presentan cambios en la dirección de los rayos de energía enviados por el sensor hacia la superficie, modificando la velocidad de propagación de dichos rayos, comprometiendo de esta manera la calidad en los resultados de las imágenes InSAR obtenidas (Alpala & Erazo, 2021). Otros trabajos de investigación que utilizan esta técnica InSAR como el de Santos Basurto, 2015 y el de Ferrer, 2016 tuvieron conclusiones similares y están de acuerdo en mencionar que los efectos atmosféricos son un gran reto al momento de procesar

interferogramas ya que generan ruido o decorrelación en la información y por ende los resultados no son los esperados o no tienen un alto grado de confiabilidad.

Zona con abundante vegetación: Como se ve en la **Figura 54**, el área de estudio llega a presentar una alta densidad de cobertura vegetal, lo que repercute en la señal enviada por el radar, ya que esta se atenúa y pierde intensidad, antes de que parte de las ondas reflejadas regresen en la dirección del sensor (Alpala & Erazo, 2021). Esta es una de las limitantes al utilizar imágenes SAR de Sentinel-1, ya que la longitud de onda de la banda C tiene poca penetración de la capa vegetal.

Figura 54

Escarpe secundario de movimiento en masa en San Eduardo.



Nota: Tomado de (H. García, 2018).

Diferencia de fecha en adquisición de datos: Aunque el movimiento en masa que se presentó en el municipio de San Eduardo en Boyacá en el año 2018 fue de gran magnitud y sucedió en un largo periodo de tiempo, clasificándose aún como un movimiento activo con una amenaza alta, en un documento sobre amenazas por movimiento en masa del municipio San Eduardo del año 2021 (SGC, 2021), el mayor volumen de deformación sucedió en los tres periodos principales

del deslizamiento que se observan en la **Figura 53**, ocurridos entre el 20 de septiembre del 2018 y el 29 de septiembre del 2018. Al trabajar con imágenes satelitales, se está sujeto a la densidad temporal de captura de información que tiene cada satélite, para el caso del evento en la zona del municipio de San Eduardo, no se encontró información captada por Sentinel-1 entre la fecha inicial del movimiento (20/09/2018) y la fecha en que sucedió el tercer periodo importante del deslizamiento (29/09/2018), la fecha más cercana que fue la usada como imagen maestra fue del 26 de octubre del 2018. Es posible que, si se tuviera información captada por el satélite en la zona del municipio de San Eduardo en fechas más cercanas al inicio del movimiento, se hubieran podido conseguir mejores resultados ya que se tendría mayor información sobre la deformación inicial del deslizamiento y esto se podría ver reflejado en una identificación más clara del movimiento, por los mapas resultantes de los interferogramas.

Por estos motivos al aplicar la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética en el movimiento en masa que inicio el 20 de septiembre del año 2018 en las cercanías de las veredas Villanueva y Cardoso del municipio San Eduardo en Boyacá, se obtuvo un resultado ambiguo, ya que no se reconoce ni se observa de forma clara en el mapa de desplazamiento, la magnitud o dirección de la deformación allí presente, de igual manera se tiene que los valores de la magnitud en coherencia son bajos (<0.5), lo que podría estar asociado a la densa cobertura vegetal presente en la zona, entre otros factores mencionados.

9. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo tiene como objetivo aplicar una metodología para utilizar la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética y aplicarla a casos de estudio en Colombia.

Para lograr esto se descargaron imágenes satelitales (Sentinel-1) de libre acceso de la plataforma Alaska Satellite Facility (ASF) pertenecientes a las áreas del complejo Volcánico

Chiles – Cerro Negro y al municipio de San Eduardo en el departamento de Boyacá, siendo estas posteriormente procesadas con la herramienta especializada en análisis y procesamiento interferométrico, Sentinel Application Platform (SNAP) generando de esta forma interferogramas y obteniendo mapas de desplazamiento para poder estimar deformación superficial del terreno en dichas áreas.

