

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN
FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO



**INTERFEROMETRÍA DE RADAR PARA EL ESTUDIO DE
SUBSIDENCIA EN ZONAS PROPENSAS DEL VALLE DE MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN

PRESENTA
MANUEL TREJO ECHEAGARAY

DIRECTORES
DR. WENSESLAO PLATA ROCHA
DR. ALONSO A. ARELLANO BAEZA

2024



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



Resumen

El fenómeno de subsidencia por consolidación regional que se presenta en la planicie cubierta antiguamente por los lagos del Valle de México tiene consecuencias cada vez más graves. Afecta tanto al patrimonio inmobiliario histórico como reciente, así como instalaciones tan importantes como la Red de Agua Potable, el Metro y el Gran Canal. Además, representa un riesgo para la población, debido a fenómenos asociados como las inundaciones y el agrietamiento en zonas de transición abrupta entre suelos blandos y firmes. Se sabe que la subsidencia es principalmente una consecuencia de la extracción de agua mediante pozos profundos del acuífero que subyace en el área metropolitana para el suministro de este líquido a la población. Este proceso induce abatimientos piezométricos que conducen a un aumento de los esfuerzos efectivos en los materiales arcillosos del subsuelo, lo que a su vez causa una subsidencia por consolidación regional. Este trabajo de investigación se centró en el estudio de la subsidencia del Valle de México, empleando 167 imágenes satelitales Sentinel-1 capturadas entre 2016 y 2023, procesadas con el enfoque *Persistent Scatterer Interferometry* (PSInSAR). Se compararon los resultados con datos GNSS obtenidos de las estaciones de monitoreo permanente MMX1 y TNGF como método de comparación. La caracterización de los desplazamientos verticales se llevó a cabo mediante metodología geoestadística, empleando kriging ordinario. Se consideró cuidadosamente el modelo del variograma para generar mapas de velocidades de hundimiento y evaluar su distribución espacial con mayor precisión. Los resultados obtenidos con SAR son consistentes con los patrones de desplazamiento vertical observados por otras técnicas, aunque se detectó una discrepancia en los valores de las velocidades. Se concluye que mediante la aplicación de imágenes capturadas por SAR, es posible identificar patrones en los desplazamientos verticales. No obstante, dado que se trata de una técnica indirecta, es imprescindible complementar estos resultados con métodos alternativos, como datos de nivelaciones entre bancos de nivel y GNSS, para describir con mayor detalle y fiabilidad el fenómeno de la subsidencia.

Palabras clave: *Subsidencia, Valle de México, Velocidades de hundimiento, PSInSAR.*

Abstract

The phenomenon of regional subsidence due to consolidation in the plains formerly covered by the lakes of the Valley of Mexico has increasingly severe consequences. It affects both historic and modern real estate assets, as well as critical infrastructure, including the Potable Water Network, the Metro, and the Gran Canal. Additionally, it poses risks to the population due to associated phenomena such as flooding and ground cracking in areas with abrupt transitions between soft and firm soils. Subsidence is primarily a consequence of water extraction through deep wells from the aquifer underlying the metropolitan area, which supplies water to the population. This process induces piezometric declines that lead to increased effective stresses in the clayey subsurface materials, ultimately causing regional subsidence through consolidation. This research focused on studying subsidence in the Valley of Mexico by employing 167 Sentinel-1 satellite images captured between 2016 and 2023, processed with the *Persistent Scatterer Interferometry* (PSInSAR) technique. The results were compared with GNSS data obtained from the permanent monitoring stations MMX1 and TNGF to validate the findings. The characterization of vertical displacements was conducted using geostatistical methodology, specifically ordinary kriging. Careful attention was given to the variogram model to produce subsidence rate maps and assess their spatial distribution with greater precision. The results obtained through SAR are consistent with the vertical displacement patterns observed by other techniques, although some discrepancies were noted in the subsidence rate values. The study concludes that SAR imagery enables the identification of patterns in vertical displacements. However, given that it is an indirect technique, it is essential to complement these findings with alternative methods, such as leveling and GNSS data, to describe the phenomenon of subsidence in greater detail and with higher reliability.

Keywords: *Land subsidence, Valley of Mexico, Subsidence rates, PSInSAR.*

Agradecimientos

- Doy eternas gracias a Dios, lo logrado es gracias a su divina intervención. *Porque todas las cosas proceden de él, y existen por él, y para él. ¡ A él sea la gloria por siempre ! Amén. (Romanos 11:36).* A mi familia y pareja por su constante amor y apoyo que han sido pilares fundamentales en mi camino.
- Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por la beca otorgada que hizo posible la realización de mis estudios de maestría **CVU: 1201340**.
- Al Dr. Wenseslao Plata Rocha, por su compromiso y valiosa orientación, facilitando los recursos necesarios para la realización de mi proyecto bajo su dirección. Al Dr. Alonso A. Arellano Baeza y a su esposa, Marina Stepanova, por su generosidad y por abrirme las puertas de su hogar durante mi paso por la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago de Chile. Valoro sus consejos, extrañando los momentos compartidos en los que disfrutábamos del té y cocinábamos esos espectaculares asados, haciendo de mi estancia algo verdaderamente especial que jamás olvidaré.
- Al grupo del Laboratorio de Geoinformática del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, M.I. Edgar Méndez Sánchez, Dr. Moises Juárez Camarena, Dr. Gabriel Auvinet Guichard y M.C. Daniel Hernández Andrade quienes me recibieron de la mejor manera. Bajo su dirección, logré comprender la complejidad de este tema de investigación, una oportunidad que ha sido y seguirá siendo invaluable para mi preparación académica.
- A la Universidad Autónoma de Sinaloa, especialmente a la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio, al Director, M.C. Aníbal I. Arana Medina, y al Secretario Administrativo, Lic. R. Kishan Singh Cebreros, por su ayuda permanente en la gestión de mis traslados aéreos. Al Dr. Sergio A. Monjardín Armenta y al Dr. Rosendo Romero Andrade por sus observaciones y comentarios. A la Facultad de Informática Culiacán y a la Coordinación del Posgrado en Ciencias de la Información, Dra. Xiomara P. Zaldivar Colado y la M.C. Thania R. Félix González. Asimismo, agradezco a mis compañeros de posgrado por las experiencias compartidas, así como a los profesores, cuyas enseñanzas fueron fundamentales para mi desarrollo académico.

With age comes wisdom, as youthful innocence is replaced by experience.

The arrow of time guides us through the stages of life. It shapes us. It defines who we are. From the moment we are born until the day we die.

Índice General

	Pág
Resumen	v
Abstract	vii
Agradecimientos	ix
Lista de Figuras	xvii
Lista de Tablas	xxi
Lista de Acrónimos	xxiii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del Problema	2
1.3. Justificación	3
1.4. Objetivos	4
1.4.1 Objetivo General	4
1.4.2 Objetivos Específicos	4
1.5. Antecedentes	5
1.5.1 Valle de México	5
1.5.2 Interferometría SAR	10
Capítulo 2. Marco Teórico	15
2.1. Percepción Remota	15
2.1.1 Definición	15
2.1.2 Sistema Sensor	16
2.1.3 Historia Temprana	18
2.1.4 Desarrollo Actual	21
2.2. Radiación Electromagnética	21
2.2.1 Espectro Electromagnético	24
2.2.2 Categorías del Espectro Electromagnético	26

2.2.3	Región de las Microondas	27
2.3.	Sistema Activo de Microondas	27
2.3.1	Penetración	28
2.3.2	Polarización	30
2.3.3	Trayectoria y Ángulo	31
2.4.	Principios del SAR	33
2.4.1	Resolución Espacial del Radar	33
2.4.2	Sistema de Apertura Real	34
2.4.3	Sistema de Apertura Sintética	36
2.5.	Interferometría de Radar	38
2.5.1	Coherencia	41
2.5.2	DInSAR	43
2.5.3	Técnicas Avanzadas	44
2.6.	Plataformas Satelitales de Radar	48
2.6.1	Sentinel-1	49
2.7.	Geoestadística	57
2.7.1	Análisis Exploratorio	59
2.7.2	Análisis Estructural	63
2.7.3	Predicciones	67
Capítulo 3. Materiales y Métodos		69
3.1.	Identificación del Área de Estudio	70
3.2.	Selección de Plataforma Satelital	79
3.2.1	Validación de Información Disponible	79
3.2.2	Adquisición de Datos de Radar	81
3.3.	Procesamiento SAR	82
3.4.	Datos GNSS	85
3.5.	Análisis Geoestadístico	88
3.5.1	Recopilación de Información	89
3.5.2	Construcción de Bases de Datos	89
3.5.3	Análisis Exploratorio	90
3.5.4	Análisis Estructural	90
3.5.5	Estimación	95
3.5.6	Visualización	96

Capítulo 4. Resultados y Análisis	97
4.1. Fase Enrollada	98
4.2. Fase Desenrollada	101
4.3. Estimación de Velocidad Media	104
4.4. Procesamiento GNSS	107
4.5. PSInSAR y Geoestadística	110
Capítulo 5. Conclusiones	117
5.1. Conclusiones	117
5.2. Trabajos Futuros y Recomendaciones	121
Apéndice A. Plataformas Satelitales de Radar	123
Apéndice B. ID de Imágenes SAR Adquiridas	125
Apéndice C. Parámetros de Separación Espacio-Temporal	133
Apéndice D. Análisis Gráfico de Separación Espacio-Temporal	141
Bibliografía	145

Lista de Figuras

	Pág	
1.1	Desarrollo urbano de la Ciudad de México 1959-2016.	7
1.2	Geología y Morfología de la Cuenca de México.	8
1.3	Emersión aparente en el Monumento a la Independencia (1910-2010). .	9
1.4	Mapa global de la distribución geográfica de implementación de InSAR para el análisis de subsidencia.	10
1.5	Producto de velocidades de hundimiento en la Ciudad de México a partir de datos de PSInSAR, CGPS y Landsat ETM+.	11
1.6	Producto de análisis de velocidades de hundimiento en la Ciudad de México a partir de datos satelitales de ENVISAT, ALOS-1, COSMO- SkyMed, ALOS-2 y SENTINEL-1 mediante los métodos GEOS-ATSA y GEOS-SBAS.	12
1.7	Producto de velocidades de hundimiento en el Centro de la Repúbli- ca Mexicana partir de procesamiento SBAS y parámetros de balance hídrico subterráneo.	13
2.1	Formas de percepción remota.	17
2.2	Evolución histórica de los sistemas de percepción remota en platafor- mas aéreas y satelitales (1858 - 2000).	19
2.3	Componentes eléctricos y magnéticos de la radiación electromagnética.	22
2.4	Amplitud, frecuencia y longitud de onda.	23
2.5	Regiones del espectro electromagnético.	25
2.6	Distintos tipos de retrodispersión.	29
2.7	Polarización en señales de radar.	30
2.8	Ángulo de depresión en los sistemas de radar.	32
2.9	Ángulo de observación en los sistemas de radar.	32
2.10	Geometría de adquisición de un sistema RAR instalado en una plata- forma satelital.	34
2.11	Señal en el Radar de Apertura Sintética.	37
2.12	Componentes de una imagen SAR compleja.	39
2.13	Representación de coherencia para la Ciudad de México.	42
2.14	Técnicas avanzadas multitemporales.	47

2.15	Panorama de satélites con instrumentos SAR.	48
2.16	Constelación Sentinel-1.	50
2.17	Modos de operación de Sentinel-1.	53
2.18	Escenario de observación Sentinel-1A.	55
2.19	Escenario de observación constelación Sentinel-1.	56
2.20	Representación esquemática de un campo aleatorio.	58
2.21	Esquema representativo de la evaluación de la estacionariedad.	62
2.22	Principales elementos del variograma.	64
2.23	Modelos básicos del variograma.	66
3.1	Esquema metodológico general empleado en el presente trabajo de investigación.	70
3.2	Configuración topográfica en el Valle de México.	72
3.3	Mapa geológico de la zona lacustre del Valle de México.	73
3.4	Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México.	76
3.5	Contribución a la actualización del mapa de hundimiento regional para el Valle de México.	77
3.6	Delimitación del área de estudio, zona lacustre del Valle de México.	78
3.7	Interfaz gráfica de usuario de la plataforma digital ASF Data Search Vertex.	80
3.8	Configuración de parámetros de filtros de búsqueda en ASF Data Search Vertex.	80
3.9	Búsqueda en ASF Data Search Vertex.	81
3.10	Ubicación geográfica de estaciones de monitoreo permanente MMX1 y TNGF.	86
3.11	Esquema metodológico general empleado para el análisis geostadístico.	88
3.12	Análisis geostadístico, definición de tolerancias.	92
3.13	Análisis del semivariograma con ajuste del modelo exponencial en cuatro direcciones (ejemplo archivo de datos del 2017).	94
4.1	Esquema general del proceso para la generación de resultados principales.	97
4.2	Representación de fase enrollada, desenrollada relativa y absoluta.	98
4.3	Fase enrollada obtenida durante el procesamiento SAR (intervalos 2016, 2017, 2018).	99
4.4	Fase enrollada obtenida durante el procesamiento SAR (intervalos 2019, 2020, 2021).	100

4.5	Fase desarrollada obtenida durante el procesamiento SAR (intervalos 2016, 2017, 2018).	102
4.6	Fase desarrollada obtenida durante el procesamiento SAR (intervalos 2019, 2020, 2021).	103
4.7	Desplazamiento vertical acumulado en LOS asociado a un determinado PS.	104
4.8	Velocidad media estimada durante el procesamiento SAR (intervalos 2016, 2017, 2018).	105
4.9	Velocidad media estimada durante el procesamiento SAR (intervalos 2019, 2020, 2021).	106
4.10	Procesamiento de series temporales en la estación TNGF para el intervalo 2016-2022.	108
4.11	Procesamiento de series temporales en la estación MMX1 para el intervalo 2016-2024.	109
4.12	Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2016-2017.	111
4.13	Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2017-2018.	112
4.14	Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2018-2019.	113
4.15	Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2019-2020.	114
4.16	Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2020-2021.	115
4.17	Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2021-2023.	116
5.1	Áreas sin cobertura de datos SAR dentro del polígono de estudio. . . .	119
D.1	Separación espacial y temporal para el periodo 2016-2017 (26 escenas SAR).	142
D.2	Separación espacial y temporal para el periodo 2017-2018 (28 escenas SAR).	142
D.3	Separación espacial y temporal para el periodo 2018-2019 (28 escenas SAR).	143
D.4	Separación espacial y temporal para el periodo 2019-2020 (31 escenas SAR).	143

D.5	Separación espacial y temporal para el periodo 2020-2021 (30 escenas SAR).	144
D.6	Separación espacial y temporal para el periodo 2021-2023 (24 escenas SAR).	144

Lista de Tablas

	Pág
2.1	Eventos importantes en la historia de la percepción remota. 20
2.2	Unidades de longitud utilizadas en percepción remota. 23
2.3	Frecuencias utilizadas en percepción remota. 24
2.4	Principales categorías del espectro electromagnético. 26
2.5	Aplicación de las bandas del radar. 28
2.6	Características del instrumento C-SAR de Sentinel-1. 51
2.7	Características principales de los modos de operación de Sentinel-1. . . 53
2.8	Geoestadística, técnicas de predicción. 67
3.1	Coordenadas y parámetros de estaciones de monitoreo permanente MMX1 y TNGF. 85
3.2	Parámetros de procesamiento, modelos y características aplicadas en el procesamiento con PRIDE PPP-AR. 87
3.3	Estructura del primer archivo generado para la aplicación del análisis geoestadístico. 89
3.4	Coefficientes de regresión lineal. 90
3.5	Estructura del segundo archivo generado (.DAT) a cargar en programa WinGslib. 91
3.6	Parámetros de entrada adoptados para la generación de semivariogra- mas. 93
3.7	Estructura del tercer archivo con los valores generados para los semi- variogramas. 93
3.8	Coefficientes de anisotropía. 95
3.9	Parámetros de la malla de estimación utilizados en los intervalos pro- cesados. 96
A.1	Plataformas satelitales de radar. 124
B.1	Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2016. 126
B.2	Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2017. 127

B.3	Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2018.	128
B.4	Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2019.	129
B.5	Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2020.	130
B.6	Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2021.	131
C.1	Relación maestra-esclava del 2016, tomando como referencia escena capturada el 20 de mayo de 2017.	134
C.2	Relación maestra-esclava del 2017, tomando como referencia escena capturada el 28 de marzo de 2018.	135
C.3	Relación maestra-esclava del 2018, tomando como referencia escena capturada el 22 de mayo de 2019.	136
C.4	Relación maestra-esclava del 2019, tomando como referencia escena capturada el 04 de mayo de 2020.	137
C.5	Relación maestra-esclava del 2020, tomando como referencia escena capturada el 16 de junio de 2021.	138
C.6	Relación maestra-esclava del 2021, tomando como referencia escena capturada el 31 de marzo de 2022.	139

Lista de Acrónimos

A-DInSAR	Técnicas DInSAR Avanzadas (Advanced DInSAR)
ASI	Agencia Espacial Italiana (Italian Space Agency)
BN	Banco de Nivel
CAEM	Comisión del Agua del Estado de México
CGPS	Sistemas Continuos de Posicionamiento Global (Continuous Global Positioning Systems)
CHCVM	Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México
CORS	Estaciones de Referencia Operativas Continuamente (Continuously Operating Reference Station)
CSA	Agencia Espacial Canadiense (Canadian Space Agency)
DEM	Modelo Digital de Elevación (Digital Elevation Model)
DInSAR	Interferometría Diferencial SAR (Differential InSAR)
DLR	Centro Aeroespacial Alemán (German Aerospace Center)
DTAR	Relación de Ambigüedad de Objetivo Distribuido (Distributed Target Ambiguity Ratio)
ESA	Agencia Espacial Europea (European Space Agency)
EW	Modo de Franja Extra Ancha (Extra Wide Swath Mode)
GACM	Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México
GNSS	Sistemas Globales de Navegación por Satélite (Global Navigation Satellite System)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
InSAR	Interferometría SAR (Interferometric SAR)
ISRO	Organización de Investigación Espacial de la India (Indian Space Research Organisation)
IW	Modo de Franja Ancha Interferométrica (Interferometric Wide Swath Mode)
JAXA	Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (Japan Aerospace Exploration Agency)
KARI	Agencia Coreana de Investigación Aeroespacial (Korea Aerospace Research Institute)

msnm	Metros sobre el Nivel del Mar
NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (National Aeronautics and Space Administration)
OCAVM	Organismo de Cuenca Agua del Valle de México
PIB	Producto Interno Bruto
PPP	Posicionamiento Puntual Preciso (Precise Point Positioning)
PSI	Interferometría de Dispersión Persistente (Permanent o Persistent Scatterer Interferometry)
RAR	Radar de Apertura Real (Real Aperture Radar)
SACMEX	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
SAR	Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar)
SBAS	Interferometría de Subconjuntos (Small Baseline Subsets)
ScanSAR	Escaneo SAR (Scan Mode SAR)
SM	Modo de Imagen de Franja (Strip Map Mode)
SNR	Relación Señal-Ruido (Signal to Noise Ratio)
STC	Sistema de Transporte Colectivo Metro
TLALOCNet	Red Colaborativa de Observación a Largo Plazo de la Tierra y la Atmósfera (Trans-boundary, Land and Atmosphere Long-term Observational and Collaborative Network)
TOPSAR	Observación del Terreno con Escaneo Progresivo SAR (Terrain Observation by Progressive Scans SAR)
WM	Modo de Onda (Wave Mode)
ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El Valle de México, una de las regiones más densamente pobladas y económicamente importantes de México, se enfrenta a un problema de gran relevancia: "los hundimientos". Este fenómeno ha sido principalmente desencadenado por la explotación intensiva del acuífero a través del bombeo de agua mediante pozos profundos, lo que ha iniciado el proceso de consolidación de las arcillas del subsuelo (Reséndiz y col., 2019). Como resultado, se ha intensificado la fragilidad del terreno, agravando la susceptibilidad del valle a la subsidencia y representando un riesgo significativo para la infraestructura urbana (edificios, puentes, carreteras, sistemas de alcantarillado y otros servicios públicos esenciales) (Auvinet, Méndez y Juárez, 2017a).

Históricamente, la Ciudad de México ha experimentado notables niveles de subsidencia, con tasas que logran alcanzar los 40 cm/año. La subsidencia del terreno debido a la extracción de agua subterránea es un fenómeno común que ocurre en grandes ciudades alrededor del mundo, y continuamente se reportan nuevos casos. Sin embargo, la situación en la Ciudad de México es particularmente sobresaliente, dado que el proceso de consolidación ha continuado durante casi un siglo, resultando en un asentamiento acumulado que varía entre 10 y 14 metros en amplias zonas urbanas que descansan sobre gruesos depósitos de suelos compresibles de origen lacustre (Auvinet, Méndez y Juárez, 2015; Reséndiz y col., 2019). Adicionalmente, este fenómeno no se restringe únicamente a la ciudad, se ha propagado a gran parte circundante del Valle de México, convirtiendo a esta región

en un caso de estudio ampliamente reconocido a nivel internacional debido a sus grandes complejidades geotécnicas (Reséndiz, Auvinet y Méndez, 2016).

Las técnicas directas tradicionales han sido fundamentales para el estudio y comprensión de la subsidencia del terreno, mediante mediciones continuas y comparaciones históricas. El uso de métodos topográficos y geodésicos ha permitido realizar mediciones precisas de los cambios en el nivel del suelo. No obstante, en la actualidad, el desarrollo de nuevas tecnologías ha ampliado nuestra capacidad en la identificación y representación de características o fenómenos. Esto ha impulsado la observación satelital mediante técnicas indirectas, cada vez más valoradas por su capacidad para monitorear y estudiar el planeta Tierra desde el espacio (Campbell y Wynne, 2011; Sabins y Ellis, 2020; Tsokas y col., 2022). En este sentido, el objetivo principal del presente trabajo consistió en implementar un enfoque integrado de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) y metodología geoestadística para el estudio de la subsidencia en el Valle de México, que constituye el tema central de esta investigación.

1.2. Planteamiento del Problema

La subsidencia se considera un fenómeno en el que la superficie del terreno desciende gradualmente en relación con un nivel de referencia (Bagheri-Gavkosh y col., 2021). Este evento puede ser desencadenado tanto por procesos naturales como por procesos antrópicos, con repercusiones diversas en el entorno circundante (Dinar y col., 2021). Algunos ejemplos naturales abarcan movimientos tectónicos, actividad volcánica, sismos, consolidación de sedimentos y deslizamiento del terreno. En contraste, las acciones humanas, tales como la extracción de recursos naturales (petróleo, gas, agua y minerales) (Bagheri-Gavkosh y col., 2021; Brown y Nicholls, 2015).

Según datos del censo de población del 2020 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) cuenta con una población de 22 millones de habitantes, lo que representa el 17 % del total nacional, y contribuye con el 22 % del Producto Interno Bruto (PIB) del país (INEGI, 2020). En este sentido, se destaca como una de las áreas más densamente pobladas y económicamente influyentes de México, dependiendo en gran medida del agua subterránea, la cual enfrenta un estrés significativo debido a la explotación

de sus acuíferos (Jiménez y Marín, 2004; Perló y González, 2009).

La continua consolidación del subsuelo persiste como el principal desafío no resuelto en el Valle de México (Reséndiz, Auvinet y Méndez, 2016). Este fenómeno ha provocado hundimientos, asentamientos diferenciales y la repentina formación de grietas verticales. Por lo tanto, representa un riesgo elevado para la estabilidad de las infraestructuras, siendo indispensable identificar con precisión las zonas con mayor velocidad de hundimiento (Juárez y col., 2021; Perló y González, 2009; Reséndiz y col., 2019). En consecuencia, es esencial estimar, calcular e interpretar el fenómeno de la subsidencia para contribuir a una comprensión más profunda de esta eventualidad a lo largo del tiempo.

1.3. Justificación

En los últimos años, la percepción remota por satélite ha evolucionado de manera impresionante, incorporando una creciente y diversa gama de sensores dedicados al estudio de la Tierra. La enorme cantidad de datos satelitales que se genera a diario ha fortalecido disciplinas como la geodesia y la geomática, ofreciendo nuevas oportunidades para el análisis indirecto de diferentes fenómenos terrestres. En el pasado, herramientas como la fotogrametría eran utilizadas para describir el relieve, pero la medición de los cambios en la superficie, que con el tiempo modificaban su forma, solo se lograba mediante observaciones aisladas con técnicas topográficas. Hoy en día, las imágenes satelitales, como las obtenidas mediante Radar de Apertura Sintética (SAR), son ampliamente aplicadas para la detección y monitoreo por sismos, actividad volcánica, movimientos tectónicos y subsidencia (Shuhab y col., 2023; Kumar y col., 2022; Sreejith y col., 2020). Además, son útiles en el estudio de la evolución topográfica, investigando fenómenos como erosión, sedimentación y desplazamiento de masas (Kang y col., 2023; Jinwoo y col., 2022; Yilin y col., 2021).

La propuesta de emplear la interferometría SAR representa una alternativa de gran interés en un entorno tan complejo como el Valle de México. Debido a la naturaleza persistente y preocupante de la subsidencia en esta región, su estudio y análisis continúan siendo altamente relevantes en la actualidad (Reséndiz, Auvinet y Méndez, 2016). En este contexto, este estudio cobra importancia al ofrecer un enfoque diferente para el monitoreo de este fenómeno.

