

ESTUDIO INTERFEROMÉTRICO DIFERENCIAL (DInSAR) PARA EL MONITOREO
DE LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR EL PROCESO CONSTRUCTIVO EN
LA CIUDAD DE BOGOTÁ



JORGE ENRIQUE GUARÍN CASTILLO

JOSÉ RICARDO GUEVARA LIMA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

MANIZALES, COLOMBIA

2021

ESTUDIO INTERFEROMÉTRICO DIFERENCIAL (DInSAR) PARA EL MONITOREO
DE LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO POR EL PROCESO CONSTRUCTIVO EN
LA CIUDAD DE BOGOTÁ

JOSÉ RICARDO GUEVARA LIMA

Ing. Catastral y Geodesta

JORGE ENRIQUE GUARÍN CASTILLO

Ing. Topográfico

Tesis presentada como requisito para optar al título de:

Magíster en Teledetección

Director

OSCAR CARDONA MORALES

Doctor en Ingeniería - Automática

Línea de Investigación: Tecnologías Geospaciales
Universidad Católica de Manizales
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Manizales, Colombia
2021

Dedicatoria

A mi esposa por su incondicional apoyo y a mis hijos por su comprensión y ánimo en la realización de este proyecto, quienes se constituyen en el motor como fuente de energía para asumir las estrategias que permitan realizar nuevos retos profesionales en el ámbito laboral y académico.

José Ricardo Guevara Lima

A mi esposa e hijo, de quienes obtuve siempre un apoyo incondicional y que día a día me transmitían una palabra de apoyo para salir adelante con esta meta.

A mi mamá, que desde muy pequeño me inculcó la importancia del estudio y que siempre tuvo una palabra de aliento para mí.

A Mario Montoya Castillo, mi primo incondicional, que siempre estuvo pendiente de mi proceso educativo, recalcando lo importante del estudio.

Jorge Enrique Guarín Castillo

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Manizales, 16 de agosto de 2021

Abstract

The main objective of this initiative is to carry out a subsidence analysis for the periphery of Bogotá, where urban growth has increased over time, due to forced displacement from other regions of Colombia or even from outside of it, which has overburdened the soil, increasing the constructions, changing the normal course of the runoff and substantially changing its composition, for which differential interferograms are obtained that show the displacement of the subsoil through the years and allows to see the behavior of the same due to growth urban which exceeds the bearing capacity of the soil. The images used for this purpose were from the Envisat, ERS 1 and 2, ALOS PALSAR and Sentinel 1 sensors. The generation of these interferograms is carried out with the Erdas Imagine Software Supplied by the company Datum engineering, displacement mapping module, which generates maps georeferenced motion from two interferometric images.

The development of the project will be carried out taking into account the similar studies carried out in Bogotá and other countries, which will allow generating a procedure for the identification of risk areas due to deformation of the land as a result of illegal construction in the perimeter area of Bogotá.

Keywords: Radar, interferometry, interferogram, coregistration, unwrap, forced displacement, urban growth

Resumen

El objetivo principal de esta iniciativa es realizar un análisis de subsidencia en la periferia de Bogotá, donde el crecimiento urbano en el tiempo ha aumentado, debido al desplazamiento forzado desde otras regiones de Colombia o incluso desde afuera de esta, lo cual ha sobrecargado el suelo, aumentado las construcciones, cambiando el curso normal de las escorrentías y cambiando sustancialmente la composición del mismo, para lo cual se obtienen mapas de desplazamiento diferenciales que muestran el desplazamiento del subsuelo a través de los años y permite ver su comportamiento originado en el crecimiento urbano que supera la capacidad portante del suelo. Las imágenes utilizadas para tal fin fueron de los sensores Envisat, ERS 1 y 2, ALOS PALSAR y Sentinel 1, la generación de estos interferogramas se realiza con el *Software Snap* de acceso libre, creado por la ESA (*The European Space Agency*), el cual genera mapas de movimiento georreferenciados a partir de dos imágenes interferométricas.

El desarrollo del proyecto se hará teniendo en cuenta los estudios similares realizados en Bogotá y otros países, lo cual permitirá generar un procedimiento para la identificación de zonas de riesgo por deformación del terreno como consecuencia de la construcción ilegal en la zona perimetral de Bogotá.

Palabras Clave: Radar, interferometría, interferograma, correregistro, *unwrap*, desplazamiento forzado, crecimiento urbano

Agradecimientos

Al ingeniero Tobías Leiva Pinto, quien colaboró con su conocimiento en el procesamiento de imágenes SAR con el *Software Snap*.

A la empresa Datum Ingeniería, ingeniero Javier Salgado, por su apoyo en el suministro temporal de la licencia del *software* de procesamiento Erdas Imagine.

Al Instituto Geográfico Agustín Codazzi, que nos colaboró con información cartográfica de la ciudad de Bogotá.

Al Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, por el suministro de imágenes de radar de diferentes sensores.

A la Universidad Católica de Manizales, por el apoyo en nuestro proceso formativo-investigativo y, por supuesto, educativo.

A nuestro tutor, el Doctor Óscar Cardona Morales, por todo el apoyo y recomendaciones que hizo posible la elaboración de este trabajo.

A nuestras familias, por el apoyo y comprensión en cada etapa de este proceso investigativo.

Tabla de contenido

Glosario	16
1. Introducción	18
1.1 Planteamiento del problema	20
1.2 Justificación	25
1.3 Objetivos	29
1.3.1 Objetivo General	29
1.3.2 Objetivos Específicos	29
2. Marco Teórico	30
2.1 Datos crudos SAR	31
2.2 Información Orbital	35
2.3 Modelo Digital de Elevación “DEM”	37
2.4 Enfoque de datos crudos	38
2.5 Conversión DEM a coordenadas SAR	41
2.6 Corregistro de Imágenes SAR	44
2.7 Generación de interferogramas	46
2.8 Filtro Deburst	49
2.9 Remoción de la fase topográfica	49
2.10 Filtrado de la fase	50

	9
2.10.1 Filtro Goldstein	50
2.10.2 Filtro Multilooking	51
2.11 Desdoblar fase	51
2.12 Sistema de referencia	55
2.13 Antecedentes	57
2.14 Insumos	62
2.14.1 Descripción general Envisat	62
2.14.2 Descripción general Sentinel	63
2.14.3 Polígonos de análisis	65
2.14.4 Estaciones GNSS – IGAC activas	68
3. Metodología	70
3.1 Área de estudio	70
3.2 Flujo de trabajo	72
3.3 Modelo de coherencia	73
3.4 Corregistro	75
3.5 Recorte de la zona de estudio	77
3.6 Creación del interferograma	77
3.7 Eliminación de ráfagas (Deburst)	78
3.8 Remoción de la fase topográfica	78

	10
3.9 Filtro Goldstein	78
3.10 Desenvolvimiento de la fase	79
3.11 Fase a desplazamiento	80
3.12 Geocodificación o Corrección Geométrica	80
3.13 Exportación de datos	81
4. Resultados	82
4.1 Mapas de Desplazamiento Envisat	82
4.2 Mapas de Desplazamiento Sentinel	85
4.3 Validación e interpretación de los mapas de desplazamiento	88
4.3.1 Validación con estaciones GNSS	88
4.3.2 Interpretación y análisis de los mapas de desplazamiento	90
5. Conclusiones	97
6. Limitaciones y Recomendaciones	98
7. Referencias	105

Lista de tablas

Tabla 1. Bandas de radar y campos de uso	34
Tabla 2. Características imágenes Envisat	63
Tabla 3. Características imágenes Sentinel 1	65
Tabla 4. Diferencias de alturas de las Estaciones GNSS Activas MAGNA – SIRGAS.....	69
Tabla 5. Fechas imágenes de radar	74
Tabla 6. Pares interferométricas seleccionados	75
Tabla 7. Diferencias de alturas de las Estaciones GNSS Activas MAGNA – SIRGAS.....	89
Tabla 8. Diferencias de alturas obtenido de los mapas de desplazamiento.	89

Lista de gráficas

Gráfico 1. Tendencia estimada mapas de desplazamiento Envisat – Estación GNSS BOGT	84
Gráfico 2. Tendencia estimada mapas de desplazamiento Sentinel 1– Estación GNSS ABPD	87
Gráfico 3. Tendencia Estaciones GNSS y mapas de desplazamiento.....	89

Lista de figuras

Figura 1. Geometría pertinente a adquisiciones de SAR entrecerradas	39
Figura 2. Geometría de procesamiento cónica, el eje coincide con la trayectoria del vuelo	40
Figura 3. Geometría de procesamiento cilíndrica el eje coincide con la trayectoria del vuelo	40
Figura 4. Rango y Acimut de una imagen SAR.....	42
Figura 5. Flujograma de correregistro.....	46
Figura 6. Desarrollar fase.....	53
Figura 7. Sistema de referencia MAGNA.....	56
Figura 8. Ortofoto oficial para Bogotá 2017 – Polígonos de Monitoreo IDIGER.....	66
Figura 9. Ortofoto oficial para Bogotá 2017 – Barrio legalizados SDP	66
Figura 10. Ortofoto oficial para Bogotá 2017 – Zona de Alto Riesgo no Mitigable IDIGER	67
Figura 11. Ortofoto oficial para Bogotá 2017 – Urbanización Arboleda Santa Teresita - Caja de Vivienda Popular	68
Figura 12. Área de estudio.	70
Figura 13. Flujo de Trabajo Sentinel.....	72
Figura 14. Flujo de Trabajo Envisat.....	72
Figura 15. Filtro Goldstein 10/09/2016 – 07/02/2017	79

Figura 16. Mapas de desplazamiento recortado y exportado a Google Earth 10/09/2016 – 07/02/2017	81
Figura 17. Mapas de desplazamiento obtenidos con Envisat.....	82
Figura 18. Mapas de desplazamiento obtenidos con Envisat.....	83
Figura 19. Mapas de desplazamiento Envisat	85
Figura 20. Mapas de desplazamiento Envisat	86
Figura 21. Imagen Google Earth 01/06/2001 – Mapa de desplazamiento (m) 200303 - 200309	91
Figura 22. Imagen Google Earth 01/06/2001 – Mapa de desplazamiento (m) 200303 – 200309.....	92
Figura 23. Imagen Google Earth 03/21/2020 – Mapa de desplazamiento en (m) Sentinel 202001 – 202006.....	93
Figura 24. Imagen Google Earth 11/12/2016 – Mapa de desplazamiento en (m) Sentinel 201609 – 201702.....	94
Figura 25. Mapas de desplazamiento en (m) Sentinel 1 201702 – 201704	95
Figura 26. Mapas de desplazamiento en (m) Sentinel 1 201901 – 201909	95
Figura 27. Imagen Google Earth 01/18/2016 – Mapa de desplazamiento en (m) Sentinel 201609 – 201702.....	96

Lista de ecuaciones

Ecuación 1. Mapeo <i>pixel</i> a <i>pixel</i>	43
Ecuación 2. Mapeo <i>pixel</i> a <i>pixel</i> simplificada.....	44
Ecuación 3. Fase interferométrica.....	48
Ecuación 4. Remisión de la fase topográfica	49
Ecuación 5. Valor de fase inequívoco.....	52
Ecuación 6. Ruido de fase.....	54
Ecuación 7. Función de costo	55

Glosario

Interferograma. Figura geométrica que cuantifica la variación de posiciones de puntos dispuestos en una rejilla como consecuencia de su deformación mediante el uso de la interferencia de las ondas de luz.

Interferometría de radar de Apertura Sintética (SAR). Es una familia de técnicas de procesamiento de imágenes para medir la topografía de una superficie, los cambios de superficie a lo largo del tiempo y otros cambios en las características detalladas de la superficie.

Corregistro. Es el proceso mediante el cual la Imagen de coincidencia (esclava) Se alinea con la imagen de referencia (maestra).

Desenvolvimiento. recuperar el número entero de ciclos n que se agregarán a la fase envuelta φ para que el valor de fase inequívoco ψ se pueda obtener finalmente para cada *pixel* de la imagen.

DInSAR. *Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar.*

Envisat. Satélite de observación terrestre construido por la Agencia Espacial Europea (ESA). Fue lanzado el 1 de marzo de 2002, a una órbita polar síncrona con el Sol a una altura de 790 km (± 10 km). Orbita la Tierra con un periodo orbital de cerca de 101 minutos y con un periodo de repetición de ciclos cada 35 días. Estuvo operativo hasta el 8 de abril de 2012, día en el que se perdieron todas las comunicaciones con el satélite.

ALOS PALSAR. También llamado Daichi, es un satélite artificial japonés dedicado a la observación terrestre. Fue lanzado el 24 de enero de 2006 y ALOS 2 en 2014.

ERS 1 y 2. El *European Remote Sensing Satellite* (ERS) se convirtió en el primer satélite de observación de la tierra lanzado por la Agencia Espacial Europea (ESA), el 17 de julio de 1991, a una órbita polar síncrona con el sol, a una altura de entre 782 y 785 km.

Sentinel. Es un proyecto multisatélite que inició en el año 2014. Está siendo desarrollado por la ESA en el marco del Programa Copérnico. Las misiones Sentinel incluyen satélites de radar y satélites de imágenes súper-espectrales para la vigilancia terrestre, oceánica y atmosférica de la Tierra.

DEM. Modelo Digital del Terreno.

Amplitud. Es la intensidad de la señal de retorno.

Fase. Es la medida de la posición de la onda sinusoidal en la que golpea la antena de retorno.

Coherencia. Es un indicador de la precisión de los resultados de la medición de altura o movimiento de la calidad del interferograma resultante.

GCP. Punto de Control Terrestre.

1. Introducción

Con el proceso de globalización de la economía, las organizaciones gubernamentales se han visto obligadas a afrontar nuevos retos para mantener la calidad de vida de la sociedad y adaptar nuevas estrategias para estructurar sus procesos de producción a las nuevas exigencias que le impone el desarrollo de las tecnologías de información y la comunicación (TIC), que integran políticas y estándares para el desarrollo de productos y servicios que satisfagan las necesidades a usuarios en un mercado cada vez más abierto.

En ese contexto cambiante, las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) y en especial la teledetección les ha permitido a las organizaciones asumir proyectos estratégicos que les permita obtener información de lugares en donde no es fácil obtenerla de manera directa, para favorecer la toma de decisiones efectivas que mejoren la calidad de vida de una comunidad. En este sentido, Colombia a través del CONPES 3918 “Estrategias para la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en Colombia”, converge por la democratización de las políticas en el territorio, con el ánimo de disminuir las brechas e incrementar el bienestar de la población.

La teledetección se constituye en una herramienta importante para la planificación territorial; fundamental para detectar fenómenos que suceden sobre la superficie terrestre y producir mapas de diversos tipos que permitan introducir medidas para mitigar los impactos sociales, económicos y ambientales.

La interferometría SAR (*Synthetic Aperture Radar* -InSAR), es una metodología de uso reciente, en el campo de los sensores remotos para el seguimiento y medición de los cambios de la superficie terrestre, que mediante la técnica DInSAR (InSAR diferencial) se

utiliza la fase del SAR, que percibe los cambios de elevación de la topografía entre dos imágenes del mismo sensor.

Esta técnica se convierte en una herramienta importante para determinar zonas de subsidencia en áreas urbanas a gran escala, la cual se presenta por el uso indebido del suelo, construcciones ilegales, minería, sustracción de aguas subterráneas y construcción de infraestructura vial y de vivienda entre otros, donde determinar la variación en altura de las diferentes zonas puede llegar a determinar zonas de riesgo no mitigable para la comunidad.

Bogotá es una de las ciudades en Colombia, que desde 1997 ha presentado un crecimiento urbano bien importante; desde 1997 a 2005 presentó un crecimiento concentrado alrededor del casco urbano, y de 2010 en adelante el crecimiento se expande hacia áreas rurales de la ciudad, según estudio de crecimiento y evolución de la huella urbana para los municipios que conforman el área Bogotá Región liderado por la Alcaldía de Bogotá y la gobernación de Cundinamarca. El crecimiento demográfico entre 1997 y 2010 tuvo un aumento de 23.61%; desde el 2010 a 2016 el incremento disminuyó al 8%. Sin embargo, este se ve consolidado en el costado sur y norte de Bogotá, toda vez que el río Bogotá se convierte en una barrera natural para el crecimiento hacia el occidente.

A partir de este aumento urbanístico en Bogotá y su afectación sobre el suelo, este proyecto pretende generar una serie de mapas de desplazamiento con imágenes SAR de diferentes sensores, Envisat, ERS 1 Y 2, ALOS PALSAR y Sentinel, que permita la identificación de zonas de riesgo por remoción en masa o subsidencia de zonas urbanizadas o en proceso de urbanización.

En consecuencia, se aborda el tema de desplazamiento de la superficie terrestre aplicando los conceptos de interferometría de radar a procesos constructivos para aportar el

conocimiento técnico en la solución de proyectos de infraestructura sostenibles y generación de políticas públicas.

1.1 Planteamiento del problema

Existen variadas fuentes por las cuales se pueden presentar movimientos de la superficie del terreno, ya sea por acción natural o provocadas por la actividad humana, reflejados en movimientos originados por actividades de extracción de petróleo, gas, agua, minerales. También se pueden presentar dichos movimientos por obras de infraestructura subterráneas como: túneles, estructura para metro, subsidencia por procesos constructivos vinculada a la sobrepoblación en diferentes zonas del país; subsidencias por dolinas; derrumbe de laderas, actividades sísmicas, cosísmicas e intersísmicas; actividades volcánicas entre otros (Ayala *et al.*, 2019).

Actualmente el suelo de las zonas periféricas de Bogotá está siendo usado para asentamientos humanos ilegales, incrementando la construcción de vivienda y sobrecargando el suelo como consecuencia de la sobrepoblación generada por el desplazamiento humano desde lo rural a zonas urbanas. Situación debida al desplazamiento forzoso de comunidades por grupos al margen de ley, inmigración de personas extranjeras que, por la situación social, política y económica que atraviesan buscan mejores condiciones de vida.

De acuerdo con el Banco Mundial (2012), entre 1970 y 2011 se han registrado más de 28.000 eventos adversos, de los cuales solo el 60% son reportados a partir de los 90. Se evidencia un aumento en la periodicidad de los eventos, pasando de 5.657 registros entre 1970 y 1979, a 9.270 registros entre el 2000 y el 2009, lo cual está sujeto no solo a la existencia y calidad de los datos, sino que también influye el aumento de la población y los

bienes; la distribución del nivel de exposición en Colombia relacionado con la alta amenaza por movimiento en masa es del 8%, la deficiencia en el conocimiento e incorporación de restricciones ambientales y condiciones de riesgo en los procesos de planificación y ordenamiento urbano y regional y, también, la capacidad de cubrir las necesidades de vivienda, generan el aumento de asentamientos en zonas no aptas y el crecimiento de barrios asociados con infraestructura deficitaria (Campos, 2015).

En Colombia, la Unidad Nacional para la Gestión de Riesgo de Desastres -UNGRD, en el Boletín informativo No. 57 de 2020, indica que Colombia con una población de 48.258.494 de personas, Censo DANE 2018, más del 82% se encuentra en amenaza alta por movimiento de masas, lo cual deja claro, que el crecimiento de la población asociado a procesos de urbanización acelerada sin una adecuada planificación, han incidido en alto grado para que se incremente el riesgo por este aspecto (UNGRD, 2020).

De acuerdo con los datos mostrados en el documento de Informe de Gestión del Instituto Distrital en el Plan Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático D.C., 2015 - 2050 de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER de diciembre del año 2015, el riesgo de remoción en masa se presenta por la ubicación de asentamientos humanos dedicados a la extracción de material y establece mediante el índice de evaluación que determina la afectación que un predio tiene según la amenaza en la que esté expuesto, obteniendo como resultado valores en condición de amenaza alta en las localidades de Usme, y Ciudad Bolívar, equivalente a tener un área de 16,03 km², es decir, que aproximadamente el 4% de la urbe se encuentra clasificada en amenaza alta. El mismo documento muestra que 61,28 km², es decir, que aproximadamente el 15% se encuentra una cobertura de amenaza

media y que 51,27 km², es decir, que aproximadamente el 12% se encuentra una cobertura de amenaza baja (IDIGER, 2015).

De acuerdo con lo anteriormente indicado, el estudio de la deformación del terreno se puede estudiar en tres campos referentes; a la detección y estudio de nuevas deformaciones del terreno, de igual manera el estudio de las ya existentes, así como la predicción de futuros efectos provocados por las deformaciones. En un gran porcentaje de los casos presentados, el objetivo radica en descubrir zonas de subsidencia, que no han sido identificadas, de esta manera planificar una investigación detallada de las zonas en riesgo. En otros casos, mediante investigaciones posteriores relacionados con la deformación del terreno, estas se basan en realizar un análisis exhaustivo de la zona con el fin de determinar posibles fuentes que generan tal deformación (Agudo et al., 2003).

Es importante resaltar que hoy en día existen gran variedad de técnicas relacionadas, para cuantificar las deformaciones de la superficie terrestre. La mayoría de ellas se basan en metodologías de topografía y el monitoreo geodésico como, por ejemplo, las nivelaciones geométricas con equipos de precisión. Por otro lado, existen técnicas basadas en el sistema GPS (*Global Positioning System*). También existen variedad de métodos diseñados para ser utilizados de manera específica en la construcción de obras subterráneas, o las herramientas requeridas en la monitorización de derrumbes de laderas. Estas técnicas son muy particulares y diversas. Algunas suministran medidas de tipo manual, que suelen ser precisas y al mismo tiempo costosas. Otras pueden proporcionar medidas de tipo automático, pero que conciernen a puntos aislados, permitiendo monitorizar pocos puntos a la vez (Agudo *et al.*, 2003).

Actividad planificadora realizada por los entes gubernamentales en materia del territorio necesita de un estudio exhaustivo de todo lo que afecta la zona de estudio,

primordialmente aquello que pueda generar riesgo para las personas y sus bienes, (Peña, Rueda y García, 2010). Por lo cual, la subsidencia en las grandes urbes y en aquellas que se encuentran en un constante crecimiento, de ser tomada en serio toda vez que se han encontrado casos extremos donde se ocasiona el colapso de edificación y obras civiles y grandes pérdidas económicas.

