Interferometría SAR Aplicada a la Observación de Deslizamiento de Tierra en Rosas, Cauca, Colombia

Manuela Chica Toro

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográficos

Asesor: Carlos Marcelo Jaramillo Echeverry

Universidad De Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización Sistemas De Información Geográfica

Manizales,2024

Resumen

Los deslizamientos de tierra son eventos geológicos que anualmente generan pérdidas humanas y económicas. Este fenómeno es de gran relevancia para Colombia, un país con un clima tropical y zonas montañosas que favorecen la incidencia de deslizamientos de tierra. En su estudio, a pesar de la diversidad de técnicas implementadas, estas resultan insuficientes para caracterizar los movimientos en masa. Por ello, se propone una metodología que combina la detección satelital remota con las técnicas de interferometría SAR, permitiendo identificar cambios en la superficie y pérdida de coherencia, características comunes en los deslizamientos de tierra. El caso particular de estudio es el deslizamiento de tierra ocurrido el 9 de enero de 2023 en Rosas, Cauca, el cual provocó un daño importante en la vía panamericana, incomunicando la zona sur del país. Esta técnica se presenta como una herramienta prometedora para avanzar en el estudio de los movimientos en masa, apoyando la gestión de riesgos y contribuyendo a la toma de decisiones informadas y a la emisión de alertas tempranas.

Palabras clave: SAR, interferometría, movimiento en masa, teledetección, imágenes satelitales.

Abstract

Landslides are geological events that annually generate human and economic losses. This phenomenon is of great relevance to Colombia, a country with a tropical climate and mountainous areas that favor the incidence of landslides. In its study, despite the diversity of techniques implemented, these are insufficient to characterize mass movements. Therefore, a methodology is proposed that combines remote satellite detection with SAR interferometry techniques, allowing the identification of surface changes and loss of coherence, common characteristics in landslides. The particular case of study is the landslide that occurred on January 9, 2023 in Rosas, Cauca, which caused significant damage to the Panamericana Highway, isolating the southern part of the country. This technique is presented as a promising tool to advance the study of mass movements, supporting risk management and contributing to informed decision-making and the issuance of early warnings.

Keywords: SAR, interferometry, mass movement, remote sensing, satellite images.

Tabla de Contenido

Resumen..... 2

Abstract 3
1. Planteamiento del problema de investigación 9
1.1. Descripción del área problemática 10
1.2. Formulación del problema 12
2. Justificación 12
3. Objetivos: 14
3.1. Objetivo general 14
3.2. Objetivos específicos 14
4. Antecedentes 15
5. Referente normativo y legal 18
6. Referente Teórico 19
6.1. Marco Geológico: 24
6.1.1. Formación Galeón (NgQpg) 25
6.1.2. Depósito de Cenizas (Qc): 26
6.1.3. Complejo Arquía 26
6.1.4. Granitoide de Bellones (Mzgb) 27
6.1.5. Secuencia sedimentaria rojiza (J?ss) 27
6.1.6. Complejo de Rocas máficas y Ultramáficas (Kiub) 27
6.1.7. Complejo Barroso-Amaime (Kiba) 28
6.1.8. Complejo Quebrada 28
6.2. Geología Estructural 29
6.2.1. Sistema de Falla Romeral 29
6.2.2. Fallas Mosquerillo-La Tetilla 29
6.3. Teledetección 29
7. Metodología 38
7.1. Metodología Enfoque metodológico 38
7.2. Tipo de estudio 38
7.3. Procedimiento 39
7.3.1. Obtención de datos SAR Interferométrico 39
7.3.2. Procesamiento InSAR 41
7.3.3. Exportar a Google Earth 56
8. Resultados 57
9. Discusión 64
10. Conclusiones 67

11. Recomendaciones 68
12. Referencias..... 70

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Ubicación de la zona del movimiento en masa. Municipio Rosas, Cauca, Colombia. 11

Ilustración 2. Imagen del deslizamiento de tierra en Rosas, Cauca (Carrillo, E et al., 2023)..... 12

Ilustración 3. Mapa Geológico del municipio Rosas, Cauca. Escala 1:100.000 adaptado de la plancha 364-Timbio, especificación zona del movimiento en masa. Fuente: SGC (2009). . **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 4. Funcionamiento SAR. Fuente. (GlobeSAR, s.f.)..... 32

Ilustración 5. Transmisión de un sistema SAR. Fuente. (Lira, 2002)..... 33

Ilustración 6. Reflector Diedro y Triedro. Fuente. (GlobeSAR, s.f.) 34

Ilustración 7. Proceso de adquisición de dos imágenes SAR en un amista región, diferentes momentos. Si se observa movimiento entre ambas imágenes, se registra el cambio en la fase. El interferograma mapea dichos cambios. Geoscience Australia. 35

Ilustración 8. Comparación del desenrollamiento de la fase y fase absoluta..... 37

Ilustración 9. Diagrame de flujo simplificado del procesamiento de imágenes InSAR 39

Ilustración 10. Obtención de los datos interferómetros SRA por medio de Alaska Satellite Facility Sentinel Data Portal 41

Ilustración 11. Proceso para corregistar las dos imágenes (S1 TOPS Coregistration) 42

Ilustración 12. Determinar parámetros para S1 TOPS Coregistration..... **¡Error! Marcador no definido.**

Ilustración 13. Corregistro de las imágenes antes y después del evento. IW2_VV. Zoom 1:22, pixel spacing: 12.61m 3.59m. Snap 43

Ilustración 14. Imagen antes de la aplicación del filtro TOPS Deburst para la eliminación de las franjas negras que se generan en los barrios. IW2_VV. Zoom 1:19. Pixel spacing 12.61m 3.59m. Snap..... 44

Ilustración 15. Aplicación de ‘Topographic Phase Removal’. Zoom 1:18. Pixel spaicing 14.09m 3.55m. Snap. 45

Ilustración 16. Aplicación del filtro Goldstein Phase Filtering 46

Ilustración 17 Combinación de i y q para la creación de la fase. 47

Ilustración 18. Aplicación del filtro Goldstein Phase Filtering y Multi-Looking.Zoom 1:15.8. Pixel spacing 14.09m 3.55m. Snap. 47

Ilustración 19. Verificación en los Plugins SNAPHU Unwrapping instalado en Snap. 48

Ilustración 20. Imagen producto desenrollada. 49

Ilustración 21. Parámetros y coordenadas para extraer el subconjunto 50

Ilustración 22. Producto de pasar de fase desenrollada a desplazamiento 51

Ilustración 23. Producto de la creación de capa coherencia por medio de capas anteriores. 52

Ilustración 24. Pasos para obtener una corrección en el terreno y la capa resultante. 53

Ilustración 25. Producto de aplicar transparencia en los datos de coherencia < 0.2 54

Ilustración 26. Pasos para aplicar correctamente la corrección en los desplazamientos de terreno. 55

Ilustración 27. Producto después de aplicar las correcciones y aumento de la confiablidad en los datos 55

Ilustración 28. Comparación de la capa exportada desde en SNAP y la imagen satelital de Google Earth Pro en donde se ubica el deslizamiento de tierra. Fecha de la imagen: 8/1/2024. Elevación 1429m. 57

Ilustración 29. Producto de Producto de pasar de fase desenrollada a desplazamiento con valores positivos en el grafico estadístico. 60

Ilustración 30. Perfil de desplazamiento con corrección del terreno relacionado con los pixeles del producto. En la parte inferior se muestra de donde se obtuvo los datos del perfil. 61

Ilustración 31. Agrupación de los datos obtenidos en el perfil de desplazamiento relacionada con la trayectoria de pixeles 62

Ilustración 32. Ilustración del KMZ exportado a Google Earth pro en la zona de estudio Rosas, Cauca..... 63

Ilustración 33. Configuraciones del Snaphu unwrapping en la pestaña de System Variables. 65

Ilustración 34. Archivo.txt del unwrapping generado. 65

Lista de tablas

Tabla 1. Clasificación de la velocidad de movimientos en masa. Fuentes: Cruden y Varnes (1996), The Geological Society (2012b). 21

Tabla 2. Clasificación según el tipo de movimiento. Fuentes: Cruden y Varnes (1996) y The Geological Society (2012b). 22

Tabla 3. Cuadro de definiciones Ecuación de radar..... 30

Tabla 4. Clasificación de bandas con su respectiva frecuencia y longitud de onda..... 30

Tabla 5. Coordenadas del área de interés..... 40

Tabla 6. Identificación de imágenes descargadas antes y después del evento con su respetivo ID 40

Tabla 7. Resumen de las fases en el procesamiento de las imágenes InSAR en SNAP..... 58

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Formula de radar. Chuvieco, 1995..... 29

Ecuación 2. Fórmula para la estimación de coherencia (Seymour & Cumming, 1994)..... 36

Ecuación 3. Formula fase interferométrica..... 36

1. Planteamiento del problema de investigación

Los deslizamientos de tierra son una de las mayores amenazas geológicas en las zonas montañosas de Colombia, provocan daños a la infraestructura, cambios ambientales y afectaciones a personas o en el peor de los casos, pérdida de vidas. En el año 2023 en el municipio de Rosas, Cauca se presentó un gran deslizamiento de tierra que puso en peligro la vida de los habitantes de la zona, y causo grandes daños a la infraestructura. Dicho deslizamiento, favorecido por la

topografía montañosa y las condiciones climáticas de la región aumenta la vulnerabilidad de los residentes de la zona (Carrillo, E et al., 2023).

Por lo anterior, el análisis y monitoreo de los deslizamientos de tierra es primordial, el implementar las nuevas tecnologías para la mitigación y prevención de los riesgos. La tecnología de radar de apertura sintética (SAR) y su aplicación interferométrica (InSAR) ha demostrado ser una herramienta eficaz para un seguimiento preciso del movimiento del suelo. Sin embargo, su implementación en Colombia es mínima.

A pesar de los grandes avances de las tecnologías con el desarrollo de la interferometría para lograr determinar movimientos terrestres, se presentan precarios estudios específicos que se apliquen al análisis de dichos eventos en Colombia. Esta carencia de avance e implementación de las nuevas tecnologías limita la capacidad de las autoridades locales y regionales en la implementación y desarrollo de estrategias con mayor grado de eficiencia para el monitoreo y mitigación de desastres.

Es de gran importancia mostrar cómo se puede implementar el análisis interferométrico SAR de forma efectiva en la observación y evaluación de los deslizamientos de tierra en una zona específica, para después ser replicada en otras zonas de deslizamientos con condiciones similares.

1.1.Descripción del área problemática

El evento del movimiento en masa ocurrido en el municipio de Rosas, Cauca el 9 de enero de 2023 fue de tal magnitud que afectó 4 veredas: Santa Clara, Chontaduro, La Soledad, Párraga Viejo, entre ellas, más de 150 viviendas, daños a bosques, cultivos, un daño importante de 300 m a la vía panamericana, lo que deja incomunicada la zona sur del país perjudicando la economía. Lo más importante del gran evento es que no ocasionó pérdida de vidas (Carrillo, E et al., 2023).

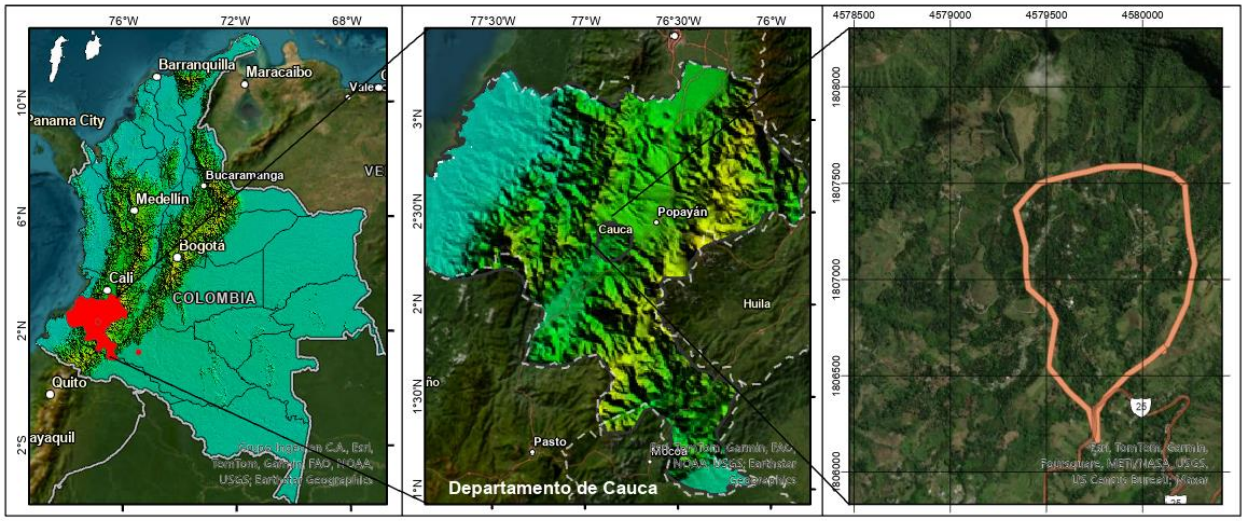


Ilustración 1. Ubicación de la zona del movimiento en masa. Municipio Rosas, Cauca, Colombia.

El deslizamiento de tierra ocurrió sobre la microcuenca de la quebrada Chontaduro en la base del Cerro Broncazo, extendiéndose por 90 ha. La microcuenca se encuentra en la plancha geológica 364-Timbio, compuesta por una secuencia de rocas volcánicas y epiclasticas pertenecientes a la formación Galeón (TQpg), los espesores de material volcánico pueden alcanzar los 800 m, se incluyen los ríos Quilcacé y Esmita. Se asocian los movimientos de los bloques tectónicos al sistema de falla Romeral, específicamente Falla Mosquerillo-La Tetilla (Orrego & Acevedo, 1993).

El movimiento de masa, permaneció activo días después de su primer evento el 9 de enero de 2023, continuando activo hasta el 23 de enero de 2023, se generaron varios hundimientos escalonados, exhibiendo grandes taludes de hasta 40 m de altura y coronas semicirculares en las partes altas. La carretera de la vía panamericana se vio totalmente destruida y cubierta por flujos lodosos (Carrillo, E et al., 2023).

Ilustración 2. Imagen del deslizamiento de tierra en Rosas, Cauca (Carrillo, E et al., 2023).

1.2.Formulación del problema

¿La implementación de las herramientas de interferometría SAR para la caracterización e interpretación de un movimiento en masa ocurrido en el municipio de Rosas, Cauca es una herramienta óptima?

2. Justificación

En el municipio de Rosas, Cauca, ha surgido una necesidad por fortalecer el conocimiento y prevención de los desastres a causa de los deslizamientos de tierra. En el desarrollo del proyecto, se implementa una metodología óptima y eficiente para identificar el comportamiento del deslizamiento de tierra. El área de estudio es de carácter montañoso, con altas precipitaciones y de

clima tropical donde se perciben suficientes condiciones para la ocurrencia de un deslizamiento de tierra como el del año 2023. En múltiples ocasiones se han visto afectadas las vías de transporte, viviendas, residentes, agricultores, ganaderos, entre otros pobladores de la zona (Carrillo, E et al., 2023).

Se demostró en anteriores estudios de la zona que las metodologías implementadas para interpretar un movimiento en masa como las simulaciones fluidodinámicas, son poco eficientes y arrojan resultados poco concluyentes, por las limitaciones que se presentan al momento de un deslizamiento de tierra (Carrillo, E et al., 2023). Las condiciones de la zona al momento del movimiento en masa son peligrosas, el acceso a la zona es limitado, situación que dificulta el estudio, pero son suprimidas bajo las herramientas remotas como la interferometría SAR.

Problemáticas como, limitaciones con la topografía al momento del deslizamiento podrán ser solventadas con herramientas modernas, en donde los resultados sean concluyentes y en menor tiempo para la toma de decisiones bien informadas y puedan ser llevadas a cabo por las autoridades competentes (Alayo, J. & Villegas, J., 2021).

El estudio de las imágenes InSAR es fundamental para entender el comportamiento de los deslizamientos de tierra, mejorando la gestión del riesgo a dichos eventos, específicamente en Rosas, Cauca. El uso de estas técnicas avanzadas dará datos tempranos sobre los movimientos en masa de la zona, brinda información de alta calidad a las autoridades competentes de la zona y la comunidad científica para desarrollar, implementar y mejorar las estrategias de mitigación, haciéndolas cada vez más efectivas. Los resultados de la investigación, se espera sean un modelo para estudios similares en otras regiones con alta susceptibilidad a movimientos de tierra a nivel país como Colombia o a nivel internacional.

Esta nueva tecnología ha revolucionado la forma de vigilar los deslizamientos de tierra en las zonas montañosas, partiendo en que la nubosidad no limita estos estudios, lo que antes ha sido una gran barrera. Sin embargo, la falta de conocimiento de las nuevas tecnologías hace que la gestión de la amenaza se vea limitada a las técnicas normalmente empleadas (Carrillo, E et al., 2023). Este proyecto de investigación busca llenar vacíos, proporcionar datos valiosos y desarrollar una metodología entendible y aplicable a diferentes zonas, contribuyendo de manera significativa en la seguridad y bienestar de las comunidades afectadas.

3. Objetivos:

3.1. Objetivo general

Realizar la caracterización e interpretación del movimiento en masa ocurrido en Rosas, Cauca por medio de la interferometría de apertura sintética de imágenes SAR.

3.2.Objetivos específicos

- Identificar los conceptos básicos de la interferometría SAR y rastreo de pixeles SAR para después ser aplicados en la realización del proyecto.

- Implementar una metodología entendible para el procesamiento de los datos en la creación de un interferograma.