1.4. Objetivos

Para asegurar una correcta estructuración de este trabajo de investigación, se han definido los siguientes objetivos.

1.4.1. Objetivo General

- Estudiar y caracterizar la subsidencia en las zonas propensas del Valle de México a través de interferometría SAR, para identificar y cuantificar las magnitudes de los desplazamientos verticales de la superficie del terreno durante los últimos años.

1.4.2. Objetivos Específicos

1. Identificar las zonas susceptibles a subsidencia en el Valle de México y establecer el polígono de estudio.
2. Procesar imágenes SAR de la plataforma satelital Sentinel-1 mediante el enfoque PSInSAR.
3. Determinar la variación espacial de las velocidades de hundimiento en intervalos anuales.
4. Analizar los resultados mediante metodología geoestadística, para identificar patrones y tendencias de los desplazamientos verticales.
5. Producir mapas de velocidades de hundimiento integrando el procesamiento PSInSAR con metodología geoestadística.

1.5. Antecedentes

En esta sección se revisan algunos de los episodios relevantes que han contribuido al entendimiento de la subsidencia en la zona lacustre del Valle de México, además del uso de imágenes capturadas por SAR en esta temática, resaltando su alto potencial.

1.5.1. Valle de México

Durante casi un siglo, se ha documentado la subsidencia por consolidación regional en el Valle de México, un fenómeno que, de acuerdo con primeros estudios (Marsal, Hiriart y Sandoval, 1951; Marsal y Sáinz, 1956; Marsal y Mazari, 1959; Mazari y Alberro, 1990) y recientes investigaciones (Auvinet, Méndez y Juárez, 2017a; Juárez y col., 2021; Reséndiz, Auvinet y Méndez, 2016; Rodríguez y Rodríguez, 2006), surge directamente de la explotación del agua subterránea.

La detección sorpresiva de la subsidencia tuvo lugar tras el colapso de las compuertas del Gran Canal de Desagüe en San Lázaro. Este canal conducía el agua pluvial desde la Ciudad de México hacia una cuenca contigua al Norte del Valle de México (Reséndiz, Auvinet y Méndez, 2016). Las compuertas experimentaron un asentamiento, desplazándose en uno de los extremos de su base, indicando la pérdida de estabilidad en la estructura (Molina, 1957). En aquel momento, se imputó la responsabilidad al ingeniero Roberto Gayol y Soto, quien se desempeñaba como director de obras de drenaje. No obstante, al estar firmemente convencido de que el fenómeno no era atribuible al proceso de construcción, emprendió nuevos trabajos de nivelación. Durante este proceso, verificó que las compuertas habían descendido con respecto a sus valores iniciales. De esa manera, en 1925, Gayol presentó un informe ante la Asociación de Ingenieros y Arquitectos de México sobre el descenso general observado, atribuyendo la causa probable del hundimiento a la pérdida de agua en el subsuelo.¹ José A. Cuevas Montes de Oca, impulsor y experto de la Mecánica de Suelos en México, respaldó la conclusión de Gayol. En 1936, alertó sobre los peligros vinculados al bombeo excesivo de agua subterránea, sugiriendo la posibilidad de que la ciudad experimente el fenómeno de subsidencia a niveles desproporcionados (Juárez y col., 2021; Molina, 1957).

¹«Estudio de las perturbaciones que en el fondo del Valle de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo por las obras del Desagüe, y rectificación de los errores que ha dado lugar una incorrecta interpretación de los hechos observados».

En 1947, el eminente ingeniero y científico mexicano Dr. Nabor Carrillo Flores, en su papel como coordinador de la investigación científica, asumió la responsabilidad de supervisar todos los estudios relacionados con la subsidencia en el Valle de México. Sus investigaciones sentaron las bases teóricas para abordar de manera científica la problemática. En sus trabajos (Carrillo, 1947; Carrillo, 1951) se explica el proceso de subsidencia mediante la teoría de consolidación de Terzaghi, estableciendo una correlación cuantitativa entre la consolidación del subsuelo y las magnitudes de descenso. Esta relación se deriva del incremento de los esfuerzos efectivos, provocados por la reducción de la presión del agua en el subsuelo (Reséndiz, Auvinet y Méndez, 2016).

Seguidamente, en 1948, Raúl J. Marsal, Fernando Hiriart y Raúl Sandoval, integrantes del cuerpo de técnicos especializados en Mecánica de Suelos, llevaron a cabo una exhaustiva investigación del subsuelo. En el marco de este estudio, se realizaron las primeras mediciones piezométricas, confirmando los descubrimientos previamente identificados por el Dr. Carrillo (Auvinet, Méndez y Juárez, 2015; Molina, 1957). Asimismo, las investigaciones del Dr. Leonardo Zeevaert Wiechers fueron decisivas, aportando conocimientos fundamentales que enriquecieron la comprensión del fenómeno. Zeevaert advirtió que ciertas áreas de la Ciudad de México experimentaban subsidencia de forma acelerada (SMIG, 2021).

A partir de 1953, la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (CHCVM), inició una serie de levantamientos y mediciones piezométricas, seguido por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) (Auvinet, Méndez y Juárez, 2015). Esta iniciativa marcó el comienzo de la implementación progresiva de una red de Bancos de Nivel (BN) y estaciones piezométricas en la ciudad y en áreas de especial interés, lo que dio paso a una valiosa tarea de investigación sobre la subsidencia por consolidación regional.

De acuerdo con Auvinet, Méndez y Juárez (2017a), la Ciudad de México ha experimentado una transformación impresionante desde la descripción realizada por Marsal y Mazari (1959). Un ejemplo de esto, se muestra en la Figura 1.1, donde se contrasta el área urbana en 1959 con su configuración en 2016, evidenciando un considerable crecimiento de la mancha urbana.

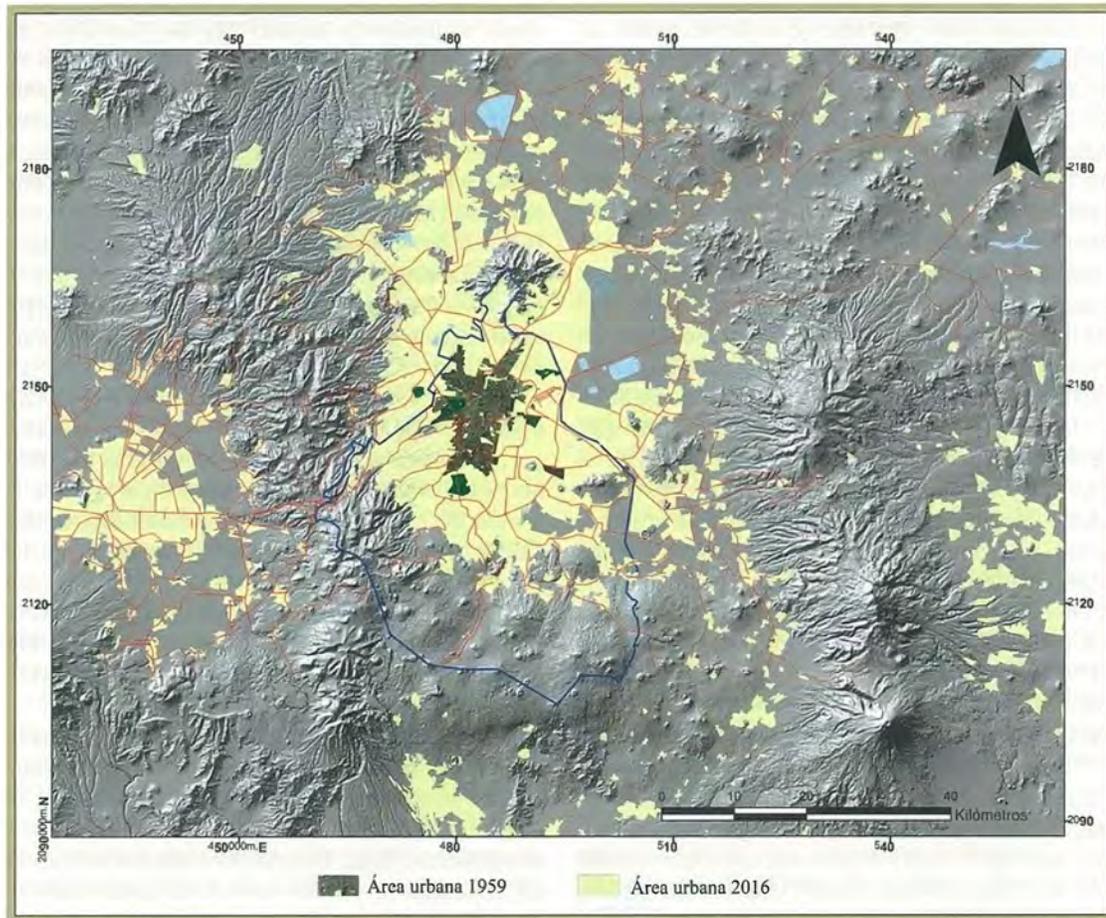


Figura 1.1: Desarrollo urbano de la Ciudad de México 1959-2016 (Auvinet, Méndez y Juárez, 2017a; Marsal y Mazari, 1959).

El progreso en el conocimiento del subsuelo, está estrechamente vinculado a la ejecución de importantes proyectos civiles. Entre ellos, se destaca la construcción de la Torre Latinoamericana, construida en 1956 y considerada uno de los edificios más emblemáticos por ser de los primeros rascacielos en construirse en una zona de alto riesgo sísmico, lo que la convirtió en un experimento para la cimentación y construcción de futuros edificios. Además, las primeras líneas del Sistema de Transporte Colectivo Metro (STC) a finales de la década de 1960, y la puesta en marcha del drenaje profundo de la Ciudad de México en 1975.

La comprensión del subsuelo en el Valle de México se fundamenta en la información geológica disponible. En el estudio de Santoyo y col. (2005), se documentan los principales sistemas de fallas que atraviesan la ZMVM (Figura 1.2), ofreciendo

una síntesis del conocimiento actual sobre la estratigrafía del subsuelo. Este modelo representa las distintas formaciones geológicas, desde la Sierra de Chichinautzin (al Sur) hasta Pachuca (al Norte), y desde la Sierra de las Cruces (al Oeste) hasta la Sierra Nevada (al Este) (Auvinet, Méndez y Juárez, 2017a).

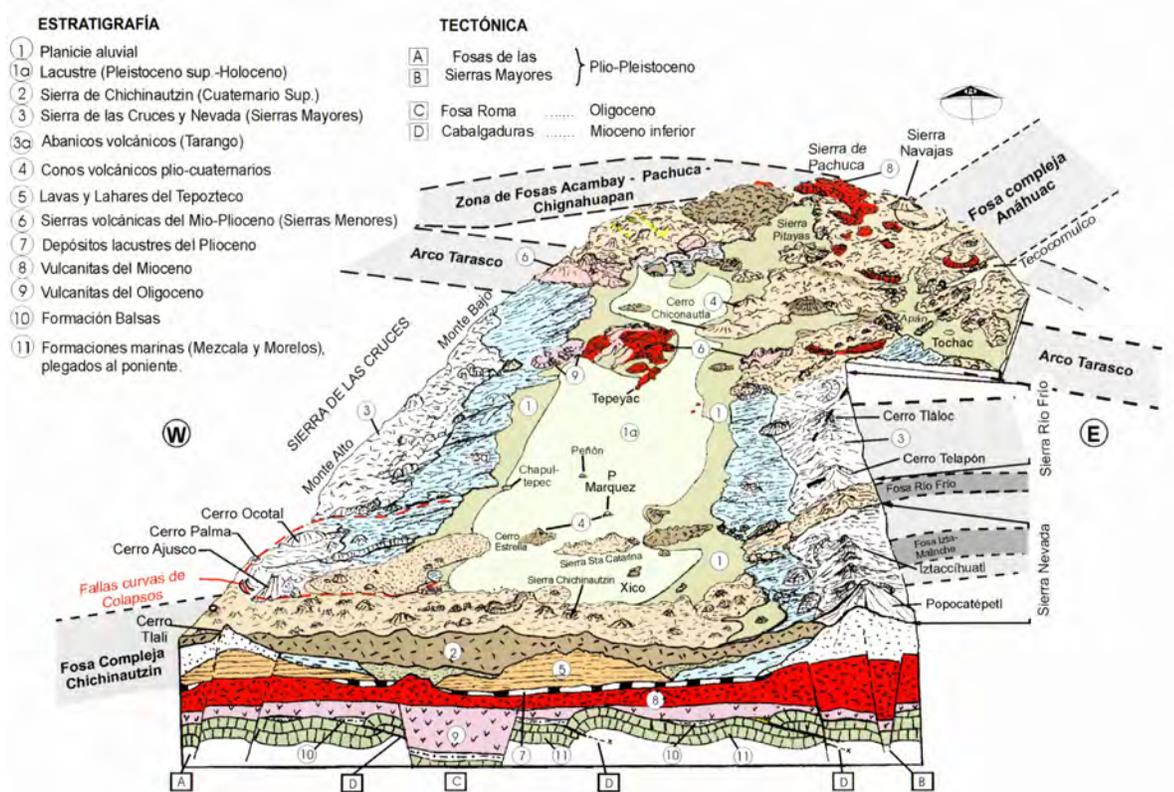


Figura 1.2: Geología y Morfología de la Cuenca de México (Santoyo y col., 2005).

El fenómeno de la subsidencia origina variados comportamientos en las cimentaciones; aquellas sometidas a cargas ligeras experimentan notables asentamientos, mientras que las cimentaciones sobrecargadas o apoyadas en pilotes tienden a emerger con respecto al terreno circundante. Un ejemplo destacado de este último caso es la aparente elevación observada en el Monumento a la Independencia (Figura 1.3). Como señala Auvinet, Méndez y Juárez (2017b), este monumento ha registrado un incremento aparente en altura de 2.44 metros a lo largo de un siglo, lo que equivale a un promedio anual de 2.44 centímetros.



Figura 1.3: Emersión aparente en el Monumento a la Independencia (1910-2010).

Conforme a lo expuesto en Reséndiz, Auvinet y Méndez (2016), en la extensa zona plana del Valle de México, la subsidencia constante es uno de los fenómenos más problemáticos, cuya magnitud está directamente relacionada con el espesor y la compresibilidad de los depósitos de suelo en cada ubicación. En lugares donde hay cambios bruscos de espesor, se observan asentamientos diferenciales que han dado lugar a la aparición repentina de grietas verticales profundas. Estas grietas han causado fracturas significativas en la infraestructura de algunas áreas de la ciudad, especialmente cerca de la transición entre depósitos compresibles y formaciones rocosas en la periferia del valle. Además, la subsidencia provoca un aumento gradual en el gradiente de asentamiento diferencial y en los esfuerzos de tensión en la superficie del terreno, lo que eventualmente desencadena fracturas (Auvinet, Méndez y Juárez, 2013).

Por lo tanto, la consolidación regional en el Valle de México tiene tres consecuencias interrelacionadas y perjudiciales: en primer lugar, se observan notables hundimientos del terreno en áreas llanas con un subsuelo altamente compresible; en segundo lugar, se evidencia la constante acumulación de asentamientos diferenciales en las zonas mencionadas anteriormente; y en tercer lugar, se produce la repentina formación de grietas verticales en lugares donde se experimentan

considerables variaciones en la compresibilidad del subsuelo (Reséndiz, Auvinet y Méndez, 2016).

1.5.2. Interferometría SAR

La literatura indica que la aplicación de InSAR en estudios de subsidencia ha mostrado un incremento notable en los años recientes. La subsidencia del terreno, vinculada a diversos procesos tanto naturales como antropogénicos, se observa en diversas regiones a nivel mundial (Herrera y col., 2021; Raspini y col., 2022). Cada continente cuenta con al menos una zona de estudio, con Asia y Europa concentrando la mayor cantidad de análisis de casos, mientras que en América del Norte se han registrado aproximadamente 120 contribuciones (Figura 1.4). En este sentido, la disponibilidad de múltiples plataformas satelitales, el continuo progreso en las capacidades de captura de imágenes, el perfeccionamiento de los enfoques de procesamiento y el creciente conocimiento en la interpretación de datos, han impulsado el uso de InSAR a distintas escalas de análisis en diferentes entornos fisiográficos.

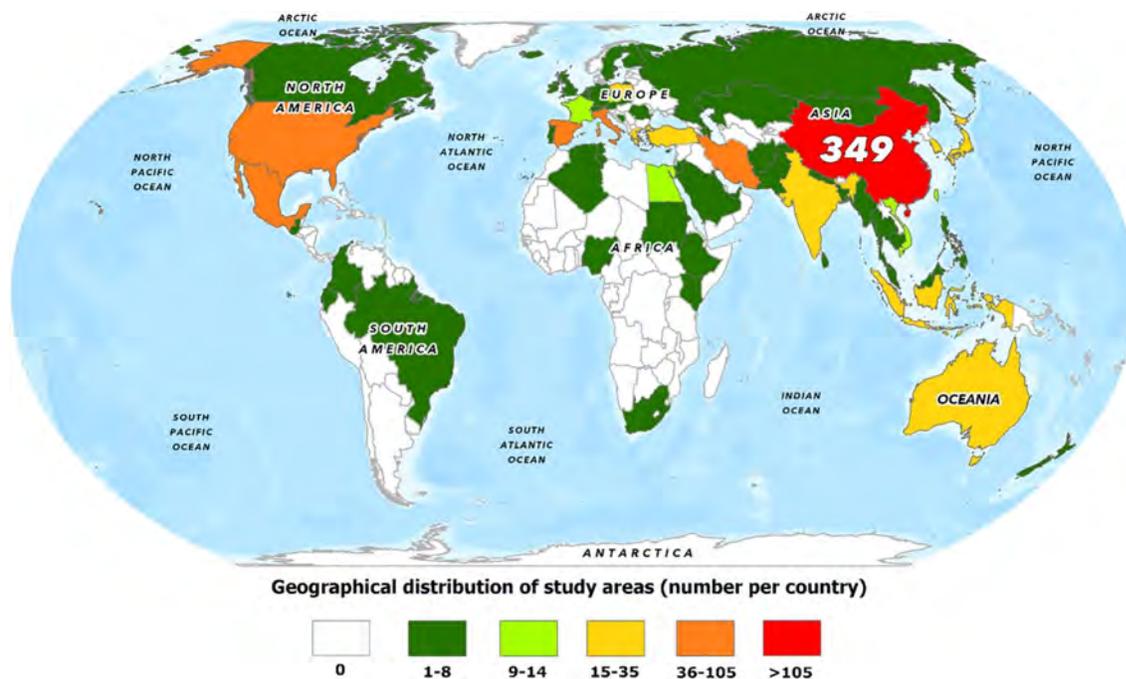


Figura 1.4: Mapa global que ilustra la distribución geográfica de la implementación de InSAR para el análisis de subsidencia (Raspini y col., 2022).

La cantidad de trabajos dedicados al estudio de la subsidencia en el Valle de México mediante InSAR es limitada, dado que pocos presentan conclusiones concretas. Sin embargo, en el presente trabajo se han tomado en cuenta las siguientes investigaciones que contribuyen significativamente a la disciplina, como la realizada por Poreh y Pirasteh (2019). Este estudio analiza las velocidades de hundimiento en la Ciudad de México, integrando 52 imágenes ENVISAT-ASAR obtenidas entre 2002 y 2010, datos de Sistemas Continuos de Posicionamiento Global (CGPS) generados por nueve estaciones GPS, y una imagen multispectral de Landsat ETM+ (Figura 1.5). Los resultados del SAR evidencian desplazamientos verticales constantes en el Centro y Este de la ciudad, alcanzando hasta 30 cm/año, mostrando una concordancia casi perfecta con los datos de CGPS en la mayoría de las estaciones.

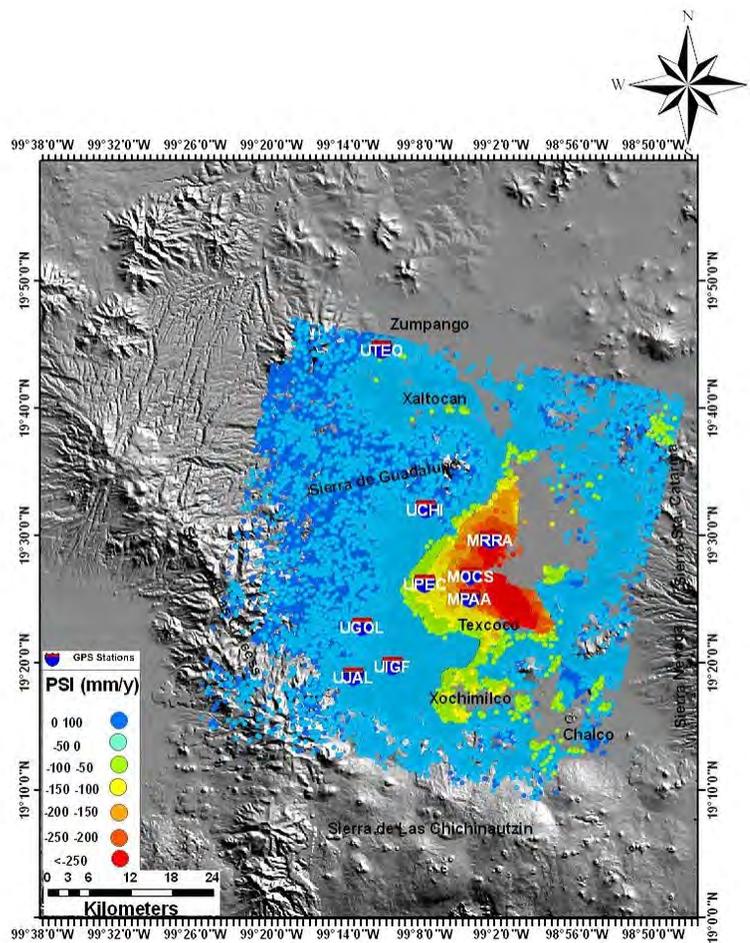


Figura 1.5: Producto de velocidades de hundimiento en la Ciudad de México empleando datos PSInSAR, CGPS y Landsat ETM+ (Poreh y Pirasteh, 2019).

El estudio de Du y col. (2019), analiza la subsidencia en la Ciudad de México durante un periodo de 15 años (2004-2018), utilizando datos satelitales de ENVISAT, ALOS-1, COSMO-SkyMed, ALOS-2 y SENTINEL-1, y aplicando los métodos GEOS-ATSA y GEOS-SBAS. Los autores implementaron dos módulos: uno basado en IDW (*Inverse Distance Weighting*), que mejora la densidad de los píxeles ponderando más las mediciones cercanas, y otro basado en estimación M con regresión de máxima verosimilitud, que ajusta los datos para optimizar la calidad de las mediciones al minimizar el impacto de los errores y los valores atípicos. Los resultados permitieron identificar zonas de subsidencia con una tasa máxima de 30 cm/año, destacando que las validaciones cruzadas indican una representación más precisa del patrón de subsidencia al utilizar sensores de banda L en lugar de las bandas C y X. Las comparaciones entre las mediciones de InSAR y GPS muestran que las tasas de subsidencia se mantuvieron consistentes durante el periodo analizado.

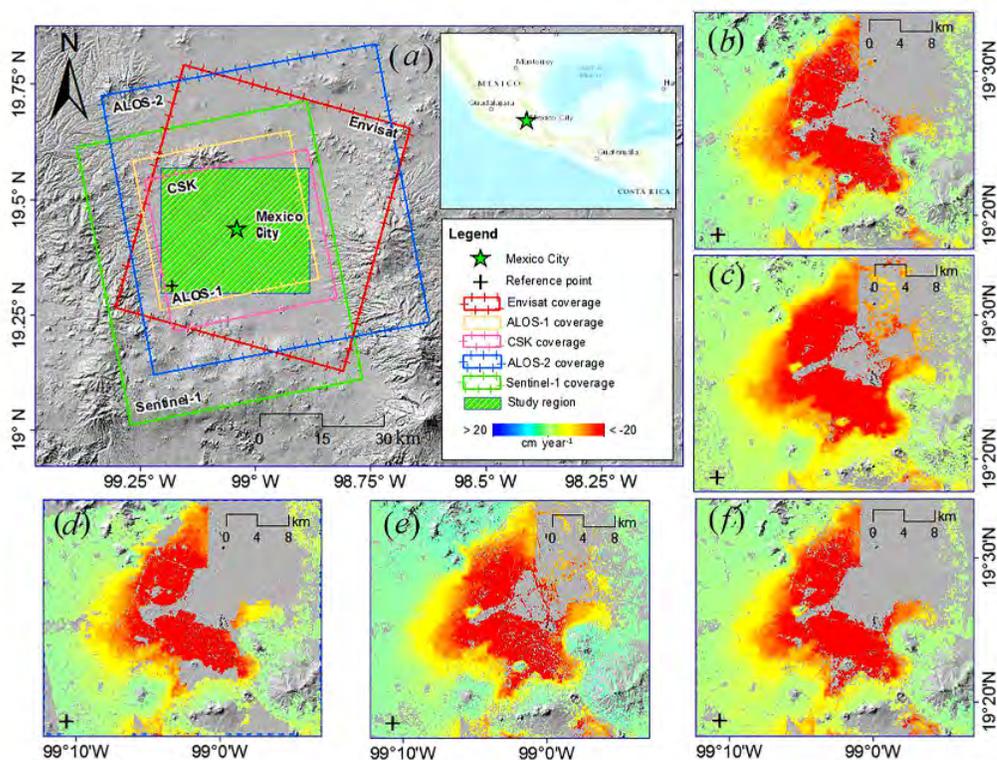


Figura 1.6: Producto de análisis de velocidades de hundimiento en la Ciudad de México a partir de datos satelitales de ENVISAT, ALOS-1, COSMO-SkyMed, ALOS-2 y SENTINEL-1 mediante los métodos GEOS-ATSA y GEOS-SBAS (Du y col., 2019).