En el caso del CVCCN se pudo estimar la deformación superficial del terreno ligada al evento sísmico ocurrido el 25 de julio del 2022, procesando imágenes de radar de Sentinel-1 y obteniendo como resultado un desplazamiento vertical ascendente de ≈ 8 cm a 14 km al sureste del volcán Chiles, así como un hundimiento al sureste de la zona del levantamiento mencionado, de aproximadamente 3cm, resultados que son coherentes con el informe sobre el área de estudio realizado por el Servicio Geológico Colombiano y el IG-EPN de Ecuador, en cuanto a que hubo una deformación en la zona. En los resultados obtenidos es posible observar que en el área específica donde ocurrió el sismo y en donde se observa con más claridad la deformación del terreno, los valores se encuentran dentro de un rango utilizable pero ruidoso (0.3-0.5), este rango de valores de la magnitud en coherencia no es muy alto, pero pese a esto, se pudo identificar la señal de deformación en el interferograma, razón por la cual se deduce que a pesar de esta no tan alta coherencia en la zona, que obtuvo Sentinel-1 (por la banda en la que este satélite opera, banda C), es posible hacer monitoreo de procesos de deformación superficial que ocurran en ciertas áreas volcánicas.

En el caso del movimiento en masa ocurrido en el municipio de San Eduardo no se obtuvieron los resultados esperados, ya que no fue posible identificar la deformación superficial del terreno, a raíz del evento analizado, siendo las razones más probables la cobertura vegetal presente en la zona, así como también las condiciones atmosféricas producto del clima, que

provocan errores en las mediciones del desplazamiento del terreno y no permiten que se generen resultados confiables.

Aunque en ambos casos de estudio, los resultados arrojaron valores dentro de un mismo rango de coherencia, hay que tener en cuenta que la coherencia depende y es producto de varios factores como pueden ser: el tiempo entre adquisiciones de las imágenes, cambios de vegetación o volúmenes, retrasos de la señal al atravesar la atmosfera, cambios en la geometría o pendientes empinadas y de las fallas en el procesamiento (Fonseca, 2020). Entonces, aunque se tengan valores relativamente similares en la coherencia, puede que haya unos lugares o zonas que se vean más o menos afectados en diferente medida, por cada uno de los distintos factores mencionados, lo que provoca que no se logre la identificación de la señal de deformación. A parte de esto, en el caso en particular de esta investigación, la magnitud del evento y de la deformación ocurrida en el CVCCN, es mucho mayor que en la del municipio de San Eduardo, lo que podría ser un factor que favorece a que se identificara de forma más clara la señal de la deformación de este evento con respecto al otro.

Después de haber aplicado la técnica InSAR, se pudo concluir que su ventaja es la capacidad de monitorear extensas áreas en la superficie terrestre, esto gracias a su alta resolución espacial y temporal, otra ventaja que destaca es la facilidad de acceder a datos SAR de agencias espaciales como la ESA, por ejemplo los datos obtenidos por Sentinel-1, están disponibles de forma gratuita para cualquier persona, de igual manera los software de procesamiento para este tipo de información como el ejemplo de SNAP utilizado en esta investigación, se encuentran liberados para procesar estas imágenes de Sentinel-1, lo que resulta en una herramienta técnica accesible para cualquier interesado en el tema; como desventaja se observa que, para llegar a obtener un resultado bueno y confiable al aplicar la técnica, esto depende en gran medida de las

condiciones del área de estudio, como por ejemplo la topografía y la vegetación. En el caso de esta investigación en el área del CVCCN el ruido de correlación que se observó en los valores de coherencia obtenidos, se pueden deber principalmente a la vegetación presente en la zona, ya que Sentinel-1 opera en la banda C, lo que lo hace poco favorable para trabajar en áreas con densas coberturas de vegetación, ya que esta banda tiene poco alcance de penetración de cubierta vegetal, por lo que en Colombia al ser un país tropical con pocas áreas desérticas esto es una gran desventaja. De igual manera se encuentra como desventaja el estar sujeto a la disponibilidad de imágenes que tengan estos satélites, que, para el caso de esta investigación, Sentinel-1 no cuenta con registros anteriores al año 2014 por lo que no es posible estudiar eventos anteriores, además de que no en todas las áreas del país se cuenta con la misma densidad de imágenes satelitales, como fue el caso en esta investigación para el área de San Eduardo en Boyacá, en donde no fue posible contar con imágenes satelitales del día en que comenzó el movimiento en masa.