- Interpretar los resultados de la fase de SAR interferométrico sobre la superficie terrestre y su comportamiento en el deslizamiento de tierra de Rosas, Cauca.

- Analizar la confiabilidad del método InSAR en la detección del movimiento en masa de la zona específica de estudio a comparación de metodologías anteriormente implementadas.

4. Antecedentes

En los estudios de susceptibilidad a deslizamientos de tierra se han implementado los Sistemas de Información Geográfica como una gran herramienta para la zonificación de riesgos. En los estudios más actualizados, se ha recurrido a análisis geoespaciales y estadísticos multivariables mucho más exactos y con mayor cantidad de datos en los modelamientos (Principi, N., 2024; Blahut et al., 2010).

Es evidente que las zonas montañosas como el área de estudio, son las más susceptibles a los eventos de movimientos en masa, esto debido a su alta inestabilidad del terreno por sus altas pendientes, lo que hace característico una alta probabilidad a deslizamiento. Según un informe de la Oficina de la ONU para Asuntos Humanitarios (2020), América Latina y el Caribe son la

segunda región más proclive a la ocurrencia de desastres naturales a nivel mundial. Es importante destacar que el cambio climático se ha convertido en un factor muy importante para la ocurrencia de los deslizamientos de tierra alrededor del mundo (Iverson, 2018).

Un deslizamiento de tierra se presenta cuando el poder de resistencia del suelo es superado por la fuerza de corte (Refahi, 2000). Según la Organización Mundial de la Salud 'OMS' (2022), los movimientos de tierra representan aproximadamente el 12% del total de desastres naturales. Ocasionan más de 11.500 muertes anuales. La susceptibilidad a un deslizamiento de tierra se define como la probabilidad de ocurrencia de dicho deslizamiento en una ubicación geográfica determinada (van Westen et al., 2006; Guzzetti et al., 2006).

Debido a la gran emergencia después del evento del deslizamiento de tierra en rosas cauca, el SGC junto con la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y el Instituto Nacional de Vías (2023), hacen un informe técnico como herramienta para la gestión del riesgo, para ser usado en la toma de decisiones mejor informadas para las autoridades locales, al ser un informe de urgencia, las entidades encargadas debieron entregarlo de forma rápida con la información oportuna, sin entrar en muchas precisiones.

En dicho informe, se hace una modelación fluido-hidráulicas para identificar la altura y velocidad del flujo generado por altas precipitaciones en el movimiento de masa, iniciando de la parte alta en la vereda Soledad y transitando hasta la cuenca baja en la vereda Chontaduro, el informe al final no es concluyente por limitaciones en la topografía, reología, incertidumbre en los volúmenes de flujo entre otras limitaciones de elementos adicionales que no se incluyen. Acevedo (2022) hace un estudio en Pamplona, Colombia con herramientas SIG como QGIS para generar modelos digitales de elevación y modelación del terreno, permitiendo conocer, además, de la

morfología y topografía, el comportamiento de la zona en caso de un evento de deslizamiento. Con el estudio de Acevedo se demuestra como con las herramientas computacionales se puede entender mejor dichos eventos.

La implementación de este mapeo puede ser de gran ayuda para la planificación de metodologías estratégicas para la mitigación de riesgos, monitoreo continuo y alerta temprana en caso de presentar un riesgo latente a deslizamiento de tierra, dichas metodologías son eficientes y de gran utilidad para las autoridades encargadas y planificadores de cada sector en específico (Roccatti et al., 2021).

Con el lanzamiento del ERS-1 en 1991 es posible utilizar Interferometría SAR (InSAR) para interpretar los movimientos del terreno, además de caracterizarlos con sus diferentes procesos y peligros relacionados (Colesanti y Wasowski, 2006; Delacourt et al., 2007; Herrera et al., 2009). El análisis de deslizamientos en la superficie terrestre con InSAR es cada vez más implementado para cartografiarlos (Farina et al., 2006; Bianchini et al., 2011; Righini et al., 2011; Cigna et al., 2012; Bianchini et al., 2013; Strozzi et al., 2013; Solari et al., 2018).

González et al. (2008) utilizaron imágenes ASAR y ERS para determinar el movimiento del suelo en seis deslizamientos de tierra específicos en Perú, debido al número limitado de imágenes, cobertura vegetal y DEM de baja resolución del Shuttle Misión de Topografía por Radar (SRTM), se obtuvieron resultados poco satisfactorios. Por otro lado, Alayo (2021) realiza un análisis de desplazamientos producidos por remociones en masa en la ciudad de Huancabamba, Perú, correlacionando subpíxeles con ayuda de imágenes ópticas satelitales de SENTINEL 2 y SPOT 6, valida dichos resultados con movimientos de GPS en una red de puntos geodésicos, logrando identificar zonas inestables y de peligro en la ciudad.

En general, en Colombia se tiene una carencia en estudios con datos InSAR de satélites para la investigación de ocurrencia de deslizamiento de tierra y su potencial para caracterizarlos, sirviendo de insumo para la gestión de riesgo de desastres.

5. Referente normativo y legal

El estudio de los movimientos en masa hace parte de la gestión de riesgo de desastres, donde se regulan los planes, estrategias y medidas tomadas para la reducción de riesgo y para un buen manejo si ocurre un desastre. Lo anterior con el principal objetivo de asegurar la sostenibilidad y seguridad colectiva, promoviendo la mejora en la calidad de vida de la comunidad. Dentro de las normativas para la gestión de riesgos de desastres están:

Ley 1523 de 2012. Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial 48411 de abril 24 de 2012. Bogotá D.C (Colombia, Congreso de la República., 2012).

Decreto 1807 de 2014. Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones (Colombia, Presidencia de la República., 2014).

Decreto Ley 919 de 1989: Establece el Sistema Nacional para la Prevención y Atención de Desastres (hoy conocido como el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres - SNGRD) y crea la Dirección Nacional para la Prevención y Atención de Desastres, que fue el precursor de la UNGRD Referente teórico

6. Referente Teórico

Los deslizamientos de tierra son un fenómeno natural con graves consecuencias, tanto para las comunidades como para la infraestructura y el medio ambiente. En Colombia, particularmente en el departamento de Cauca, los movimientos en masa son eventos recurrentes debido a la combinación de varias variables como factores geológicos, antropogénicos y climáticos. El municipio de Rosas y sus alrededores ha sido identificado como un área de alta vulnerabilidad a estos eventos, lo que hace de total importancia la implementación de técnicas de monitoreo y prevención de desastres, mucho mejor si son técnicas modernas que mejoren la eficiencia de los procesos.

La interferometría de radar de apertura sintética (SAR) ha demostrado ser una herramienta para observar y monitorear los deslizamientos de tierra, siendo una técnica en la que la nubosidad no limita la toma de datos, por lo que proporciona eficiencia para evaluar desastres en diferentes fechas. Estudios alrededor del mundo han demostrado su eficiencia en la detección de zonas con movimientos activos sobre la superficie terrestre, en Colombia, es una técnica poco conocida y, por ende, poco implementada. Es clara la necesidad de capacitar a los profesionales, científicos locales y las entidades a cargo de la gestión del riesgo de desastres.

A continuación, se expondrán conceptos teóricos para definir la temática del proyecto, se precisará en terminologías relacionadas con la investigación valiéndose de referentes teóricos. Lo anterior proporciona una perspectiva más clara del estudio para un correcto análisis.

Los movimientos en masa, popularmente se conocen como deslizamiento de tierra, derrumbe, deslizamiento, procesos de remoción en masa, entre otros. Se definen como movimientos de suelo y roca pendiente abajo. Son uno de los peligros naturales más comunes del mundo, provocando numerosas víctimas al año (Fell et al., 2008; Varnes and the IAEG, 1984). Bonnard (2008a) señala que no necesariamente ocurre por la pendiente, como lo es el caso de los movimientos de roca o los flujos de escombros. El Servicio Geológico Colombiano en el año 2015 elaboró un Mapa Nacional de Amenaza por Movimientos en Masa, en el que se identificó que aproximadamente el 20% del territorio nacional está categorizado como amenaza alta y el 4% en amenaza muy alta. Los movimientos en masa son de tamaños muy variables, pueden ir desde unos pocos m3 a algunos millones de m3. Cruden y Varnes (1996) proponen una clasificación de la velocidad de los eventos de movimientos en masa (ver Tabla 1), van desde los mm/año a los m/seg, también asociándose al daño que puedan causar.

Tabla 1. Clasificación de la velocidad de movimientos en masa. Fuentes: Cruden y Varnes (1996), The Geological Society (2012b).

Es importante definir el Tipo de Material envuelto en el movimiento de masa según el tamaño de sus partículas:

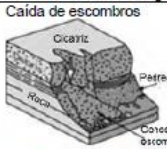
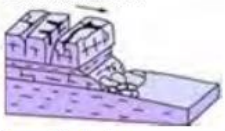
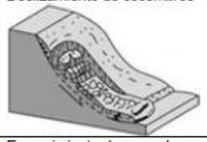
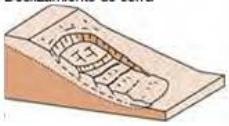
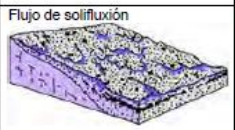
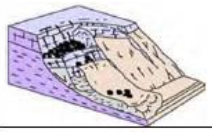
- Roca: masa firme y dura. Suelo: agregado de partículas sólidas transportadas.
- Tierra: más del 80 % son partículas < 2mm.
- Barro: más del 80% son partículas < 0.06mm.
- Escombros: combinación de material grueso (> 2mm) con material pequeño (<2mm).

Velocidad Clase	Descripción	Velocidad (mm/sec)	Velocidad típica	Probable significado destructivo
7	Extremadamente rápido	5x103	5 m/seg	Catástrofe de violencia mayor; edificios destruidos por impacto de material desplazado; muchas muertes; improbable escapar.
6	Muy rápido	5x101	3 m/min	Algunas pérdidas humanas, muy rápido para permitir que todas las personas escapen.
5	Rápido	5x10-1	1,8 m/hora	Posible escape de evacuación; estructuras y equipos destruidos.
4	Moderado	5x10-3	13 m/mes	Algunas estructuras pueden ser temporalmente mantenidas.
3	Lento	5x10-5	1,6 m/año	Posible remediación de construcciones se puede ejecutar durante el movimiento.
2	Muy lento	5x10-7	15 mm/año	Algunas estructuras sin daño por el movimiento.
1	Extremadamente LENTO	-	-	Imperceptible sin instrumentos de monitoreo, posibles construcciones con precaución.

Cruden y Varnes (1996) y The Geological Society (2012b) proponen una clasificación de los movimientos en masa según la distribución de la masa desplazada y la dinámica del

movimiento en masa, resumida en la Tabla 2, en la que se anexan imágenes del tipo de desplazamiento para mejorar su comprensión:

Tabla 2. Clasificación según el tipo de movimiento. Fuentes: Cruden y Varnes (1996) y The Geological Society (2012b).

TIPO DE MOVIMIENTO	TIPO DE MATERIAL		
	Capa de roca base (bedrock)	Suelos de ingeniería	
		Predominantemente grueso	Predominantemente fino
Caída	Caída de roca	Caída de escombros 	Caída de tierra
Derrumbe	Derrumbe de roca	Derrumbe de escombros	Derrumbe de tierra
Deslizamiento – Deslizamiento Rotacional	Deslizamiento rotacional único	Deslizamiento rotacional múltiple	Deslizamiento rotacional sucesivos
Deslizamiento – Deslizamiento Traslacional	Deslizamiento de roca 	Deslizamiento de escombros 	Deslizamiento de tierra 
Esparcimiento lateral	Esparcimiento de roca	Esparcimiento de escombros	Esparcimiento de tierra
Flujo	Flujo de solifluxión 	Flujo de escombros	Flujo de tierra (deslizamiento de tierra)
Complejo	Ej.: asentamiento flujo de tierra con caída de rocas 		Ej.: compuesto, no circular. Parte rotacional/ parte traslacional. Clasificación de deslizamiento de flujo de tierra al pie

La evaluación del peligro es un aspecto muy importante para la reducción de riesgos de desastres, más en una zona como Rosas, Cauca. La amenaza, se define como la ocurrencia de

eventos naturales en un área específica, con cierta intensidad dentro de un periodo de tiempo específico y con daños latentes (UNISDR,2009; IPCC, 2014; Blaikie et al., 2014). En el caso puntual, peligro a que un deslizamiento de tierra se presente con tal severidad de causar pérdidas humanas, impactos en la salud, la calidad de vida de la población, daños a bienes materiales, daños en servicios y recursos ambientales (Colombia, Congreso de la República., 2012).

Para definir el nivel de peligro, se deben tener en cuenta dos variables: intensidad y frecuencia. Los deslizamientos de tierra suelen ser procesos no recurrentes, por lo que al determinar la intensidad se basa en el estado de actividad y la velocidad (ver tabla 1). La evaluación del peligro se hace por medio del mapeo en campo, con imágenes satelitales y recopilación de eventos históricos.

La gestión del riesgo es un evento social de planeación, ejecución, seguimiento y evaluación de políticas y acciones permanentes para el conocimiento del riesgo, en un intento por prevenir, prepararse, controlar las situaciones de desastre o para la fase de recuperación. Todas las acciones para contribuir al bienestar y calidad de vida de la comunidad con un desarrollo sostenible (Colombia, Congreso de la República, 2012). El Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres se integra a esta definición: ‘Infraestructura colombiana de datos espaciales’, donde se tiene información para la gestión de riesgo de desastres, debe mantenerse actualizado y funcional, fomentando el uso de esta información como apoyo para la gestión de riesgos de desastres (Colombia, Congreso de la República., 2012).

6.1.Marco Geológico:

La zona de estudio se ubica en el sur occidente de Colombia, en la parte sur de Popayán. En esta zona se tiene 4 provincias geomorfológicas importantes: La cordillera central, el valle intermedio Cauca-Patía altiplano nariñense, la cordillera occidental y en la parte oeste encontramos la costa pacífica. La forman las rocas metamórficas del Paleozoico y Mesozoico, rocas clásticas del terciario cortadas por rocas intrusivas intermedias y sobre estas encontramos la secuencia

vulcano-sedimentaria del Neógeno-Cuaternario (Orrego y Acevedo, 1993), lo anterior resumido en la ilustración 3.

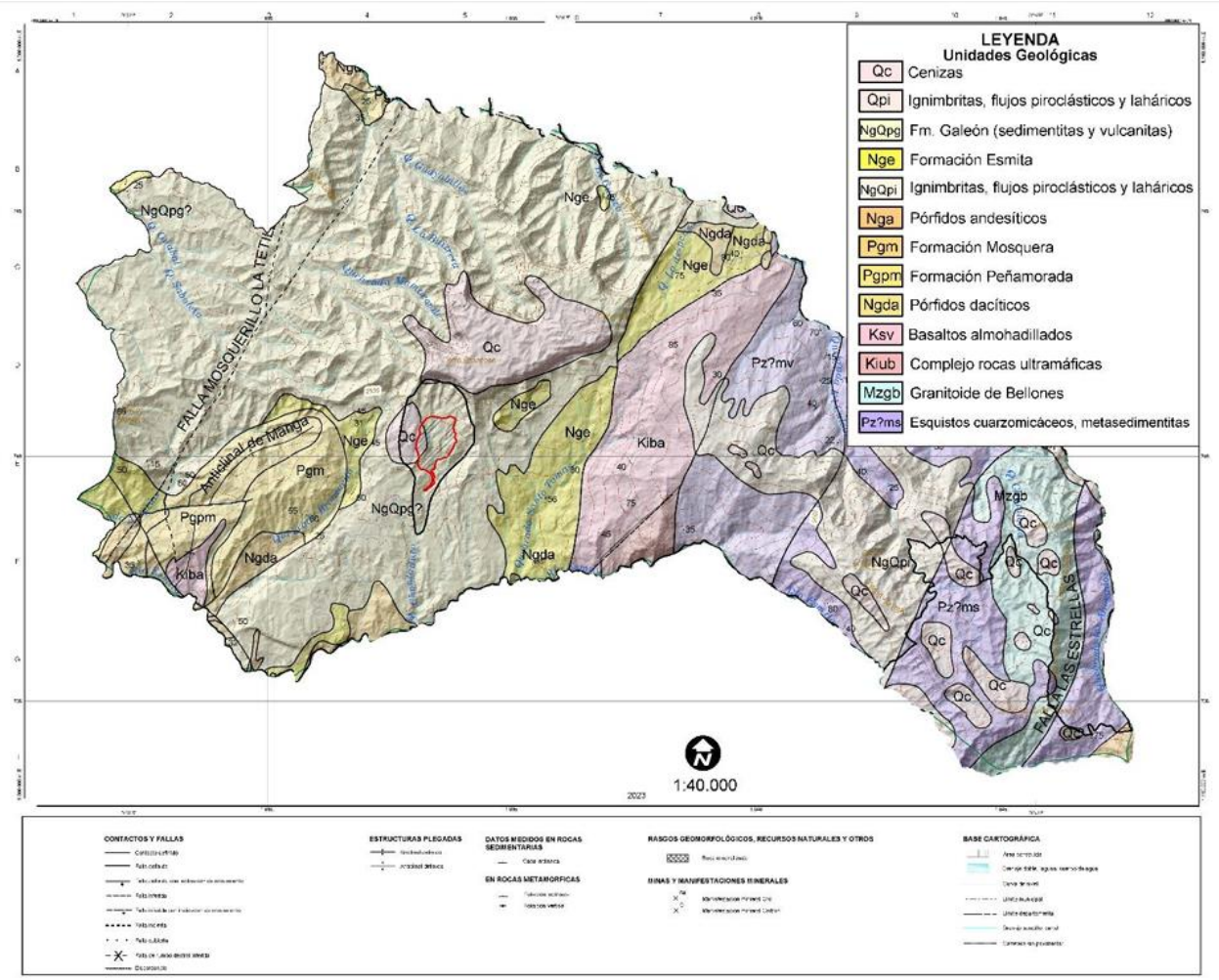


Ilustración 3. Mapa Geológico del municipio Rosas, Cauca. Escala 1:100.000 adaptado de la plancha 364-Timbio, especificación zona del movimiento en masa. Fuente: SGC (2009).