En el estudio de Cigna y Tapete (2022), los autores presentan lo que describen como el análisis InSAR más extenso realizado en la República Mexicana, abarcando una superficie de $700,000 \text{ km}^2$ (Figura 1.7). Este estudio integra 1,677 imágenes SAR de la misión Sentinel-1, capturadas durante el periodo 2019-2020, a lo largo de seis órbitas descendentes, junto con datos sobre parámetros de balance hídrico subterráneo, ofreciendo una manera diferente de aproximarse al análisis de la subsidencia. Los resultados revelan valores de hundimiento en diversas regiones críticas, con la Ciudad de México destacándose como el caso más severo, alcanzando hasta 35 cm/año . Asimismo, se observa una correlación entre los déficits de agua subterránea, las tasas de extracción y los cambios en el almacenamiento reportados en los informes de gestión, lo cual evidencia una relación directa entre la explotación de los acuíferos y los procesos de subsidencia.

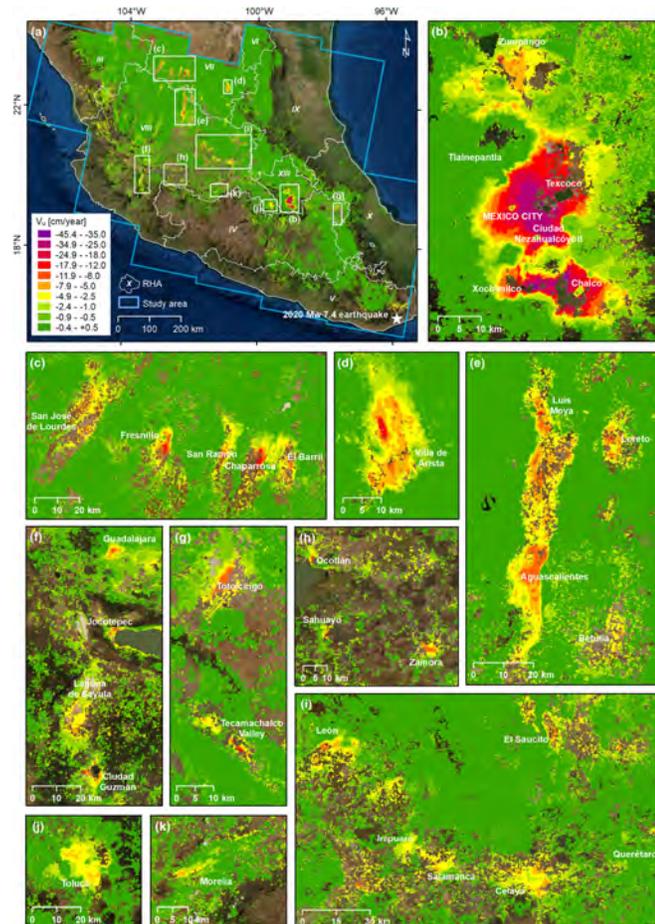


Figura 1.7: Producto de velocidades de hundimiento en el Centro de la República Mexicana partir de procesamiento SBAS y parámetros de balance hídrico subterráneo (Cigna y Tapete, 2022).

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Percepción Remota

Desde tiempos antiguos, la humanidad ha sentido la necesidad de comprender su entorno, describir los fenómenos naturales y orientarse en el mundo que la rodea. La observación de la Tierra ha recorrido un largo camino, desde las primeras exploraciones motivadas por la supervivencia, hasta el desarrollo avanzado de la ciencia y la tecnología, que nos ha permitido estudiar aspectos fundamentales de nuestro planeta con mayor profundidad. En la actualidad, la observación terrestre desde el espacio nos ofrece una perspectiva global sin precedentes, contribuyendo de manera decisiva a la comprensión de las transformaciones ambientales y el impacto de las actividades humanas.

2.1.1. Definición

La exploración remota de la superficie terrestre es el ámbito de estudio de la Teledetección, también conocida como Percepción Remota. Este término, del inglés *Remote Sensing*, fue acuñado en la década de 1960 para referirse a cualquier método de observación a distancia (Cohen, 2000; Chuvieco, 1995). A partir de ese momento, se han consignado diversas definiciones que abordan a la percepción remota desde distintas perspectivas.

En términos generales, se define a la percepción remota como la ciencia y el arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno mediante el análisis de datos recopilados a través de un dispositivo sensor, excluyendo todo contacto físico directo (Lillesand y Kiefer, 1994). Adicionalmente, en el ámbito de las geociencias, se describe como la técnica capaz de capturar, tratar y analizar información de la superficie terrestre, obtenida desde el espacio mediante el uso de sensores remotos (Gutiérrez y Muñoz, 2002).

2.1.2. Sistema Sensor

Los sensores son elementos capaces de convertir una magnitud física en una señal eléctrica, captando la energía emitida por un objeto y convirtiéndola en una señal perceptible y analizable (Campbell y Wynne, 2011). En el campo de la percepción remota, un sistema sensor se estructura con varios elementos que operan de manera coordinada, guiados por un principio fundamental (Lira, 1987). En este procedimiento, una fuente emite radiación electromagnética, desempeñando un papel importante al facilitar la captación de la señal reflejada por los objetos de interés (Chuvieco, 1995). La información recopilada se transmite a una estación receptora, donde se procesa de acuerdo con los requisitos específicos del objeto de estudio (Lillesand y Kiefer, 1994).

Los sensores se categorizan según la fuente de energía, teniendo la capacidad de ser pasivos o activos (Figura 2.1) (Campbell y Wynne, 2011). Un sensor pasivo, registra la radiación electromagnética proveniente del objeto, sin emitir energía propia. Por ejemplo, los sensores pasivos utilizados en plataformas satelitales capturan información a partir de la radiación emitida o reflejada por la Tierra, siendo la radiación solar la principal fuente. En contraste, un sensor activo emite su propia energía o radiación hacia el objetivo que se desea analizar, y luego mide la señal reflejada. Este último, emite una señal controlada, como un pulso de microondas en el caso de los radares (Díaz y col., 2014). Dentro de los sensores pasivos están los fotográficos, ópticos electrónicos y de antena. Mientras que, en los sensores activos se tienen los radares los cuales trabajan en la región de las microondas, y el lidar, luz polarizada o láser el cual opera en el visible e infrarrojo cercano (Chuvieco, 1995).

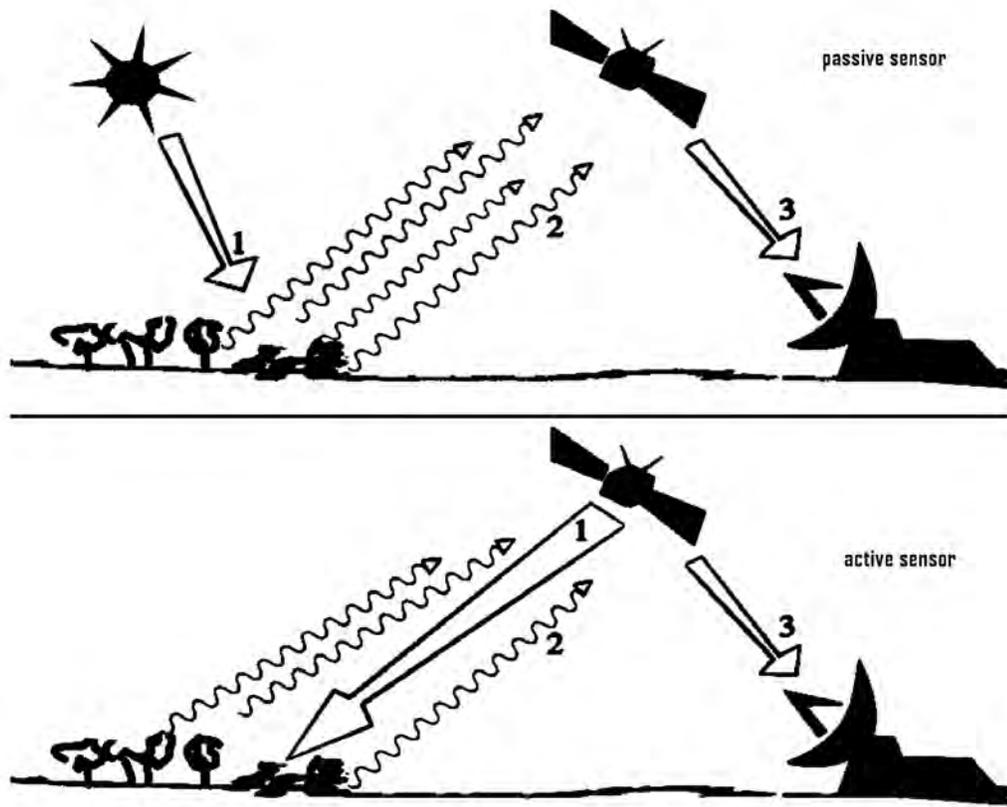


Figura 2.1: Formas de percepción remota (Adamo y col., 2021). El sensor pasivo observa la energía emitida o reflejada naturalmente, mientras que el sensor activo emite su propia energía y mide la respuesta.

En cuanto a la resolución de estos sistemas, algunos autores definen este aspecto fundamental, refiriéndose a la habilidad del sensor para diferenciar entre distintos elementos en la escena; abarcando manifestaciones espaciales, espectrales, radiométricas y temporales (Robinson y col., 2002; Sabins y Ellis, 2020). De acuerdo con Chuvieco (1995), las distintas modalidades de resolución se describen de la siguiente manera:

- Resolución Espacial:** Tamaño mínimo distinguible en una imagen, variando según el tipo de sensor. En sistemas fotográficos, se mide como la mínima separación para que los objetos aparezcan distintos, dependiendo de la longitud focal y la altura de la cámara. En sensores óptico electrónicos, se define como la sección angular medida en radianes, y se traduce en la distancia en el terreno que corresponde a este ángulo, tomando en cuenta altura, velocidad y número de detectores. Para los sensores de antena, la resolución se vincula

al radio de apertura, altura de la plataforma y longitud de onda utilizada.

- **Resolución Espectral:** Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. Entre los sensores, la menor resolución espectral corresponde al radar y a los sistemas fotográficos. El primero trabaja normalmente en un solo canal, mientras la fotografía puede ofrecer películas pancromáticas, infrarrojo (b/n), color natural o infrarrojo color. Por el contrario, los sensores óptico electrónicos ofrecen un amplio rango de bandas.
- **Resolución Radiométrica:** Describe la capacidad y sensibilidad de un sensor para discriminar diferencias en energía o radiancia. En el caso de los sistemas fotográficos, se indica por el número de niveles de gris. Para los óptico electrónicos, el número máximo de niveles digitales. En los sensores de radar, la diferencia en la intensidad de la señal recibida.
- **Resolución Temporal:** Se refiere a la frecuencia con la que el sensor puede proporcionar cobertura en una misma área. El ciclo de cobertura esta en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación y ángulo de observación).

2.1.3. Historia Temprana

La percepción remota, como técnica aplicada, está estrechamente ligada al progreso tecnológico de cada época (Figura 2.2). Para entender su alcance, es útil adentrarse en su historia y seguir la evolución de una serie de acontecimientos que marcaron el desarrollo en este campo (Tabla 2.1). Esto comenzó con la invención de la cámara a principios del siglo XIX. Las primeras fotografías exitosas fueron producidas por el inventor francés Nicéphore Niépce. Poco después del desarrollo de la fotografía, Gaspard Félix Tournachon, capturó la primera fotografía aérea desde un globo aerostático, obteniendo la escena de una aldea francesa (Chuvieco, 1995).

A comienzos del siglo XX, Wilbur Wright tomó las primeras fotografías aéreas desde un avión, marcando el inicio de una era visual desde las alturas. Durante la Primera Guerra Mundial, las cámaras montadas en aviones ofrecieron perspectivas aéreas de extensas áreas, convirtiéndose en recursos invaluable para el reconocimiento militar. En la Segunda Guerra Mundial, las fuerzas aliadas formaron equipos de expertos para examinar meticulosamente millones de imágenes

estereoscópicas en busca de bases de cohetes nazis ocultas (Cohen, 2000). Posteriormente, en la guerra fría y durante la frenética carrera espacial de las décadas de 1950 y 1960, emergió la era de la percepción remota por satélite. La Unión Soviética marcó el hito en 1957 con el lanzamiento del Sputnik 1, el primer satélite artificial colocado en órbita. Después, los Estados Unidos, se unieron con el lanzamiento del Explorer-1 y en los años subsiguientes se presenciaron avances acelerados en la tecnología de satélites. En 1960, se lanzó el primer satélite meteorológico exitoso, el TIROS-1 y en 1972, se despliega el Landsat-1, primer satélite dedicado a estudiar los recursos terrestres (Chuvieco, 1995; Cohen, 2000). Desde entonces, el interés de la comunidad científica por esta tecnología experimentó un crecimiento exponencial, generando así un considerable número de estudios que se focalizan en el análisis de imágenes capturadas por sensores remotos (Sabins y Ellis, 2020).

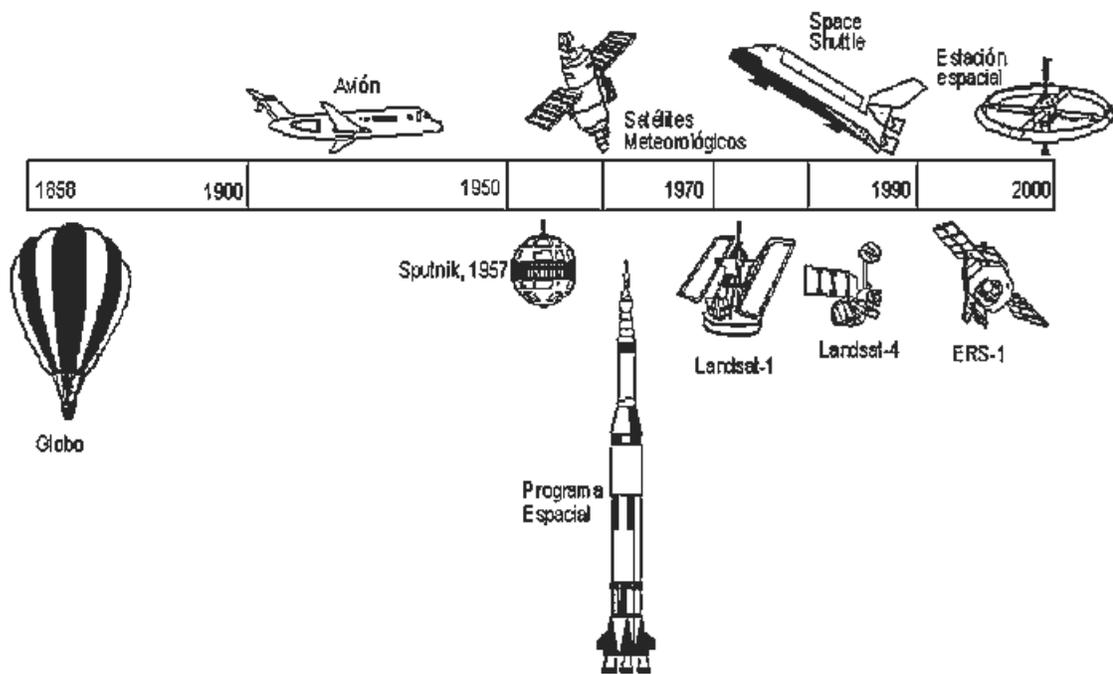


Figura 2.2: Evolución histórica de los sistemas de percepción remota en plataformas aéreas y satelitales (1858 - 2000).

Tabla 2.1: Eventos importantes en la historia de la percepción remota (Campbell y Wynne, 2011).

Año	Evento
1800	Descubrimiento del infrarrojo por William Herschel
1839	Inicio de la práctica de la fotografía
1847	Demostración del espectro infrarrojo por A. H. L. Fizeau y J. B. L. Foucault compartiendo propiedades con la luz visible
1850-1860	Fotografía desde globos aerostáticos
1873	Teoría de la energía electromagnética desarrollada por James Clerk Maxwell
1909	Fotografía desde aviones
1914-1918	Primera Guerra Mundial; reconocimiento aéreo
1920-1930	Desarrollo y aplicaciones iniciales de la fotografía aérea y fotogrametría
1929-1939	La depresión económica genera crisis ambientales que llevan a aplicaciones gubernamentales de la fotografía aérea
1930-1940	Desarrollo de radares en Alemania, Estados Unidos y Reino Unido
1939-1945	Segunda Guerra Mundial; aplicaciones de porciones no visibles del espectro electromagnético; entrenamiento de personal en la adquisición e interpretación de fotografías aéreas
1950-1960	Investigación y desarrollo militar
1956	Investigación de Colwell en la detección de enfermedades en plantas con la fotografía infrarroja
1960-1970	Primer uso del término <i>percepción remota</i>
1972	Satélite meteorológico TIROS
1970-1980	Observaciones de percepción remota desde el espacio con Skylab
1980-1990	Landsat 4; nueva generación de sensores Landsat
1986	Satélite francés de observación terrestre SPOT
1980s	Desarrollo de sensores hiperespectrales
1990s	Sistemas globales de percepción remota, LIDAR

2.1.4. Desarrollo Actual

En los primeros años del siglo XXI, el creciente impacto del internet revolucionó el acceso a imágenes de percepción remota por satélite, abriendo las puertas para que la comunidad científica obtuviera información valiosa sobre la superficie terrestre (Sabins y Ellis, 2020). Esto permitió el desarrollo de diversas disciplinas, contribuyendo a una comprensión más profunda de nuestro entorno (Campbell y Wynne, 2011).

Según la Oficina de las Naciones Unidas para Asuntos del Espacio, se tiene un registro de aproximadamente 10,000 satélites puestos en órbita (UNOOSA, 2023). En el contexto actual, diversos organismos continúan llevando a cabo el lanzamiento de satélites para aplicaciones variadas, que incluyen comunicaciones, observación de la Tierra, navegación, entre otras (Sabins y Ellis, 2020). Esto evidencia que la percepción remota ha asumido un papel fundamental al facilitar la obtención de información relevante desde el espacio.

2.2. Radiación Electromagnética

La radiación es la acción y efecto de irradiar; despedir rayos de luz, calor u otra energía. Para la física, se trata de la energía ondulatoria o de las partículas que se propagan a través del espacio (Siegel, Saukko y Houck, 2012).

Las cargas eléctricas en reposo producen campos eléctricos (E), mientras que las cargas en movimiento generan tanto campos eléctricos como magnéticos (B) (Figura 2.3). La interacción de estos campos en ciclos repetitivos, se manifiesta como una oscilación perpendicular a la dirección de propagación (K) (Campbell y Wynne, 2011; Smith, 1997). Además, la energía electromagnética puede caracterizarse mediante diversas propiedades (Figura 2.4):

- **Longitud de Onda:** Distancia entre la cresta de una onda y la siguiente, o dos valles consecutivos. Se puede medir en unidades de longitud cotidianas, sin embargo, las longitudes de onda muy cortas tienen distancias tan pequeñas entre las crestas que requieren unidades de medida extremadamente cortas (Tabla 2.2).
- **Frecuencia:** Corresponde al número de crestas que pasan por un punto fijo

en un período de tiempo determinado. Se mide en hercios (Hz), donde un hertzio es igual a un ciclo por segundo (Tabla 2.3).

- **Amplitud:** La magnitud máxima de oscilación o variación de una onda, medida desde su posición de equilibrio hasta el punto más alto (cresta) o más bajo (valle) de la onda. Se mide en unidades del sistema de medida correspondiente al fenómeno específico (niveles de energía).

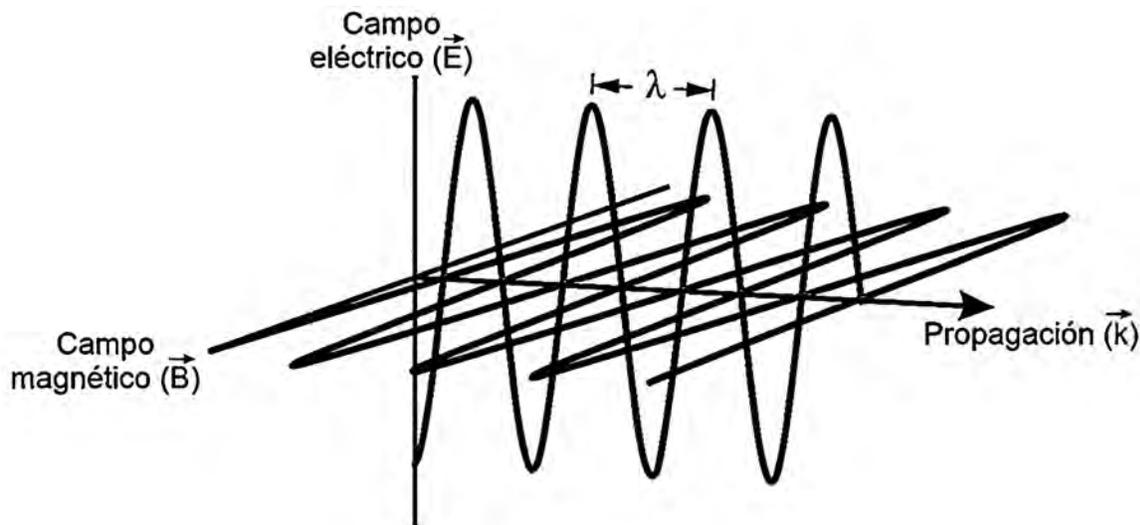


Figura 2.3: Componentes eléctricos (E) y magnéticos (B) de la radiación electromagnética.

De manera general, la fase de las ondas se define por la forma en que se sincronizan sus picos, y esta magnitud se cuantifica en unidades angulares, tales como grados o radianes. Cuando dos ondas están alineadas y sus máximos coinciden, se considera que están en fase, oscilando de manera coordinada. En cambio, si los máximos de una onda coinciden con los mínimos de otra, se dice que están desfasadas (Campbell y Wynne, 2011).

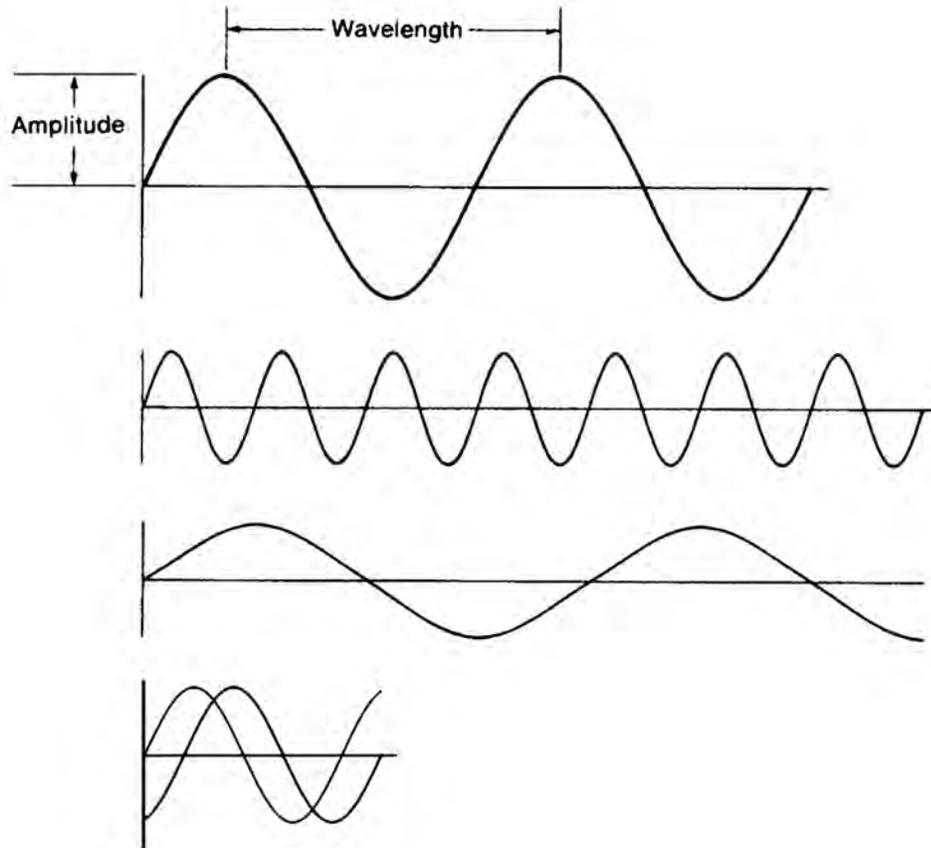


Figura 2.4: Amplitud, frecuencia y longitud de onda. El segundo diagrama representa alta frecuencia, longitud de onda corta; el tercero, baja frecuencia y baja longitud de onda. El diagrama inferior ilustra dos formas de onda que están desfasadas (Campbell y Wynne, 2011).

Tabla 2.2: Unidades de longitud utilizadas en percepción remota (Campbell y Wynne, 2011).

