



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Trabajo Fin de Máster

APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS MULTITEMPORALES DE INTERFEROMETRÍA RADAR DE SATÉLITE PARA EL ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DE LA SABANA DE BOGOTÁ Y LA CIUDAD DE BOGOTÁ (COLOMBIA)

Estudiante: Tamayo Duque, Juan Sebastián

Tutor: Prof. Dr. Antonio Miguel Ruiz Armenteros
Prof. Dr. Joaquim João Moreira de Sousa

Dept: Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

DICIEMBRE, 2023



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Centro de Estudios de Postgrado

Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría

El Prof. Dr. Antonio Miguel Ruiz Armenteros y el Prof. Dr. Joaquim João Moreira de Sousa, tutores del Trabajo Fin de Master titulado: *APLICACIÓN DE LAS TÉCNICAS MULTI-TEMPORALES DE INTERFEROMETRÍA RADAR DE SATÉLITE PARA EL ESTUDIO DE LAS DEFORMACIONES RECIENTES DE LA SABANA DE BOGOTÁ Y LA CIUDAD DE BOGOTÁ (COLOMBIA)*, que presenta JUAN SEBASTIÁN TAMAYO DUQUE, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Diciembre de 2023

El alumno:

Juan Sebastián Tamayo Duque

Los tutores:

Firmado digitalmente por RUIZ ARMENTEROS
ANTONIO MIGUEL - 26016256J
Fecha: 2023.12.04 13:38:25 +01'00'

Antonio Miguel Ruiz Armenteros

Assinado por: **Joaquim João Moreira de Sousa**
Num. de Identificação: 10331586
Data: 2023.12.04 17:35:45+00'00'

Joaquim João Moreira de Sousa

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este Trabajo Fin de Máster.

En primer lugar, quiero agradecer a mis dos tutores académicos, el Prof. Dr. Antonio Miguel Ruiz Armenteros y el Prof. Dr. Joaquim João Moreira de Sousa, por su paciencia y apoyo constante a lo largo de este proceso. Su guía experta y el ambiente propicio que crearon fueron fundamentales para llevar a cabo mi investigación y contribuyeron significativamente a mi crecimiento académico. El compromiso de ambos con la excelencia académica ha dejado una marca invaluable en este trabajo.

Agradezco también al Prof. Dr. Guillermo E. Ávila y al Ing. Gustavo Matiz, quienes participaron como colaboradores en mi investigación, por su guía, asesorías y disposición. Asimismo, quiero expresar mi agradecimiento al Servicio Geológico Colombiano y al Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría de la Universidad de Jaén por proporcionar la información necesaria y los recursos que facilitaron el desarrollo de este trabajo. Su apoyo administrativo fue esencial para superar los desafíos que surgieron durante este viaje académico.

Quiero destacar la contribución especial del Prof. Dr. Antonio Miguel Ruiz Armenteros, quien ha sido un pilar fundamental. Su máximo apoyo, compartiendo ideas, conocimientos y experiencias, enriqueció mi enfoque y perspectiva. Su colaboración y compañerismo han sido invaluable.

Agradezco a mi familia por su constante apoyo emocional y motivación. Su comprensión y aliento fueron mi fuente de fortaleza en momentos difíciles. Dedico este trabajo a mi hija y esposa, quienes han estado presentes en todo este proceso y me han brindado su comprensión y cariño.

Este logro no es solo mío, sino de todos aquellos que creyeron en mí y me acompañaron en este viaje académico. Gracias a cada uno de ustedes por ser parte fundamental de este importante capítulo en mi vida.

RESUMEN

Bogotá, el mayor centro urbano y capital de Colombia, está situada dentro de la sabana de Bogotá, que se originó como un lago en la parte central de la Cordillera Oriental colombiana. Con el tiempo, el lago se transformó en una llanura suavemente ondulada con sedimentos depositados horizontalmente que se formaron hace unos cinco millones de años. En las últimas décadas, la región ha experimentado un importante crecimiento demográfico y un rápido desarrollo urbano, impulsado en gran medida por la migración desde las zonas rurales. Este desarrollo ha influido sustancialmente en el hundimiento observado en la ciudad, debido principalmente a la extracción de aguas subterráneas. Un estudio previo del Servicio Geológico Colombiano (SGC) utilizó datos de estaciones GNSS e interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) con TerraSAR-X SAR entre 2011 y 2017 para identificar un patrón de subsidencia en la región central de Bogotá. El propósito del estudio fue evaluar los riesgos y potenciales desastres asociados al fenómeno de subsidencia. Nuestro estudio investiga tanto la subsidencia en Bogotá, previamente estudiada, como la zona de sabana rural, que actualmente está experimentando un significativo desarrollo residencial e industrial. Aplicando técnicas multitemporales InSAR (MT-InSAR) con imágenes SAR Sentinel-1 de 2014 a 2021. Los resultados del análisis indican que las regiones exteriores de la ciudad muestran subsidencias más significativas, que se extiende desde el centro hacia el norte. Las velocidades de subsidencia en estas zonas alcanzan aproximadamente 5-6 cm/año.

Palabras clave: *InSAR; subsidencia; series temporales InSAR; PS-InSAR; sabana de Bogotá; Bogotá DC; Sentinel-1.*

ABSTRACT

Bogotá, the largest urban center and capital city of Colombia, is located within the Bogotá savanna, which originated as a lake in the central part of the Colombian Eastern Cordillera. Over time, the lake transformed into a gently undulating plain with horizontally deposited sediments that formed around five million years ago. Over the last few decades, the region has undergone significant population growth and rapid urban development, largely driven by migration from rural areas. This development has substantially impacted the subsidence observed in the city, primarily due to the extraction of groundwater. A previous study by the Servicio Geológico Colombiano (SGC) utilized data from GNSS stations and synthetic aperture radar interferometry (InSAR) with TerraSAR-X SAR between 2011 and 2017 to identify a subsidence pattern in the central region of Bogotá. The purpose of the study was to evaluate the risks and potential disasters associated with the subsidence phenomenon. Our study investigates both the subsidence in Bogotá, previously studied, as well as the rural savanna area, which is currently undergoing significant residential and industrial development. Applying multi-temporal InSAR (MT-InSAR) techniques with Sentinel-1 SAR images from 2014 to 2021. The analysis results indicate that the outer regions of the city display the most significant subsidence, extending from the center to the north. The subsidence velocities in these areas reach approximately 5–6 cm/year.

Keywords: *InSAR; subsidence; time series InSAR; PS-InSAR; Bogotá savanna; Bogotá DC; Sentinel-1*

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	9
1.1	Estructura del TFM	12
2	OBJETIVOS.....	13
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
4	REGIÓN DE ESTUDIO	15
4.1	Sabana de Bogotá	15
4.1.1	Geología de la sabana de Bogotá.....	15
4.1.2	Hidrogeología de la sabana de Bogotá	17
4.2	Bogotá, D.C.....	20
4.2.1	Geología de Bogotá	20
4.2.2	Hidrogeología de Bogotá.....	21
5	DATOS Y MÉTODOS	23
5.1	Datos InSAR y GNSS	23
5.2	Metodología.....	25
5.2.1	Fundamentos de La Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR):	25
5.2.2	GNSS.....	30
6	RESULTADOS	32
6.1	InSAR Multi-Temporal	32
6.2	GNSS y comparación con MT-InSAR.....	47
7	DISCUSIÓN.....	51
8	CONCLUSIONES	59
9	BIBLIOGRAFIA.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la Sabana de Bogotá: (a) Ubicación de Colombia en América del Sur. ;(b) El Departamento de Cundinamarca está ubicado en el centro de la Cordillera Oriental, donde se encuentra la Sabana de Bogotá. ;(c) Área de interés (AOI) y Footprints de las trayectorias ascendentes y descendentes de Sentinel-1 utilizadas en esta investigación. ;(d) Perfil hidrogeológico simplificado para el análisis de subsidencias; La sección de este perfil se indica en el panel (c) con una línea discontinua Blanca. (Ávila Á & Castro Villamarín, 2011).	16
Figura 2. (a) Subcuencas hidrogeológicas de la sabana de Bogotá estudiadas por INGEOMINAS (SGC) en 1989. La región fue analizada y dividida en nueve subcuencas hidrogeológicas, las cuales se integraron en las Cuencas Alta y Media del Río Bogotá. La fuente de esta información es Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (b) Relieve de la sabana de Bogotá (adaptado (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019))......	18
Figura 3. Deposición de suelos lacustres en el lago paleolítico de la localidad de Bogotá (Colombia): (a) depósitos fluvio-lacustres. (b) depósitos lacustres y palustres poco profundos. (c) depósitos palustres. (d) depósitos fluvio-lacustres en pleamar, (e) depósitos lacustres. Diagramas de bloques esquemáticos por (Caicedo et al., 2018; Torres et al., 2005).....	20
Figura 4. Ubicación de las estaciones GNSS BOGT, BOGA y ABCC en Bogotá.....	24
Figura 5. (a)Diferencia de fase entre dos señales y Desplazamiento del terreno(ΔH). (b) Representación de pixel en la imagen izquierda de un Dispensor persistente en color azul y en la imagen derecha en color rojo representación de un dispensor distribuido.....	26
Figura 6. Workflow ilustrativo y simplificado del procesamiento ejecutado en SARPROZ para el análisis PS-InSAR.	28
Figura 7. Distribución temporal frente a la línea de base perpendicular para las pistas ascendente (a) y descendente (b). La barra de color representa la coherencia espacial media de todos los interferogramas.	29
Figura 8. Mapas de velocidad media en dirección LOS (mm/año) para la sabana y la ciudad de Bogotá derivados de este análisis MT-InSAR para el periodo 2014-2021. (a). Resultados para la órbita ascendente. (b) Resultados para la descendente. La estrella blanca representa la zona supuestamente estable a efectos de referencia.	33
Figura 9. Resultados del procesamiento MT-InSAR del AOI. (a) Mapa de desplazamiento vertical acumulado. (b) Mapa de desplazamiento horizontal acumulativo este-oeste. Las regiones resaltadas en rojo indican tasas de desplazamiento acumulativo entre -200 mm y -400 mm durante el periodo 2014-2021. Para los desplazamientos acumulativos en dirección este-oeste, los colores rojos indican movimientos hacia el oeste, mientras que los azules indican movimientos hacia el este.	34
Figura 10. Tasas de deformación MT-InSAR del AOI. (a) Mapa de velocidad vertical y (b) Mapa de velocidad Este-Oeste. El mapa de velocidad Este-Oeste denota los movimientos hacia el oeste con color rojo y los movimientos hacia el este con color azul.	34
Figura 11. Análisis MT-InSAR de la sabana de Bogotá y en la ciudad de Bogotá. Tasas de velocidad de deformación vertical (imagen izquierda) y este-oeste (imagen derecha). Los círculos blancos representan las áreas 1 a 16 que fueron elegidas para un análisis detallado.....	35
Figura 12 Resultados de series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el municipio de La Mesa. La elipse blanca indica una zona con desplazamiento hacia el este.	36

- Figura 13.** Resultados de series temporales de la vertical y este-oeste. Tasas de deformación de velocidad para el municipio de San Antonio de Tequendama. El área marcada con la elipse blanca indica un deslizamiento de tierra hacia el oeste. 36
- Figura 14.** Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el municipio de Facatativá. En esta zona se observa un ligero movimiento hacia el este con componente vertical de subsidencia. 37
- Figura 15.** Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el municipio de El Rosal. La zona marcada con una elipse blanca indica subsidencias del terreno con una ligera componente este. 38
- Figura 16.** Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el municipio de Madrid. Esta zona muestra dos áreas de subsidencia y movimiento horizontal asociado. El deslizamiento de ladera con tendencia este es el más prominente, marcado por la elipse blanca de la derecha. 38
- Figura 17.** Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste del municipio de Tenjo. El hundimiento del terreno se indica con una elipse blanca en esta zona. 39
- Figura 18.** Resultados de series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para la Población de La Isla. En la zona señalada con una elipse blanca se aprecia el hundimiento del terreno y los movimientos horizontales asociados. horizontales asociados. 40
- Figura 19.** Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el municipio de Cota y Chía. El área marcada con una elipse blanca en la imagen de la izquierda indica un hundimiento del terreno con sus movimientos horizontales asociados mostrados en la imagen de la derecha. 40
- Figura 20.** Resultados de series de temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste de barrios del noroeste de la ciudad de Bogotá. En la imagen de la izquierda, la elipse blanca indica una zona de hundimiento significativo, cuyos movimientos horizontales asociados se indican en la zona de la derecha..... 41
- Figura 21.** Resultados de series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste de Guadalajara y Buenavista. En esta zona se aprecia un hundimiento del terreno, indicado por la elipse blanca en la imagen de la izquierda. elipse blanca en la imagen de la izquierda. Este movimiento vertical está asociado a un movimiento horizontal, como en la imagen de la derecha 42
- Figura 22.** Resultados de series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste en el centro de la ciudad de Bogotá. En esta zona se observan movimientos verticales con valores máximos en las áreas representadas en naranja en la imagen de la izquierda. En la zona central se observa una franja longitudinal con un movimiento horizontal ligeramente pronunciado, representado por el polígono blanco. 43
- Figura 23.** Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste del barrio Pedregal, ubicado en el este de Bogotá. La elipse blanca delimita un área con movimiento vertical y desplazamiento horizontal asociado..... 44
- Figura 24.** Resultados de las series de temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el barrio Siete de Agosto de la ciudad de Bogotá. 44
- Figura 25.** Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste localizados en diferentes barrios del centro al oeste de la ciudad de Bogotá. En esta zona se observa cierto hundimiento del suelo con movimientos horizontales diferenciados..... 45

- Figura 26.** Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para El Dorado El Dorado y el barrio Florencia. 45
- Figura 27.** Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el grupo de barrios Tintal del norte y sur en el noroeste de la ciudad de Bogotá. Las elipses blancas indican áreas de subsidencia pronunciada y un ligero movimiento horizontal asociado. 46
- Figura 28.** Serie temporal de posición de las estaciones GNSS ABCC, BOGA y BOGT en Bogotá del 2000 al 2021, procesadas por el SIRGAS en DGFI-TUM. (a) Componente norte. (b) Componente este. (c) Componente de altura (Up). Nota: Las líneas discontinuas en los gráficos (b y c) comprende la duración de este estudio a lo largo de la serie temporal completa de las 3 estaciones GNSS. (Fuente: <https://www.sirgas.org/es/processing/>)..... 47
- Figura 29.** Estaciones GNSS ABCC, BOGA y BOGT representados sobre el mapa de desplazamientos verticales acumulativos MT-InSAR como triángulos blancos. 48
- Figura 30.** Posiciones de las estaciones GNSS ABCC, BOGA y BOGT en el este y componentes de altura indicados por las líneas discontinuas en la Figura 28 b, c para el período 2014 a 2021. 50
- Figura 31.** Región de subsidencia en la sabana, superpuesta a las subcuencas con bajos piezométricos bajos (Tabla 1), que se asocia con este fenómeno, según un estudio realizado por la CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019). 52
- Figura 32.** Los polígonos 1 y 2 (en color blanco) delimitan las áreas identificadas como áreas críticas para la explotación de aguas subterráneas por la CAR en 2005 (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019) 53
- Figura 33.** (a) El área urbana de la ciudad de Bogotá centrada en el barrio Puente Aranda mostró altas tasas de velocidad lineal entre 1997 y 2009, según lo observado utilizando imágenes ENVISAT (Fuente: (Blanco et al., 2009)). (b) Otro estudio se centró en tres sitios de Bogotá con diferentes grados de subsidencia entre 2011 y 2017, incluidos el más alto (Puente Aranda), el medio (Normandía) y el bajo (La Guaca), según se calculados a partir de imágenes TerraSAR-X (Fuente: (Mora-Páez et al., 2019)). 54
- Figura 34.** Foco de subsidencia en la ciudad de Bogotá. (a) Las líneas discontinuas azules encierran un área considerable de subsidencia, lo que indica un desplazamiento vertical en el centro de la ciudad de Bogotá. (b) El área resaltada indica vecindarios (Tabla 4) clasificados dentro de la zona de desplazamiento vertical. (c) Las líneas discontinuas encierran un área considerable del desplazamiento este-oeste, indicando la dirección del movimiento en el centro de Bogotá..... 55
- Figura 35.** Modelo de predicción de subsidencia siguiendo un descenso del nivel freático a un ritmo de 0,1 m/año durante diferentes periodos. Las flechas azules indican el asentamiento predicho por el modelo para un periodo de 6,6 años coincidente con el periodo de análisis MT-InSAR. (a) Sector Aeropuerto El Dorado. (b) Sector INGEOMINAS. Fuente: (Ávila Á & Castro Villamarín, 2011) 57
- Figura 36.** Patologías estructurales de una edificación en el año 2019 en una zona de subsidencia (parte occidental de Ciudad Salitre) en la ciudad de Bogotá. Las imágenes proporcionadas por Gustavo Matiz (Ingeniero Topógrafo), Leonardo Ruiz Arce (Ingeniero Civil) y Jorge E. Ruiz Bastidas (Arquitecto).58
- Figura 37.** Efectos de los asentamientos en los pasos peatonales alrededor de un centro comercial en el barrio de Chicó Lago. 58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Subcuencas definidas para evaluar la reducción potencial de las aguas subterráneas.....	17
Tabla 2. Niveles piezométricos en las subcuencas hidrogeológicas de 1997 a 2006 según clasificación de la CAR, mostraron una disminución progresiva (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019).....	18
Tabla 3. Sentinel-1A/B, Datos SAR de la Banda C utilizados en este estudio (Long. de onda de 5,7 cm).	23
Tabla 4. Tasas de deformación de los barrios afectados significativamente por el fenómeno de hundimiento en la zona central de la ciudad de Bogotá (Figura 34).	46
Tabla 5. Desplazamiento acumulativo de las posiciones de las estaciones GNSS basado en sus observaciones geodésicas, tal como se informa en el sitio web oficial entre enero de 2000 y diciembre de 2021. (Fuente: https://sirgas.ipgh.org/red--gnss/estaciones/lista--de--estaciones/ , accessed on 1 October 2023).	48
Tabla 6. Tasas de deformaciones verticales GNSS – MT-INSAR.	49
Tabla 7. Tasas de deformaciones GNSS (este) y MT-INSAR (este-oeste).	49

LISTA DE ABREVIATURAS

AOI	Área de interés.
APS	Pantalla de Fase Atmosférica.
ASI	Índice de Estabilidad de Amplitud
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
DEM	Modelo de Elevación Digital.
DGFI-TUM	Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut of the Technical University of Munich.
FOPAE	Fondo para la Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá
GNSS	Sistema Global de Navegación por Satélite.
ICC	Institut Cartogràfic de Catalunya.
INGEOMINAS	Actualmente SGC
InSAR:	Radar de interferometría de Apertura Sintética o Radar de Apertura Sintética Interferométrico.
MT-InSAR	Técnicas InSAR multitemporales.
PS	Dispersor permanente o persistente.
PS-InSAR	Dispersor persistente InSAR.
SAR	Radar de Apertura Sintética.
SGC	Servicio Geológico Colombiano.
SIRGAS	Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.
SLC	Single Look Complex
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission

1 INTRODUCCIÓN

El hundimiento o subsidencia del terreno es una preocupación ambiental notable atribuida al uso extensivo de aguas subterráneas, que prevalece principalmente en regiones áridas y semiáridas. Afecta al equilibrio de recarga y escurrimiento de aguas subterráneas, provocando el hundimiento del terreno, lo que causa una serie de problemas que incluyen colapsos estructurales y daños a las redes de transporte y energía (Foroughnia et al., 2019). El término "Subsidencia de la tierra" se refiere al hundimiento gradual o abrupto de la superficie de la Tierra debido al movimiento de materiales del subsuelo (Galloway et al., 1999). Si bien las subsidencias son generalmente un proceso gradual, ciertas actividades humanas, incluida la minería subterránea, la explotación intensiva de acuíferos, el descenso de los niveles freáticos y la extracción/expulsión de petróleo o gas, pueden acelerarlo. Otros factores que contribuyen a este fenómeno pueden estar relacionado con los procesos de consolidación de los suelos blandos y orgánicos (Vallejo et al., 2002).

Las subsidencias del terreno es un fenómeno global que ha sido observado en diversos países y en las principales ciudades de todo el mundo. En áreas urbanas específicas, la extracción de agua subterránea ha sido identificada como la principal causa de este problema. Ejemplos destacados de regiones que experimentan hundimiento del suelo debido a esta práctica incluyen México (Figueroa-Miranda et al., 2018), el Valle de San Joaquín en California (Galloway et al., 1999; Neely et al., 2021), Shanghái en China (He et al., 2019; Shi et al., 2008), Tokio en Japón (Sato et al., 2006), la Cuenca del Guadalentín en España y Málaga (Hu et al., 2022; Ruiz-Constán et al., 2018), Bolonia en Italia (Modoni et al., 2013), entre otros. Es importante destacar que la extracción de agua subterránea emerge como la principal responsable de las subsidencias en áreas altamente desarrolladas, especialmente en lugares con geología compleja, como cuencas llenas de depósitos aluviales, lacustres o marinos poco consolidados. Estas actividades tienen consecuencias significativas, dando lugar a fenómenos como el hundimiento o asentamiento del terreno (Poland, 1987).

Las consecuencias perjudiciales de las subsidencias se manifiestan claramente en un estudio que aborda el descenso del suelo provocado por la sobreexplotación de las aguas subterráneas en los valles tectónicos del centro de México (Figueroa-Miranda et al., 2018). El estudio presenta casos de ciudades ubicadas en estos valles que han sufrido subsidencias diferenciales del suelo desde la década de 1980, lo que ha resultado en efectos adversos sobre las estructuras civiles. El principal desencadenante se atribuyó a la extracción intensiva de agua subterránea, impulsada por el crecimiento demográfico a medida que las personas migran de áreas rurales a urbanas (Sosa Ruiz et al., 2018). La extracción de aguas subterráneas tiene un impacto significativo en los centros urbanos de los valles, como lo respalda el estudio que empleó radar interferométrico de apertura sintética (InSAR) a diferentes escalas y durante varios períodos de tiempo, dada su frecuente utilización como método de seguimiento en los hundimientos del terreno. Este enfoque permitió medir con precisión el desplazamiento vertical y horizontal del suelo en México (Figueroa-Miranda et al., 2018).

Para investigar los riesgos naturales derivados de la actividad humana, existen diferentes técnicas disponibles, como la geodesia. El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) y el InSAR son técnicas geodésicas comúnmente utilizadas para el análisis de deformaciones locales y cambios espaciotemporales en la litosfera de la Tierra (Farolfi et al., 2019); o, como se demostró en investigaciones previas (Chalouan et al., 2014; Hollenstein et al., 2008; Lazos et al., 2020; Müller et al., 2013), los datos GNSS se han utilizado para la construcción de modelos o análisis de deformaciones dentro de la corteza terrestre. La interferometría de radar

satelital, como InSAR, ofrece la ventaja del análisis simultáneo de grandes áreas, lo que da como resultado una amplia cobertura espacial.

Varios investigadores en Colombia han estudiado la subsidencia en varias regiones del país utilizando una variedad de técnicas, incluidos métodos topográficos, geotécnicos y geodésicos. Durante la década de 1990, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), anteriormente conocido como INGEOMINAS, recopiló información hidrogeológica, durante el estudio de microzonificación sísmica de la ciudad. Los estudios proporcionaron información valiosa sobre el suelo, incluida la caracterización de depósitos de arcilla a diferentes profundidades, así como mediciones de la presión del agua subterránea a través de una red de piezómetros. En mayo de 2008, se llevó a cabo un estudio integral para evaluar cuantitativamente los cambios de elevación en la red geodésica de Bogotá entre 2003 y 2007, utilizando la red de nivelación y datos GNSS (Sánchez et al., 2008). El análisis reveló diferencias entre 0 y 31 mm entre los dos métodos. A pesar de las diferencias metodológicas, ambos enfoques confirmaron la presencia de subsidencias activas del suelo en las áreas analizadas durante ese período. Esto resaltó la urgencia de implementar nuevas campañas de vigilancia y medidas preventivas. Seguidamente, el Fondo para la Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá (FOPAE), en colaboración con el Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC), llevó a cabo un estudio diferencial InSAR (DInSAR) para evaluar la evolución de la subsidencia del suelo en Bogotá de 1997 a 2009. Los resultados de la investigación revelaron un mapa de subsidencia que indicaba una tasa de deformación lineal de -75 mm/año en ciertos barrios de la ciudad. No obstante, es crucial señalar que el estudio destacó la importancia de la aplicación de este método en áreas rurales circundantes para obtener mayor información y resultados de estas zonas que probablemente llegaran presentar subsidencias relevantes en territorios de poca intervención antrópica. (Blanco et al., 2009).

En 2011 se llevó a cabo un estudio de campo exhaustivo para evaluar los emplazamientos que experimentaban hundimientos significativos, como se menciona en el estudio del FOPAE y el ICC. El estudio consistió en la actualización de las lecturas de piezómetros instalados previamente y en la aplicación de técnicas de modelización numérica. Los resultados del estudio indicaron que la región con la subsidencia más pronunciada se alineaba con áreas con altas tasas de extracción de agua subterránea. Además, se observó una clara correlación entre el hundimiento acumulado y el volumen acumulado de agua extraída. Las observaciones in situ no revelaron daños significativos en los edificios ni deformaciones locales del terreno. Sin embargo, se postuló que esta falta de impacto significativo podría atribuirse a los relativamente modestos asentamientos diferenciales, que eran insuficientes para causar daños estructurales. Finalmente, el estudio concluyó que se estaba produciendo un fenómeno general de subsidencias, aunque no se viera reflejado en la infraestructura. (Ávila and Castro, 2011).

En el año 2020, se realizó otro estudio utilizando imágenes de radar TerraSAR-X para investigar la evolución de las subsidencias y cuantificar la deformación del suelo en Bogotá de 2011 a 2017. Los resultados revelaron valores de deformación de -33 mm/año, que fueron validados utilizando datos GNSS. Estos resultados constituyen una sólida evidencia del actual fenómeno de subsidencia en Bogotá. La consistencia de los hallazgos, respaldada por dos métodos geodésicos independientes (Mora Paéz et al., 2020), refuerza aún más esta conclusión.

En este estudio, se aplicó la técnica de InSAR multitemporal (MT-InSAR) para investigar el movimiento del suelo en la región de la sabana de Bogotá, un área que no ha sido estudiada previamente, y monitorizar la evolución de las subsidencias de la ciudad de Bogotá. Para ello, se adquirieron imágenes SAR de Sentinel-1A/B en las órbitas ascendentes y descendentes entre

los años 2014 y 2021. El objetivo principal de nuestro estudio es evaluar la evolución de los patrones de subsidencia a lo largo del tiempo en la región de la sabana de Bogotá. Para validar los resultados del procesamiento MT-InSAR en la ciudad, realizamos un análisis comparativo utilizando datos previamente procesados de tres estaciones GNSS: BOGT, BOGA y ABCC, disponibles en el sitio web del Sistema de Referencia Geodésica para América del Sur (SIR-GAS). Al analizar las componentes este y altura (up), confirmamos la evolución constante las subsidencias en la ciudad capital, respaldada por dos técnicas geodésicas distintas. Sin embargo, es crucial implementar instrumentos geotécnicos o hidrogeológicos adicionales para determinar las causas subyacentes del hundimiento en la ciudad.

Además, nuestro estudio resalta la necesidad apremiante de ejecutar una estrategia de gestión integral destinada a garantizar la extracción sostenible de agua de los acuíferos en toda la región de la sabana. Aunque varios estudios sugieren que el agotamiento de las aguas subterráneas desencadena el hundimiento, la falta de datos recientes en toda la región de la sabana subraya la necesidad de establecer sistemas de monitoreo mejorados para identificar los mecanismos específicos que causan este fenómeno.

1.1 Estructura del TFM

Con el fin de alcanzar los objetivos establecidos en este trabajo fin de máster (TFM), se procede a organizar su contenido en ocho capítulos.

El primer capítulo uno inicia con la introducción de este trabajo, abordando la definición de conceptos clave. Se nombran algunas ciudades del mundo donde se han presentado casos de subsidencias, así como sus efectos. Posteriormente, se centra en la historia del área de estudio en Colombia, destacando investigaciones previas sobre el problema de subsidencias en la región de Bogotá y la sabana. Finalmente, se expone el propósito principal de este trabajo de fin de máster.

En el segundo y tercer capítulo, se abordan los objetivos propuestos para este estudio, delineando su alcance, así como el planteamiento del problema. En otras palabras, se exploran las razones fundamentales que respaldan el desarrollo del TFM.

En el cuarto capítulo, se recopila la información de geológica básica e hidrogeológica sobre el área de interés (AOI), abarcando las zonas de interés tanto en la Sabana de Bogotá como en la ciudad de Bogotá. Se examinan estudios previos realizados por diversos autores y entidades gubernamentales que abordan la problemática y las posibles causas subyacentes de las subsidencias.

En el quinto capítulo, se presenta la información relativa a los datos utilizados para analizar la evolución de la problemática que afecta el AOI durante el periodo de estudio. Además, se detalla la metodología empleada para procesar estos datos, incluyendo la manipulación del conjunto de datos de imágenes de radar. Se incorpora, también, una segunda técnica geodésica utilizada como herramienta de verificación y evaluación de la evolución del problema.

En el sexto y séptimo capítulo, se presentan los resultados gráficos de subsidencias obtenidos mediante la técnica de teledetección InSAR, así como las zonas de mayor interés en el Área de Interés (AOI), que incluye la Sabana de Bogotá y Bogotá. Además, se exponen los resultados derivados del procesamiento externo de las estaciones GNSS. Seguido, de la discusión de los datos, con el objetivo de confirmar la actividad de las subsidencias en la región y explorar posibles evoluciones, considerando los resultados obtenidos. Se busca también identificar causas adicionales aportadas por otros autores, en concordancia con el desarrollo de la región.

En el octavo capítulo, se expondrán las conclusiones derivadas de los dos capítulos anteriores, analizando el estado de las subsidencias en la ciudad de Bogotá. Además, se agregarán nuevos datos que proporcionarán información valiosa y gráfica, especialmente en la Sabana de Bogotá, una zona que hasta ahora no ha sido explorada mediante InSAR.

Los resultados finales de esta investigación se han publicado oficialmente en la revista Remote Sensing [Remote Sens. 2023, 15, 5249.<https://doi.org/10.3390/rs15215249>] con el fin que puedan ser consultados por toda la comunidad científica en especial para la comunidad de la región investigada.