Por ello, el presente trabajo presenta una técnica poco difundida hoy en día, y con grandes beneficios para la detección de deformaciones en la superficie terrestre, la técnica DInSAR, que para muchas de las aplicaciones puede ser muy beneficiosa. Los usos más relevantes del DInSAR incluyen: descubrir y examinar los efectos de deformaciones en áreas urbanas, en zonas donde se presenta bastantes terremotos, en los movimientos de capas del suelo y en áreas volcánicas, entre otros.

Existen ventajas entre las técnicas basadas en imágenes SAR (*Synthetic Aperture Radar*) respecto a las técnicas tradicionales, entre ellas se encuentra la realización de estudios o generación de mapas de deformación en el tiempo, entendiendo que se puede realizar trazabilidad desde la fecha donde existan imágenes archivadas, hasta la fecha de funcionamiento del sensor, que en comparación con las técnicas tradicionales nos limitamos a estudios previamente planificados, generalmente, por el conocimiento previo de la deformación. De otro lado el costo del estudio de grandes áreas es inferior con el uso de técnicas SAR que con técnicas tradicionales. Normalmente, las imágenes SAR cubren aproximadamente 10.000 km², así mismo cada imagen SAR adquirida contiene unos 100 millones de medidas aprox., que en comparación con GNSS obtenemos alrededor del 10% de los puntos, por últimos, el SAR realiza una adquisición regular en el tiempo. Ello agiliza

las tareas de monitoreo de la deformación de la superficie terrestre en el tiempo, (Bovenga, 2020).

Lo cual nos lleva a plantear el siguiente interrogante ¿se puede identificar y cuantificar el desplazamiento del suelo resultado del proceso constructivo y desarrollo urbano en el sur y periferia de la ciudad de Bogotá con la implementación de la técnica DInSAR?

1.2 Justificación

De acuerdo con Guillermo Ávila (2009), doctor de la Universidad Pontificia de Cataluña, Bogotá está sufriendo un hundimiento de grandes extensiones de tierra, también conocido como subsidencia debido a múltiples factores relacionados con procesos naturales como el desplazamiento de placas continentales, fallas geológicas o por acción del hombre como lo es la extracción de grandes cantidades de agua, petróleo, minerales o gas del subsuelo, así como la construcción de túneles o sobrecarga extensiva del terreno por el proceso construcción y desarrollo urbano. En este sentido el Instituto Distrital de Gestión de Riesgo y Cambio Climático (IDIGER), es el ente distrital encargado de realizar los estudios geotécnicos y emitir conceptos técnicos sobre la potencial amenaza por remoción en masa en determinadas zonas, para la legalización de barrios y uso del suelo, en el Distrito Capital.

Un factor importante en el desarrollo de esta dinámica radica en el estudio de la subsidencia; el acelerado crecimiento urbanístico, la construcción de grandes edificaciones en muy poco tiempo, la migración de personas de diferentes regiones de Colombia a la ciudad de Bogotá, en busca de mejores oportunidades laborales y económicas. La migración desbocada se ve reflejada en el incremento desmedido en la extensión del área urbana de Bogotá en todas las direcciones. Así mismo, se evidencia que constructores ilegales adquieren terrenos de manera ilegal motivando la ocupación masiva de grandes extensiones de terreno, también se encuentra las constructoras legales que generan la demolición de pequeñas viviendas para ser sustituidas por grandes edificios de vivienda, muestra de este fenómeno es el sur de Bogotá.

Ávila en el último estudio realizado en compañía con el FOPAE hoy IDIGER mencionan que una de las razones principales del hundimiento de Bogotá, se debe a la

extracción de agua subterránea, Puente Aranda es la localidad donde más se ve reflejado este fenómeno debido al gran número de pozos subterráneos para extracción de agua identificados. Sin embargo, no se puede dejar a un lado el acelerado y desmedido crecimiento urbano en la periferia, ha conllevado a que las propiedades físicas del suelo se modifiquen, evidenciado eventos relacionados con deslizamientos, salubridad, cambios de cursos de agua, de igual manera se puede evidenciar con la presencia de grandes fisuras en las obras de infraestructura actuales tales como construcciones, vías y puentes entre otros, lo cual puede llevar a la pérdida de vidas humanas.

De acuerdo al estudio realizado entre Findeter, la Gobernación de Cundinamarca y la Alcaldía mayor de Bogotá “Crecimiento y Evolución de la Huella Urbana para los Municipios que Conforman el Área Bogotá Región 1997-2016” indica que: “Entre 1997 y 2016 los 20 municipios vecinos han ocupado un total de 27.309 ha con una población total de 1.969.893 habitantes. Bogotá por su parte, alberga una población 4 veces mayor (7.980.001) en un área apenas 1,3 veces más grande que la de estos municipios (36.143 ha)”, mostrando de esta manera la alta densidad de ocupación del suelo en las áreas periféricas de la ciudad.

El plan de desarrollo nacional se construyó teniendo en cuenta los objetivos de desarrollo sostenible 2030, mediante el pacto con la sostenibilidad (producir conservando y conservar produciendo), con el objetivo de “promover el conocimiento en la comunidad sobre los riesgos de desastres y el cambio climático para tomar mejores decisiones en el territorio” con la aplicación de una de las estrategias “realizaremos estudios de amenazas ante fenómenos naturales para el ordenamiento territorial municipal desde las entidades técnico-científicas del país”.

El plan de desarrollo para Bogotá 2016-2020, contempla en el eje transversal no 3 “Sostenibilidad ambiental basada en eficiencia energética” en su programa “Recuperación y manejo de la Estructura Ecológica Principal” que en su componente Cerros Orientales, reconoce que el crecimiento urbano en esta área no obedecen a un proceso planificado de desarrollo y urbanización, creando asentamientos informales que además de incidir en el desfavorecimiento medioambiental, también favorece la presencia de riesgos de remoción en masa.

En coherencia con lo anterior, es necesario que se desarrolle técnicas de monitoreo para y control de nuevas construcciones ya sean legales o ilegales, que permitan identificar confiablemente las zonas con posibles desplazamientos del suelo o áreas de subsidencia a fin de mejorar los protocolos de seguridad establecidos por el IDIGER para zonas de riesgo no mitigable.

La técnica de interferometría InSAR, es una de las metodologías más prometedoras para realizar este tipo de estudios, toda vez que las imágenes de radar tienen mayor resolución espacial y son más fáciles de adquirir. De igual manera la resolución temporal es cada vez más pequeña, convirtiendo esta técnica en solución rápida no solo para determinar la subsidencia en periodos de tiempo largo por causa de un fenómeno permanente, sino también en periodos cortos cuando los fenómenos son más puntuales y cortos.

Razón por lo cual el presente proyecto busca identificar la eficacia de la técnica de interferometría InSAR con imágenes de radar para el periodo comprendido entre los años 2000 y 2020 frente al desplazamiento del terreno obtenido por el proceso constructivos de diferentes zonas del sur de Bogotá, que permita identificar zonas potenciales en riesgo por remoción en masa, y este a su vez lleve a establecer una política pública que se constituya en

una política pública de la planificación nacional que le permita a las entidades territoriales proyectar de forma efectiva su gestión del riesgo con el uso efectivo de esta técnica obteniendo una percepción de los desplazamientos verticales y horizontales del terreno en grandes extensiones del terreno a bajo costo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Identificar zonas de desplazamiento de la superficie terrestre generados por el proceso constructivo en el sur de Bogotá, entre los años 2000 y 2020 mediante el uso de interferometría DInSAR.

1.3.2 Objetivos Específicos

Implementar la metodología de interferometría DInSAR para la generación de mapas de desplazamiento con imágenes Envisat para el periodo de tiempo comprendido entre los años 2002 y 2008.

Aplicar una metodología de interferometría DInSAR para la generación mapas de desplazamiento con imágenes Sentinel 1 para el periodo de tiempo comprendido entre los años 2016 y 2020.

Realizar un análisis comparativo en términos de precisión e identificación de fenómenos de subsidencia en zonas del sur de Bogotá que presentan un desarrollo constructivo en el tiempo, mediante el uso de mapas de desplazamiento obtenidos a partir de las imágenes de Envisat, Sentinel 1 y los estudios técnicos realizados por diferentes entidades de Gestión del Riesgo en esta zona.

2. Marco Teórico

Se presenta en este capítulo una serie de antecedentes válidos, los cuales fueron tenidos en cuenta en el desarrollo del presente proyecto de investigación por proporcionar los conceptos teóricos que dan sustento para resolver el problema planteado.

Con los procesos de desarrollo económico y tecnológico que en el mundo se desarrollan como resultado de la globalización económica de los países, los organismos internacionales como la ONU se han puesto a la tarea de proponer objetivos de desarrollo sostenible que oriente las políticas de los diferentes gobiernos para mejorar las prácticas de producción, de manera que generen menos impactos sobre la superficie de la tierra con el desarrollo de técnicas que mejoren el sistema productivo con la capacidad de la tierra donde se utilicen los recursos naturales apropiadamente garantizando la conservación de la población.

El plan de desarrollo nacional se construyó teniendo en cuenta los objetivos de desarrollo sostenible 2030, mediante el pacto con la sostenibilidad (producir conservando y conservar produciendo), con el objetivo “Promover el conocimiento en la comunidad sobre los riesgos de desastres y el cambio climático para tomar mejores decisiones en el territorio” con la implementación de una de las estrategias “realizaremos estudios de amenazas ante fenómenos naturales para el ordenamiento territorial municipal desde las entidades técnico-científicas del país”. De igual manera el Plan de desarrollo para Bogotá 2016-2020, contempla en el eje transversal “Sostenibilidad ambiental basada en eficiencia energética” con el programa “Recuperación y manejo de la Estructura Ecológica Principal” que en su

componente Cerros Orientales se reconoce que los Cerros Orientales no obedecen a un proceso planificado de desarrollo y urbanización, creando asentamientos informales que no solo inciden en la degradación ambiental, sino que se encuentra en riesgos de remoción en masas.

Emilio Chuvieco (2002), describe la teledetección como una técnica que permite adquirir datos a distancia de los objetos ubicados en la superficie terrestre. Con este concepto las imágenes de radar recogen un alto volumen de datos de la superficie del suelo a partir de su propia energía mediante ondas de microondas con longitudes de onda comprendida entre 3 mm y 30 cms.

Las imágenes de radar son imágenes con una gran resolución espacial de la superficie del terreno llamadas imágenes SAR, en la que cada *píxel* corresponde a un número complejo conformado por un valor de amplitud y otro de fase.

De acuerdo con lo establecido por Zozaya (2017), la imagen de radar es una representación 2D (o 3D) de reflectancias, que está en función de la dirección de iluminación, la frecuencia, la polarización y de las características geométricas y constitutivas de la superficie del terreno. La reflectancia se mide en metros cuadrados con el coeficiente de retrodispersión que corresponde a la medida estadística de la reflectancia por el área iluminada por el radar.

2.1 Datos crudos SAR

El radar de apertura sintética SAR, es un sensor activo que irradia energía en las microondas en un corto periodo de tiempo y obtiene información de las reflexiones de la señal cuando rebota en los objetos generando la una apertura sintética, es decir que debido a

la gran velocidad de movimiento del sensor la cual es 7,5 Km/s aprox., la antena del SAR se transforma en una antena virtual de un tamaño mayor. El objeto en la superficie terrestre dura en el haz de la antena durante un momento y es observado por el radar desde numerosos puntos de vista en su trayectoria, lo equivale a extender la longitud real de la antena.

Al considerar el efecto Doppler el cual se origina por el desplazamiento del sensor, la resolución acimutal mejora sustancialmente. Dos objetivos puntuales separados por una distancia muy corta en la dirección acimutal evidencia en cualquier instante velocidades diferentes respecto del radar, por ello, la señal reflejada del objeto presentará un desplazamiento en frecuencia Doppler distinto (Martínez *et al.*, 1999) este tipo de dispositivos puede ser instalados en diferentes tipos de plataformas

Existen tres niveles de procesamiento con las que son entregadas las imágenes SAR; 0, 1, 2 los cuales indican el nivel de procesamiento de los datos:

Productos SAR de nivel 0

Contienen los datos SAR sin procesar de los paquetes de fuente de instrumentos (ISP) no procesados, esto pueden incluir datos en modo de polarización simple (HH o VV) o, para los modos SM, IW y EW, pueden incluir modos de polarización dual (HH + HV o VV + VH). Para los datos de polarización dual, los datos para cada polarización están disponibles en archivos separados dentro del producto de nivel 0, (ESA, 2000-2019).

Productos SAR de nivel 1

Los productos Sentinel nivel-1 son los datos que se utilizarán para desarrollar este trabajo, estos son productos de línea de base para la mayoría de los usuarios, de los que se derivan niveles más altos, el módulo de procesamiento de instrumentos (IPF) genera

productos enfocados de complejo de nivel 1 (SLC) y productos de nivel 1 de detección de rango de terreno (GRD).

Los parámetros SAR que varían con la posición del satélite en órbita, como la velocidad de FM azimutal, la frecuencia del centroide Doppler y la altura del terreno, se actualizan periódicamente para garantizar la homogeneidad de la escena al procesar una toma de datos completa. Del mismo modo, los productos generados a partir de datos de VM pueden contener cualquier cantidad de viñetas, potencialmente hasta el valor de una órbita completa.

Todos los productos de nivel 1 están georreferenciados y etiquetados en el tiempo con cero tiempos Doppler en el centro de la franja. La georreferenciación se corrige para el sesgo biestático azimutal teniendo en cuenta el tiempo de recorrido del pulso delta entre el centro de la franja y el rango de cada punto georreferenciado, (ESA, 2000-2019).

Productos SAR de nivel 2

El nivel 2 consiste en productos geofísicos georreferenciados obtenidos del nivel anterior. Solo hay un producto estándar de Nivel 2 para aplicaciones de viento, olas y corrientes: el producto Océano de Nivel 2 (OCN), (ESA, 2000-2019).

La zona de trabajo de los sistemas de estas plataformas, se encuentra en un rango del espectro electromagnético, las cuales se muestran en la *Tabla 1*, clasificadas por bandas y los campos donde son utilizadas.

BANDA	GAMA DE FRECUENCIAS	Long (λ) cm	APLICACIONES
WHF	300 KHz - 300 MHz		follaje, penetración del suelo, biomasa
P	300 MHz - 1 GHz	30.0 - 100.0	biomasa, humedad del suelo
L	1 GHz- 2 GHz	15.0 - 30.0	agricultura, gestión forestal, humedad del suelo
C	4 GHz- 8 GHz	3.8 - 7.5	océano, agricultura
X	8 GHz- 12 GHz	2.4 - 3.8	agricultura, océano, radar de alta resolución
Ku	14 GHz- 18 GHz	1.7 - 2.4	glaciología (mapeo de la cubierta de nieve)
Ka	27 GHz- 47 GHz	0.8 - 1.1	Radares de alta resolución

Tabla 1. Bandas de radar y campos de uso.

Normalmente los sistemas de radar operan en la frecuencia adecuada para la misión para la cual ha sido construido, sin embargo, algunas plataformas pueden operar en varias frecuencias. La mayor penetración en la vegetación y en el suelo se logra con el uso de bandas de longitud de ondas largas, razón por la cual, en este trabajo utilizará las bandas C, las cuales son muy habituales para monitorear la superficie terrestre.

De otro lado algunos sistemas de radar pueden manipular la disposición de la onda emitida y recibida bien sea Horizontal (H) o Vertical (V), para esto la diferentes plataformas tienen la posibilidad de configurar el sistema de emisión y recepción, obtenido las siguientes configuraciones; HH, VV, HV, VH, esta particularidad es muy importante en estas plataformas ya que las ondas de radar al rebotar con el relieve, podría cambiar su polarización, permitiendo de esta manera percibir las características topográficas de la superficie y el uso de la polarización apropiada para cada tipo de estudio, para este trabajo se utilizará la polarización Vertical-Vertical (VV).

2.2 Información Orbital

La combinación de los efectos orbitales define la señal principal del interferograma, los sensores deben estar lo más cerca posible y en la misma posición espacial para que se produzca la interferometría. Lo que significa que no es posible confrontar imágenes SAR de plataformas diferentes, con diferentes orbitas; De esta forma se debe trabajar con la información de un sensor desde la misma trayectoria orbital. Dicho de otra manera, la «línea de base» conocida como la distancia perpendicular entre las dos imágenes, normalmente se describe en pocos centímetros, la cual se puede controlar solo con distancias más largas. Esta discrepancia genera una diferencia regular en la fase que varía sutilmente en el interferograma la cual puede ser modelarse y eliminarse.

Las diferencias en la posición de la plataforma alteran la distorsión ocasionada por el relieve, lo cual a través del efecto estereoscópico se produce una diferencia de fase adicional. En este sentido la altitud de ambigüedad o cambio de fase, es producida por una relación inversa entre la línea base y la altura topográfica necesaria para producir este cambio, lo cual permite calcular la altura topográfica requerida para producir un DEM (Modelo digital de elevación).

Para la determinación precisa de la órbita es de suma importancia conocer con gran detalle el historial de masas de la plataforma, la evolución de su centro de gravedad, el historial de maniobras y la información de actitud. Además, para el procesamiento basado en GNSS, se requiere la ubicación y orientación de las antenas. La ESA genera un archivo que combina información sobre maniobras y cortes de GNSS para la misión:

Los productos orbitales precisos y los datos auxiliares generados por el servicio *Copernicus* POD “determinación precisa de órbitas” para la misión Sentinel-1 se pueden dividir en dos categorías según la oportunidad asociada.

Los productos de tiempo casi real (NRT) se generan en función de la disponibilidad inmediata de GPS L0 con las órbitas y relojes GPS casi en tiempo real proporcionados por EGP, Estos están asociados a la disponibilidad de un nuevo archivo GPS L0, que generalmente tiene una cobertura de varias órbitas con superposiciones significativas. Tiene la cobertura del último cruce de nodos ascendente (ANX) contenido en el GPS L0 que activó su generación más 2 órbitas hacia atrás. Por lo tanto, los productos POD NRT oficiales para Sentinel-1 generalmente, muestran superposiciones de 1 o 2 órbitas, dependiendo de la cobertura del GPS L0.

Los productos que no son críticos para el tiempo (NTC) se calculan después de varios días para permitir que todas las entradas altamente precisas estén disponibles, como las órbitas GPS y los relojes de IGS. Los cuales se genera con una puntualidad de 20 días y cubren 26h, desde 1 hora antes del comienzo del día $N-20$ hasta 1 hora después del final del día $N-20$ (siendo N el día actual). Por lo tanto, hay una superposición de 2h entre archivos de órbita NTC consecutivos.

En este sentido es importante contar con tal información en las cabeceras de los archivos toda vez que esta información definirá el grado de coherencia entre los pares interferométricos, permitiendo hacer un filtro a toda las imágenes obtenidas, seleccionando aquellas que cuenten mayor grado de coherencia para generar los interferogramas, este valor ha sido muy discutido entre los diferentes autores, haciendo referencia al comportamiento de

un objeto entre las dos visitas del sensor, teniendo en cuenta que si el par interferométrico se tomara al mismo tiempo este valor tendría que ser 1 o muy próximo a 1.

2.3 Modelo Digital de Elevación “DEM”

Las características que describen la forma del relieve y su configuración a través de una representación visual y matemática de los valores que representan la altura con respecto al nivel medio del mar se conoce como el modelo digital del terreno. Esta información se encuentra contenida en archivos ráster con estructura regular.

Estas imágenes ráster contienen cualidades esenciales relacionadas con la exactitud y la resolución horizontal que dependiendo del método con el que se genera pueden variar. Para el caso de los DEM generados con LIDAR se obtienen modelos de alta resolución y gran exactitud.

Los modelos digitales de elevación en la actualidad tiene una variedad de representaciones, que con el apoyo de los sistemas de información geográfica le permiten a los usuarios realizar análisis efectivos de los datos del relieve a través de esquemas hipsométricos para realizar modelo dinámicos en 3D, perfiles longitudinales a diferentes intervalos donde varían los colores conforme a la variación de la elevación, de manera que a través de la superposición de datos de interés en formato vectorial o ráster de diferentes temas y aplicaciones se obtengan nuevos productos georreferenciados de apoyo a la toma de decisiones.

2.4 Enfoque de datos crudos

Los sistemas de radar de apertura sintética (SAR), requieren que se realice una operación de enfoque en los ecos retrodispersados recibidos (datos brutos) para generar imágenes de microondas de alta resolución. Debido a la inestabilidad de la altitud de la plataforma o a los efectos de rotación de la Tierra, los datos brutos de SAR pueden adquirirse en geometrías "entrecerradas", es decir, con el haz del radar dirigido con un ángulo de compensación (ángulo de estrabismo) desde la dirección del lado ancho.

Con este fin, el enfoque de procesamiento SAR de frecuencia 2D se generaliza con respecto a los sistemas de referencia cónicos, es decir, no ortogonales. Esto permite el análisis de lo geométrico, espectral, y aberraciones de fase introducidas en las imágenes por la geometría de procesamiento elegida con respecto a la adquisición, e identificación del procedimiento de enfoque que minimiza estas aberraciones.

Este enfoque tiene como objetivo sintetizar una apertura cuya dimensión es mucho mayor (generalmente, 100-1000 veces) que el tamaño real del acimut de la antena montada a bordo de la plataforma. El rango de procesamiento, debido a la intrínseca naturaleza del problema y su independencia sobre las ubicaciones de destino, es habitualmente sencillo.

Trabajos recientes se preocupan más por procedimientos precisos y/o eficientes para compensar la variante espacial, la cual depende del rango de tiempo, características de la función de transferencia del sistema SAR (STF) En todos los casos, el STF 2-D SAR es proyectado en un sistema de referencia cilíndrico cuyo eje coincide con la trayectoria de vuelo del sensor para lo cual se supone que es una línea recta.