Es evidente que la composición de la microcuenca Chontaduro está conformada principalmente por la Formación Galeón (NgQpg) (Orrego y Acevedo, 1993) y de Cenizas (Qc).

6.1.1. Formación Galeón (NgQpg)

Hacen parte de las “Vulcanitas de Galeón”, específicamente, el Conjunto de Sedimentitas (Epiclásticas) y Rocas Volcánicas (NqQpg) llamado así según Grosse (1935) al haberse definido en el Cerro Galeón, es característico por sus escarpes abruptos y plegamientos asociados a las fallas Mosquerillo-La Tetilla que siguen activas. Edad estimada Mioceno inferior al Cuaternario. Se componen principalmente secuencias de material epiclástico con aporte importante de material volcánico, algunos cantos de metamorfitas. Presenta capas de ceniza volcánica delgadas de composición ácida. Las partes superiores tienen cenizas muy meteorizadas (Orrego y Acevedo, 1993).

6.1.2. Depósito de Cenizas (Qc):

Cenizas de caída meteorizadas, compuestas principalmente de pumita, óxido y fragmentos de vidrio. presenta espesores de 15 a 20 m. Se le asigna una edad Plioceno-Cuaternario según Orrego & Paris (1990).

Otras de las formaciones presentes en el municipio de Rosas Cauca, de gran importancia geológica pero que no se encuentran aflorando en ninguno de los sectores del deslizamiento de tierra son:

6.1.3. Complejo Arquía

Unidad característica por su metamorfismo dinamotérmico regional en facies de esquistos verdes a anfibolitas con presión media. Encontramos las Anfibolitas y metagabros (cretácicas) asociados a la falla Silvia-Pijao, esquistos verdes (pre-cretácico) y meta-sedimentarios, esquistos cuarzo-micáceos y cuarcitas (cretácicos).

Se presenta una alternancia entre esquistos verdes y esquistos cuarzo micáceos de origen sedimentario. La relación con las anfibolitas, se interpreta un origen oceánico (Orrego y Acevedo, 1993).

6.1.4. Granitoide de Bellones (Mzgb)

Se presenta como un bloque tectónico alargado. Limitado por esquistos cuarzo micáceos cuarcitas a ambos lados en las zonas de contacto, se evidencian allí mismas evidencias de falla, lo que indica su emplazamiento tectónico. Es una roca ígnea plutónica granitoide con cristales gruesos considerada de edad Triásico-Jurásico (Orrego y Acevedo, 1993).

6.1.5. **Secuencia sedimentaria rojiza (J?ss)**

Como su nombre lo indica, la característica principal es su color rojizo. En la zona sur, este y norte está cubierta por rocas volcánicas del cenozoico tardío. En la parte oeste presentan un contacto fallado (Falla San Jerónimo) con el Complejo Quebradagrande una secuencia de vulcanitas básicas y sedimentarias de edad cretácea. A la secuencia sedimentaria se le asocia un origen continental de edad Triásico-Jurásico (Orrego y Acevedo, 1993).

6.1.6. Complejo de Rocas máficas y Ultramáficas (Kiub)

Aparece como bloques tectónicos de ofiolitas asociados a las falla Cauca-Almaguer. Se emplazan dentro del Complejo Barroso-Amaime, una secuencia de vulcanitas básicas y sedimentarias. Las secuencias se encuentran incompletas debido al tectonismo. Su emplazamiento tectónico inicia en el cretáceo y continúa hasta el neógeno (Orrego y Acevedo, 1993).

6.1.7. Complejo Barroso-Amaime (Kiba)

Secuencia de rocas básicas de basaltos, diques de gabros y piroclastitas. Se presentan algunas rocas sedimentarias compuestas por limolitas, arcillolitas, chert con radiolarios y areniscas de grano fino con posible metamorfismo dinámico. Se consideran de edad Pre-Coniaciana.

6.1.8. Complejo Quebrada

Al obtener datos tan difusos de las observaciones de campo y mapas poco concluyentes, el enfoque de la interferometría de radar SAR es una gran oportunidad para el mapeo de la deformación de la superficie brindando datos con alta precisión. Desde el lanzamiento de ERS-1 en 1991 es posible utilizar la interferometría de radar para identificar los movimientos en la superficie terrestre.

6.2.Geología Estructural

La microcuenca de la quebrada Chontaduro presenta escarpes abruptos relacionados con el movimiento de bloques asociados a la falla Mosquerillo-La Tetilla del Sistema de fallas Romeral.

6.2.1. Sistema de Falla Romeral

Su nombre fue asignado por Grosse (1926), ubicado en la parte occidental de la cordillera central de Colombia y están relacionados con el levantamiento de esta, su dirección predominante es N-S. Estas fallas ponen en contacto corteza continental con corteza oceánica. Es un sistema grande de fallas que se puede extender desde el Ecuador hasta la parte septentrional de Colombia, se le asocian los deslizamientos de tierra y afectan rocas de edad Paleozoico y Holoceno.

6.2.2. Fallas Mosquerillo-La Tetilla

Es una estructura de gran tamaño con tendencia general N-S y buzamiento vertical, compuesta por tres fallas paralelas que se intersecan, afectan rocas de edad cenozoicas continentales y mesozoicas oceánicas. París & Marulanda (1975) asigna su nombre por La Tetilla, al noroeste de Popayán.

6.3. Teledetección

Se define como el procedimiento para la obtención de imágenes de la superficie terrestre desde plataformas espaciales con sensores, se presenta por medio de una interacción energética artificial o por luz solar (Chuvieco, 1995). Hay dos tipos de teledetección, uno son los Pasivos y Activos, los primeros con un rango del espectro electromagnético en el que se toman imágenes, logrando diferenciar los diferentes patrones de la cobertura terrestre, analizar firmas espectrales y monitoreos gracias al número de bandas; uno de los grandes inconvenientes son las limitaciones

en la presencia de nubosidad, esto no es inconveniente para los sensores **Activos: LIDAR** los cuales tienen un rango electromagnético de microondas en la región del espectro de 1m a 1 cm , subsanando la información con nubosidad por lo que la atmósfera no limita la toma de datos (Chuvieco, 1995). A continuación, la ecuación de radar:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2}$$ Ecuación 1. Formula de radar. Chuvieco, 1995.

Tabla 3. Cuadro de definiciones Ecuación de radar

P_t: potencia transmitida	F: factor de propagación del patrón
G_t: ganancia de la antena de transmisión	R_t : distancia del transmisor al objetivo
A_r: apertura efectiva (área) de la antena de recepción	R_r : distancia del objetivo al receptor
σ: coeficiente de decaimiento del objetivoA_r: apertura efectiva (área) de la antena de recepción.	

RADAR ilumina el terreno con las microondas para producir la imagen 2D, el rango de longitudes y frecuencias de longitudes más usadas son las correspondientes a las bandas L, C, X, pero existen más (Hill, 2001), resumidas en la tabla 4:

Tabla 4. Clasificación de bandas con su respectiva frecuencia y longitud de onda.

Banda	Frecuencia (GHz)	Longitud de onda (cm)

P	0,3 - 1	30 - 100
L	1 - 2	15 - 30
S	2 - 4	7,5 - 15
C	4 - 8	3,75 - 7,5
X	8 - 12,5	2,4 - 3,75
Ku	12,5 - 18	1,67 - 2,4
K	18 - 26,5	1,1 - 1,67
Ka	26,5 - 40	0,75 - 1,1
Milimétrica a Submilimétrica	100 - 26,5	0,3 - 0,75

Para el caso de estudio se implementa un **Radar de Apertura Sintética** es un sistema de iluminación lateral radar con grandes mejoras por su alta versatilidad gracias a su tamaño pequeño fácil de emplear en plataformas espaciales, cuentan con baja resolución por el tamaño de la antena, su operación se basa en el efecto Doppler, se toman datos de pulsos de un mismo punto de la superficie pero en dos momentos diferentes de la trayectoria, el radar SAR es muy efectivo para la detección de los componentes y tipo del movimiento, gracias a su ángulo de observación (Pérez & Mu oz, 2006).

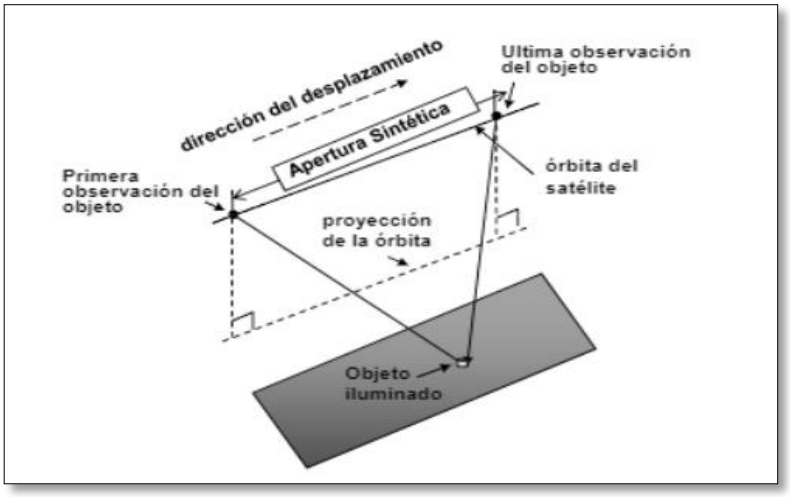


Ilustración 4. Funcionamiento SAR. Fuente. (GlobeSAR, s.f.).

El **ángulo de incidencia** es el ángulo entre la normal de la superficie y la dirección de iluminación del radar. La geometría de visualización de una imagen varía de punto a punto en la dirección del rango.

La **resolución espacial**: en los sensores se tiene dos dimensiones, una en dirección de azimut (determinada por el ancho angular del haz) y otra en dirección del rango (determinada por la distancia sobre la línea de visión entre radar y el objeto observado, también la determina la distancia en la dirección del rango proyectada sobre un plano).

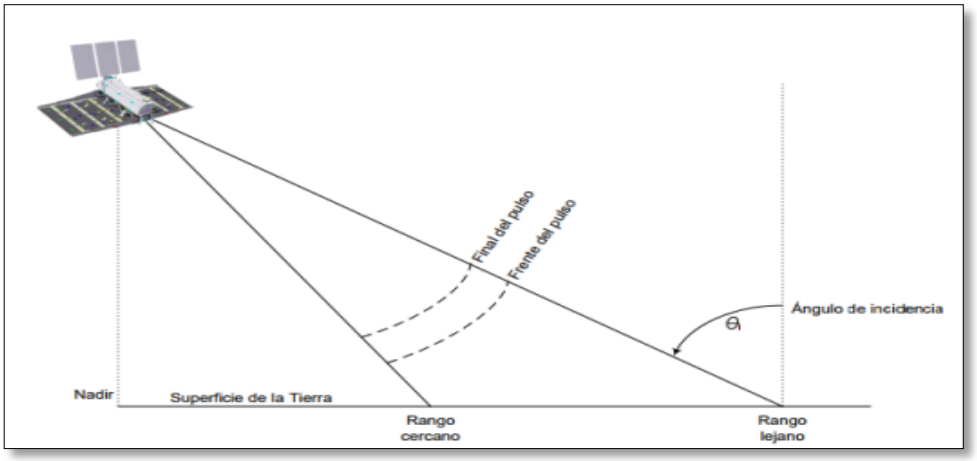


Ilustración 5. Transmisión de un sistema SAR. Fuente. (Lira, 2002)

La **polarización** es una característica que aporta definición de la radiación del sensor. Define la orientación horizontal o vertical del vector del campo eléctrico y magnético de la señal. Los radares pueden operar en diferente polarización en la que recibe y trasmite la señal (Hermosillo Camacho et al., 2018): Horizontal-Horizontal (HH) - Horizontal-Vertical (HV) - Vertical-Vertical (VV) -Vertical-Horizontal (VH).

Se tienen 4 **tipos de reflexión**: Difusa, Especular, Moderada y de Efecto angular.

La reflexión de **efecto angular** se presenta cuando se tienen 2 o 3 superficies planas, casi perpendiculares entre sí y de cara al sensor, se presenta principalmente en ciudades por las construcciones.

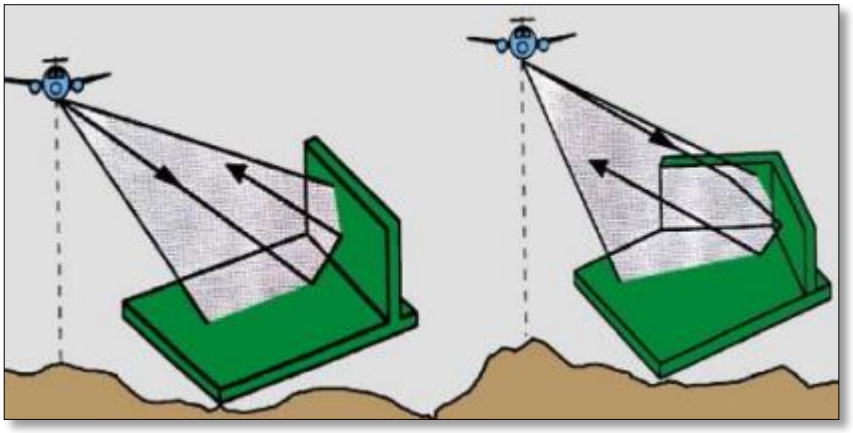


Ilustración 6. Reflector Diedro y Triedro. Fuente. (GlobeSAR, s.f.)

La reflexión **difusa** se presenta en superficies rugosas, un ejemplo son las zonas de vegetación, la reflexión **moderada** es muy similar, solo que en relieves más suaves. Por último, la reflexión **especular** se presenta en superficies lisas o con rugosidad muy suave, simulando un espejo un ejemplo son las aguas tranquilas (GlobeSAR, s.f.).

Niveles de Procesamiento: se tienen diferentes niveles de procesamiento en las imágenes SAR, según el modo en que se adquieren y su resolución (Maitre et al., 2001). El primero es el **Nivel 0**: en donde los datos son brutos y sin focalizar.

Nivel 1: Son los disponibles para el público, mediante algoritmos se procesan los datos de nivel 0. Entre los procesamientos encontramos los productos SLC Y GRD (ESA, 2013).

Single Look Complex (SLC/SSC): fue el producto que se utilizó para este caso de estudio, son datos focalizados, georreferenciados y con geometría de vista lateral.

Ground Range Detected (GRD): Son datos focalizados, son proyectados a partir de un modelo de elipsoide de la tierra como el WGS84, con las correcciones dependiendo de la altura del terreno.

Nivel 2: productos derivados del nivel 1, son productos geolocalizados, generalmente en multivista (Multilook), son empleados para el estudio de olas, de corrientes de vientos, entre otros

Interferometría de radar de apertura sintética InSAR: es una técnica empleada para medir la topografía por medio del procesamiento digital de imágenes, permite ver las formaciones en la superficie terrestre y los cambios que se presenten por medio de la comparación de dos imágenes SAR en tiempos diferentes.

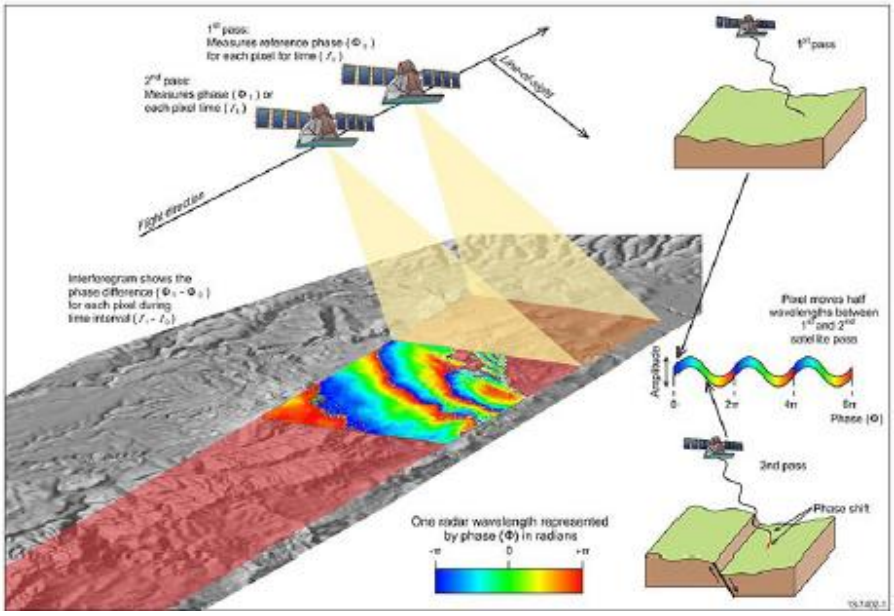


Ilustración 7. Proceso de adquisición de dos imágenes SAR en un amista región, diferentes momentos. Si se observa movimiento entre ambas imágenes, se registra el cambio en la fase. El interferograma mapea dichos cambios. Geoscience Australia.