2 OBJETIVOS

El propósito de este trabajo es abordar las limitaciones y deficiencias identificadas en investigaciones anteriores. Para ello, se emplearán imágenes radar obtenidas a través de la tecnología de Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR) con el fin de analizar y monitorear con precisión el patrón de subsidencia en las áreas de interés. Este estudio se fundamentará en datos actualizados y empleará metodologías avanzadas para asegurar resultados de mayor precisión.

- ✓ El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis y monitorización del patrón de subsidencia en el AOI que abarca dos zonas de interés.

La primera zona comprende la sabana de Bogotá, donde se han observado deformaciones verticales en diferentes municipios. A pesar de haber sido monitoreada desde la década de los 90 utilizando técnicas tradicionales geotécnicas, hidrogeológicas y topográficas, aún no se ha llevado a cabo un estudio de esta zona mediante el uso de InSAR.

La segunda zona de interés es la ciudad de Bogotá, capital de Colombia. Aunque el fenómeno de las subsidencias ha sido monitoreado en años anteriores por diversos autores y entidades gubernamentales utilizando técnicas geodésicas, no se han realizado actualizaciones desde el año 2017, de acuerdo con la literatura encontrada.

- ✓ En el desarrollo de la investigación, se establece como objetivo secundario la comparación de los resultados obtenidos mediante el uso de técnicas multitemporales de InSAR y los resultados de las estaciones GNSS publicados por el SIRGAS, en la zona urbana de Bogotá.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El suministro de agua subterránea es crucial para diversos sectores, como la industria, el comercio y los hogares, y su demanda ha aumentado significativamente en las ciudades capitales de Colombia debido al crecimiento urbano e industrial. Esta situación se refleja en la proliferación de pozos perforados y autorizados por las entidades ambientales en todo el país, incluyendo más de 5000 pozos profundos en la sabana de Bogotá, de acuerdo al inventario realizado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR)(Mejía Ramírez et al., 2016). En los últimos quince años, se ha observado un incremento significativo en la extracción de agua subterránea en la región debido a la insuficiencia de los recursos hídricos superficiales para hacer frente a la creciente demanda, especialmente durante períodos prolongados del verano (Antonio-Fragala and Obregón-Neira, 2011; Bermoudes and Velandia, 2002). Como consecuencia de la creciente demanda, la sostenibilidad del recurso se ha visto afectada en el desequilibrio hidrológico, debido a la baja recarga de los acuíferos, generando cambios volumétricos en las capas del suelo.

En la cuenca artesiana de la Sabana de Bogotá se han registrado observaciones de una disminución del nivel del agua subterránea a una tasa anual de 3 a 5 metros (Lobo-Guerrero, 1995). Este fenómeno ha dado lugar a un proceso de compactación desigual y hundimiento del terreno. Incluso en la capital colombiana, se ha detectado subsidencias progresivas en determinadas áreas de Bogotá D.C., lo cual, bajo ciertas condiciones particulares, puede comprometer la estabilidad de la infraestructura urbana y plantear amenazas que requieren una monitorización constante. Estos procesos de hundimiento exhiben tasas de deformación variables, siendo especialmente notables en sectores específicos, con valores cercanos a 7.5 cm/año. Si esta tendencia ascendente se mantiene, es probable que surjan problemas a mediano y largo plazo, es decir, en un período de 10 a 20 años (Ávila and Castro, 2011; Blanco et al., 2009).

Las subsidencias en la región de la sabana han sido monitoreadas por diversas entidades mediante técnicas tradicionales como las geotecnias, hidrogeológicas o topográficas, hasta la fecha, no se ha encontrado en la literatura un análisis exhaustivo que abarque la región de estudio en la Sabana de Bogotá utilizando técnicas multitemporal de Interferometría SAR (MT-InSAR). Por otro lado, en Bogotá, a pesar de contar con monitoreo geodésico en años anteriores, la información relacionada con InSAR no ha sido actualizada desde 2017. Las técnicas de DInSAR permiten una cuantificación precisa de los desplazamientos verticales del suelo, con una precisión superior a un centímetro, superando las limitaciones inherentes a los métodos clásicos. Esto posibilita el monitoreo de amplias extensiones de terreno a un menor costo, aprovechando datos provenientes de sensores de radar montados en satélites (Blanco et al., 2009).

4 REGIÓN DE ESTUDIO

4.1 Sabana de Bogotá

4.1.1 Geología de la sabana de Bogotá

El área de estudio se localiza en la región andina de Colombia, en el departamento de Cundinamarca, de manera más precisa en una sección particular que comprende tanto el centro como el sur de la sabana de Bogotá y en esta se localizan veintisiete municipios: Soacha, Sibaté, Bojacá, Mosquera, Madrid, Facatativá, Funza, Tenjo, Tabio, Cota, Subachoque, El Rosal, Cajicá, Chía, Zipaquirá, Nemocón, Cogua, La Calera, Sopó, Tocancipá, Gachancipá, Sesquilé, Guatavita, Chocontá, Suesca, Villapinzón y Bogotá. Esta zona se sitúa a lo largo del eje central de la Cordillera Oriental de Colombia, comúnmente denominada sabana de Bogotá (Figura 1) y se formó a partir de una antigua llanura de origen lacustre que se encuentra ligeramente desecada a una altitud de 2600 msnm. La extensión de la sabana es aproximadamente 4780 km² y se localiza entre las siguientes coordenadas: Latitud 4°1'31.3'' y 5°16'36.6'' Norte y Longitud 73°21'33.4'' y 74°26'28.3'' oeste (Landscapes, 2016).

Las alturas de las montañas que rodean los depósitos lacustres antiguos pueden llegar a alcanzar los 4000 metros sobre el nivel del mar. La extensión geográfica de la Sabana de Bogotá es limitada y se ve interrumpida en algunas áreas por crestas montañosas y colinas que evidencian un control estructural. Estas características se identifican como anticlinales y homoclinales, asociados con rocas mayoritariamente arenosas de origen marino y transicional, las cuales se depositaron desde el Cretácico Temprano hasta el Cenozoico Temprano (Landscapes, 2016).

La zona de la Sabana fue en su época un lago de 157.000 hectáreas situado en la Cordillera Oriental de los Andes colombianos. Con el tiempo, la acumulación de sedimentos de los períodos Plioceno, Pleistoceno y Holoceno superior fue llenando gradualmente el lago. Los sedimentos consisten principalmente en capas de arcilla lacustres, fluviales y fluvio-glaciares horizontales intercaladas con delgadas lentes de limo, arena y grava y numerosos lechos. La llanura de sabana de Bogotá abarca actualmente la capital del país y ocupa una sexta parte de la superficie de la meseta. Los suelos arcillosos que se encuentran en las zonas norte y este de la zona y en las afueras de Bogotá causan muchos problemas relacionados con la agradación y la contracción del suelo. (Lobo-guerrero, 1992; Lobo-Guerrero and Gilboa, 1987; Mora Paéz et al., 2020).

Esta región está situada en la Cuenca Hidrográfica Superior del Río Bogotá y puede segmentarse en dos regiones fisiográficas. El altiplano y la zona montañosa de la Cordillera Oriental. INGEOMINAS realizó una revisión de unidades geológicas en el área de sabana en 2005, que implicó la identificación y diferenciación de estructuras regionales dentro de las formaciones rocosas. En la descripción general (Figura 1d, (Montoya and Reyes, 2005)), se identificaron las siguientes unidades geológicas:

- **Formación Sabana:** Depósitos lacustres que emergen en la zona plana compuesta principalmente por arcilla y hacia los márgenes de la orgánica, arcillas arenosas y turba. Es en este depósito donde se produce las subsidencias.
- **Formación Bogotá:** Una secuencia de bancos gruesos de areniscas y arcillolitas.
- **Formación Cacho:** Conformada por areniscas granuladas con algunos bancos de arcilla.
- **Formación Guaduas:** Secuencia arcillo-arenosa con filones de carbón.

- **Formación Labor-Tierna:** Capas muy gruesas de arenisca intercaladas con capas muy delgadas de arcillita.
- **Formación Plaeners:** Conformada por arcillitas, liditas, limolitas y, en menor medida, muy -areniscas de grano fino.
- **Arenisca Dura:** Esta unidad se reconoce por formar una morfología abrupta, derivada de la litología que está constituido principalmente de areniscas con espesores de hasta 450 m.
- **Formación Chipaque:** Está constituida por esquistos piríticos con intercalaciones de areniscas calizas, areniscas sueltas y niveles de caliza.

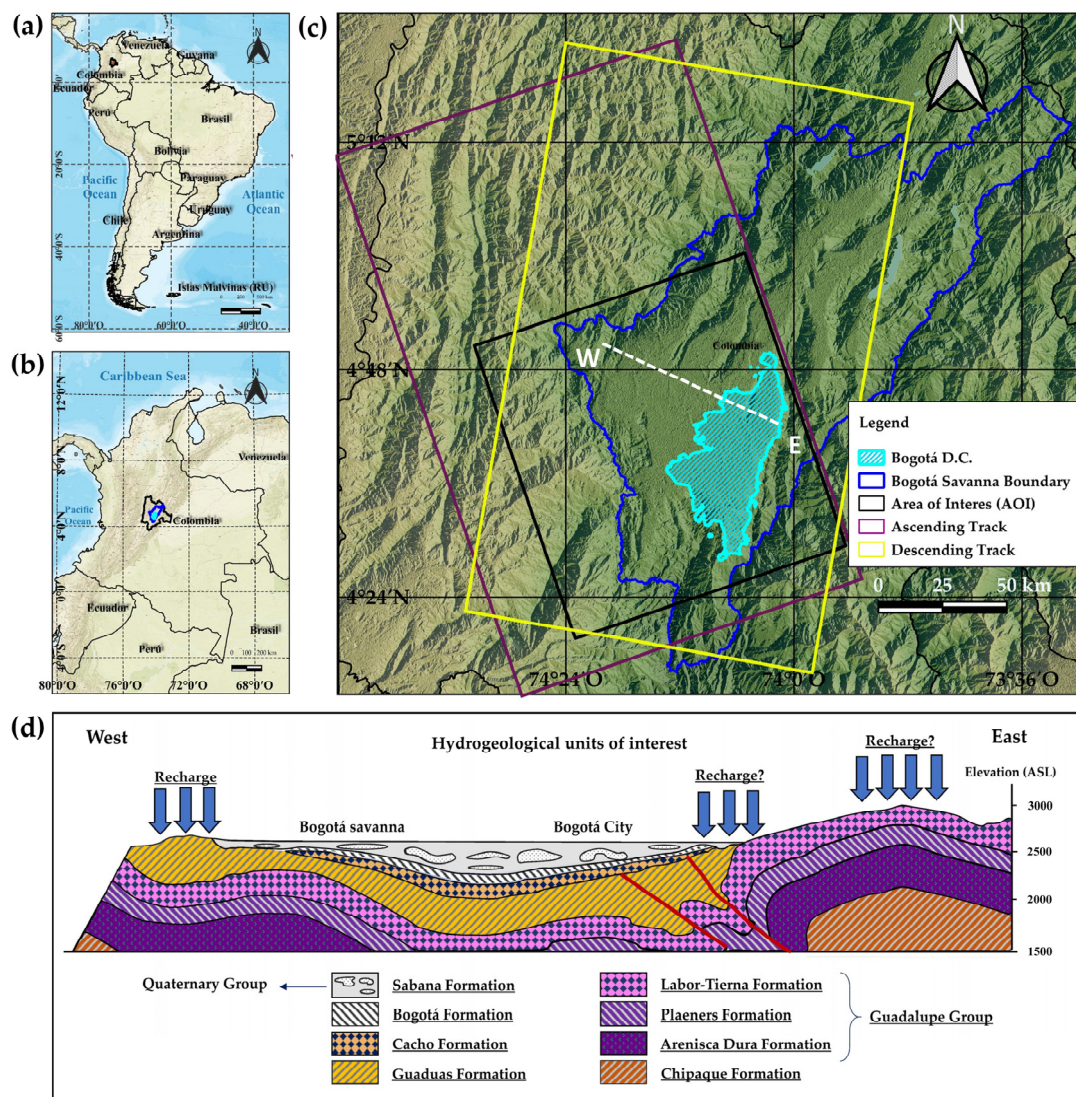


Figura 1. Localización de la Sabana de Bogotá: (a) Ubicación de Colombia en América del Sur. ;(b) El Departamento de Cundinamarca está ubicado en el centro de la Cordillera Oriental, donde se encuentra la Sabana de Bogotá. ;(c) Área de interés (AOI) y Footprints de las trayectorias ascendentes y descendentes de Sentinel-1 utilizadas en esta investigación. ;(d) Perfil hidrogeológico simplificado para el análisis de subsidencias; La sección de este perfil se indica en el panel (c) con una línea discontinua Blanca. (Ávila and Castro, 2011).

4.1.2 Hidrogeología de la sabana de Bogotá

En la sabana de Bogotá, el acceso al agua subterránea es esencial para abastecer de agua potable a diversas poblaciones, respaldar la actividad agrícola y mantener las operaciones de diversas industrias. Para hacer frente a la creciente demanda, se ha observado un significativo aumento en la perforación de pozos a mayores profundidades, dado que los recursos hídricos superficiales resultan insuficientes (Lobo-Guerrero, 1995). En este contexto, la extracción de agua subterránea de acuíferos poco profundos se ha vinculado con subsidencias en el suelo, fenómeno agravado por el crecimiento demográfico, en parte impulsado por la migración de personas desde el distrito capital hacia municipios periféricos. Este éxodo se ve motivado por costos de vida más bajos, opciones de vivienda más atractivas y mejores condiciones en comparación con las grandes ciudades (Sabana Centro Cómo Vamos, 2018). Además, el desarrollo de empresas de diferentes tamaños en la sabana ha contribuido al aumento de la población, impulsado por los elevados costos en la ciudad capital y las reducciones de impuestos para las zonas francas.

En este contexto, las temporadas de lluvias desempeñan un papel crucial en la sabana de Bogotá, ya que facilitan la recarga de los acuíferos regionales, fundamentales para mantener el nivel freático. No obstante, la disminución de las corrientes medias de los ríos se vincula estrechamente con las elevadas temperaturas durante el verano, las anomalías hidroclimáticas o captación para consumo de la población (Córdoba Álvarez, 2012). Por esta razón, en ocasiones, las lluvias no llegan a suplir la necesidad de recarga de los acuíferos debido al alto nivel de consumo

El área crítica de la sabana de Bogotá ha sido objeto de numerosos estudios hidrogeológicos, con el propósito de evaluar la gestión y explotación sostenible de las aguas subterráneas. El estudio “Plan de Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en la Sabana de Bogotá y zona crítica” fue realizado por INGEOMINAS (actual SGC) y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) en la región. El estudio analizó la geología, hidrogeología e hidroquímica de nueve subcuencas dentro de las cuencas alta y media del río Bogotá (Figura 2). Los resultados del estudio proporcionaron información sobre las consecuencias de la extracción de aguas subterráneas (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019). El estudio reveló una disminución del potencial hidrogeológico de la región debido al desarrollo económico y al crecimiento poblacional de la sabana de Bogotá. Las subcuencas hidrogeológicas que se examinaron en este estudio se presentan en la Tabla 1 y la Figura 2a.

Tabla 1. Subcuencas definidas para evaluar la reducción potencial de las aguas subterráneas.

No.	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Subcuencas	Sisga	Tominé	Teusacá	Neusa	Fontibón	Chicú	Subachoque	Balsillas	Tunjuelito

Entre 1997 y 2006, La CAR realizó una campaña de medición del nivel freático en varios pozos y depósitos de agua situados en la sabana para determinar el caudal medio total extraído de cada acuífero subyacente a las subcuencas hidrogeológicas listadas en el Tabla 1. En la Tabla 2 se muestran los principales acuíferos afectados para cada subcuenca de la región y la fluctuación del nivel freático.

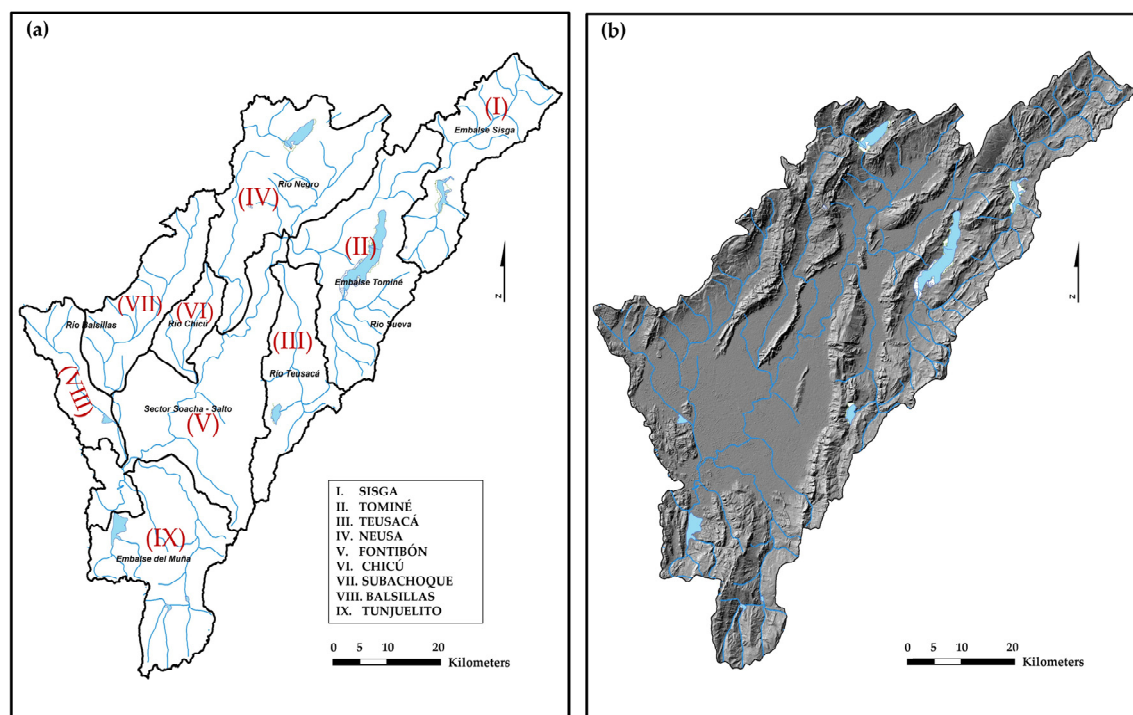


Figura 2. (a) Subcuencas hidrogeológicas de la sabana de Bogotá estudiadas por INGEOMINAS (SGC) en 1989. La región fue analizada y dividida en nueve subcuencas hidrogeológicas, las cuales se integraron en las Cuencas Alta y Media del Río Bogotá. La fuente de esta información es Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR). (b) Relieve de la sabana de Bogotá (adaptado (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019)).

Tabla 2. Niveles piezométricos en las subcuencas hidrogeológicas de 1997 a 2006 según clasificación de la CAR, mostraron una disminución progresiva (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019).

No.	Subcuenca	Acuífero relacionado	Análisis de fluctuación nivel estático piezométrico
I	Sisga	Paleógeno Cretácico Guadalupe Neógeno cuaternario	* <5 m
II	Tominé	Paleógeno Cretácico Guadalupe Neógeno cuaternario	* Descensos de 5 m
III	Teusacá	Paleógeno Cretácico Guadalupe Neógeno cuaternario	* Disminuciones graduales entre 5 y 10 m
IV	Neusa	Paleógeno Cretácico Guadalupe Neógeno cuaternario	Disminuciones entre 1 y 10 m Descensos de 10 m
V	Fontibón	Paleógeno Cretácico Guadalupe Neógeno cuaternario	* Disminuciones entre 5 y 15 m
VI	Chicú	Paleógeno Cretácico Guadalupe Neógeno cuaternario	Disminuciones entre 15 y 50 m Disminuciones entre 5 y 25 m
VII	Subachoque	Paleógeno Cretácico Guadalupe Neógeno cuaternario	* Disminuciones entre 10 y 30 m
VIII	Basillas	Paleógeno Cretácico Guadalupe Neógeno cuaternario	* Disminuciones entre 5 y 15 m
IX	Tunjuelito	Paleógeno Cretácico Guadalupe Neógeno cuaternario	* Disminuciones entre 5 y 15 m

(*) Datos no recopilados, información insuficiente.

Durante los períodos de precipitaciones normales, las operaciones de extracción de agua subterránea que duraron menos de 10 horas diarias registraron caudales del orden de 7.030.000 m³. Sin embargo, durante episodios de sequía o fenómenos de El Niño, la necesidad de extracción de agua subterránea aumentaron a niveles que oscilan entre 28.000.000 y 35.000.000 m³, con excepción del área metropolitana (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019).

El estudio realizado por el CAR ilustra la notable disminución de los acuíferos Cuaternario y Guadalupe dependiendo de su ubicación durante la temporada, lo que en última instancia conduce al agotamiento de las aguas subterráneas. Se descubrió que en zonas críticas de la sabana de Bogotá donde se encuentran pozos, durante las temporadas de intenso calor, la recarga natural de estos acuíferos es insuficiente, provocando una reducción del potencial hídrico subterráneo (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019). Las subsidencias en el suelo puede deberse a varios factores, pero el mayor contribuyente en la región es la extracción de agua subterránea (Ávila and Castro, 2011). Para abordar este problema, la única solución viable es lograr un equilibrio entre la cantidad de agua bombeada desde los acuíferos y la cantidad recargada a través de procesos naturales como la filtración de agua de lluvia (clima) o bombeando agua reciclada al suelo (Tomás et al., 2009).

4.2 Bogotá, D.C.

4.2.1 Geología de Bogotá

La ciudad de Bogotá, capital de Colombia, está situada dentro de la sabana de Bogotá, la mayor provincia de la región. La mayoría de sus habitantes se han asentado a unos 2.600 m de altitud sobre antiguos depósitos lacustres, que ahora se encuentran principalmente bajo la ciudad. Está rodeada de altas montañas pertenecientes a los Andes orientales y forma una cuenca. El desarrollo urbano de la ciudad se produce a lo largo de las laderas montañosas de sur a norte. Las zonas de alto relieve (Figura 3) están formadas por rocas sedimentarias fracturadas y cubiertas por gruesos coluviones, aluviones, arenas y gravas de terrazas fluviales, fluvio-glaciares y depósitos en abanico (Ojeda and Donnelly, 2006). Desde una perspectiva geológica, la ciudad de Bogotá se encuentra ubicada sobre un extenso relleno sedimentario que conforma la sabana de Bogotá y está rodeada por cerros formados por rocas tipo arenisca, arcillitas y conglomerados (Ingeominas and Universidad de los Andes, n.d.).

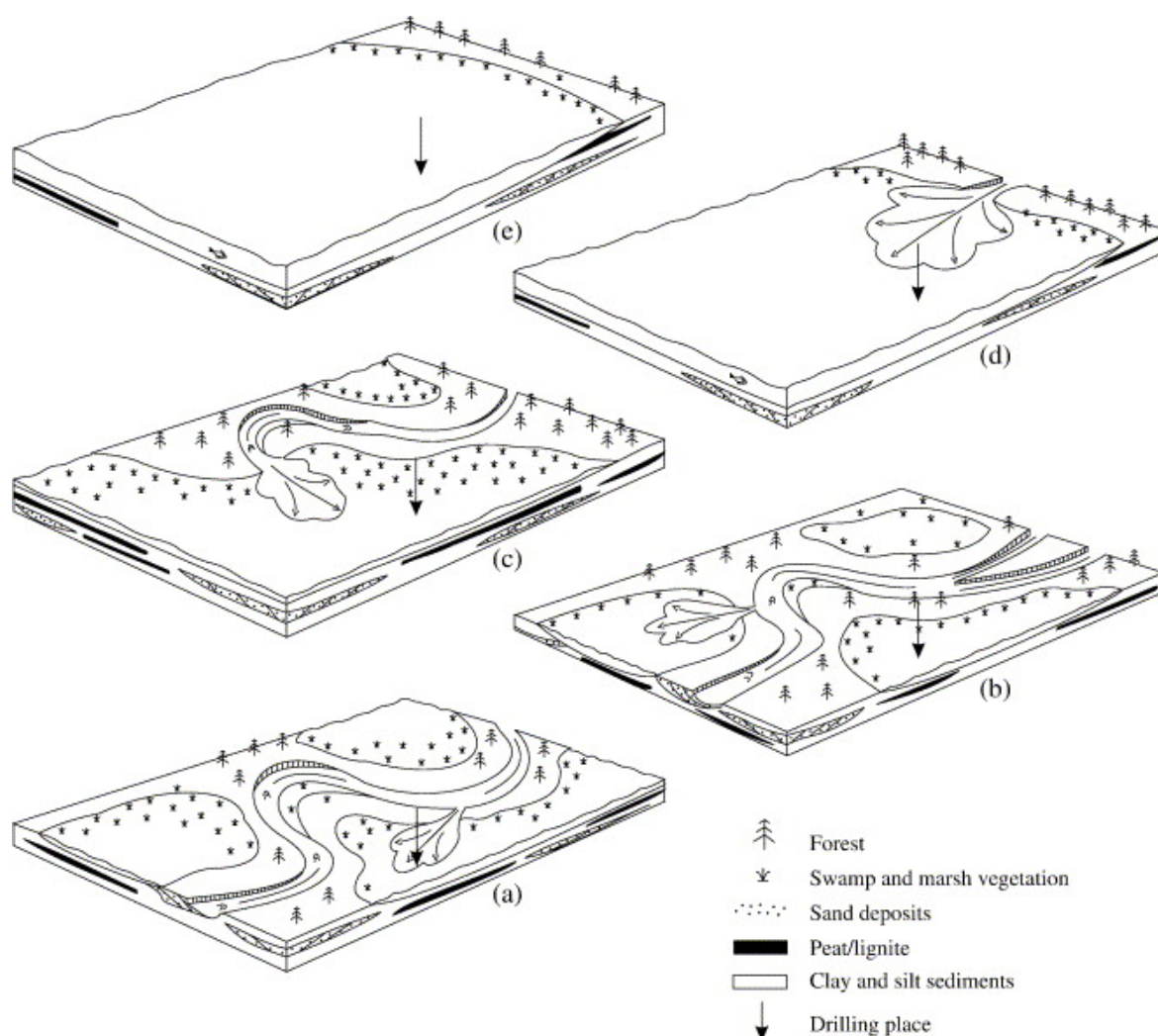


Figura 3. Deposición de suelos lacustres en el lago paleolítico de la localidad de Bogotá (Colombia): (a) Depósitos fluvio-lacustres. (b) depósitos lacustres y palustres poco profundos. (c) depósitos palustres. (d) Depósitos fluvio-lacustres en pleamar, (e) Depósitos lacustres. Diagramas de bloques esquemáticos por (Caicedo et al., 2018; Torres et al., 2005)

La región plana de Bogotá ha experimentado un proceso de formación mediante la sedimentación que tuvo lugar en un antiguo lago de origen tecto sedimentario. Este cuerpo lacustre recibió diversos materiales provenientes de condiciones lacustres, fluviales y fluvio-glaciares, desde el final del período Plioceno hasta su completa desecación hace aproximadamente 30.000 años. En la actualidad, la composición de esta formación consiste en arcillas plásticas de tonalidad gris oscuro, dispuestas en estratos con un espesor que varía entre 0,4 y 1,0 metros. Dentro de estos estratos, se observan lentes de arena y grava, así como intercalaciones de ceniza volcánica de color gris blancuzco. El espesor máximo de los sedimentos, hasta alcanzar la roca subyacente, presenta valores de hasta 780 metros en la parte occidental del depósito, disminuyendo progresivamente a medida que nos acercamos a la zona montañosa (Ávila A., 2004).

Así mismo, como se describe en (Chicangana et al., 2015), tanto para la Sabana como la ciudad de Bogotá se sitúan en una región con una alta probabilidad de experimentar sismos significativos debido a la configuración geomorfológica de su sistema. Esta configuración está asociada al Sistema de Fallas de la Falla Frontal de la Cordillera Oriental, lo cual aumenta el riesgo sísmico en esta zona. En esta región se localiza el límite entre el bloque andino y la placa suramericana, lo cual la convierte en una zona de intensa actividad tectónica. Esta dinámica se debe al empuje generado por la placa de Nazca, que subduce por debajo de la placa suramericana, generando fuerzas significativas en este sector del continente. Como resultado, se observa una notable movilidad tectónica en esta área geográfica.

4.2.2 Hidrogeología de Bogotá

La ciudad de Bogotá, exhibe atributos hidrogeológicos y climáticos que se asemejan a los descritos en la anterior sección debido a su ubicación dentro de la sabana.

El depósito lacustre de Bogotá se encuentra en un altiplano andino a 2600 m de altitud aproximadamente y más del 60% de la ciudad esta cimentada sobre suelos blandos. Por otro lado, la profundidad del depósito puede llegar a 586 m en algunas áreas de la meseta (Caicedo et al., 2018). El altiplano de Bogotá, localizado en las coordenadas geográficas 4° N y 74° O, se y su formación se remonta a un lago que se desarrolló durante el Plio-Pleistoceno y que gradualmente se fue colmando de agua a lo largo del tiempo. La presencia de depósitos profundos de suelos puede ser atribuida al hundimiento del fondo de la cuenca, acompañado de la acumulación gradual de sedimentos lacustres predominantes durante los últimos 3 millones de años (Caicedo et al., 2018; Hooghiemstra and Sarmiento, 1991).

El agua consumida por los habitantes de Bogotá es proveniente de los páramos de Chingaza, Guerrero y Sumapaz. La captación, almacenamiento, tratamiento y distribución de este recurso hídrico es llevada a cabo por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. La infraestructura utilizada incluye embalses, plantas de tratamiento y redes de distribución. Los páramos mencionados dan origen a una red de quebradas y ríos que conforman las cuencas hidrográficas principales para el abastecimiento de la ciudad. Estas cuencas están asociadas a los ríos Chuza y Guatiquía, río Bogotá y río Tunjuelo, respectivamente. El agua proveniente de estas cuencas es almacenada en los embalses de Chuza y San Rafael (Sistema Chingaza), Neusa, Sisga y Tominé (Sistema Norte), y La Regadera y Chisacá (Sistema Sur). Posteriormente, se realiza su tratamiento en las plantas de Tibitoc, Wiesner y Dorado (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá -ESP, nf).

Las características climáticas de la ciudad de Bogotá, al estar localizada dentro de la sabana, presenta una temperatura promedio de 13.1 °C además de dos periodos de lluvias y temperaturas altas y medias (Bernal, Germán Horacio Rosero; Cadena and Montealegre, Martha Cecilia; Enrique, 2014).