En este caso, cada objetivo de la escena iluminada, después de la operación de enfoque de datos, se visualiza en la posición de acimut y rango correspondiente a una

geometría "ortogonal" (*figura 1.*), es decir (x_0, r_0) para el objetivo P en la imagen fotografiada con el ángulo de este modo de enfoque se denomina como procesamiento SAR cero *Doppler* (ZD) geometría de salida.

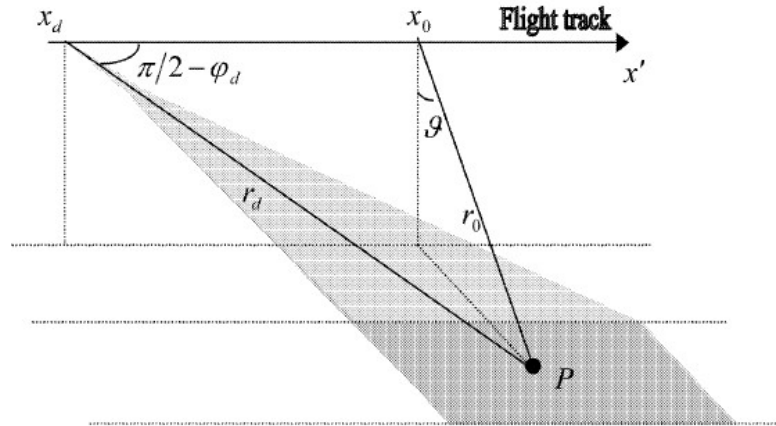


Figura 1. Geometría pertinente a adquisiciones de SAR entrecerradas.

Donde:

(x_d, r_d) y (x_0, r_0) = son el acimut y el rango objetivo cuando es tomado.

$\pi / 2 - \varphi_d$ = Es el ángulo respectivo

Sin embargo, con frecuencia sucede que, ya sea debido a los efectos de rotación de la Tierra o al ángulo de orientación de la antena que no está en el exterior, la adquisición de datos se realiza en una geometría que es "no ortogonal" a la dirección de la antena, es decir, con el haz del radar con un ángulo de desplazamiento desde la dirección ZD. Es intuitivo que, en el caso de procesamiento de ZD SAR, los objetivos de la escena se migren de alguna manera con respecto a la ventana de adquisición en las direcciones de acimut y rango para que coincida con la geometría de salida, (Fornaro *et al.*, 2002).

Existen dos tipos de enfoque o evaluación de la geometría, la primera de ellas cónica, la cual se describe en la *figura 2.*

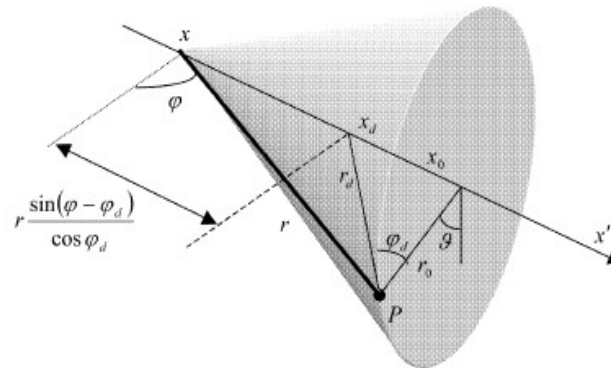


Figura 2. Geometría de procesamiento cónica, el eje coincide con la trayectoria del vuelo.

Donde:

(x, r, θ) = son las coordenadas que se definen respecto al ángulo cónico φ

El segundo enfoque realiza el ajuste respecto a un cilindro según figura 3.

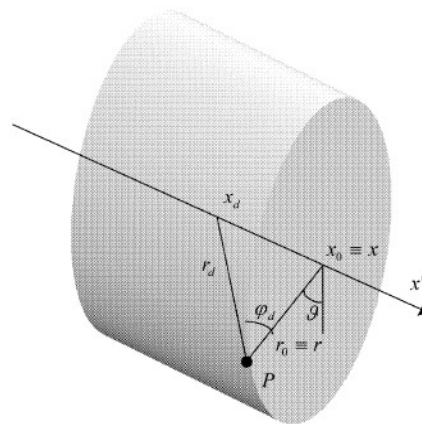


Figura 3. Geometría de procesamiento cilíndrica el eje coincide con la trayectoria del vuelo.

Donde:

$(x = x_0, r = r_0, \theta)$ = son las coordenadas de destino

x^2 = es la posición del sensor a lo largo de la pista

2.5 Conversión DEM a coordenadas SAR

La conversión del modelo de elevación digital (DEM) en coordenadas SAR se realiza explotando las llamadas ecuaciones *Doppler* de rango. Este paso, que normalmente explota los datos de la misión de topografía de radar del transbordador (SRTM), primero requiere que un DEM sobremuestreado que se convierta en un sistema cartesiano fijo centrado en la Tierra. Posteriormente, al explotar la órbita de la imagen maestra de la cual sirve de referencia, las coordenadas de acimut y rango por cada *píxel* DEM se identifican y almacenan en dos archivos.

Los últimos valores se configuran en una cuadrícula irregular, y luego es necesario un proceso adicional a esta cuadrícula. Debido al sobremuestreo del DEM, la dimensión de las matrices de datos involucradas puede volverse demasiado grandes ocupando varios *Gigabytes*, generando que el proceso de esta imagen sea demorado. Generalmente, cuando se trata de áreas amplias que requieren que la máquina tenga una gran memoria y almacenamiento en disco para manejar los productos intermedios. Por otro lado, el procedimiento se realiza en coma flotante de doble precisión para reducir la propagación del error, lo que aumenta aún más la memoria y almacenamiento requerido.

El DEM externo es necesario no solo para la eliminación de la topografía en la generación diferencial de interferogramas, sino también para el registro conjunto de cada imagen con respecto a la geometría de referencia maestra, para lo que posteriormente se realiza un paso de corrección geométrica después de haber calculado, por cada imagen, las distancias a lo largo de la línea de visión “rango” y la pista de vuelo “acimut” de los píxeles de imagen desde una posición de referencia orbital; los archivos resultantes se denominan archivos de rango y acimut.

Estos archivos se calculan en coma flotante de doble precisión a través de una solución geométrica simple y luego son almacenados toda vez que serán utilizados en el siguiente paso de corrección y en la generación diferencial de interferogramas; para lo cual necesita el rango mencionado y los archivos de acimut como entrada para calcular la función de deformación, así como la imagen esclava para ser interpolada con respecto a la geometría maestra (Francesco *et al.*, agosto 2014).

El procesamiento no es particularmente pesado en términos de complejidad, para lo cual la función de deformación se estima directamente por la diferencia de los archivos de rango y acimut (*figura 4*), mientras que la interpolación de esclavos se realiza con doble precisión, la principal limitante en este procesamiento es la memoria en RAM del equipo.

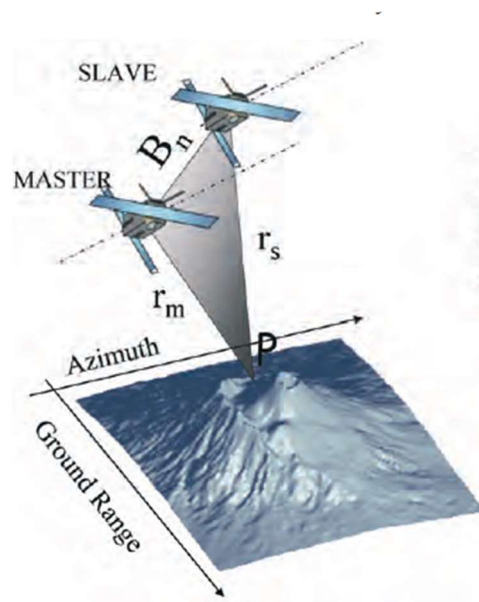


Figura 4. Rango y Acimut de una imagen SAR.

La implementación real es complicada, ya que el DEM se posiciona normalmente en una proyección de referencia de la tierra que concuerde con una proyección cartográfica, mientras que $\Delta(p)$ se debe calcular en una cuadrícula regular en la referencia SAR (rango inclinado, acimut). Se necesita un algoritmo adecuado para transformar esta referencia al sistema de coordenadas deseado. Este problema no existe si se supone un perfil de terreno plano.

El interferograma sintético proporciona un campo de fase sin envolver que puede usarse para los siguientes propósitos:

- La fase se puede restar del interferograma SAR final para eliminar la topografía conocida, proporcionando así un interferograma diferencial, para monitorear los cambios.
- Aplicando la *ecuación 1*, proporciona un esquema del mapeo de *pixel a pixel* desde la imagen maestra a la esclava, para ser utilizado para el registro de imágenes:

$$\Delta r = -2 \frac{b_n q_s}{R} \quad (1)$$

Ecuación 1. Mapeo pixel a pixel.

Donde:

B_n = línea base perpendicular

R = distancia del objetivo de radar

q_s = Desplazamiento entre las celdas de resolución a lo largo de la perpendicular al rango inclinado.

La variación de fase interferométrica $\Delta\phi$ es entonces directamente proporcional a Δr dividido por la longitud de onda transmitida λ de acuerdo con la *ecuación 2*:

$$\Delta(\rho) = \frac{2\pi\Delta r}{\lambda} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{b_n q_s}{R} \quad (2)$$

Ecuación 2 Mapeo pixel a pixel simplificada.

2.6 Corregistro de Imágenes SAR

La interferometría SAR requiere una coincidencia de *pixel a pixel* entre las características comunes en los pares de imágenes SAR. Por lo tanto, el registro conjunto, la alineación de las imágenes SAR de dos antenas, es un paso esencial para la determinación precisa de la diferencia de fase y para la disminución del ruido. Las imágenes SAR se obtienen a partir de una distancia de alcance inclinado de aproximadamente 850 km con una línea base de aprox. 200 m, por lo que no hay paralaje visible o disparidad entre las imágenes. El propósito completo del corregistro es alinear las muestras para la diferenciación de fase. La geometría imprecisa de paso repetido dificulta la inscripción conjunta, y los datos complejos de InSAR podrían facilitar la inscripción conjunta.

La coincidencia de imagen óptica normal necesita tradicionalmente solo uno o dos píxeles de precisión, que es un registro aproximado para imágenes SAR. La ventana de correlación se utiliza para buscar compensaciones entre imágenes maestras y esclavas. Después de este registro de nivel de *pixel*, se puede generar un interferograma, pero no es adecuado para el procesamiento interferométrico. La precisión del registro de fase debe ser mayor, por lo que se debe realizar un registro a nivel de subpíxeles.

La coincidencia de subpíxeles a subpíxeles, también llamada registro fino, es imprescindible para obtener resultados de InSAR de alta precisión. O bien, la imagen compleja completa o la función de fase se muestrea a 1/8, 1/10, 1/20 o incluso 1/100 píxeles, para encontrar la mejor alineación de subpíxeles. Un desplazamiento no es adecuado para volver a muestrear la imagen esclava corregistrada. Se prefieren las ecuaciones de transformación polinomiales de primer o segundo orden para ajustar los puntos de coincidencia conjugados (Li y Bethel, 2008).

El método más utilizado para el corregistro es calcular la compleja función de correlación cruzada entre las dos imágenes SAR (Li y Goldstein, 1990). Otro enfoque implica estimar una relación señal / ruido (SNR) de la imagen del interferograma (Gabriel y Goldstein, 1988). Por otro lado, la función de fluctuación promedio de la imagen del interferograma se puede usar para ajustar los parámetros de corregistro.

El procedimiento típico corregistro SAR consiste en:

- Corregistro grueso para una precisión a nivel de *píxel*, incluyendo la búsqueda de compensaciones de imagen gruesas y el desplazamiento de la imagen esclava.
- Corregistro suave para la precisión de subpíxeles, incluyendo la búsqueda de puntos de unión de subpíxeles, encajando ecuaciones de transformación, y el remuestreo de la imagen esclava.

Las ecuaciones de transformación. El rendimiento de corregistro es generalmente evaluada por la coherencia y la precisión del DEM final.

En la *figura 5* se muestra un flujo de trabajo para este proceso.

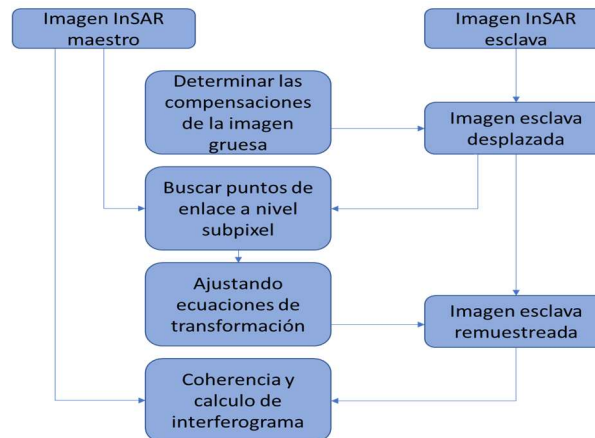


Figura 5 Flujograma de corrección de registro.

2.7 Generación de interferogramas

La generación de interferogramas mediante InSAR y su variante DInSAR, son metodologías que usan como base las imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR). Los cuales son sensores activos que capturan imágenes de alta resolución espacial mediante el uso de una antena virtual que captura un vector de continuas y coherentes señales de radar que son emitidas y recibidas por una antena más pequeña ubicada en el sensor el cual recorre una órbita.

La interferometría SAR (InSAR) y su variante, DInSAR, son técnicas basadas en el proceso y análisis de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR). Los SAR son sensores de los denominados activos, que registran imágenes de alta resolución espacial. Una antena de apertura sintética o virtual consiste en un vector de sucesivas y coherentes señales de radar que son transmitidas y recibidas por una pequeña antena que se mueve a lo largo de un determinado recorrido de vuelo u órbita.

Para crear una imagen en el procesamiento de la señal se requiere del uso de magnitudes y de la fase de la señal recibidas a través de pulsos sucesivos. Así los datos

obtenidos a partir del interferograma, corresponden a las distancias entre los satélites y la superficie del terreno procesados con la medición de tiempos y desfases para la obtención de imágenes de alta resolución. De esta manera, la interferometría SAR se constituye en una técnica de procesamiento de imágenes a partir de 2 pares interferométricos que al medir las diferencias de fase entre el satélite y la superficie terrestre en dos pasos del satélite por la misma zona se genera el Modelo Digital de Elevaciones (DEM) y la coherencia relativa.

Los motivos por los cuales se presentan las diferencias de fase están en función de distancia debido a dos causas: la primera de ellas, tiene que ver con la diferencia ubicación entre las dos trayectorias del satélite, que permite medir el relieve del terreno; por otro lado es debido al movimiento entre las dos observaciones sobre la misma zona, lo cuales pueden ser influenciadas por fenómenos tales como la subsidencia debida a la explotación de minas, canteras, construcción de infraestructura vial. Es así como, la interferometría SAR (InSAR) es una herramienta efectiva para la detección de movimientos y deformaciones de la superficie de la tierra (Sillerico *et al.*, 2010).

Existen varios factores que distorsionan la señal que se devuelve al sensor, tales como el ruido, la atmosfera y los movimientos de la superficie, para el caso cuando son afectadas por los movimientos en la superficie los cálculos son los que se mencionan a continuación.

Se contempla un punto P que ha movido a otro punto P' en un tiempo determinado entre las adquisiciones. Es así como la fase interferométrica es influenciada por varios parámetros, según se presenta en la *ecuación 3*.

$$\phi_{Int} = \phi_S - \phi_M$$

$$\phi_{Int} = \frac{SP-MP}{\frac{\lambda}{4 * \pi}} + \frac{SP'-M}{\frac{\lambda}{4 * \pi}} + \phi_{Atm} + \phi_{Ruido} \quad (3)$$

$$\phi_{Int} = \phi_{Topo} + \phi_{Mov} + \phi_{Atm} + \phi_{Ruido}$$

Ecuación 3. Fase interferométrica.

Donde:

ϕ_S y ϕ_M = Equivale a las fases interferométricas relacionadas con la posición del satélite al momento de tomar las dos imágenes (Esclava y Maestra)

ϕ_{Atm} = Corresponde a la contribución de la atmósfera.

ϕ_{Ruido} = se refiere a la Componente relacionada con el ruido.

ϕ_{Topo} = Hace referencia a la componente asociada a la topografía del terreno.

ϕ_{Mov} = Hace referencia al movimiento o deformación.

SP = Corresponde a la distancia de la posición del satélite esclavo al punto, siendo P' el punto desplazado.

MP = Hace referencia a la distancia de la posición del satélite maestro al punto.

λ = Es la longitud de onda radar.

La técnica D-InSAR se utiliza multitemporalmente, donde se adquieren 2 imágenes en un periodo de tiempo, con el fin de encontrar los desplazamientos de la superficie terrestre de varios meses o años. Existen múltiples metodologías para el procesamiento D-InSAR.

Con esta técnica se elimina el problema planteado en la metodología InSAR, a raíz de que la información se encuentra combinada con la señal topográfica, toda vez que se quita del interferograma obtenido y se genera un interferograma diferencial SAR, esta metodología es muy utilizada para identificar movimientos muy pequeños en la superficie, una vez

descompuesta la fase resultante, se computa la magnitud del movimiento y debido a la longitud de onda reducida en la que se trabaja, se detectan desplazamientos subcentimétricos.

2.8 Filtro Deburst

Las imágenes Sentinel 1 utilizan una técnica de medida, la cual forma una imagen con tres (3) sub-franjas, las cuales a su vez contienen diferentes ráfagas que se solapan entre ellas, este paso unifica las ráfagas teniendo en cuenta el solapamiento existente, por lo tanto, desaparecen la línea divisoria de las ráfagas, teniendo como resultado una sola imagen continua.

2.9 Remoción de la fase topográfica

Al generar el interferograma eliminamos la contribución de la curvatura terrestre, sin embargo, nos hace falta remover la fase, con el fin de encontrar el valor real del desplazamiento. La contribución de la fase topográfica al valor del desplazamiento de la fase está dada por la *ecuación 4*.

$$\frac{\Delta q B_n}{\text{Sen} \phi R_o \lambda} \quad (4)$$

Ecuación 4. Remisión de la fase topográfica.

Donde:

q = Es la altura del punto.

B_n = Distancia perpendicular entre las señales de medida.

Este valor debe ser lo más pequeño posible, ya que, a mayor base perpendicular, más franjas tengo para un mismo salto de altura.

Al aplicar este procedimiento se crea un interferograma diferencial, de donde se obtiene la diferencia de fase relacionada con el desplazamiento, lo más cercano al desplazamiento real.

2.10 Filtrado de la fase

Después de eliminado el ruido aportado por la curvatura terrestre y por la fase topográfica, es necesario eliminar la carga asociada a las condiciones atmosféricas y el ruido. La interferencia por las condiciones atmosféricas normalmente se puede considerar despreciables, sin embargo, en algunas ocasiones las condiciones climatológicas tales como humedad, temperatura y presión son elevadas y puede tener una influencia considerable, impactando la medición de altura y medición de la deformación (Andeas y Luis, 2021).

Por otro lado, este no es el caso para la carga generada por ruido, esta interferencia, aunque no se puede suprimir por completo, si se es posible disminuir sus efectos con el uso de algunos filtros. Las fallas en la fase interferométrica puede ser causada por la distancia temporal, por carencia de precisión geométrica, cambio en los dispersores y a errores de cómputo. Con el propósito de disminuir esta interferencia se utilizan principalmente dos filtros: De *Goldstein* y el proceso *Multilooking* (Alexandro *et al.*, 2007).

2.10.1 Filtro Goldstein

El filtro que se basa en estudiar los píxeles de la imagen, de acuerdo con una ventana definida y aplicarle al *pixel* el valor promedio de acuerdo con los valores de los píxeles

contenidos en una ventana se denomina filtro *Goldstein*, el cual fue creado por Goldstein y Werner en 1998, y se considera un filtro adaptativo no lineal, su aplicación depende del entorno, obteniendo resultados muy buenos en zonas de alta coherencia, (Ferretti *et al.*, 2007).

2.10.2 Filtro Multilooking

Este filtro realiza una disminución del ruido asumiendo como valor del *pixel* el promedio de las celdas de resolución de rango y acimut que se adquieren en un determinado *pixel* para realizar el *Multilooking*. Dicho dato se muestra para las direcciones de alcance y acimut; como causa de la aplicación de este filtro se disminuye la resolución espacial y se mejora la resolución radiométrica. Normalmente y de acuerdo con los valores obtenidos se crea una imagen con la misma resolución de los píxeles en rango y acimut, con menos ruido y espaciado aproximado de píxeles cuadrados después de ser convertido de rango inclinado a rango de tierra. (Andeas y Luis, 2021). El *Multilooking* mejora notablemente el resultado del desenrollado de la fase.

2.11 Desdoblar fase

Dado que de la fase interferométrica solo se conoce el módulo -2π y la variación de altura máxima en el área de interés puede dar lugar a cientos de ciclos, es necesario un procedimiento para desenvolver y estimar la topografía local. Si la contribución de fase de una tierra idealmente plana se ha estimado y compensado adecuadamente (es decir, el interferograma se ha aplanado), el desenvolvimiento de fase permite pasar del patrón de estas franjas a un campo de fase proporcional o topografía local. En un gran número de casos, este

es el principal obstáculo a superar en la cadena de procesamiento para la reconstrucción de InSAR DEM; por lo general no se puede realizar de forma totalmente automática, (Zebker y Lu, 1998).

Con este paso se busca desenvolver la fase, lo cual significa recobrar el número entero de ciclos n que se agregarán a la fase envuelta φ , con el propósito que el valor de fase inequívoco ψ se pueda obtener para cada *píxel* de la imagen. Dicho de otra manera, es el proceso de agregar el múltiplo entero correcto de 2π a las franjas interferométricas, al cual se le denomina desenvolvimiento de fase (Braun y Veci, 2021), de acuerdo con la *ecuación 5*.

$$\Psi = \varphi + 2\pi * n \quad (5)$$

Ecuación 5. Valor de fase inequívoco.

En general, si no se dispone de información inicial sobre φ , es decir, no se da ninguna restricción a la solución como lo es la banda de frecuencia máxima y potencia de señal, el desenvolver la fase se convierte en un problema inverso mal planteado y, por lo tanto, se puede obtener un número infinito de soluciones diferentes.