De igual manera se recomienda analizar la viabilidad de utilizar diferentes metodologías con imágenes SAR provenientes de otras misiones distintas a Sentinel-1, como por ejemplo el caso de ALOS-PALSAR, ya que algunas de estas tienen mayor resolución espacial y pueden penetrar mejor la vegetación por una longitud de onda mayor, así como también son menos sensibles a los efectos atmosféricos, corrigiendo las desventajas encontradas en el procesamiento y resultados obtenidos por esta investigación.

Para finalizar se recomienda profundizar en la implementación de otras técnicas InSAR como por ejemplo SBAS (Small Baseline) que genera series de tiempo, logrando llegar a mejorar el procesamiento en el cálculo de interferogramas, para poder detectar deformaciones más pequeñas y continuas sobre un largo periodo de tiempo. Así mismo se recomienda integrar a los estudios otras fuentes de información geológica obtenidas con observaciones en terreno que

permitan mejorar las interpretaciones y evitar errores en los resultados. Para el área perteneciente al CVCCN se recomienda realizar un análisis más detallado de mecanismos focales asociados al evento, para ver si es posible mejorar el resultado y si concuerda mejor con la deformación encontrada en la investigación.

Referencias Bibliográficas

- Alpala, J., & Erazo, Y. (2021). Interferometría con software libre e imágenes Sentinel 1A/1B, aplicada al monitoreo de la deformación volcánica en Colombia, caso de estudio volcanes Chiles—Cerro Negro. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12265.42086>
- Angarita, M. F. (2016). Procesos de deformación en la región de los volcanes Chiles-Cerro Negro por medio de imágenes InSAR [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/59318>
- Bocanegra, L., & Sánchez, J. (2017). Mapa de fallas de los volcanes Chiles-Cerro Negro (Nariño), a partir de minería de datos y confirmación de campo. *Boletín de Geología*, 39, 71-86.
- Ceupe. (2019). ¿Qué es la teledetección? Ceupe. <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-teledeteccion.html?dt=1663803863048>
- Chancusig, C. G. (2017). Caracterización de la secuencia litoestratigráfica y de la mineralogía de alteración hidrotermal del pozo PGT-1 del proyecto geotérmico Tufiño-Chiles, provincia del Carchi. [BachelorThesis, Quito, 2017.]. <https://doi.org/10/CD>
- Chuvieco, E. (1990). FUNDAMENTOS DE TELEDETECCIÓN ESPACIAL (segunda edición). Ediciones RIALP, S.A.
- Duarte, C. (2017). El Radar de Apertura Sintética. Hacia el espacio. <https://haciaelespacio.aem.gob.mx/revistadigital/articul.php?interior=507>
- Egüez, A., Alvarado, A., Yepes, H., Machette, M., Costa, C., & Dart, R. L. (2003). Database and Map of Quaternary Faults and Folds in Ecuador and its Offshore Region.
- ESA. (s. f.). Sentinel-1—Instrument Payload—Sentinel Online—Sentinel Online. Recuperado 15 de noviembre de 2022, de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload>