El crecimiento de la ciudad ha llevado a un aumento de la población, causado tanto por inmigraciones impulsadas por el conflicto armado interno como por la falta de oportunidades económicas en las zonas rurales para algunos sectores de la población colombiana, como se expone en (Alcaldía mayor de bogotá, 2017). Según datos del DANE, la población estimada de Bogotá en 2021 era de 7.834.167 habitantes. La migración hacia el interior del país ha afectado las condiciones de vida en varias localidades y municipios del área de estudio (Lizarazo, 2011).

Como se describe en (Lizarazo, 2011), la población de la ciudad ha crecido 8,5 veces en los últimos 60 años, pasando de 883.410 habitantes en 1952 a 7,47 millones de habitantes en 2011. El crecimiento poblacional ejerce presión sobre el uso del suelo y el medio ambiente. Las propiedades rurales se ven afectadas por el desarrollo acelerado de las comunidades residenciales locales. Además, el plan de construcción de la zona industrial indica que habrá más problemas de contaminación en el futuro (Piña and Martínez, 2014). Un ejemplo de ello es el aumento del consumo de agua en los sectores industrial y residencial de la ciudad, como consecuencia del crecimiento de la población. En 2020, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) reportó datos de consumo de agua desagregados por tipo de uso. Para el consumo residencial (relacionado con el número de hogares e individuos), se registró un total aproximado de 650.774.904 litros por día, mientras que para el sector no residencial, la demanda reportada alcanzó aproximadamente los 37.164.547 litros por día (López Hernández et al., 2020).

Este aumento en el consumo de agua ha tenido varias consecuencias, entre ellas el impacto sobre el medio ambiente local, como lo evidencia (Ávila, 2004), particularmente en relación con los fenómenos de contracción y agrietamiento de los suelos arcillosos en Bogotá. El estudio realizó diversas pruebas geotécnicas en muestras de un depósito lacustre para simular las condiciones que pueden dar lugar a estos fenómenos. La extracción de agua subterránea se ha señalado como la principal causa de las grietas por hundimiento que resultan en la desecación del suelo. A pesar de ello, otras estructuras geológicas profundas, como las fallas o los contactos litológicos, también pueden dar lugar a discontinuidades superficiales, escalones y grietas en zonas propensas a hundimientos. Estas estructuras, además, pueden ocasionar deformaciones no uniformes, contribuyendo así a la generación de irregularidades en la superficie.

Aparte de la correlación existente entre la subsidencia y la extracción de aguas subterráneas, existen otros factores que podrían ser considerados como contribuyentes a este fenómeno. Estos factores consisten en: a) la disminución de los niveles piezométricos en las capas más profundas del suelo, b) la desecación de la superficie resultante de la disminución de los niveles de agua subterránea, c) la influencia de la vegetación, d) la sobrecarga del suelo debido a desarrollos extensivos de construcción, e) la disminución de la superficie del suelo causada por efectos tectónicos relacionados con la disposición regional de las placas tectónicas, f) la consolidación secundaria de los depósitos de arcilla debido a efectos viscosos sin cambios en los niveles de carga, y g) las obras subterráneas y las operaciones de minería profunda (Ávila and Castro, 2011).

5 DATOS Y MÉTODOS

En este estudio, se emplearon datos de dos tecnologías desarrolladas en las últimas décadas: la Interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) y las redes del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS). Estas tecnologías desempeñan un papel fundamental en la monitorización de deformaciones en la actualidad. La técnica principal utilizada en este caso de estudio, es la técnica multitemporal del InSAR, reconocida como una herramienta espacial altamente precisa para la detección de la tendencia de subsidencia en campos o áreas urbanas.

5.1 Datos InSAR y GNSS

Este estudio analizó la sabana de Bogotá y la ciudad de Bogotá a través de imágenes SAR Sentinel-1A/B en el espectro de banda C, con una longitud de onda de aproximadamente 5,7 cm y una frecuencia de 5,3 GHz. Para el análisis, se obtuvieron imágenes en formato SLC (Single Look Complex) ya enfocados en modo interferométrico de barrido ancho (IW), que proporciona una amplia cobertura del área con dimensiones de imagen de 240×170 km. El estudio utilizó específicamente imágenes con polarización vertical (VV). Además, se utilizaron dos conjuntos de datos independientes, adquiridos de diferentes geometrías, comprendidas las órbitas ascendentes y descendentes. El conjunto de datos ascendente comprende 107 escenas SAR capturadas entre octubre de 2014 y mayo de 2021, ubicadas en el medio de la subfranja 2. Por otra parte, el conjunto de datos descendente incluye 153 escenas SAR capturadas entre octubre de 2014 y mayo de 2021, también ubicadas en la mitad de la subfranja 2. La Tabla 3 proporciona las principales características de estos dos conjuntos de datos. La distribución de las líneas de base temporales y perpendiculares utilizadas en el análisis multitemporal (MT-InSAR) para conjuntos de datos ascendentes y descendentes se muestra más adelante en la sección 4.2.1.

Tabla 3. Sentinel-1A/B, Datos SAR de la Banda C utilizados en este estudio (Long. de onda de 5,7 cm).

Parámetros	Ascendente	Descendente	Modo de Adquisición
Periodo de Adquisición	15/10/2014 -29/05/2021	10/10/2014-24/05/2021	
Número total de escenas en el periodo	107	153	
Numero de Track	150	69	Interferometric Wide
Angulo de visión (°)	39.33°	39.56°	
Heading Azimuth (°)	348.33°	191.65°	
Número de Puntos PS Generados	263669	284778	

Como método de verificación secundario, utilizamos datos de las series de temporales de tres estaciones GNSS (BOGT, BOGA y ABCC) ubicadas en la ciudad de Bogotá. Como se ilustra en la Figura 4, en las áreas de subsidencia donde se han instalado antenas, se ha registrado un patrón a lo largo de las últimas décadas en estas estaciones, como demuestran múltiples estudios. La estación BOGT está ubicada en un espacio verde dentro del edificio del SGC, mientras que BOGA está ubicado en la azotea del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (Mora Paéz et al., 2020), ambas estaciones ubicadas en el mismo barrio. Mientras que ABCC, se localizada en la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) en el barrio Granjas del Techo.

Todas estas estaciones están incluidas en la red MAGNA-ECO, que es la Red de Estaciones GNSS de Operación Continua a nivel nacional de Colombia. La información recopilada por estas estaciones es transmitida a diferentes centros de procesamiento del Sistema de Referencia

Geocéntrico para las Américas (SIRGAS), ubicados en Sudamérica. Posteriormente, los datos son procesados para adquirir soluciones finales que son publicadas abiertamente por este organismo oficial. El objetivo principal es examinar las fluctuaciones en las componentes Este y Altura a lo largo de la duración de este estudio y verificar si las tasas de deformación coinciden o se ajustan con los resultados de las series temporales analizadas en el estudio MT-InSAR. Las estaciones BOGT y BOGA están en operación desde el año 2000, proporcionando un conjunto de datos que cubre alrededor de 21 años hasta 2021. Por otro lado, la estación ABCC se incorporó a la red SIRGAS en 2010, dando como resultado un conjunto de datos que abarca un período de 11 años.

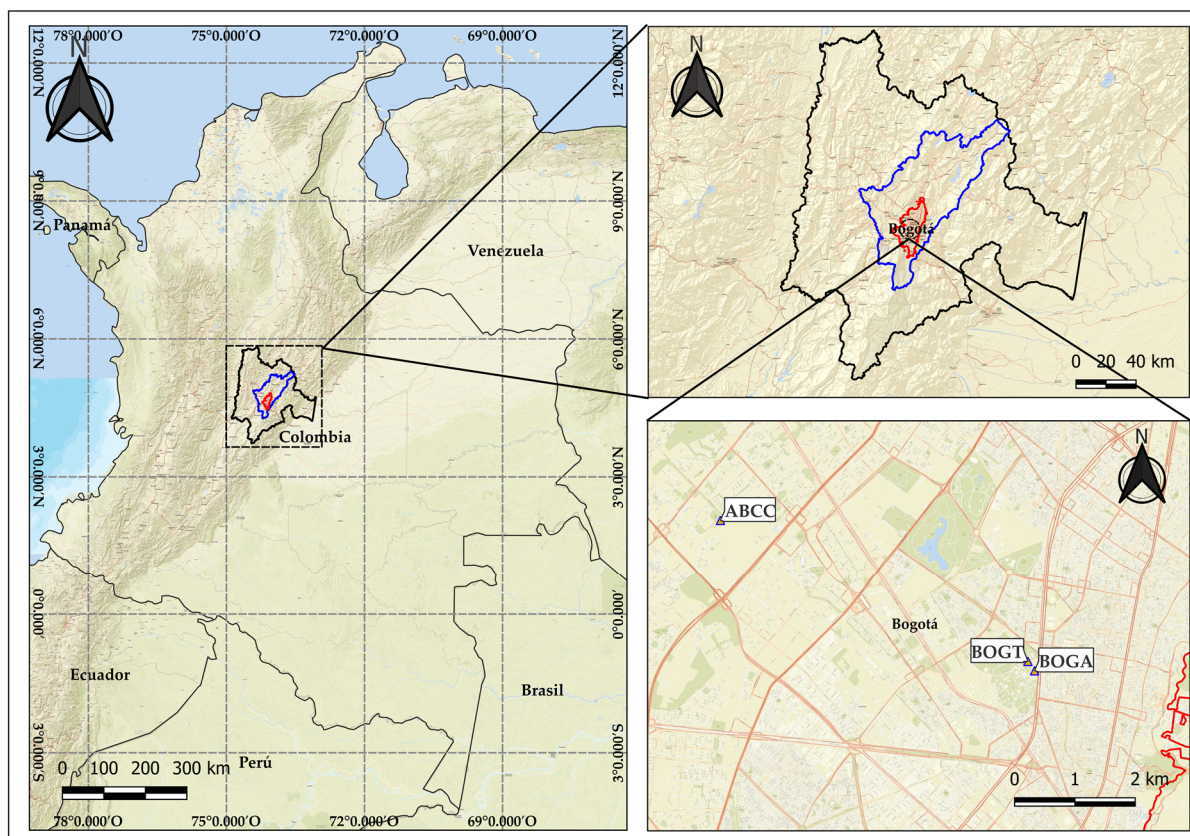


Figura 4. Ubicación de las estaciones GNSS BOGT, BOGA y ABCC en Bogotá.

5.2 Metodología

5.2.1. Fundamentos de La Interferometría Radar de Apertura Sintética (InSAR)

La interferometría de radar de apertura sintética es una técnica avanzada utilizada para obtener imágenes y medir la topografía de una superficie, así como para detectar cambios a lo largo del tiempo y en las características detalladas de la misma. Esta técnica explota la fase de la señal de radar coherente, que es una componente crucial de la microonda emitida por el sensor. La interferometría ha transformado la teledetección por radar, anteriormente interpretativa, en una herramienta cuantitativa con diversas aplicaciones. Entre ellas, se destaca su utilidad en cartografía, geodesia, caracterización de la cubierta terrestre y evaluación de riesgos naturales (Rosen et al., 2010).

Los satélites de Radar de Apertura Sintética (SAR) se clasifican como satélites activos, lo que implica que emiten su propia señal hacia la tierra y, simultáneamente, reciben señales. Además, cuentan con una fuente de energía propia y un sistema de transmisión. Estos pueden ser satélites de baja órbita terrestre (LEO) o geoestacionarios dependiendo de su misión y aplicación. La forma del satélite se optimiza específicamente para albergar el sistema radar y otros instrumentos necesarios. La antena SAR desempeña un papel crítico en el sistema y tiene un impacto directo en la resolución y características del radar. Usualmente, la antena adopta el formato de “phased array”, lo que significa que puede ajustar electrónicamente la dirección del haz sin necesidad de movimientos físicos. Como resultado, crea artificialmente una antena mejorada o sintética, combinando la información de muchos retornos de impulsos recibidos dentro de la antena móvil. Esta capacidad posibilita la formación de imágenes en distintas direcciones sin requerir mecanismos móviles adicionales. Durante su funcionamiento, la antena emite pulsos de radar y, a su vez, recibe las señales reflejadas desde la superficie terrestre.

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), utiliza múltiples imágenes de radar para extraer información topográfica y cambios en la superficie, como la deformación del suelo. Los sistemas SAR emiten ondas electromagnéticas con longitudes de onda que van desde milímetros hasta centímetros y que suelen descomponerse en dos componentes: Fase y Amplitud. Al transmitir y recibir señales activamente, el SAR puede funcionar en cualquier condición meteorológica, ya que las longitudes de onda del radar no se ven afectadas significativamente por las nubes. Esto permite que el SAR opere tanto de día como de noche, proporcionando datos precisos sobre el terreno (Zhong et al., 2010).

Los sensores satelitales interferométricos SAR emiten señales de microondas hacia la zona objetivo y capturan las señales retro dispersadas que se reflejan de nuevo en dirección del sensor para crear una imagen. El satélite despliega una capacidad de medición exhaustiva tanto de la amplitud como de la fase de la señal de la onda del radar. La amplitud representa la intensidad de la señal registrada, mientras que la fase indica la fracción de un ciclo completo de ondas que alcanza el sensor. La medida precisa de la fase resulta fundamental para evaluar el desplazamiento. Una diferencia en la fase entre dos mediciones secuenciales revela cambios en la superficie. La Figura 5, ilustra cómo se determina el desplazamiento a partir de una diferencia de fase. Cuando la superficie terrestre se hunde, la señal de radar debe recorrer una mayor distancia hasta alcanzarla. Esto se traduce en una reflexión adicional y en un registro de una fracción adicional de la onda de radar, conocida como diferencia de fase (resaltada en rojo y azul). La longitud de un ciclo de fase es del orden de centímetros y varía según el satélite. Dado que esta longitud se conoce con alta precisión, podemos calcular el desplazamiento de la superficie con una precisión milimétrica.

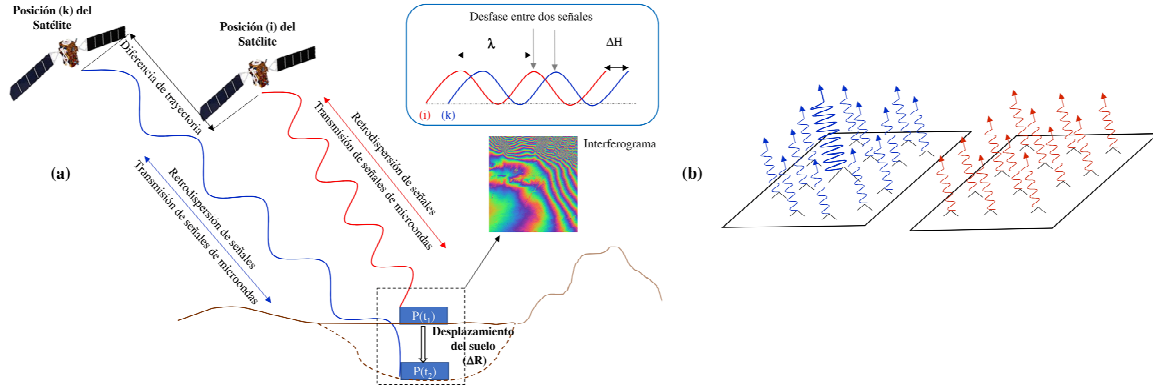


Figura 5. (a) Diferencia de fase entre dos señales y Desplazamiento del terreno(ΔH). (b) Representación de pixel en la imagen izquierda de un Dispensor persistente en color azul y en la imagen derecha en color rojo representación de un dispensor distribuido.

Los ecos sucesivos son adecuadamente muestreados y guardados en una matriz 2D conocida como "matriz de datos en bruto", que aún requiere ser procesada. Las imágenes SAR pueden entregarse en formato L0 (datos en bruto) o L1 (SLC, Single Look Complex). Antes de realizar el proceso de alinear y registrar dos o más imágenes de radar adquiridas en momentos diferentes (Corregistro) para garantizar una comparación precisa entre las imágenes, los datos brutos deben enfocarse para alinear las imágenes SAR y asegurar que los píxeles correspondientes contengan la misma área de terreno. Para la interferometría, se requieren imágenes con geometría nominal similar (órbita y ángulo de incidencia). Sin embargo, debido a pequeñas diferencias en la posición del satélite en cada adquisición, pueden surgir desalineaciones entre las imágenes. Normalmente, se toma una imagen como referencia (Maestra) y las demás imágenes (Esclavas) se remuestrean en la misma cuadrícula de muestreo. Las coordenadas de píxeles se dividen en "*samples*" en el rango y "*lines*" en el azimut. (Perissin, 2016).

La generación de un interferograma, involucra el proceso de comparar y analizar las fases de dos imágenes SAR adquiridas en diferentes momentos sobre la misma área. Después de seleccionar un par de imágenes, se llevan a cabo correcciones geométricas para alinear adecuadamente los datos y evitar descorrelaciones debido a la dispersión temporal y geométrica (Rosen et al., 2010). El interferograma SAR se obtiene al realizar una multiplicación cruzada, píxel por píxel, entre la primera imagen SAR y el conjugado complejo de la segunda. De esta manera, la amplitud del interferograma resulta de la multiplicación entre la amplitud de la primera imagen y la amplitud de la segunda, mientras que su fase, denominada fase interferométrica, representa la discrepancia de fase entre ambas imágenes. Este mapa visualiza patrones de franjas interferométricas, donde cada franja representa un cambio en la distancia entre el satélite y la superficie terrestre (Figura 5a).

En la Figura 5a, se observa el desplazamiento del retrodispersor o punto en el suelo, donde se observa el cambio de distancia de la onda emitida por el sensor a lo largo de su órbita. Dando como resultado dos adquisiciones de datos diferentes en tiempo y por lo tanto dos fases diferentes. La fase interferométrica ($\Delta\phi_{i,k}$) y la diferencia en la longitud de la trayectoria a un objetivo están directamente relacionadas desde el radar, a lo largo de la dirección de línea de visión (LOS) (Ec.1).

$$\Delta\phi_{i,k} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot [R_k - R_i] + \phi \quad (\text{Ec.1})$$

$\Delta\phi_{i,k}$: Fase interferométrica en las posiciones i,k.

λ : Longitud de onda.

ϕ : Cambios de fase debido a condiciones atmosféricas, distorsiones topográficas durante las adquisiciones de las imágenes y ruidos del sistema por diversas condiciones.

Donde los cambios de fase interferométrica se pueden expresar como la suma de todas las componentes que afectan al sistema como se observa en la Ec.2.

$$\Delta\phi_{i,k} = \phi_{deformacion} + \phi_{atmosferica} + \phi_{topografica} + \phi_{ruido} \quad (\text{Ec.2})$$

$\phi_{atmosferica}$: Cambio de fase atmosférico debido al retraso de la señal debido a las condiciones meteorológicas durante la adquisición de las imágenes (Minh et al., 2020).

$\phi_{topografica}$: Surgen como consecuencia de la variación de los parámetros de adquisición como por ejemplo el ángulo de visión (LOS) del satélite durante el recorrido orbital.

ϕ_{ruido} : Se pueden catalogar como ruido, todo tipo de interferencia que se debida a la descorrelación temporal, los errores de registro, la descorrelación espectral no compensada, los errores orbitales, la humedad del suelo y el ruido térmico (Minh et al., 2020).

Para analizar las deformaciones del suelo o las subsidencias, el foco de interés recae en los cambios de fase de la deformación ($\phi_{deformación}$). Esto se debe a que los otros términos expresados en la Ec.2 están vinculados a la descorrelación generada al emitir la señal del sensor, la configuración del terreno en el área de interés y la atmósfera por la que atraviesan las ondas. Por lo tanto, para obtener el valor de las deformaciones, es necesario realizar un tipo de corrección para cada término de la Ec.2. En el caso de $\phi_{Topográfica}$, se puede estimar y corregir utilizando información precisa de la órbita y un modelo de elevación digital (DEM), específicamente el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) del área de interés (AOI).

En el proceso de interferometría SAR, la atmósfera puede introducir errores en las mediciones de fase, especialmente en áreas con condiciones atmosféricas cambiantes. A menudo, los modelos atmosféricos completos pueden ser complejos y difíciles de implementar. En lugar de modelar directamente la fase atmosférica, a veces se emplean técnicas interferométricas como la interferometría diferencial, donde las diferencias de fase entre dos puntos cercanos se utilizan para mitigar el efecto de la atmósfera. Este enfoque no modela la fase atmosférica APS de manera explícita, pero busca reducir su impacto al comparar las diferencias de fase en lugar de la fase absoluta en un solo punto.

Sin embargo, la técnica de DInSAR (Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética) no está exenta de limitaciones. La reflectividad del terreno puede desencadenar descorrelación en el radar, lo que dificulta la interpretación de la fase InSAR. Además, el vapor de agua atmosférico puede introducir retrasos en la señal del radar, resultando en mediciones de fase precisas, pero no exactas. Fue necesario más de una década para abordar estas limitaciones mediante el desarrollo de métodos que aprovechan los datos multitemporales (Perissin, 2016).

Para superar las descorrelaciones temporales y geométricas en DInSAR, se han desarrollado varias técnicas MT-InSAR (Crosetto et al., 2016; Ferretti et al., 2001; A. J. Hooper, 2008; Mora et al., 2002).

En este estudio, hemos empleado la técnica MT-InSAR, específicamente conocida como interferometría de dispersores permanentes (PS-InSAR), para detectar principalmente píxeles

coherentes únicos en un conjunto de múltiples imágenes SAR con una línea de base considerable (incluso superior a la descorrelación). Los píxeles identificados como dispersores permanentes (PS) (A. Hooper et al., 2012) son puntos aislados con firmas de fase que pueden explicarse de manera consistente a lo largo del tiempo (Figura 5b). Diversos métodos se han desarrollado para identificar y aislar estos píxeles PS en el interferograma, empleando modelos funcionales para mapear los cambios de deformación a lo largo del tiempo. Estos métodos han tenido éxito en la identificación de píxeles PS tanto en áreas urbanas como no urbanas que experimentan deformaciones predominantemente estacionarias o periódicas. Los PS suelen asociarse con elementos ubicados sobre estructuras artificiales, tales como edificios, puentes, presas, tuberías de agua, antenas, y también con reflectores naturales estables, como, por ejemplo, rocas expuestas.

En este estudio, el análisis de las imágenes radar se llevó a cabo con el software SARPROZ (www.sarproz.com). Los resultados PS-InSAR se obtuvieron siguiendo el flujo de trabajo mostrado en la Figura 6, que se describe brevemente a continuación.

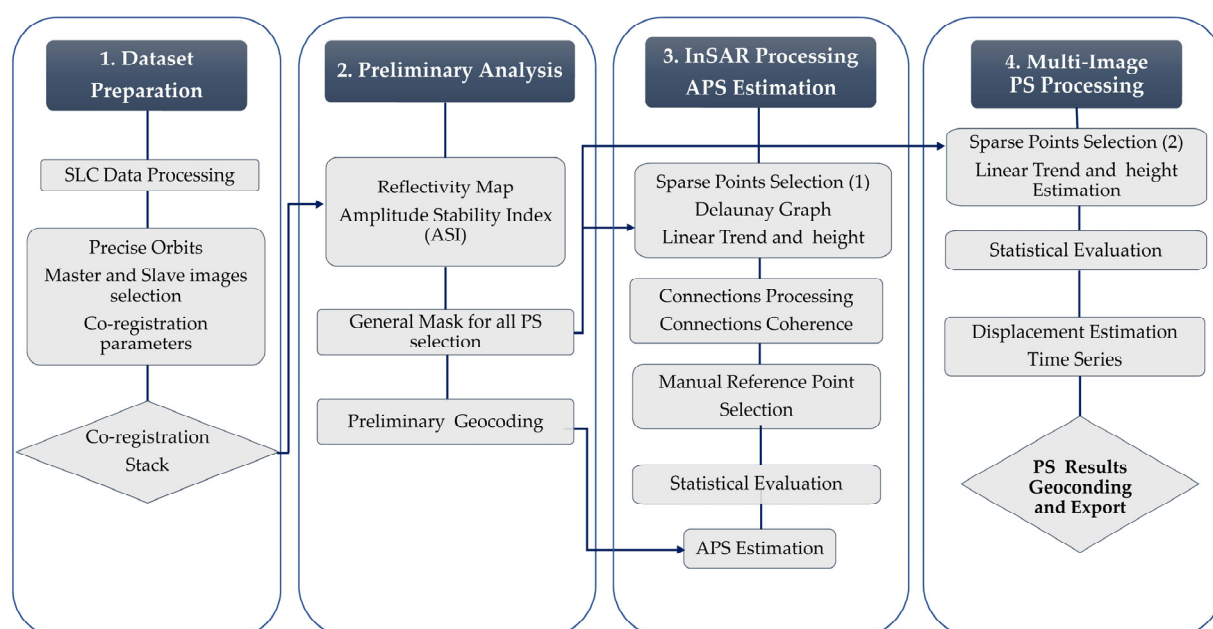


Figura 6. Workflow ilustrativo y simplificado del procesamiento ejecutado en SARPROZ para el análisis PS-InSAR.

El procesamiento comienza con la importación de imágenes, la aplicación de órbitas precisas y la definición del conjunto de datos, que incluye la selección de imágenes maestras y esclavas. En la sección 5.1 se indica que el conjunto de datos consta de 107 imágenes tomadas entre el 15 de octubre de 2014 y el 29 de mayo de 2021 en la órbita ascendente (Tabla 3). Para este conjunto, se seleccionó la imagen maestra adquirida el 2 de junio de 2018. El segundo conjunto de datos consta de 153 imágenes para la órbita descendente, obtenidas entre el 10 de octubre de 2014 y el 24 de mayo de 2021, con imagen master adquirida el 26 de febrero de 2017 (Tabla3). Una vez seleccionada la imagen maestra y extraídas las imágenes esclavas, el registro conjunto se realiza utilizando las órbitas precisas. La Figura 7 muestra la distribución de referencia temporal y perpendicular para conjuntos de datos ascendentes y descendentes.

El segundo paso del proceso consiste en realizar un análisis preliminar para calcular el mapa de reflectividad y el Índice de Estabilidad de Amplitud (ASI) de todo el AOI. Posteriormente, se elige una máscara para la selección de puntos y se realiza una geo codificación

preliminar utilizando el Modelo Digital de Elevación (DEM) de 1 arco segundo de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

La siguiente fase implica el procesamiento InSAR, que incluye el cálculo de interferogramas, la evaluación de la coherencia en el espacio de la imagen y la determinación de la coherencia espacial (coherencia media de los interferogramas seleccionados). En la etapa inicial del análisis multitemporal, se procede con la estimación de la pantalla de fase atmosférica (APS), la cual se evalúa y elimina para cada imagen SAR mediante la aplicación de diversos filtros, según estudios previos (Beladam et al., 2019; Perissin, 2016). La ASI se calculó mediante la Ec 3:

$$ASI = 1 - D_A = 1 - (\sigma_A/m_A) \quad (\text{Ec.3})$$

donde D_A representa la dispersión de amplitud, σ_A representa la desviación estándar de amplitud en el tiempo, y m_A representa la desviación media de la amplitud en el tiempo.

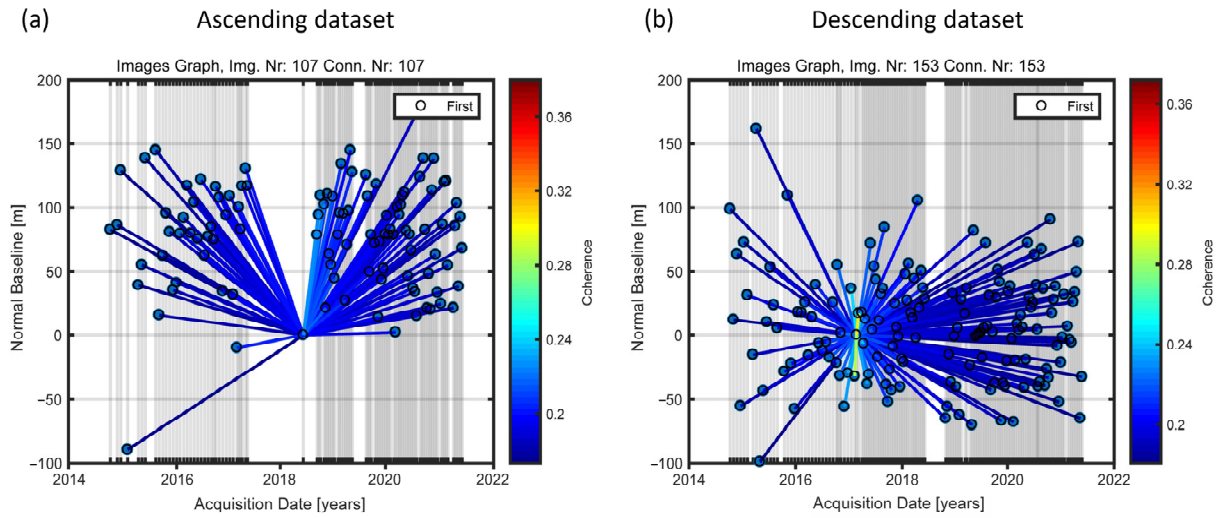


Figura 7. Distribución temporal frente a la línea de base perpendicular para las orbitas. (a) Ascendente. (b) Descendente. La barra de color representa la coherencia espacial media de todos los interferogramas.

Antes de llevar a cabo una evaluación de la estabilidad de fase, es crucial estimar y eliminar influencias como la pantalla de fase atmosférica (APS), errores en el Modelo Digital de Elevación (DEM) e imprecisiones orbitales. A diferencia de la fase, los valores de amplitud absoluta se ven menos afectados por estos fenómenos. Por lo tanto, se espera que los píxeles que mantengan una amplitud similar a lo largo de múltiples adquisiciones de datos tengan una dispersión de fase mínima (Fárová et al., 2019).

Para este estudio, se fijó un umbral ASI superior a 0,75 para la selección inicial de puntos dispersos (Sparse points), lo que redujo el número de puntos de datos, pero mejoró la precisión de las estimaciones APS. Los primeros puntos PS crean una red de referencia mediante triangulación de Delaunay, y los cálculos incluyen la velocidad de deformación diferencial y el error topográfico residual para cada conexión. A continuación, se sustrae un modelo de residuos lineales de altura y velocidades de desplazamiento que busca corregir las diferencias lineales predichas y observadas, lo que da como resultado APS obtenidos a partir de residuos de fase mediante inversión de gráficos. Se fija un PS como referencia, y la calidad del APS se evalúa

mediante un análisis de coherencia temporal tras la inversión del gráfico y la eliminación del APS.