El procedimiento para desenvolver la fase más directo sería una simple integración de las diferencias de fase, comenzando desde un punto de referencia. Sin embargo, debido a las discontinuidades de fase, este procedimiento no siempre es el mejor y más preciso (Ferretti *et al.*, 2007).

Casi todas las soluciones para desenvolver la fase se asientan en la hipótesis de que el verdadero campo de fase sin envolver es "suave" y cambia "lentamente". Más exactamente, el proceso asume que la información de la fase vecina se encuentra dentro de medio ciclo, o sea π radianes entre sí. Aunque esta hipótesis a menudo es válida para gran parte de los

píxeles de una imagen, la existencia de variaciones de fase absolutas entre píxeles vecinos mayores de π radianes genera inconsistencias, debido a que la fusión origina diferentes resultados dependiendo de la ruta seguida.

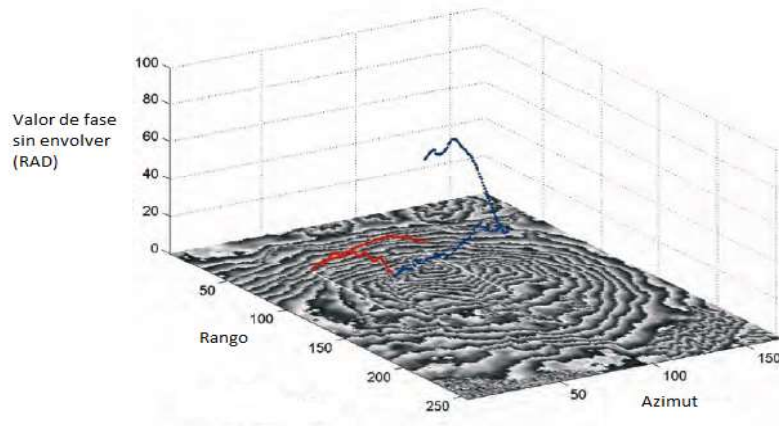


Figura 6. Desenrollar fase.

Esta característica es evidente en la *figura 6*, cuando la suma de las diferencias de fase envuelta alrededor de una ruta cerrada difiere de cero. Para ser consistente, un campo de gradiente debe ser irrotacional, es decir, el rizo de $\nabla \phi$ debería ser cero en todas partes, Cada vez que se verifica esta condición en todo el interferograma, lo cual si se cumple para toda la imagen, tendríamos un problema trivial para desenrollar la fase, desafortunadamente este normalmente nunca es el caso en el procesamiento de datos InSAR.

El componente rotacional del campo de gradiente se puede estimar fácilmente sumando las diferencias de fase envuelta alrededor de los caminos cerrados formados por cada conjunto de cuatro píxeles mutuamente vecinos. Siempre que la suma no sea cero, se señala que ocurre un residuo. Su valor generalmente se normaliza a un ciclo y puede ser

positivo o negativo. La suma de las variaciones de fase envuelta a lo largo de un camino cerrado arbitrario es igual a la suma algebraica de los residuos encerrados en el camino.

Dado que los residuos de fase simplemente marcan los puntos finales de las líneas de discontinuidad, el verdadero problema es su identificación completa. Las discontinuidades se deben esencialmente a dos factores independientes y específicos (Ferretti *et al.*, 2007).

- ruido de fase
- Pendientes de terreno empinado

En la interferometría de paso repetido, generalmente y de acuerdo con la *ecuación 6*, se trata con valores bajos en la calidad del interferograma (~ 0 dB) debido a la de-correlación temporal o geométrica, y la probabilidad en terreno plano de una variación de fase mayor que π , no es en absoluto insignificante por coherencia $\gamma = 0.5$.

$$N_{eff} = 3p(|\Delta\phi| > \pi) \approx 0.01 \quad (6)$$

Ecuación 6. Ruido de fase.

Por otro lado, la geometría de adquisición del sensor da lugar a un muestreo desigual del terreno en el rango del terreno. Los píxeles vecinos en la dirección del alcance pueden corresponder a dos dispersores muy separados en el alcance del terreno con elevaciones muy diferentes. En general, el número de discontinuidades estará en función de la topografía local, el ángulo fuera del nadir, la línea de base normal y el ruido de des-correlación (Ferretti *et al.*, 2007).

Para hacer frente a las discontinuidades de fase, se han seguido diferentes estrategias y se han desarrollado diferentes algoritmos para desenvolver la fase, los cuales buscan minimizar la siguiente *ecuación 7*, función de costo.

$$C = \left\{ \sum_{i,j} w_{i,j}^{(r)} \left| \Delta^{(r)} \Psi_{i,j} - \Delta_w^{(r)} \Phi_{i,j} \right|^p + \sum_{i,j} w_{i,j}^{(a)} \left| \Delta^{(a)} \Psi_{i,j} - \Delta_w^{(a)} \Phi_{i,j} \right|^p \right\} \quad (7)$$

Ecuación 7. Función de costo.

Donde:

$$0 \leq p \leq 2$$

Δ = indica diferenciación discreta a lo largo de las direcciones de rango (r) y acimut (a) respectivamente;

w = son pesos definidos por el usuario; y las sumas incluyen todas las filas apropiadas i y las columnas j.

El sufijo w del operador de diferenciación Δ indica que las diferencias de fase están envueltas en el intervalo entre $(-\pi a + \pi)$. Se debe señalar que esta función objetivo no se ha obtenido de un análisis teórico o una descripción estadística de una señal de fase topográfica en coordenadas SAR. Es solo una traducción razonable en términos matemáticos de la suposición básica: $\Delta\psi = \Delta w\varphi$ en casi todas partes.

2.12 Sistema de referencia

En Colombia, el marco de referencia oficial es el Marco de Referencia Geocéntrico Nacional (MAGNA) mediante la resolución 65 del año 2005 del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC, el cual se encuentra integrado al Marco de Referencia Terrestre Internacional

(ITRF) adoptado por la asociación Internacional de Geodesia IAG en su versión actual 2014, permitiendo de esta manera, representar mediante coordenadas geocéntricas (X,Y,Z) o coordenadas geográficas (latitud, longitud y altura) como se muestra en la *figura 7* (Vanicek, y Steeves, 1996) permitiendo de esta manera representar con precisión la posición de los objetos que se localizan sobre la superficie terrestre.

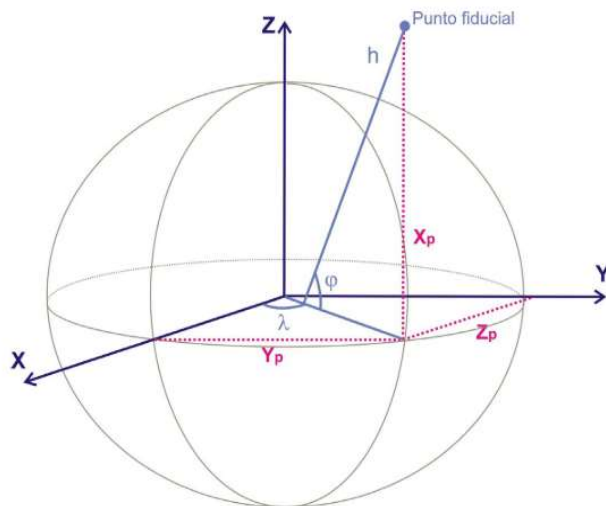


Figura 7. Sistema de referencia MAGNA.

Mediante Estaciones Geodésicas GNSS como se muestra en la *figura 7*, que hacen parte de la Red Geodésica Nacional Activa, se obtiene información satelital sobre la posición precisa de las mismas, las cuales conforman el Marco de Referencia y permiten definir a partir de ellas la posición precisa de la posición de los objetos sobre la corteza terrestre.

Para la representación de la superficie curva de la tierra sobre un plano se utiliza como sistema de referencia la proyección *Gauss Krüger* (IGAC, 2004), que tiene como característica de ser una proyección conforme, es decir, los ángulos en el terreno se conservan en el plano, de acuerdo con lo establecido en la resolución 399 de 2011, por el cual se definen

los orígenes cartográficos para la proyección *Gauss – Krüger*, Colombia (Transversa de Mercator).

2.13 Antecedentes

Para entender el proceso de condición ilegal, se debe comprender que la declaratoria de legalización de un barrio de origen informal, reconoce que los predios tienen acceso a los bienes y servicios que ofrece la ciudad, mediante regulaciones y actuaciones que las oficinas de planeación y ordenamiento territorial proporcionan.

De acuerdo con (Camargo y Hurtado, 2013), el proceso de urbanización ilegal inicia con la adquisición del terreno a bajo precio por parte del urbanizador pirata, el cual lo convierte en un producto inmobiliario limitado a una parcelación con un lote promedio de 72 m², sin acceso a servicios públicos y localizados en áreas de riesgos o de protección ambiental, y la comercialización dada la imposibilidad de demostrar capacidad de pago como lo solicitan los bancos.

El panorama de desarrollo urbanístico en el sur de la ciudad de Bogotá, se basa en construcciones sobre suelos inestables, erosión, construcciones en ladera con alto grado de pendiente, corte de taludes, entre otros, que generan problemáticas relacionadas con fenómenos de remoción de masas, (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2019).

El desarrollo de la tecnología satelital con el uso de imágenes SAR para su aplicación en estudios geodinámicos, se establece como una metodología eficiente para el estudio y comprensión de la geodinámica actual de grandes superficies del terreno (regional o local), de manera que permite caracterizar fenómenos deformativos a partir de la tectónica, la sismicidad, el vulcanismo o actividades de tipo antrópicas relacionados con la explotación

de recursos minerales y excavaciones, lo que permite establecer mediante monitoreo el peligro en infraestructura por sismicidad o deslizamiento de laderas, fenómeno indicado en el documento de estudio aplicado a la ciudad de Mendoza (Argentina y sus alrededores) del Dr. Ing. Pablo Andrés Eullades de la Universidad del Cuyo. En este estudio se analiza la velocidad media de deformación donde se observa subsidencia de 0,5 cm/año, como un caso de compactación del subsuelo por reducción de presión de capas productoras de petróleo.

El uso de InSAR como herramienta para medir la deformación del suelo ha permitido implementar técnicas de monitoreo aplicada a la infraestructura de áreas urbanas relacionadas con la recuperación de tierras, la construcción subterránea y la extracción de aguas subterráneas a través de la técnica de monitoreo mediante Scatterers permanentes (PS) o persistentes basándose en una serie temporal de datos SAR sobre un área (Songbo *et al.*, 2020).

Con series temporales largas de imágenes interferométricas mediante la identificación de Permanent Scatterers (PS) se establecen grupos de píxeles de imagen que aportan información para medición de precisión de alta precisión que aplicados a áreas urbanas aportan información que muestra efectos de hundimiento y abstención (Ferretti *et al.*, 2000). Este tipo de técnica se aplicó en la ciudad de Pomona en California a través de la cual se identifican píxeles coherentes que con ayuda del modelo digital del terreno incrementa la precisión de elevación para cada *pixel* en la detección del movimiento, obteniendo una precisión mayor a 2 cm/año. Con esta técnica aplicada a áreas urbanas y rocosas hay PS que ofrecen buena información y se puede realizar una mejor estimación tanto de la topografía local como de la deformación del terreno (Ferretti *et al.*, 2001).

En consecuencia, los investigadores se han preocupado por encontrar diferentes técnicas para monitorear la deformación del suelo en áreas urbanas para mitigar los peligros relacionados con la deformación, como las inundaciones y daños a las infraestructuras con el propósito de estudiar la deformación del suelo urbano y los peligros relacionados (Songbo *et al.*, 2000).

El monitoreo de la deformación del terreno con las técnicas de interferometría se realiza para establecer el grado de subsidencia que la superficie del terreno tiene como consecuencia de la ocupación terrenos anegados para habilitarlos para la agricultura y la ganadería, así como el efecto de la minería subterránea, extracción de agua y petróleo (Songbo *et al.*, 2000).

Otro aspecto importante en la aplicación de la interferometría se encuentra en la construcción subterránea, como los proyectos de metro que a menudo puede causar deformaciones del suelo. El mapeo de la evolución temporal de dicha deformación del terreno permite comprender y gestionar mejor los riesgos provocados por las actividades de construcción (Songbo *et al.*, 2000). Por ejemplo, a las líneas del metro se les puede determinar el desplazamiento como en el caso del metro de Beijing, fue clara y alcanzó una tasa de hasta 20 mm por año (Ge *et al.*, 2016).

El estudio de deformación del terreno donde se encuentra el metro de Guangzhou, se realizó con imágenes ALOS y ASAR, obteniéndose como resultado mayor a 1 mm/año y en algunos tramos se obtuvo resultados mayores a 8 mm/año. Se obtuvo un asentamiento de 5,2 mm a 23,6 mm (Wang *et al.*, 2017).

Otra aplicación de la interferometría es en la evaluación de daños de los edificios por la construcción de túneles con validación con medidas de nivelación realizadas en terreno

como se trató en un estudio de caso del ferrocarril de Londres, donde se realizó un análisis de series de tiempo de puntos ubicados en diferentes áreas que revela hundimientos que varían de 2 cm a 3,5 cm.; de manera que se tiene una herramienta de evaluación precisa capaz de monitorear el progreso actual de los trabajos de excavación (Milillo *et al.*, 2018).

Para la localización y el análisis de daños en puentes la técnica de interferometría combinada con escaneo láser terrestre (TLS), interferometría de microondas terrestre y radar de apertura sintética de interferometría de dispersión permanente (PS-InSAR), permite determinar el área efectiva de daño potencial del puente de *Beishatan* en Beijín-China, mediante el uso de imágenes *COSMO-SkyMed* de resolución de 3 m × 3 m, al que se le integró un modelo digital de la superficie inferior del puente para obtener el área potencial de daño obtenida con scanner e interferometría de posición en tierra con el propósito de detectar daños por descomposición de la señal. Se determinó que es posible que el puente tenga daños como consecuencia de la construcción del edificio del metro. (Liu, 2019).

Con el desarrollo de la técnica de interferometría con imágenes de radar para cuantificar el desplazamiento de la superficie del terrestre con imágenes Envisat, se han desarrollado varios proyectos orientados a cuantificar el movimiento en un periodo de tiempo determinado, uno de estos realizado en el año 2006 con imágenes Envisat para obtener información para mapear subsidencia en la ciudad de Tianjin (China) tomando imágenes Envisat entre abril de 2003 y agosto de 2004 (Fan *et al.*, 2006).

Así mismo, para el año 2010 se realizó el proyecto con 23 imágenes Envisat, de julio de 2003 y noviembre de 2007, para evaluar el desplazamiento de la superficie por la actividad volcánica producida, (Samsonov *et al.*, 2010).

Con el desarrollo de la tecnología la Agencia Espacial Europea ESA, mejoró las características del sensor radar para obtener imágenes Sentinel 1 con las cuales se han desarrollados proyectos para la determinación de la deformación de la superficie del terreno por la acción de diferentes anomalías naturales ocasionadas por el cambio climático que son considerados en la gestión de riesgos de desastres, como lo indica estudio realizado en 2018 con imágenes Sentinel-1, entre enero de 2015 y febrero de 2016; con el objeto de obtener información útil para detectar desastres específicos en un área a escala regional después de un terremoto, para obtener una identificación precisa de daño en la ciudad de *Tainan*, localizada al suroeste de la ciudad de *Taiwán*, y obteniendo como resultado una distribución de los daños a las edificaciones como fallas de estructuras, información útil que permite elaborar acciones de emergencia, (Liu *et al.*, 2018).

De igual manera, para el año 2018 se realizó un estudio con el objeto de analizar el hundimiento urbano en la ciudad de *Bengaluru* (India), mediante la técnica DInSAR con 23 imágenes Sentinel 1, con fechas comprendidas entre mayo de 2016 y diciembre de 2017, obteniendo como resultado que existen más hundimientos en la parte occidental que en la parte oriental de la ciudad (Ittycheria *et al.*, 2018)

En el año 2020, se realizó estudio con el objeto de realizar un análisis detallado de las construcciones que componen la infraestructura urbana, incluyendo edificios y un tramo de la línea ferroviaria incluida un área de la ronda del río de la ciudad de *Olsztyn*. Se obtuvo un historial de la deformación de la superficie del terreno a partir de 648 imágenes Sentinel-1 adquiridas entre octubre de 2014 y agosto de 2018, basado en el análisis de series de tiempo de interferogramas, mostrando de esta manera que esta tecnología es una herramienta útil para estudiar la medición del hundimiento urbano, (Wieczorek, 2020).

2.14 Insumos

2.14.1 Descripción general Envisat

El 1 de marzo de 2002 fue lanzado el cohete Ariane 5 con el satélite Envisat creado por la Agencia Espacial Europea. Esta plataforma tiene una resolución temporal de 35 días en una órbita heliosincrónica de más de 100 minutos.

El instrumento *Advanced Synthetic Aperture Radar* (ASAR) era un sensor de radar activo a bordo del satélite Envisat, operativo desde marzo de 2002 hasta la inesperada pérdida de contacto en abril de 2012. ASAR construido sobre el *Active Microwave Instrument* (AMI) transportado a bordo del satélite ERS. ASAR fue construido por Matra Marconi Space (MMS) UK, ahora *Airbus Defence and Space*.

Las aplicaciones de este sensor son muchas e incluyen el estudio del océano, como las olas, la extensión y el movimiento del hielo marino, y los estudios de la superficie terrestre, como la deforestación y el movimiento del suelo.

En el modo *Wide Swath* se utiliza la técnica ScanSAR, que proporciona imágenes de una franja más ancha (405 km) con resolución media (150 m) en polarización HH o VV. La franja total consistió en cinco sub-bandas y el ASAR transmite ráfagas de pulsos a cada una de las sub-bandas a su vez, de tal manera que se construyó una imagen continua a lo largo de la trayectoria para cada sub-banda.

En la *tabla 2* se muestran las características más importantes del sensor ASAR de Envisat.

PLATAFORMA	ENVISAT
Sensor	ASAR (<i>Advanced Synthetic Aperture Radar</i>)
Tipo de datos	<i>Single Look Complex (SLC)</i>
Agencia	Agencia Espacial Europea (ESA)
Instrumento	C-Band SAR 5.6 GHz
Angulo de incidencia	20 - 45 °
Polarización	(VV y VH) o (HH y HV)
Altura del sensor	800 km
Órbita	Cuasi polar heliosincrónica
Tiempo de revisita	35 días
Resolución	30 x 30 150 x 150 1000 x 1000
Acho de barrido	100 / Variable
lanzamiento	Marzo 01 de 2002

Tabla 2. Características imágenes Envisat.

2.14.2 Descripción general Sentinel

La misión Sentinel 1 genera imágenes de radar permanentemente durante todo el tiempo, día y noche en la banda C. La constelación Sentinel 1 proporciona alta confiabilidad, menor tiempo de revisita, con gran extensión geográfica y rápida diseminación de información que brindan sustento a aplicaciones operativas en las áreas prioritarias de monitoreo marino, monitoreo terrestre y servicios de emergencia.

Sentinel 1, potencialmente toma imágenes de toda la superficie terrestre, entre los que se encuentran zonas costeras y rutas de navegación en aguas europeas en alta definición, abarcando los océanos globales a intervalos regulares. Tener un modo operativo primario sobre tierra y otro sobre mar abierto permite una operación preprogramada libre de conflictos. El modo operativo principal presenta una amplia franja (250 km) con alta

resolución geométrica (normalmente 20 m de resolución de producto de Nivel 1) y radiométrica, adecuada para la mayoría de las aplicaciones.

El instrumento Sentinel 1 *Synthetic Aperture Radar* (SAR) puede obtener información de la siguiente manera:

- *Stripmap (SM)*: un método estándar de imágenes de *Stripmap* SAR corresponde a la franja terrestre iluminada con una secuencia de pulsos continuos, entretanto que el haz de la antena se dirige a un ángulo de elevación y acimut fijos.
- *Franja ancha interferométrica (IW)*: la información se obtiene en tres franjas utilizando la técnica de imágenes de observación del terreno con escaneo progresivo SAR (*Topsar*). En el modo IW, se regularizan las ráfagas de una toma a otra con el fin de asegurar la alineación de los pares interferométricos. IW es el modo operativo principal de Sentinel 1 en tierra.
- *Franja extra ancha (EW)*: la información se obtiene en cinco franjas utilizando la técnica de imagen *Topsar*. El modo EW proporciona una cobertura de franja muy grande a expensas de la resolución espacial.
- *Wave (WV)*: la información se obtiene en pequeñas fracciones de mapas de bandas llamadas "viñetas", situadas a distancias de 100 km regularmente a lo largo de la pista. Las viñetas se obtienen adquiriendo una viñeta en un ángulo de incidencia de rango cercano entretanto que la siguiente viñeta se obtiene en un ángulo de incidencia más lejano. WV es la técnica operativa de Sentinel 1 sobre mar abierto.

Las Características más importantes de la plataforma Sentinel 1 se muestran en la *tabla 3*.

PLATAFORMA	SENTINEL 1
Sensor	Sentinel 1
Tipo de datos	<i>Single Look Complex (SLC)</i>
Agencia	Agencia Espacial Europea (ESA)
Instrumento	C-Band SAR 5.4 GHz
Angulo de incidencia	15 - 45 °
Polarización	(VV y VH) o (HH y HV)
Altura del sensor	693 km
Orbita	heliosincrónica
Tiempo de revisita	12 días
Resolución	5 x 20 max
Acho de barrido	250 km
lanzamiento	abril 03 de 2014

Tabla 3. Características imágenes Sentinel 1.

2.14.3 Polígonos de análisis

Polígonos de monitoreo.

Son polígonos que el IDIGER (Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio climático) los ha denominado de esta manera, toda vez que no son urbanos y se encuentra en proceso de invasión desde ya hace varios años. Actualmente se evidencia un crecimiento considerable en su construcción y desarrollo. Estos 9 polígonos se encuentran localizados en el sur de Bogotá, localidad de Ciudad Bolívar y UPZ 67 Lucero.