Unidad	Distancia	
Kilómetro (km)	1,000 m	
Metro (m)	1.0 m	
Centímetro (cm)	0.01 m	10^{-2} m
Milímetro (mm)	0.001 m	10^{-3} m
Micrómetro (μm)	0.000001 m	10^{-6} m
Nanómetro (nm)		10^{-9} m
Ángstrom (Å)		10^{-10} m

Tabla 2.3: Frecuencias utilizadas en percepción remota (Campbell y Wynne, 2011).

Unidad	Frecuencia [ciclos por segundo]
Hertz (Hz)	1
Kilohertz (kHz)	10^3 (=1,000)
Megahertz (MHz)	10^6 (=1,000,000)
Gigahertz (GHz)	10^9 (=1,000,000,000)

La radiación electromagnética se propaga en forma de onda a una velocidad constante, y sus propiedades ondulatorias se encuentran relacionadas con la velocidad, la longitud de onda y la frecuencia. Esta relación se expresa mediante la fórmula:

$$c = \lambda f \quad (2.1)$$

Donde, c indica la velocidad de la luz ($299,792,458\text{m/s}$), λ expresa la longitud de onda, y f la frecuencia. Dado que la velocidad es constante, cualquier aumento en frecuencia disminuye la longitud de onda. En consecuencia, la longitud de onda y la frecuencia mantienen una relación inversamente proporcional (Percuoco, 2014; Siegel, Saukko y Houck, 2012). La velocidad con la que se propaga la radiación varía en diferentes medios, como gases, líquidos o sólidos, y se expresa de la siguiente manera:

$$n = c/v \quad (2.2)$$

Donde, n es el índice de refracción, y v la velocidad de la luz en el medio. Esta relación, proporciona información valiosa sobre las propiedades inherentes al material (Percuoco, 2014).

2.2.1. Espectro Electromagnético

Con base en lo deducido anteriormente, es posible describir cualquier tipo de energía radiante según su longitud de onda o frecuencia en el denominado espectro electromagnético (Percuoco, 2014). Este abarca el rango completo de todas las posibles frecuencias de radiación electromagnética, dividiéndose en dos partes; visible y no visible (Figura 2.5) (Smith, 1997).

El espectro visible, perceptible por el ojo humano, abarca desde 400 hasta 700 nanómetros de longitud de onda. En contraste, el espectro no visible se clasifica en dos grupos; ondas de baja frecuencia y alta frecuencia. Las ondas de baja frecuencia poseen una longitud de onda mayor y transportan una cantidad reducida de energía, mientras que las de alta frecuencia se distinguen por tener una longitud de onda más corta y transformar una mayor cantidad de energía (Siegel, Saukko y Houck, 2012).

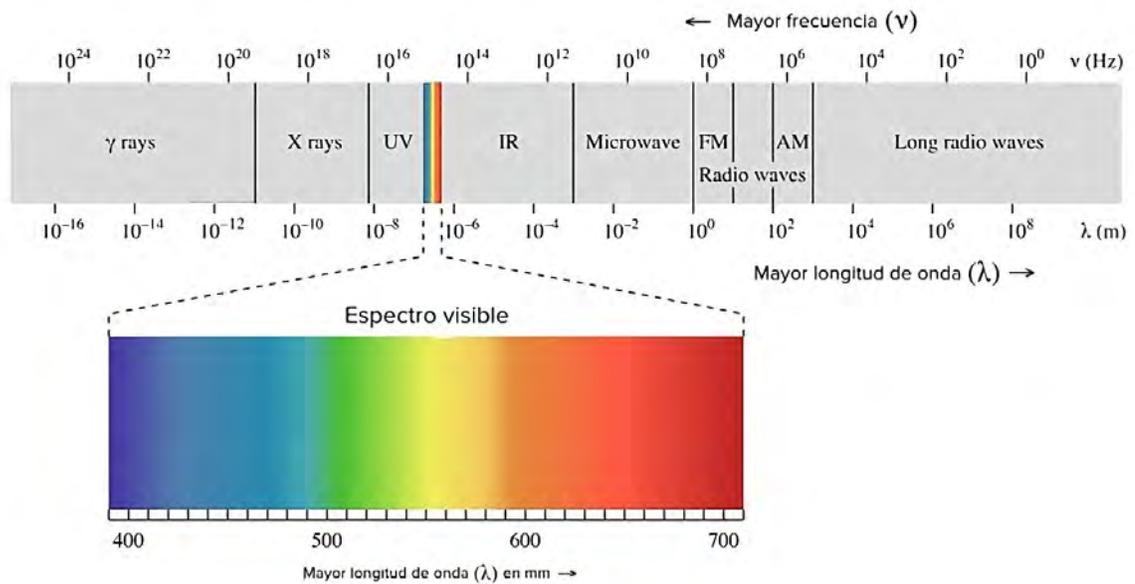


Figura 2.5: Regiones del espectro electromagnético.

En el ámbito de la percepción remota, es esencial aludir a múltiples bandas espectrales que se utilizan extensamente con la tecnología actual (Campbell y Wynne, 2011; Chuvieco, 1995). La diversidad de estas franjas espectrales permite captar información valiosa sobre la superficie terrestre, ofreciendo así una herramienta crucial en la obtención y análisis de datos geospaciales:

- Espectro Visible:** Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir los ojos humanos, coincidiendo con las longitudes de onda donde es máxima la radiación solar. Suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul, verde y rojo en razón de los colores elementales asociados a esas longitudes de onda.

- **Infrarrojo Cercano:** A veces se denomina también infrarrojo reflejado y fotográfico, puesto que puede detectarse a partir de films dotados de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- **Infrarrojo Medio:** Donde se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre.
- **Infrarrojo Lejano:** Incluye la porción emisiva del espectro terrestre.
- **Microondas:** Con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

2.2.2. Categorías del Espectro Electromagnético

La principales categorías del espectro electromagnético están en esencia definidas de forma arbitraria (Tabla 2.4). Las subdivisiones se definen de manera conveniente y de acuerdo con las tradiciones particulares de diversas disciplinas (Campbell y Wynne, 2011).

Tabla 2.4: Principales categorías del espectro electromagnético (Campbell y Wynne, 2011).

Categoría	Límites
Rayos Gamma	<0.03 nm
Rayos X	0.03 - 300 nm
Ultravioleta	0.30 - 0.38 μm
Luz visible	0.38 - 0.72 μm
Radiación Infrarroja	
Infrarrojo Cercano	0.72 - 1.30 μm
Infrarrojo Medio	1.30 - 3.00 μm
Infrarrojo Lejano	7.0 - 1,000 μm (1mm)
Microondas	1 mm - 30 cm
Radio	> 30 cm

2.2.3. Región de las Microondas

La región del espectro que comienza en las longitudes de onda milimétricas recibe la denominación de microondas. Estas longitudes de onda encuentran aplicación en diversos usos civiles y militares, como las comunicaciones de todo tipo vía satélite, así como en la meteorología (Gonzalez, 2001). Las frecuencias de microondas oscilan entre 10^9 Hz (1 GHz) hasta aproximadamente 1000 GHz con un rango de longitudes de onda desde 30 cm hasta 0.03 cm (Ohring y Kasprzak, 2015).

2.3. Sistema Activo de Microondas

Como se detalló en la sección anterior, la región de las microondas dentro del espectro electromagnético está muy alejada de aquellas que se encuentran dentro y cerca del espectro visible. En consecuencia, nuestra experiencia sensorial directa no es capaz de interpretar información en esta región. Como resultado, el estudio de imágenes suele ser un tema complicado y requiere más atención de la que suele ser necesaria para las obtenidas mediante otras regiones del espectro (Campbell y Wynne, 2011).

De acuerdo con Campbell y Wynne (2011), en el contexto de la percepción remota por satélite, los sistemas de microondas activos son dispositivos diseñados para emitir y recibir señales de microondas con el fin de formar imágenes de la Tierra. Estos sistemas constan de un transmisor, un receptor, un conjunto de antenas y un registrador. El transmisor emite pulsos repetitivos de energía de microondas a una frecuencia específica, mientras que el receptor recibe, filtra y amplifica la señal reflejada por la antena. El conjunto de antenas dirige un haz estrecho de energía de microondas utilizando guías de onda, que regulan la propagación de la onda. A menudo, la misma antena se utiliza tanto para la transmisión como para la recepción de la señal. Finalmente, el registrador documenta los valores de las señales, proporcionando una representación detallada de los datos capturados durante el proceso de medición (Chuvieco, 1995; Smith, 1997).

El radar es un ejemplo de un sistema de microondas activo, evaluando el intervalo de tiempo entre la transmisión de una señal hacia la superficie del terreno, y su recepción al retornar. Esta tecnología permite una medición precisa de la

distancia desde la antena hasta los elementos en el suelo, facilitando así, la detección de cambios en frecuencia y polarización. Al transmitir una señal de longitud de onda conocida, el sensor posibilita la comparación entre la señal recibida y la señal originalmente transmitida (Campbell y Wynne, 2011). En esta perspectiva, las próximas subsecciones destacan el papel del radar como un sistema activo de microondas, explorando en detalle su funcionamiento en la percepción remota por satélite.

2.3.1. Penetración

La penetración en los radares, se refiere a la capacidad de estos para atravesar distintos tipos de materiales y así obtener información sobre la estructura y características subyacentes de la superficie terrestre (Chuvieco, 1995). La capacidad de penetración varía según la frecuencia del radar y las características del material a través del cual se intenta penetrar. Aunque los radares experimentales a veces pueden variar su frecuencia e incluso emplear múltiples frecuencias, como ocurre en el caso de un radar multiespectral, su diseño suele centrarse en el uso de una sola banda con una frecuencia y longitud de onda específica (Campbell y Wynne, 2011; Smith, 1997). La Tabla 2.5, presenta las subdivisiones principales del radar, donde cada una se distingue por su rendimiento en diversas áreas de aplicación como la cartografía, la monitorización ambiental y la detección de cambios en el terreno (Camara, 2007).

Tabla 2.5: Aplicación de las bandas del radar (Camara, 2007).

Banda	Frecuencia [GHz]	Long λ [cm]	Aplicaciones
VHF	0.03 - 0.3	1000 - 100	Comunicaciones, transmisiones de radio FM
UHF, P	0.3 - 1	100 - 30	Biomasa, cartografía, humedad del suelo
L	1 - 2	30 - 15	Agricultura, monitoreo forestal, humedad del suelo
S	2 - 4	15 - 7.5	Vigilancia agrícola, radar marino
C	4 - 8	7.5 - 3.75	Detección de cambios, vigilancia urbana, glaciares
X	8 - 12.5	3.75 - 2.4	Vigilancia urbana, hielo y nieve, meteorología
Ku	12.5 - 18	2.4 - 1.7	Telecomunicaciones, monitoreo del hielo y nieve
Ka	18 - 40	1.7 - 0.75	Telecomunicaciones, cartografía de alta resolución
V	50 - 75	0.60 - 0.40	Televisión por satélite
W	75 - 111	0.40 - 0.27	Aplicaciones militares de seguimiento

Al penetrar en la superficie del terreno, las señales de radar pueden experimentar diversas perturbaciones que afectan su calidad y fiabilidad. Estas perturbaciones pueden incluir efectos causados por la vegetación, como la atenuación y la dispersión de la señal, así como la interferencia debida a condiciones atmosféricas cambiantes, como la lluvia intensa o la niebla. Además, la topografía del terreno y la presencia de obstáculos pueden causar reflexiones múltiples o sombras (Campbell y Wynne, 2011; Camara, 2007).

Por otra parte, cuando un radar emite un haz de microondas hacia la superficie, la mayor parte de este haz se dispersa al entrar en contacto con ella. Dependiendo de la naturaleza del sustrato, el haz se dispersa principalmente hacia la atmósfera (en el caso del suelo), se dispersa dentro del propio objeto (en el caso de la vegetación), o se refleja especularmente (en el caso del agua). Estos tres comportamientos generan señales de retorno notablemente diferentes, como se observa en la Figura 2.6. Por tanto, este fenómeno está determinado por el coeficiente de retrodifusión, que tiene un significado similar a la reflectividad en términos del espectro visible (Chuvieco, 1995).

Otros factores, como la rugosidad y geometría del terreno, así como el ángulo de incidencia y la polarización del flujo, influyen en la señal captada por el sensor, los cuales se detallarán más adelante.

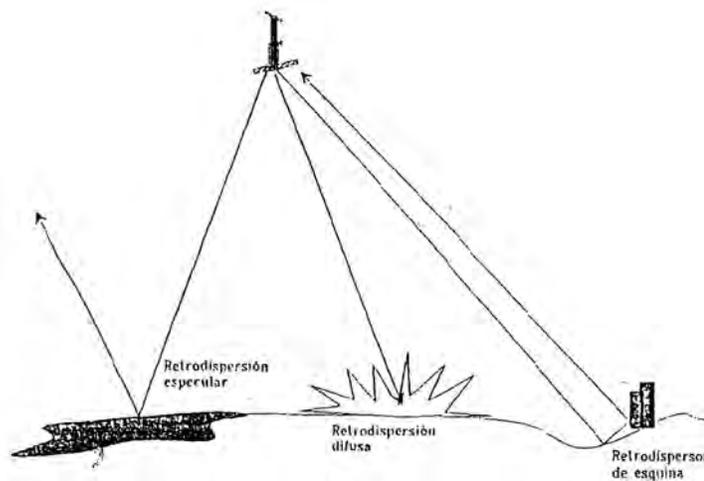


Figura 2.6: Distintos tipos de retrodispersión (Chuvieco, 1995).

2.3.2. Polarización

La polarización en señales se refiere a la orientación del campo eléctrico de la onda electromagnética transmitida. Los sistemas de radar pueden transmitir energía polarizada de manera vertical, horizontal o circular (rotando en un plano constante hacia la izquierda o hacia la derecha) (Figura 2.7). La dirección de polarización está definida por la orientación del campo eléctrico de la onda, que siempre está a 90° , o perpendicular a su campo magnético (Campbell y Wynne, 2011; Camara, 2007).

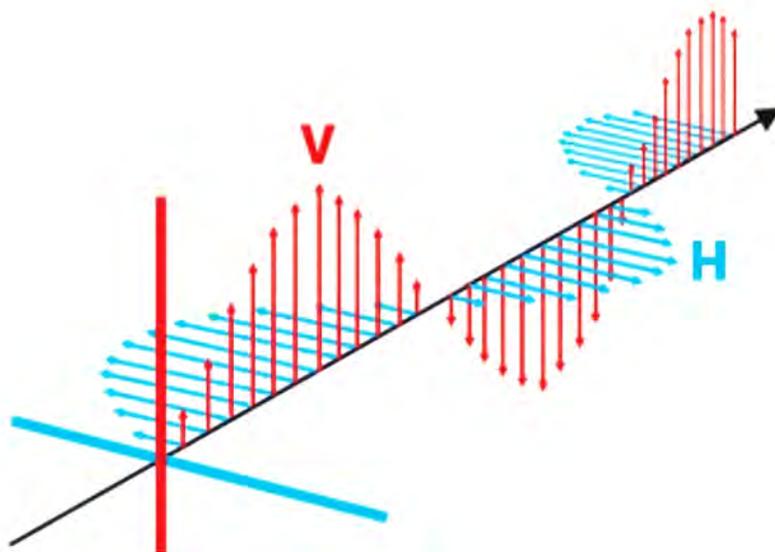


Figura 2.7: Polarización en señales de radar. Las líneas de fuerza eléctrica y magnética son perpendiculares entre sí, pero es el campo eléctrico el que determina la dirección de la polarización de la onda.

Los radares pueden presentar diversas configuraciones de polarización. Un sistema de polarización única (*pol único*), transmite y recibe una polarización única, generalmente en la misma dirección, lo que resulta en un generador de imágenes HH (horizontal-horizontal) o VV (vertical-vertical). Un sistema de doble polarización (*dual-pol*), puede transmitir con una polarización pero recibir con dos, lo que da como resultado imágenes HH y HV o VH y VV. Un sistema (*Quad-pol*), es una estrategia avanzada utilizada en sistemas de radar que involucra la emisión y recepción de señales de radar en cuatro combinaciones diferentes de polarización: HH, HV, VH y VV.

Entonces, la polarización en los sistemas radar, permite recopilar información detallada sobre las propiedades de la superficie observada, lo que revela la estructura, orientación y condiciones ambientales de los elementos presentes (JPL, 2022). Por ejemplo, las estructuras orientadas linealmente, como edificios o ondas en la arena, tienden a reflejar y preservar la coherencia de la señal polarimétrica, manteniendo así la misma dirección lineal. En contraste, las estructuras orientadas aleatoriamente, como las hojas de los árboles, dispersan y despolarizan la señal a medida que rebota en múltiples direcciones. La utilización de múltiples polarizaciones y combinaciones de longitudes de onda proporciona una variedad de información de superficie, cada una ofreciendo perspectivas diferentes y complementarias (Camara, 2007).

2.3.3. Trayectoria y Ángulo

La trayectoria y el ángulo se refieren a la dirección desde la cual el radar emite y recibe las señales. De acuerdo con Campbell y Wynne (2011), la dirección en la que la señal incide en el paisaje es fundamental tanto en entornos naturales como artificiales. En paisajes naturales, cuando el radar observa desde ángulos que cruzan lateralmente las características del terreno, es decir, perpendiculares a su orientación, la sombra producida por esas características generalmente se destaca más en la imagen. Por el contrario, cuando el radar observa desde ángulos que siguen la misma dirección que las características del terreno, es decir, paralelos a su orientación, la sombra proyectada tiende a ser menos notoria en la imagen capturada. En consecuencia, la extensión de esta sombra no solo depende del relieve local, sino también de la orientación de las características con respecto a la trayectoria de vuelo; aquellas más cercanas a la fuente del radar proyectarán sombras más pequeñas, mientras que las ubicadas en el límite de la imagen mostrarán sombras más grandes (Figura 2.8).

Entonces, se tienen dos conceptos: el ángulo de observación y el ángulo de depresión, donde el primero se refiere al ángulo bajo el cual el radar observa la superficie de la Tierra desde su posición en el espacio. Este ángulo determina la perspectiva desde la cual se adquieren los datos de la imagen radar. Por otro lado, el ángulo de depresión es la medida de cuánto el radar está inclinado hacia abajo desde la horizontal al apuntar hacia el suelo (Camara, 2007). Con respecto al primer concepto, este varía, siendo más pronunciado en el lado cercano (*near range*) y me-

nos profundo en el lado lejano (*far range*) (Figura 2.9). De tal forma que, en ángulos pronunciados se iluminan áreas más pequeñas debido a la geometría del haz del radar, permitiendo una mayor concentración de energía, así como una iluminación más intensa y detallada en esas regiones específicas del terreno (Campbell y Wynne, 2011).

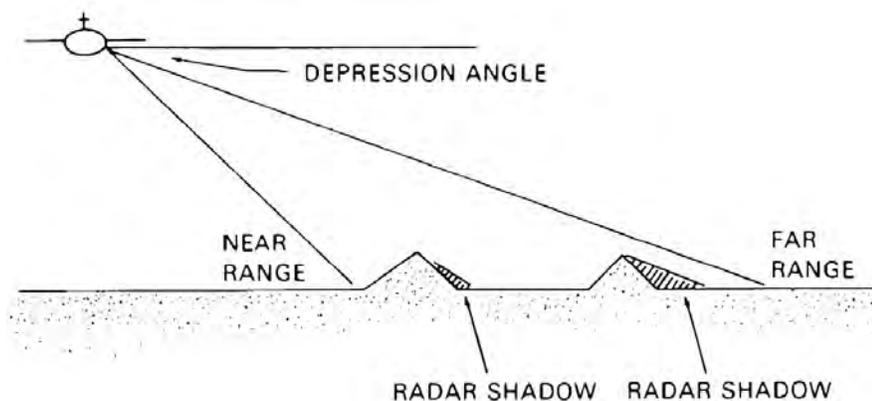


Figura 2.8: Ángulo de depresión en los sistemas de radar (Campbell y Wynne, 2011). La sombra del radar aumenta a medida que aumenta el relieve del terreno y disminuye el ángulo de depresión.

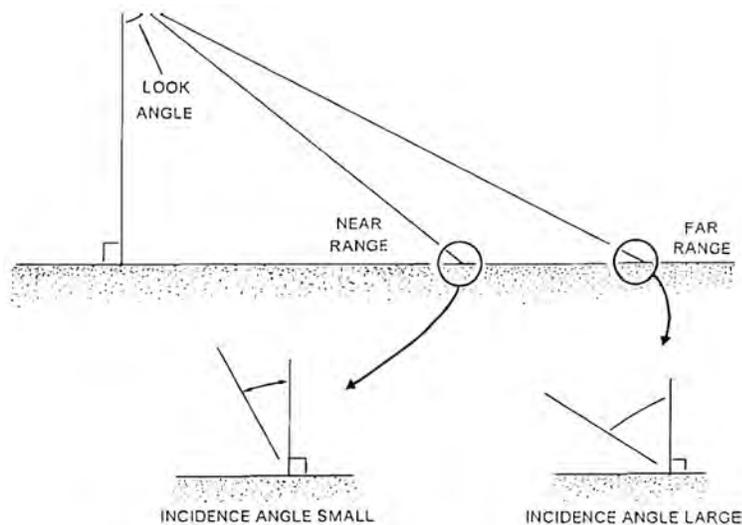


Figura 2.9: Ángulo de observación en los sistemas de radar (Campbell y Wynne, 2011). Este ángulo determina la dirección de observación del radar en la superficie del terreno.

2.4. Principios del SAR

En la sección anterior, se ha tratado el funcionamiento del radar montado en una plataforma en movimiento. En esta siguiente parte, procederemos a analizar los principios fundamentales del SAR, enfocándonos en los conceptos y ecuaciones matemáticas que permiten la obtención de imágenes de alta resolución de la superficie terrestre.

2.4.1. Resolución Espacial del Radar

Como se ha discutido previamente, el radar emite pulsos electromagnéticos en una dirección perpendicular a su desplazamiento. Estos pulsos se envían a intervalos regulares, iluminando así un área específica en la superficie, conocida como pisada de la antena, desde la cual se reciben los ecos correspondientes a cada objetivo presente en ella (Chuvieco, 1995; Panozzo y Solorza, 2021). Para evitar confusiones causadas por la llegada simultánea de ecos de diferentes objetivos, es fundamental enviar las ondas perpendicularmente a la dirección de vuelo del satélite y con un ángulo de observación diferente de cero desde el nadir. Para ilustrar este punto, consideremos un ejemplo sencillo: si el radar emitiera directamente hacia el nadir, los ecos de dos objetivos ubicados a una distancia Δx a ambos lados tendrían el mismo retraso, lo que dificultaría identificar su ubicación con precisión en la superficie del terreno.

Por lo tanto, una imagen de radar no presenta una resolución espacial cuadrada debido a las diferencias en la geometría de adquisición y procesamiento de los datos de las señales retornadas. En este contexto, la resolución en la dirección de avance del satélite, también conocida como dirección de azimut,² determina la capacidad de distinguir entre dos objetivos situados a lo largo de la dirección de vuelo del radar (Panozzo y Solorza, 2021).

Por otro lado, la dirección de observación del radar se denomina como rango oblicuo, aunque comúnmente se refiere como resolución en rango. Esta última determina la distancia entre el sensor y el blanco objetivo (Camara, 2007; Panozzo y Solorza, 2021).

²También escrito como acimut o más raramente, acimud.

2.4.2. Sistema de Apertura Real

El Radar de Apertura Real (RAR), es una tecnología que emplea una antena física de tamaño considerable para emitir pulsos de microondas hacia la superficie terrestre y posteriormente recibir las señales reflejadas (Chuvienco, 1995).

González (2010) explica que, en el contexto satelital, este sistema opera de la siguiente manera (Figura 2.10): en un momento determinado, se emite un pulso electromagnético que atraviesa la atmósfera hasta interactuar con un objeto. Esta interacción resulta en la absorción de parte de la energía del pulso, mientras que una fracción es reflejada y regresa hacia la antena receptora. Esta señal reflejada se traduce en un valor de fase y amplitud; la fase proporciona información sobre el tiempo transcurrido, que es proporcional a la distancia recorrida, mientras que la amplitud revela detalles sobre la textura, la pendiente y propiedades eléctricas del objeto, que a su vez pueden depender de factores ambientales como la temperatura y la humedad.

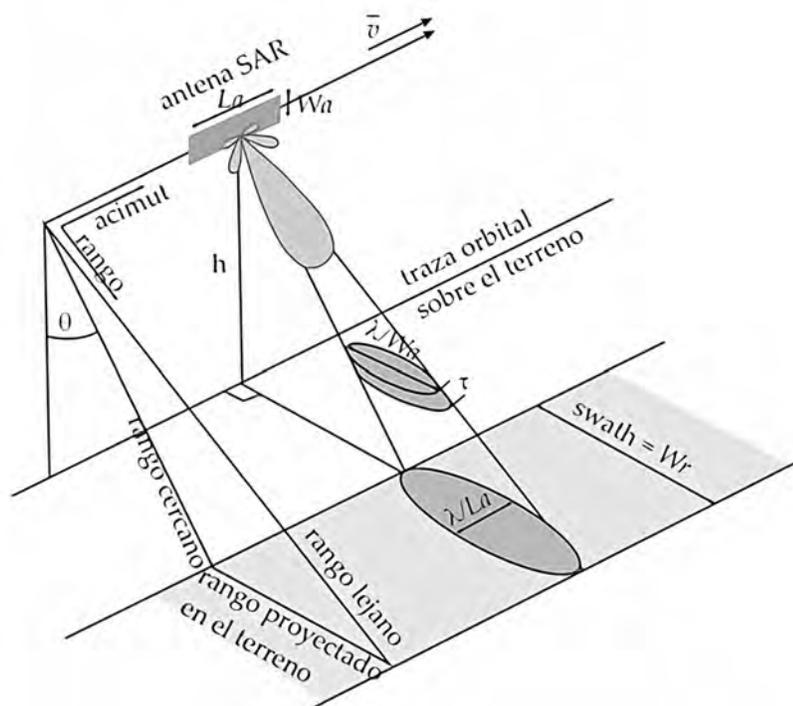


Figura 2.10: Geometría de adquisición de un sistema RAR instalado en una plataforma satelital (González, 2010).