Seleccionamos los puntos PS finales para las estimaciones subsiguientes de velocidad lineal y altura después de realizar la estimación de APS. Con el objetivo de asegurar una cobertura densa de puntos PS, aplicamos un umbral de ASI mayor a 0.6. Durante este proceso de procesamiento multi-imagen de PS, empleamos parámetros similares y un punto de referencia utilizado previamente durante la estimación de APS. Las deformaciones con respecto a este punto de referencia se presentan en la dirección de la línea de visión (LOS). En los mapas de deformación, los movimientos positivos, que indican que los PS se desplazan hacia el sensor, se representan en azul, mientras que los movimientos negativos, que señalan que los PS se alejan del sensor, se muestran en rojo. Esta metodología nos permite visualizar y entender los desplazamientos de los PS de manera clara, proporcionando una representación gráfica de las variaciones en la dirección LOS. La consistencia en el uso del punto de referencia y la consideración de umbrales garantizan resultados más precisos y confiables en nuestras estimaciones subsiguientes.

La etapa final incluye la geo codificación y visualización, generando series temporales de deformación para puntos PS con coherencia temporal mayor a 0.6–0.7.

Este procesamiento se realizó de manera independiente para conjuntos de datos ascendente y descendente. Después de obtener las deformaciones de LOS para ambas órbitas, se extraen los componentes verticales y horizontales este-oeste para cada PS a través de la descomposición del movimiento.

5.2.2. GNSS

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) ha revolucionado la forma en que nos orientamos y navegamos en el mundo moderno. Consiste en una constelación de satélites en órbita alrededor de la Tierra que transmiten señales precisas y sincronizadas a receptores en la superficie terrestre. Estas señales permiten determinar la posición, la velocidad y el tiempo con una gran precisión en cualquier lugar del planeta. La estructura de los sistemas de navegación por satélite se compone de tres segmentos bien definidos: un segmento espacial, un segmento de control y un segmento de usuarios (García Álvarez, 2008)

El GNSS se ha convertido en una tecnología esencial para una amplia gama de aplicaciones industriales y personales. En esta introducción, exploraremos brevemente los fundamentos del GNSS, su funcionamiento, los sistemas de navegación por satélite más conocidos, como el GPS (Sistema de Posicionamiento Global), GLONASS (Sistema de Navegación Global por Satélite) y Galileo.

El Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS) es un sistema de posicionamiento que se basa en la interacción entre satélites en órbita y receptores en la Tierra. Los satélites del GNSS, como el GPS (Sistema de Posicionamiento Global), GLONASS (Sistema de Navegación Global por Satélite), Galileo, Beidu, etc., emiten señales de radiofrecuencia que contienen información sobre su posición y tiempo de transmisión. Estas señales son recibidas por los receptores GNSS en la superficie terrestre.

El principio fundamental del GNSS es la trilateración (Hofmann-Wellenho, Bernhard Lichtenegger and Wasle, 2008). Para determinar su posición, un receptor GNSS mide el tiempo que tarda en recibir las señales de al menos cuatro satélites. Cada satélite transmite una señal portadora que contiene un código de tiempo preciso y una ubicación conocida. El receptor compara el tiempo de llegada de las señales de diferentes satélites y calcula las distancias entre sí y cada uno de los satélites. Utilizando estos datos, el receptor realiza cálculos matemáticos complejos para determinar su posición tridimensional con una precisión de varios metros.

El GNSS también se beneficia de la corrección de errores para mejorar aún más la precisión de las mediciones. Los errores pueden surgir debido a efectos atmosféricos, retrasos en la señal, interferencias electromagnéticas, entre otros factores. Para corregir estos errores, se utilizan técnicas como la corrección diferencial, que compara las mediciones de un receptor GNSS de referencia con las mediciones de otros receptores cercanos. Estas correcciones se transmiten a los receptores GNSS en tiempo real, lo que permite obtener mediciones de posición más precisa (Hofmann-Wellenho, Bernhard Lichtenegger and Wasle, 2008). Esta técnica geodésica se ha convertido en una herramienta esencial en numerosos campos, incluyendo la monitorización de la corteza terrestre, subsidencias, estabilidad de estructuras entre otros, debido a su capacidad para proporcionar información precisa de posicionamiento tanto en tiempo real o post procesamiento.

En este estudio, al tratarse de una región en Colombia se hace necesario usar la información geoespacial disponible en la región. Las estaciones colombianas que hacen parte de la red activa están reguladas por el marco de referencia oficial del país MAGNA-SIRGAS, con el cual la generación de datos espaciales es de alta calidad y confiabilidad, además de garantizar la compatibilidad de las coordenadas colombianas con técnicas espaciales de posicionamiento y con conjuntos de datos georreferenciados internacionales (IGAC, 2018).

En Colombia, la responsabilidad de la instalación de estas estaciones recae tanto en el IGAC, encargado de los sistemas nacionales de referencia geodésica, investigaciones geográficas y catastro del país, como en el SGC, que tiene la tarea de evaluar y monitorear las amenazas geológicas en todo el territorio nacional. el IGAC para procesamiento de todos los datos espaciales ha adoptado como sistema de referencia nacional geodésico el MAGNAS-SIRGAS (Marco Geocéntrico Nacional de Referencia, densificación del Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas). En esta región, se ha establecido la red MAGNA-ECO, conocida como la "Red de Estaciones GNSS de Operación Continua", como el marco geocéntrico nacional. Estas estaciones, distribuidas estratégicamente a lo largo del territorio, funcionan como puntos de referencia para los levantamientos diferenciales al recibir información satelital en tiempo real. Conformada por un total de 46 estaciones, cada una cuenta con una antena, receptor, mástil o pilastra para la monumentación, y un equipo de comunicación que facilita la transferencia de datos al Centro de Control del Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC (IGAC, 2020).

Las coordenadas de las estaciones de la Red MAGNA-ECO se procesan semanalmente en cooperación con el centro de análisis regional del servicio internacional GPS (IGS-RNAAC-SIR: Centro de Análisis Asociado de la Red Regional-SIRGAS). Estos centros generan soluciones semanales que proporcionan coordenadas de precisión milimétrica, asociadas a una época de referencia específica, y también registran los cambios a lo largo del tiempo (velocidades de las estaciones) para cada una de ellas. Esto asegura que las estaciones estén constantemente orientadas dentro del mismo sistema de coordenadas referido por los satélites GNSS (IGAC, 2018).

Las estaciones colombianas, que pertenecen al SIRGAS, constituyen una red de estaciones GNSS que operan continuamente en todo el continente americano. Estas estaciones se adhieren a una definición unificada del Sistema de Referencia Terrestre Internacional (ITRS), sirviendo como un aumento regional del Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) en las Américas y el Caribe. Las estaciones SIRGAS se clasifican en dos categorías principales: la red continental (SIRGAS-C) y varias redes de densificación conocidas como redes de referencia nacional (SIRGAS-N) las cuales se encuentran ubicadas estratégicamente en toda América Latina, mientras que las redes de densificación son específicas de cada país (SIRGAS, 2021).

Finalmente, cada semana, diez Centros de Procesamiento SIRGAS generan soluciones semanales semilibres que contienen las coordenadas de un conjunto específico de estaciones SIRGAS. Estas estaciones son procesadas por tres centros de procesamiento diferentes, asegurando una distribución equitativa. Los Centros de Procesamiento SIRGAS siguen estándares unificados basados en convenciones del Servicio Internacional de Rotación de la Tierra y Sistemas de Referencia (IERS) y directrices del Servicio Internacional GNSS (IGS). Sin embargo, las soluciones SIRGAS tienen órbitas y relojes de satélites y parámetros de orientación de la Tierra que corresponden a los valores semanales finales del IGS. Además, las posiciones de las estaciones se restringen a ± 1 m para generar las soluciones semilibres en el formato SINEX. Los Centros de Combinación SIRGAS combinan las soluciones individuales para obtener las posiciones semanales de las estaciones en el mismo marco de referencia utilizado por el IGS para calcular las órbitas de los satélites GNSS. El DGFI-TUM es responsable de procesar la red continental SIRGAS-C y combinar las soluciones de esta red con las soluciones individuales de los otros Centros de Procesamiento SIRGAS. La red SIRGAS-C, que es la densificación primaria del ITRF en América Latina, brinda una amplia cobertura y estabilidad para integrar los marcos de referencia nacionales latinoamericanos de manera consistente en el marco de referencia continental y global.

El procesamiento de las estaciones GNSS del SIRGAS sigue un protocolo establecido, el cual involucra el uso del software Bernese GNSS versión 5.2. Durante este proceso, se realiza un análisis de las discontinuidades en la posición de las estaciones, las cuales pueden ser causadas por desplazamientos sísmicos o la configuración de las antenas. Para obtener más información o para aquellos lectores interesados en profundizar en el estado del arte del procesamiento de datos GNSS, se recomienda consultar las publicaciones de SIRGAS en América Latina (Sánchez et al., 2015; Sánchez and Drewes, 2016, 2020a, 2020b).

6 RESULTADOS

6.1 InSAR Multi-Temporal

Como se explicó en el capítulo anterior, en este estudio se utilizó la técnica MT-InSAR para evaluar y procesar los conjuntos de datos Sentinel-1A/B. Esta técnica permitió examinar la acumulación espacio-temporal de la deformación del suelo en la dirección de la línea de visión del satélite (LOS) sobre la sabana y la ciudad de Bogotá durante el período de estudio. Para el procesamiento MT-InSAR, se estableció un área estable de comparación, eligiendo como punto de referencia los cerros de Suba (Figura 8), una región dentro de la ciudad caracterizada por la presencia de areniscas duras y resistentes a la erosión, un tipo de roca conocida por sus propiedades geológicas relativamente estables en comparación con los suelos arcillosos que predominan en toda la ciudad (Escobar Castro et al., 2010). Durante el análisis MT-InSAR,

se lograron identificar y procesar información de 284.778 dispersores para la órbita ascendente y 263.669 para la órbita descendente. Los dispersores se concentraron principalmente en áreas urbanas densamente pobladas dentro de la sabana, particularmente en la ciudad de Bogotá, que proporcionó los resultados individuales más representativos para el análisis temporal (Figura 8a,b).

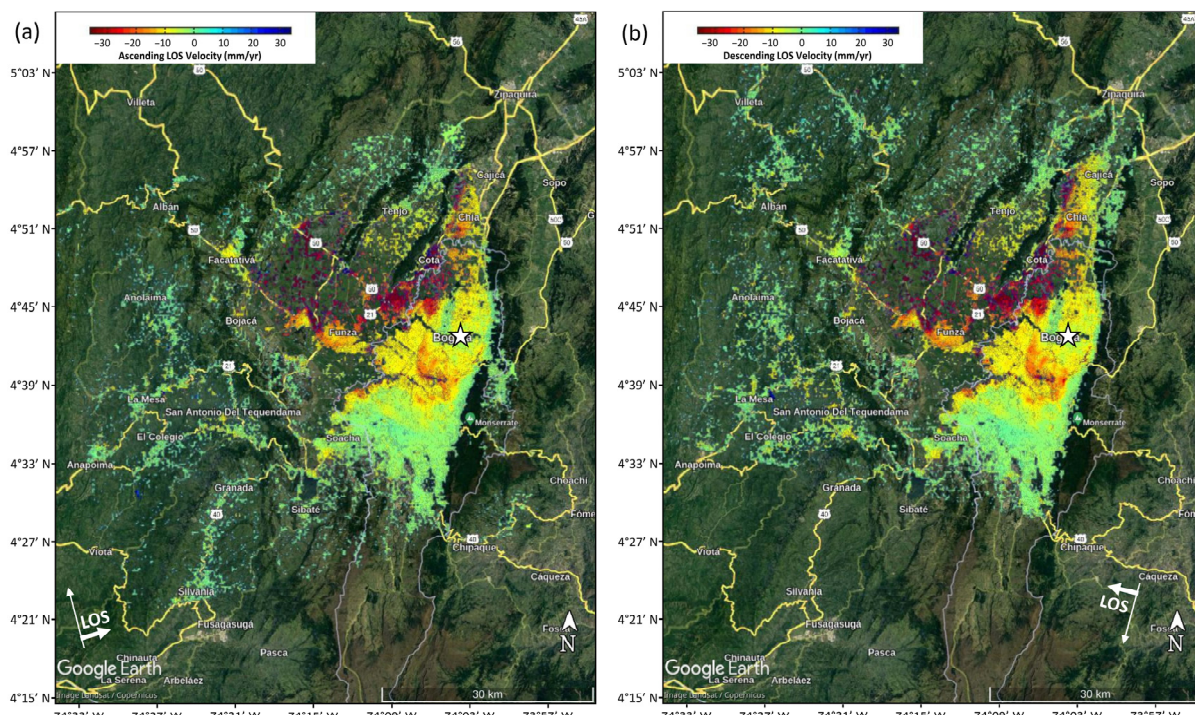


Figura 8. Mapas de velocidad media en dirección LOS (mm/año) para la sabana y la ciudad de Bogotá derivados de este análisis MT-InSAR para el periodo 2014-2021. (a). Resultados para la órbita ascendente. (b) Resultados para la descendente. La estrella blanca representa la zona supuestamente estable a efectos de referencia.

Los resultados del procesamiento MT-InSAR del estudio, reveló en el mapa deformación vertical acumulativa un patrón de regular que oscilaba entre -100 y -400 mm en varios municipios de la región central y suroeste de la sabana. Entre ellos se encuentran Madrid, Mosquera, Funza, Facatativá, Cota, El Rosal, Buenavista y Chía, entre otros (Figura 9a). Mientras tanto, las tasas de deformación horizontal variaron principalmente entre 0 y 100 mm hacia el este durante el periodo de estudio (Figura 9b).

El resultado del mapa de La Figura 10a, muestra la velocidad vertical de deformación, que indica las subsidencias que varía de -30 a -40 mm/año en múltiples municipios de la sabana, alcanzando hasta -50 a -60 mm/año en algunas áreas. Además, la Figura 10b resalta zonas particulares dentro de la región de la sabana donde se observa un desplazamiento hacia el este, indicado por puntos azules más pequeños, con una velocidad de aproximadamente 15 mm/año.

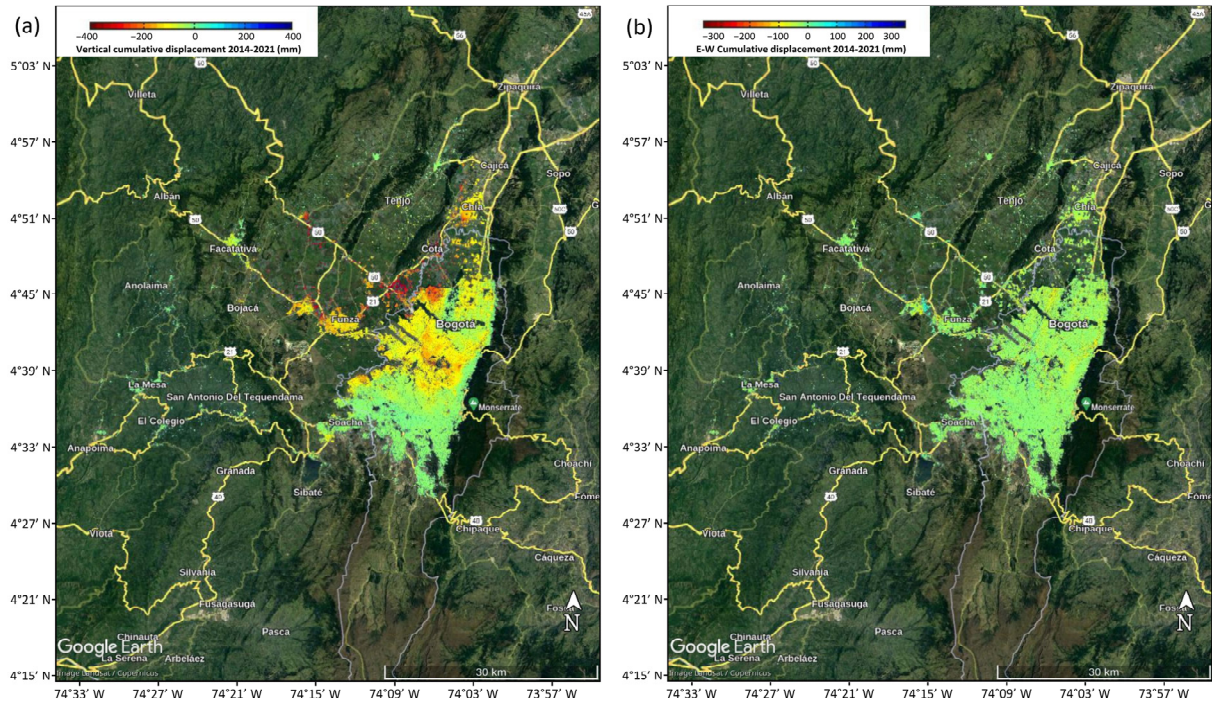


Figura 9. Resultados del procesamiento MT-InSAR del AOI. (a) Mapa de desplazamiento vertical acumulado. (b) Mapa de desplazamiento horizontal acumulado este-oeste. Las regiones resaltadas en rojo indican tasas de desplazamiento acumulativo entre -200 mm y -400 mm durante el periodo 2014-2021. Para los desplazamientos acumulativos en dirección este-oeste, los colores rojos indican movimientos hacia el oeste, mientras que los azules indican movimientos hacia el este.

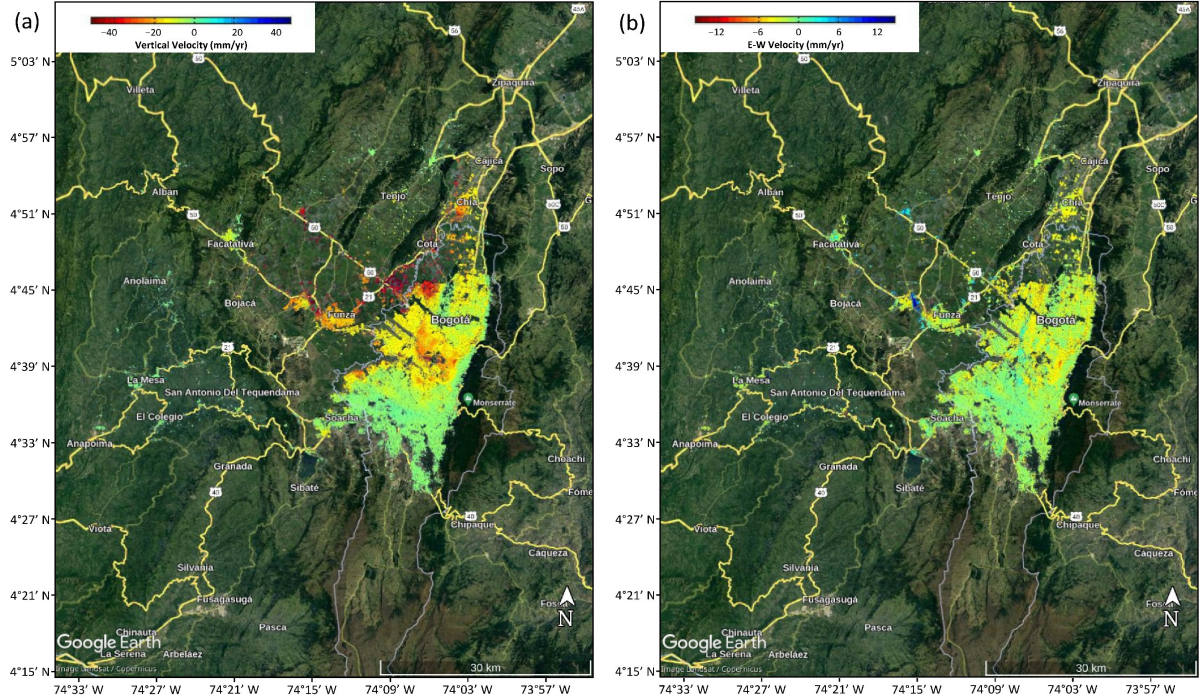


Figura 10. Tasas de deformación MT-InSAR del AOI. (a) Mapa de velocidad vertical y (b) Mapa de velocidad Este-Oeste. El mapa de velocidad Este-Oeste denota los movimientos hacia el oeste con color rojo y los movimientos hacia el este con color azul.

El análisis MT-InSAR evidencia movimientos del terreno a lo largo del AOI en ambas orbitas. La Figura 11 identifica 16 zonas específicas en las que la deformación del suelo es particularmente significativa.

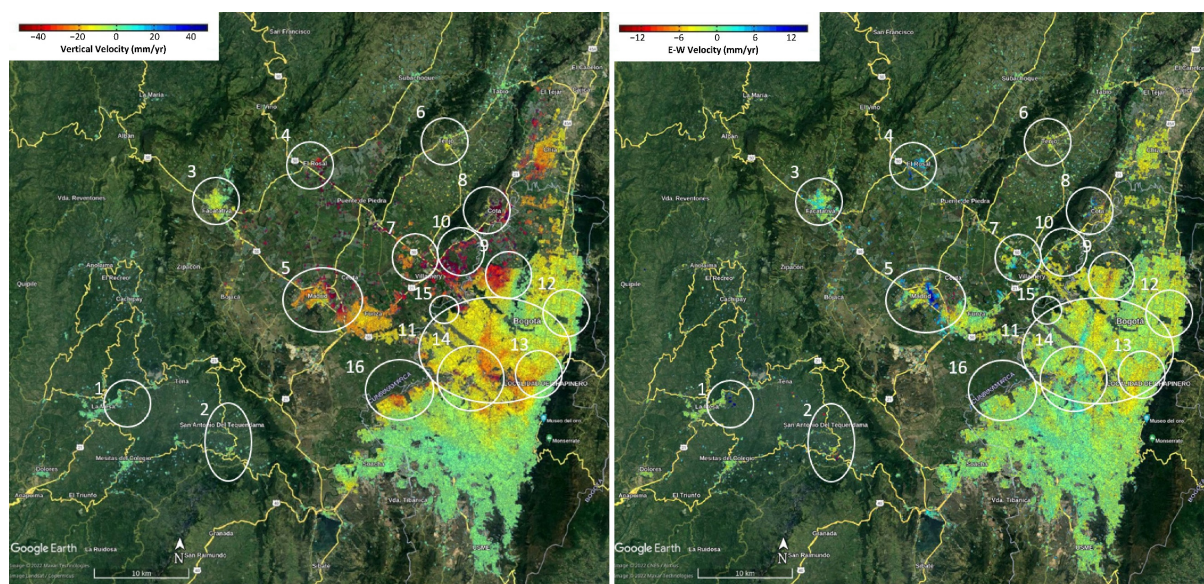


Figura 11. Análisis MT-InSAR de la sabana de Bogotá y en la ciudad de Bogotá. Tasas de velocidad de deformación vertical (imagen izquierda) y este-oeste (imagen derecha). Los círculos blancos representan las áreas 1 a 16 que fueron elegidas para un análisis detallado.

La Zona 1, que se muestra en la Figura 12, corresponde al municipio de La Mesa ubicado en la sabana de Bogotá. El análisis MT-InSAR realizado en esta área descubrió un ligero movimiento de levantamiento por debajo de 10 mm/año y un movimiento hacia el este en una zona que contiene casas de campo.

En la Figura 13 se identifica la zona 2, en la cual se localiza en el municipio de San Antonio de Tequendama, en cercanías de la sabana de Bogotá. Aquí se ha observado un desplazamiento de la pendiente hacia el oeste y subsidencias verticales. Mientras tanto, la Figura 14 ilustra el área de la zona 3, correspondiente al municipio de Facatativá. En la figura 14 se observan movimientos hacia el este que van de 0 a 6 mm/año, junto con subsidencias verticales que van de 0 a -20 mm/año. Es importante destacar que, en las zonas circundantes a Facatativá, como los campos de cultivos, invernaderos y almacenes industriales, se evidencian tasas de subsidencia vertical y desplazamientos hacia el este superiores en comparación con los registrados dentro del mismo municipio.

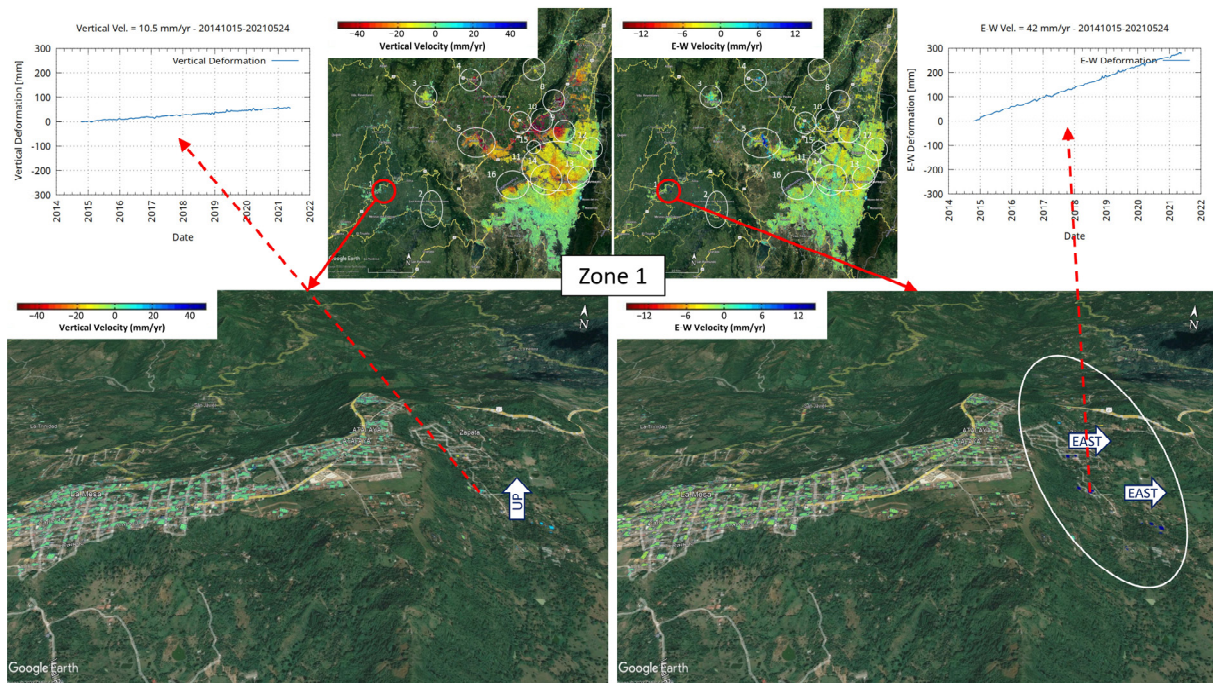


Figura 12. Resultados de series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el municipio de La Mesa. La elipse blanca indica una zona con desplazamiento hacia el este.

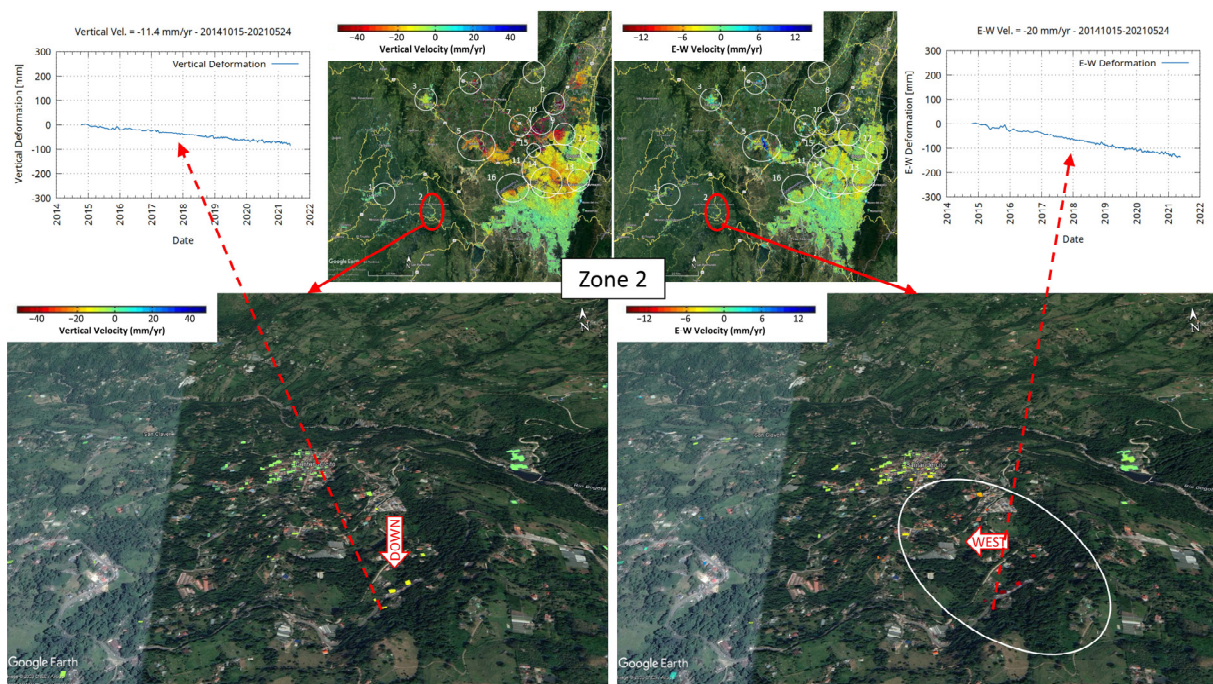


Figura 13. Resultados de series temporales de la vertical y este-oeste. Tasas de deformación de velocidad para el municipio de San Antonio de Tequendama. El área marcada con la elipse blanca indica un deslizamiento de tierra hacia el oeste.