Para la interpretación de esta técnica es muy importante la **coherencia** entre las imágenes al modificarse las propiedades físicas del terreno por lo que pierde la coherencia, la similitud entre píxeles entre las imágenes debe ser muy similar para estar correlacionadas (Lira, 2002, p.32). Para estimar la coherencia entre imágenes se utiliza la ecuación 2. Si el resultado de los píxeles arroja valor de 0, no hay coherencia, si llegan a 1, hay coherencia.

$$\gamma = \frac{|\sum_{n=1}^{N} Y_1^{(n)} Y_2^{*(n)}|}{\sqrt{\sum_{n=1}^{N} |Y_1^{(n)}|^2 \sum_{n=1}^{N} |Y_2^{(n)}|^2}}$$

Ecuación 2. Fórmula para la estimación de coherencia (Seymour & Cumming, 1994).

Fase interferométrica: es la resta entre imagen master y la imagen esclava.

$$\triangle \Phi_{AB} = \triangle \Phi_{plana} + \triangle \Phi_{topografía}$$

Ecuación 3. Formula fase interferométrica.

La primera expresión de “plana” hace referencia a la superficie de altura constante mientras que “topografía” es la que mide los cambios de altura en los diferentes puntos de la escena (Blanco y Barreto, 2009). Un **interferograma** es la combinación de imágenes procesadas, en donde se compara ambas fases reflejadas por la superficie terrestre y se analiza la diferencia entre ambas, permite calcular las variaciones en la distancia entre la superficie y el sensor (Ferrer Rubio et al., 2016).

Desenrollamiento de la fase: Es uno de los pasos más importantes para estimar el movimiento del terreno, también es una de las partes más difíciles en la interferometría, con el desenrollamiento se obtienen la conversión de los datos de altura. La fase simplemente genera una

información confusa de la altitud relativa, mientras que al desenrollar genera un resultado más real (ESA, 2013).

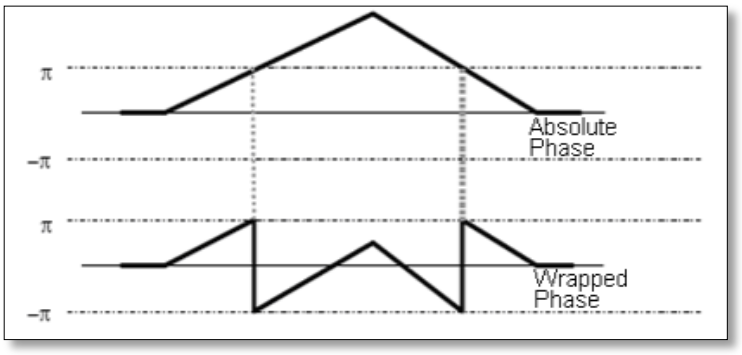


Ilustración 8. Comparación del desenrollamiento de la fase y fase absoluta.

Fase a desplazamiento: A partir de la fase, se pueden obtener los desplazamientos (en metros) del terreno, brinda la información necesaria para identificar cómo se comporta un movimiento sobre la superficie terrestre (Seppi, 2016).

SNAPHU: Fue implementado por Chen y Zebker (2002) para el desenrollamiento de la fase bidimensional, es la implementación de un algoritmo estadístico y de flujo de red para ser aplicado en el análisis de los datos de radar de apertura sintética InSAR. El modelo implementa modelos estadísticos con los datos topográficos, estadísticos y de deformación. El programa utiliza el lenguaje de programación C (European Space Agency, 2017). Para el desenrollamiento de la fase, primero se deben exportar los archivos del interferograma con los filtros aplicados a través del programa SNAP.

SNAP: "Sentinel Application Platform" Es un programa diseñado para el procesamiento de imágenes satelitales de Sentinel, lanzado por la Agencia Espacial Europea.

7. Metodología

7.1. Metodología Enfoque metodológico

El enfoque de la investigación es principalmente cuantitativo, pues se basa en medir un evento geológico como los movimientos en masa específicamente en Rosas, Cauca. Es un caso real y puntual, basado en datos científicos, con metodología para la caracterización de un deslizamiento de tierra. Es un proceso secuencial, probatorio y analiza la realidad del evento de forma objetiva. Para al final probar las hipótesis iniciales.

Busca generar resultados con procesamientos que puedan ser replicados en otros eventos de movimientos en masa en diferentes zonas, permitiendo la predicción bajo condiciones similares.

En la investigación, se promueve la comprobación de la eficiencia en los resultados para las predicciones de los deslizamientos de tierra y próximas decisiones bien informadas con el fin de mitigar las afectaciones.

7.2. Tipo de estudio

Para una investigación cuantitativa, se pueden tener 4 tipos de estudios: exploratorio, descriptivo, correlacional y explicativo. Para el caso puntual de la investigación, se tienen, un enfoque descriptivo en el que se tiene la zona de estudio y la metodología detallada que se va a emplear, se describe paso a paso las herramientas usadas para el correcto desarrollo de las imágenes, con los métodos que se puedan implementar para el deslizamiento de tierra en Rosas, Cauca.

7.3. Procedimiento

Se describe la secuencia metodológica para desarrollar y procesar este trabajo para la caracterización de los deslizamientos de tierra en la zona de estudio. Este proceso se agrupó en fases para que se entendiese mejor. La metodología seguida es de acuerdo a lo propuesto por Fielding, E. y Handwerger, A. (2019).

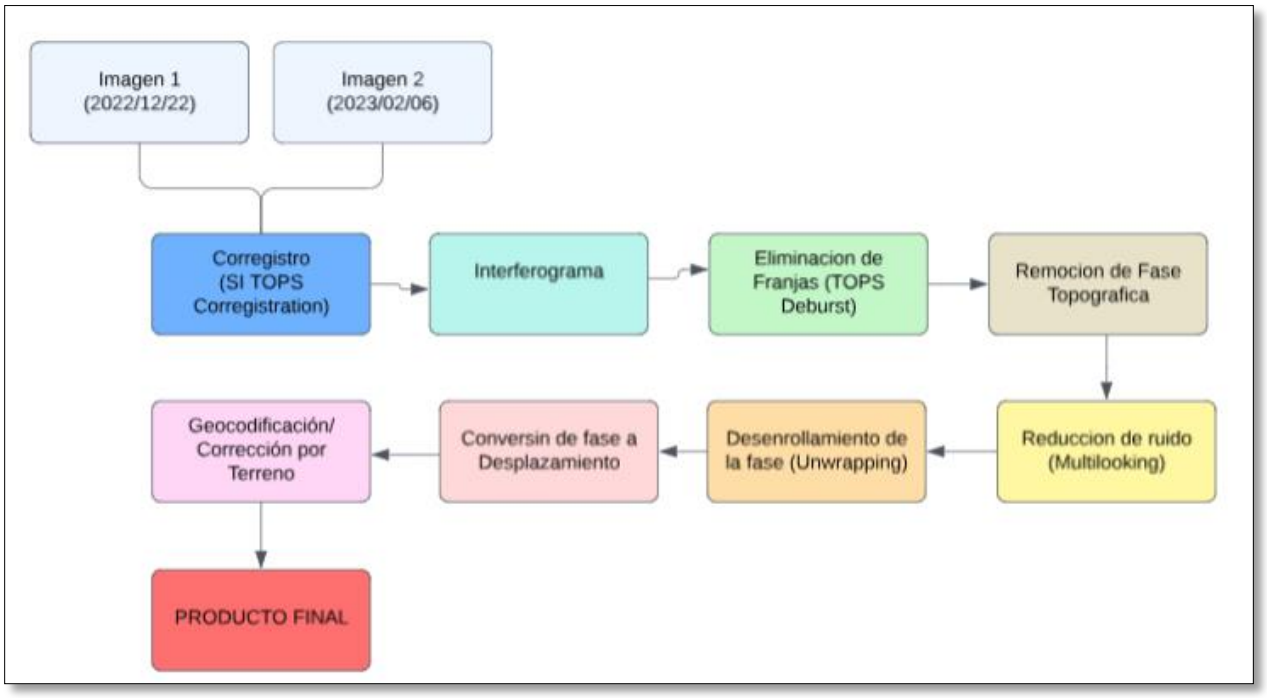


Ilustración 9. Diagrame de flujo simplificado del procesamiento de imágenes InSAR

7.3.1. Obtención de datos SAR Interferométrico

Los datos se obtuvieron en la plataforma Alaska Satellite Facility Sentinel Data Portal: https://search.asf.alaska.edu/ como se observa en la Ilustracion 11, es una fuente de datos de imágenes de muy buena calidad y con un vasto conjunto de datos disponibles en formatos que pueden ser trabajados y utilizados para diferentes tipos de proyectos. Se hace una selección del área de interés por medio de coordenadas identificadas en le tabla 5.

Tabla 5. Coordenadas del área de interés

Coordenadas del Área de Interés	
Latitud Norte	-2.368
Longitud Oeste	76.631
Latitud Sur	2.329
Longitud Este	-76.755

Luego se deben indicar las fechas en las que se quiere obtener las imágenes, en este caso son antes y después del deslizamiento de tierra Rosas, Cauca, Colombia, y que corresponde al lapso de tiempo entre el 12 de diciembre de 2022 y el 25 de febrero de 2023.

Se identifica el satélite del cual se obtendrán las imágenes, para este caso Sentinel-1 A/B, tipo "L1 Single Look Complex (SLC)" que toma los datos en azimut incluyendo la información de la órbita. La dirección de toma de imagen es “Descendente”donde el satelite se desplza de norte a sur, atravesando el ecuador. Al final, obtenemos los dos archivos .zip identificados en la tabla 6 con ambas fechas (antes y después del evento)

Tabla 6. Identificación de imágenes descargadas antes y después del evento con su respetivo ID

N° imagen	**Fecha**	**ID**
1	12/12/2022	S1A_IW_SLC__1SDV_20221220T105223_20221220T105251_046414_058F67_C104
2.	25/02/2023	S1A_IW_SLC__1SDV_20230206T105221_20230206T105249_047114_05A6F7_EEDB

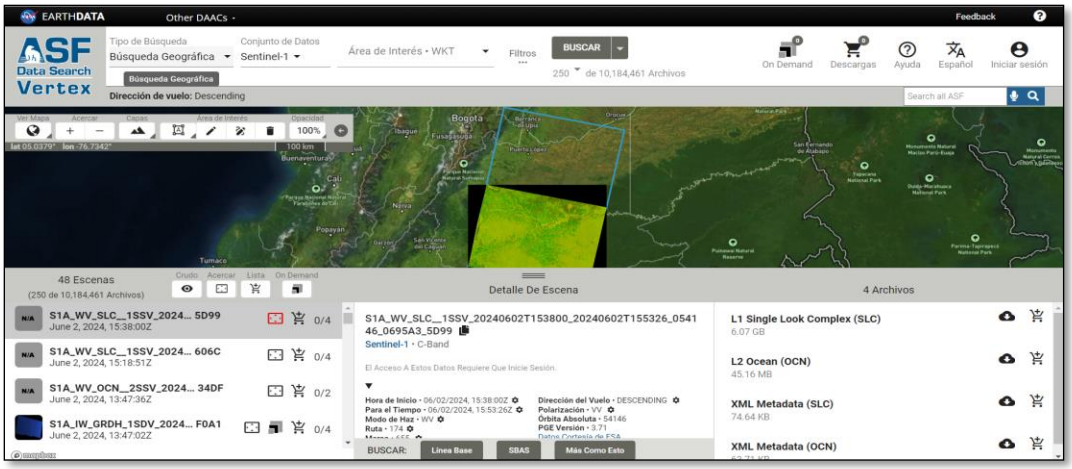


Ilustración 10. Obtención de los datos interferómetros SRA por medio de Alaska Satellite Facility Sentinel Data Portal

7.3.2. Procesamiento InSAR

El procesamiento de los datos InSAR será realizado en el software SNAP, que es un programa gratuito ofrecido por la Agencia Espacial Europea y se utiliza para procesar y analizar imágenes de satélite, con una amplia variedad de herramientas para los diferentes procesos que realiza.

Inicie el SNAP, se abren las imágenes anteriormente descargadas como archivo Sentinel-1 SLC .zip. Se selecciona el barrido IW2 VV, pues es en la que ubicamos la zona del deslizamiento de Rosas, Cauca.

Nota: las imágenes SAR están invertidas N-S.

a) Corregistrar Escenas (S1 TOPS Coregistratio)

El primer paso de la interferometría es corregistrar dos imágenes SLC. **Radar >Coregistration >S1 TOPS Coregistration >S1 TOPS Coregistration.**

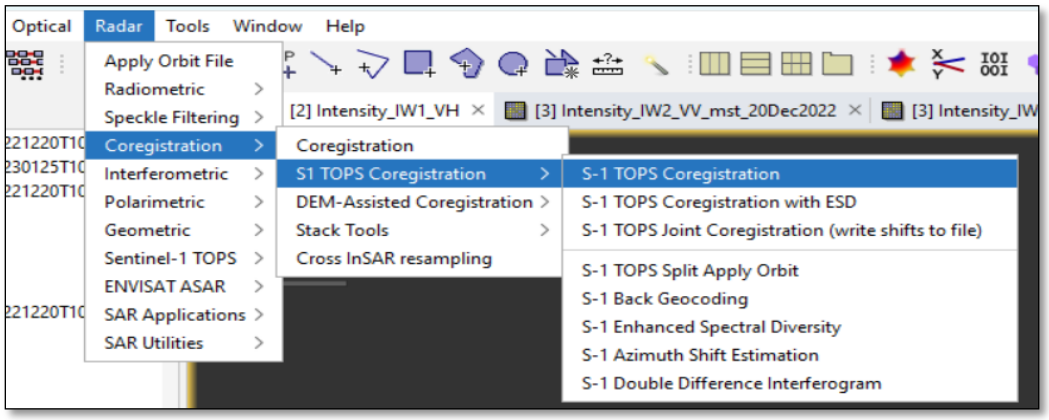


Ilustración 11. Proceso para corregistar las dos imágenes (S1 TOPS Coregistration)

En la pestaña Read, seleccione el SLC 20221220 (antes del evento) y en la pestaña Read (2) seleccione el SLC 20230125 (después del evento)

En las pestañas TOPSAR-Splity TOPSAR-Split (2), seleccione Subswath: IW2 Polarisations: VV, después, en la pestaña Back-Geocoding-SRTM 1sec HGT (auto download) como se observa en la ilustración 12.

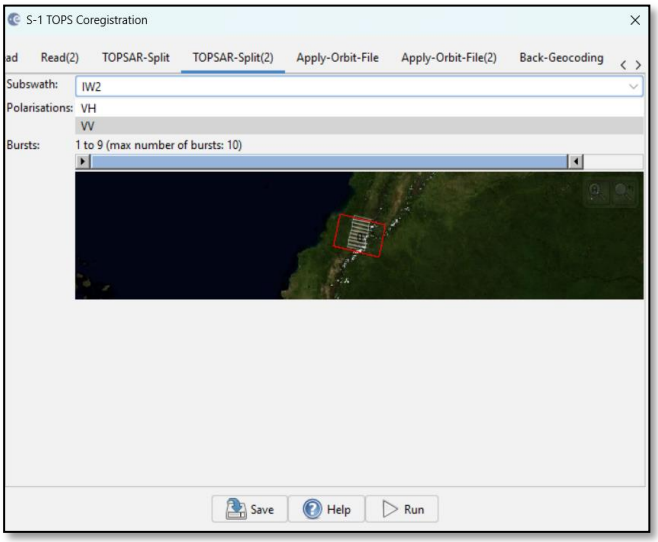


Ilustración 12 Determinar parámetros para S1 TOPS Coregistration

b) Formar interferograma Bruto

El segundo paso de la interferometría es hacer un interferograma a partir de las imágenes SLC corregistradas **Radar > Interferometric > Products> Interferogram Formation.**

En la pestaña I/O Parameters, seleccione el producto “Orb_Stack” creado por el paso de corregistracion. Por defecto, el archivo de salida está en la misma carpeta y se la agrega “ifg” al nombre, resultado en la ilustración 13.

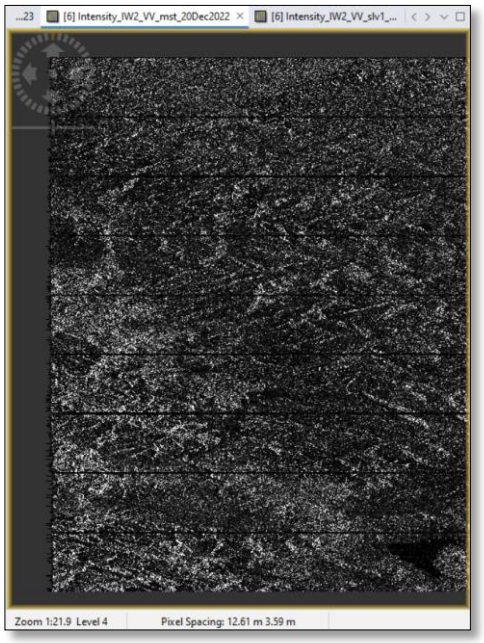


Ilustración 13. Corregistro de las imágenes antes y después del evento. IW2_VV. Zoom 1:22, pixel spacing: 12.61m 3.59m. Snap

c) TOPS Deburst

En el momento en el que se obtiene la imagen por medio de barridos, se presentan unas franjas con decorrelación en la imagen, lo que hace necesario, eliminar al máximo dichas franjas para el procesamiento de las imágenes. Combine todos los datos de las tomas (bursts) en una sola

imagen, **Radar > Sentinel-1 TOPS > S1 Tops Deburst.** En la pestaña I/O Parameters, seleccione el “ifg”. Resultado en la ilustración 14.