De acuerdo con la Figura 2.10, la formulación expuesta por Hanssen (2001), así como la descripción y modificación de ciertas expresiones por parte de González (2010), se presenta una antena radar RAR. Esta antena tiene una división lateral rectangular con dimensiones L_a y W_a , instalada en un satélite que se desplaza a una velocidad \bar{v} en la dirección de avance del satélite (azimut) y a una altitud sobre el terreno h . Los pulsos emitidos desde la antena hacia la superficie siguen una dirección (rango) que forma un ángulo de inclinación θ con respecto a la vertical. Esto ocasiona que el área iluminada tenga una anchura proporcional al patrón de la antena RAR en la dirección del rango, expresada mediante la Ecuación 2.3, en tanto que la proyección sobre el terreno (swath) de esta anchura se formula a partir de la Ecuación 2.4:

$$w_r = \frac{\lambda}{W_a} \quad (2.3)$$

$$W_r = \frac{\lambda R}{W_a \cos \theta} \quad (2.4)$$

Donde, W_r representa la anchura del área iluminada en rango, λ denota la longitud de onda y R corresponde a la distancia hasta un punto específico en el terreno. Por lo tanto, la resolución espacial en la dirección del rango está determinada por la diferencia de tiempo entre pulsos, siendo la diferencia de tiempos mínima igual a la duración del pulso τ . Así, la resolución en rango se expresa mediante la Ecuación 2.5, mientras que la proyección sobre el terreno se formula a partir de la Ecuación 2.6:

$$\delta_r = \frac{c\tau}{2} \quad (2.5)$$

$$\delta_r = \frac{c\tau}{2 \sin \theta} \quad (2.6)$$

En términos reales, la separación de pulsos a esta frecuencia no es posible debido a la baja cantidad de energía que regresa al sensor en comparación con el ruido del sistema. En su lugar, se emplea una frecuencia modulada o pulso *chirp*, con un ancho de banda de B_w , lo que permite resolver diferencias de tiempo de $1/B_w$. Esto se traduce en una resolución en rango proyectada sobre el terreno, expresada de la siguiente manera:

$$\delta_r = \frac{c}{2B_w \sin \theta} \quad (2.7)$$

La distancia más pequeña entre dos puntos que pueden distinguirse es proporcional a la longitud del pulso del patrón de la antena RAR; ($w_a = \frac{\lambda}{L_a}$), lo que también influye en la longitud del área iluminada.

En la dirección de avance del satélite, que corresponde a la resolución azimutal, esta suele ser más pobre debido a que los objetos se encuentran a la misma distancia relativa al movimiento del radar, lo que limita la capacidad de discriminación espacial en esta dirección; su cálculo se expresa de la siguiente forma:

$$\delta_a = \frac{\lambda}{L_a} R \quad (2.8)$$

El principal obstáculo de estos sensores reside en su escasa resolución en la dirección azimutal. Esta limitación dificulta su uso en plataformas espaciales, ya que sería necesario disponer de antenas de gran tamaño para lograr una resolución satisfactoria (Chuvieco, 1995). Para superar esta limitación se desarrolló el concepto de Radar de Apertura Sintética (SAR) (González, 2010).

2.4.3. Sistema de Apertura Sintética

El desarrollo del SAR representó un hito importante para los radares aerotransportados, al permitir la obtención de imágenes de alta resolución y calidad desde plataformas aéreas o espaciales en movimiento (Moreira y col., 2013). De esta manera, SAR se considera una solución para mejorar la resolución acimutal, evitando la necesidad de aumentar considerablemente la longitud de la antena. Su principio de operación se basa en el efecto Doppler, que afecta a la observación realizada cuando existe un movimiento relativo entre objeto y sensor (Campbell y Wynne, 2011). Para este caso, se registran los pulsos de un mismo punto de la superficie terrestre en momentos distintos de la trayectoria, con lo que la resolución es equivalente a la que se obtendría con una antena de similar longitud a la distancia existente entre ambos puntos (Camara, 2007; Campbell y Wynne, 2011; Chuvieco, 1995).

De acuerdo con González (2010), el concepto de radar de apertura sintética se basa en que un punto en el terreno como P_o , puede recibir múltiples pulsos durante el paso orbital de la antena SAR. Esta idea se ilustra en la Figura 2.11, donde se observa que el punto P_o recibe pulsos a lo largo de la trayectoria orbital

del satélite, desde P_1 hasta P_2 . Dado que la frecuencia emitida varía debido al efecto Doppler, causado por el movimiento relativo entre el emisor y el receptor, se utiliza la diferencia para distinguir los pulsos reflejados por P_o durante el trayecto $P_1 - P_2$, permitiendo así obtener una imagen con una resolución espacial equivalente a la de una antena real RAR con una dimensión L_s . Por lo tanto, la resolución en azimut de un sensor SAR se define como:

$$\delta_a = \frac{\lambda}{L_s} R \tag{2.9}$$

Entonces, si la longitud de la antena sintética se define como: $L_s = \frac{2\lambda R}{L_a}$, y que es equivalente a la resolución en el terreno del sensor en modo RAR, podemos expresarlo de manera más concisa como:

$$\delta_a = \frac{L_a}{2} \tag{2.10}$$

Por lo tanto, la formación de una apertura sintética conduce a una alta resolución en azimut, mientras que la resolución en rango se determina por el ancho de banda B_w del *chirp* transmitido (Moreira y col., 2013).

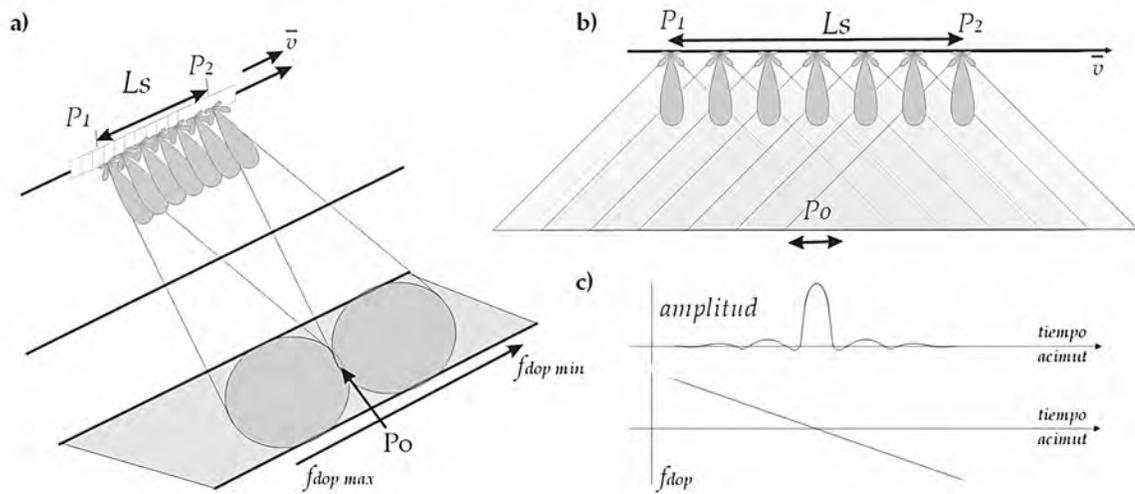


Figura 2.11: Señal en el Radar de Apertura Sintética (González, 2010).
 a) Concepto de un radar de apertura sintética. b) Principio del SAR en la dirección azimutal. c) Relación de la amplitud normalizada del patrón de la antena SAR.

2.5. Interferometría de Radar

La Interferometría de Radar (InSAR), es una técnica que emplea datos de radar para medir con precisión cambios en la superficie del terreno (Ferretti y col., 2007; Hanssen, 2001). Cada adquisición SAR proporciona dos mediciones fundamentales: amplitud y fase (como se detalla en la Sección 2.4.2), y en su esencia, InSAR compara estas mediciones a partir de dos o más imágenes de radar complejas que han sido adquiridas desde posiciones ligeramente diferentes o en momentos distintos (Moreira y col., 2013). De este modo, al alinear dos imágenes SAR de manera que haya una sobreposición píxel a píxel, es posible crear un interferograma permitiendo identificar el cambio relativo en el área correspondiente a un determinado píxel (Figura 2.12).

De acuerdo con Ferretti y col. (2007), los valores de un interferograma están fuertemente correlacionados con la topografía del terreno, el cual se obtiene al multiplicar la imagen compleja de referencia por el conjugado complejo de la imagen secundaria. En este contexto, las imágenes de referencia y secundaria, son generalmente referidas en la literatura como: maestra (M) y esclava (E) (del inglés *master* y *slave*) respectivamente. La elección de la primera se considera en función de su calidad, es decir, menor distorsión o interferencia atmosférica, mientras que, la segunda se alinea y compara para calcular las diferencias entre ambas. Así, en el interferograma resultante, la amplitud corresponde a la multiplicación de las amplitudes, en tanto que la fase interferométrica corresponde a la diferencia de fases entre las dos imágenes.

Según lo indicado por González (2010), la fase de la imagen maestra (ϕ_1) y de la imagen esclava (ϕ_2), se definen de la siguiente manera:

$$\phi_1 = \frac{2 * 2\pi}{\lambda} R_1 + \phi_{scat} \quad (2.11)$$

$$\phi_2 = \frac{2 * 2\pi}{\lambda} R_2 + \phi_{scat} \quad (2.12)$$

Donde, el factor multiplicativo (2) surge del tiempo de ida y vuelta, mientras que ϕ_{scat} representa la fase ocasionada por la interacción de la onda con la superficie del terreno. Dado que esta contribución varía entre píxeles, la fase de una imagen SAR exhibe aleatoriedad. Además, debido a la naturaleza cíclica de la señal

SAR, la distancia: $R = (\phi + k) * \lambda$, que se calcularía simplemente como la fase más un número entero de ciclos de onda por la longitud de onda, no se puede determinar con precisión.

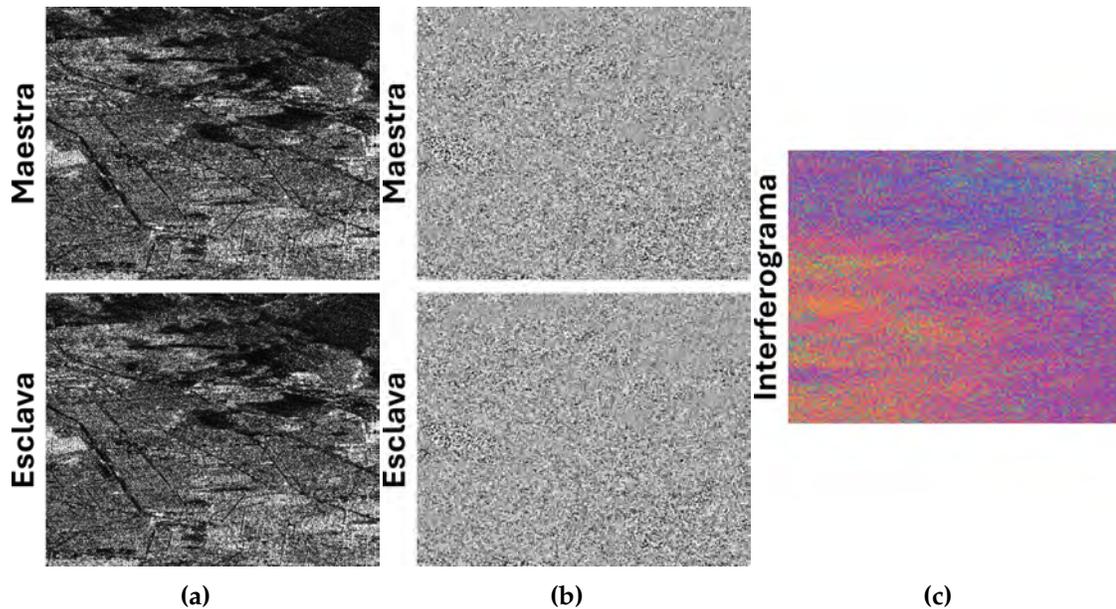


Figura 2.12: Componentes de una imagen SAR compleja. El interferograma SAR se genera multiplicando de manera cruzada, píxel por píxel, la primera imagen SAR con el conjugado complejo de la segunda. a) Imagen de amplitud. El brillo en la imagen indica la cantidad de energía reflejada, la cual varía según la rugosidad, pendiente y propiedades eléctricas de la superficie. b) Imagen de fase. Se registra la diferencia en la distancia entre el sensor y los puntos de la superficie, proporcionando información sobre los cambios en el terreno. c) Interferograma resultante. Al combinar la imagen maestra y esclava se puede generar un interferograma, y así mapear los patrones de desplazamiento.

Al construir un interferograma mediante la diferencia de fases entre las dos imágenes, la fase resultante, conocida como fase interferométrica (ψ), se vuelve independiente de las propiedades de reflexión del terreno (ϕ_{scat}), las cuales asumimos constantes en el tiempo. Por lo tanto, la fase interferométrica solo estará influenciada por la discrepancia en las distancias recorridas en las dos imágenes, representadas por R_1 y R_2 .

Con base en lo expuesto por González (2010), la Ecuación 2.13, expresa la fase interferométrica (ψ), y representa una versión simplificada que se basa únicamente en el cambio de distancias recorridas:

$$\psi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} * (R_2 - R_1) = \frac{4\pi}{\lambda} * \delta R_{1,2} \quad (2.13)$$

Sin embargo, es fundamental tomar en cuenta que la diferencia de fases consiste en realidad en una suma más compleja de múltiples contribuciones. Entre ellas, destaca la contribución de fase por geometría o aproximación de la Tierra plana (ψ_{tpl}). Cuando se adquieren dos imágenes desde puntos distintos, se produce una diferencia de fase que varía en función de la separación entre los satélites. Esta diferencia de fase se refleja entre dos píxeles a y b del interferograma, a partir de la siguiente expresión:

$$\psi_{tpl} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \tan \theta - \zeta} \quad (2.14)$$

Donde, B_{\perp} representa la distancia o separación perpendicular entre dos satélites en el espacio,³ R indica la distancia entre la antena y la superficie del terreno, mientras que ζ describe la pendiente local del terreno.

La contribución de fase debida a la topografía (ψ_{top}), emerge cuando el terreno presenta irregularidades y no es plano. En este caso, se agrega a la componente de Tierra plana una fase proporcional a la diferencia de altitud entre los puntos a y b del interferograma, expresándose de la siguiente manera:

$$\psi_{top} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp}}{R \sin \theta} \delta_h \quad (2.15)$$

Donde, δ_h representa la diferencia de altitud entre los puntos a y b. Es importante destacar que cuando se presenta el caso: $B_{\perp} = 0$, la componente topográfica tiende a cero.

Por otro lado, la fase asociada al desplazamiento del terreno (ψ_{dez}), se presenta cuando se producen cambios en el terreno entre los momentos en que se adquirieron las imágenes:

$$\psi_{dez} = \frac{4\pi}{\lambda} \delta_{LOS} \quad (2.16)$$

³ B_{\perp} conocido comúnmente como línea de base en la literatura.

Donde, δ_{LOS}^4 corresponde al desplazamiento tridimensional proyectado en la dirección del rango.

Por último, si las condiciones de refracción atmosférica no son uniformes en ambas imágenes, esto provoca un retraso diferencial entre los puntos a y b. En este contexto, se presenta la contribución de fase debida al retraso atmosférico (ψ_{atm}), donde N representa la distribución de refracción presente en las imágenes maestra y esclava:

$$\psi_{atm} = \frac{4\pi}{\lambda \cos \theta} \int_h^o (N_2 - N_1) dh \quad (2.17)$$

2.5.1. Coherencia

Otro aspecto relevante en InSAR, es la inclusión del coeficiente de correlación interferométrica. De acuerdo con González (2010), este parámetro cuantifica el grado de similitud entre las fases de las imágenes maestra (M) y esclava (E). En este contexto, la fase se supone circular, estacionaria, gaussiana y con media cero. Así, el coeficiente de correlación interferométrica se describe como:

$$\gamma = \frac{H\{ME^*\}}{\sqrt{H\{|MM^*|^2\}H\{|EE^*|^2\}}} \quad (2.18)$$

La variable H , indica la esperanza matemática, mientras que el símbolo (*) denota el conjugado complejo. Dado que este coeficiente de correlación no puede calcularse píxel a píxel, suele aproximarse espacialmente mediante el estimador de coherencia ($|\hat{\gamma}|$), que se basa en el estimador de máxima verosimilitud de la fase interferométrica ($\sum_{i=0}^{NM} M_i S_i^*$), donde NM píxeles denota el entorno del estimador de coherencia:

$$\hat{\gamma} = \left| \frac{\frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{NM} M_i S_i^*}{\sqrt{\frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{NM} M_i M_i^* \frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{NM} S_i S_i^*}} \right| \quad (2.19)$$

De acuerdo con lo expuesto en ESA (2007), la coherencia en el ámbito de InSAR está vinculada con la variación de fase entre dos o más imágenes. De modo que, se define como un indicador de correlación que ofrece información sobre la estabilidad temporal de las señales de radar en una región determinada. Esta estabilidad temporal se refiere a la uniformidad en la fase de las señales captadas

⁴LOS línea de vista desde el observador hasta el objetivo.

durante diversas observaciones, lo que permite deducir características del terreno o de los objetos observados (Ferretti y col., 2007). En este contexto, el valor de este parámetro oscila entre 0 y 1, donde 1 indica la máxima correlación posible y 0 la mínima. Por tanto, en una imagen SAR, las áreas con alta coherencia aparecen brillantes, mientras que las áreas con baja coherencia se muestran oscuras (Figura 2.13).

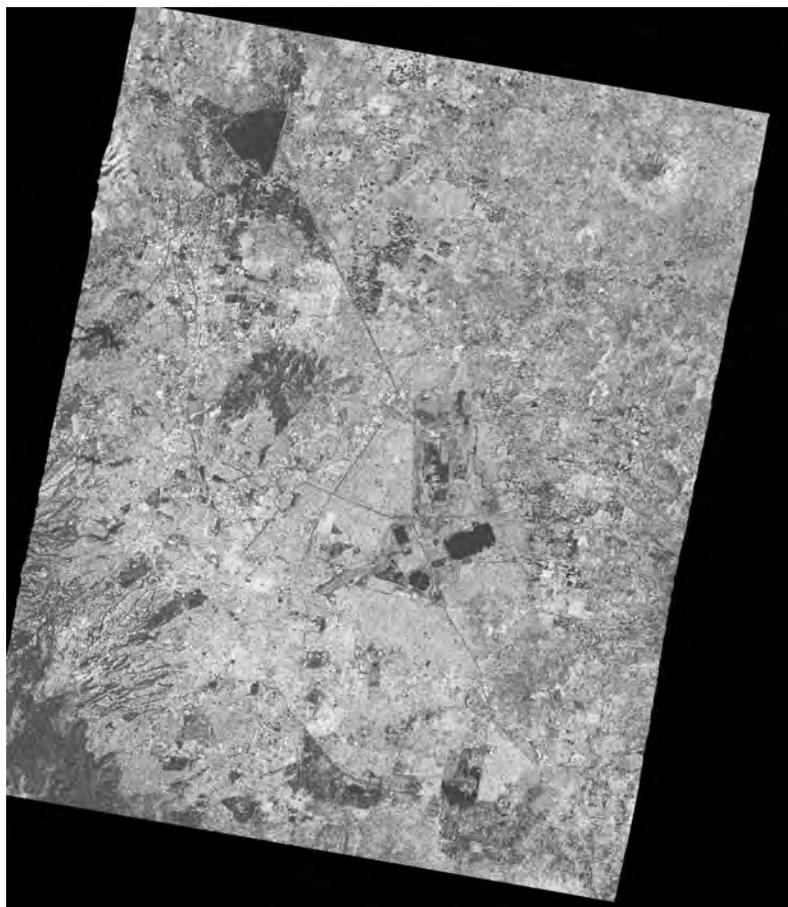


Figura 2.13: Representación de coherencia para la Ciudad de México. En una imagen SAR, las zonas que muestran alta coherencia suelen ser aquellas con características estables y poco cambiantes en el tiempo. Esto puede incluir áreas de terreno plano, superficies urbanas consistentes y regiones con vegetación densa y homogénea. Las zonas con baja coherencia suelen ser aquellas con cambios significativos entre las observaciones, como áreas con vegetación dispersa, cuerpos de agua en movimiento o áreas urbanas con estructuras que cambian con el tiempo.

De acuerdo con Hanssen (2001) y Moreira y col. (2013), en la práctica, varios factores contribuyen a la disminución de la coherencia. Un importante contribuyente es el ruido del receptor. Si asumimos que la potencia de ruido es idéntica para ambos receptores, la pérdida de coherencia correspondiente se determina mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_{SNR} = \frac{1}{1 + SNR^{-1}} \quad (2.20)$$

Donde, SNR describe la relación entre la señal de retorno de radar recibida y el nivel de ruido presente en dicha señal.⁵ Otro factor importante es la decorrelación temporal (γ_{Temp}), que hace referencia a las variaciones en la composición y las características del entorno entre los distintos momentos en los que se capturan las imágenes. Además, otras fuentes significativas de pérdida de coherencia incluyen los efectos geométricos (γ_{Geo}), que pueden deberse a la geometría de la escena observada por el radar, y los volumétricos (γ_{Vol}), que son cambios en el volumen de la superficie terrestre entre las adquisiciones SAR. Por lo tanto, la pérdida total de coherencia (γ) se calcula como el producto de las pérdidas individuales, y se denota de la siguiente manera:

$$\gamma = \gamma_{SNR} \cdot \gamma_{Temp} \cdot \gamma_{Geo} \cdot \gamma_{Vol} \quad (2.21)$$

2.5.2. DInSAR

La Interferometría Diferencial (DInSAR) surge como una derivación de InSAR, y se distingue principalmente en su capacidad para eliminar la contribución de la topografía en la fase del interferograma, permitiendo así una medición más precisa de los desplazamientos en la superficie terrestre. Como se ha mencionado anteriormente, se necesitan por lo menos dos imágenes SAR capturadas en momentos distintos y con cierta diferencia temporal, las cuales se combinan para generar un interferograma. En un escenario ideal, ambas capturas deberían presentar una línea de base nula, garantizando que la información de la fase esté exclusivamente relacionada con los desplazamientos a lo largo de la línea de visión (LOS) de la escena. Sin embargo, siempre existirá alguna distancia de línea de base, lo que implica que el interferograma reflejará sensibilidad a la topografía. Por lo tanto, al emplear un Modelo Digital de Elevación (DEM) externo, se logra suprimir la influencia topográfica en la fase del interferograma, lo que constituye la esencia de DInSAR. De

⁵SNR alto indica que la señal es fuerte en relación con el ruido, lo que generalmente se traduce en una mejor calidad de imagen.

acuerdo con Moreira y col. (2013), se pueden detectar desplazamientos de la superficie del terreno con una precisión del orden de una fracción de la longitud de onda.

Con base en lo expuesto por Moreira y col. (2013), y retomando la formulación de González (2010) y Hanssen (2001), DInSAR es el proceso de modelado y cancelación de las contribución de fase debida a la topografía (ψ_{top}), y de geometría de adquisición (ψ_{tpl}). En este contexto, la fase interferométrica diferencial (φ) se expresa de la siguiente manera:

$$\varphi = \cancel{\psi_{tpl}} + \cancel{\psi_{top}} + \psi_{dez} + \psi_{atm} + \cancel{\psi_{scat}} + \epsilon \quad (2.22)$$

Donde, ψ_{scat} describe la fase introducida por los cambios en el terreno que no pueden ser modelados, mientras que ϵ abarca los errores asociados al sistema o al procesamiento. No obstante, si consideramos que hay fases residuales debido a las imperfecciones en la corrección de la geometría del interferograma (φ_{tpl}) y a los errores del DEM (φ_{top}), la fase interferométrica diferencial (φ) puede ser representada como:

$$\varphi = \varphi_{tpl} + \varphi_{top} + \varphi_{dez} + \varphi_{atm} + \epsilon \quad (2.23)$$

Entonces, al simplificar la expresión y agrupar los residuos y errores atmosféricos en ϵ , la fase diferencial estaría relacionada exclusivamente con los desplazamientos en φ_{dez} :

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \delta_{LOS} + \epsilon \quad (2.24)$$

2.5.3. Técnicas Avanzadas

La interferometría diferencial está limitada por la pérdida de coherencia interferométrica, atribuida principalmente a los cambios en las propiedades del terreno (ψ_{scat}), a la decorrelación temporal, así como líneas de base demasiado grandes (González, 2010; Hanssen, 2001). En consecuencia, algunas publicaciones sugieren que DInSAR puede no ser una técnica adecuada para mediciones de desplazamientos de alta precisión; sin embargo, se destaca su utilidad en la identificación de patrones de movimiento progresivo (Moreira y col., 2013).