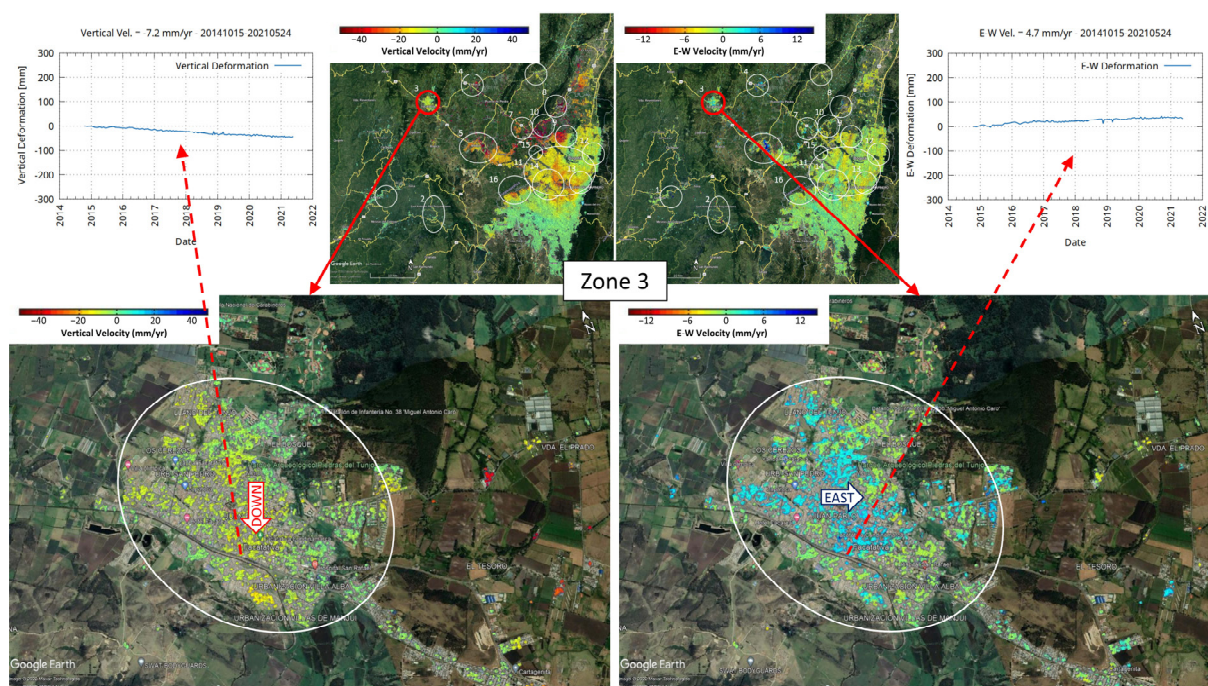


Figura 14. Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el municipio de Facatativá. En esta zona se observa un ligero movimiento hacia el este con componente vertical de subsidencia.

La Figura 15 representa la zona 4, correspondiente al municipio de El Rosal. Este sector se encuentra en una región llana rodeada de tierras de cultivo e invernaderos, enfrentando un problema conocido de subsidencia causado por la reducción del nivel piezométrico en el área de estudio del CAR. La extracción de agua subterránea de los acuíferos Cuaternario y Guadalupe se identifica como la causa principal de este fenómeno. Según el análisis MT-InSAR, se evidencia un significativo movimiento vertical descendente que varía entre -20 y -40 mm/año en todo el municipio y sus alrededores. Además, se registra un desplazamiento hacia el este de hasta 6 mm/año.

La Zona 5 corresponde al Municipio de Madrid, como se muestra en la Figura 16. Esta región se caracteriza por su proximidad a una colina y la expansión de las infraestructuras urbanas hacia la llanura circundante del municipio. De forma similar a la zona 4, el municipio experimenta hundimientos debido al crecimiento de las industrias y del regadío agrícola. Los datos MT-InSAR muestran desplazamientos verticales que oscilan entre 20 y 40 mm/año. Además, se detecta un movimiento de cizalladura, con tasas de deformación de 10 mm/año hacia el este y 6 mm/año hacia el oeste.

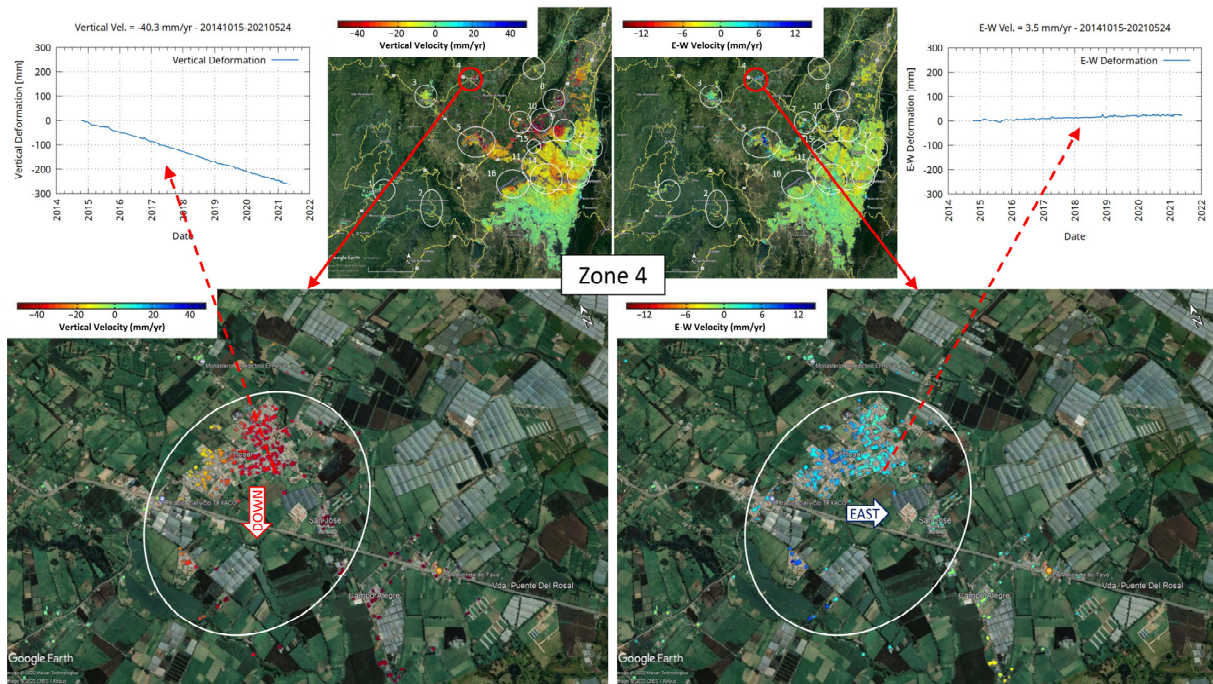


Figura 15. Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el municipio de El Rosal. La zona marcada con una elipse blanca indica subsidencias del terreno con una ligera componente este.

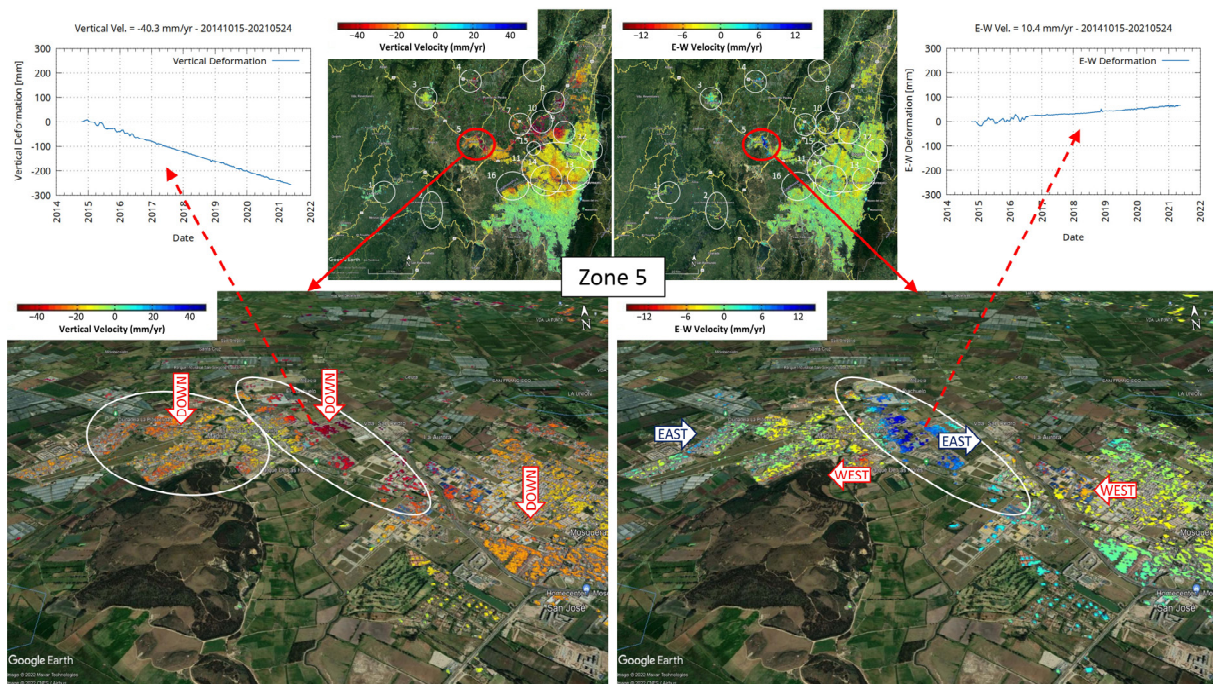


Figura 16. Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el municipio de Madrid. Esta zona muestra dos áreas de subsidencia y movimiento horizontal asociado. El deslizamiento de ladera con tendencia este es el más prominente, marcado por la elipse blanca de la derecha.

La Zona 6, que se observa en la Figura 15, representa el municipio de Tenjo, situado al pie de la ladera de la montaña. En este distrito, el análisis MT-InSAR revela desplazamientos verticales que oscilan aproximadamente entre -10 y -30 mm/año, acompañados de movimientos hacia el oeste que varían de 0 a -6 mm/año.

La Zona 7, como se muestra en la Figura 18, corresponde al pueblo de la Isla, situada en cercanías de Madrid, junto con otros municipios que también experimentan efectos de subsidencias como Funza, Mosquera y Tenjo. La zona está rodeada de edificios industriales, invernaderos y campos de cultivo. Según el análisis MT-InSAR, en esta región se producen deformaciones verticales de hasta -20 mm/año o incluso mayores, con valores superiores a -40 mm/año en las áreas circundantes. Además, se observan movimientos horizontales de 9 mm/año hacia el este y -5 mm/año hacia el oeste.

La figura 19 ilustra la zona 8, que incluye los municipios de Cota y Chía. Cota se dedica principalmente a la agricultura y se encuentra en las estribaciones de la cordillera dentro de la región de sabana. El análisis MT-InSAR revela desplazamientos verticales que oscilan de 20 a 40 mm/año en Cota y un patrón de subsidencia similar de 20 mm/año en Chía. La Figura 19 muestra dos tendencias distintas de desplazamiento horizontal observadas en Cota: hacia el este y hacia el oeste. Por el contrario, Chía muestra únicamente un desplazamiento horizontal que se dirige hacia el oeste.

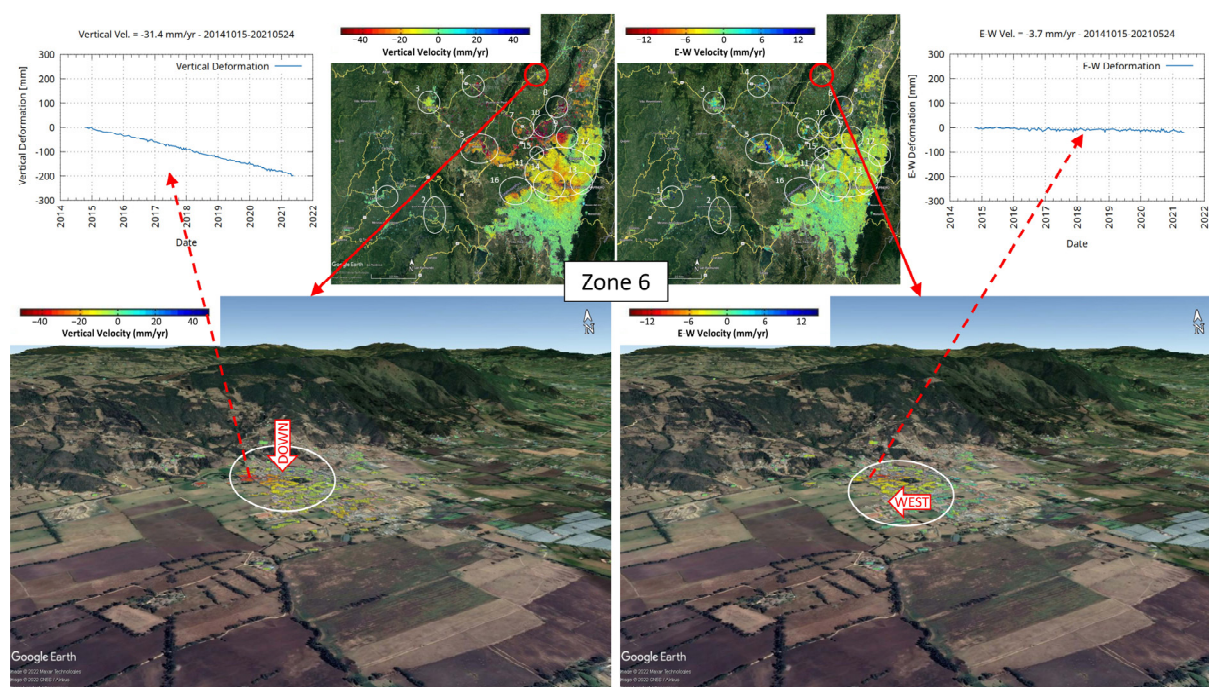


Figura 17. Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste del municipio de Tenjo. El hundimiento del terreno se indica con una elipse blanca en esta zona.

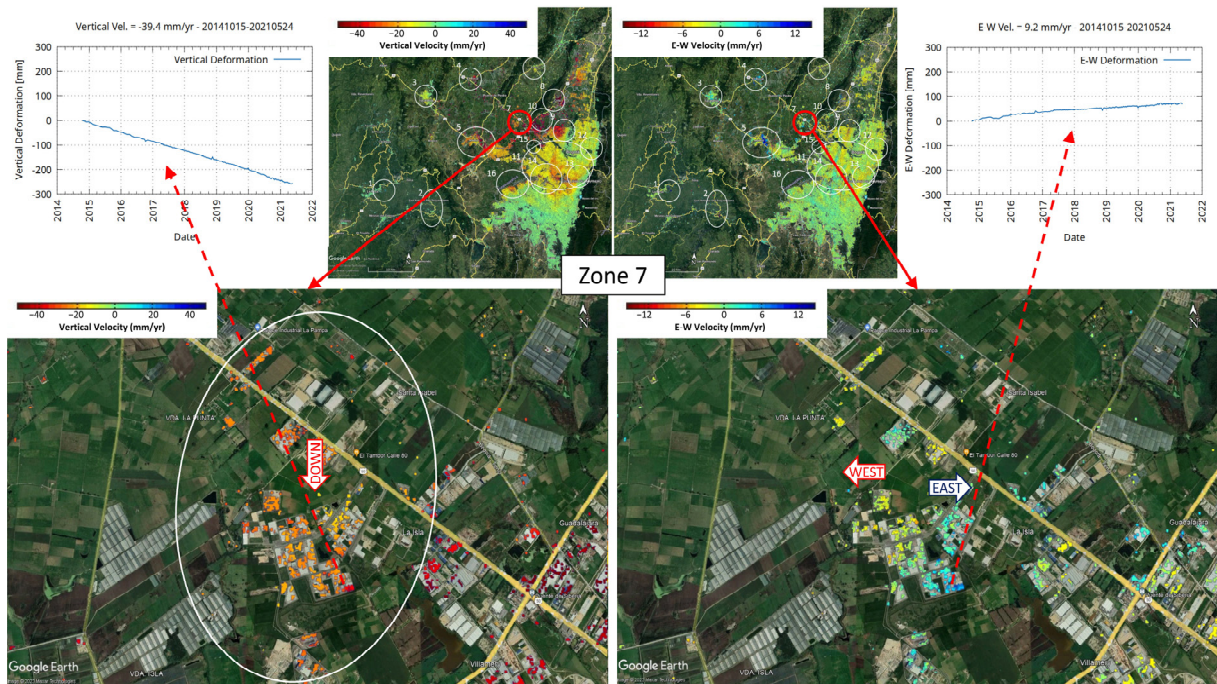


Figura 18. Resultados de series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para la Población de La Isla. En la zona señalada con una elipse blanca se aprecia el hundimiento del terreno y los movimientos horizontales asociados.

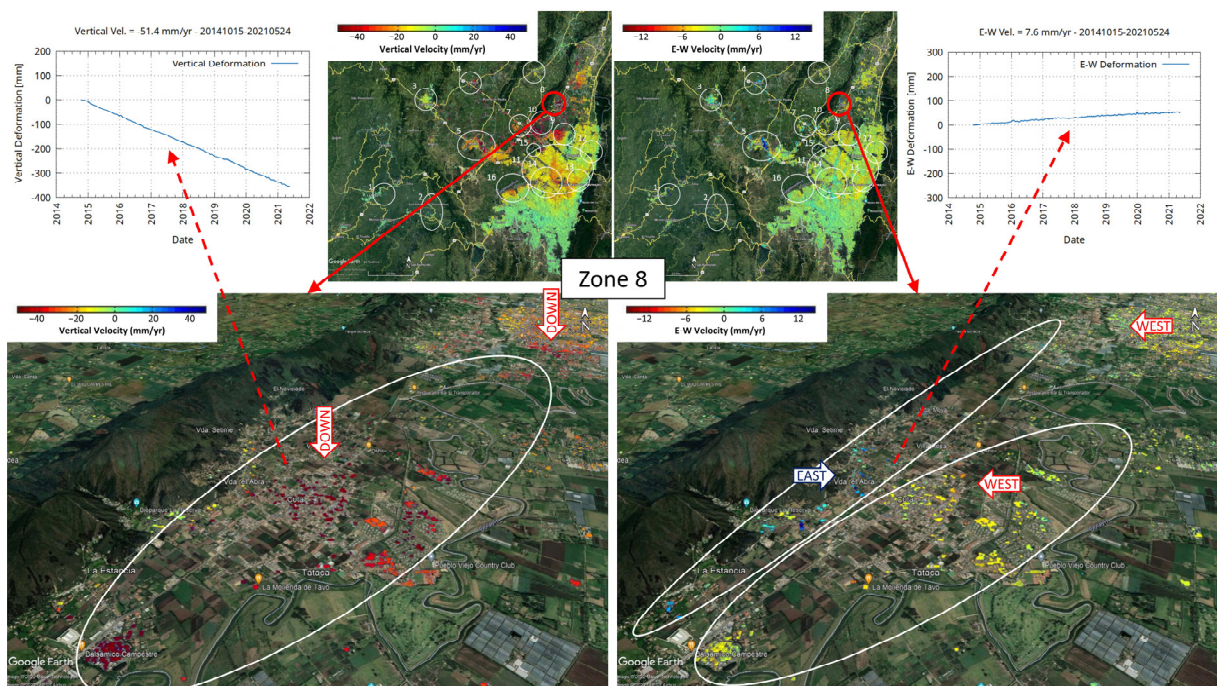


Figura 19. Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el municipio de Cota y Chía. El área marcada con una elipse blanca en la imagen de la izquierda indica un hundimiento del terreno con sus movimientos horizontales asociados mostrados en la imagen de la derecha.

La Zona 9, que se muestra en la Figura 20, incorpora un grupo de barrios que se encuentran en el área noroccidental de Bogotá, en la planicie situada a la izquierda de los Cerros de Suba. Este sector es una combinación de propiedades residenciales, comerciales e industriales. Los desplazamientos verticales oscilan entre -10 y -40 mm/año. Estos desplazamientos pueden deberse a diversos usos del suelo, como la extracción de aguas subterráneas con fines industriales, nuevos desarrollos residenciales o la influencia de variaciones significativas en los niveles piezométricos regionales sobre los cimientos de las estructuras más antiguas de la ciudad. La figura 20 muestra dos tendencias significativas de desplazamiento horizontal dentro de esta zona. Una de ellas muestra un claro movimiento hacia el este, con tasas que alcanzan los 10 mm/año. La otra tendencia, de menor escala, muestra un desplazamiento en la dirección opuesta (oeste) con tasas de hasta -5 mm/año. Además, una zona situada en las afueras de la ciudad ilustra una tendencia hacia el este con tasas de hasta 3 mm/año.

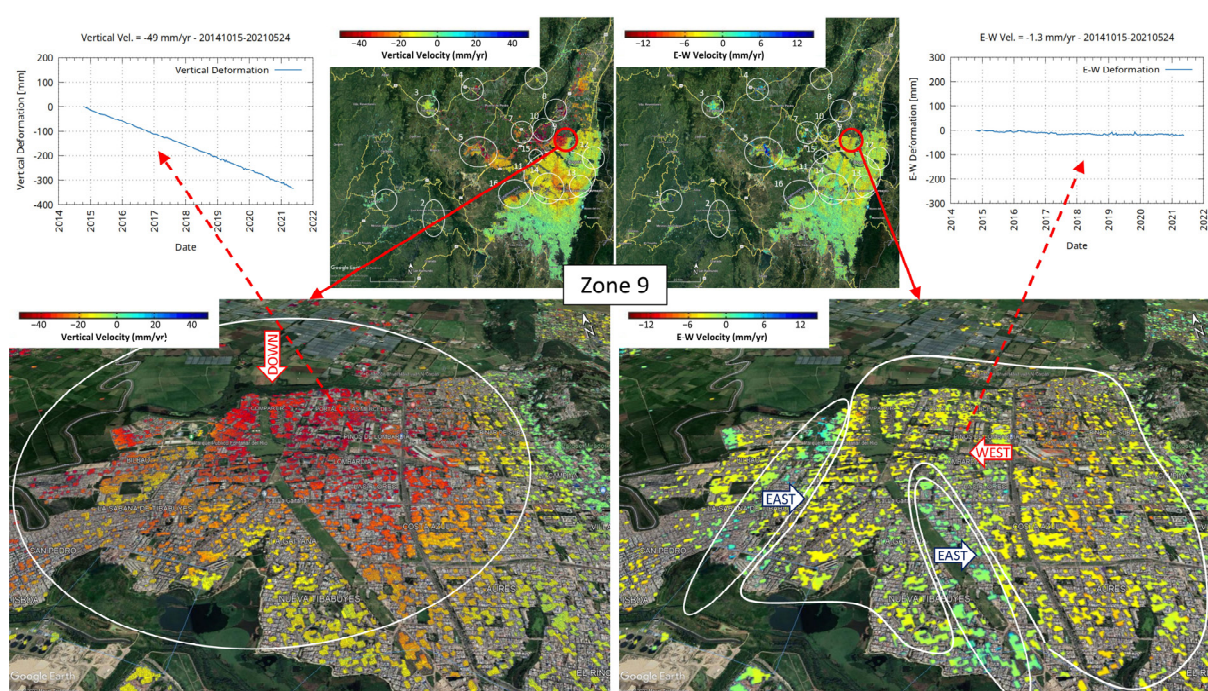


Figura 20. Resultados de series de temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste de barrios del noroeste de la ciudad de Bogotá. En la imagen de la izquierda, la elipse blanca indica una zona de hundimiento significativo, cuyos movimientos horizontales asociados se indican en la zona de la derecha.

La Figura 21 ilustra la zona 10, la cual exhibe una tendencia de desplazamiento vertical igual o mayor que la de la zona 7 en la Figura 18. Según los datos del SAR, existen desplazamientos verticales que van desde -20 a -40 mm/año, con mayores deformaciones. Los desplazamientos horizontales en esta área revelan dos patrones de movimiento hacia el este y el oeste, como lo muestra la Figura 21.

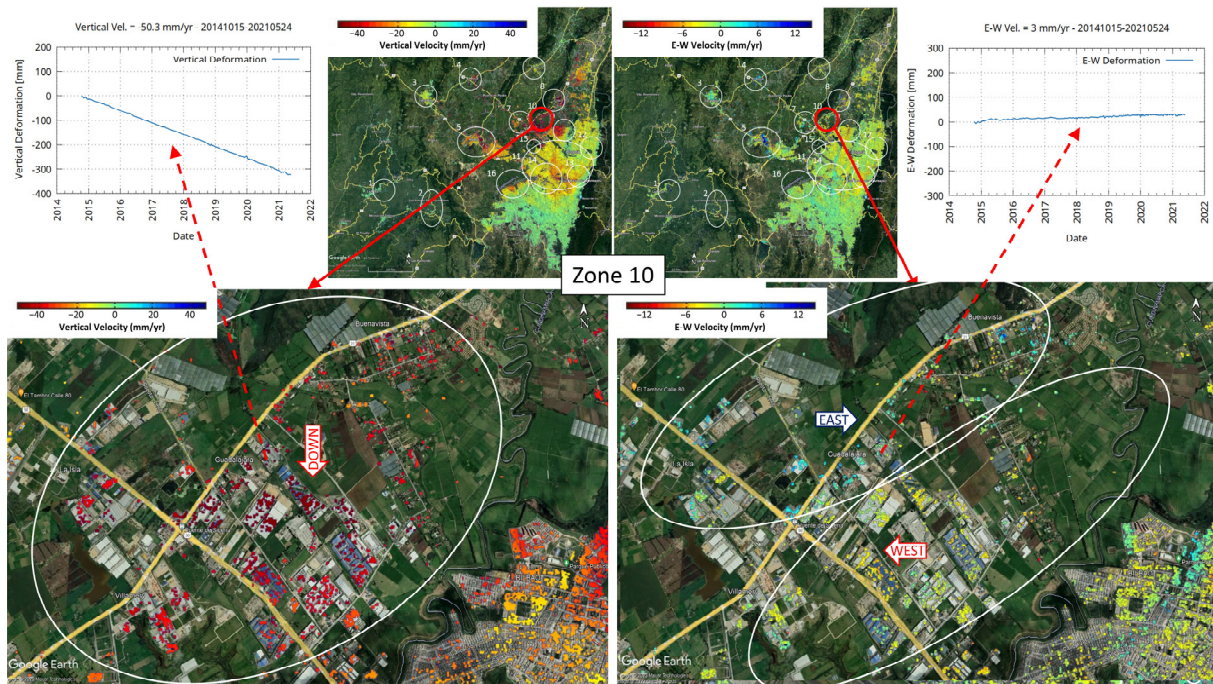


Figura 21. Resultados de series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste de Guadalajara y Buenavista. En esta zona se aprecia un hundimiento del terreno, indicado por la elipse blanca en la imagen de la izquierda. Este movimiento vertical está asociado a un movimiento horizontal, como en la imagen de la derecha.

Las siguientes Figuras 22 – 27 muestran las tendencias de desplazamiento vertical y horizontal dentro de varios barrios de Bogotá (zonas 11 a 16).

En la zona 11, ubicada dentro de la ciudad de Bogotá, la Figura 22 ilustra la presencia de un corredor alargado que se extiende desde el centro-oeste hacia el noroeste. Esta área muestra movimientos verticales similares a un pasillo, que fluctúan entre -10 y -20 mm/año. Además, el desplazamiento horizontal muestra una tendencia hacia el este, alcanzando valores de hasta 5 mm/año.

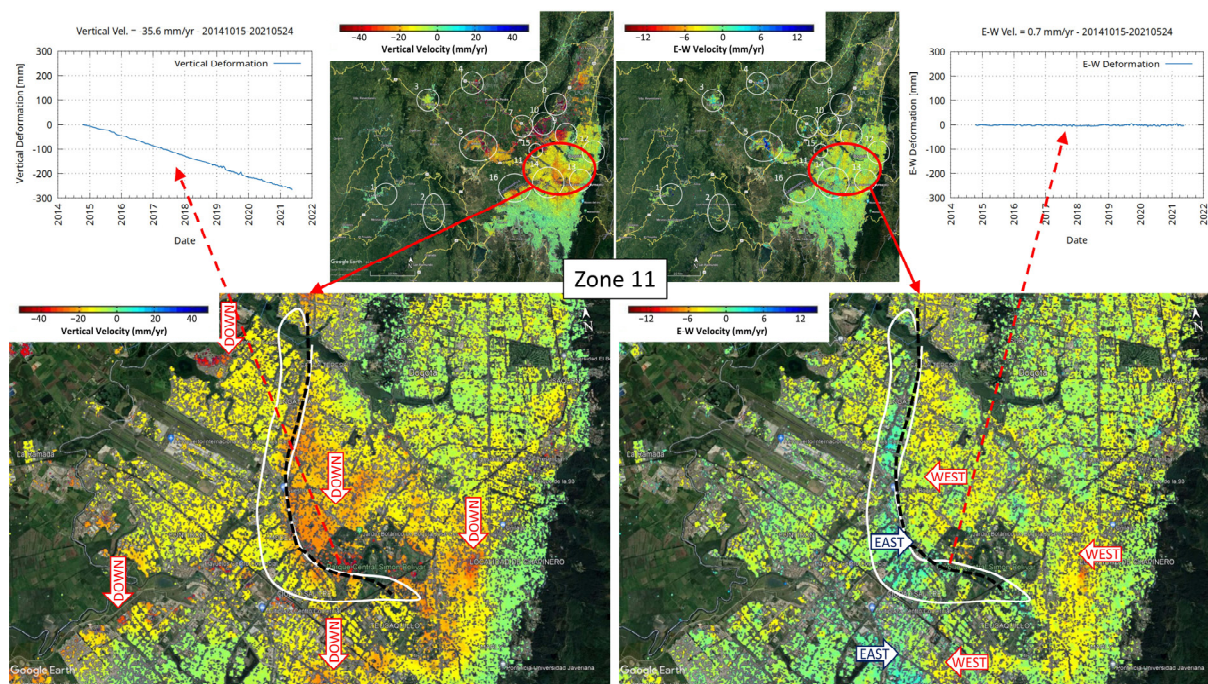


Figura 22. Resultados de series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste en el centro de la ciudad de Bogotá. En esta zona se observan movimientos verticales con valores máximos en las áreas representadas en naranja en la imagen de la izquierda. En la zona central se observa una franja longitudinal con un movimiento horizontal ligeramente pronunciado, representado por el polígono blanco.

Si pasamos a la zona 12, ilustrada en la Figura 23, ésta abarca el barrio del Pedregal situado junto a los cerros de Bogotá. La región comprende una mezcla de zonas residenciales y algunas áreas industriales. Los desplazamientos verticales observados en esta zona oscilan entre 0 y 40 mm/año. Se observa una tendencia hacia el este, similar a la de la zona 11, que contrasta con la tendencia general observada en la ciudad.

Las figuras 23-27 muestran patrones de subsidencias similares en el desplazamiento vertical, con tasas que van de 10 a 40 mm/año en las zonas 13 a 16, respectivamente. En la sección de Discusión, la Tabla 4 y la Figura 34 ofrecen una clasificación y demarcación de los barrios que experimentan deformaciones superiores a 20 mm/año. El barrio de Santa Cecilia en la zona 14, situado en el centro de la región de subsidencia, presenta una tasa de deformación vertical de 25 mm/año, además de desplazamientos hacia el oeste de hasta 3 mm/año. Esta zona conecta con la zona 11 que es un largo pasaje que se desplaza en dirección opuesta.