- Ferrer, L. L. (2016). Deformación observada a través de radar interferométrico de apertura sintética InSAR del volcán Nevado del Ruíz, Colombia. instname:Universidad de los Andes.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/15500>
- Fielding, E. (Director). (2018, septiembre 10). NASA ARSET: SAR Interferométrico para el Estudio de Terremotos, Sesión 4/4. <https://www.youtube.com/watch?v=Qj35zb5W-gk>
- Fonseca, D. A. (2020). Uso de imágenes satelitales de radar para la identificación y monitoreo de deslizamientos en Antioquia [Universidad EIA].
<https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2583>
- Fourqurean, J., Beverly, J., Hilary, K., & Lovelock, C. (2019). Carbono azul: Métodos para evaluar las existencias y los factores de emisión de carbono en manglares, marismas y pastos marinos — UNESCO Biblioteca Digital. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372868_spa
- Garcés, M. G. (2020). Aplicación de interferometría de radar de apertura sintética (INSAR) y análisis de series de tiempo SBAS, para tres casos de estudio en Chile Central [Universidad de Chile].
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/177567>
- García, D. (2021). Aplicación de interferometría diferencial de radar de apertura sintética (DInSAR) sobre la superficie del Volcán Galeras entre los años 2017 y 2019, y del Complejo Volcánico Chiles – Cerro Negro De Mayasquer Entre Los Años 2019 Y 2020, en el Departamento De Nariño (Suroccidente de Colombia), A partir de imágenes satelitales sentinel-1. Universidad Católica de Manizales. <https://repositorio.ucm.edu.co/jspui/handle/10839/3621>
- García, H. (2018). Concepto técnico sobre la visita de emergencia al movimiento en masa de las veredas Villanueva y Cardoso del municipio de San Eduardo (Departamento de Boyacá).
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18694.22086>
- Geoinnova, A. (2016, abril 27). Teledetección, una manera para redescubrir el mundo. Geoinnova.
<https://geoinnova.org/teledeteccion-una-manera-redescubrir-mundo/>

Goldstein, R. M., & Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications.

Geophysical Research Letters, 25(21), 4035-4038. <https://doi.org/10.1029/1998GL900033>

Gómez, E. (2022). Interferometría de imágenes radar de apertura sintética aplicada al estudio de

deformación superficial del terreno: Región de Bío-Bío, Chile.

<https://gredos.usal.es/handle/10366/149761>

Guzman, G. M., Quintana Rodriguez, J. A., Gasca Zamora, H. M., Carrion Viramontes, F. J., Martinez

Trujano, L. A., Hernandez Figueroa, J. A., Hernandez Guzman, A., Valenzuela Delgado, J. I., &

Anaya Diaz, M. (2020). ANALISIS DEL POTENCIAL DE TECNOLOGIA SATELITAL INSAR PARA EL

MONITOREO DE LA INFRAESTRUCTURA CARRETERA. PUBLICACION TECNICA, 593.

<https://trid.trb.org/view/1753212>

Hermosilla, E. D. (2016). INTERFEROMETRÍA A RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (INSAR) APLICADA AL

ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE LADERA ALEDAÑA AL VOLCAN CALBUCO CON AYUDA DE

IMÁGENES SENTINEL 1A. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/22701>

ICEL, I. C. de E. E. (1983). Proyecto geotérmico Chiles Cerro Negro: Fase I etapa de prefactibilidad.

<https://repositoriobi.minenergia.gov.co/handle/123456789/2628>

INGEOMINAS. (2000). Generalidades Volcán Chiles.

<https://www2.sgc.gov.co/sgc/volcanes/VolcanChiles/Paginas/generalidades-volcan-chiles.aspx>

kazilek. (2017, mayo 31). Eco localización [Text]. <https://askabiologist.asu.edu/eco-localizacion>

Lira, J. (1995). 63 LA PERCEPCION REMOTA NUESTROS OJOS EN EL ESPACIO.

https://www.academia.edu/16458304/63_LA_PERCEPCION_REMOTA_NUESTROS_OJOS_EN_EL_ESPACIO

Molina, C. (2022). La gestión del riesgo volcánico en Colombia: Una historia eruptiva con importantes

lecciones aprendidas. Revista Fasecolda, 185, Art. 185.

Montes de Toledo. (2012). Nuevas tecnologías en investigación medioambiental.