Las Técnicas DInSAR Avanzadas (A-DInSAR) surgieron al reconocer que algunos elementos en los interferogramas diferenciales mantenían su coherencia, incluso con separaciones considerables en las líneas de base y temporal. Estas téc-

nicas se centran en analizar las diferencias de fase presentes en los píxeles de los interferogramas, con el objetivo de identificar puntos o blancos coherentes que reflejen los cambios en la superficie del terreno. De esta manera, A-DInSAR se basa en la combinación de la información de fase de un conjunto de interferogramas diferenciales formados a partir de un determinado número de imágenes SAR (González, 2010).

Para comprender la evolución de los desplazamientos del terreno, se han desarrollado diversos enfoques de procesamiento de imágenes SAR. Según Gheorghe y Armas (2016), estos enfoques han demostrado la capacidad de superar ciertas limitaciones, como la eliminación de los efectos atmosféricos, problemas relacionados con la línea de base y diversos fenómenos de decorrelación. Además, contribuyen a mejorar la coherencia y la robustez de los datos, lo que ayuda a minimizar posibles errores en los DEM. Como resultado, la selección de las coherencias ha llevado a la clasificación de las técnicas de procesamiento en diferentes grupos, cada uno con sus propias metodologías y ventajas.

Enfoque de Procesamiento - PSI

La técnica de Interferometría de Dispersión Persistente (PSI), introducida por Ferretti, Prati y Rocca (2001), se basa en la identificación de reflectores puntuales persistentes (o permanentes) en las imágenes multitemporales SAR, permitiendo superar las limitaciones geométricas, temporales y atmosféricas (Gheorghe y Armas, 2016). Los reflectores se consideran características que funcionan como puntos estables para las señales del radar, como edificaciones, estructuras metálicas, torres de alta tensión, antenas, objetos expuestos y formaciones rocosas, entre otros (Foroughnia y col., 2019; Volkan y Tunc, 2022). Estos elementos exhiben una fase de señal permanente, lo que implica que mantienen una alta correlación a lo largo del tiempo (Crosetto y col., 2016).

En esta metodología, los interferogramas se generan utilizando una sola imagen maestra (M) de referencia (Figura 2.14a), y con base en González (2010), el criterio para la selección de candidatos a píxeles coherentes, se basa en un parámetro de estabilidad de fase conocido como el índice de dispersión de la amplitud de los interferogramas (D_a), el cual se relaciona con la desviación estándar de la fase

interferométrica (σ_ψ) en cada píxel, y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_\psi \approx \frac{\sigma_a}{\bar{a}} = D_a \quad (2.25)$$

Donde, D_a representa la desviación estándar y \bar{a} la media temporal de las imágenes de amplitud. Los píxeles con una alta estabilidad de fase temporal se correlacionan con los puntos en el terreno que actúan como reflectores puntuales, típicamente presentes en áreas urbanas (Ferretti, Prati y Rocca, 2001). Esto permite la formación de todos los interferogramas utilizando la imagen de referencia, ya que la reflexión en estos puntos apenas se ve afectada por las condiciones de la línea de base espacial.

Siguiendo la argumentación de González (2010), una vez que se han identificado los candidatos a píxeles coherentes, se analiza la información de fase en la dimensión temporal, contrastándola con un punto en la imagen maestra que se supone inmóvil. Además, se parte de un modelo de deformación (lineal, sinusoidal, entre otros) para simular la evolución del movimiento del terreno, píxel por píxel. A continuación, se formula el siguiente modelo para maximizar una función no lineal conocida como coherencia temporal:

$$\hat{\rho}_t = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K e^{j\xi^k} \quad (2.26)$$

En esta expresión, K denota el número total de interferogramas, mientras que el parámetro ξ^k representa la diferencia entre la fase observada en el k -ésimo interferograma (ψ^k) y la fase calculada. Entonces, para un modelo lineal, la discrepancia de la expresión ξ^k se define como:

$$\xi^k = \psi^k - \left(-\frac{4\pi}{\lambda} \delta t^k v_{lin}\right) \quad (2.27)$$

Donde, δt^k corresponde a la diferencia temporal del interferograma entre la imagen maestra y esclava respectivamente. Para abordar este problema, se realiza una búsqueda en el espacio del modelo para encontrar el valor de la velocidad lineal (v_{lin}), que maximice el valor de $\hat{\rho}_t$. Este procedimiento se repite para cada píxel, descartando aquellos que presenten un residuo estadísticamente alto (Ferretti, Prati y Rocca, 2001; González, 2010).

Enfoque de Procesamiento - SBAS

La Interferometría de Subconjuntos (SBAS), propuesta por Berardino y col. (2002), es una técnica multitemporal que analiza un conjunto de interferogramas mediante las posibles combinaciones de imágenes SAR con pequeñas diferencias en separaciones espaciales y temporales (Figura 2.14b) (Amardeep, Amanpreet y Sudesh, 2018; Lanari y col., 2007). De acuerdo con lo señalado por González (2010), los puntos con alta coherencia no suelen ser reflectores puntuales, como ocurre en PSI, sino blancos distribuidos que corresponden a zonas relativamente grandes y estables. Los píxeles seleccionados deben mostrar una coherencia espacial promedio alta, definiendo $\bar{\rho}$ según:

$$\bar{\rho} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \rho^k \quad (2.28)$$

El estándar anterior puede combinarse con la estabilidad temporal ρ_t para mejorar la selección de los píxeles con alta coherencia. Por lo tanto, SBAS es especialmente útil para investigar áreas no urbanas, donde predominan los fenómenos de reflexión difusa o distribuida.

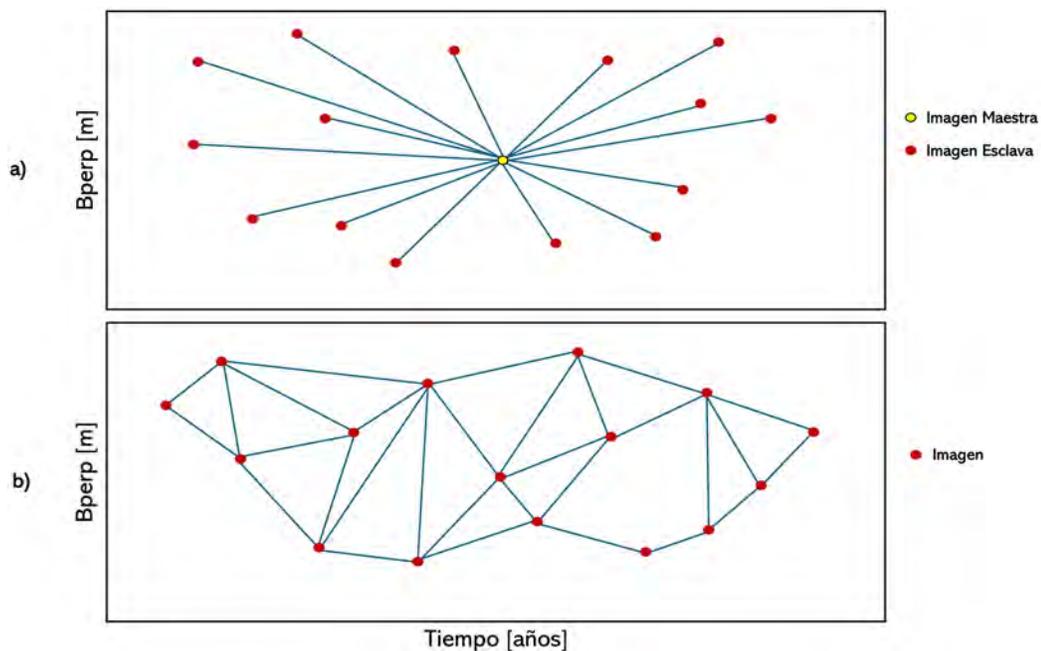


Figura 2.14: Técnicas avanzadas multitemporales. a) Interferometría de Dispersión Persistente (PSInSAR). b) Interferometría de Subconjuntos (SBAS).

2.6. Plataformas Satelitales de Radar

En la década de 1970, la introducción de la percepción remota mediante microondas activas a través de satélites marcó un hito significativo en la observación de la Tierra desde el espacio. Desde entonces, numerosas agencias espaciales han desplegado satélites equipados con instrumentación SAR, como parte de un esfuerzo continuo por mejorar nuestra comprensión del planeta desde una perspectiva orbital (Figura 2.15).

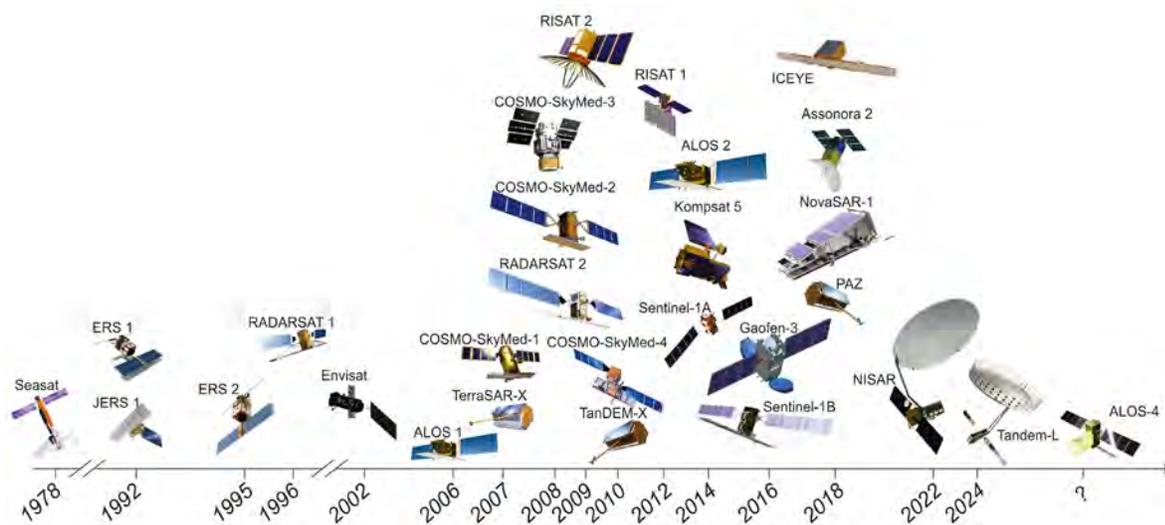


Figura 2.15: Panorama de satélites con instrumentos SAR (Aswathi y col., 2022).

La era de los satélites SAR comenzó con el Seasat, lanzado en 1978 por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA). Esta misión se diseñó específicamente para la observación de los océanos, con objetivos que incluían la recolección de datos sobre vientos marinos, temperaturas, altura de las olas, humedad atmosférica, hielo y topografía oceánica. El Seasat se destacó por proporcionar imágenes espectaculares de la Tierra, lo que demostró el inmenso potencial de la tecnología SAR (ESA, 2018b).

Más adelante, en la década de 1990, los satélites ERS-1/ERS-2 de la Agencia Espacial Europea (ESA), se destacaron por transportar un radar SAR, junto con una serie de instrumentos de observación terrestre (ESA, 2018a). Estos satélites tenían

como objetivo recopilar datos sobre diversos aspectos del medio ambiente terrestre, incluyendo la topografía, la atmósfera, los océanos y los glaciares. Además, se diseñaron para proporcionar información precisa sobre el clima, los recursos naturales y los cambios ambientales a lo largo del tiempo (Gade, 2015).

En 1995, la Agencia Espacial Canadiense (CSA) despliega el RADARSAT-1, seguido por el lanzamiento del Envisat de la ESA en 2002. En años posteriores, agencias espaciales de diferentes países comenzaron a introducir sus propios satélites SAR, como el ALOS de la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA), lanzado en 2006, y en 2007 los satélites COSMO-SkyMed de la Agencia Espacial Italiana (ASI) y el TerraSAR-X del Centro Aeroespacial Alemán (DLR), seguidos por TanDEM-X en 2010.

Otros satélites notables incluyen RISAT de la Organización de Investigación Espacial de la India (ISRO), lanzado en 2009, KOMPSAT de la Agencia Coreana de Investigación Aeroespacial (KARI), lanzado en 2013, y los satélites Sentinel 1A y 1B de la ESA, lanzados en 2014 y 2016 respectivamente.

El futuro de las plataformas SAR es alentador, con planes para nuevos lanzamientos y avances tecnológicos que buscan incrementar la resolución, la cobertura y la frecuencia de adquisición de datos. En el Apéndice A, se presenta la Tabla A.1, que proporciona información detallada sobre la mayoría de las misiones SAR que han sido colocadas en órbita, así como sobre algunas de sus especificaciones técnicas.

2.6.1. Sentinel-1

La misión espacial Sentinel-1, consiste en una constelación de satélites artificiales desarrollados por la ESA, como parte del Programa Copérnico, cuyo objetivo es el monitoreo terrestre y oceánico. Esta misión es la primera de cinco que la ESA ha desarrollado para la iniciativa Copérnico, comenzando con el lanzamiento del Sentinel 1A el 3 de abril de 2014 y del Sentinel 1B el 25 de abril de 2016. Cada satélite tiene un ciclo de repetición de 12 días en una órbita casi polar (ascendente/descendente), compartiendo el mismo plano orbital con una diferencia de 180 grados entre sí, lo que permite la repetición de pasadas cada 6 días (Figura 2.16) (ESA, 2018c; Manunta y col., 2019).

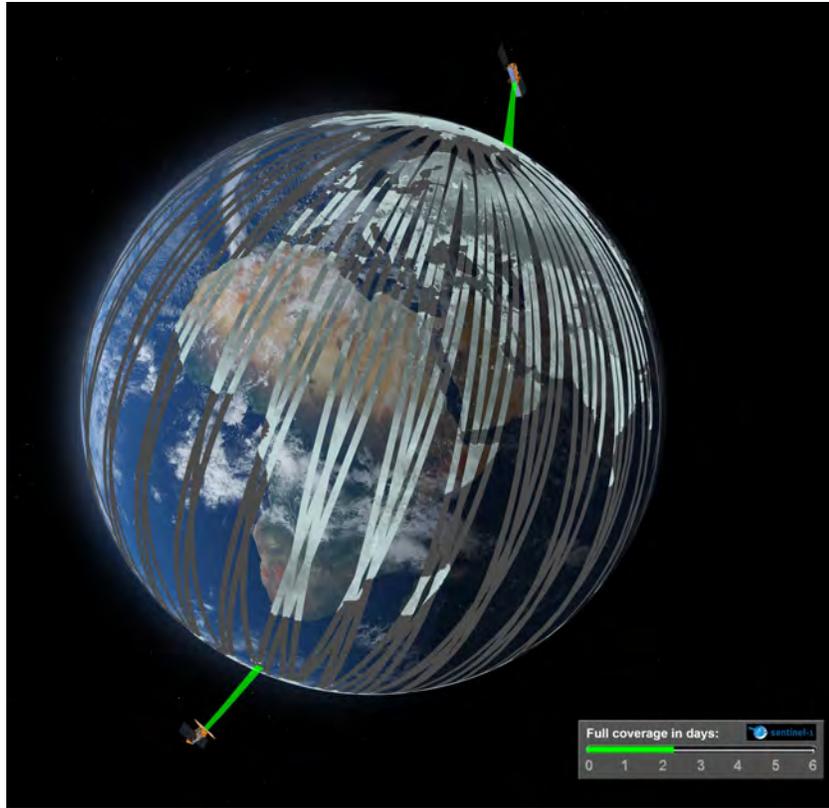


Figura 2.16: Constelación Sentinel-1 (ESA, 2018c).

El instrumento principal del Sentinel-1 es un radar SAR que opera en la banda C, con una frecuencia central de 5,405 GHz (correspondiente a una longitud de onda de aproximadamente ~ 5.5 cm). Este radar incluye una antena de matriz en fase activa orientada hacia la derecha, que permite un barrido rápido tanto en elevación como en azimut, proporcionando así una cobertura eficiente y detallada en sus observaciones.

Adicionalmente, el radar del Sentinel-1, es capaz de operar en polarización Dual, proporcionando combinaciones HH+HV y VV+VH. Esta funcionalidad se logra mediante una cadena de transmisión conmutable a H o V y dos cadenas de recepción paralelas para polarización H y V (Tabla 2.6) (ESA, 2018c).

Tabla 2.6: Características del instrumento C-SAR de Sentinel-1 (ESA, 2012).

Parámetro	Valor
Frecuencia central	5,405 GHz ($\lambda \sim 5.5465763$ cm)
Ancho de banda	0-100 MHz (programable)
Polarización	HH+HV, VV+VH, VV, HH
Rango de ángulo de incidencia	20°- 46°
Dirección de observación	Derecha
Tipo de antena	Radiadores de guía de ondas ranuradas
Tamaño de la antena	12.3 m x 0.821 m
Masa de la antena	880 kg
Ancho del haz en azimut	0.23°
Alcance del haz en azimut	-0.9° a +0.9°
Ancho del haz en elevación	3.43°
Alcance del haz en elevación	-13.0° a +12.3°
Potencia pico de RF	4.368 kW, 4.075 kW
Ancho de pulso	5-100 μ s (programable)
Ciclo de transmisión	Max 12 %, SM 8.5 %, IW 9 %, EW 5 %, WV 0.8 %
Ruido del receptor en la entrada del módulo	3 dB
Ancho de banda máximo	100 MHz
Masa total del instrumento (incluyendo antena)	945 kg

Con base en lo expuesto en ESA (2018c), la constelación Sentinel-1 proporciona una capacidad operativa en cuatro modos distintos (Figura 2.17). El modo *Strip Map* (SM), proporciona cobertura con una alta resolución espacial (5 × 5 m) sobre una franja estrecha de 80 km. En este producto se puede elegir una de las seis fran-

jas superpuestas, ajustando el ángulo de incidencia del haz y el ancho del haz en elevación. Principalmente se utiliza para mapear pequeñas islas y ocasionalmente para respaldar acciones de gestión de emergencias.

El modo *Interferometric Wide Swath* (IW), es la principal modalidad de adquisición sobre tierra, permitiendo la combinación de un amplio ancho de franja (250 km) con una resolución espacial moderada (5 x 20 m). Este modo captura imágenes en tres subfranjas utilizando la técnica de Observación del Terreno con Escaneo Progresivo SAR (TOPSAR).⁶ Mediante la técnica TOPSAR, además de dirigir el haz en rango como en ScanSAR, se realiza un escaneo electrónico de atrás hacia adelante en la dirección del azimut para cada ráfaga, evitando el efecto de escalonamiento y garantizando una calidad de imagen uniforme en toda la franja (De Zan y Monti Guarnieri, 2006). No obstante, la resolución en la dirección del azimut disminuye en comparación con el modo SM, ya que el tiempo de iluminación del objetivo durante cada ráfaga es menor.

En un escenario similar, el modo *Extra Wide Swath* (EW), utiliza la técnica TOPSAR, cubriendo una franja ultra ancha de poco más de 400 km compuesta por cinco subfranjas. La resolución espacial es media (20 x 40 m), donde los productos contienen una imagen por subfranja y una por canal de polarización, sumando un total de cinco imágenes (polarización única) o diez imágenes (polarización dual). Estos productos están destinados principalmente para el monitoreo de hielo, derrames de petróleo y servicios de seguridad.

Por otro lado, el modo *Wave* (WM), en combinación con modelos globales oceánicos, puede ayudar a determinar la dirección y la altura de las olas en los océanos. Los productos consisten en pequeñas imágenes de franja (20 x 20 km) alternando los ángulos de incidencia entre los rango cercano y lejano (aproximadamente 23° y 36° respectivamente). La resolución espacial de WM es de 5 x 5 m, con adquisiciones a cada 100 km a lo largo de la órbita, y áreas con el mismo ángulo de incidencia con una separación de 200 km. La Tabla 2.7, resume las características principales de cada modo de operación de Sentinel-1.

⁶El modo TOPSAR sustituye al ScanSAR convencional, ofreciendo la misma cobertura y resolución, pero con una SNR y una DTAR casi uniformes.

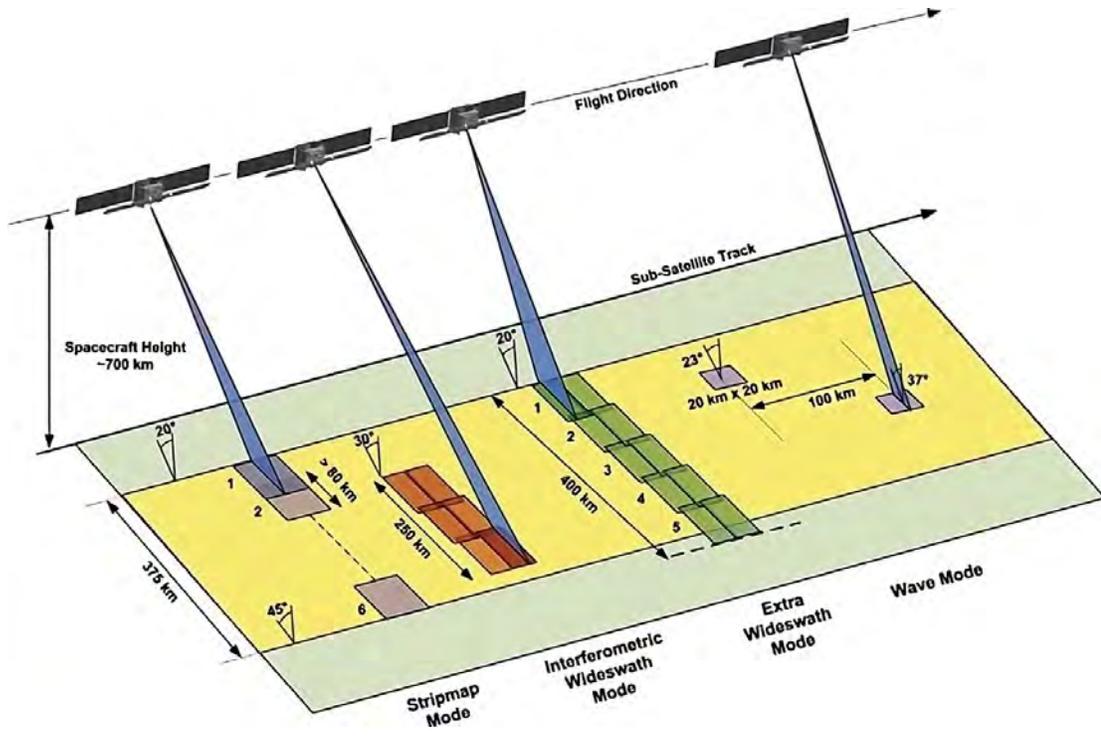


Figura 2.17: Modos de operación de Sentinel-1 (ESA, 2012).

Tabla 2.7: Características principales de los modos de operación de Sentinel-1 (ESA, 2012).

Parámetro	IW	WM	SM	EW
Polarización	Dual (HH+HV, VV+VH)	Única (HH, VV)	Dual (HH+HV, VV+VH)	Dual (HH+HV, VV+VH)
Ángulo de incidencia	31° – 46°	23° + 37°	20° – 47°	20° – 47°
Resolución en azimut	20 m	5 m	5 m	40 m
Resolución en rango	5 m	5 m	5 m	20 m
Miradas en azimut y rango	Única	Única	Única	Única
Franja	250 km	20×20 km	80 km	410 km

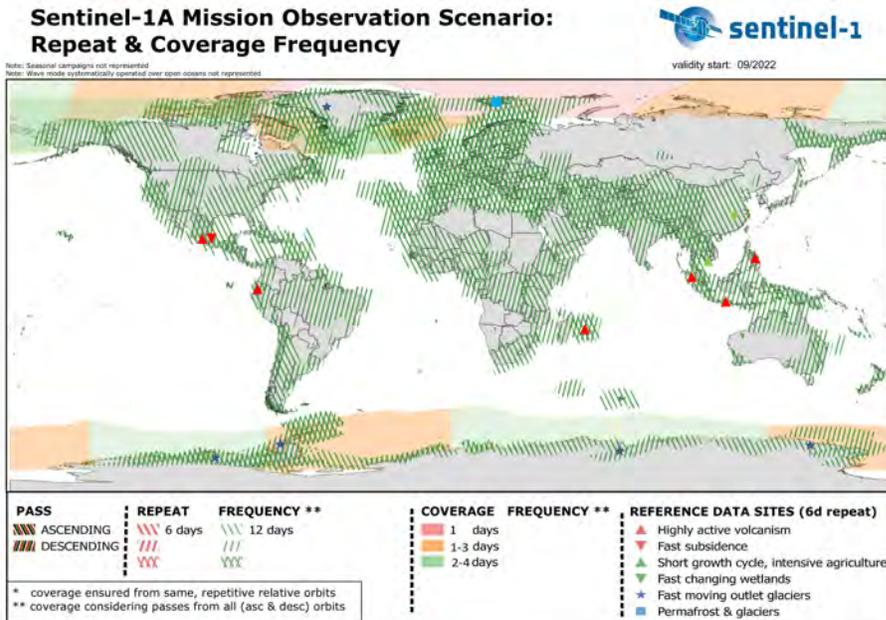
De acuerdo con ESA (2018c), la misión Sentinel-1 implementa un plan de observación predefinido para optimizar el ciclo de trabajo del instrumento C-SAR, asegurando observaciones para dos categorías principales: monitoreo en océanos y en tierra. En el caso de los océanos, se suelen necesitar datos en tiempo real, generalmente disponibles en menos de tres horas. Por otro lado, los servicios sobre tierra abarcan una amplia gama de dominios temáticos y generalmente no requieren datos en tiempo real. Los datos se registran a bordo y se descargan a la red principal de estaciones terrestres, estando disponibles en 24 horas.