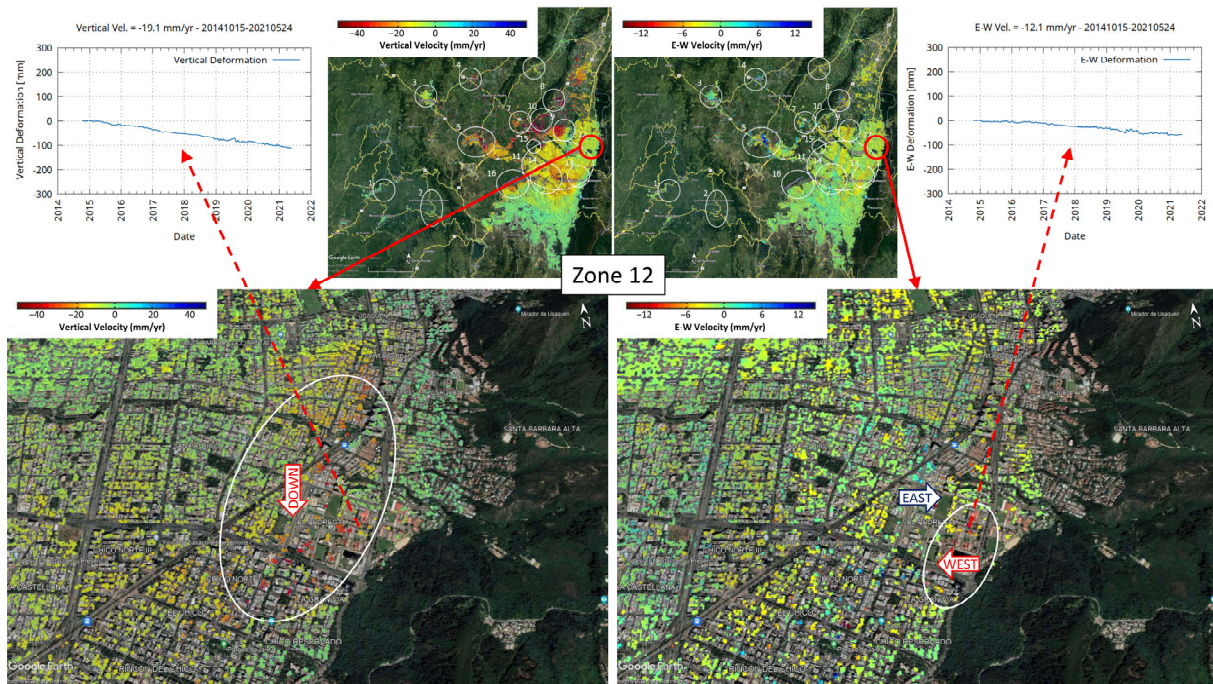


Figura 23. Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste del barrio Pedregal, ubicado en el este de Bogotá. La elipse blanca delimita un área con movimiento vertical y desplazamiento horizontal asociado.

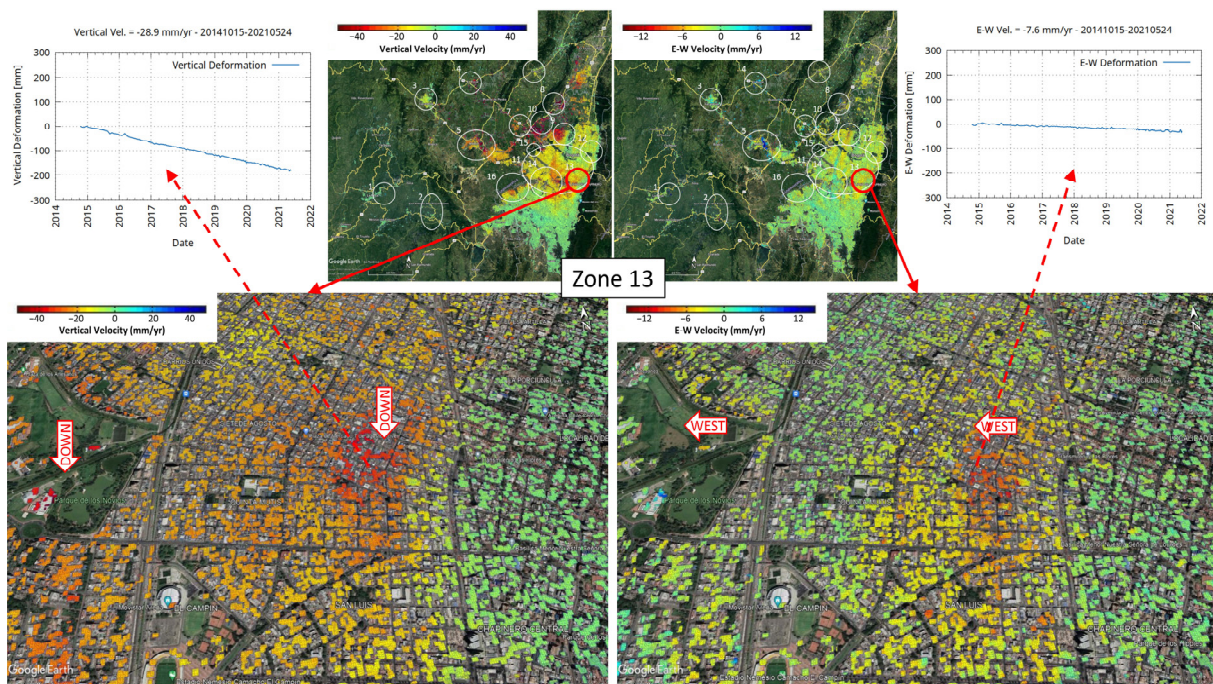


Figura 24. Resultados de las series de temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el barrio Siete de Agosto de la ciudad de Bogotá.

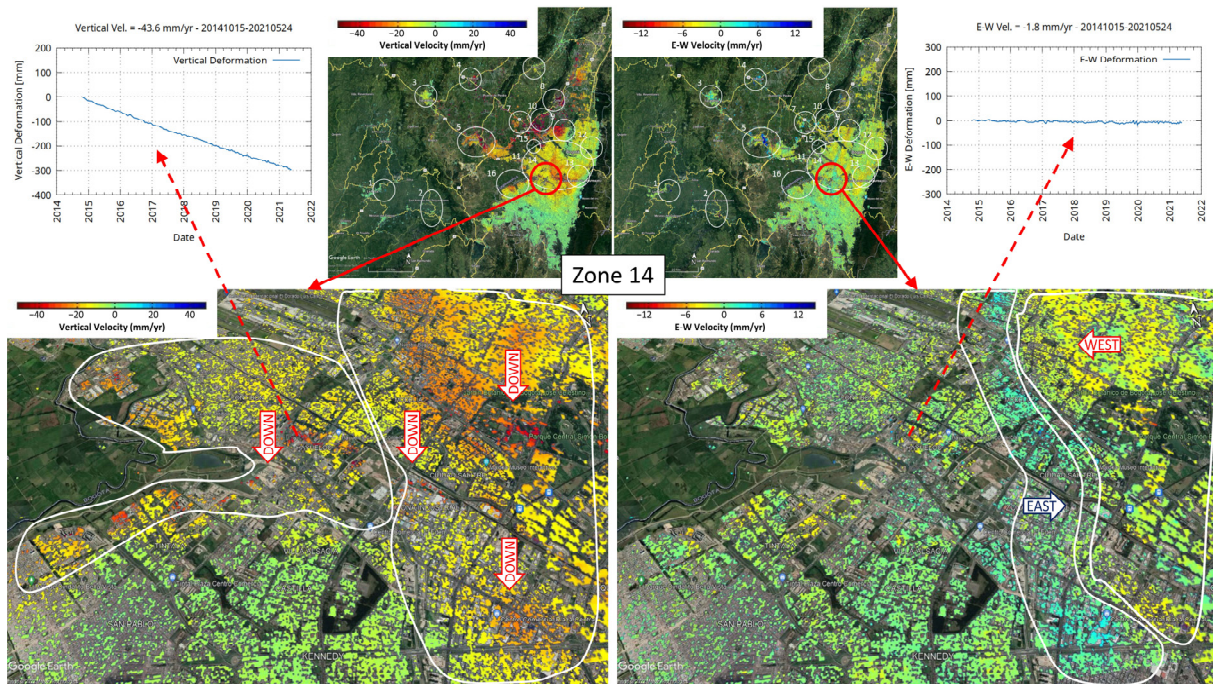


Figura 25. Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste localizados en diferentes barrios del centro al oeste de la ciudad de Bogotá. En esta zona se observa cierto hundimiento del suelo con movimientos horizontales diferenciados.

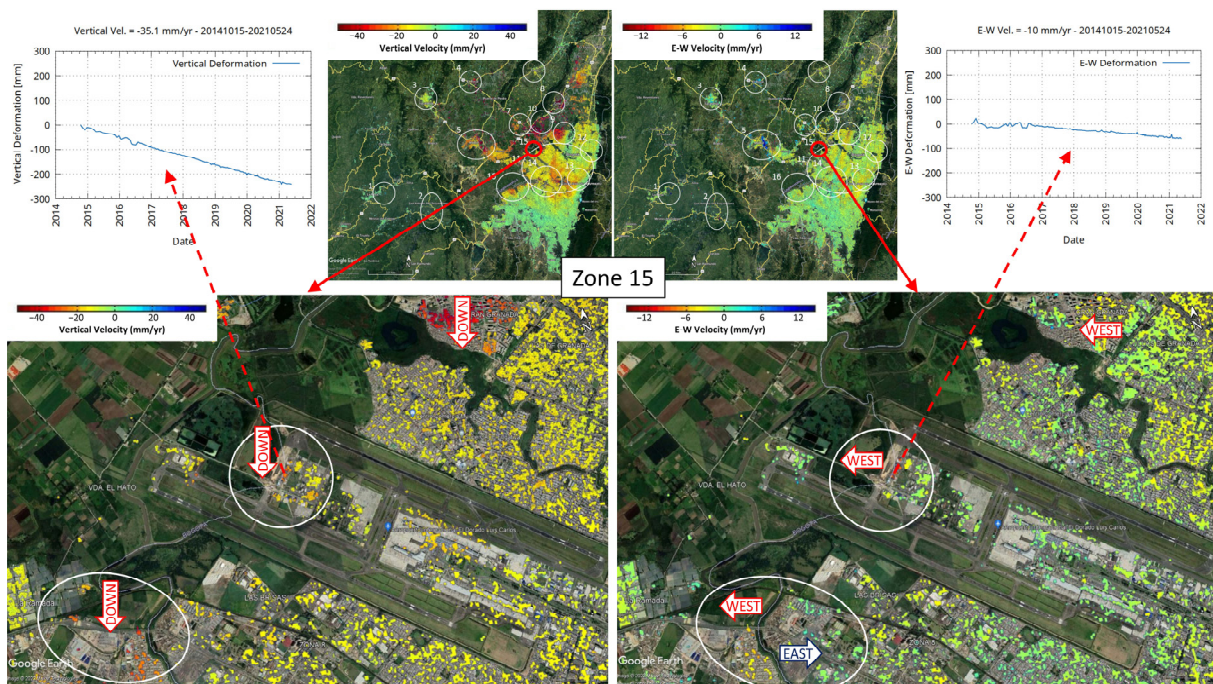


Figura 26. Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para El Dorado El Dorado y el barrio Florencia.

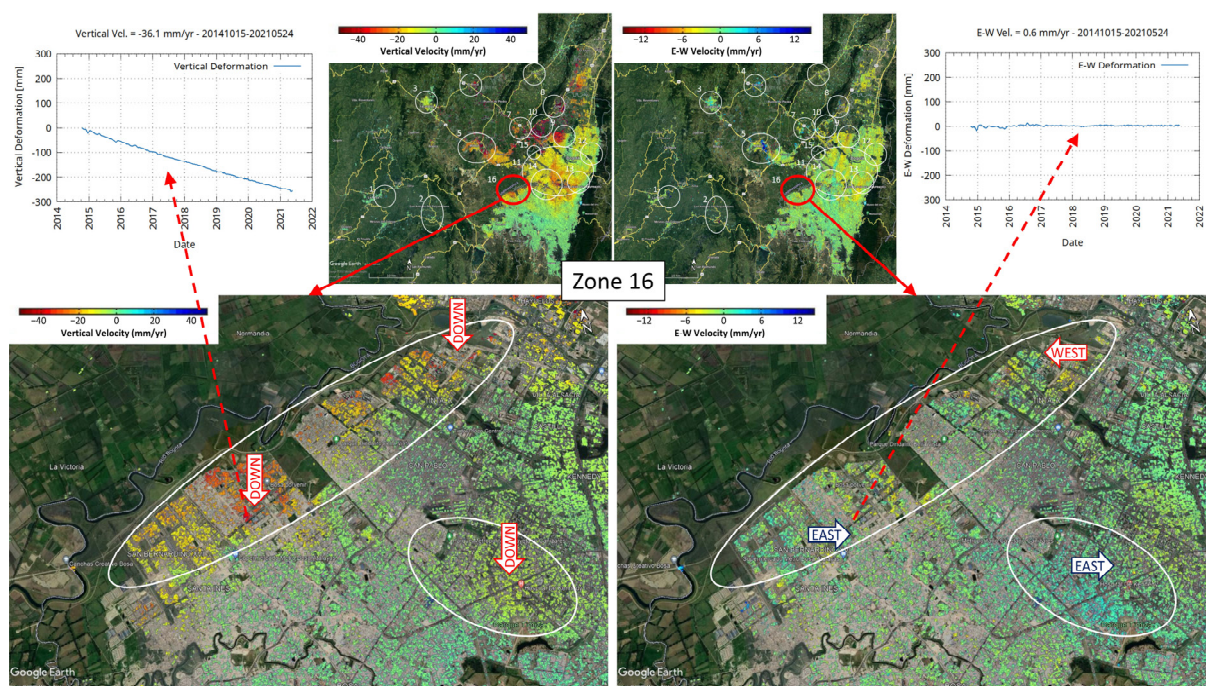


Figura 27. Resultados de las series temporales de las tasas de velocidad de deformación vertical y este-oeste para el grupo de barrios Tintal del norte y sur en el noroeste de la ciudad de Bogotá. Las elipses blancas indican áreas de subsidencia pronunciada y un ligero movimiento horizontal asociado.

Tabla 4. Tasas de deformación de los barrios afectados significativamente por el fenómeno de hundimiento en la zona central de la ciudad de Bogotá (Figura 34).

Zona	Barrios	Tasas de deformación [mm/año]		Descripción de los edificios y alrededores de los Barrios de Análisis
		máx.	mín.	
1	Aeropuerto El Dorado	-11,6	-4	-
2	Álamos	-24,4	-2,5	Área de Almacenes y edificios residenciales
3	Baviera	-15	-2	Área de edificios residencial nuevos
4	Bolivia	-19	-4,3	Edificios nuevos ; Área de edificios residencial nuevos
5	Boyacá Real	-23	-5	Área de edificios residencial
6	Castilla	-29	0	Área residencial de edificios nuevos
7	Capellanía	-17,6	-4,7	Área de Almacenes y edificios residenciales
8	Calandaima	-12	-1	Área residencial edificios nuevos
9	Chico Lago	-20	0	Edificios residenciales
10	Ciudad Salitre Occidente.	-24	-1	Edificios residenciales
11	Ciudad Salitre Oriente.	-27,7	-5,8	Área de Edificios residenciales y bodegas
12	Doce de octubre	-24	-5	Edificios residenciales
13	El Porvenir	-26,6	0	Área residencial edificios nuevos
14	Engativá	-17,1	-5	Área de almacenes y edificios residenciales
15	Fontibón	-35,4	-4,4	Área de almacenes y edificios residenciales
16	Fontibón San Pablo	-16,5	-2,6	Área de almacenes y zona industrial
17	Galerías	-22,6	-1,9	Edificios residenciales
18	Garcés Navas	-37,1	-5	Área residencial edificios nuevos
19	Granjas de Techo	-33,1	-2	Área de almacenes
20	Jardín Botánico	-30	-8,2	Edificios residenciales y áreas deportivas
21	La Esmeralda	-23	-5	Edificios residenciales
22	Las Ferias	-26,1	-1	Área residencial edificios nuevos
23	Los Alcázares	-31	-3,7	Área de Almacenes y edificios residenciales
24	Minuto de Dios	-14	0	Edificios residenciales
25	Modelia	-17	-3,7	Edificios residenciales
26	Parque salitre	-38,1	-9,6	Parques; Área verde; Edificios residenciales
27	Parque Simón Bolívar	-28,1	-10	Parques; Área verde; Edificios residenciales
28	Patio Bonito	-20	0	Edificios residenciales

Zona	Barrios	Tasas de deformación [mm/año]		Descripción de los edificios y alrededores de los Barrios de Análisis
		máx.	mín.	
29	Puente Aranda	-23	-6	Área de almacenes y zona industrial
30	Quinta Paredes	-21,3	-1	Edificios residenciales
31	Santa Cecilia	-25,3	-9	Edificios residenciales
32	Teusaquillo	-18,8	0	Edificios residenciales
33	Tintal Norte	-27	0	Área residencial edificios nuevos y Área de almacenes
34	Tintal Sur	-18,9	-2	Área residencial edificios nuevos y Área de almacenes
35	Zona Franca	-24,5	-1,2	Área residencial edificios nuevos y Área de almacenes

6.2 GNSS y comparación con MT-InSAR

La Figura 28 muestra las series temporales de las estaciones GNSS (ABCC, BOGA y BOGT) desde su puesta en servicio. Es decir, han registrado datos por un periodo aproximado de 22 años. Las estaciones BOGA y BOGT muestran una tendencia lineal de deformación acumulada en el componente de altura durante todo el período, con valores de alrededor de -861 mm y -641 mm, respectivamente. Por el contrario, ABCC comenzó a registrar datos en SIRGAS en agosto de 2011 y ha mostrado una tendencia constante decreciente de la deformación con un valor alrededor de los -197 mm en su componente de altura hasta 2021 (Figura 28c y Tabla 5). Las deformaciones en el componente este de estas estaciones han mostrado relativa estabilidad en el tiempo, como se observa en la Figura 26b. Para una comprensión más completa de las estaciones GNSS, los lectores pueden consultar estudios de investigación anteriores (Kaniuth et al., 2002; Mora-Páez et al., 2019; Rudenko and Sch, 2013; Sánchez and Drewes, 2016).

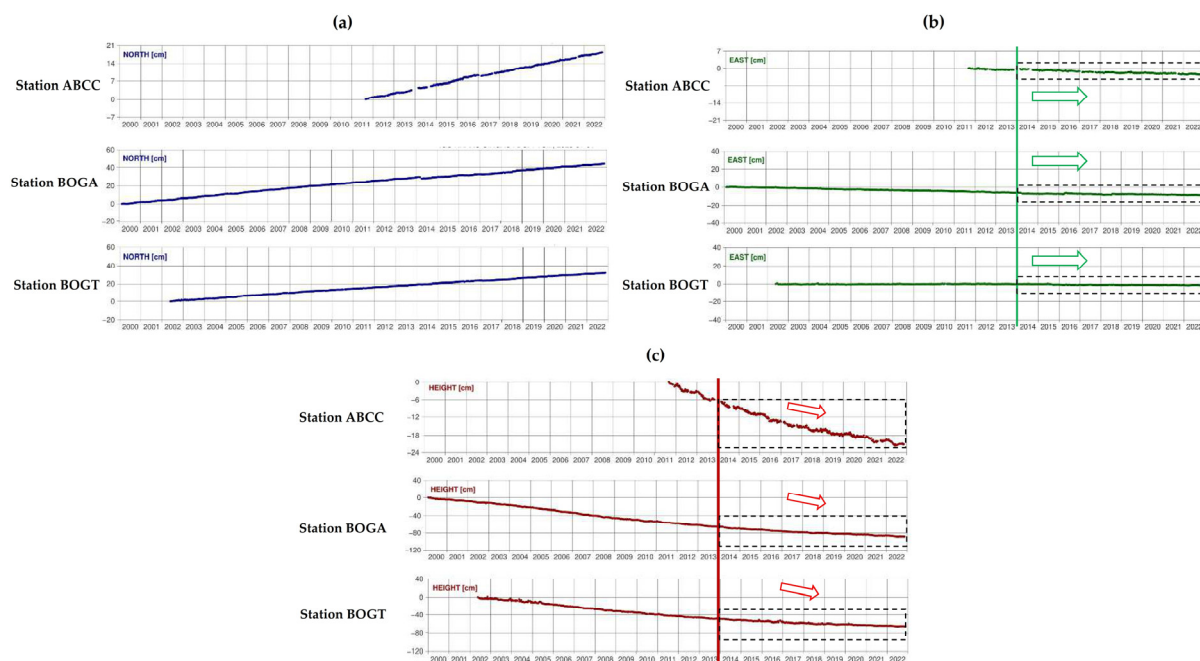


Figura 28. Serie temporal de posición de las estaciones GNSS ABCC, BOGA y BOGT en Bogotá del 2000 al 2021, procesadas por el SIRGAS en DGFI-TUM. (a) Componente norte. (b) Componente este. (c) Componente de altura (Up). Nota: Las líneas discontinuas en los gráficos (b y c) comprende la duración de este estudio a lo largo de la serie temporal completa de las 3 estaciones GNSS. (Fuente: <https://www.sirgas.org/es/processing/>).

Tabla 5. Desplazamiento acumulativo de las posiciones de las estaciones GNSS basado en sus observaciones geodésicas, tal como se informa en el sitio web oficial entre enero de 2000 y diciembre de 2021. (Fuente: <https://sirgas.ipgh.org/red--gnss/estaciones/lista--de--estaciones>).

Estación	Norte	Este	Arriba
GNSS	[mm]	[mm]	[mm]
ABCC	$170,69 \pm 0,061$	$-23,36 \pm 0,115$	$-197,06 \pm 0,213$
BOGA	$427,51 \pm 0,029$	$-85,80 \pm 0,045$	$-861,84 \pm 0,081$
BOGT	$309,28 \pm 0,051$	$-12,65 \pm 0,116$	$-641,12 \pm 0,192$

La Figura 29 presenta una porción del mapa de desplazamiento vertical acumulativo, extraído de la Figura 9, superpuesto con las ubicaciones de tres estaciones GNSS. Un análisis detallado de los componentes de estas estaciones confirma la presencia de un hundimiento en áreas específicas de Bogotá, con tasas de deformación que se incrementan con el tiempo. La aplicación de MT-InSAR ha posibilitado la elaboración de un mapa minucioso de la ciudad, revelando una tendencia al aumento de las tasas de deformación en ciertos barrios durante el período de estudio, aspecto que no había sido detectado en investigaciones previas.

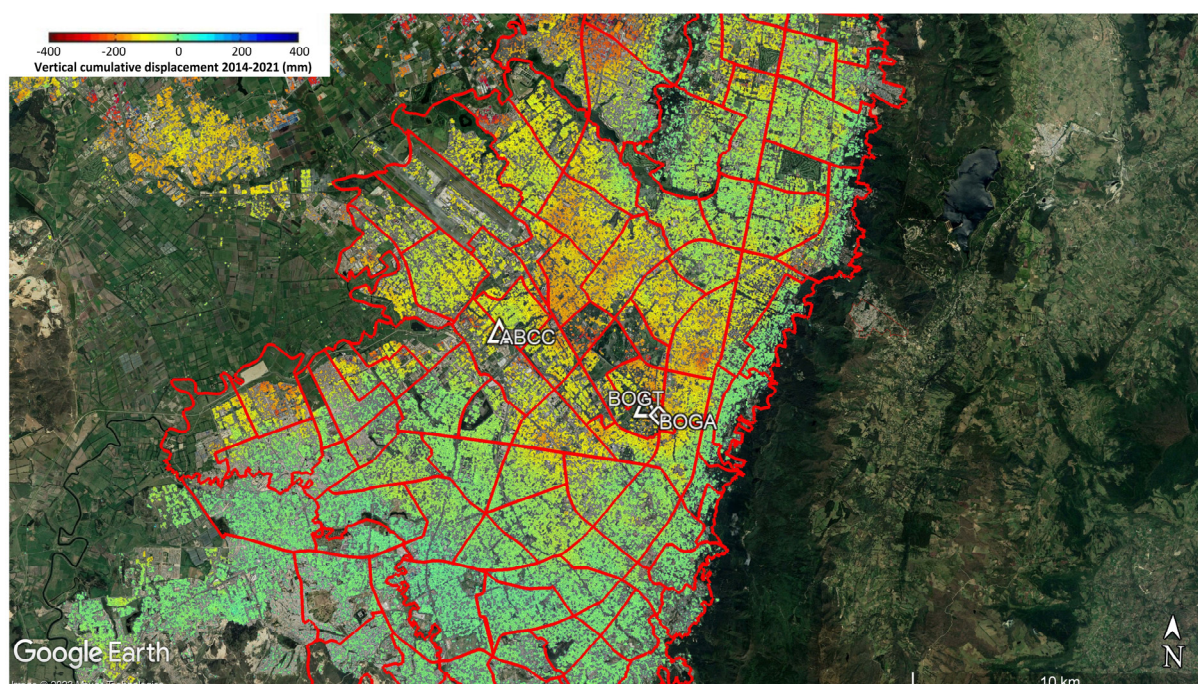


Figura 29. Estaciones GNSS ABCC, BOGA y BOGT representados sobre el mapa de desplazamientos verticales acumulativos MT-InSAR como triángulos blancos.

Para alinearnos con los resultados del procesamiento de MT-InSAR, hemos ajustado el periodo temporal de las series temporales de las tres estaciones GNSS para abarcar el intervalo de 2014 a 2021. La Figura 30 muestra los ajustes de los componentes de estas estaciones durante dicho periodo, utilizando el año 2014 como punto de referencia. Las posiciones semanales de ABCC, BOGA y BOGT de 2014 a 2021 fueron obtenidas del sitio web de SIRGAS (Tablas 6 y 7).

La estación GNSS ABCC, ubicada en el barrio de Granjas del Techo, revela, según la Figura 30, un desplazamiento acumulado de -140 mm ($-17,5$ mm/año) a lo largo del periodo de estudio. En la Figura 29, los resultados de MT-InSAR evidencian que dicho desplazamiento oscila entre -100 y -150 mm ($-12,5$ a $-18,8$ mm/año), superando estos valores en algunas regiones adyacentes (Tabla 6). Por otro lado, la componente este de la estación, representada en la Figura 30, registra valores de aproximadamente -22 mm ($-2,8$ mm/año), mientras que los resultados MT-InSAR este-oeste sugieren un desplazamiento acumulativo que oscila entre -10 y -20 mm ($-1,3$ a $-2,5$ mm/año) (Figura 9b y Tabla 7).

La estación BOGA está situada en el Parque Simón Bolívar. Para analizar y comparar las deformaciones verticales entre ambas técnicas, se examina la serie temporal de la componente de altura de la estación GNSS en la Figura 30, donde se observa un desplazamiento acumulado de -210 mm ($-26,2$ mm/año). Los resultados de MT-InSAR, representados en la Figura 29, muestran deformaciones verticales acumuladas que oscilaron entre -170 a -200 mm ($-21,2$ a -25 mm/año) en la zona de ubicación y proximidades (Tabla 6). En cuanto al análisis de la componente este de la estación GNSS, BOGA exhibe una deformación de -27 mm ($-3,4$ mm/año) desde 2014 hasta 2021, como se presenta en la Figura 30. Además, el análisis MT-InSAR en este barrio de la ciudad (Figura 9b), se identificaron valores de deformación este-oeste que oscilan entre 0 y -30 mm ($-3,7$ mm/año) (Tabla 7).

La estación BOGT, al igual que estación anterior, se encuentra ubicada en el Parque Simón Bolívar. La deformación vertical que se aprecia en la serie temporal GNSS de la componente de altura (Figura 30) revela un desplazamiento de -160 mm (-20 mm/año). En los resultados de MT-InSAR (Figura 29 y Tabla 6), se observan deformaciones verticales acumuladas que oscilaron entre -170 y -200 mm ($-21,2$ a -25 mm/año) en la ubicación de la estación. Además, en la Figura 30, se evidencia que la componente este de BOGT muestra una deformación de -13 mm ($-1,6$ mm/año) desde 2014 hasta 2021, mientras que el análisis MT-InSAR identifica (Figura 9b) valores de deformación vertical que oscilan entre 0 y -30 mm ($-3,7$ mm/año) (Tabla 7).

Tabla 6. Tasas de deformaciones verticales GNSS vs. MT-InSAR.

Deformaciones Verticales				
Descrip.	Análisis GNSS		Análisis MT-INSAR	
	Deformación Acumulada [mm]	Deformación [mm/año]	Deformación Acumulada [mm]	Deformación [mm/año]
ABCC	-140	-17.50	-100 a -150	-12.50 a -18.80
BOGA	-210	-26.20	-170 a -200	-21.20 a -25.00
BOGT	-160	-20.00	-170 a -200	-21.20 a -25.00

Tabla 7. Tasas de deformaciones GNSS (este) y MT-INSAR (este-oeste).

Deformaciones Horizontales				
Descrip.	Análisis GNSS (este)		Análisis MT-INSAR (este-oeste)	
	Deformación Acumulada [mm]	Deformación [mm/año]	Deformación Acumulada [mm]	Deformación [mm/año]
ABCC	-22	-2.80	-10 a -20	-1.30 a 2.50
BOGA	-27	-3.40	0 a -30	-3.70
BOGT	-13	-1.60	0 a -30	-3.70

En última instancia, ambas técnicas han confirmado de manera concluyente y coherente los resultados, proporcionando una confirmación indirecta de las deformaciones observadas en estos lugares. Tanto los datos derivados de SIRGAS como los obtenidos mediante MT-InSAR han demostrado ser eficaces y robustos en su capacidad para identificar y cuantificar las deformaciones. Esta convergencia de resultados refuerza la confianza en la precisión y la fiabilidad de las observaciones, validando así la consistencia de las conclusiones obtenidas a través de ambas metodologías. Esta correlación fortalece aún más la integridad de los hallazgos y respalda la solidez del análisis de deformación en la zona en estudio.