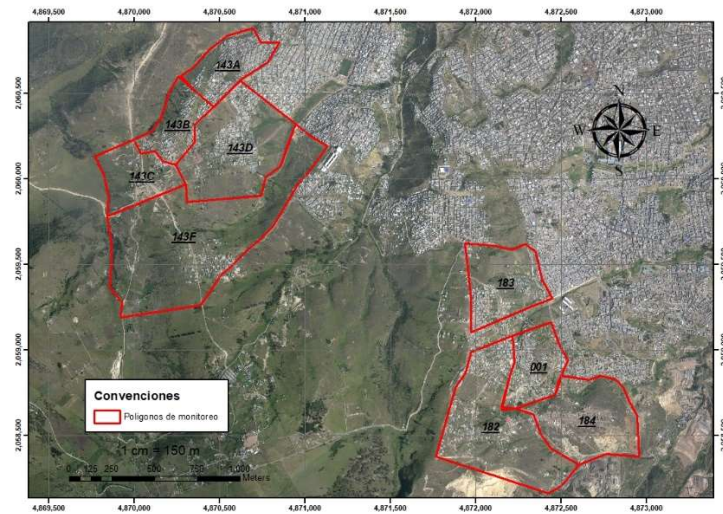


Figura 8. Ortofoto oficial para Bogotá 2017 – Polígonos de Monitoreo IDIGER.

Polígonos barrios legalizados.

Dentro de este grupo se encuentran 3 barrios legalizados por la Secretaria Distrital de Planeación: Brisas del Volador, Los Alpes y el Recuerdo Sur, los cuales son adyacentes a los polígonos de monitoreo establecidos por el IDIGER, localidad de Ciudad Bolívar y UPZ 67 Lucero.

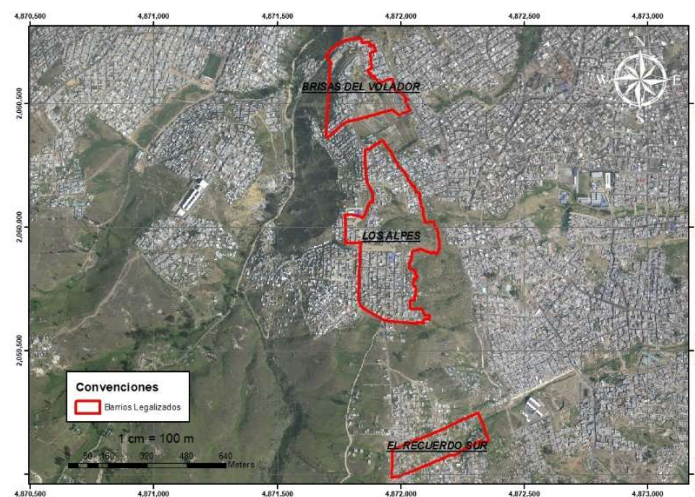


Figura 9. Ortofoto oficial para Bogotá 2017 – Barrio legalizados SDP.

Polígono en Alto Riesgo no Mitigable.

Este conjunto lo conforma un polígono donde se encontraba parte del barrio Mirador de la Estancia, el cual fue declarado como zona de Alto Riesgo no Mitigable por el IDIGER en el año 2002. Debido a la existencia de zonas donde la subsidencia era bastante elevada, al igual que derrumbes de gran magnitud.



Figura 10. Ortofoto oficial para Bogotá 2017 – Zona de Alto Riesgo no Mitigable IDIGER.

Urbanización Arboleda Santa Teresita.

Este grupo corresponde a la Urbanización Arboleda Santa Teresita, desarrollado por la Caja de Vivienda Popular desde el año 2015, ubicado en la localidad de San Cristóbal, UPZ 51 Los Libertadores.



Figura 11. Ortofoto oficial para Bogotá 2017 – Urbanización Arboleda Santa Teresita - Caja de Vivienda Popular.

2.14.4 Estaciones GNSS – IGAC activas

Selección de las Estaciones Activas pertenecientes al Marco de Referencia Geodésico Nacional MAGNA – SIRGAS cercanas a la zona de estudio. Se seleccionaron las Estaciones Activas: BOGA ubicada en las instalaciones del Servicio Geológico Colombiano (SGC) en Bogotá y la Estación ABPD ubicada en las instalaciones de la Empresa de Acueducto y Alcantarilla do Bogotá (EAAB) en la planta de tratamiento de agua El Dorado en la localidad de Usme. A la fecha presentan datos desde el año 2010.

Para esto se obtienen las coordenadas geocéntricas históricas de las Estaciones Activas seleccionadas en la página web de SIRGAS «<http://www.sirgas.org/es/sirgas-con-network/coordinates/weekly-positions/>» desde su publicación inicial en 2020.

Obteniendo los siguientes resultados:

DIFERENCIAS DE ALTURAS ESTACIONES ACTIVAS GNSS		
FECHA	BOGT	ABPD
21/12/2002 - 1/03/2003	-0,010	
1/03/2003 - 27/09/2003	-0,034	
11/09/2004 - 25/12/2004	-0,014	
25/12/2004 - 5/11/2005	-0,039	
1/02/2006 - 7/06/2008	-0,137	
25/06/2008 - 29/11/2008	-0,007	
10/09/2016 - 7/02/2017		0,009
7/02/2017 - 8/04/2017		0,004
8/04/2017 - 5/09/2018		-0,003
5/09/2018 - 29/11/2018		0,012
28/01/2019 - 13/09/2019		-0,010
13/09/2019 - 11/01/2020		0,009
11/01/2020 - 27/06/2020		-0,010

Tabla 4. Diferencias de alturas de las Estaciones GNSS Activas MAGNA – SIRGAS.

3. Metodología

3.1 Área de estudio



Figura 12. Área de estudio. Fuente: Elaboración propia.

El presente proyecto se desarrolló en el sur de Bogotá, específicamente en las localidades de Ciudad Bolívar, Tunjuelito, Rafael Uribe Uribe y San Cristóbal, las cuales han sufrido una transformación importante por el acelerado crecimiento de la construcción no licenciada sobre suelos que presentan problemas de remoción en masa o se localizan en áreas inestables geológicamente o en polígonos de protección ambiental, en predios de reserva para infraestructura vial o en servidumbres de redes de alta tensión o conducción de gas, hidrocarburos o agua (Torres, 2013).

La ciudad de Bogotá cuenta con un área de 4.219 km² y un número de habitantes de 8 millones 140 mil. El sector socio-económico para este proyecto se encuentra definido por los estratos 1 y 2 en donde predomina el uso residencial con infraestructura precaria, limitantes de accesibilidad, reducidos equipamientos y espacio público; presentan poca dotación de bienes públicos urbanos y una alta densidad poblacional, según la Secretaría Distrital de Hábitat, mediante la Subsecretaría de Inspección, Vigilancia y Control de Vivienda, para el año 2015, la ciudad presentaba ocupaciones informales de aproximadamente 19 mil polígonos, donde cerca del 45% se localizan en Ciudad Bolívar, lo que ha dado como resultado urbanizaciones ilegales con desequilibrios ambientales, difícil acceso a servicios públicos, permanentes amenazas físicas y conflictos jurídicos entre colindantes por el uso y goce de los lotes; elevando los costos de infraestructura por el difícil relieve de la zona (García, 2020).

Esta zona se caracteriza por encontrarse alturas entre 2700 m a 3200 m sobre el nivel medio de mar, provisto de cerros con alto escarpe y fuertes pendientes, definido por estructuras geológicas compuestas por rocas sedimentarias de la era cretácica y terciaria (Molina, 2007). La estratigrafía aflora las siguientes unidades con edades que van desde el Cretáceo hasta el Reciente, discriminadas así: Formación Chipaque (Kvc), Grupo Guadalupe, Formación Arenisca Dura (Kgd), Formación *Plaeners* (Kgp). (Molina, 2007).

3.2 Flujo de trabajo

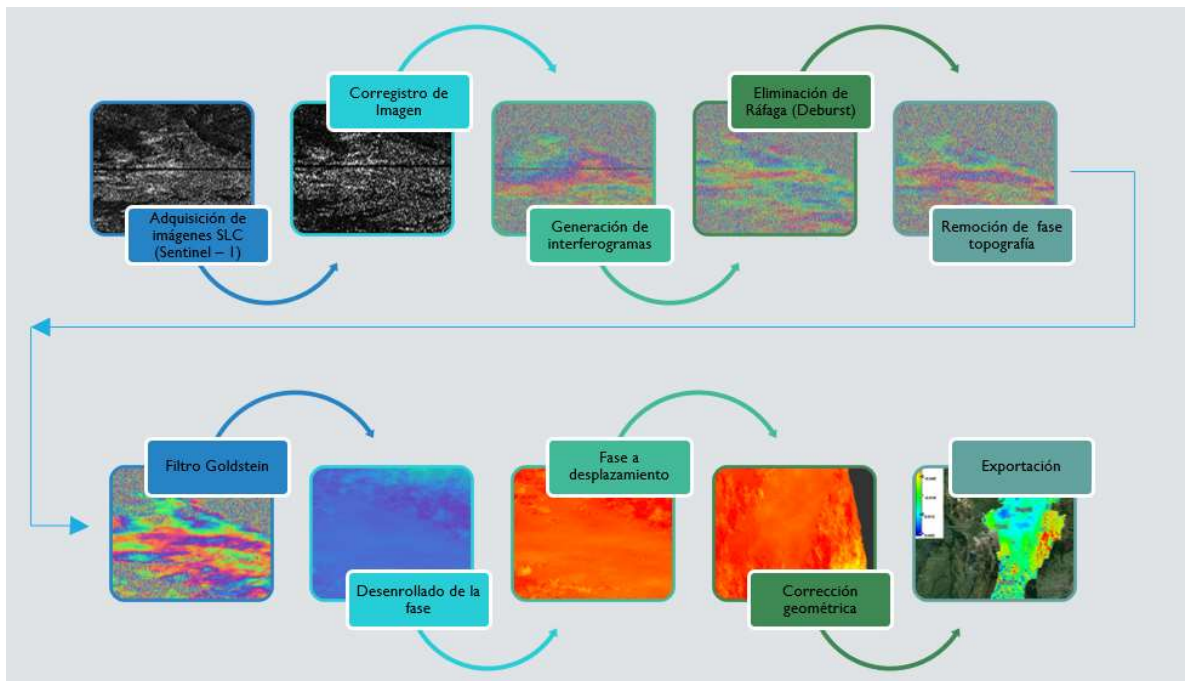


Figura 13. Flujo de trabajo Sentinel.

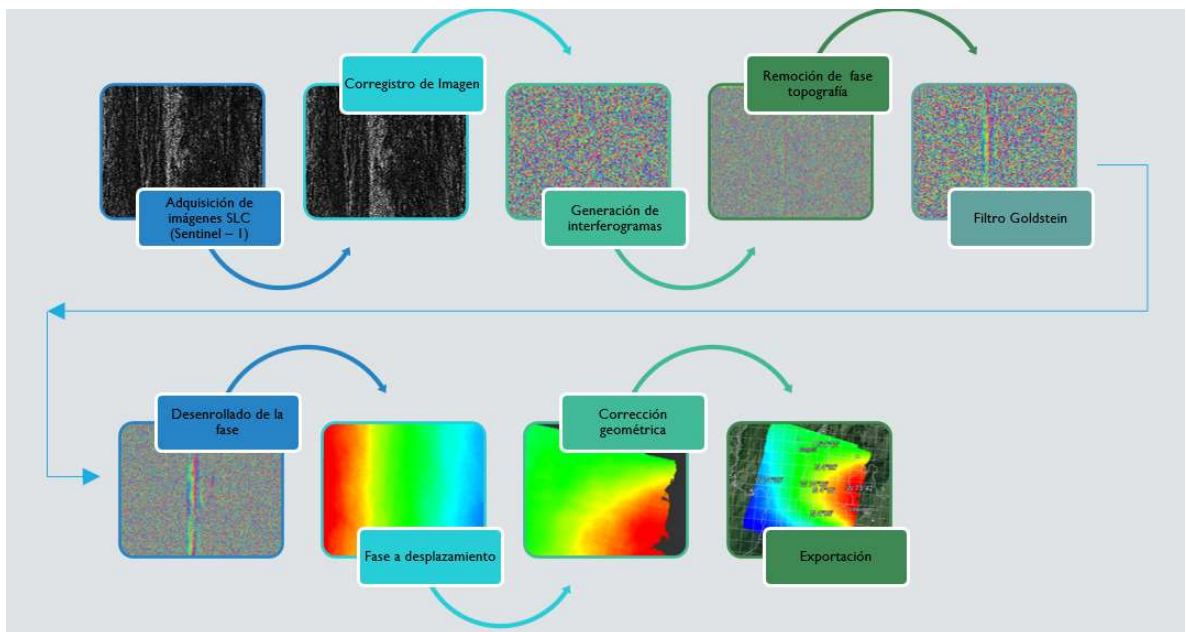


Figura 14. Flujo de trabajo Envisat.

3.3 Modelo de coherencia

Para dar inicio al procesamiento de imágenes de radar, se verificó si el par interferométrico seleccionado cumple con un parámetro de coherencia estimada superior al 0.75, valor bastante polémico entre los diferentes autores; sin embargo, para nuestro caso tomaremos como valor mínimo de coherencia 0.60, el cual hace referencia al comportamiento de un objeto entre las dos visitas del sensor, teniendo en cuenta que si el par interferométrico se tomara al mismo tiempo este valor tendría que ser 1 o muy próximo a 1. para lo cual se crea un cuadro de coherencia con los valores predeterminados de vista múltiple, donde la imagen de coherencia tiene un tamaño de 8 bits, y el valor de *pixel* 0 (con ruido) representa un valor de coherencia de 0 y un valor de *pixel* de 255 representa un valor de coherencia de 1 (sin ruido), (ESA, 2017).

Teniendo en cuenta esto, existen algunos factores que pueden modificar el valor entre las dos tomas de imágenes como el grado de humedad, el ángulo de toma de la imagen, cuerpos de agua, alta densidad de vegetación por los cambios que suceden permanentemente; pendiente del terreno y ubicación de los elementos dispersores de señal (arboles) sobre superficie inclinada, entre otros.

Inicialmente se lograron obtener un total de 49 imágenes de radar de diferentes plataformas ERS 1 y 2, Envisat, ALOS PALSAR y Sentinel, en diferentes periodos de tiempo comprendidos desde el año 1992 al año 2020, las cuales se muestran en la *tabla 5*.

IMÁGENES DE REFERENCIA			
ERS 1	ENVISAT	ALOS PALSAR	SENTINEL
17/06/1992	21/12/2002	20/12/2006	19/05/2015
17/02/1993	1/03/2003	22/06/2007	27/11/2015
11/08/1993	10/05/2003	7/08/2007	19/04/2016
18/10/1997	19/07/2003	23/12/2007	10/09/2016
20/06/1998	27/09/2003	25/03/2008	7/02/2017
25/07/1998	11/09/2004	10/05/2008	8/04/2017
5/02/2000	20/11/2004	25/06/2008	6/09/2018
11/03/2000	25/12/2004	10/08/2008	29/11/2018
1/12/2001	5/11/2005	27/06/2009	28/01/2019
	18/02/2006	12/08/2009	13/09/2019
	7/06/2008	15/05/2010	11/01/2020
	12/07/2008	15/08/2010	27/06/2020
	16/08/2008	15/02/2011	
	20/09/2008		
	25/10/2008		
	29/11/2008		
	3/01/2009		
	14/03/2009		

Tabla 5. Fechas imágenes de Radar. Fuente: Elaboración propia.

Con esta información se procedió a identificar los pares interferométricos que cumplieran con el porcentaje de coherencia superior a 0.6, en aras de comenzar la creación de interferogramas, quedando así 14 imágenes de los sensores Envisat y Sentinel, descartando las imágenes de ERS-1 y ALOS PALSAR por su baja coherencia. En la *tabla 6*, se muestran los pares interferométricos con una coherencia aceptable.

IMÁGENES SELECCIONADAS POR COHERENCIA		
FECHA	ENVISAT	SENTINEL
21/12/2002 - 1/03/2003	X	
1/03/2003 - 27/09/2003	X	
11/09/2004 - 25/12/2004	X	
25/12/2004 - 5/11/2005	X	
1/02/2006 - 7/06/2008	X	
25/06/2008 - 29/11/2008	X	
10/09/2016 - 7/02/2017		X
7/02/2017 - 8/04/2017		X
8/04/2017 - 5/09/2018		X
5/09/2018 - 29/11/2018		X
28/01/2019 - 13/09/2019		X
13/09/2019 - 11/01/2020		X
11/01/2020 - 27/06/2020		X

Tabla 6. Pares interferométricas seleccionadas.

3.4 Corregistro

El objetivo de corregistro es alinear con precisión la geometría del rango inclinado. para los cual es necesario definir cuál de las imágenes funcionará como maestra y cuál funcionara como esclava, por defecto el *software* selecciona la imagen más antigua como maestra y la otra como esclava, de igual manera también se debe seleccionar el tipo de polarización que será utilizada para la generación del interferograma, las imágenes con polarización VH se utilizan frecuentemente para la detección del dosel de bosques, comúnmente llamado cálculo de biomasa, sin embargo no es recomendable para análisis de subsidencia o deformaciones del terreno, para esto es necesario utilizar la polarización VV.

Just y Bamler (1994) sugieren que para la precisión requerida de un corregistro de imagen el procesamiento interferométrico requiere una alineación con una precisión de 0,1 píxeles tanto en X como en Y, es decir, en un área de 0,01 píxeles, este proceso se puede

resumir en dos pasos importantes, un proceso de correregistro grueso y uno fino. En el proceso de correregistro fino se calcula con una precisión de subpíxeles aprovechando la información compleja de la imagen, el correregistro fino se realiza mediante la evaluación de las medidas de correlación cruzada, basadas en los datos complejos de entrada.

Durante el desarrollo de este proceso es fundamental incorporar el modelo digital del terreno, SNAP permite seleccionar el modelo digital de elevación (MDE) que se ajuste a la necesidad del usuario. Esta selección se realiza con los modelos incluidos en el software, los cuales se descargan automáticamente al momento de realizar el proceso o se seleccionan como archivo ubicado en el equipo de procesamiento. Para el proyecto, se eligió la segunda opción adjuntando el MDE para la ciudad de Bogotá generado por el IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi) con resolución de 5 metros, el cual contiene el Datum vertical asumido, las unidades utilizadas, así como información de:

- *Tamaño de píxel X*: muestra el área geográfica, en unidades de mapa, representada por cada *píxel* en la dirección X (horizontal), es decir, 5 metros.
- *Tamaño de píxel Y*: muestra el área geográfica, en unidades de mapa, representada por cada *píxel* en la dirección Y (vertical), es decir, 5 metros.
- *Unidades*: nombre de las unidades utilizadas para medir los píxeles, es decir, 5m x 5m.

Nota Sentinel: las imágenes provenientes del sensor de Sentinel tiene una opción adicional donde permite seleccionar la *swaths* y *burst* de la imagen, recordemos que este tipo de imágenes cuenta con 3 franjas o *swaths*, las cuales corresponden a las zonas que cubre el satélite en cada paso, en cada una de estas franjas se encuentran 9 diferentes barridos llamados *burst*, los cuales deben ser iguales en las dos imágenes seleccionadas

(paso semejante a recorte de la imagen). Este paso es importante, toda vez que mejora considerablemente los tiempos de procesamiento.

3.5 Recorte de la zona de estudio

Para los sensores diferentes de Sentinel se hace necesario realizar un recorte de la zona de estudio, toda vez que no tienen la opción de seleccionar *swaths* y *burst*, este recorte se puede realizar de varias formas, a saber a) visual, b) la ubicación fila columna de los píxeles extremos de la zona de estudio, c) Coordenadas Geográficas, el recorte es muy importante cuando las imágenes a procesar son demasiado grandes y el polígono de estudio es muy reducido, con el propósito de reducir los tiempos de procesamiento de las imágenes.

3.6 Creación del interferograma

El siguiente paso consiste en formar el interferograma entre las dos imágenes, proceso que permitirá determinar si existe o no deformación de la superficie del terreno entre las dos fechas de las imágenes, SNAP genera una imagen donde la unidad de medida son los radianes.

Es conveniente seleccionar la opción “*subtract flat-earth phase*” lo que permite eliminar la contribución de la fase por cuenta de la curvatura de la tierra, por otro lado, si lo que se desea es generar un modelo de elevación de la tierra esta opción debe quedar desmarcada, con el fin de que el software calcule la diferencia entre el satélite y la imagen adquirida. Como resultado de este proceso se generan 2 imágenes importantes para dar continuidad al procesamiento, son: la de coherencia y la de *phase*.

3.7 Eliminación de ráfagas (*Deburst*)

Este proceso solo se realiza para las imágenes Sentinel, que como se mencionó anteriormente, vienen estructuradas en franjas y barridos, este paso eliminará las franjas negras que resultan de la unión de cada uno de los *burst* en cada uno de los 3 *swaths*, de manera que se genera una imagen completa toda vez que son tomadas en diferentes tiempos, las cuales se pueden evidenciar luego de realizar la correlación, con este subproceso se busca eliminar estas franjas y generar una imagen continua y completa; se aclara que este paso solo se debe realizar para las imágenes provenientes del sensor Sentinel 1, ya que otros sensores como ALOS PALSAR o Envisat no cuentan con esta configuración.

3.8 Remoción de la fase topográfica

Luego de ensamblar los diferentes haces, se continúa con la eliminación del aporte topográfico de la fase, para eliminar cualquier contribución a la altitud del terreno producto de la diferencia en la llegada de las señales en “*slant*” al sensor o de la deformación propia del terreno, estos se logra mediante la iteración entre comparación de las dos imágenes utilizadas y un modelo digital de elevación del terreno “MDE”, y así poder eliminar la elevación del área y calcular los desfases de manera independiente.