Con respecto a la cobertura geográfica de los modos operacionales, WM opera continuamente sobre los océanos, aunque tiene una prioridad menor en comparación con los modos de alta velocidad. Los modos IW y EW, se utilizan en áreas geográficas predefinidas; el modo IW se aplica sobre tierra y áreas costeras, mientras que IW o EW se emplean en mares y polos. En casos excepcionales, las solicitudes de observación de emergencia pueden alterar el plan predefinido, lo que podría requerir el uso del modo SM.

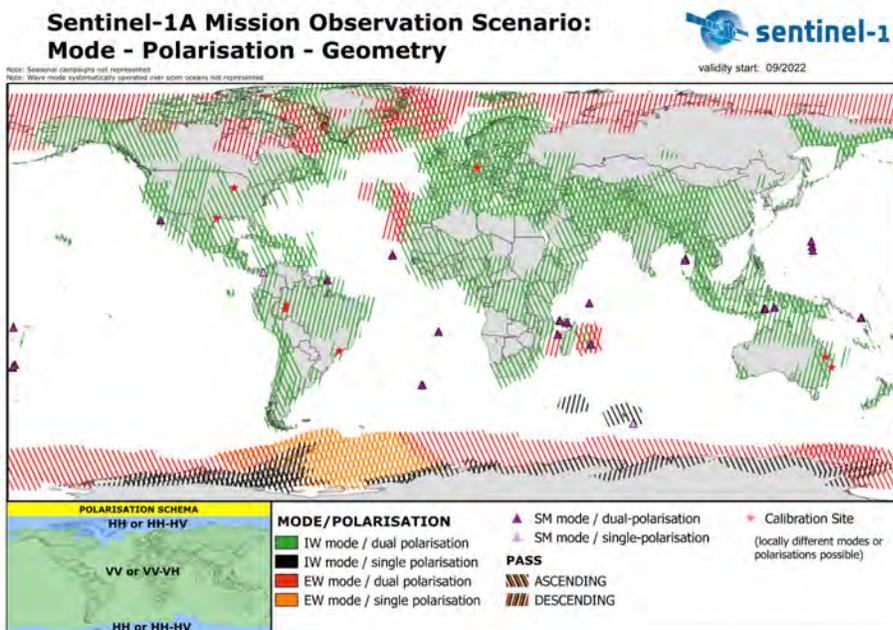
Por otro lado, la polarización en tierra se emplea de forma consistente para asegurar series temporales de datos bajo condiciones uniformes y facilitar la interferometría SAR. La elección de la polarización se determina según la aplicación principal. Se utiliza la polarización HH-HV o HH para el monitoreo de entornos polares y áreas de hielo marino, mientras que la polarización VV-VH o VV se aplica para las demás áreas de observación, que incluyen zonas terrestres generales, así como regiones urbanas.

Es importante señalar que el satélite Sentinel-1B dejó de estar operativo y fue declarado fuera de servicio en julio de 2022 debido a una serie de eventos que afectaron su capacidad. Además, el Sentinel 1A ha superado su vida útil de diseño de siete años. Por ello, la ESA planea lanzar un nuevo satélite, el Sentinel 1C, para asegurar la continuidad de las observaciones (ESA, 2022).

Los mapas mostrados en la Figura 2.18 proporcionan una visión general de la observación actual llevada a cabo por el satélite Sentinel 1A. Asimismo, la Figura 2.19 ilustra el esquema de observación basado en una constelación de dos satélites.

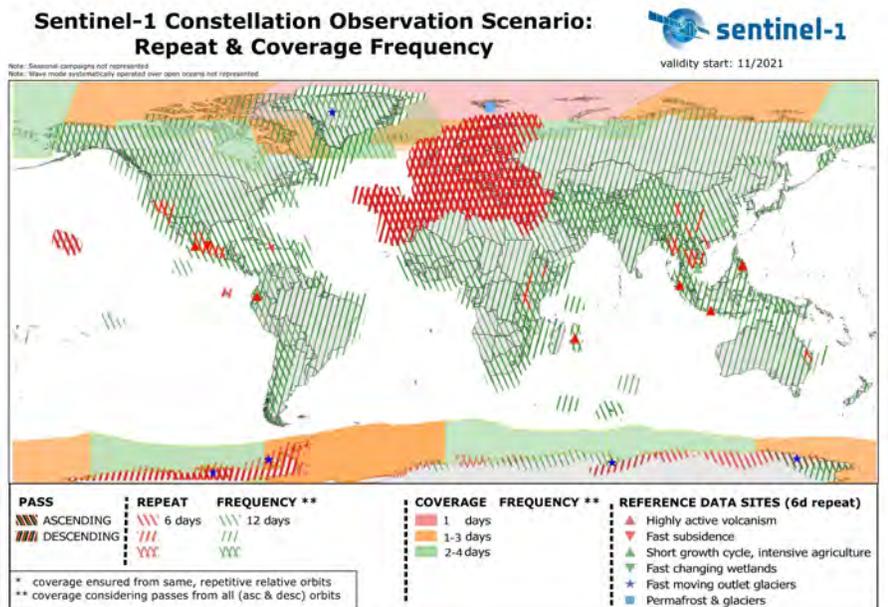


(a)

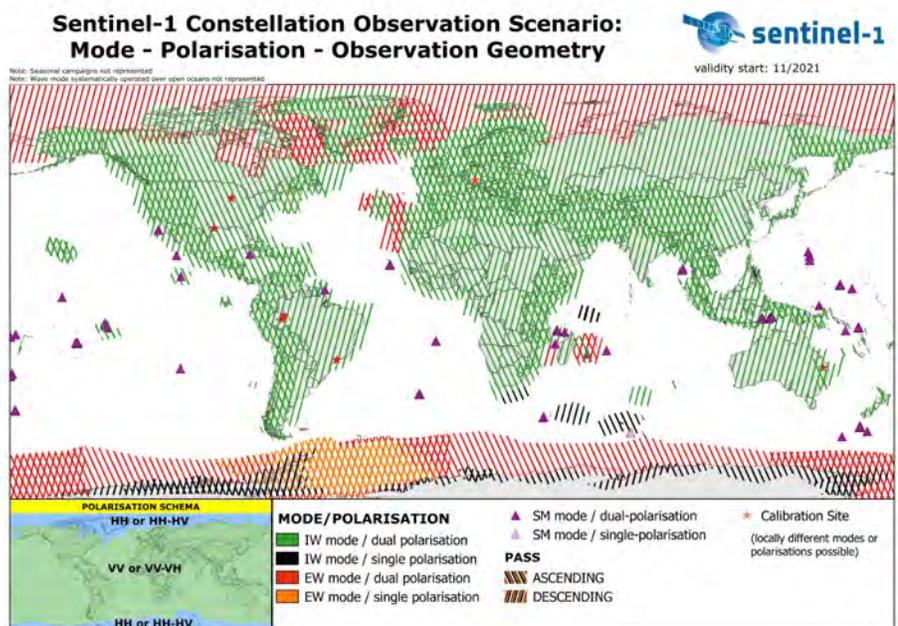


(b)

Figura 2.18: Escenario de observación Sentinel-1A. a) Frecuencia de cobertura - Periodo de revisita. b) Modo de operación - Polarización - Geometría de observación.



(a)



(b)

Figura 2.19: Escenario de observación constelación Sentinel-1. a) Frecuencia de cobertura - Periodo de revisita. b) Modo de operación - Polarización - Geometría de observación.

2.7. Geoestadística

El análisis estadístico de datos cuantitativos ha estado tradicionalmente orientado hacia medidas descriptivas como la tendencia central, la posición y la dispersión, así como en análisis de correlación y regresión. En el ámbito de las Ciencias de la Tierra, estos métodos no incluyen una referencia espacial que permita correlacionar las mediciones con su ubicación geográfica. Por esta razón, a partir de la segunda mitad del siglo XX, surge la *Geoestadística*, una metodología innovadora y robusta para el análisis de variables con distribución espacial (González, Guerra y Gómez, 2007; Matheron, 1962).

Conforme a lo indicado en Gómez (2005), y desde una óptica histórica, la geoestadística se estableció como una solución para rectificar las estimaciones sesgadas de reservas de mineral en las minas de oro de Sudáfrica. En la década de 1950, Daniel Krige identificó inexactitudes en las estimaciones obtenidas por el promedio simple de los datos de muestra (Krige, 1951). Para solucionar este problema, Krige desarrolló una técnica que incorporaba la correlación espacial de los datos, corrigiendo el sesgo causado por la concentración de muestras en zonas de alto contenido de mineral. Posteriormente, Georges Matheron, aclamado como el padre de la geoestadística, formalizó y extendió esta técnica bajo un enfoque matemático (Matheron, 1962). En tal sentido, el problema que ambos analizaron se presenta al estudiar fenómenos con variabilidad espacial, caracterizados por un componente errático superpuesto a una tendencia determinista. Este problema no se limita solo a la minería, sino que también se encuentra en otros campos donde las variables dependen de la ubicación.

La geoestadística se define como una rama de la estadística aplicada que se especializa en el análisis, modelación y predicción de la variabilidad espacial de fenómenos en Ciencias de la Tierra. Para Matheron (1962), es la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de fenómenos naturales.

En contraposición con la estadística clásica o convencional, la geoestadística no trata a los valores de forma independiente; por el contrario, se supone de manera implícita que están correlacionados unos con otros, es decir, que existe una dependencia espacial. Intuitivamente, esto indica que, mientras más cercanos

estén situados dos puntos, más correlacionados están, y mientras más separados, hay menos relación entre ellos. Por lo tanto, el objetivo principal de la metodología geoestadística consiste en estimar valores desconocidos a partir de los conocidos, buscando minimizar la variable del error de estimación. En términos generales, el proceso incluye un análisis exploratorio de los datos, un estudio estructural o de correlación espacial, y la generación de predicciones mediante estimación o simulación. Sin embargo, antes de adentrarse en estos pasos, es fundamental comprender el formalismo de los fenómenos regionalizados.

La geoestadística considera que los valores de la variable de interés en diferentes puntos de un determinado espacio constituyen una familia o campo de variables aleatorias $V(X)$. Según Juárez (2015), estas variables, distribuidas dentro de un espacio R , se denominan variables aleatorias regionalizadas. El fenómeno que estas variables describen se conoce como regionalización, función aleatoria espacial o campo aleatorio (Figura 2.20).

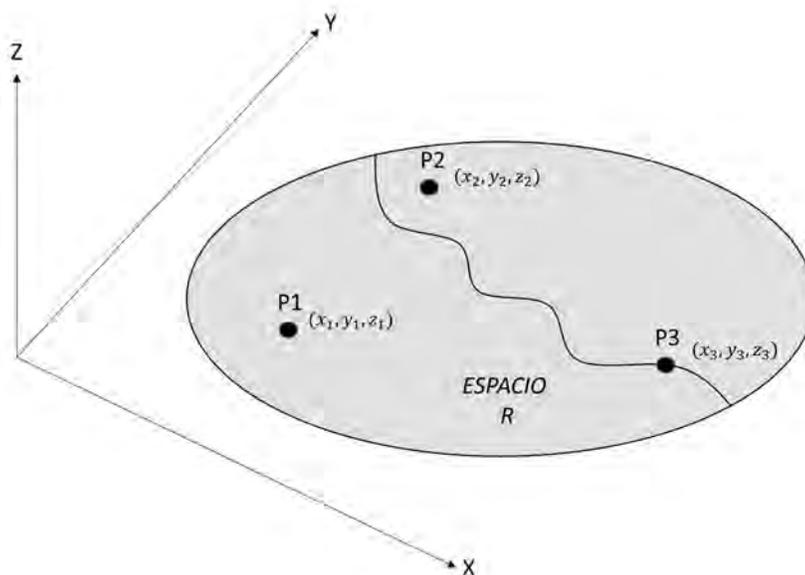


Figura 2.20: Representación esquemática de un campo aleatorio. Como se puede observar, el valor experimental de la variable de interés suele conocerse únicamente en algunos puntos específicos del dominio. Además, los valores se representan en un sistema de coordenadas, con el fin de establecer una posición a los valores que toma esta variable dentro del espacio y lograr la interpretación de su distribución espacial.

Por otro lado, Ovalles (1992) sostiene que una variable regionalizada debe entenderse como una función que describe un fenómeno natural distribuido geográficamente. En otras palabras, se trata de una función $f(x)$ que toma valores en todos los puntos (x, y, z) en el espacio. Sin embargo, dado que estas funciones frecuentemente presentan variaciones irregulares, es fundamental realizar un análisis de la variabilidad de la información disponible para comprender adecuadamente el fenómeno estudiado.

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, la geoestadística se fundamenta en la aplicación de la teoría de las variables regionalizadas para la estimación de procesos o fenómenos dentro de un espacio o dominio (Matheron, 1962).

2.7.1. Análisis Exploratorio

En la etapa inicial del análisis geoestadístico, conocida como análisis exploratorio, se utilizan métodos de estadística descriptiva para obtener información preliminar sobre la muestra. Esta fase se centra en evaluar la cantidad, calidad y distribución de los datos, así como en identificar valores atípicos que pueden distorsionar correlaciones entre variables. Se recopilan datos mediante mediciones repetidas y se analizan a través de parámetros estadísticos, que se dividen en medidas de tendencia central, que reflejan el promedio, y medidas de dispersión, que indican cómo se distribuyen los datos en torno a ese valor central.

Medidas de tendencia central

La *media* \bar{x} , comúnmente conocida como promedio, es la medida de tendencia central más utilizada. Se obtiene sumando todos los valores del conjunto de datos y dividiendo esa suma por el número total de observaciones, lo que permite representar el valor promedio o central de la distribución. Dado un conjunto de n números $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, se define como:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (2.29)$$

La *mediana* (\tilde{x}) de un conjunto de números ordenados por magnitud se define como el valor central si el número de observaciones es impar, o el promedio de los dos valores centrales si es par. De este modo, la mediana se calcula para un conjunto de datos x , compuesto por n elementos, organizados en orden ascendente:

$$\tilde{x} = \begin{cases} x_{(\frac{n+1}{2})}, & \text{si } n \text{ es impar} \\ \frac{x_{(\frac{n}{2})} + x_{(\frac{n}{2}+1)}}{2}, & \text{si } n \text{ es par} \end{cases} \quad (2.30)$$

La *moda* (\hat{x}) de un conjunto de valores es aquel que aparece con mayor frecuencia en el conjunto, es decir, el valor más recurrente. No obstante, la moda puede no existir si todos los valores ocurren con la misma frecuencia, o no ser única si más de un valor presenta la misma frecuencia máxima:

$$\hat{x} = \text{Valor(es) más frecuente(s)} \quad (2.31)$$

Medidas de variación o dispersión

El *rango* es definido como la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de un conjunto de datos. Si bien es una medida sencilla de dispersión, su sensibilidad a los valores atípicos puede limitar su eficacia en algunos análisis:

$$\text{Rango} = x_{max} - x_{min} \quad (2.32)$$

La *varianza* (s^2) mide la variabilidad de un conjunto de datos en relación con su media, al calcular el promedio de los cuadrados de las diferencias entre cada valor y dicha media. Para un conjunto de datos experimentales, se define como:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.33)$$

La *desviación estándar* (s) se define como la raíz cuadrada de la varianza, y proporciona una medida de dispersión expresada en las mismas unidades que los datos originales. Esta medida resulta útil para interpretar la variabilidad de los datos en términos más accesibles. Para un conjunto de datos experimentales, se establece como:

$$s = \sqrt{s^2} \quad (2.34)$$

El *coeficiente de variación* (CV) se define como la relación entre la desviación estándar y la media, expresada comúnmente como un porcentaje. Esta métrica es útil para comparar la variabilidad entre distintos conjuntos de datos con diferentes unidades o magnitudes, permitiendo una evaluación más objetiva de la dispersión relativa:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \% \quad (2.35)$$

Análisis gráfico de variabilidad

Las propiedades de un conjunto de datos pueden examinarse a través de representaciones gráficas estadísticas, entre las más habituales se incluyen el histograma, el polígono de frecuencias y la distribución de frecuencias relativas:

- El histograma es un gráfico que muestra la distribución de un conjunto de datos dividiéndolos en clases, representadas por barras cuya altura indica la frecuencia de cada clase. Facilita la visualización de patrones como la simetría, asimetría o agrupamientos.
- El polígono de frecuencias es una extensión del histograma, donde los puntos medios de las alturas de las barras se conectan con líneas rectas. Este gráfico facilita la visualización de la forma general de la distribución y resalta tendencias y patrones menos evidentes en el histograma.
- La distribución de frecuencia relativa muestra la proporción de datos en cada clase en lugar de frecuencias absolutas, estandarizando los datos para facilitar la comparación entre muestras de distintos tamaños.

Tendencia o deriva

Cuando la esperanza matemática de una variable varía de manera no constante en función de las coordenadas x, y, z , se considera que el campo aleatorio exhibe una tendencia o deriva. Del mismo modo, las varianzas y otros momentos, así como las funciones de distribución de probabilidad, pueden mostrar variaciones espaciales. Según Juárez (2015), si la deriva es insignificante, es posible asumir que el campo es estacionario, al menos en sentido amplio, considerándolo estadísticamente homogéneo. Si la deriva es significativa, se recomienda separar la parte determinista de la parte aleatoria y trabajar con los residuos, eliminando así la tendencia del campo experimental. El cálculo de la tendencia generalmente se realiza

ajustando un modelo lineal (hiperplano en los casos de 2D y 3D). Este modelo puede expresarse como:

$$V(x) = ax \quad (2.36)$$

$$V(x, y) = ax + by + c \quad (2.37)$$

$$V(x, y, z) = ax + by + cz + d \quad (2.38)$$

Donde a, b, c, d son los coeficientes de regresión. La evaluación de la tendencia se fundamenta en estos coeficientes, lo que permite construir una gráfica de regresión (recta o plano) representando la dirección general del cambio. Para conjuntos de datos distribuidos en un espacio bidimensional (2D) (Figura 2.21), es posible determinar la estacionariedad del campo mediante la aplicación de los siguientes criterios:

1. Un plano de regresión con pendiente cercana a cero sugiere la ausencia de tendencia en el campo, por lo que puede considerarse estacionario.
2. Un plano de regresión con pendiente marcada indica la presencia de una tendencia en el campo, lo que lo clasifica como no estacionario.

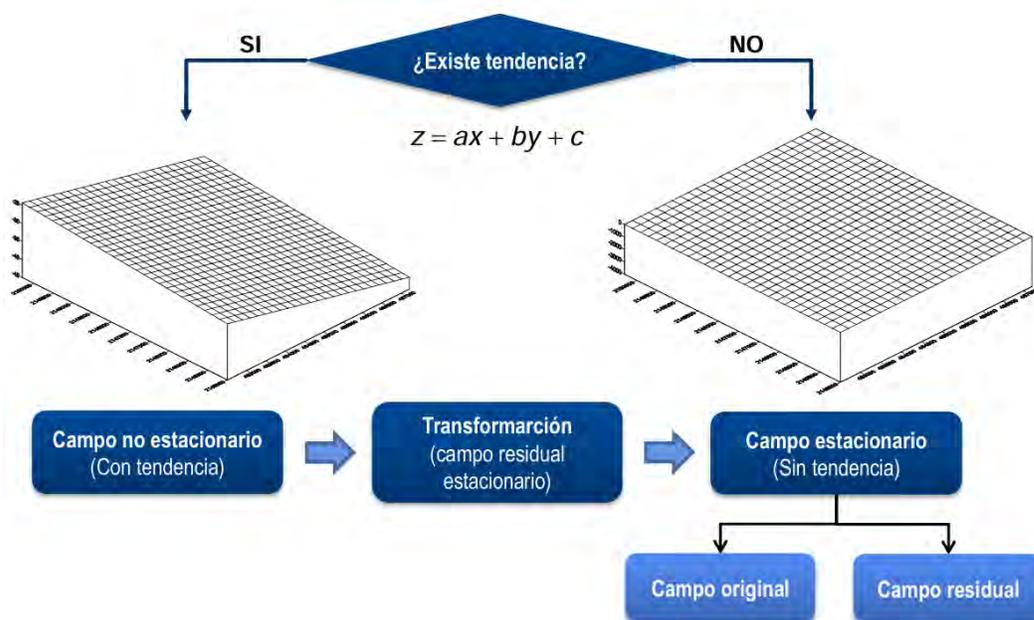


Figura 2.21: Esquema representativo de la evaluación de la estacionariedad (Juárez, 2015).

2.7.2. Análisis Estructural

El análisis estructural es fundamental en geoestadística, ya que se dedica a describir la estructura espacial de una propiedad o fenómeno regionalizado. Este proceso permite desarrollar un modelo geoestadístico que captura el comportamiento de la función aleatoria bajo estudio. En pocas palabras, podemos decir que el análisis estructural consiste en estimar y modelar una función que refleje la correlación espacial de la variable regionalizada a partir de la adopción razonada de la hipótesis más adecuada acerca de su variabilidad. Esto quiere decir, que en dependencia de las características de estacionaridad del fenómeno se modelará la función de covarianzas o la de semivarianzas (Díaz, 2002).

Dada su importancia y aplicabilidad general, en este trabajo nos centraremos en el proceso de estimación y modelación del semivariograma, que representa gráficamente la semivarianza en función de la distancia entre puntos.

Variograma

El variograma, o semivariograma, es una herramienta en geoestadística que cuantifica la variación entre los valores de una variable aleatoria según la distancia entre puntos en una región. A partir de él se obtiene un variograma experimental, que muestra cómo varía la influencia de un punto sobre otro a diferentes distancias y determina la distancia máxima de esta influencia. No obstante, el variograma experimental no se puede utilizar directamente en métodos de interpolación, por lo que es necesario ajustar un modelo matemático, denominado variograma teórico, que lo represente con precisión.

Con base en lo expuesto por Hilal y col. (2024), el semivariograma experimental $\gamma(h)$ cuantifica la diferencia promedio entre puntos de datos separados por un vector h , calculándose como la mitad de la diferencia cuadrática media entre los componentes de cada par de datos. Aunque existen varios estimadores, la forma más común para la estimación del semivariograma se expresa de la siguiente manera:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \sum_{N(h)}^{i=1} [(Z(x_i) - Z(x_i + h))]^2 \quad (2.39)$$

Donde, $\gamma(h)$ representa la semivarianza experimental, h es la distancia entre puntos, y Z es la variable bajo estudio. $N(h)$ es el número de pares de puntos de datos separadas por la distancia h . Los valores $Z(x_i)$ y $Z(x_i + h)$ son las mediciones de Z en diferentes ubicaciones x_i y $x_i + h$ respectivamente.

El semivariograma se obtiene al graficar la semivarianza contra la distancia de separación entre puntos de datos (Figura 2.22). Los elementos que caracterizan sus estructuras son el efecto pepita, la meseta y el alcance.

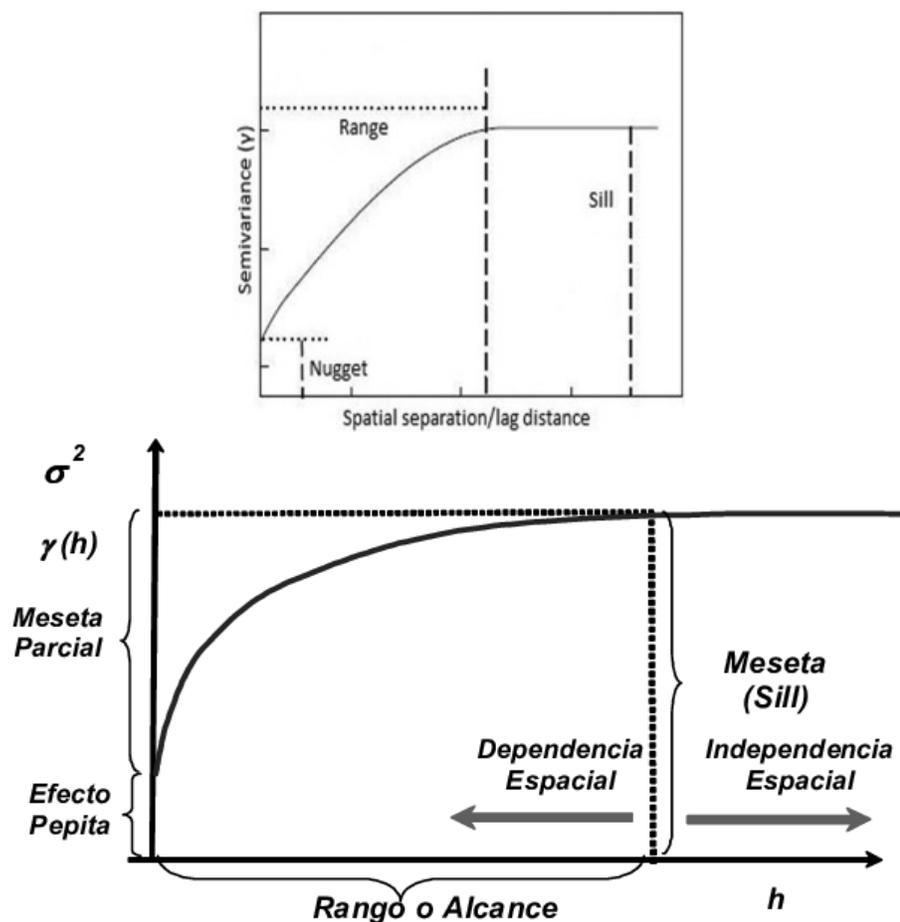


Figura 2.22: Principales elementos del variograma (Mejía, Betancur y Londoño, 2007).