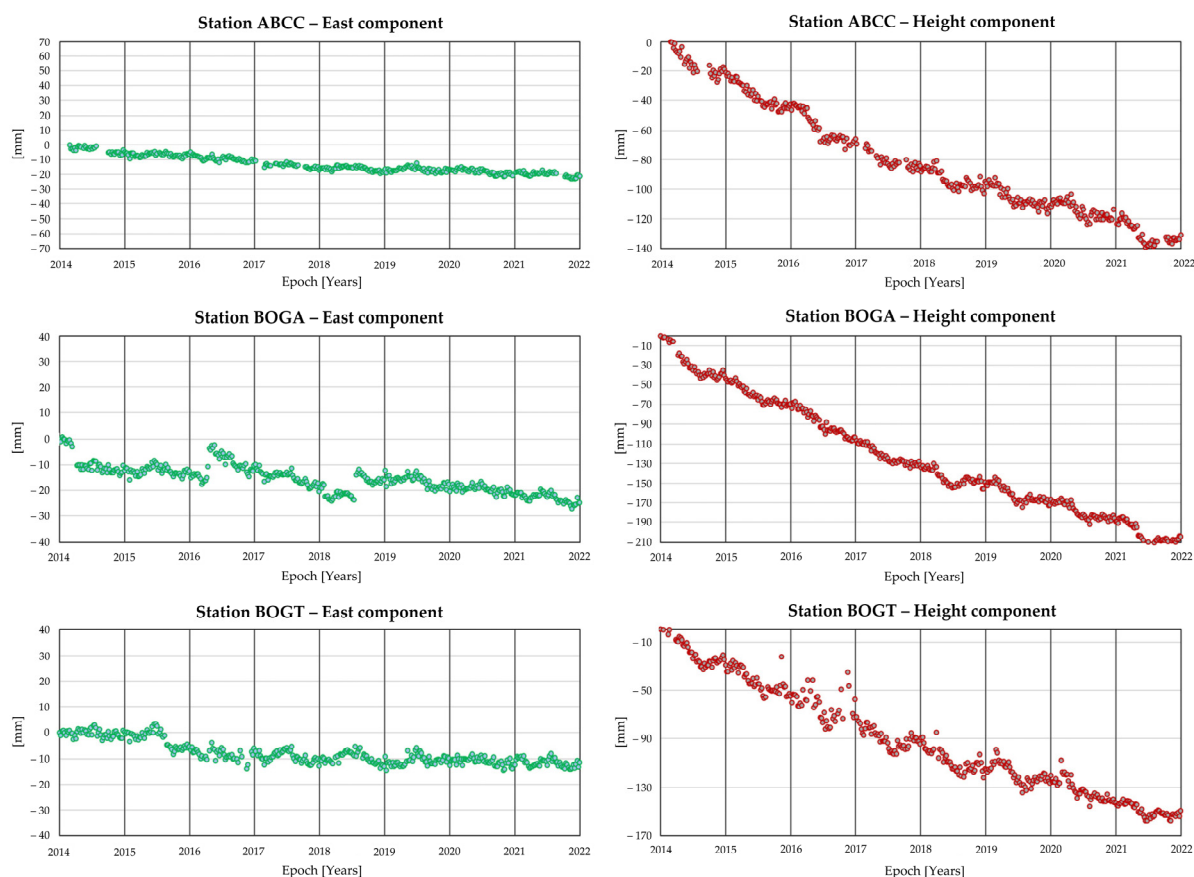


Figura 30. Posiciones de las estaciones GNSS ABCC, BOGA y BOGT en el este y componentes de altura indicados por las líneas discontinuas en la Figura 28 b, c para el período 2014 a 2021.

7 DISCUSIÓN

En esta sección, se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos mediante MT-InSAR en áreas previamente identificadas por investigaciones de otros autores y entidades gubernamentales, donde se han observado subsidencias en la sabana y la ciudad de Bogotá. Además de emplear técnicas multitemporales de MT-InSAR, se complementó el análisis con datos GNSS procesados por una entidad específica. Este estudio guarda una estrecha relación con el Plan de Manejo Ambiental de Aguas Subterráneas en la Sabana de Bogotá y la zona crítica de la CAR. La investigación se enfoca en las subcuencas hidrogeológicas previamente estudiadas por la CAR en zonas de la región, donde se ha registrado una disminución gradual de los niveles de agua tanto en el acuífero Cuaternario como en el de Guadalupe. La extracción intensiva de agua de los acuíferos emerge como el principal mecanismo desencadenante, generando una reducción de los niveles piezométricos entre 5 y 40 metros en diversas subcuencas de la sabana de Bogotá, siendo esta la causa principal de las subsidencias en la región. A pesar de la falta de datos hidrogeológicos o GNSS actualizados para la sabana, el uso de imágenes Sentinel-1 y técnicas MT-InSAR ha permitido una medición actualizada de las tasas de deformación hasta el 2021, proporcionando una comprensión contemporánea de este fenómeno. Los municipios más impactados por este fenómeno son Madrid, Mosquera, Funza, zonas aledañas a Facatativá, Cota y Chía. Estas áreas exhiben una tendencia lineal de valores de desplazamiento acumulativo vertical de -200 mm desde el 2014 al 2021, con una tasa de subsidencia promedio que oscila entre -30 y -40 mm/año alcanzando valores cercanos a -60 mm/año. Siendo la región de Facatativá, un área de especial interés por parte de investigadores y organizaciones gubernamentales en cuanto a la extracción de agua subterránea de los acuíferos Guadalupe y Cuaternario, debido a diversas actividades impulsadas por razones económicas realizadas por las industrias locales.

Nuestro estudio introduce un nuevo patrón de deformación de la sabana de Bogotá obtenido mediante el uso de MT-InSAR, siendo la primera vez que estas deformaciones se visualizan de una manera gráfica con imágenes satelitales. Investigaciones previas realizadas por varias instituciones y autores dependían de métodos tradicionales de monitoreo, resaltando la importancia de nuestros resultados para la comprensión de este fenómeno. Por otro lado, se logró identificar 16 zonas con deformaciones significativas presentadas en las Figuras 12 a 27, de las cuales 10 exhiben deformaciones notables en toda el área de estudio, incluidas La Mesa, San Antonio de Tequendama, Facatativá, El Rosal, Madrid, Tenjo, la Isla, Cota y Chia, Guadalajara y Buenavista. Como se nombró anteriormente, algunas de estas zonas han sido objeto de estudios posteriores que examinan la reducción de los niveles potenciométricos, como El Rosal o Facatativá, dirigidas por diversos autores. La tendencia de subsidencia observada en estas áreas en los últimos años se ha atribuido a la extracción de aguas subterráneas para fines agrícolas o industriales. Sin embargo, el análisis de las imágenes también identificó otros factores, como la construcción acelerada de viviendas, que potencialmente podrían contribuir a esta tendencia. La rápida construcción de estructuras de viviendas, fábricas y otras industrias en la región de la sabana de Bogotá ha causado cargas excesivas sobre las arcillas blandas altamente comprimibles, lo que ha resultado en efectos de consolidación temprana en los suelos de la sabana. Los impactos de la consolidación primaria de estas estructuras pueden durar varios años, como se ve en el análisis Sentinel-1 durante nuestro período de estudio. Este fenómeno se debe a la distribución gradual de las cargas sobre la cimentación, lo que provoca impactos posteriores sobre el suelo subyacente.

Otro factor adicional, identificado por otros autores como mecanismo del descenso del nivel piezométrico, se ha vinculado con la succión ejercida por la vegetación. Esta succión

contribuye al patrón de subsidencias en la región, provocando la contracción de la arcilla en Bogotá y generando daños en las estructuras civiles menores cercanas.

La tendencia de hundimiento observada se concentró en las regiones central y suroeste de la sabana, coincidiendo con los patrones de subsidencia localizados en los sistemas acuíferos del Cuaternario y Guadalupe. Estos hallazgos son respaldados por investigaciones previas, como se informa en (Ávila Briceño, 2020; Ávila and Castro, 2011; Lobo-guerrero, 1992; Lobo-Guerrero, 1995; Lobo-Guerrero and Gilboa, 1987; Sánchez et al., 2015), y se presentan de manera detallada en la Tabla 2 y las Figuras 2 y 31.

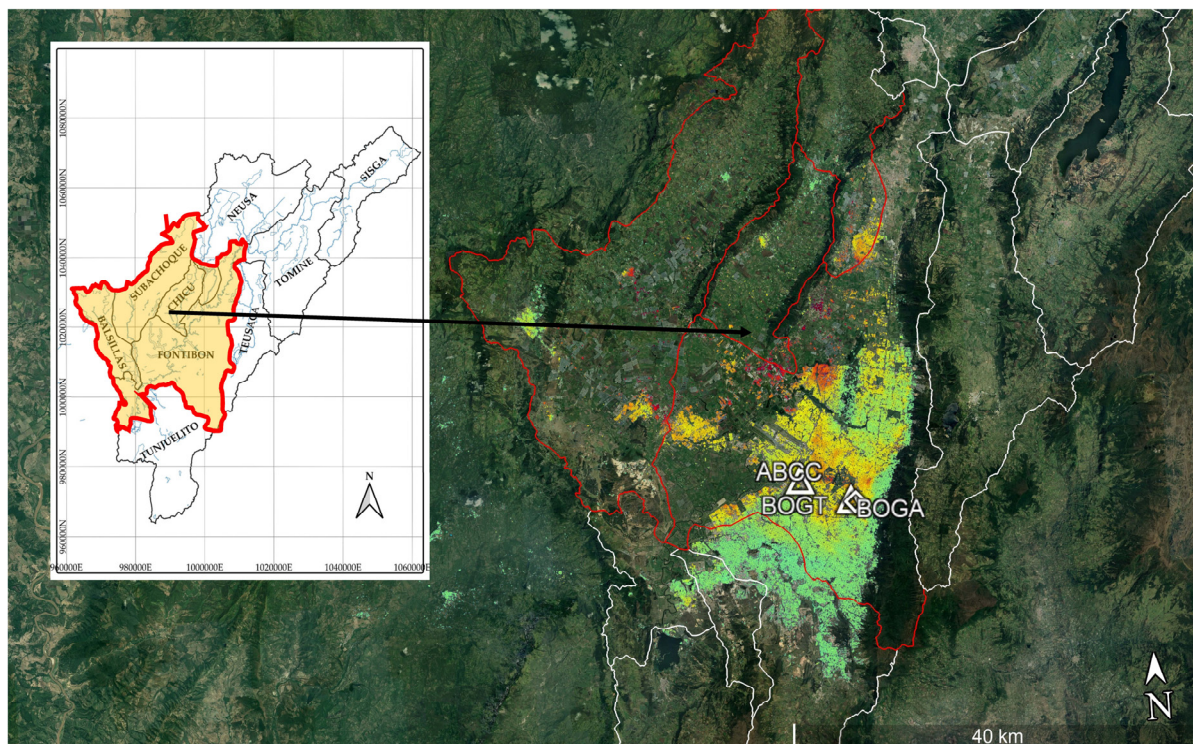


Figura 31. Región de subsidencia en la sabana, superpuesta a las subcuencas con bajos piezométricos bajos (Tabla 1), que se asocia con este fenómeno, según un estudio realizado por la CAR (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019).

En 2005, un acuerdo de la CAR (Autoridad ambiental de la región de Cundinamarca, Colombia), identificó ciertos municipios, incluidos Tenjo, El Rosal, Madrid, Funza, Facatativá y Mosquera, así como partes de Cota, Tabio, Subachoque, Soacha y Sibaté, como Zonas críticas para la explotación de aguas subterráneas. Estas áreas fueron delineadas dentro de los límites especificados en dos polígonos (1 y 2) (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019).

Como se ilustra en la Figura 32, en donde se muestran los polígonos delineados por CAR junto con los resultados de MT-InSAR, persiste una deformación significativa del suelo en la sabana de Bogotá, particularmente en las áreas críticas identificadas por CAR. Durante nuestro período de estudio, se observaron deformaciones verticales de hasta -400 mm. Esto indica que el hundimiento del suelo en la sabana de Bogotá, bajo monitoreo desde la década de 1990, sigue siendo un desafío persistente en la región y se está extendiendo más allá de los polígonos inicialmente identificados.

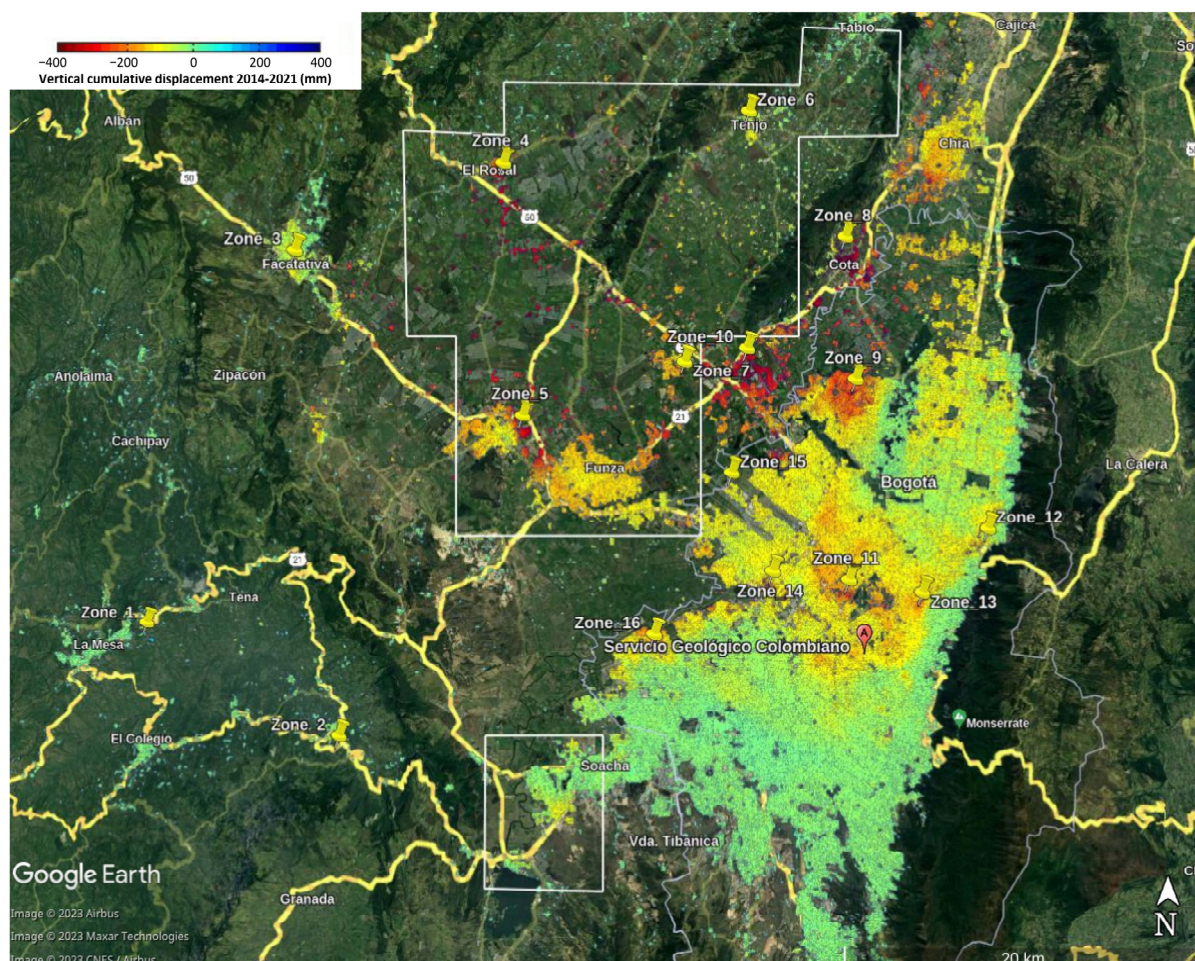


Figura 32. Los polígonos 1 y 2 (en color blanco) delimitan las áreas identificadas como áreas críticas para la explotación de aguas subterráneas por la CAR en 2005 (Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, 2019).

En general, las tasas de deformación en el área de la sabana indican una mayor tendencia de deformación vertical en comparación con la horizontal, lo cual es evidente en las Figuras 9 y 10.

Las deformaciones horizontales identificadas son resultado de desplazamientos secundarios provocados por las subsidencias del terreno. Los eventos de subsidencia sólo ocurren en áreas con variaciones topográficas superficiales y no parecen estar vinculados a características geológicas más profundas. Esto se debe a que la cuenca sinclinal subyacente debería producir movimientos consistentes y convergentes, sin embargo, lo que se observa son movimientos en diferentes direcciones que están consistentemente asociados con la pendiente del terreno donde se produce el hundimiento. Los desplazamientos horizontales suelen ser del 15% al 25% de la magnitud de los desplazamientos verticales, y aumentan con tasas más altas de subsidencias y pendientes más pronunciadas.

Como se mencionó anteriormente, las investigaciones sobre las subsidencias en la ciudad de Bogotá se remontan a la década de 1990, cuando la ciudad fue sometida a análisis de microzonificación sísmica. En investigaciones posteriores se utilizaron diversas técnicas geotécnicas, hidrogeológicas, topográficas y redes GNSS para estudiar la subsidencia en toda el área metropolitana, confirmando su presencia en diferentes lugares de la ciudad. En 2009, el FOPAE y el ICC colaboraron en un estudio que analizaba la eficacia del DInSAR como herramienta de

evaluación para el seguimiento de fenómenos de deformación (Blanco et al., 2009). Para este estudio, se utilizó un conjunto de datos formado por ocho imágenes ENVISAT de 2008-2009, dos imágenes de 2002-2003 y otras ocho imágenes de 1997 a 2006 obtenidas de un estudio posterior para generar 57 interferogramas. Utilizando un algoritmo del ICC para llevar a cabo el análisis multitemporal durante el periodo de estudio de octubre de 1997 a marzo de 2009. Los resultados identificaron con éxito el foco principal de subsidencia de la zona de Puente Aranda, que presentaba una tasa de deformación de 75 mm/año (Figura 33a) (Blanco et al., 2009). Otro estudio, documentado por Mora Paéz et al., 2020, utilizaron imágenes de radar TerraSAR-X para el análisis cuantitativo de hundimiento en Bogotá. El mapa de deformación resultante mostró que la región central de la ciudad tenía una tasa de deformación de hasta -33 mm/año (Figura 33b).

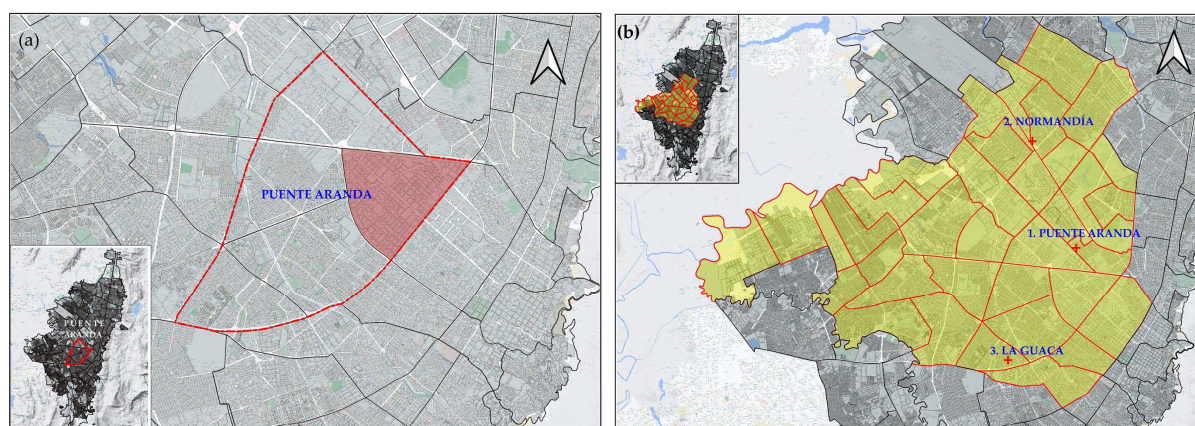


Figura 33. (a) El área urbana de la ciudad de Bogotá centrada en el barrio Puente Aranda mostró altas tasas de velocidad lineal entre 1997 y 2009, según lo observado utilizando imágenes ENVISAT (Fuente: (Blanco et al., 2009)). (b) Otro estudio se centró en tres sitios de Bogotá con diferentes grados de subsidencia entre 2011 y 2017, incluidos el más alto (Puente Aranda), el medio (Normandía) y el bajo (La Guaca), según se calculados a partir de imágenes TerraSAR-X (Fuente: (Mora-Páez et al., 2019)).

A continuación, comparamos nuestros resultados obtenidos a partir de imágenes Sentinel-1 con los estudios previos mencionados anteriormente (Blanco et al., 2009; Mora Paéz et al., 2020), para evaluar la evolución espacio-temporal de las subsidencias en Bogotá. Este proceso de verificación nos permitió conocer mejor los cambios y patrones de subsidencia a lo largo del tiempo.

Examinamos los barrios ubicados en la región central de Bogotá (Figura 32) y observamos que la subsidencia se extiende desde el centro de la ciudad hacia las direcciones norte, sur y oeste mediante el empleo del procesamiento MT-InSAR. En nuestro análisis, hemos identificado 35 zonas específicas (Tabla 4) con tasas anuales de deformación destacadas en esta parte de la ciudad.

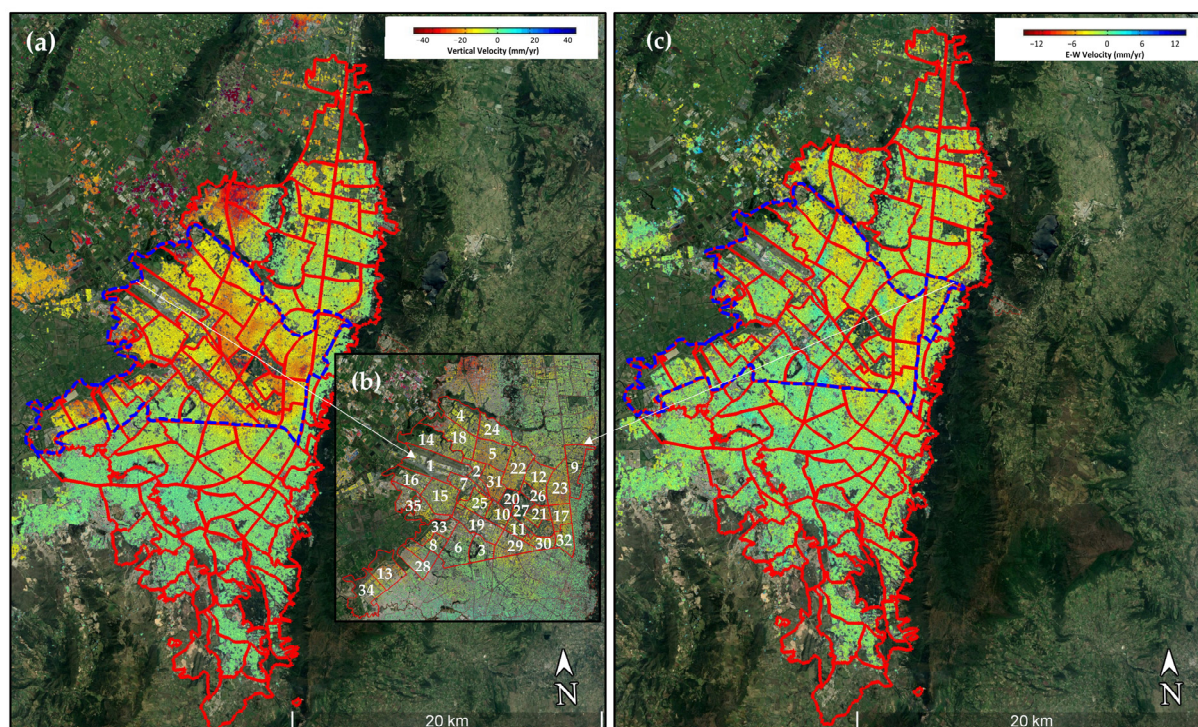


Figura 34. Foco de subsidencia en la ciudad de Bogotá. (a) Las líneas discontinuas azules encierran un área considerable de subsidencia, lo que indica un desplazamiento vertical en el centro de la ciudad de Bogotá. (b) El área resaltada indica vecindarios (Tabla 4) clasificados dentro de la zona de desplazamiento vertical. (c) Las líneas discontinuas encierran un área considerable del desplazamiento este-oeste, indicando la dirección del movimiento en el centro de Bogotá.

En este estudio, para analizar la evolución espacio-temporal de las subsidencias, se clasificaron diferentes barrios que presentaron tasas de subsidencias superiores a 20 mm/año. Algunos de estos barrios, incluidos el n.º 2, 20, 25 y 31, situados en la zona central de la ciudad, presentaron tasas de deformación vertical más bajas, que oscilaron entre -17 y -30 mm/año, en comparación con los estudios anteriormente nombrados. No obstante, se observó un aumento de las tasas de deformación en las regiones cercanas al centro de subsidencia. La tasa de deformación vertical en el barrio de Fontibón (15) fue de $-35,4$ mm/año, el barrio de Garcés Navas (18) fue de $-37,1$ mm/año, el barrio de Granjas de Techo (19) exhibió $-33,1$ mm/año, y el Parque Salitre (26) mostró -38 mm/año. Esto indica que mientras la tendencia de deformación disminuyó en ciertas áreas de la región central, la subsidencia se extendió hacia los barrios periféricos del foco central de subsidencia.

Para validar los resultados de MT-InSAR, se consideró el desplazamiento vertical acumulado de las estaciones GNSS ubicadas en dos áreas de referencia previamente estudiadas en la ciudad de Bogotá: Granjas de Techo y Parque Simón Bolívar. Estas áreas albergan tres estaciones GNSS específicas, BOGT, BOGA y ABCC. Tanto las deformación acumulada vertical-este y las tasas de velocidad por año, derivadas de las estaciones GNSS mostraron coherencia con los resultados de MT-InSAR, como se detalla en la Sección 6.2.

Investigaciones adicionales realizadas por Kaniuth et al., 2002 utilizando las estaciones BOGT y BOGA ubicadas en Bogotá DC obtuvieron un valor de componente vertical de $-25,2 \pm 1,4$ mm/año para BOGA, suponiendo una tasa idéntica para BOGT. Esto se basó en el análisis y procesamiento de datos GPS de 2000-2001. Rudenko & Sch, 2013, llevaron a cabo un reproceso exhaustivo de los datos GNSS desde el período 1998 hasta 2007, revelando una tasa de

deformación de la componente vertical de $-44,21 \pm 0,19$ mm/año. ,casi el doble de la tasa determinada por Kaniuth et al. Además, los últimos estudios de datos GPS de la estación BOGT GNSS, realizados por el SGC, han producido una serie temporal de la componente vertical que muestra una tendencia decreciente continua, correspondiente a una estimación de tendencia lineal de la tasa de $-34,5 \pm 0,9$ mm/año (Sánchez et al., 2008).

Por otro lado, aparte de la existencia de numerosos estudios que han investigado el fenómeno de subsidencias en Bogotá desde la década de 1990, se destaca un estudio en especial, “Avances en estudios de subsidencia en la ciudad de Bogotá” de (Ávila and Castro, 2011). En 2011 realizó y utilizó las variaciones del nivel piezométrico piezométricas registradas durante 15 años para modelar magnitudes de subsidencia y proyectar tendencias futuras de deformaciones verticales. El estudio evaluó la subsidencia causada por el descenso del nivel freático a una tasa de 0,1 m/año utilizando un modelo de "suelo blando" en dos localizaciones: el aeropuerto de El Dorado y el emplazamiento de INGEOMINAS (Figura 35). Este modelo empleó un análisis elastoplástico del proceso de consolidación del suelo. Luego seleccionó una tasa de 0,1 m/año debido a los intervalos de variabilidad limitados y deducidos de los estudios de suelo disponibles, dada la fuerte asociación entre los niveles de agua subterránea y los factores climáticos locales. Finalmente, modelaron la evolución de la subsidencia en estos sitios, analizando durante 100 años bajo cuatro escenarios de disminución del nivel freático a una tasa de 0,1 m/año: un descenso que duró 5 años (curva verde), 10 años (curva azul), 20 años (curva rosa), y 50 años (curva roja). Según el modelo, se anticipó una subsidencia acumulada del terreno de hasta -175 cm (-17,5 mm/año) en INGEOMINAS y -300 cm (-30 mm/año) en el Aeropuerto El Dorado en el escenario más extremo (curva roja). En el escenario menos extremo (curva verde), se predijo que las subsidencias acumuladas del suelo durante 100 años en ambos sitios serían de alrededor de -20 cm (-2 mm/año).

Para validar este modelo, utilizamos los resultados del análisis MT-InSAR y los datos de proyección este estudio para verificar las tasas asentamiento. El modelo estimó la subsidencia en INGEOMINAS entre -80 y -125 mm (-12 - -15,6 mm/año) y en el aeropuerto de El Dorado en torno a -50 mm (-7,5 mm/año) durante los primeros 6,6 años (el periodo de nuestro análisis MT-InSAR). Al comparar estas predicciones con la deformación vertical acumulada obtenida mediante MT-InSAR durante un período de 6,6 años (octubre de 2014-mayo de 2021), nuestro estudio encontró que la deformación vertical acumulada en INGEOMINAS fue de -66 mm (-10 mm/año) y de -80 mm (-12 mm/año) en el Aeropuerto El Dorado (flechas azules en la Figura35). Nuestros resultados se utilizaron para calibrar el modelo, revelando una ligera sobreestimación del asentamiento en INGEOMINAS y una ligera subestimación en el Aeropuerto El Dorado. Sin embargo, en ambos casos, las tasas de subsidencia fueron relativamente similares durante este periodo de 6,6 años.

Para ilustrar el impacto de la inestabilidad sobre las estructuras de los edificios y los asentamientos, este estudio presenta dos estudios de casos de diferentes barrios de Bogotá. En el primer ejemplo se detalla un estudio realizado en 2019 en un conjunto residencial ubicado en la parte occidental del barrio Ciudad Salitre de la ciudad de Bogotá (Figura 36) por El ingeniero topógrafo Gustavo Matiz, el ingeniero civil Leonardo Ruiz Arce y el arquitecto Jorge E. Ruiz Bastidas. En el estudio se detectaron asentamientos entre 4 y 8 cm en varias posiciones dentro de la estructura del edificio. Estos hallazgos se correspondieron con los resultados del análisis MT-InSAR, que demostraron una tasa de deformación vertical de aproximadamente 24 mm/año en las inmediaciones durante el periodo de estudio, como se muestra en la Tabla 4.