<https://es.slideshare.net/pilarbiologa/02-nuevas-tecnologas-en-investigacin-medioambiental>

Mora, H., Diaz, F., & Cardona, L. (2019). Chapter 16. Mapping Land Subsidence in Bogotá, Colombia,

Using the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Technique with TerraSAR-X Images

(N.º 63; p. 63). Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.16>

OVSP-SGC, & IG-EPN. (2022). INFORME EXTRAORDINARIO COMPLEJO VOLCÁNICO CHILES – CERRO

NEGRO Informe Técnico Conjunto: Incremento de la actividad sísmica y volcánica. Observatorio

Vulcanológico y Sismológico de Pasto del Servicio Geológico Colombiano, Instituto Geofísico de

la Escuela Politécnica Nacional Ecuador.

www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Informes%20tcnicos/Informe_Extraordinario_Chiles_CerroNegro_26_07_2022_SGC-IGEPN.pdf

Passaron, F. J. (2021). Determinación de mecanismos focales en el valle de México durante el período

2014-2016. <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/29975>

Pérez, R., Castro, J., García, H., Chaparro, J., Hernández, A., Sandoval, A., Ramírez, K., & Reyes, A. (2019).

Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa en el Municipio de San Eduardo Boyacá.

Escala 1:25.000. Versión año 2019. Documento.

https://recordcenter.sgc.gov.co/B23/710_2020ZonAmMMSanEduardo25k/Documento/Pdf/InfAmeMMSanEduardo25k.pdf

Pinto, N. (2018). NASA ARSET: Introducción SAR Polarimétrico, Sesión 3/4.

https://www.youtube.com/watch?v=q4sePXswtn0&ab_channel=NASAVideo

Restrepo, J. J. (2020). Aprovechamiento de radar de apertura sintética para la gestión del riesgo de

desastres: Detección de zonas de amenaza por subsidencia en el área urbana del municipio de

Pereira en el departamento de Risaralda. <https://hdl.handle.net/11059/12112>

- Santos, R. (2015). Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) aplicada a una caldera volcánica: Los Humeros Puebla-México.
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/7904>
- SGC. (2021). ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA EN EL CASCO URBANO Y PARTE DE LAS VEREDAS VILLANUEVA, BOMBITA, SAN PABLO Y CARDOSO DEL MUNICIPIO DE SAN EDUARDO – BOYACÁ A ESCALA 1:2.000. Servicio Geológico Colombiano.
https://saneduardoboyaca.micolombiadigital.gov.co/sites/saneduardoboyaca/content/files/000241/12015_presentacion-final-san-eduardo-1_2000-version-final.pdf
- Sierra, D. E. (2015). Determinación del estado de esfuerzos tectónicos en la zona del complejo volcánico chiles- cerro negro [BachelorThesis, Quito, 2015.].
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/10638>
- Soulas, J. P., Egúez, A., Yepes, H., & Perez, H. (1991). Tectónica activa y riesgo sísmico en los Andes ecuatorianos y el extremo sur de Colombia. Bol. Geol. Ecuat., 2, 3-11.
- Telenchana, E. R. (2017). Estudio Geovolcanológico del volcán Chiles—Provincia del Carchi [BachelorThesis, Quito, 2017.]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18997>
- Terrazas, R., Moreno, G., Buitrago, J., Perez, A., & Montoya, D. (2010). GEOLOGÍA DE LA PLANCHA 210-GUATEQUE (p. 146).
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B12/23008010024318/documento/pdf/2105243181101000.pdf>
- Ulloa, C. (1975). Memoria explicativa, CUADRÁNGULO K-12 GUATEQUE PLANCHAS 210 GUATEQUE - 229 GACHALÁ, escala 1:100 000.
<https://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024359/documento/pdf/0101243591101000.pdf>
- UNGRD. (2020). Riesgo por movimientos en masa en Colombia. Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres. <https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Noticias/2020/Riesgo-por-movimientos-en-masa-en-Colombia.aspx>

Veci, L. (2015). Sentinel-1 Toolbox, TOPS Interferometry Tutorial. 25.

Villegas, H. (2018). INTRODUCCION A LA PERCEPCION REMOTA INGEOMINAS (p. 60).