3.9 Filtro *Goldstein*

Una vez culminado la eliminación de la *phase* topográfica se procede a eliminar o minimizar el ruido propio de las imágenes, efecto (sal y pimienta), mediante el filtro Goldstein lo cual permite facilitar la visualización de la imagen y el desenrollado de la fase para la determinación de los cambios en el terreno, este paso corresponde a una convolución

espacial o un filtro adaptativo no lineal que analiza los píxeles de la imagen según una ventana de 3x3 la cual actúa como un comunicador aumentando la señal/ruido entre todos los píxeles de la imagen.

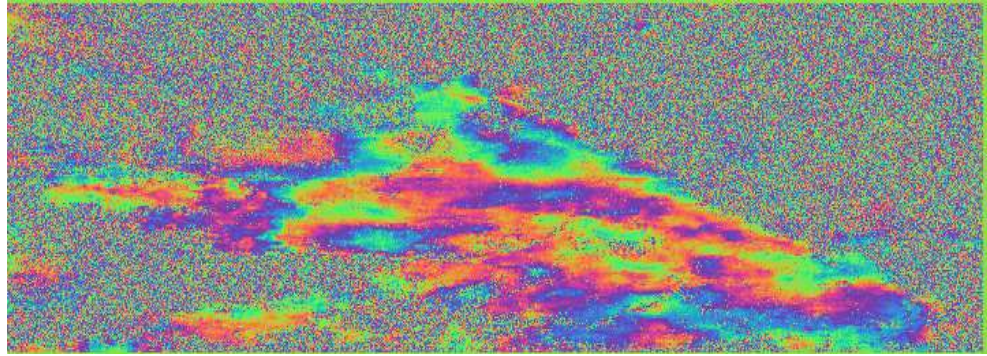


Figura 15. Filtro Goldstein 10/09/2016 – 07/02/2017.

En la *figura 15* se observa con claridad los colores del interferograma donde el efecto sal y pimienta se elimina de la zona urbana de Bogotá, permitiendo de esta manera apreciar un mayor contraste y mejorar interpretación de la misma.

3.10 Desenvolvimiento de la fase

Una vez se haya aplicado el filtro *Goldstein*, se procede a desenrollar la fase; actualmente Snap no permite realizar este proceso y por lo tanto hay que realizarlo en el *software Snaphu*, el cual se ejecuta bajo plataforma Linux o bajo máquinas virtuales diseñadas para tal fin, las cuales funcionan sobre plataforma Windows o Mac Os. Para el proyecto se eligió la segunda opción, máquinas virtuales, ya que no se cuenta con el sistema operativo Linux.

Para iniciar con este proceso es necesario exportar la imagen a *Snaphu*. El archivo resultante debe ser almacenado en una carpeta independiente con el fin de no mezclarla con

las demás imágenes resultantes de los diferentes subprocesos generados por Snap, de esta manera facilitará su posterior importación.

Seguido de esto se realiza el proceso de desenrollado en el *software Snaphu*, desde una máquina virtual de Linux para Windows, este software desenvuelve la fase como un algoritmo de estimación de probabilidad máxima de acuerdo con los observables de entrada y a partir de tres modelos estadísticos incorporados: datos genéricos uniformes, datos de deformación y datos de topografía. Una vez desenrollados se importan nuevamente los resultados a Snap para continuar con el procesamiento.

3.11 Fase a desplazamiento

Esta fase transforma cada uno de los valores filtrados y procesados en valores absolutos de elevación, permitiendo que sea fácil su caracterización y visualización. Este valor varía de acuerdo con las características topográficas de la zona.

3.12 Geocodificación o Corrección Geométrica

El objetivo de este proceso es asignar un sistema de referencia a la imagen resultante con el fin de que sea más fácil su interpretación, este paso busca unificar el tamaño del *pixel* y ajustar la *slant* en información ortogonal, para lo cual se debe tener en cuenta el modelo de elevación y el sistema de coordenadas destino, para lo cual, en este caso se utilizará sistema de proyección WGS84, de igual manera se debe seleccionar el Modelo Digital de Elevación, suministrado por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi “IGAC”.

3.13 Exportación de datos

Por último y con el objetivo de tener una mejor visualización del resultado para su posterior análisis, se exporta la imagen final a formato KMZ con el fin de poderla visualizar e interpretar en el *software Google Earth*; este software tiene la característica de poder superponer a los mapas de desplazamiento resultantes en una imagen óptica de la fecha como lo muestra la *figura 16*, y así realizar un análisis visual entre estas dos imágenes.

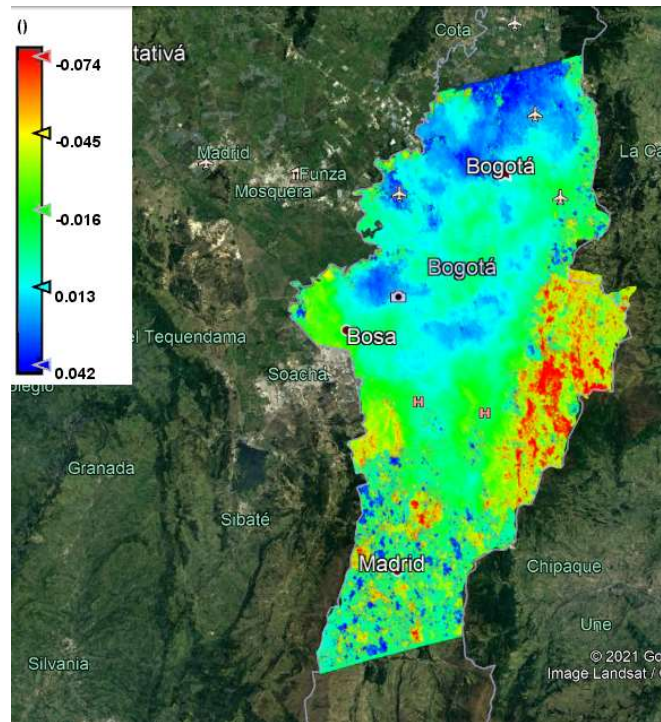


Figura 16. Interferograma recortado y exportado a Google Earth 10/09/2016 – 07/02/2017.

4. Resultados

4.1 Mapas de Desplazamiento Envisat

En concordancia con la metodología planteada, en las *figuras 17 y 18*, se presentan los Mapas de desplazamiento obtenidos de las imágenes de Envisat, las cuales se encuentran representadas con una rampa de colores, en la que se observan variaciones en el nivel de subsidencia de la ciudad.

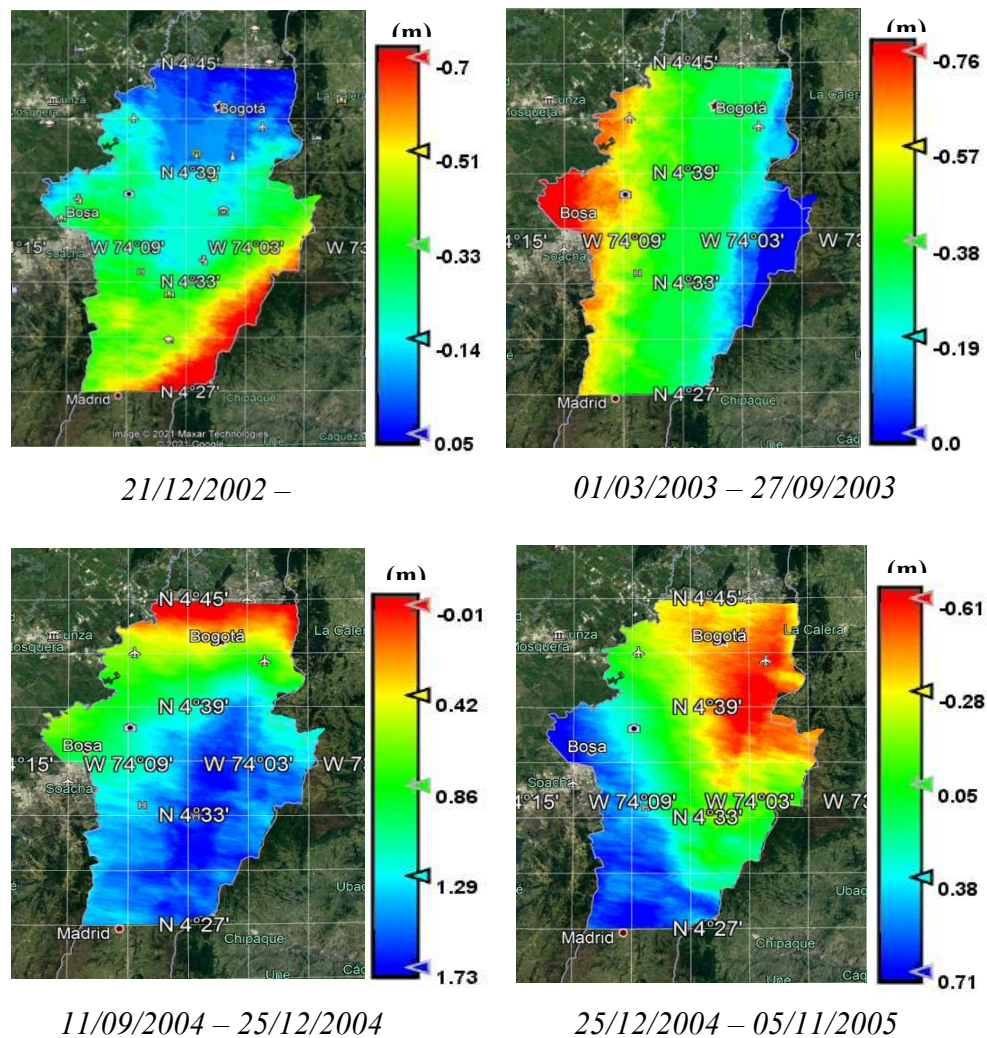


Figura 17. Mapas de desplazamiento obtenidos con Envisat.

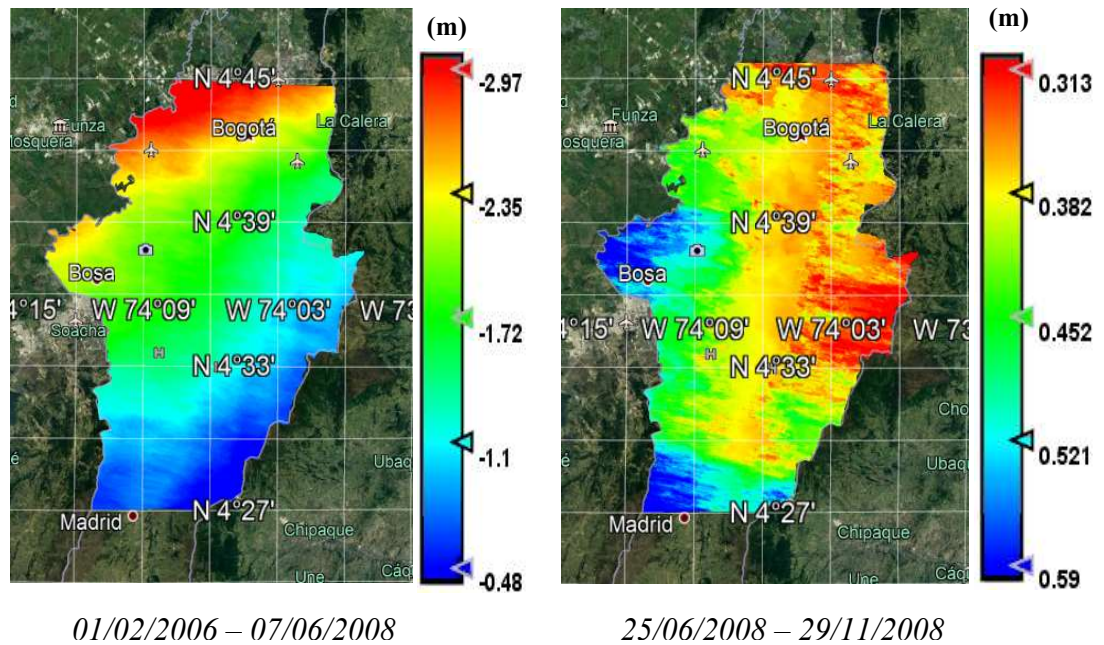


Figura 18. Mapas de desplazamiento obtenidos con Envisat.

De acuerdo con los mapas de desplazamiento generados con las imágenes de Envisat (figura 18), los cuales muestran desplazamientos o subsidencias muy elevadas, que si bien no son reales sí guardan una similitud o tendencia con los resultados obtenidos de las estaciones permanentes del instituto Geográfico Agustín Codazzi, tal como se muestra en la (figura 19).

Existen varias razones por las que este fenómeno puede suceder, una de ellas puede deberse a que la resolución espacial de estas imágenes es bastante grande 30 x 30 m por lo cual el producto generado mediante la metodología DInSAR en áreas urbanas en el marco de la retrodispersión de la señal de radar no se evidencian muchas oscilaciones o fluctuaciones

positivas, originado básicamente por la disposición de la infraestructura urbana (Dávila y Madrigal, 2015).

De otro lado, es conveniente recordar que el periodo de revisita de este sensor es de 35 días, y las imágenes seleccionadas para este trabajo cuenta con un periodo más largo que este, haciendo que los datos no sean los más precisos. En este sentido, es conveniente tener en cuenta que en el análisis de coherencia se obtuvo un valor bajo muy cercano a 0.6% en comparación con los obtenidos para las imágenes Sentinel 1.

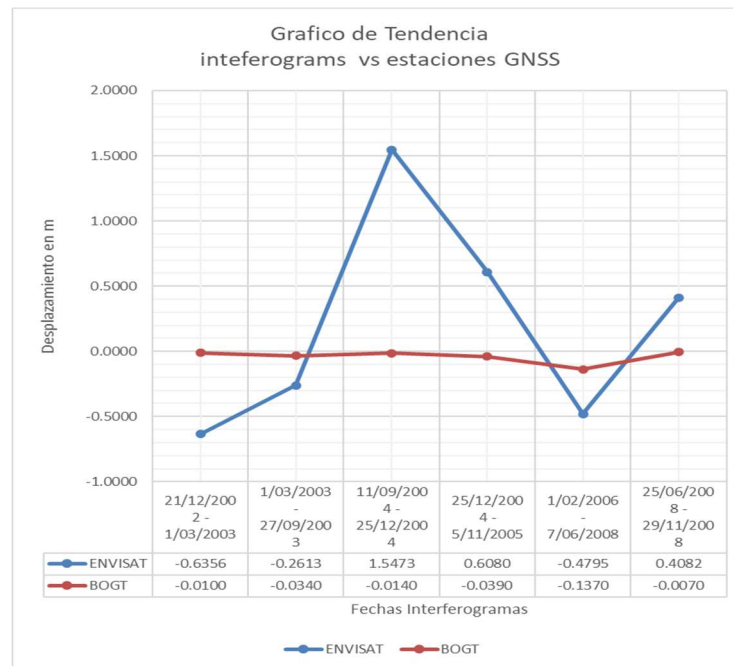


Gráfico 1. Tendencia estimada mapas de desplazamiento Envisat – Estación GNSS BOGT.

La variabilidad en altura obtenida con las imágenes Envisat comparadas con la información de variabilidad en altura con la Estación Geodésica GNSS “BOGT”, se observa que se mantiene tendencia para valores entre 1.5m y -0.65m, entre el periodo de tiempo del 21/12/2002 y el 29/11/2008, que de acuerdo con su resolución media de 150 m, es útil para

establecer una línea base de referencia para observar cambios en la extensión de la superficie en el control de desastres relacionados con las inundaciones, terremotos, deshielos, entre otros, por parte de entidades dedicadas a la Gestión de Riesgo como el IDIGER, el IDEAM y el SGC.

4.2 Mapas de Desplazamiento Sentinel

En la *figura 19*, se presentan los interferogramas obtenidos de las imágenes Sentinel.

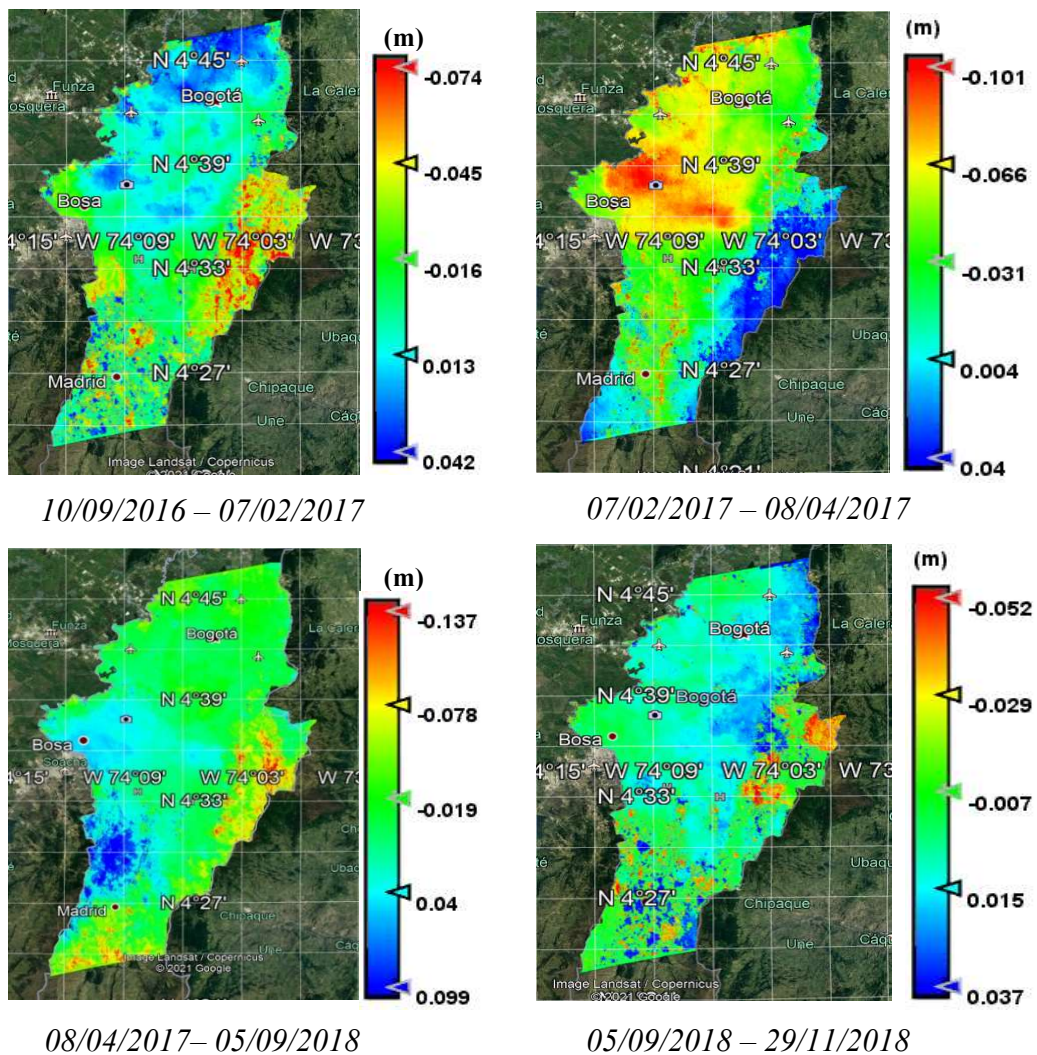


Figura 19. Mapas de desplazamiento Sentinel 1.

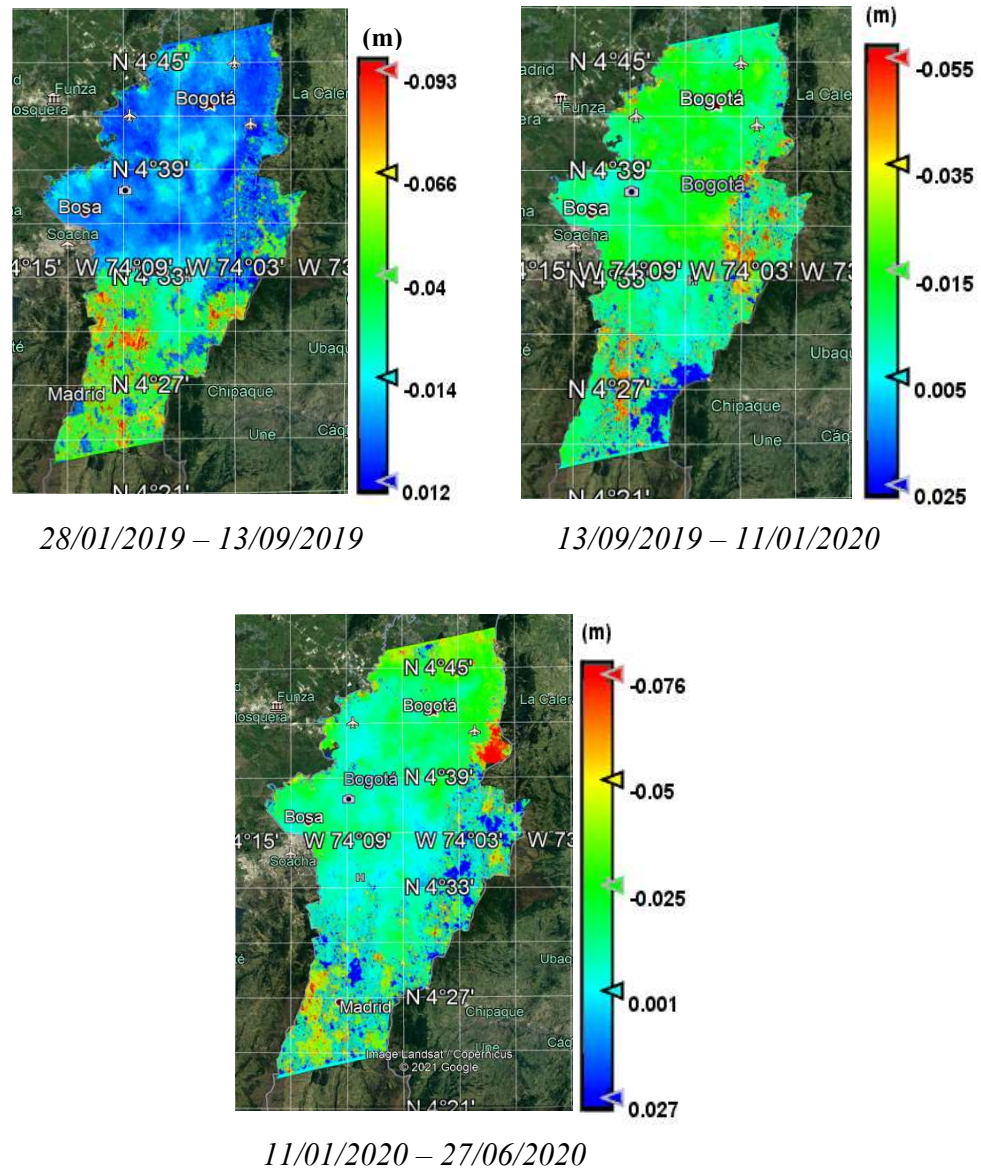


Figura 20. Mapas de desplazamiento Sentinel 1.