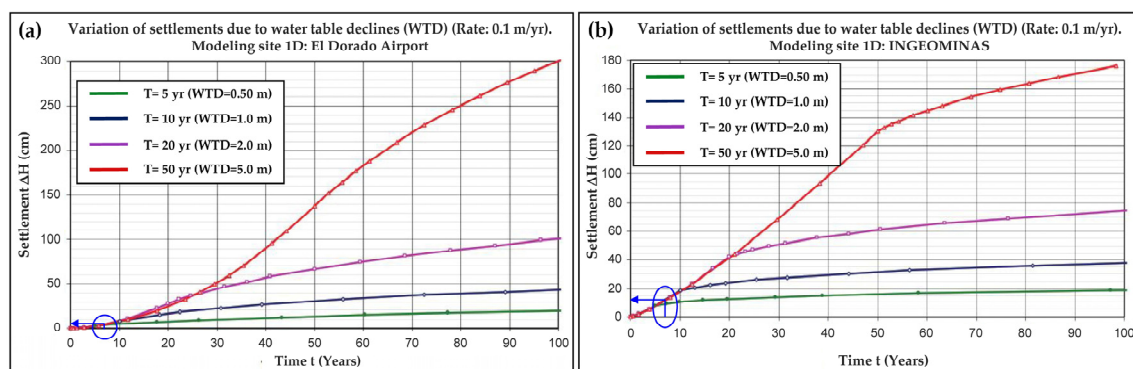


Figura 35. Modelo de predicción de subsidencia siguiendo un descenso del nivel freático a un ritmo de 0,1 m/año durante diferentes periodos. Las flechas azules indican el asentamiento predicho por el modelo para un periodo de 6,6 años coincidente con el periodo de análisis MT-InSAR. (a) Sector Aeropuerto El Dorado. (b) Sector INGEOMINAS. Fuente: (Ávila and Castro, 2011).

Para ilustrar el impacto de la inestabilidad sobre las estructuras de los edificios y los asentamientos, este estudio presenta dos estudios de casos de diferentes barrios de Bogotá. En el primer ejemplo se detalla un estudio realizado en 2019 en un conjunto residencial ubicado en la parte occidental del barrio Ciudad Salitre de la ciudad de Bogotá (Figura 36) por El ingeniero topógrafo Gustavo Matiz, el ingeniero civil Leonardo Ruiz Arce y el arquitecto Jorge E. Ruiz Bastidas. En el estudio se detectaron asentamientos entre 4 y 8 cm en varias posiciones dentro de la estructura del edificio. Estos hallazgos se correspondieron con los resultados del análisis MT-InSAR, que demostraron una tasa de deformación vertical de aproximadamente 24 mm/año en las inmediaciones durante el periodo de estudio, como se muestra en la Tabla 4. Sin embargo, la mayoría de las deformaciones se atribuyeron al proceso de consolidación resultante de las cargas verticales del edificio, lo que sugiere que la construcción intensiva puede contribuir al hundimiento regional. Posteriormente se implementaron medidas de refuerzo estructural. Sin embargo, los ocupantes reportaron daños adicionales en las tuberías y fisuras en las paredes. Se encontró que los daños identificados eran esfuerzos residuales causados por asentamientos remanentes de la estructura y que no representaban un riesgo de colapso de la edificación en el conjunto residencial.

El segundo ejemplo (Figura 37), corresponde a asentamientos que se han presentado en el barrio Chicó Lago que afectan numerosos edificios. Esta zona alguna vez se caracterizó por sus extensos lagos y bosques, pero con el desarrollo urbano de Bogotá, el lago fue desecado, y fue urbanizado poco a poco. Los resultados de MT-InSAR revelaron tasas de deformación que oscilaron entre 0 y -20 mm/año en esta área. Sin embargo, los procesos de consolidación local en las áreas construidas son inferiores al proceso de hundimiento regional. Las conclusiones extraídas de estos resultados deben interpretarse con cautela debido a la disminución de la cubierta arbórea en la zona. Se construyeron escalones para el acceso al edificio, como se muestra en la Figura 35. Esto se puede atribuir al uso de pilotes flotantes hincados, que aumentan la densidad del suelo y transfieren la carga a capas más profundas, reduciendo la tasa de consolidación.

Se llevaron a cabo inspecciones exhaustivas en toda el área de estudio, incluida la ciudad capital, y no se observaron efectos discernibles de hundimiento en las regiones que experimentaron las tasas de subsidencias más altas. Estos efectos podrían haber incluido deformación del suelo, deterioro de edificios o grietas estructurales. Esto puede atribuirse a la mínima aparición de asentamientos diferenciales en un área grande, lo que dificulta discernir el impacto del hundimiento en las estructuras afectadas.



Figura 36. Patologías estructurales de una edificación en el año 2019 en una zona de subsidencia (parte occidental de Ciudad Salitre) en la ciudad de Bogotá. Las imágenes proporcionadas por Gustavo Matiz (Ingeniero Topógrafo), Leonardo Ruiz Arce (Ingeniero Civil) y Jorge E. Ruiz Bastidas (Arquitecto).

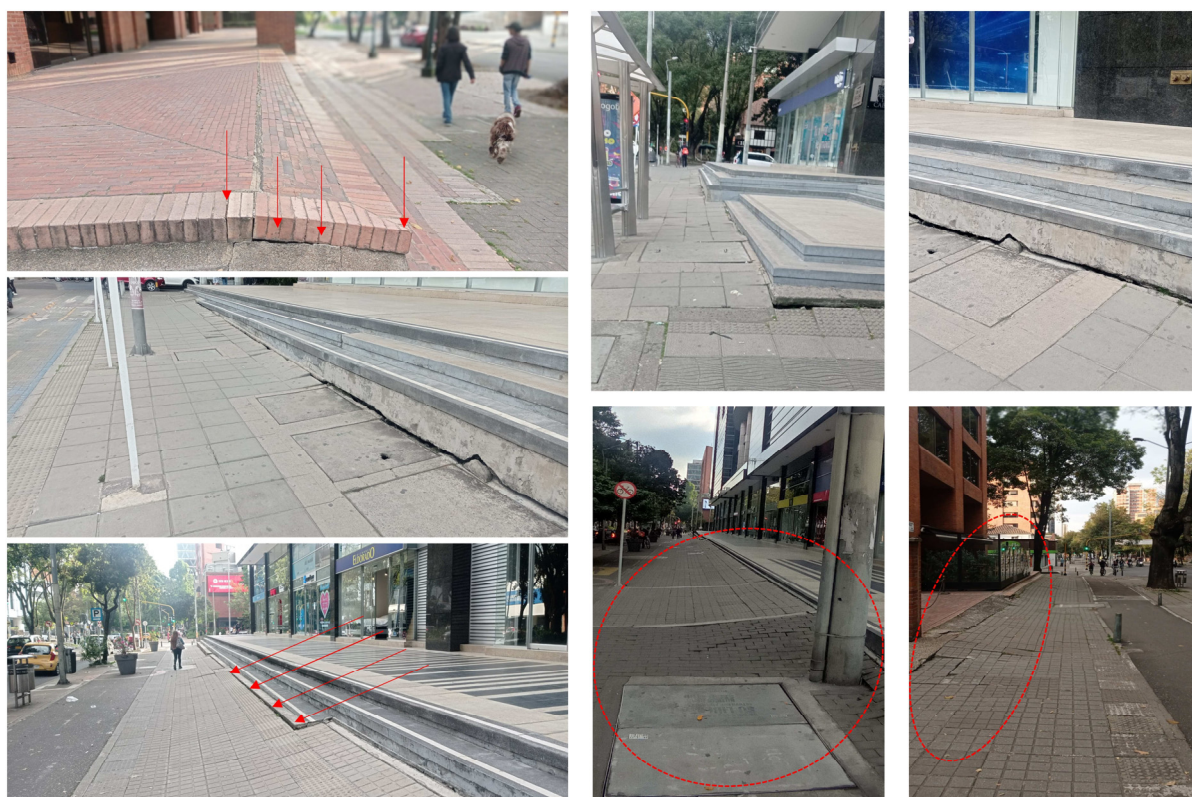


Figura 37. Efectos de los asentamientos en los pasos peatonales alrededor de un centro comercial en el barrio de Chicó Lago.

8 CONCLUSIONES

Este estudio lleva a cabo un análisis MT-InSAR utilizando datos de Sentinel-1 recopilados entre 2014 y 2021, complementado con la verificación mediante datos GNSS. Además, se incorporaron datos hidrogeológicos y geotécnicos anteriores para facilitar la identificación de áreas críticas. Dando por cumplido los objetivos planteados de investigar la subsidencia en la sabana y la ciudad de Bogotá con dos técnicas geodésicas. Además de identificar posibles factores que contribuyen a este fenómeno. Como resultado, se obtienen las siguientes conclusiones:

- El fenómeno de subsidencia en el AOI continúa activo en la actualidad, afectando principalmente a las regiones central y suroeste de la sabana de Bogotá, así como ciertas zonas dentro de ciudad de Bogotá. La sobreexplotación de las aguas subterráneas, impulsada por el desarrollo industrial y el crecimiento demográfico, se considera como la causa principal de las subsidencias, que está presentando desde el año 1990. Varios municipios, entre ellos El Rosal, Madrid, Facatativá, Cota, Funza, Bojacá, entre otros, presentaron importantes deformaciones acumuladas de hasta -400 mm durante el período de investigación desde 2014 al 2021.
- Las subsidencias del terreno revelan tasas de deformación que varían entre -10 y -40 mm/año en las regiones central y oeste de la sabana de Bogotá, con algunos lugares incluso registrando tasas más elevadas de hasta 60 mm/año. A diferencia de las tasas previas de subsidencia vertical, las deformaciones horizontales en la dirección este-oeste alcanzan aproximadamente los 12 mm/año, siendo estas inferiores a las tasas verticales dentro del área de interés (AOI). No obstante, es crucial señalar que esta problemática aún representa un desafío significativo que demanda una vigilancia constante en la región. En cuanto a los acuíferos Cuaternario y Guadalupe, muestran tasas de deformación en continuo descenso, indicando una posible disminución del nivel potenciométrico de las aguas subterráneas en la región. Este agotamiento se atribuye a la extracción intensiva para satisfacer necesidades básicas de consumo que superan la recarga natural. Como consecuencia, las capas superficiales experimentan compactación y hundimiento, generando un rápido deterioro de los pavimentos en la sabana y la ciudad de Bogotá.
- Los resultados del procesamiento MT-InSAR revelan que, al igual que la sabana, Bogotá experimenta tasas de deformación en diferentes barrios situados en el norte, centro, oeste y algunas partes del sur. Estudios previos han identificado tasas de deformación de hasta -33 mm/año en barrios específicos de la ciudad. En nuestro análisis se observaron tasas de deformación aún mayores y una expansión espacio-temporal desde el centro de la ciudad hacia el sur, el norte y el oeste.
- Por el contrario, la zona central de Bogotá experimentó un movimiento de descenso constante de 2014 a 2021, como lo confirman tanto los resultados MT-InSAR y los GNSS de las estaciones SIRGAS. Lo que proporciona una validación adicional en una parte significativa de la ciudad. Por consiguiente, es necesario realizar un seguimiento continuo de la subsidencia en la capital, debido a la gran extensión de la ciudad, lo que podría suponer un riesgo para la estabilidad de las estructuras. de las estructuras. No obstante, se debe tener cautela en el momento de clasificar los mecanismos que desencadenan estas subsidencias en el interior de la ciudad debido a que existen diversos factores que pueden malinterpretarse.

- Además, el estudio constató que la creciente demanda de viviendas en ciudades y pueblos más pequeños contribuye al hundimiento de la sabana de Bogotá. La construcción de nuevos edificios multifamiliares, fábricas, almacenes y otras estructuras ha provocado una consolidación de la carga estructural en el suelo, captada por radar, que puede persistir hasta 20 años o más.
- La falta de datos actuales y accesibles al público sobre los niveles piezométricos o los niveles freáticos en la región presenta desafíos para la investigación. Sería beneficioso establecer un sistema de información público y exhaustivo para facilitar investigaciones futuras sobre el uso de aguas subterráneas y sistemas de control piezométrico. El análisis MT-InSAR desempeña un papel crucial en un sistema de alerta temprana que identifica las zonas que requieren vigilancia e intervención en problemas relacionados con la subsidencia. No obstante, este sistema puede complementarse con otras tecnologías de monitorización geodésica.

Los resultados de este Trabajo de Fin de Máster se han publicado en la revista Remote Sensing con la siguiente referencia: Tamayo Duque et al. Study of Recent Deformations in the Bogotá Savanna and the City of Bogotá (Colombia) Using Multi-Temporal Satellite Radar Interferometry, *Remote Sens.* 2023, 15, 5249. <https://doi.org/10.3390/rs15215249>. El propósito de esta publicación es poner a disposición de la comunidad científica datos que permitan analizar fenómenos similares o monitorizar la evolución de estos en la región. Se hace énfasis en la relevancia para la comunidad científica regional, facilitando el acceso a información que respalde la realización continua de estudios sobre la evolución de subsidencias en la Sabana de Bogotá

9 BIBLIOGRAFIA

- Alcaldía mayor de bogotá. (2017). *Resumen del diagnostico general. Plan de ordenamiento territorial de Bogotá*.
http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/201708_resumendiagnosticopot_v3.0.pdf
- Antonio-Fragala, F., Obregón-Neira, N. (2011). Estimación de la recarga media anual en los acuíferos de la sabana de Bogotá. *Ingeniería y Universidad*, 15(1), 145–169.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-21262011000100009&lang=pt%5Cnhttp://www.scielo.org.co/pdf/inun/v15n1/v15n1a09.pdf
- Ávila A., G. E. (2004). *Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. aplicación a la arcilla de Bogotá* [Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/10803/6233>
- ávila Briceño, D. A. (2020). *Estimación del potencial geotérmico de baja entalpía para la ciudad de Bogotá y la Sabana de Bogotá usando bombas de calor de agua subterránea* [Universidad de los Andes]. <http://hdl.handle.net/1992/51292>
- Ávila, G. (2004). Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá [Universitat Politècnica de Catalunya]. In *Estudio de la retracción y el agrietamiento de arcillas. Aplicación a la arcilla de Bogotá*.
<http://www.tesisenred.net/handle/10803/6233>
- Ávila, G., Castro, N. (2011). Avances en el estudio de subsidencia en la ciudad de Bogotá. *VIII Seminario Colombiano de Geotecnia*, 6-1-6–11.
- Beladam, O., Balz, T., Mohamadi, B., Abdalhak, M. (2019). Using ps-insar with sentinel-1 images for deformation monitoring in northeast Algeria. *Geosciences (Switzerland)*, 9(7).
<https://doi.org/10.3390/geosciences9070315>
- Bermoudes, O., Velandia, F. (2002). *Modelo hidrogeologico conceptual de la sabana de bogota*.
- Bernal, Germán Horacio Rosero; Cadena, M. C., Montealegre, Martha Cecilia; Enrique, J. (2014). *Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá y Cuenca Alta del Río Tunjuelo* (Bogotá : 2007 (ed.)). <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/clima>
- Blanco, P., Barreto, G., Ortiz Abaunza, D. (2009). La interferometría diferencial dinsar – una técnica para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá d. C. *Dirección de Prevención y Atención de Emergencias de Bogotá - DPAE*, 1–15.
[http://www.icgc.cat/es/content/download/20083/64365/version/1/file/12_ARTICULO Boletin Colombiano de Geotecnia GBA.pdf](http://www.icgc.cat/es/content/download/20083/64365/version/1/file/12_ARTICULO%20Boletin%20Colombiano%20de%20Geotecnia%20GBA.pdf)
- Caicedo, B., Mendoza, C., López, F., Lizcano, A. (2018). Behavior of diatomaceous soil in lacustrine deposits of Bogotá, Colombia. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 10(2), 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.10.005>
- Chalouan, A., Gil, A. J., Galindo-Zaldívar, J., Ahmamous, M., Ruano, P., De Lacy, M. C., Ruiz-Armenteros, A. M., Benmakhlouf, M., Riguzzi, F. (2014). Active faulting in the frontal Rif Cordillera (Fes region, Morocco): Constraints from GPS data. *Journal of Geodynamics*, 77, 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.01.002>
- Chicangana, G., Vargas-jiménez, C. A., Kammer, A., Caneva, A., Capera, A. G. (2015). *La amenaza sísmica de la Sabana de Bogotá frente a un sismo de magnitud $M > 7.0$, cuyo origen esté en el Piedemonte Llanero A ameaça sísmica da Sabana de Bogotá ante um sismo de magnitude $M > 7.0$ cuja origem esteja no Piedemonte Llanero*. 24, 73–91.
<https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50207>

- Córdoba Álvarez, R. D. (2012). *Una aproximación estocástica para modelar y caracterizar los episodios torrenciales en el espacio y el tiempo – Caso de estudio Sabana de Bogotá* [Universidad de los Andes]. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/12053/u670567.pdf?sequ>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, C. (2019). *Plan de manejo ambiental de agua subterránea en la Sabana de Bogotá y zona crítica* (1ra ed., p. 176). Imprenta Nacional de Colombia. <https://www.car.gov.co/vercontenido/94>
- 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>
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá -ESP, E.-E. (n.d.). *¿De dónde viene el agua que consume Bogotá?* <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/agua>
- Escobar Castro, G., Marantes González, L. E., Lindon Losada, G. P., Díaz Parra, F. J. (2010). *Zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá para el diseño sísmo resistente de edificaciones*. https://www.idiger.gov.co/documents/20182/112614/Zonificacion_Respuesta_Sismica-FOPAE-2010.pdf
- Farolfi, G., Bianchini, S., Casagli, N. (2019). Integration of GNSS and Satellite InSAR Data: Derivation of Fine-Scale Vertical Surface Motion Maps of Po Plain, Northern Apennines, and Southern Alps, Italy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(1), 319–328. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2854371>
- Fárová, K., Jelének, J., Kopačková-Strnadová, V., Kysel, P. (2019). Comparing DInSAR and PSI Techniques Employed to Sentinel_1 Data to Monitor Highway Stability_ A Case Study of a Massive Dobkovičky Landslide_Czech Republic.pdf. *Emote Sensing*, 11. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/rs11222670>
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Figueroa-Miranda, S., Tuxpan-Vargas, J., Ramos-Leal, J. A., Hernández-Madriral, V. M., Villaseñor-Reyes, C. I. (2018). Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Engineering Geology*, 246(November), 91–106. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2018.09.023>
- Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y., Perissin, D. (2019). An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74(August 2018), 248–258. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.018>
- Galloway, D., Jones, D. R., Ingebritsen, S. E. (1999). Land subsidence in the United States. In *US Geological Survey Circular* (Issue 1182). <https://doi.org/10.3133/cir1182>
- García Álvarez, D. A. (2008). *Sistema GNSS(Global Navigation Satellite System)*. 5–6. <http://arantxa.ii.uam.es/~jms/pfcsteleco/lecturas/20080125DavidGarcia.pdf>
- He, X. C., Yang, T. L., Shen, S. L., Xu, Y. S., Arulrajah, A. (2019). Land subsidence control zone and policy for the environmental protection of Shanghai. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(15), 1–13. <https://doi.org/10.3390/ijerph16152729>
- Hofmann-Wellenho, Bernhard Lichtenegger, H., Wasle, E. (2008). *GNSS Global Navigation*

- Satellite Systems GPS, GLONASS, GALILEO & MORE* (S.-V. Wien (ed.); Springer-V). Springer-Verlag Wien.
- Hollenstein, C., Müller, M. D., Geiger, A., Kahle, H. G. (2008). Crustal motion and deformation in Greece from a decade of GPS measurements, 1993-2003. *Tectonophysics*, 449(1-4), 17-40. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.12.006>
- Hooghiemstra, H., Sarmiento, G. (1991). Long continental pollen record from a tropical intermontane basin: Late Pliocene and Pleistocene history from a 540-meter core. *Episodes*, 14(2), 107-115. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1991/v14i2/001>
- Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arikan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514-517, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- Hooper, A. J. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letters*, 35(16), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2008GL034654>
- Hu, L., Navarro-Hernández, M. I., Liu, X., Tomás, R., Tang, X., Bru, G., Ezquerro, P., Zhang, Q. (2022). Analysis of regional large-gradient land subsidence in the Alto Guadalupe Basin (Spain) using open-access aerial LiDAR datasets. *Remote Sensing of Environment*, 280(August). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113218>
- IGAC. (2018). *MAGNA-SIRGAS*. IGAC. <https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/magna-sirgas>
- IGAC. (2020). *Red MAGNA ECO*. IGAC. <https://www.igac.gov.co/es/contenido/areas-estrategicas/red-magna-eco>
- Ingeominas, Universidad de los Andes, U. (n.d.). *Microzonificación sísmica de Santa Fe de Bogotá. Convenio interadministrativo 01-93.pdf*.
- Kaniuth, K., HäfeleHafele, P., Sánchez, L. (2002). Subsidence of the Permanent GPS Station Bogotá. In P. Drewes, H., Dodson, A.H., Fortes, L.P.S., Sánchez, L., Sandoval (Ed.), *Vertical Reference Systems. International Association of Geodesy Symposia*, vol 124. (Issue 48, pp. 56-59). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-04683-8_12
- Landscapes, W. G. (2016). *Landscapes and Landforms of Colombia* (M. Hermelin (ed.)). Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11800-0>
- Lazos, I., Chatzipetros, A., Pavlides, S., Pikridas, C., Bitharis, S. (2020). Tectonic crustal deformation of corinth gulf, greece, based on primary geodetic data. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*, 17(4), 413-424. <https://doi.org/10.13168/AGG.2020.0030>
- Lizarazo, P. (2011). *La Integración de la Región Capital hacia 2038*. Subdirección Imprenta Distrital DDD. <https://observatorio.desarrolloeconomico.gov.co/competitividad/la-integracion-de-la-region-capital-hacia-2038>
- Lobo-guerrero, A. (1992). *Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana*.
- Lobo-Guerrero, A. (1995). Descenso de Niveles de Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá. *VIII Jornadas Geotécnicas de La Ingeniería En Colombia -II Foro Sobre Geotecnia de La Sabana de Bogotá*, 1-11.
- Lobo-Guerrero, A., Gilboa, Y. (1987). Grounwater in Colombia. *Hydrological Sciences Journal*, 32(2), 161-178. <https://doi.org/10.1080/02626668709491175>
- López Hernández, C. N., Jaramillo Garcés, M. M., Avendaño A., A. J., Pérez Otavo, D., Romero C., Y. E., Gaitán Victoria, C. E. (2020). *Indicadores de consumo de agua y*

- energía eléctrica*. Alcaldía Mayor de Bogotá: Secretaria de Planeación. https://www.sdp.gov.co/sites/default/files/indicadores_de_consumo_de_agua_y_energia_electrica_-_bogota_d.c._2020_vf.pdf
- Mejía Ramírez, M. V., Ramírez-Guna, E. J., Valero Fandiño, J. A. (2016). *Análisis de las variaciones de niveles piezométricos del complejo acuífero cuaternario, registrados dentro de pozos profundos, por la car, entre 1998 y 2007, en la sabana de Bogotá*. [Universidad Católica de Colombia]. <http://hdl.handle.net/10983/14015>
- Minh, D. H. T., Hanssen, R., Rocca, F. (2020). Radar interferometry: 20 years of development in time series techniques and future perspectives. *Remote Sensing*, 12(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/RS12091364>
- Modoni, G., Darini, G., Spacagna, R. L., Saroli, M., Russo, G., Croce, P. (2013). Spatial analysis of land subsidence induced by groundwater withdrawal. *Engineering Geology*, 167, 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.014>
- Montoya, D. M., Reyes, G. A. (2005). Geología de la Sabana de Bogotá. In *Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS)* (p. 105). Editor: Bogotá, Colombia : Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS). https://catalogo.sgc.gov.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=48393&shelfbrowse_itemnumber=47740
- Mora-Páez, H., Kellogg, J. N., Freymueller, J. T. (2019). Contributions of Space Geodesy for Geodynamic Studies in Colombia: 1988 to 2017. In A. O. (editors Gómez, J. & Pinilla-Pachon (Ed.), *LR Lloyd's Register* (Vol. 100, Issue July, pp. 479–498). <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.14>
- Mora, O., Lanari, R., Mallorqui, J. J., Berardino, P., Sansosti, E. (2002). A new algorithm for monitoring localized deformation phenomena based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2, 1237–1239. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1025900>
- Mora Paéz, H., Díaz Mila, F., Cardona, L. (2020). Mapping Land Subsidence in Bogotá, Colombia, Using the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) Technique with TerraSAR-X Images. *His Master's Voice*, 4, 515–548. <https://doi.org/10.7551/mitpress/12605.003.0019>
- Müller, M. D., Geiger, A., Kahle, H. G., Veis, G., Billiris, H., Paradissis, D., Felekis, S. (2013). Velocity and deformation fields in the North Aegean domain, Greece, and implications for fault kinematics, derived from GPS data 1993-2009. *Tectonophysics*, 597–598, 34–49. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.08.003>
- Neely, W. R., Borsas, A. A., Burney, J. A., Levy, M. C., Silverii, F., Sneed, M. (2021). Characterization of Groundwater Recharge and Flow in California's San Joaquin Valley From InSAR-Observed Surface Deformation. *Water Resources Research*, 57(4), 1–20. <https://doi.org/10.1029/2020WR028451>
- Ojeda, J., Donnelly, L. (2006). Landslides in Colombia and their impact on towns and cities. *Remote Sensing*, 112(112), 103–122. [https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijece/7/2/7_56/_article%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/228834189_Landslides_in_Colombia_and_their_impact_on_towns_and_cities#:~:text=Each year landslides in Colombia,damage to towns and cities.&text=These b](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ijece/7/2/7_56/_article%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/228834189_Landslides_in_Colombia_and_their_impact_on_towns_and_cities#:~:text=Each%20year%20landslides%20in%20Colombia,damage%20to%20towns%20and%20cities.&text=These%20b)
- Perissin, D. (2016). Interferometric SAR multitemporal processing: Techniques and applications. *Remote Sensing and Digital Image Processing*, 20, 145–176. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_8

- Piña, W. A., Martínez, C. I. P. (2014). The Suburbanization Process in Bogotá D.C. and Municipalities of the Savanna of Bogotá 1998-2010. In *Suburbanization Versus Peripheral Sustainability of Rural-Urban Areas Fringes* (pp. 103–122). Nova Science Publishers, Inc. <https://novapublishers.com/shop/suburbanization-versus-peripheral-sustainability-of-rural-urban-areas-fringes/>
- Poland, J. F. (1987). Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal. In *Tunnelling and Underground Space Technology* (Vol. 2, Issue 2). [https://doi.org/10.1016/0886-7798\(87\)90022-8](https://doi.org/10.1016/0886-7798(87)90022-8)
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodríguez, E., Goldstein, R. M. (2010). Synthetic aperture radar interferometry. *Sciences of Geodesy - I: Advances and Future Directions*, 88(3), 415–474. https://doi.org/10.1007/978-3-642-11741-1_11
- Rudenko, S., Sch, N. (2013). *Reprocessed height time series for GPS stations. 2008*, 23–41. <https://doi.org/10.5194/se-4-23-2013>
- Ruiz-Constán, A., Ruiz-Armenteros, A. M., Martos-Rosillo, S., Galindo-Zaldívar, J., Lazecky, M., García, M., Sousa, J. J., Sanz de Galdeano, C., Delgado-Blasco, J. M., Jiménez-Gavilán, P., Caro-Cuenca, M., Luque-Espinar, J. A. (2018). SAR interferometry monitoring of subsidence in a detritic basin related to water depletion in the underlying confined carbonate aquifer (Torremolinos, southern Spain). *Science of the Total Environment*, 636(April), 670–687. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.280>
- Sabana Centro Cómo Vamos. (2018). *Análisis de la situación poblacional Sabana Centro* (Issue 1). <http://sabanacentrocomovamos.org/home/informes-especiales/>
- Sánchez, L., Drewes, H. (2016). Crustal deformation and surface kinematics after the 2010 earthquakes in Latin America. *Journal of Geodynamics*, 102, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.06.005>
- Sánchez, L., Drewes, H. (2020a). *Geodetic Monitoring of the Variable Surface Deformation in Latin America*. https://doi.org/10.1007/1345_2020_91
- Sánchez, L., Drewes, H. (2020b). Velocity model for SIRGAS 2017: VEMOS2017. *Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut Der Technischen Universität München, PANGAEA*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1594/PANGAEA.912350>
- Sánchez, L., Drewes, H., Brunini, C., Mackern, M. V., Martínez-Díaz, W. (2015). *SIRGAS Core Network Stability* (pp. 183–191). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/1345_2015_143
- Sánchez, L., Martínez, W., Herrera, I., Téllez, L. (2008). *Estimación de la Subsistencia en Bogotá a partir de mediciones GNSS y nivelación geométrica*. https://www.sirgas.org/fileadmin/docs/Boletines/Bol13/46_Subsistencia_Bogota_GPS_nivelacion_Martinez_et_al.pdf
- Sato, C., Haga, M., Nishino, J. (2006). Land Subsidence and Groundwater Management in Tokyo. *International Review for Environmental Strategies (IRES)*, 6(2), 403 – 424.
- Shi, X., Wu, J., Ye, S., Zhang, Y., Xue, Y., Wei, Z., Li, Q., Yu, J. (2008). Regional land subsidence simulation in Su-Xi-Chang area and Shanghai City, China. *Engineering Geology*, 100(1–2), 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.02.011>
- SIRGAS. (2021). *SIRGAS: Sobre nosotros*. SIRGAS. <https://www.sirgas.org/es/sirgas-definition/>
- Sosa Ruiz, D., López-Caloca, A. A., Couturier, S. (2018). Posibilidades y limitaciones de la interferometría radar (InSAR) con imágenes de una y dos polarizaciones para el monitoreo de áreas urbanas. Caso de estudio: Zona Metropolitana del Valle de México. *Análisis*

- Geoespacial En Los Estudios Urbanos, April*, 15–38. https://www.researchgate.net/publication/324416097_Posibilidades_y_limitaciones_de_la_interferometria_radar_InSAR_con_imagenes_de_una_y_dos_polarizaciones_para_el_monitoreo_de_areas_urbanas_Caso_de_estudio_Zona_Metropolitana_del_Valle_de_Mexico
- Tomás, R., Herrera, G., José, D., Peña, F. (2009). *Subsidencia del terreno*. 295–302.
- Torres, V., Vandenberghe, J., Hooghiemstra, H. (2005). An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogotá basin (Colombia) during the last 3 million years from abiotic and biotic proxies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 226(1–2), 127–148. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.05.005>
- Vallejo, L. I. G. De, Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo, C. (2002). *Ingeiería geológica* (ALHAMBRA (ed.); N.º 1 edic). PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Zhong, L., Jixian, Z., Yonghong, Z., Dzurisin, D. (2010). Monitoring and characterizing natural hazards with satellite InSAR imagery. *Annals of GIS*, 16(1), 55–66. <https://doi.org/10.1080/19475681003700914>