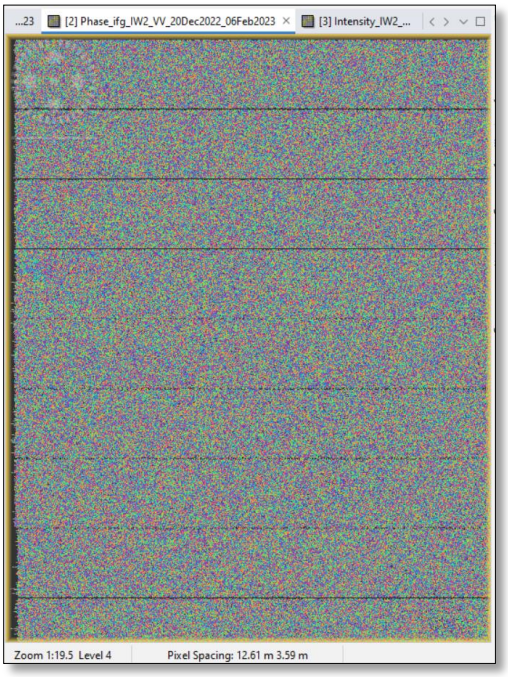


Ilustración 14. Imagen antes de la aplicación del filtro TOPS Deburst para la eliminación de las franjas negras que se generan en los barrios. IW2_VV. Zoom 1:19. Pixel spacing 12.61m 3.59m. Snap

d) Remoción de la Fase Topográfica

Es muy importante eliminar la influencia de la topografía en el interferograma, se debe remover la fase topográfica mediante un DEM. Debido a las variaciones topográficas en la imagen y la inclinación del radar en el satélite, las distancias pueden distorsionarse en la imagen (López-Quiroz et al., 2009). Las correcciones topográficas en el terreno compensan las distorsiones para que la representación de la geometría de la imagen sea lo más cercana posible a la realidad. **Radar > Interferometric > Products > Topographic Phase Removal.** Resultado en la ilustración 15.

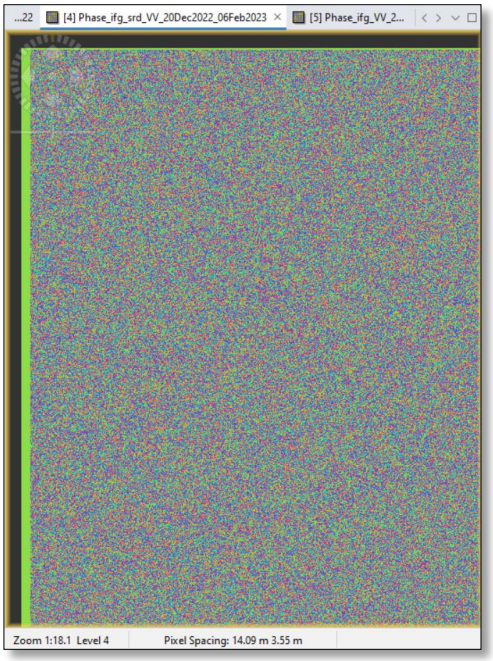
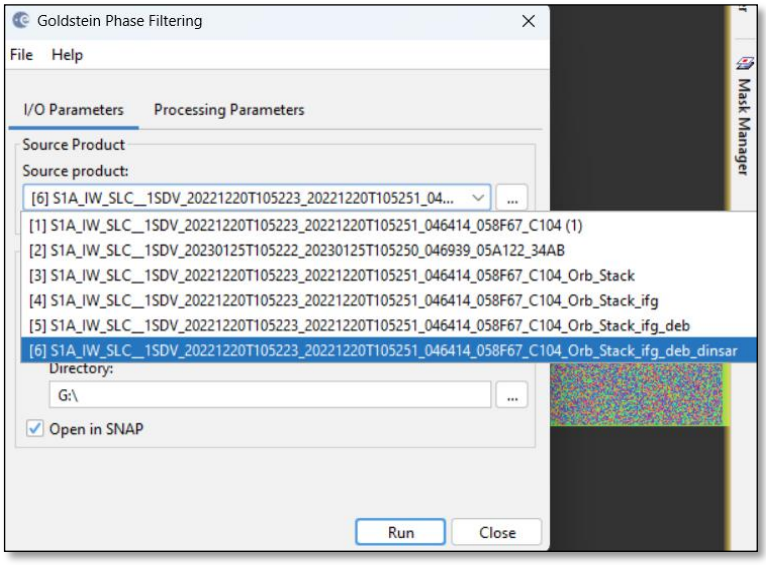


Ilustración 15. Aplicación de 'Topographic Phase Removal'. Zoom 1:18. Pixel spaicing 14.09m 3.55m. Snap.

e) "Multi-Looking" de Interferogramas y Filtración (Goldstein Phase Filtering)

Es una herramienta muy importante para promediar los pixeles, este procedimiento puede llegar a reducir la resolución espacial, pero reduce el ruido de la imagen **SAR. Radar> Interferometric > Filtering > Goldstein Phase Filtering**



En la pestaña I/O Parameters, seleccione el producto "ifg_deb" creado en el paso anterior. Por defecto, al archivo de salida se le agrega "flt" al nombre

Ilustración 16. Aplicación del filtro Goldstein Phase Filtering

"Multi-looking" significa calcular el promedio a varios pixeles en cada dirección, lo que los ingenieros de radar llaman "darle varias miradas". El resultado son pixeles más grandes y éstos pueden reducir la cantidad de ruido de manera significante. **Radar > SAR Utilitiesy > Multilooking**

En la pestaña I/O Parameters, seleccione el producto "ifg_deb_flt creado por el paso de filtración y por defecto al archivo de salida se le agrega "ML" al nombre

En la pestaña ProcessingParameters, seleccione SourceBands"i_ifg","q_ifg" y "coh". Para esta escena, normalmente utilizo 4 looks del rango y 1 del azimut para producir pixeles con ~14 m de resolución. No seleccione las bandas "Phase" o "Intensity".

f) Visualizar Interferogramas Multi-Look

Primero, debemos hacer una nueva banda de fase virtual después de realizar el "multi-looking" del interferograma complejo. Seleccione la banda i_ifg_VV o q_ifg_VV en la pestaña de Product Explorer como se observa en la ilustración 17. **Raster > Data Conversiony > Complexi and q to Phase.** Ver resultado en la ilustración 18.

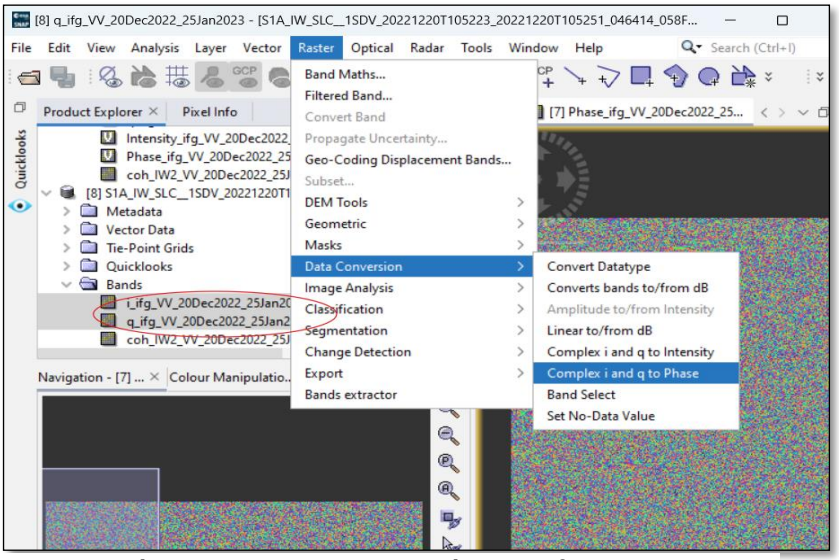


Ilustración 17 Combinación de i y q para la creación de la fase.

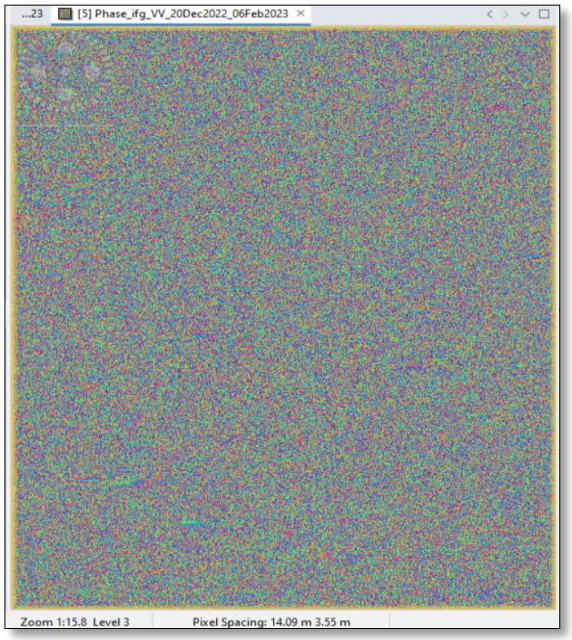


Ilustración 18. Aplicación del filtro Goldstein Phase Filtering y Multi-Looking.Zoom 1:15.8. Pixel spacing 14.09m 3.55m. Snap.

g) Desenrollar la Fase con el plugin SNAPHU para SNAP

Es una de las etapas más importantes en el procesamiento de las imágenes, la diferencia entre los tiempos que mide los ciclos de onda para viajar desde el sensor hasta el punto en la superficie, si se excede los limites (de $-\pi$ a π), ocurre un "envolvimiento" y la fase se reinicia desde $-\pi$, generando saltos en los valores de la fase afectando la precisión. Con este paso, recuperamos la fase original, sin estos saltos abruptos.

Instalación del Snaphu:

–. El plugin SNAPHU Unwrapping se instala desde **Tools > Plugins > Available Plugins>Install** como se ve en la ilustración 19.

Reinicie SNAP cuando termine la instalación de SNAPHU Unwrapping. Cuando el plugin este instalado lo podrá ver en Radar > Interferometric> Unwrapping> Snaphu-unwrapping.

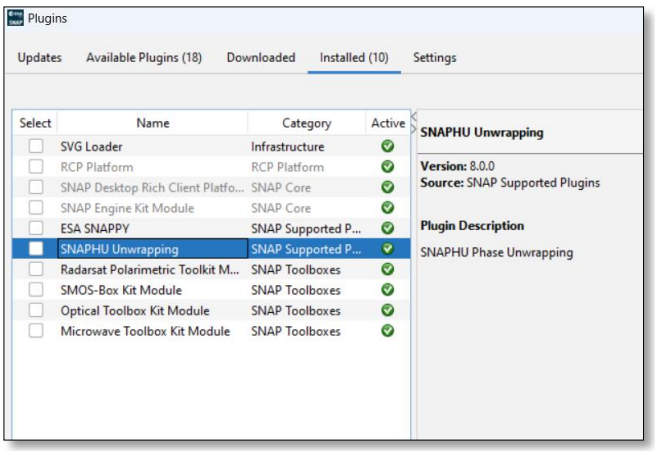


Ilustración 19. Verificación en los Plugins SNAPHU Unwrapping instalado en Snap.

Para ejecutar el desenrollamiento correctamente debo seguir 3 pasos esenciales. Primero debo exportar el producto antes de desenrollar. **Radar> Interferometric> Unwrapping> Snaphu Export**. Después de la exportación puedo seguir con el desenrollamiento. **Radar> Interferometric> Unwrapping> Snaphu-unwrapping.** Y, por último, damos paso a la importación del producto desenrollado **Radar> Interferometric> Unwrapping> Snaphu Import**. Ver resultado en la ilustración 20.

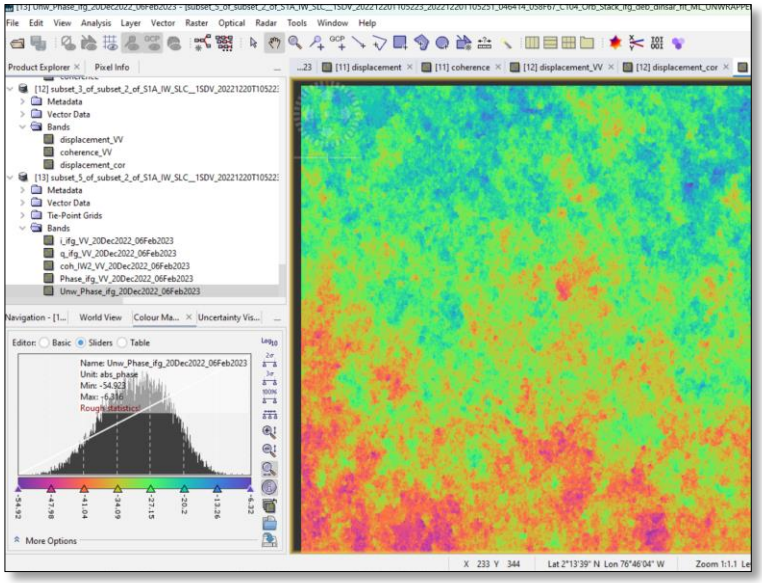


Ilustración 20. Imagen producto desenrollada.

En la pestaña Color Manipulation podemos ver el deslizamiento mucho mejor. La fase desenrollada arroja valores de radianes. Tenemos un ráster continuo, pero sin valores de desplazamiento.

h) Crear un Subconjunto

En ese paso, reduce el área de la imagen espectral con coordenadas, se enfoca en el área de interés, además, hace los procesos más rápidos por la reducción de pixeles a procesar. Esto hará el

desarrollamiento y procesamiento más rápido. **Raster> Subset> Geo Coordinates**. Se ingresan los datos: North Latitude Bound: -2.368, West Longitude Bound: 76.631, South Latitude Bound: 2.329, East Longitude Bound: -76.755, como se vee n la ilustración 21.

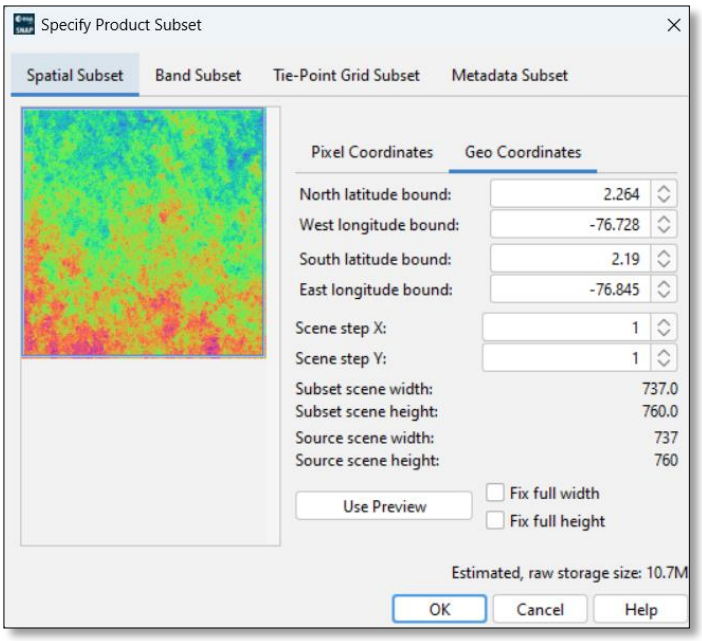


Ilustración 21. Parámetros y coordenadas para extraer el subconjunto

i) Convertir fase desenrollada en desplazamiento

Para pasar de radianes a desplazamiento en metros. **Radar> Interferometric > Products > Phase to Displacement**. En la pestaña de Parámetros, seleccionamos en producto desenrollado que se importó en el paso anterior. Se crea un producto con terminación del nombre "_dsp". Ver resultado en la ilustración 22.

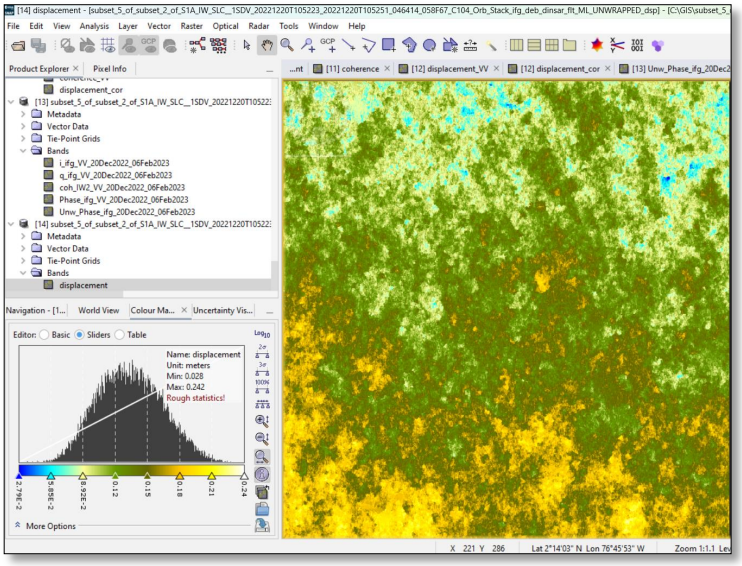


Ilustración 22. Producto de pasar de fase desenrollada a desplazamiento

j) Añadir la coherencia

Las bandas de coherencia no se incluyen automáticamente en el ráster de desplazamiento, se pueden importar desde una capa anterior, Clic derecho sobre “displacement” > Band Maths. Quitar la selección en Virtual, después clic en edit. Expresión, en la nueva pestaña seleccionar un producto anterior y hacer clic en la capa de coherencia > ok. Ver resultado en la ilustración 23.