En los mapas de desplazamiento obtenidos con Sentinel para el periodo comprendido entre el 2016 – 2020, se muestra más detalle en comparación con los mapas de desplazamiento obtenidos con imágenes Envisat debido a que la resolución espacial de este

sensor es mayor (13.5m * 13.5m), lo que proporciona mapas con mejores rasgos en la representación gráfica facilitando de esta manera la interpretación, ya que la información obtenida de estos es mucho más precisa y cercana a la realidad, de igual manera también guardan similitud con la tendencia establecida por la estación GNSS permanente del IGAC ABPD de acuerdo con el *grafico 2*.

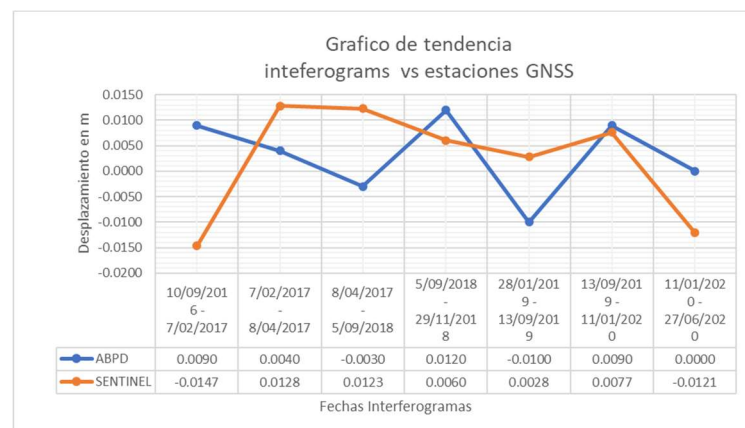


Gráfico 2. Tendencia estimada mapas de desplazamiento Sentinel 1– Estación GNSS ABPD.

En el *gráfico 2* de tendencias, se establece que la información de variabilidad en altura de las imágenes Sentinel procesadas, guarda tendencia con la variabilidad de la altura reportada por SIRGAS (Sistema de Referencia idéntico al Sistema Internacional de Referencia ITRS) con valores aproximados que oscilan entre +/- 0,015m para el periodo comprendido entre 10/09/2016 y 27/06/2020, con lo que visualmente se logra tener más detalle de la información obtenida, toda vez que para estos resultados no se ven zonas de grandes extensiones, sino que por el contrario, esta se ve con bastantes parches que muestran las diferencia en zonas más pequeñas.

4.3 Validación e interpretación de los mapas de desplazamiento

4.3.1 Validación con estaciones GNSS

Para la validación de la información obtenida de los mapas de desplazamiento, se seleccionó información de las estaciones GNSS del IGAC para las fechas de los pares de imágenes seleccionadas para la generación de cada uno de los mapas de desplazamiento. Obteniendo las diferencias de altura a partir de las coordenadas geocéntricas publicadas por el IGAC.

Posteriormente, se procedió a listar en la *tabla 7* las diferencias de altura de las estaciones Geodésicas GNSS para las fechas seleccionadas, y a listar en la *tabla 8* la diferencia resultante de los mapas de desplazamiento finales teniendo en cuenta el *pixel* donde se encuentran las estaciones Geodésicas GNSS activas, con el fin de realizar un diagrama de tendencia y evaluar la variabilidad en altura de la información obtenida en los mapas de desplazamiento.

DIFERENCIAS DE ALTURAS ESTACIONES ACTIVAS		
FECHA	BOGT	ABPD
21/12/2002 - 1/03/2003	-0,010	
1/03/2003 - 27/09/2003	-0,034	
11/09/2004 - 25/12/2004	-0,014	
25/12/2004 - 5/11/2005	-0,039	
1/02/2006 - 7/06/2008	-0,137	
25/06/2008 - 29/11/2008	-0,007	
10/09/2016 - 7/02/2017		0,009
7/02/2017 - 8/04/2017		0,004
8/04/2017 - 5/09/2018		-0,003
5/09/2018 - 29/11/2018		0,012
28/01/2019 - 13/09/2019		-0,010
13/09/2019 - 11/01/2020		0,009
11/01/2020 - 27/06/2020		-0,010

Tabla 7. Diferencias de alturas de las Estaciones GNSS Activas MAGNA – SIRGAS.

DIFERENCIAS DE ALTURAS MAPAS DE DESPLAZAMIENTO		
FECHA	ENVISAT	SENTINEL
21/12/2002 - 1/03/2003	-0,63555	
1/03/2003 - 27/09/2003	-0,261328	
11/09/2004 - 25/12/2004	1,547298	
25/12/2004 - 5/11/2005	0,608049	
1/02/2006 - 7/06/2008	-0,479471	
25/06/2008 - 29/11/2008	0,408201	
10/09/2016 - 7/02/2017		-0,014684
7/02/2017 - 8/04/2017		0,012846
8/04/2017 - 5/09/2018		0,012323
5/09/2018 - 29/11/2018		0,006031
28/01/2019 - 13/09/2019		0,002784
13/09/2019 - 11/01/2020		0,00765
11/01/2020 - 27/06/2020		-0,012071

Tabla 8. Diferencias de alturas obtenido de los mapas de desplazamiento.

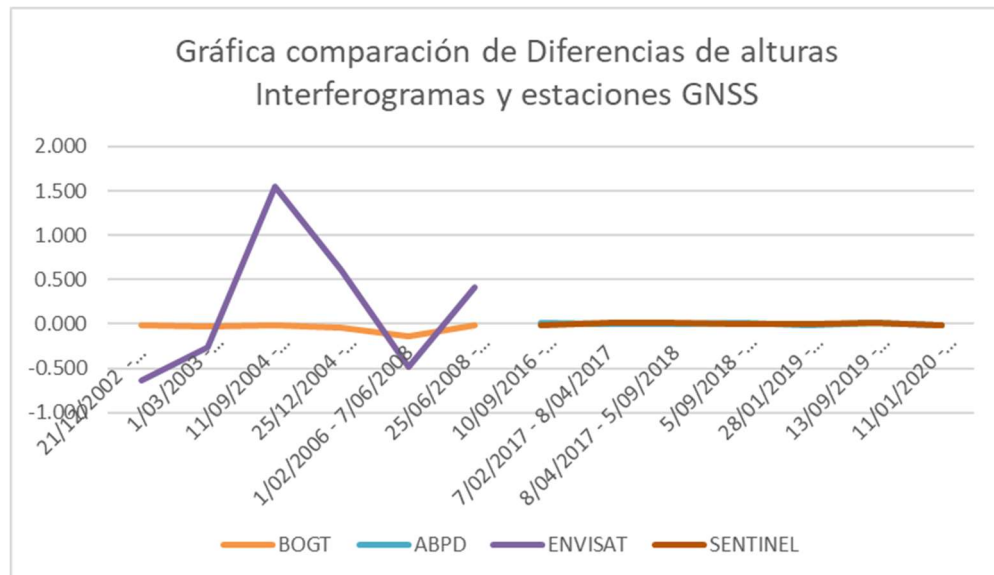


Gráfico 3. Tendencia Estaciones GNSS y Mapas de desplazamiento.

En el *gráfico 3*, se observa que existe una tendencia entre la variabilidad de la altura obtenida con las Estaciones Geodésicas GNSS BOGT y ABPD y la variabilidad en la altura obtenida con los mapas de desplazamiento procesados en el periodo comprendido entre el 21/12/2002 y el 11/01/2020, por lo que guardan una similitud en su disposición a través de los años.

4.3.2 Interpretación y análisis de los mapas de desplazamiento

Para el rango de tiempo entre los años 2002 y 2003 se identifica una subsidencia que oscila entre -0.38 m hasta -0.76 m para los barrios legalizados de Brisas del Volador, Recuerdo Sur y Los Alpes. Barrios que fueron legalizados en los años 1999, 1999 y 1993 respectivamente. Superponiendo los polígonos con imágenes de *Google Earth* del año 2001, se puede determinar que estos polígonos se encontraban en desarrollo, con pocas construcciones y algunas vías.

En la *figura 21*, se puede evidenciar que el polígono que se encuentra más al sur del Barrio el Recuerdo Sur tiene la menor subsidencia, apreciado con menos desarrollo en infraestructura civil para este periodo de tiempo.

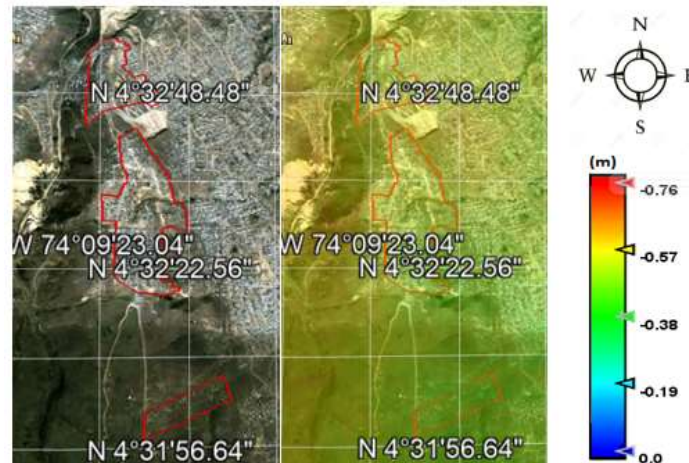


Figura 21. Imagen Google Earth 01/06/2001 – Mapa de desplazamiento (m) 200303 – 200309.

Para el rango de tiempo entre los años 2002 y 2003 se identifica una subsidencia elevada para el sector de Mirador de la Estancia, se encuentra con valores entre -0.57 m hasta -0.76 m de acuerdo con la figura 22. El informe de IDIGER “*Estrategia de gestión predial en el sector de Altos de la Estancia en la localidad de Ciudad Bolívar, enfocada al saneamiento y adquisición*” dice que para el año 2002 existían 4375 familias afectadas por localizarse en zonas de riesgo de remoción en masa, de las cuales fueron reasentadas 1540 familias de 8 barrios de este sector para el año 2002-2003, posteriormente en el año 2004 iniciaron trámite de reasentamiento otras 1485 de las cuales dieron prioridad a 530 familias, quedando pendientes 1350 que se encontraban en zonas de monitoreo.



Figura 22. Imagen Google Earth 01/06/2001 – Mapa de desplazamiento (m) 200303 – 200309.

De igual manera para el comprendido entre enero de 2021 y junio del mismo año se encontraron algunos polígonos menores con diferencias de altura desiguales correspondientes a invasiones nuevas, obras de contención y algunos parques que se encuentra elaborando la alcaldía mayor de Bogotá, tal como lo muestra la *figura 23*.

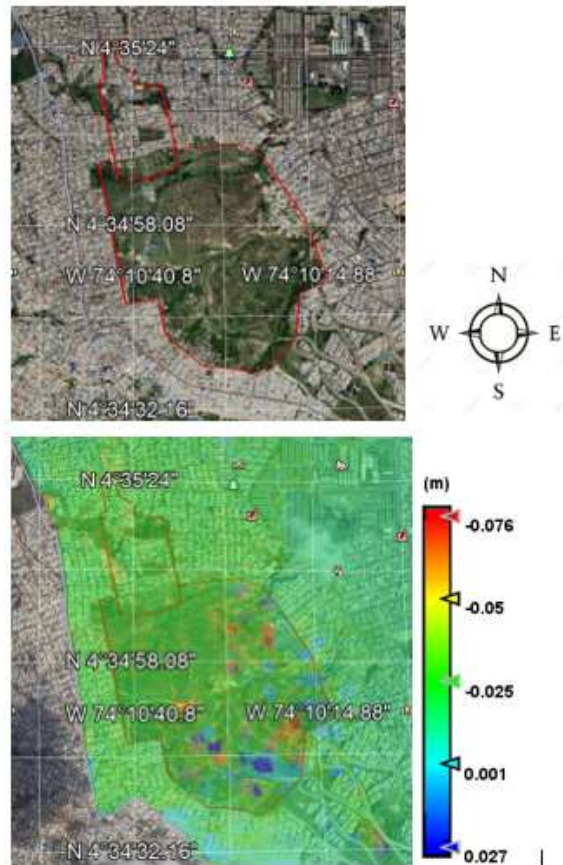


Figura 23. Imagen Google Earth 03/21/2020 – Mapa de desplazamiento en (m) Sentinel 202001 – 202006.

De acuerdo con la *figura 24* para los 9 polígonos de monitoreo de la zona sur de Bogotá se evidencia una subsidencia que oscila entre -0.016 y -0.074 m, para el periodo de tiempo 201609 – 201702, para lo cual y de acuerdo con la imagen de *Google Earth* 01/012/2016 los siguientes predios se encuentran iniciando un proceso de invasión, se debe aclarar que estos polígonos de monitoreo se encuentran en zona de ladera, lo que hace más inestable el terreno al momento de construcción e implementación de algunos servicios públicos.

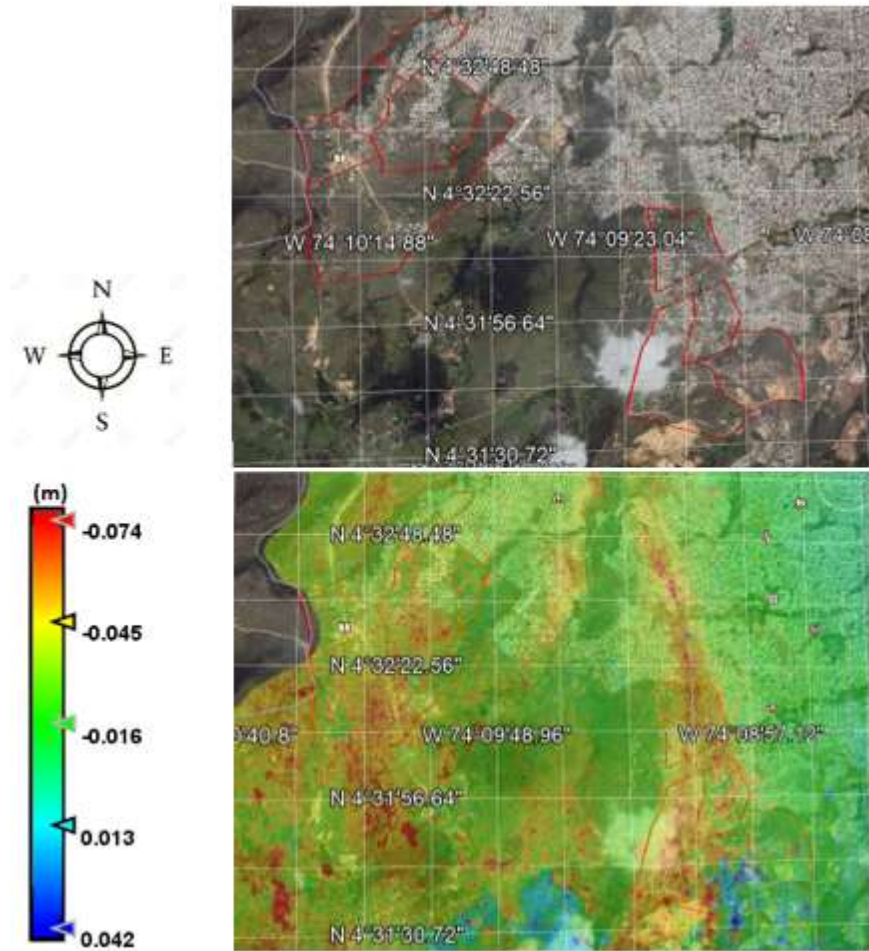


Figura 24. Imagen Google Earth 11/12/2016 – mapa de desplazamiento en (m) Sentinel 201609 – 201702.

Para el periodo comprendido entre 20/17/2002 y 20/17/2004 se evidencia una subsidencia con valores que se encuentra entre -0.031 y -0.101 m. La subsidencia más elevada se encuentra en los polígonos 183, 143F y 001 de aproximadamente 10 cm, *figura 25*.

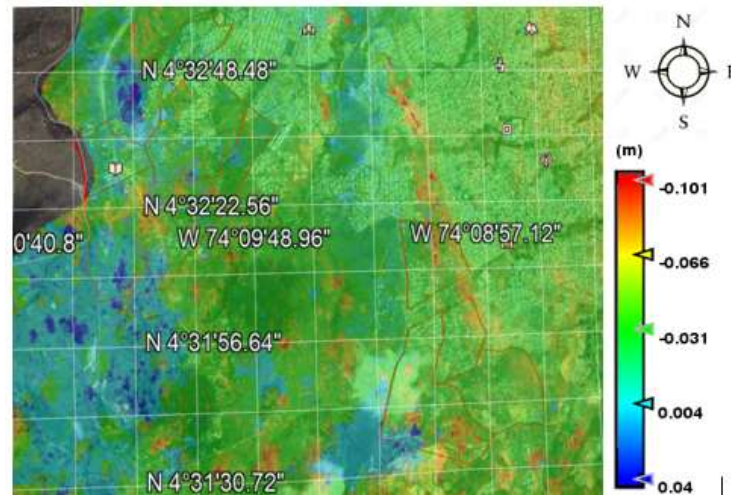


Figura 25. Mapa de desplazamiento en (m) Sentinel 1 201702 – 201704.

De acuerdo con la *figura 26*, en el año 2019 t se encuentra una subsidencia importante que varía entre los 4 cm y los 10 cm para los polígonos 182, 183, 184, 143F y 001

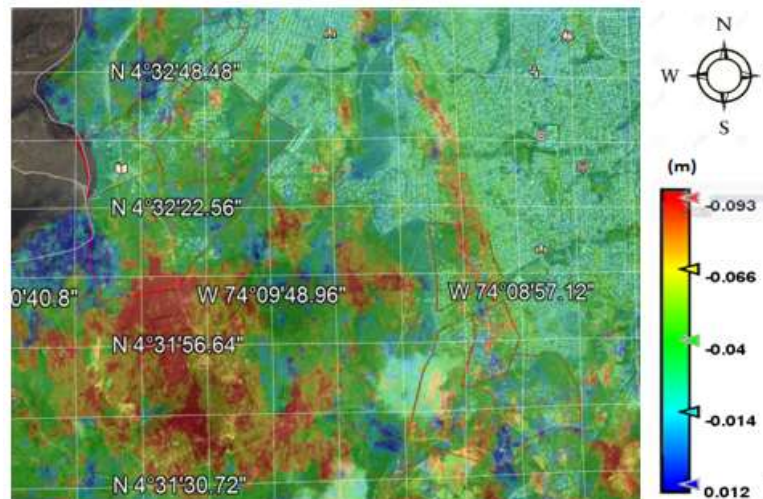


Figura 26. Mapa de desplazamiento en (m) Sentinel 1 201901 – 201909.

Para el polígono Arboleda Santa Teresita, predio de la Caja de Vivienda Popular que inicia procesos de construcción a mitad del año 2016, presenta subsidencia entre los 4 y 7 cm

para el periodo comprendido entre el mes de septiembre de 2016 y febrero de 2017, para este año la Caja de Vivienda Popular manifiesto que se presentaron deslizamientos en la zona sureste del predio, *figura 27*. El cual colinda con una zona de reserva y protección ambiental que pertenece de igual manera a la Caja de Vivienda Popular.

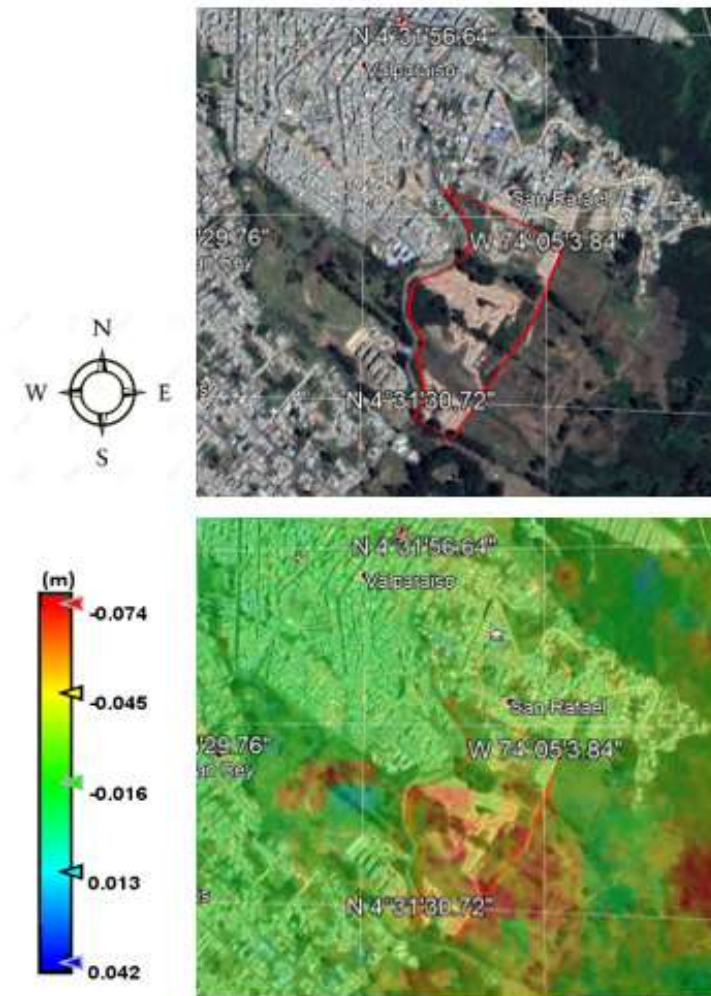


Figura 27. Imagen Google Earth 01/18/2016 – Mapa de desplazamiento en (m) Sentinel 201609 – 201702.