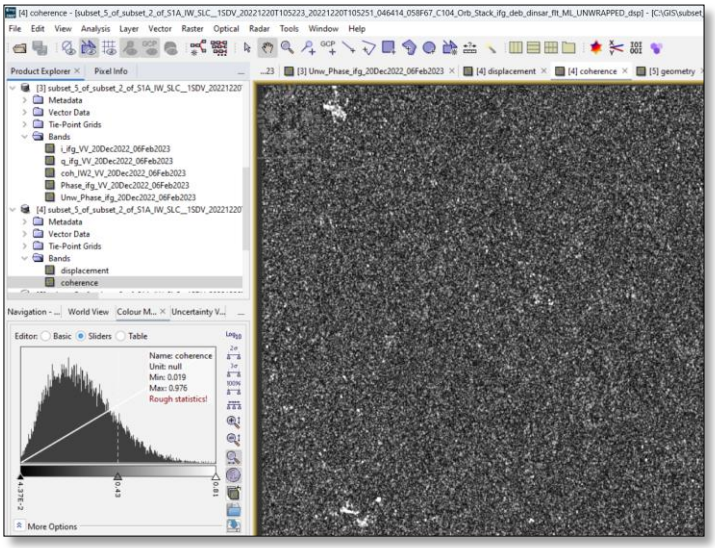


Ilustración 23. Producto de la creación de capa coherencia por medio de capas anteriores.

k) Corrección del terreno

Esta herramienta corrige las distorsiones geométricas del SAR (Superposiciones, sombras) por medio de un DEM y generando un producto proyectado en el mapa. Pasa de un rango terrestre a un sistema de coordenadas en el mapa. Parta hacer la corrección del terreno, en la pestaña superior. **Radar> Geometric> Terrain Correction> Range-Doppler Terrain Correction**. Como se observa en la ilustración 24.

En la pestaña I/O Paraneters se debe seleccionar algunos de los productos con ML y en la pestaña de Processing Parameters, en Source Bandas se selecciona el producto, en DEM seccionar 1Sec HGT. El producto que se genera es con terminación "_TC"
Si se desea exportar los datos a Google Earth como KMZ, se debe seleccionar el sistema de coordenadas geográficas WGS84.

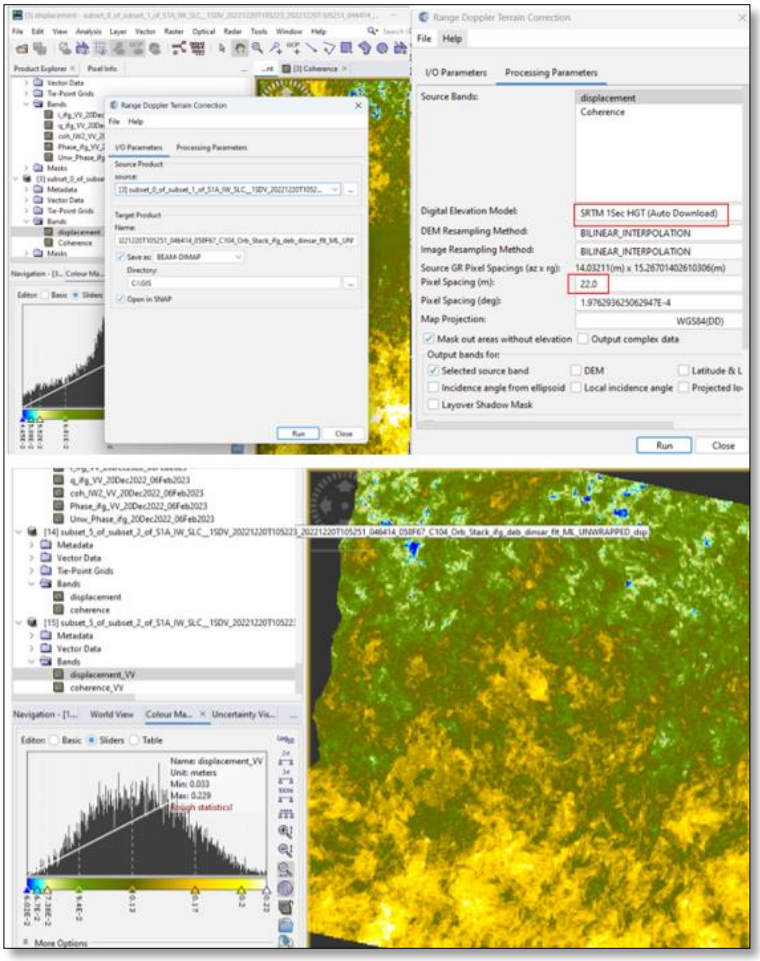


Ilustración 24. Pasos para obtener una corrección en el terreno y la capa resultante.

l) Ocultar pixeles de baja coherencia

Para evitar interpretaciones erronas, se van a eliminar los resultados incorrectos de la decorrelación de fases. Se da clic derecho sobre ‘displacement_VV’> propiedades> Valid -Pixel Expression > escribir ‘coherence_VV > 0.2’, ahora todos los pixeles menores a 0.2 quedan trasparentes. Ver resultado en la ilustración 25.

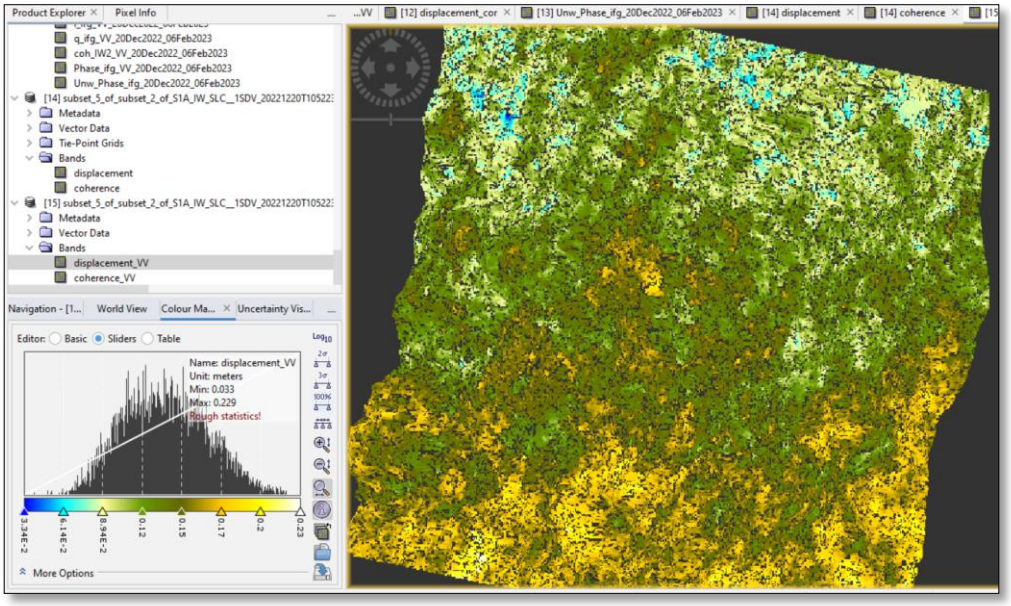


Ilustración 25. Producto de aplicar transparencia en los datos de coherencia < 0.2

m) Obtención de resultados más confiables.

Hay zonas que muestran desplazamiento cuando no lo tienen, por lo que se corregirá, se modificará la altura del producto 0,03 m más alta para que las zonas donde realmente no tiene desplazamiento sean cero y los datos de los desplazamientos sean más confiables. Ver pasos en la ilustración 26 y resultado en la ilustración 27.

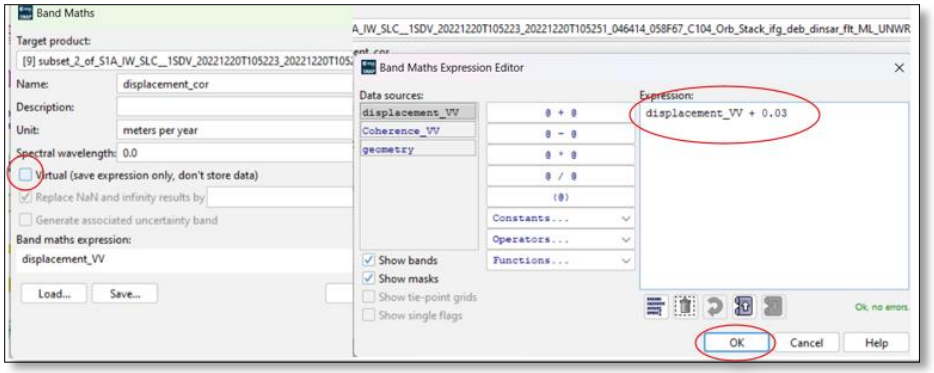


Ilustración 26. Pasos para aplicar correctamente la corrección en los desplazamientos de terreno.

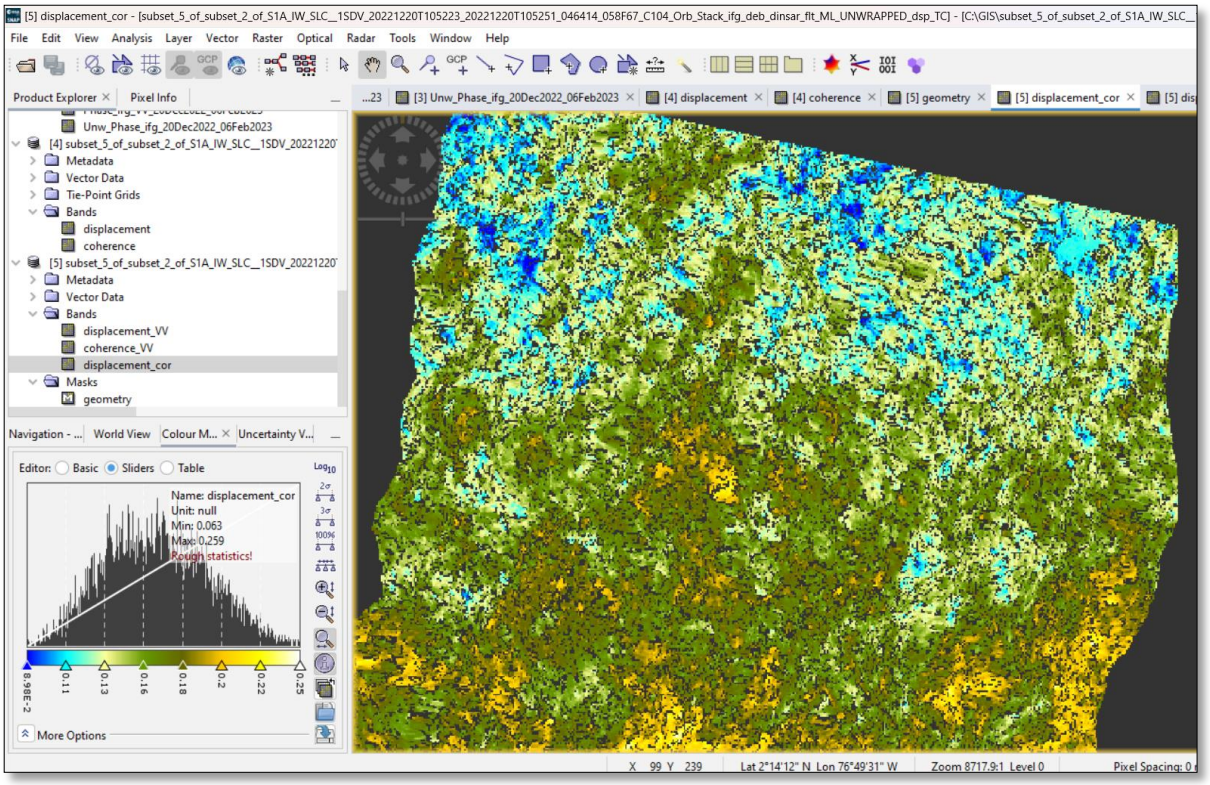


Ilustración 27. Producto después de aplicar las correcciones y aumento de la confiablidad en los datos.

7.3.3. Exportar a Google Earth

El producto generado en SNAP se puede exportar como un KMZ para abrirlos en Google Earth, lo productos deben estar en coordenadas WGS84 para exportarlos. Ver resultado en la ilustración 28.

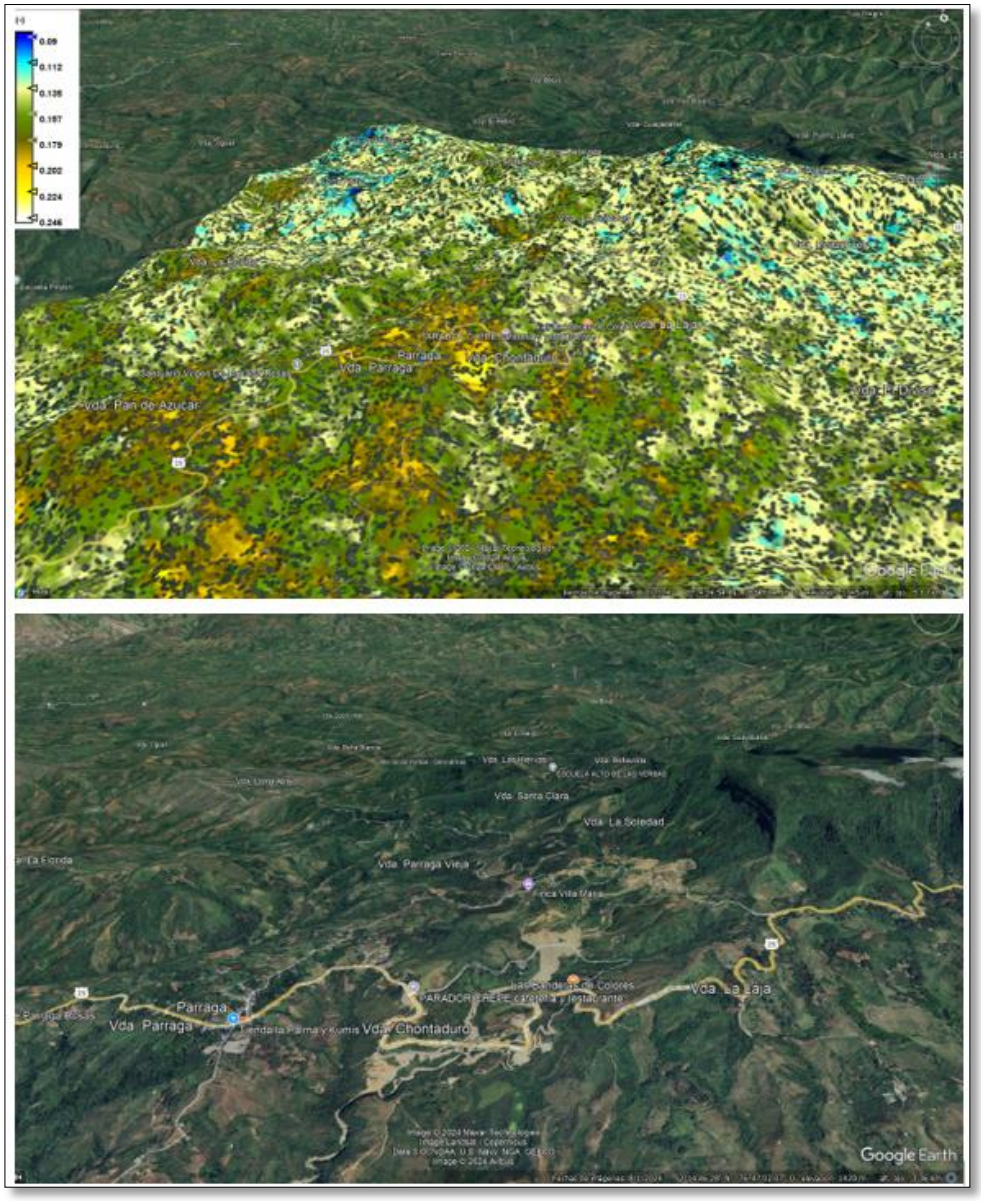


Ilustración 28. Comparación de la capa exportada desde en SNAP y la imagen satelital de Google Earth Pro en donde se ubica el deslizamiento de tierra. Fecha de la imagen: 8/1/2024. Elevación 1429m.

8. Resultados

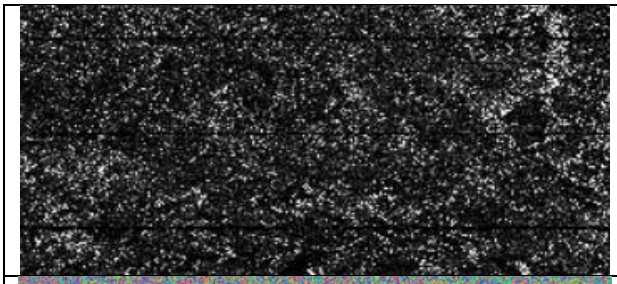
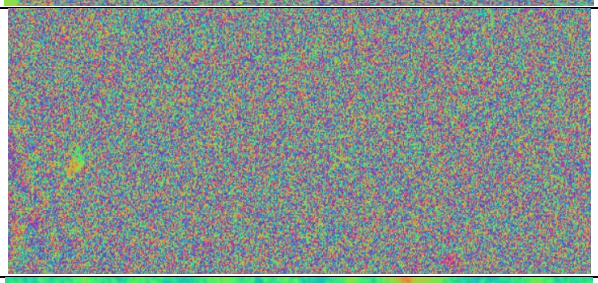
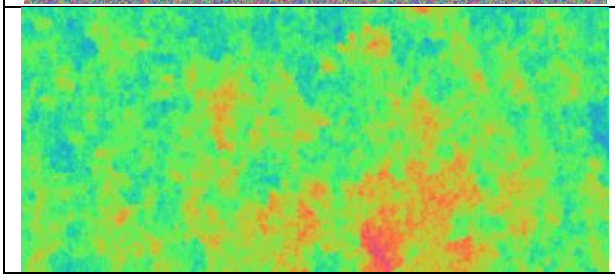
El estudio del deslizamiento de tierra en el municipio de Rosas, Cauca, ocurrido el 9 de enero de 2023, se hizo por medio de la metodología de apertura sintética (InSAR) para la detección de cambios en la superficie terrestre, donde se comparan dos imágenes de la misma zona en tiempos distintos. Teniendo claridad en los diferentes tipos de movimientos en masa, corresponde a un deslizamiento de tierra rotacional de estilo complejo, con influencia de la densidad de lluvias del fenómeno de La Niña. Las características geológicas de la zona corresponden a la Formación Galeón como se observa en la figura 3, principalmente compuesta por arenas semicompactas de flujos piroclásticos, ligeramente inclinadas muy meteorizados. La geomorfología de la zona corresponde al sistema de fallas Romeral, Mosquillerito-la Tetilla. Al agrupar estos factores climáticos, geológicos y antrópicos se atribuye la ocurrencia del deslizamiento.

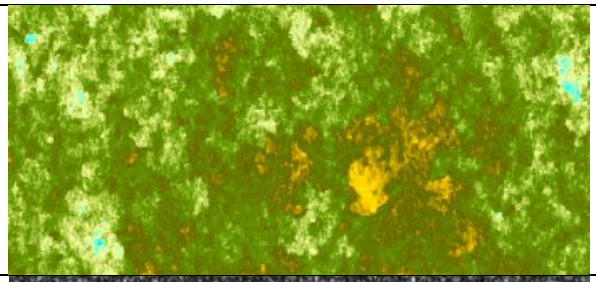
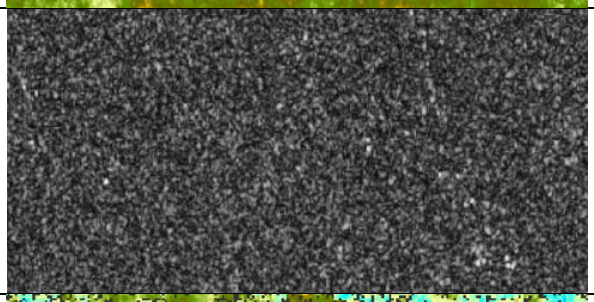
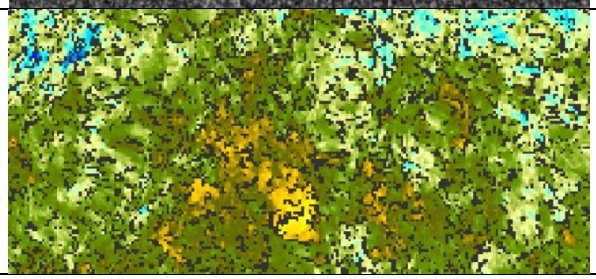
Para el procesamiento de las imágenes, se emplea una de las mejores herramientas de teledetección, interferometría de radar de apertura sintética (InSAR), se eligen imágenes en órbita descendentes, donde el desplazamiento es del hemisferio norte al hemisferio sur, con polarización VV y en SLC (Single Look Complex). La correcta elección de las imágenes satelitales demuestra la comprensión de los conceptos básicos de la interferometría SAR, cumpliéndose el primer objetivo.

Las imágenes son procesadas con la herramienta SNAP, se ilustra en la Tabla 7 el resumen de los resultados que se obtienen en cada una de las fases de desarrollo de las fases. Puede observarse

una metodología clara y paso a paso para la preparación de los datos SAR y correcta creación del interferograma.

Tabla 7. Resumen de las fases en el procesamiento de las imágenes InSAR en SNAP.

	FASE 1. Corregistro de 2 imágenes
	FASE 2. Interferograma
	FASE 3 Eliminación de Franjas
	FASE 4 Multilooking. Reducción de Ruido y remoción de fase topográfica
	FASE 5 Desenrollamiento de la fase

	FASE 6 Conversión de fase a desplazamiento
	FASE 7 Geocodificación / Corrección del terreno
	RESULTADO FINAL

En el procesamiento de las imágenes, uno de los pasos más importantes es el desenrollamiento de la fase, permite hacer la conversión de fase a desplazamiento, transformando la información a datos cuantificables de movimiento en la superficie terrestre como se observa en la ilustración 29. Esta información es crítica para interpretar cómo el deslizamiento de tierra en Rosas, Cauca afecto el terreno, alineándose con el principal objetivo de la investigación.

Uno de los principales resultados con el desarrollo de la investigación, es la identificación de los patrones de deslizamiento de tierra en la zona específica. Se observan resultados con valores positivos, lo que indica movimiento hacia arriba o al Este de la línea de observación del satélite lo que está totalmente relacionado a la pendiente de la zona.

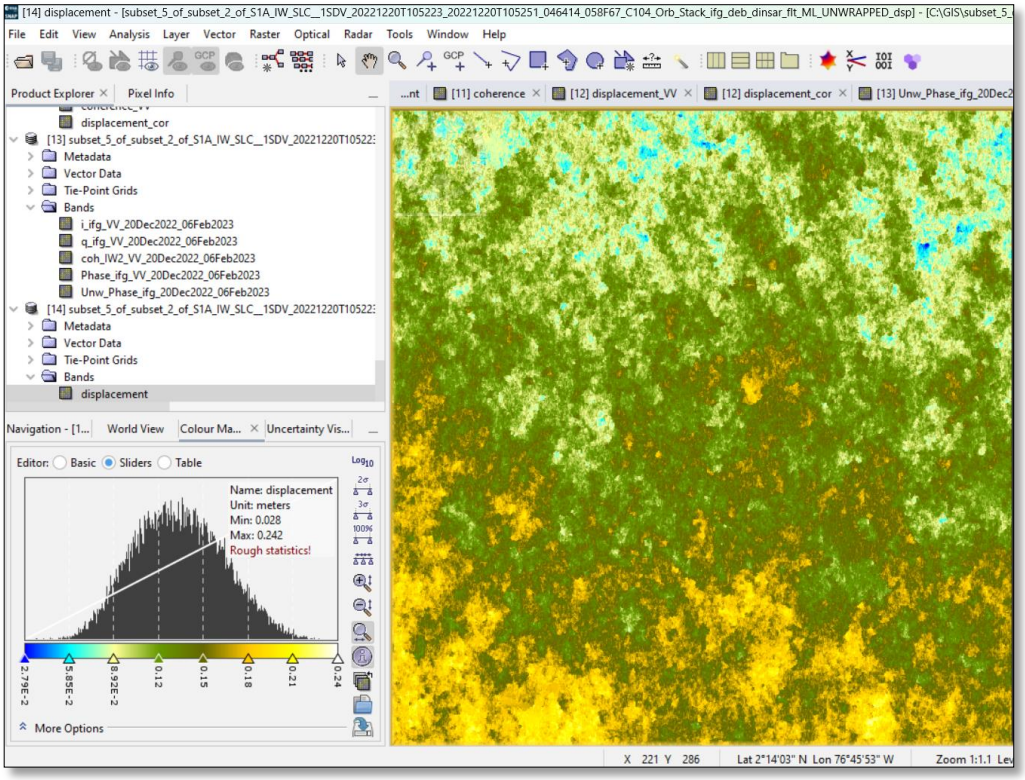


Ilustración 29. Producto de Producto de pasar de fase desenrollada a desplazamiento con valores positivos en el grafico estadístico.

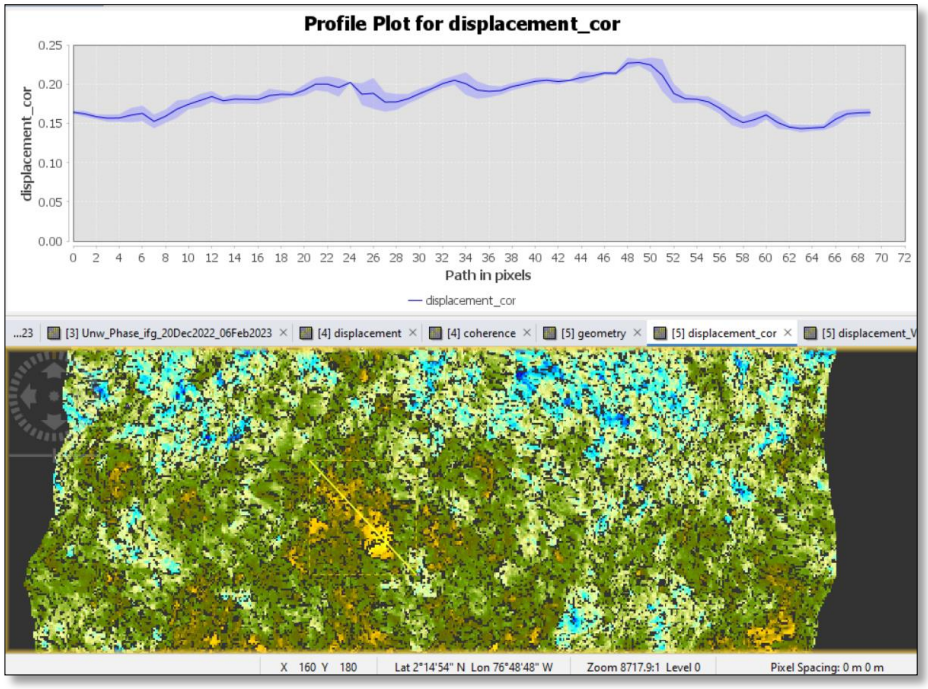


Ilustración 30. Perfil de desplazamiento con corrección del terreno relacionado con los pixeles del producto. En la parte inferior se muestra de donde se obtuvo los datos del perfil.

Con la representación visual, es evidente la presencia de un desplazamiento en la zona de estudio. Se interpreta un deslizamiento de tierra heterogéneo, evidenciado por el perfil de deslizamiento. Las franjas de color indican los rangos de cambio en la distancia entre la superficie del terreno.

Con los rangos de colores y el perfil de desplazamiento, son evidentes las zonas de mayor afectación en la zona CENTRO-SUR del perfil y entre las zonas de menor afectación, la zona extremo NORTE y extremo SUR del perfil (ver ilustración 30). Además, se genera un análisis de la zona de desplazamiento con un perfil que relaciona el desplazamiento con los pixeles del producto en la ilustración 31.

Los desplazamientos en rangos positivos de 14 a 23 cm reflejan el acercamiento del deslizamiento de tierra en dirección al radar, que va de norte a sur.

pixel_no	pixel_x	pixel_y	latitude	longitude	displacement_cor_mean	displacement_cor_sigma
24	302.0	248.0	2.23497670...	-76.785172...	0.20592712	0.004982142
25	303.0	249.0	2.23477908...	-76.784975...	0.19825509	0.012996499
26	304.0	250.0	2.23458145...	-76.784777...	0.1863613	0.005205487
27	304.0	251.0	2.23438382...	-76.784777...	0.18587863	0.003921108
28	305.0	252.0	2.23418619...	-76.784580...	0.19000793	0.007879462
29	306.0	253.0	2.23398856...	-76.784382...	0.19757679	0.0074451542
30	307.0	254.0	2.23379093...	-76.784184...	0.20247981	0.0038162346
31	308.0	255.0	2.23359330...	-76.783987...	0.20574819	0.0032199193
32	309.0	256.0	2.23339567...	-76.783789...	0.20777602	0.003371774
33	310.0	257.0	2.23319804...	-76.783591...	0.20914537	0.004708517
34	311.0	258.0	2.23300041...	-76.783394...	0.21355414	0.0061484426
35	312.0	259.0	2.23280278...	-76.783196...	0.21476415	0.00619289
36	313.0	260.0	2.23260515...	-76.782999...	0.21520928	0.0028947892
37	314.0	261.0	2.23240752...	-76.782801...	0.21377173	0.0024609552
38	315.0	262.0	2.23220989...	-76.782603...	0.21455002	0.0018734095
39	316.0	263.0	2.23201226...	-76.782406...	0.22699456	0.0037021851
40	317.0	264.0	2.23181463...	-76.782208...	0.22820151	0.0032295373
41	318.0	265.0	2.23161701...	-76.782010...	0.22319344	0.010489458
42	319.0	266.0	2.23141938...	-76.781813...	0.19847602	0.008781413
43	320.0	267.0	2.23122175...	-76.781615...	0.18624865	0.011443514
44	321.0	268.0	2.23102412...	-76.781418...	0.18786389	0.010427611
45	322.0	269.0	2.23082649...	-76.781220...	0.18363719	0.008468744
46	323.0	270.0	2.23062886...	-76.781022...	0.17878868	0.008420891
47	324.0	271.0	2.23043123...	-76.780825...	0.16785169	0.008482136
48	325.0	272.0	2.23023360...	-76.780627...	0.15640718	0.012153474
49	326.0	273.0	2.23003597...	-76.780429...	0.15461242	0.0099772
50	327.0	274.0	2.22983834...	-76.780232...	0.15783727	0.007395426
51	328.0	275.0	2.22964071...	-76.780034...	0.1509717	0.007965369
52	329.0	276.0	2.22944308...	-76.779836...	0.14516346	0.0034440642

Ilustración 31. Agrupación de los datos obtenidos en el perfil de desplazamiento relacionada con la trayectoria de pixeles

Con el seguimiento de los pasos de la metodología se permite replicar el proceso de creación del interferograma para los diferentes deslizamientos de tierra, permitiendo el entendimiento de esta técnica pudiéndose implementar en futuros estudios.

Para mayor validez en los datos, se exporta el producto de desplazamiento corregido a Google Earth pro, donde se evidencian las zonas de mayor afectación del desplazamiento.

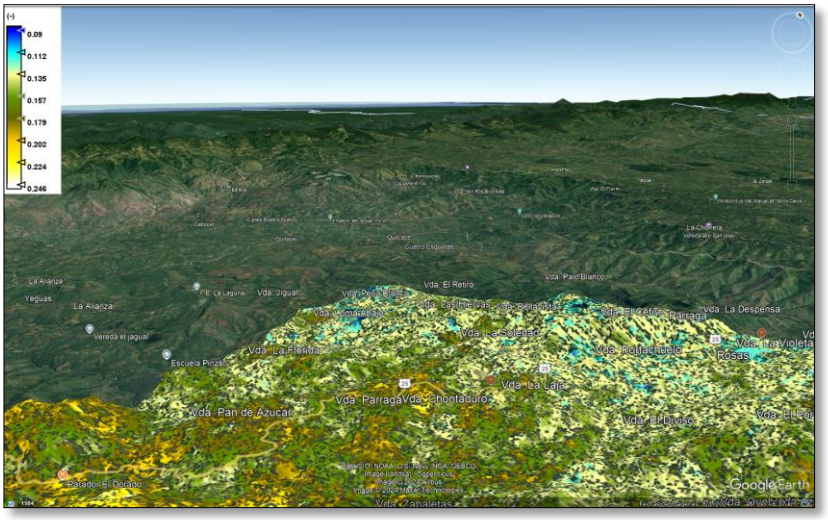


Ilustración 32. Ilustración del KMZ exportado a Google Earth pro en la zona de estudio Rosas, Cauca.

Uno de los resultados más importantes son los valores de desplazamiento, evidentemente un valor mucho más pequeño a la realidad evidenciada mediante imágenes satelitales. Con estos resultados, se evidencia limitaciones de la tecnología InSAR, la cual no tiene capacidad de medir deformaciones rápidas con alto gradiente espacial como lo es el caso del deslizamiento en Rosas Cauca; en el que su gran deformación se da en un rango de tiempo menor a una semana. Para la herramienta SAR, el desplazamiento máximo entre dos pixeles vecinos de un interferograma, no debe exceder los λ/2, la longitud de onda de los sensores SAR va de 3, 6 y 24 cm (Bandas X, C y L, respectivamente) (Massonnet & Feigl, 1998), dicha información se corrobora al obtener un máximo valor de desplazamiento es de 23 cm, indicando, se excedió los λ/2. Para la medición de un fenómeno rápido, con desplazamientos y deformaciones abruptas como lo es el caso de un deslizamiento de tierra, la herramienta genera resultados ambiguos de valores de desplazamiento. Solamente los movimientos de tierra lentos o muy lentos darán resultados con exactitud.

9. Discusión

Con la interpretación del producto, se realizó una evaluación de la confiabilidad de los resultados, la implementación de InSAR en la detección y monitoreo de los deslizamientos de tierra, debe ser una técnica que demuestre confiabilidad y mejora a los métodos tradiciones para la validación de la efectividad de la técnica. Esto puede conducir a una planificación más eficiente y ahorros significativos en costos operativos logrando una reinversión constante al proyecto para la implementación de nuevas tecnologías.

Otro resultado destacado es la mejora en la toma de decisiones, la interpretación de interferogramas SAR ayudarán a las entidades gubernamentales responsables y a todo el personal de afectación directa en caso de un movimiento en masa para la toma de decisiones más informadas y estratégicas para los resultados óptimos al momento de mitigar el impacto.

Uno de los pasos esenciales en el procesamiento de las imágenes InSAR es el desenrollamiento de la fase. En el caso de estudio, fue el que más se llevó tiempo, no se especifica en los cursos o documentos que abordan el tema. Por ende, se hace énfasis en estos puntos claves que se pudieron descubrir en el desarrollo del estudio.

1. La exportación se debe hacer a una carpeta en el disco C o el disco en el que se haya descarado el Plugin de ‘SNAPHU Unwrapping’. Para asegurar esto, Tools > Manage External Tools > Editar. En la ventana de System Variables, hay que asegurar que snaphu-v2.0.4_win64 está en el mismo disco que la exportación.