5. Conclusiones

Si bien los Mapa de desplazamiento resultantes de las imágenes Envisat guardan relación con el proceso constructivo en la ciudad de Bogotá, esta es algo baja, su precisión no es la mejor, toda vez que la resolución espacial con la que cuentan estas imágenes no es de las mejores; de otro lado el intervalo que existe entre cada una de las imágenes utilizadas, en algunos casos, es muy largo lo que hace que el análisis de coherencia para la generación de interferogramas sea muy baja afectando los resultado.

Sentinel, por otro lado, tiene una resolución espacial mejor dando resultados más óptimos en temas de precisión y al igual que los mapas de desplazamiento anteriores también guardan coherencia con los procesos constructivos que se desarrollaron durante este periodo, también se debe enfatizar que la metodología expuesta para Sentinel consta de un paso adicional y algunas mejoras sutiles dentro del procesamiento, lo que permite modificar el software Snap, mejorando considerablemente el resultado final.

Los resultados obtenidos de los Mapa de desplazamiento de estas dos plataformas guardan consistencia con estudios técnicos y documentos generados por entidades distritales y privadas en correspondencia con la gestión del riesgo en el sur de Bogotá, lo que permite deducir que el uso de este tipo de metodologías para el análisis de subsidencia por interferometría DInSAR, se constituye en un instrumento con información confiable para la toma de decisiones y así optimizar recursos, disminuir tiempos, realizar la planeación y ejecución de proyectos de infraestructura que se pretendan implementar en la zona con el fin de mitigar el riesgo. De igual forma, esta metodología ira mejorando a medida que los sensores utilizados cuenten con mejor resolución espacial y menor tiempo de revisita.

6. Limitaciones y Recomendaciones

Esta investigación implementó la técnica DInSAR en la que se hicieron visibles sus potencialidades y utilidades para el análisis de nuestro objeto de estudio. Ahora, en el plano investigativo y en la perspectiva de seguir avanzando en la mejora y cualificación de análisis y futuras investigaciones, es pertinente y oportuno indicar algunas limitaciones que se identificaron en la puesta en marcha de esta técnica para el uso y análisis de los datos, para el análisis de los resultados en los que se restringe el uso, de manera general, a proyectos similares y que requieren de técnicas complementarias para obtener resultados más precisos.

Se presentan, a continuación, algunas de las limitaciones encontradas a lo largo de esta investigación. Veamos:

Iniciamos con la densidad de píxeles y el tamaño de estos. Esta densidad es la que genera los mapas de desplazamiento en el análisis de deformación de la superficie terrestre y corresponde a la resolución espacial. La limitación está en el hecho de que con la banda C se obtiene una densidad de datos menor que con una plataforma que emplee la banda X como TerraSAR-X (Llavador, 2013).

La resolución espacial es uno de los componentes con los que este tipo de imágenes son evaluadas constantemente y en este trabajo se constituye en una barrera para la obtención de datos precisos. Las imágenes Sentinel tienen una resolución espacial de 13.5 m y Envisat de 30 m, lo cual quiere decir que un píxel de la imagen cubre un área de 13.5 x 13.5 m y 30 x 30 metros respectivamente, lo que constituye un área bastante grande para la detección de fenómenos con una georreferenciación puntual, tales como pequeños deslizamientos o hundimientos que ocurren en a lo largo y ancho de la ciudad de Bogotá.

De otro lado la zona seleccionada cuenta con un crecimiento desmesurado en algunos periodos de tiempo afectando, positiva y notablemente, el valor de desplazamiento vertical del pixel y eliminando la subsidencia puntual de la superficie terrestre. Esto debido a la gran superficie que abarca el pixel. En las imágenes contenidas en el documento se puede evidenciar que la subsidencia detectada se encuentra en épocas donde gran parte del terreno en estudio se encuentra con poca construcción y en inicios de invasión. Sin embargo, los resultados de subsidencia pueden llegar a ser muy fiables en barrios ya consolidados donde no hay procesos constructivos en desarrollo y el pixel no sea afectado por estas variaciones repentinas de las edificaciones nuevas.

De otra parte, la banda C utilizada en este proyecto tiene una longitud de onda que oscila entre 3.8 y 7.5 cm y una baja resolución espacial, tal como se mencionó anteriormente. Esta longitud de onda es muy alta si se quiere traspasar el follaje de la vegetación y llegar al subsuelo; ahora bien, si Bogotá es una urbe, esta cuenta con zonas verdes donde se encuentran grupos considerables de árboles de gran altura y la presencia de estos dentro la infraestructura urbana, tales como vías, parques, pequeñas y grandes zonas verdes, pueden llegar a afectar, en parte, el resultado de los datos, generando posibles incoherencias en algunas zonas, toda vez que lo que estaríamos tomando es el follaje y no la superficie terrestre. La manera de sobrepasar esta barrera es utilizando imágenes en la banda X o superior con una longitud de onda inferior a los 2.4 cm, ya que esta longitud de onda traspasa el follaje de la vegetación y en algunos casos alcanza a penetrar unos metros la superficie terrestre.

Una barrera, más grande aún, se interpone en este punto. Este refiere al alto costo que tiene adquirir este tipo de imágenes para un estudio permanente con esta metodología, pues mientras que las de banda C del sensor Sentinel son gratuitas, de fácil acceso y uso (en

muchos casos su resultado es aceptable según el tipo de estudio que se realice), en nuestro caso puntual una de las zonas de estudio, más precisamente Arboleda Santa Teresita se encuentra inmersa en una zona de reserva natural y la detección de subsidencia solo fue posible en el polígono que abarca la construcción, pero en visitas realizadas por la Caja de Vivienda Popular se evidencia que existen movimientos de la superficie terrestre en los cerros orientales por causa de este tipo de construcciones.

Para el análisis de las deformaciones verticales con las imágenes utilizadas en el presente proyecto debido al proceso constructivo que se ha llevado a cabo en la zona seleccionada al sur de Bogotá, sólo se obtienen buenas precisiones en la medición del movimiento cuando éste se realiza en la dirección de observación del satélite (Crosetto, *et al*, 2016), lo cual permite determinar que para las deformaciones horizontales no es fácilmente detectable sólo con DInSAR, sino que requiere del uso complementario de otras técnicas para su medición más precisa.

La geomorfología de la zona de estudio seleccionada se constituye en otro de los grandes inconvenientes de esta metodología, toda vez que los mejores resultados de esta técnica se obtienen cuando el movimiento del subsuelo está en la dirección de observación del sensor, incrementando la precisión a medida que la dirección de movimiento de la superficie del terreno se encuentre en la misma dirección de observación del satélite. Con esta técnica es posible detectar con muy buena precisión la variación vertical de la deformación de la superficie terrestre, y que para la correspondiente variación en (X, Y, Z) , es decir, la posición horizontal se debe implementar otras técnicas complementarias como el GNSS.

Los resultados obtenidos en este trabajo están influenciados en parte por este factor, toda vez que la zona de estudio se caracteriza por ser una zona escarpada, que en los resultados obtenidos se muestra la existencia de subsidencia de la superficie terrestre debido a la construcción desmesurada de infraestructura urbana en la zona. Estas propiedades de la zona se constituyen en un potencial de riesgo de deslizamiento del terreno donde se evidencia un desplazamiento en posición (X, Y, Z) , toda vez que no existen obras de mitigación de riesgo.

Así mismo, se identifica la limitación por resolución temporal, lo cual influye en la disponibilidad de los datos para el análisis y su uso potencial como sistema de alarma ante eventos relacionados con el desplazamiento ocurrido por la deformación de la superficie terrestre (Llavador, 2013). Los cambios temporales entre el paso de dos imágenes siempre tiene errores, causando pérdida de correlación o coherencia, teniendo como consecuencia la degradación de las mediciones (Podest *et al.*, s. f.).

En lo que respecta a la resolución temporal de los sensores empleados en el presente proyecto, Sentinel y Envisat, se aprecia la baja resolución temporal, en que Sentinel tiene un periodo de revisita de 13 días, Envisat tiene una resolución temporal de 35 días, que sumado a que los pares interferométricos deben tener el mismo desplazamiento ascendente o descendiente para obtener un interferograma apropiado para su análisis, DInSAR genera una ventana de tiempo bastante grande entre las imágenes a utilizar. Esta problemática genera dos grandes barreras en el uso de esta metodología: la primera, tiene que ver con el factor de coherencia entre las dos imágenes seleccionadas, factor que se evalúa al inicio de cada proceso, como se menciona en este trabajo, donde este factor de coherencia es inversamente proporcional a la diferencia de tiempo entre las dos imágenes. Entre más corto sea este

tiempo mayor será nuestro factor de coherencia y más fiables serán nuestros resultados, mientras que, si esta ventana de tiempo es más alta, nuestro factor de coherencia será menor y, también, menos confiables los resultados.

Para Envisat se contaban con imágenes de resolución temporal cada 2 o 3 meses. Estas no cumplían con la similitud del desplazamiento, lo que resulto en obtener periodos de tiempo más largos y un factor de coherencia más bajo y, por ende, unos resultados menos precisos y confiables.

Otra limitación identificada con el sistema DInSAR está relacionada con la sensibilidad para que el sensor pueda medir entre dos adquisiciones, de manera que la precisión para pequeñas deformaciones de la superficie del terreno no pueda identificar movimientos rápidos (Llavador, 2013).

Esta limitación relacionada con la velocidad de cambio de la superficie terrestre en una zona urbana donde continuamente se realizan cambios en su infraestructura es un punto de investigación más profundo, toda vez que la metodología de radar todavía no tiene el potencial para detectar movimientos de tierra muy rápidos, con presencia de fenómenos súbitos, como consecuencia de la acción o intervención realizada por el ser humano sobre la superficie terrestre. De esta manera, para el presente trabajo la presencia de dichos movimientos en la zona de estudio, tales como la deformación causada por un terremoto, no son reflejadas en los resultados obtenidos con la metodología DInSAR.

De otro lado validación de la información proporcionada por los mapas de desplazamiento puede mejorarse, si se contempla realizar una red de vértices relacionados entre sí dentro del área de estudio con información de campo en diferentes periodos de

tiempo, de manera que permita establecer con mayor precisión la veracidad del resultado obtenido por este método.

Para mejorar la calidad y precisión de la información proporcionada por la técnica avanzada DInSAR, es conveniente implementar la metodología *Persistent Scatter Interferometry* (PSI) con toma de datos GNSS de manera continua en el tiempo que permita establecer una serie de tiempo, para puntos específicos en la zona de estudio y no con base en el tamaño de *píxel* (30 x 30).

A efectos de realizar políticas públicas eficaces y oportunas relacionadas con la legalización de barrios, uso, destino y dimensiones de las construcciones que se encuentra localizadas en estos polígonos, es importante que se contemple incorporar esta técnica DInSAR para el suministro de información básica y así realizar un análisis adecuado que permita implementar estrategias para la incorporación de equipamiento comunal (servicios públicos, parques, vías, entre otros), así como obras de mitigación del riesgo.

El proceso de subsidencia en la zona urbana de Bogotá es difícil de identificar a corto plazo, por esto es importante realizar este tipo de estudios en largos periodos de tiempo, con el fin de diseñar políticas que permitan controlar el crecimiento urbano y el tipo construcciones generadas en zonas de ladera de la periferia de Bogotá.

El acceso gratuito a imágenes de radar y *software* de procesamiento permite que cada día más se utilice esta metodología para realizar un sinnúmero de estudios a grandes extensiones de tierra, con diferentes características topográficas y cubiertas terrestres, a muy bajo costo y de gran confiabilidad, no solamente a nivel urbano sino también rural.

Dadas las características del proyecto de implementación de la técnica DInSAR en una zona específica para el estudio de subsidencia debido al desarrollo constructivo, los

resultados obtenidos son muy variables en el tiempo, razón a que estas zonas están en continuo crecimiento de infraestructura civil. Sin embargo, los resultados serían muy consistentes para aquellas áreas urbanas desarrolladas y consolidadas (vivienda, industria, comercio, recreación y cultura, entre otros), en donde la subsidencia es constante por el tipo de suelo y el efecto del peso de las construcciones antiguas e infraestructura vial (vías, puentes, redes eléctricas, de comunicación, agua y gas, entre otros) en el tiempo.

7. Referencias

- Agudo, M., Biescas, E., Monserrat, O., Martínez, J., Crosetto, M., y Herrera, G. (2003).
 ¿Cómo medir deformaciones del terreno con teledetección radar? *6ª Semana de Geomática*, Barcelona España.
- Alcaldía Mayor de Bogotá, Distrito Capital. (2020). *Ficha de Estadística Básica de Inversión Local EBI-L*, pp. 1.
- Ávila, G. (2009). *Estudios de Subsidiencias sobre Bogotá mediante técnica DInSAR*, ICC Institut Cartografic de Catalunya.
- Ayala, H; Cabrera, M; Cadena, A; Castaño, C; Contreras, S; Diaz, Luis; Espitia, L; Gil, G; Gómez, S; González, H; Ipaz, S; Larrahondo, J; Macías, L; Madriñán, L; Mantilla, L; Medina, Y; Molina, C; Montoya, C; Pantoja, F; Peña, J; Pérez, E; Pinto, E; Quiroz, J; Restrepo, O; Roa, C; Rodríguez, L; Saldarriaga, C; Salgado, J; Sarmiento, J; Torres, J; Torres, G; Valencia, A; Valladares, R; Vásquez, O; Velásquez, J. (2019). *Diagnóstico de la información ambiental y social respecto a la actividad minera y la extracción ilícita de minerales en el país, Sentencia T 445 de agosto de 2016, pp. 44-55.* Benjamin, M., et al. (1999). *RADARSAT SAR observations of the Gibraltar strait: environmental conditions and its hydraulic exchange. CANIGO conference Book of abstracts, p. 50, Las Palmas.*
- Bovenga, F. (2020). *Special Issue “Synthetic Aperture Radar (SAR) Techniques and Applications”*.
- Braun, A., Veci, L. (2021). *Sentinel 1 Toolbox, SAR Basics Tutorial*, ESA.

- Camargo Sierra, A. P., Hurtado Tarazona, A. (2013). *Urbanización informal en Bogotá: agentes y lógicas de producción del espacio urbano*, pp. 104-106.
- Campos, A., Holm-Nielsen, N., Diaz, C., Rubiano, D., Costa, C., Ramírez, F y Dickson, E (2012). Análisis de la gestión del riesgo de desastres en Colombia – Un aporte para la construcción de políticas públicas–, *Banco Mundial*, 2 (7013).
- Chen, C. W., Zebker, H. A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(8), pp. 1709-1719.
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el espacio*, 1.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthéry, N., & Crippa, B. (2016). Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>
- Dávila, H. N., Madrigal, U. D. (2015). Aplicación de interferometría radar en el estudio de subsidencias en el Valle de Toluca, México, *Ciencias Espaciales*, 8(1), pp. 294-309.
- De la Peña, J. M., Rueda, R. A., García, A. Á. (2010). *La subsidencia del terreno en la ciudad y área metropolitana de Murcia*, IGME.
- ESA, A. N. (2000-2019). Level-0 *Raw Products*, Sentinel Online. Obtenido de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar>.
- Euillades, P. A. (2008). *Imágenes satelitales de radar: aplicaciones en geodinámica, actualidad y perspectivas*, pp. 213 -242.

- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR Interferometry, *Journal: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), pp. 8 – 20.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2007). InSAR Principles, *Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, European Space Agency.
- Ferretti, C. Prati y F. Rocca. (2000). Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR Interferometry, *Journal IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(5), pp. 2202-2212.
- Fornaro, G., Sansosti, E., Lanari, R., Tesauro, M. (2002). Role of Processing Geometry. *SAR Raw Data Focusing, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 38(2), pp. 441-454.
- Francesco, C., Stefano, E., Pasquale, I., Ivana, Z., Michele, M. C., Ricardo, L. (August, 2014). SBAS-DInSAR parallel processing for deformation time-series computation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- Gabriel, A., Goldsteing, R. (1988). Crossed orbit interferometry: Theory and experimental Results from SIR-B, *International journal of Remote Sensing*, pp. 857-872.
- García J. (2020). *Gestión del suelo y reasentamiento de población en el marco de proyectos urbanos de movilidad: la experiencia de Transmicable en Ciudad Bolívar*, [Proyecto grado Maestría Planeación Urbana y Regional], Bogotá: Universidad Javeriana.
- Ge, D; Zhang, L; Li, M; Liu, B; Wang, Y. (2016). *Beijing subway tunnelings and high-speed railway subsidence monitoring with PSInSAR and Terra SAR-X data*, pp. 6883-6886.

- Hooper, A. (2008). A Multi-Temporal InSAR Method Incorporating Both Persistent Scatterer and Small Baseline Approaches, *Geophysical Research Letters*.
- IDIGER. (2015). *Plan Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático para Bogotá D.C., 2015 – 2050*, Bogotá: Alcaldía Mayor de Bogotá.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi, IGAC. (2004). *Aspectos Prácticos de la adopción del Marco Geocéntrico Nacional de Referencia MAGNA-SIRGAS*, pp. 24.
- Ittycheria, N., Vaka, D., Rao, Y. (2018). Time Series Analysis of Surface Deformation of Bengaluru City Using Sentinel 1 Images, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, a, pp. 473-477.
- Fan, J; Guo, X; Ge, D; Liu, S; Liu, G; Guo, H. (2006). *Monitoring urban subsidence in the city of Tianjin (China) by differential SAR Interferometry*, *Journal International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 3304-3307.
- Just, D., Bamler, R. (1994). Phase statistics of interferograms with applications to synthetic aperture radar, *Applied optics*, 33(20), pp. 4361-4368.
- Llavador, F. P. (2013). Control Del Asentamiento De Los Diques Este Y Sur Del Puerto De. (1), 22-25.
- Li, F., Goldstein, R. (1990). Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars, *Remote Sensing and Remote Sensing*, IEEE, pp. 88 -97.
- Li, Z., Bethel, J. (2008). Image coregistration in SAR Interferometry. *The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, pp. 433 - 438, Beijing.

- Lu, C., Ni, C., Chang, C., Yen J., Chuang, R. (2018). Coherence difference analysis of sentinel-1 SAR interferogram to identify earthquake-induced disasters in urban areas, *Journal Remote Sensing*, 10, pp. 1-21.
- Milillo, P., Giardina, G., De Jong, M., Perissin, D., Milillo G. (2018). Multi-temporal InSAR structural damage assessment, *The London crossrail case study*, 10, p. 20-22.
- Molina, C., Mendoza, J., Peña, H., Peña, P. (2007). Caracterización petrográfica y mineralógica de los suelos de un sector al SW de Ciudad Bolívar, en “Bogotá, aplicada a la Geología Forense”, *Geología Colombiana*, 32, pp. 69-76.
- Pepe, A., Calò, F. (2017). A review of interferometric synthetic aperture Radar (InSAR) multi-track approaches for the retrieval of Earth’s surface displacements, *Applied Sciences*, 7(12), pp. 1264.
- Podest, E., Meyer, F., Flores, A., Lead, T., Fielding, E., Pinto, N., & Anderson, E. (s. f.). *Una sesión de preguntas y respuestas sobre la teledetección por Radar*.pdf.
- Samsonov, S., Tiampo, K., Gonzales, P., Manville, V., Jolly, G.(2010). Ground deformation occurring in the city of Auckland, New Zealand, and observed by Envisat interferometric synthetic aperture radar during 2003-2007, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 115, pp. 1-12.
- Sillerico, E., Marchamolo, J., Rejas, J. G., Martínez, R. (2010). La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción, *Informes de la Construcción*, 62, pp. 47 - 53.

- Songbo, W., Yongyao, L., Lei, Z., Xiaoli, D. (2020). Multi-temporal InSAR for Urban Deformation Monitoring, *Progress and Challenges*, 9.
- Tizzani, P., Berardino, P., Casu, F., Euillades, P., Manzo, M., Ricciardi, G., Lanari, R. (2007). *Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California investigated with the SBAS-InSAR approach, Remote Sensing of Environment*, pp. 277-289.
- Torres A. (2012), “Legalización de barrios: acción de mejora o mecanismo de viabilización fiscal de la ciudad dual”, *Bulletin de l'Institut français d'études andines* 41(3), [en línea], Disponible en «<http://journals.openedition.org/bifea/304>; DOI: <https://doi.org/10.4000/bifea.304>»
- UNGRD. (2020). *Boletín Informativo*, 57.
- Vanicek, P., Steeves, R. (1996). Transformation of coordinates between two horizontals geodetic datum's, *Journal of Geodesy*, 70, pp. 740-745.
- Wang, H., Feng, G., Xu, B., Yu, Y., Li, Z., Du, Y., Zhu, J. (2017). Deriving spatio-temporal development of ground subsidence due to subway construction and operation, *Delta regions with PS-InSAR data: A case study in Guangzhou, China, Journal: Remote Sensing*, 9.
- Wieczorek, B, (2020). Evaluation of deformations in the urban area of Olsztyn using Sentinel-1 SAR Interferometry, *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 17, pp. 5-18.
- Liu, X., Wang, P., Lu, Z., Gao, K., Wang, H., Jiao C., y Zhang, X. (2019). *Damage detection and analysis of urban bridges using Terrestrial Laser Scanning (TLS), ground-based*

microwave interferometry, and permanent scatterer interferometry synthetic aperture radar (PS-InSAR).

Zebker, H. A., Lu, Y. (1998). Phase unwrapping algorithms for radar interferometry: residue-cut, least-squares, and synthesis algorithms, *JOSA A*, 15(3), pp. 586-598.

Zhang, L., Jia, H., Lu, Z., (2019). *Minimizing Height Effects in MTInSAR for Deformation Detection over Built Areas*, 57, pp. 9167-917.

Zozaya, A.J., Carrera, F., Bolaños, R. (abril, 2017). Radar imaging basics. *Revista Ingeniería UC*, 24(1), pp. 73- 80.