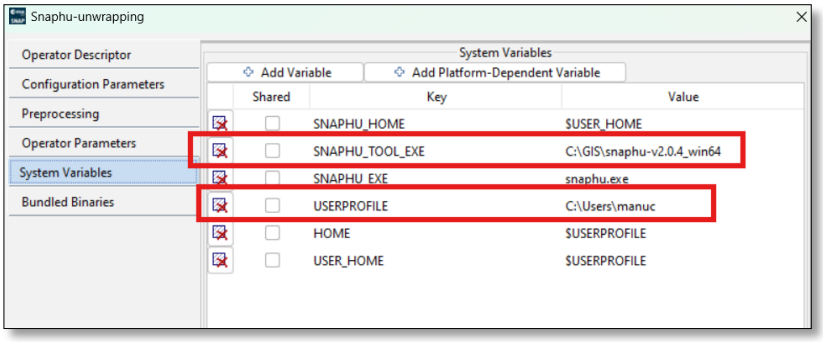


Ilustración 33. Configuraciones del Snaphu unwrapping en la pestaña de System Variables.

Cuando ya se hace la exportación de la imagen, se crea un documento en la carpeta llamado Snaphu.conf de tipo texto. Allí se deben asegurar: 1. El LOGFILE debe estar como comentario. 2. En CORFILE debe estar la coherencia mas no la fase.

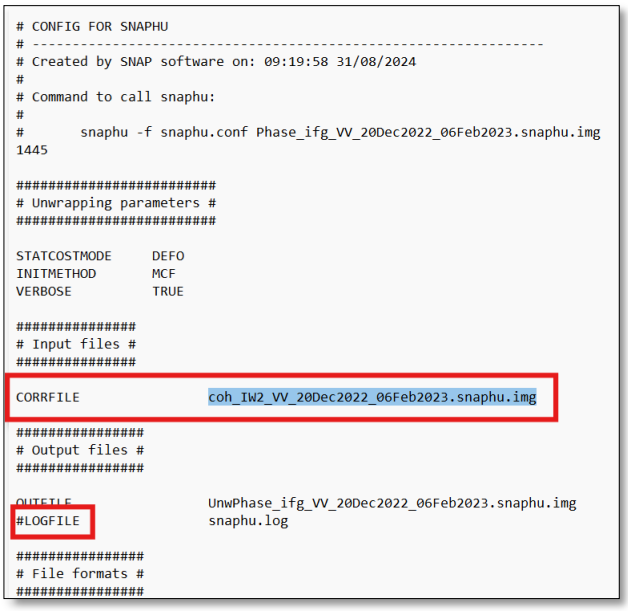


Ilustración 34. Archivo.txt del unwrapping generado.

Con las metodologías tradicionales del Informe SGC (2023) la detección de los movimientos sobre la superficie es no continua y no permite detectar pequeños movimientos antes que se vuelvan visibles, lo que es limitante para la prevención del riesgo. Además, otra gran limitante de los métodos tradicionales, es el difícil acceso a la zona después de un evento de movimiento en masa, con el uso de InSAR, se permite detectar movimientos de tierra lentos sobre la superficie terrestre con exactitud, lo que es crítico para anticipar el avance del deslizamiento de tierra.

Aunque el Informe del SGC es una herramienta esencial para la gestión del riesgo, la implementación de las tecnologías InSAR puede complementar las estrategias actuales, proporcionando una visión más completa del fenómeno, mejorando la capacidad de respuesta y mitigación en el departamento del Cauca y pudiéndose replicar en otros.

Al alcanzar los resultados esperados con la herramienta InSAR, la investigación proporcionara un conjunto de conocimientos y herramientas prácticas, fáciles de implementar y de acceso público para ser replicados por otros investigadores o por las autoridades locales, mejorando la prevención a los desastres de movimientos en masa de otros sectores, resultando en un aumento de la seguridad de la comunidad frente a estos eventos.

Se confronta con una de las grandes limitaciones de la metodología InSAR, al arrojar resultados poco precisos de desplazamiento en el caso del deslizamiento en Rosas Cauca por su rango de tiempo menor a una semana. Para la medición de un fenómeno rápido, la herramienta genera resultados ambiguos de valores de desplazamiento. Solamente los movimientos de tierra lentos o muy lentos darán resultados con exactitud, se recomienda la metodología sea implementada para hacer seguimiento del movimiento en masa antes o después del evento abrupto.

10. Conclusiones

- Con el análisis de las imágenes InSAR se logró identificar el desplazamiento de tierra en Rosa, Cauca, ocurrido el 9 de enero de 2023. Al tener claridad de los diferentes tipos de movimientos en masa, es fácil concluir, corresponde a un deslizamiento de tierra rotacional de estilo complejo, con influencia de la densidad de lluvias del fenómeno de La Niña. La zona de estudio corresponde a la Formación Galeón, compuesta por flujos piroclásticos. La geomorfología de la zona corresponde al sistema de fallas Romeral, Mosquillerito-la Tetilla. Al agrupar estos factores climáticos, geológicos y antrópicos se atribuye la ocurrencia del deslizamiento.

- Todos los rangos de desplazamiento resultaron en valores positivos, lo que indica un acercamiento al satélite que se desplaza del hemisferio norte al hemisferio sur, lo anterior es congruente con la pendiente de la zona y la información del 'Informe del SGC de 2023 del deslizamiento Rosas, Cauca'. Con la interpretación de los resultados, se identifican las áreas de mayor desplazamiento y deformación de la superficie.

- La herramienta InSAR demuestra ser una técnica eficiente para la caracterización de movimientos de la superficie por medios remotos, permite una compresión de las dinámicas espaciales y temporales del fenómeno. Al tratar de una deformación abrupta y en un corto periodo de tiempo, la metodología InSAR genera datos ambiguos de desplazamiento.

- Para la correcta aplicación de las técnicas y un correcto análisis del desplazamiento de tierra, es crucial el entendimiento de los conceptos fundamentales de la interferometría SAR. El tener bases sólidas de conceptos con la recolección de literatura y estudio anteriores, permiten abordar con éxito el procesamiento y el análisis de los datos SAR.

- La metodología es fácilmente reproducible en otras zonas y procesamientos de datos SAR para la creación de interferogramas. La metodología es un precedente para futuras investigaciones y aplicaciones en la geología y en la gestión de riesgos de desastres de las autoridades locales.

11. Recomendaciones

- Una de las principales recomendaciones es el mejoramiento continuo de las metodologías y la implementación de los avances tecnológicos. Es de esperarse, en

un futuro, el desarrollo de la interferometría SAR sea de mayor precisión y se le agreguen bondades, tal vez, la implementación de la inteligencia artificial en los procesos para una automatización y optimización de los procesos. Mantenerse a la vanguardia de las actualizaciones tecnológicas es esencial y más aún, para un país como Colombia haciéndolo mucho más competitivo.

- La metodología InSAR para la caracterización de movimientos en masa, se recomienda sea implementada antes o después del evento abrupto, para obtención de datos de desplazamiento con precisión. Hacer un seguimiento de zonas con altas probabilidades de movimiento en masa, lo que ayuda a la toma de decisiones tempranas y de prevención.

- Fomentar la idea de prevención en Colombia, implementando redes de monitoreo continuo con estas nuevas tecnologías, en donde se identifiquen los focos de vulnerabilidad en caso de un deslizamiento de tierra. Un monitoreo constante permite una visión mucho más completa y precisa del comportamiento de los terrenos. Lo anterior, ayudara en gran medida a la gestión del riesgo de desastres, reduciendo las afectaciones causadas por los eventos, además de una toma de decisiones bien informadas.

- Permitir el acceso abierto a la implementación de las tecnologías innovadoras, fomentando el aprendizaje de estos nuevos conocimientos sin limitantes. Permitir que se replique en otras zonas y entre otros profesionales será de gran ayuda.

- Generación de programas educativos que permitan el conocimiento masivo de las nuevas tecnologías, promover la investigación para integrar la interferometría SAR en el común proceder de estudios académicos. También fomentar el aprendizaje, tal vez no tan tecnificado en las comunidades locales de las áreas en riesgo, donde se aumenten las decisiones bien informadas y la preparación ante los eventos geológicos.

12. Referencias

Alayo, J. Villegas, J. (2021). Estimación de desplazamientos ocasionados por deslizamientos de tierra en la ciudad de Huancabamba, Piura, mediante análisis de imágenes satelitales. (vol 24) Investigación de física.

Investigación de física.Bianchini, S., Cigna, F., Casagli, N., (2011). Improving landslide inventory with persistent scatterers in Calabria, Italy. In: Margottini, C., Canuti, P., Sassa, K. (Eds.), Landslide Science and Practice. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31325-7_15.

Blahut, J., C. J. Van Westen y S. Sterlacchini (2010), "Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas", Geomorphology vol. 119, núms. 1-2, pp.

Blanco, P., Barreto, G., & Ortiz, D. (2010). La Interferometría Diferencial D-InSAR – Una técnica para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá D. C. (Conocimiento y Reflexión). Boletín de la Sociedad Colombiana de Geotecnia.

Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., Wisner, B., 2014. At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters. Routledge, Evanston, IL.

Carrillo, E., Contreras, N. Sánchez, F., Alpala, J. Pulgarín, B., Medina, E. Reyes, A., Gamboa, C. Muñoz, C., Galarza, J. Laverde, C., y Agudelo, A. (2023). Informe visita de emergencia a la microcuenca de la quebrada Chontaduro y concepto técnico sobre el trazado alterno de la vía Panamericana – Municipio de Rosas, departamento de Cauca. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Chen, Q., Cheng, H., Yang, Y., Liu, G., & Liu, L. (2014). Quantification of mass wasting volume associated with the giant landslide Daguangbao induced by the 2008 Wenchuan earthquake from persistent scatterer InSAR. Remote Sensing of Environment, 152, 125–135. Recuperado de https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.06.002

Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid, España: Ediciones RIALP S.A.

Cigna, F., Bianchini, S., Casagli, N., (2012). How to assess landslide activity and intensity with persistent scatterer interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach. Landslides 10 (3), 267–283. https://doi.org/10.1007/s10346-012-0335-7

Fielding, E. y Handwerger, A. (2019). SAR Interferométrico para la Observación de Deslizamientos de Tierra Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology

European Space Agency ESA. (s.f.-b). InSAR principles: Guidelines for SAR Interferometry processing and interpretation. Recuperado de: 197 http://www.esa.int/About_Us/ESA_Publications/InSAR_Principles_Guidelines_for_SAR_Interferometry_Processing_and_Interpretation_br_ESA_TM-19

European Space Agency (ESA). (2017). SNAPHU. Francia, Paris. Science Toolbox Exploitation Platform –STEP. Recuperado de http://step.esa.int/main/third-party-plugins2/snaphu/

Farina, P., Colombo, D., Fumagalli, A., Marks, F., Moretti, S., 2006. Permanent scatterers for landslide investigations: outcomes from the ESA-SLAM project. Eng. Geol. 88, 200–217. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.007

Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W.Z., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Eng. Geol. 102, 85– 98. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022

Ferrer Rubio, L. L. et al. (2016). Deformación observada a través de radar interferometrico de apertura sintética insar del volcán Nevado del Ruíz, Colombia. 21

Gerrard, J. 1994. The landslide hazard in the imalayas: Geological control and human action. Geomorphology 10: 221–230.

GlobeSAR & Natural Resources Canada. (s..f.). Introducción a la percepción remota mediante radar. Centro Canadiense de Percepción Remota, Ministerio de Recursos Naturales de Canadá.

Grosse, E., 1926. Estudio Geológico del Terciario Carbonífero de Antioquia: Berlin, Dietrich Reimer. p. 361.

Gonzales, K., Zavala, B., Fruneau, B., Díaz, M., Froger, J.L., Loayza, Y., (2008). Estudios de zonas de deslizamientos activos en la Cordillera Peruana, aplicando interferometría radar – InSAR. Congreso Peruano de Geología, 14, Congreso Latinoamericano de Geología, 13, Lima, PE, 20 setiembre–3 octubre 2008, Resúmenes. Lima, Sociedad Geológica del Perú (6 p.).Guzzetti, F., Galli, M., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., 2006. Landslide hazard assessment in the collazzone area, Umbria, central Italy. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 6 (1), 115–131. https://doi.org/10.5194/nhess-6-115-2006

Hermosillo Camacho, G. D. et al. (2018). Interferometría radar para la detección de cambio, desplazamientos y posibles afectaciones a causa del sismo del 19 de septiembre de 2017 en el proyecto del nuevo aeropuerto internacional de México (naim). 19, 32

Herrera, G., Davalillo, J.C., Mulas, J., Cooksley, G., Monserrat, O., Pancioli, V., 2009. Mapping and monitoring geomorphological processes in mountainous areas using PSI data: central Pyreneescase study. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 9, 1587–1598. https://doi.org/10.5194/nhess-9-1587-2009

IPCC, (2014). Summary for Policymakers. Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Climatee Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerabilitey. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Iverson, R.M., 2018. Landslides triggering by rain infiltration. Water Resour. Res. 54 (9),7269– 7275. https://doi.org/10.1029/2018WR023243

Klimeš, J., Vilímek, V., Benešová, M., (2015). Landslide and glacial lake outburst flood hazard in the Chucchún River basin, Cordillera Blanca, Peru. Acta Univ. Carol. Geol.50 (2), 173–180. https://doi.org/10.14712/23361980.2015.96

Leprince, S., S. Barbot, F. Ayoub, and J. P. Avouac (2007), Automatic, precise, ortho-rectification and coregistration for satellite image correlation: Application to seismotectonics, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 45, 1529–1558.

Lira, J. (2002). Sistemas de Radar de Imágenes. Geofísica UNAM. México.

Martha, T.R., Roy, P., Mazumdar, R.K., Babu Govindharaj, B., Vinod Kumar, K., 2016.Spatial characteristics of landslides triggered by the 2015 Mw 7.8 (Gorkha) and Mw 7.3 (Dolakha) earthquakes in Nepal. Landslides 14 (2), 697–704. https://doi.org/101007/s10346-016-0763-x

Massonnet, D., Feigl, K., 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. Reviews of Geophysics, 36(4), 441–500.

Principi, N. (2024). La evolución tecnológica de los atlas geográficos y la experiencia del 'Proyecto Atlas" en el LabSIG. Anuario De La División Geografía, (18), 1–11. Recuperado a partir de https://anuario-geografia.unlu.edu.ar/anugeografia/article/view/211

Refahi, H.Gh. (2000). Soil Erosion by Water & Conservation. 2nd ed., Tehran University Publications, Tehran, Iran, pp. 551.

Righini, G., Pancioli, V., Casagli, N., 2011. Updating landslide inventory maps using Persistent SCATTERER Interferometry (PSI). Int. J. Remote Sens. 33, 1–29. https://doi.org/10.1080/01431161.2011.605087

Roccati, A., Paliaga, G., Luino, F., Faccini, F., Turconi, L., 2021. GIS-based landslide susceptibility mapping for land use planning and risk assessment. Land 10 (2), 162. https://doi.org/10.3390/land10020162

Orrego, A. y Acevedo, P., 1993. Geología de la plancha 364, Timbio / Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras (INGEOMINAS).

Orrego, A. y Paris, G., 1990. Cuadrangulo N-6, Popayán: Geología, Geoquímica y ocurrencias minerales. Ingeominas, Bogotá.

Paris, G. Marulanda, N., 1975. Mapa Geológico de la parte occidental de la plancha 387-Bolívar. Escala 1:50.000. Ingeominas-Popayán (Inédito).

Pérez, C., & Mu oz, A. L. (2006). Teledetección: nociones y aplicaciones. Retrieved from https://books.google.com.co/books/about/Teledetección.html?id=SfrGxbO1DT0C&redir_es=y

Sato, H.P., Harp, E.L., 2009. Interpretation of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008, M7.9 Wenchuan earthquake in the Beichuan area, Sichuan Province, China, using satellite imagery and Google Earth. Landslides 6, 153–159. https://doi.org/10.1007/s10346-009-0147-6

Seppi, S. (2016). Uso de Interferometría Diferencial para monitorear deformaciones de terreno en la comuna de Corvara, Provincia de Bolzano, Italia. Universidad Nacional de Córdoba.

Seymour, M., & Cumming, I. (1994). Maximum likelihood estimation for SAR interferometry. Pasadena, Canada: IEEE.

Simons, M. and P. A. Rosen (2014). Interferometric Synthetic Aperture Radar Geodesy, in Treatise on Geophysics, G. Schubert Ed., Elsevier, Second Edition.

Strozzi, T., Ambrosi, C., Raetzo, H., 2013. Interpretation of aerial photographs and satellite SAR interferometry for the inventory of landslides. Remote Sens. 5,2554–2570. https://doi.org/10.3390/rs5052554

Solari, L., Barra, A., Herrera, G., Bianchini, S., Monserrat, O., Béjar-Pizarro, M., Crosetto, M., Sarro, R., Moretti, S., 2018. Fast detection of ground motions on vulnerable T. Strozzi et al. Remote Sensing of Environment 217 (2018) 111–125124elements using Sentinel-1 InSAR data. Geomat. Nat. Haz. Risk 9 (1), 152–174. https://doi.org/10.1080/19475705.2017.1413013

UNISDR, 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations, Geneva.

Van Westen, C.J., van Asch, T.W.J., Soeters, R., 2006. Landslide hazard and risk zonation— why is it still so difficult? Bull. Eng. Geol. Environ. 65 (2), 167–184. https://doi.org/10.1007/s10064-005-0023-0

Varnes and the IAEG Commission on Landslides and other Mass-Movements, 1984 D.J. Varnes, IAEG Commission on Landslides and other Mass-MovementsLandslide Hazard Zonation: a Review of Principles and PracticeNESCO Press, Paris (1984) 63 pp.