El efecto pepita (*nugget*) indica la semivarianza en distancias muy cortas, generalmente debido a discontinuidades en la función aleatoria o a variaciones que no pueden ser explicadas por el variograma a la escala de muestreo. Este efecto

proviene de errores de medición y de variaciones en distancias menores que el intervalo de muestreo. La meseta (*sill*) es el nivel de semivarianza en el que el semivariograma se estabiliza, reflejando la máxima variabilidad espacial que el modelo puede explicar. El alcance (*range*) se refiere a la distancia a la que se alcanza la meseta, más allá de la cual los puntos de datos se consideran no correlacionados espacialmente.

Como se mencionó anteriormente, los puntos experimentales que conforman el semivariograma deben ajustarse a un modelo teórico. Las funciones matemáticas empleadas para describir el comportamiento del semivariograma deben cumplir con una serie de supuestos (Deutsch y Journel, 1997). Estos modelos reflejan cómo varía la semivarianza con la distancia, y su elección depende de la forma del semivariograma experimental y del comportamiento espacial de la variable en estudio:

1. Modelo esférico: definido por un alcance real a y una contribución positiva a la varianza, conocida como el valor de meseta c :

$$\gamma(h) = c \cdot Sph\left(\frac{h}{a}\right) = \begin{cases} c \cdot \left[1,5\frac{h}{a} - 0,5\left(\frac{h}{a}\right)^3\right] & \text{si } h \leq a \\ c, & \text{si } h \geq a \end{cases} \quad (2.40)$$

2. Modelo exponencial: definido por un alcance efectivo a (rango efectivo $a/3$) y una contribución positiva a la varianza c :⁷

$$\gamma(h) = c \cdot Exp\left(\frac{h}{a}\right) = c \cdot \left[1 - exp\left(-\frac{3h}{a}\right)\right] \quad (2.41)$$

3. Modelo gaussiano: definido por un alcance efectivo a y un valor positivo de contribución a la varianza c :

$$\gamma(h) = c \cdot \left[1 - exp\left(-\frac{(3h)^2}{a^2}\right)\right] \quad (2.42)$$

⁷En los modelos de variogramas que alcanzan su meseta c de forma gradual, el alcance efectivo se define como la distancia en la que el semivariograma $\gamma(a) = 0,95\% \cdot c$.

4. Modelo de potencia: definido por un exponente $0 < w < 2$ y una pendiente positiva c , donde la distancia h puede ser anisotrópica en 2D o 3D:

$$\gamma(h) = c \cdot h^w \quad (2.43)$$

La función matemática ajustada a los datos experimentales del semivariograma se utiliza para estimar la variabilidad a diferentes distancias (Figura 2.23). Al calcular el semivariograma en diversas direcciones, se revelan características del comportamiento espacial, como la isotropía y la anisotropía. Esta herramienta es fundamental para describir cuantitativamente la variación espacial de una propiedad y para realizar predicciones en áreas no muestreadas (González, Guerra y Gómez, 2007).

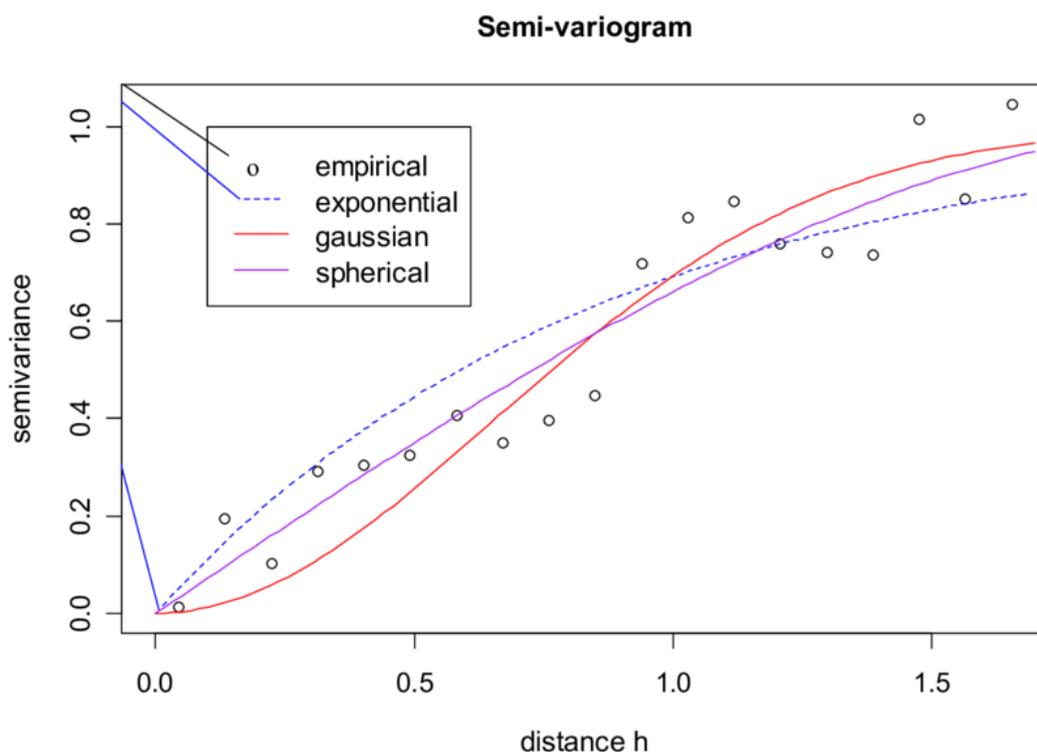


Figura 2.23: Modelos básicos del variograma que muestran diferentes componentes (Hilal y col., 2024). El modelo ajustado debe capturar la variabilidad espacial observada en los datos de manera realista, lo cual es fundamental para realizar predicciones precisas en la interpolación.

2.7.3. Predicciones

En geoestadística, el proceso de predicción consiste en estimar valores en ubicaciones no muestreadas a partir de los datos de los puntos de muestreo y la estructura de correlación espacial establecida. Con el conjunto de datos disponible, es posible emplear diversas técnicas para llevar a cabo estas predicciones, como se detalla en la Tabla 2.8. Mientras que la estimación se enfoca en obtener el valor esperado de una variable en puntos no muestreados, la simulación busca generar posibles valores de dicha variable en esas ubicaciones. En este trabajo, se ha implementado exclusivamente la técnica de Kriging Ordinario.

Tabla 2.8: Técnicas de predicción (Juárez, 2015).

Estimación	Simulación
Probabilidad Condicional	Matricial (LU)
Kriging Simple	Espectral
Kriging Ordinario	Bandas Rotantes
Kriging Universal	Secuencia Gaussiano
Kriging Indicador	Secuencia Indicador
Co-Kriging	Gaussiano Truncado
Validación Cruz	Recocido Simulado

El *Kriging* consiste en obtener el mejor estimador lineal insesgado y de mínima varianza (Best Linear Unbiased Estimation, BLUE). Según Juárez (2015), se considera el mejor porque los factores de ponderación se calculan de tal manera que la varianza de la estimación sea mínima; es lineal porque representa una combinación ponderada de los datos; e insesgado, ya que el error de estimación tendrá una media igual o cercana a cero.

Kriging Simple (KS)

El kriging simple supone que la media de la variable de interés es conocida y constante a lo largo del dominio. A diferencia de otras variantes, esta media conocida (μ) se utiliza directamente en el proceso de estimación. La predicción en un punto se basa en las desviaciones de los valores observados con respecto a esta media, ponderadas por coeficientes calculados a partir de la estructura de correlación espacial (covarianza o semivariograma). La relación matemática que

describe esta estimación se expresa en la siguiente ecuación:

$$Z^*(x_0) = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i (Z(x_i) - \mu) \quad (2.44)$$

Donde, $Z^*(x_0)$ es el valor estimado, μ es la media conocida y constante, λ_i son los pesos asignados a cada valor observado, $Z(x_i)$ son los valores observados y n es el número puntos de muestreo utilizados para la estimación.

Kriging Ordinario (KO)

El kriging ordinario considera que no se conoce la media (μ) del campo aleatorio. Esto permite generalizar el kriging a situaciones donde esta media no es constante en el espacio; puede variar de una región a otra, siempre que sea aproximadamente constante en cada vecindad de estimación. La ecuación correspondiente se expresa como:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2.45)$$

En la ecuación 2.45, se utilizan las mismas variables definidas en el kriging simple, a excepción de la media (μ), que no se emplea de forma explícita. En este sentido, el kriging simple es más sencillo y se utiliza cuando se tiene confianza en el valor medio. Por otro lado, el kriging ordinario es más flexible y se aplica cuando no se cuenta con información confiable sobre la media, lo que permite que el modelo se adapte mejor a la variabilidad local en los datos.

Capítulo 3

Materiales y Métodos

La metodología del presente trabajo de investigación se estructura en cuatro etapas fundamentales, las cuales se ilustran en la Figura 3.1. El esquema muestra que la primera etapa (cuadro superior) implica la identificación del área de estudio, comenzando con un análisis exhaustivo del estado del arte, revisando trabajos que tratan sobre la subsidencia en el Valle de México y destacando las zonas vulnerables a este fenómeno. La segunda etapa (polígono azul) parte de la selección de la plataforma satelital óptima para el estudio. Este proceso incluyó la consideración de diversos elementos importantes, como el tipo de sensor, las resoluciones espacial y temporal de las imágenes, la disponibilidad y el acceso a los datos, así como el tiempo de operación de la plataforma para extenderse a lo largo de un periodo de estudio. La etapa tres (polígono rojo) abarcó tanto el pre-procesamiento como el procesamiento de las imágenes SAR, teniendo como objetivo principal la extracción de información de las señales de radar para analizar las características del terreno. Durante esta fase, se realizaron ajustes en las imágenes para corregir distorsiones y errores, se aplicaron técnicas para mejorar la calidad de los datos, y se generaron interferogramas que permitieron identificar los desplazamientos del terreno. Además, se integraron datos de dos estaciones de monitoreo permanente GNSS, lo que permitió contrastar ambas técnicas. La cuarta y última etapa (cuadro inferior) se estructuró en realizar el análisis de los resultados utilizando metodología geoestadística. Este paso se realizó con la finalidad de modelar la información espacial y predecir su distribución en espacios no muestreados. Se emplearon métodos de análisis de variogramas y de interpolación para identificar patrones espaciales y tendencias en los datos, permitiendo una interpretación más detallada de los desplazamientos verticales en el polígono de estudio.

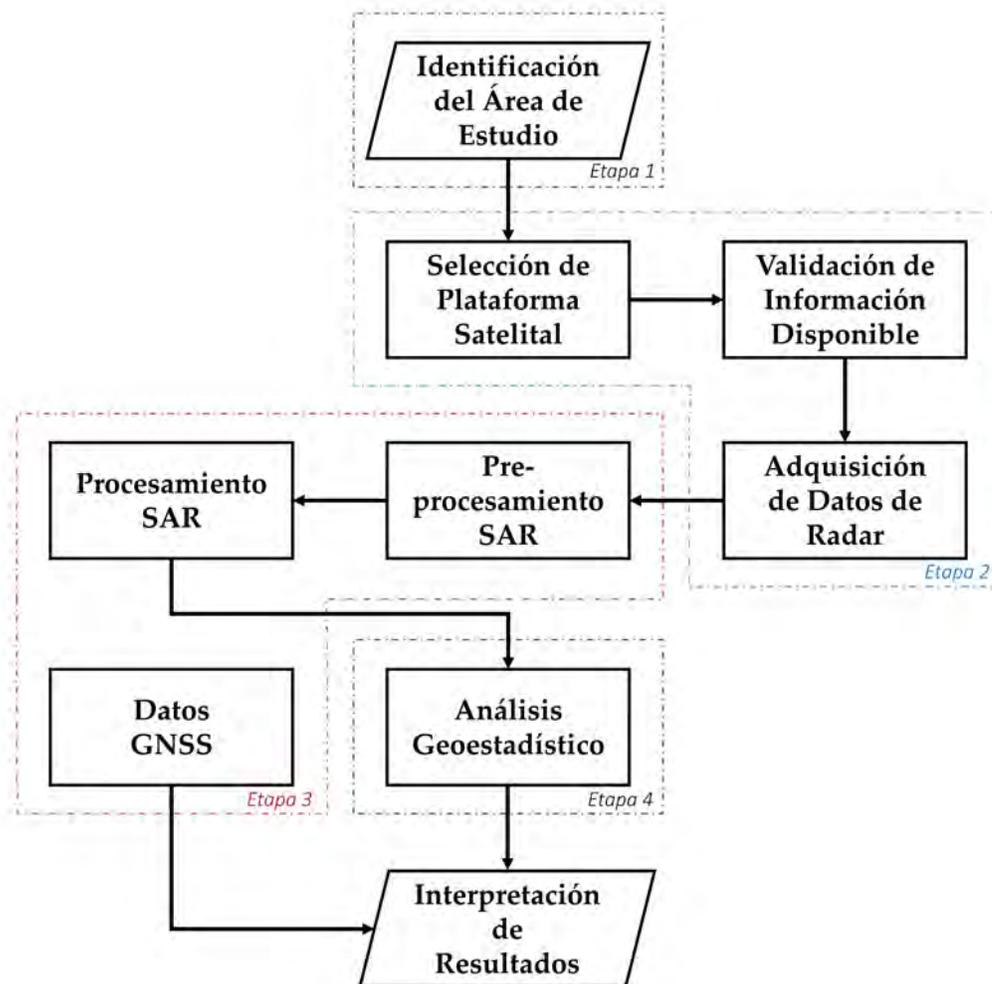


Figura 3.1: Esquema metodológico general empleado en el presente trabajo de investigación.

3.1. Identificación del Área de Estudio

La investigación se orienta hacia el Valle de México, una región localizada en la parte central del país ($19^{\circ}40'N$, $98^{\circ}52'O$) que se integra dentro de la Cuenca de México. Esta cuenca está conformada por cuatro valles; Valle de Cuautitlán (al noroeste), Valle de Apan (al nororiente), Valle de Tizayuca (al norte) y Valle de México (al sur). Este último tiene una elevación media de 2,240 msnm y una extensión territorial de 963 km^2 abarcando municipios de los estados de Hidalgo y México, y las 16 alcaldías de la Ciudad de México, formando así la ZMVM (Harbering y Schlüter, 2020; OECD, 2015; Perló y González, 2009).

El Valle de México forma un polígono irregular rodeado por grandes sierras; Sierra de Guadalupe (al norte), Sierra Nevada (al este), Sierra de Santa Catarina (al sureste), Sierra de Chichinautzin (al sur) y Sierra de las Cruces (al oeste). En el interior de este polígono, la superficie de la zona lacustre corresponde al área de los antiguos lagos de Texcoco, Xochimilco y Chalco, donde algunos cerros emergen; Xico y Tlapacoyan (al sur), Estrella, Marqués y Peñón (el centro), Tepetzingo y Coatepec (al norte) (Juárez, Auvinet y Méndez, 2016; Juárez y col., 2021). La configuración topográfica en el Valle de México, mostrada en la Figura 3.2, identifica las zonas de suelos blandos en gris oscuro y las de suelos firmes en gris claro.

En lo que concierne a la secuencia estratigráfica del subsuelo de la Ciudad de México, el trabajo de Juárez y col. (2021), menciona que esta incluye una costra superficial, arcillas superiores, una capa dura, arcillas inferiores y depósitos profundos. Por otra parte, en cuanto a la geología del área, el estudio de Mooser, Montiel y Zúñiga (1996), presenta un mapa geológico de la zona lacustre del Valle de México (Figura 3.3). Según la explicación detallada por Juárez, Auvinet y Méndez (2016), la parte central de este mapa está integrada por depósitos de arcilla lacustre blanda (Ql), rodeados por depósitos aluviales (Qal) que también se extienden por debajo de los depósitos lacustres.

Las formaciones geológicas que rodean el Valle de México destacan por sus características estructurales. La Sierra de Guadalupe (al norte), está formada principalmente por estratovolcanes andesíticos y dacíticos, coronados por domos ácidos que se formaron durante su actividad final. La Sierra de las Cruces (al oeste), está constituida por una línea de grandes volcanes orientados de NO a SE; la actividad final de estos volcanes fue explosiva, lo que llevó a la formación de extensos abanicos volcánicos compuestos por materiales piroclásticos (T) asociados a esa actividad. La Sierra de Santa Catarina (al este), está formada por una línea de volcanes orientados en dirección EO; estos son volcanes muy jóvenes, por lo que sus productos eruptivos son lavas (Qv) que están intercaladas con depósitos aluviales (Qal) y lacustres (Ql). Finalmente, la Sierra de Chichinautzin (al sur), es un extenso campo volcánico del Cuaternario, formado por muchos cuerpos individuales, cuyos productos volcánicos, principalmente lavas (Qv), constituyen una enorme masa de roca que separa la Cuenca de México del Valle de Cuernavaca (Juárez, Auvinet y Méndez, 2016).

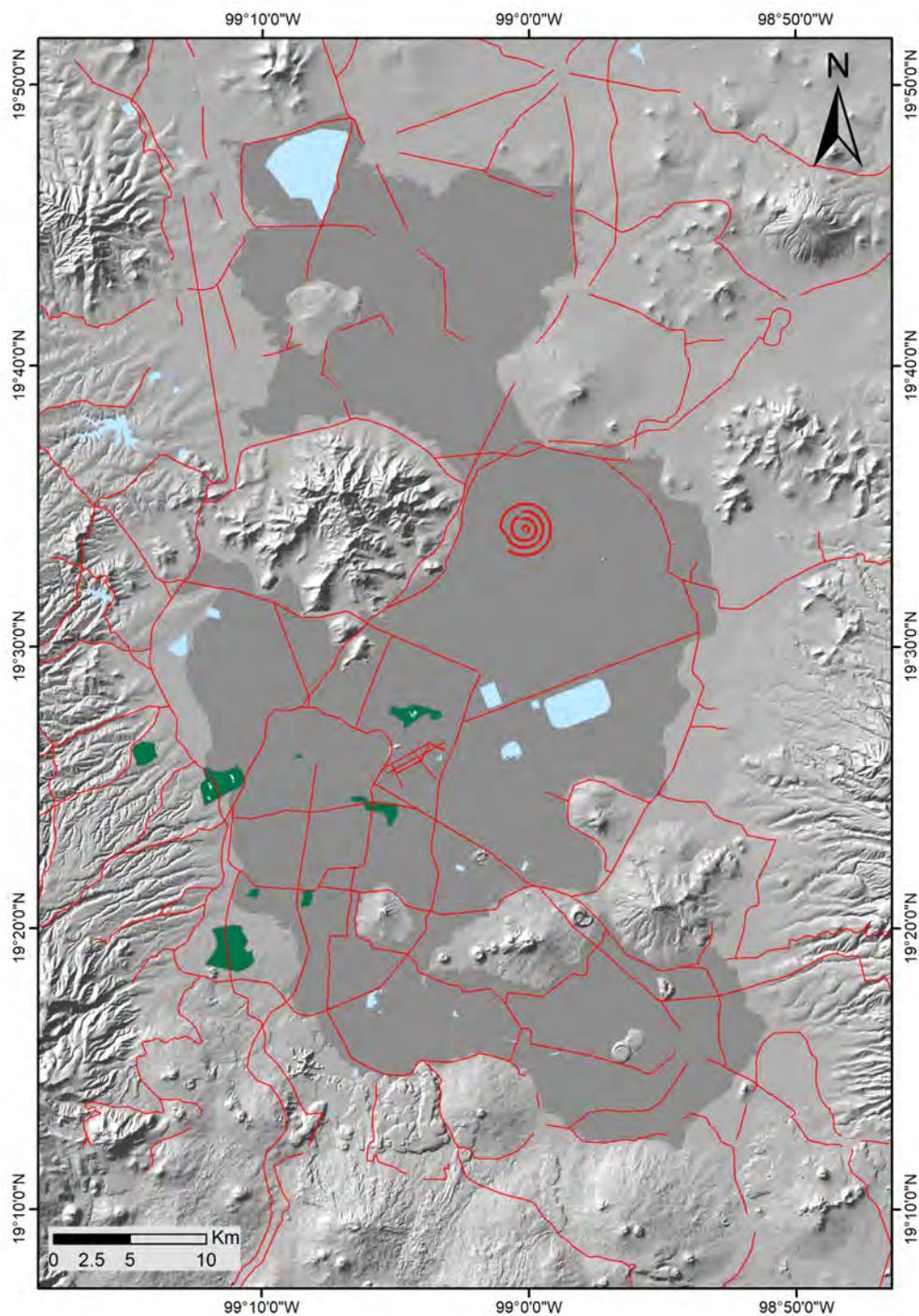


Figura 3.2: Configuración topográfica en el Valle de México, donde el área en gris oscuro representa la zona de suelos blandos y el área en gris claro indica suelos firmes. Mapa cortesía del Laboratorio de Geoinformática del IINGEN, UNAM.

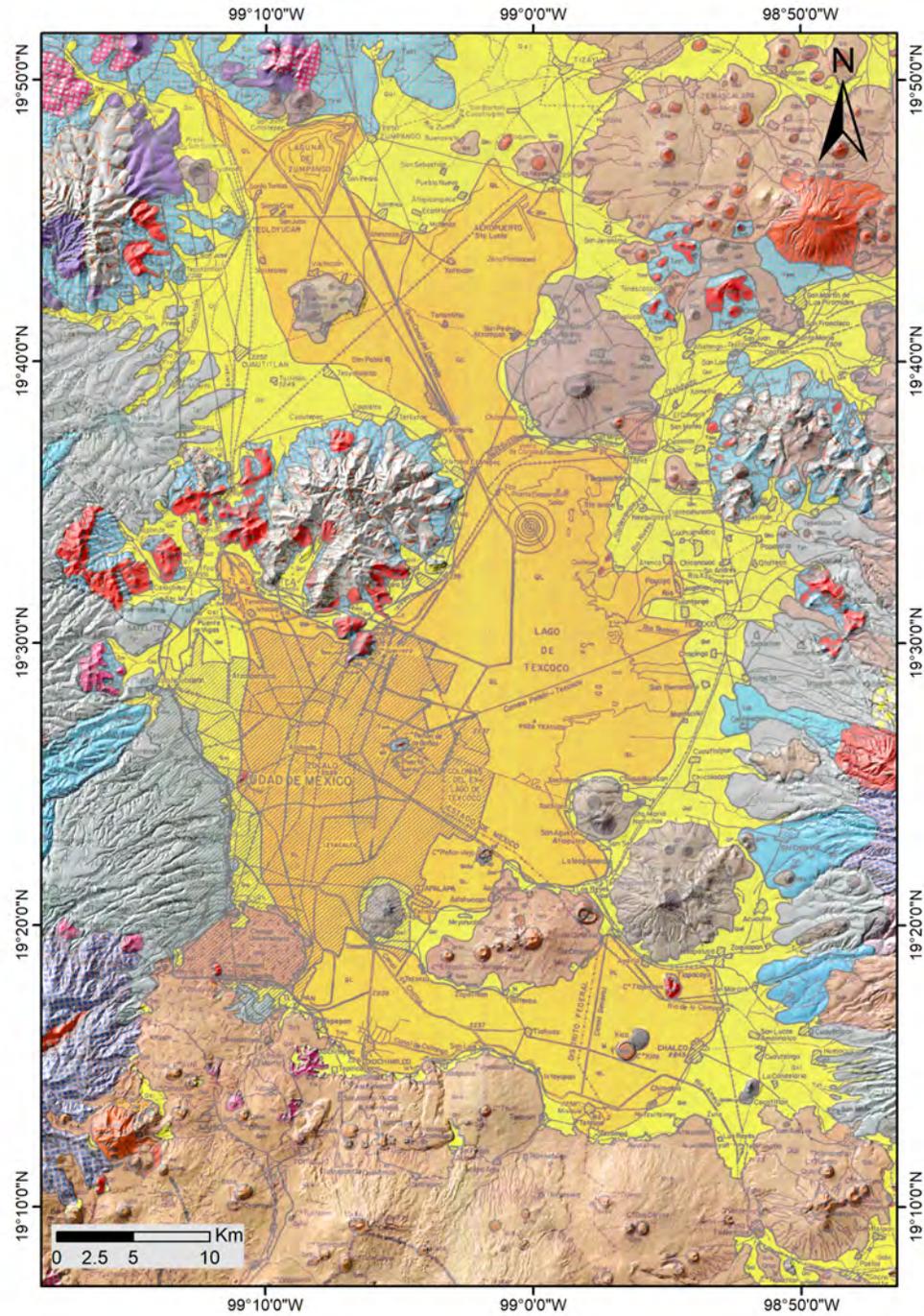


Figura 3.3: Mapa geológico de la zona lacustre del Valle de México (Mooser, Montiel y Zúñiga, 1996). Diversas formaciones sobresalen dentro de la planicie lacustre, entre ellas el Cerro de la Estrella, el Peñón del Marqués, el Pedregal, y la cadena de conos volcánicos de la Sierra de Santa Catarina, junto con los cerros de Xico y Tlapacoya.

Diversos trabajos han abordado la problemática de la subsidencia en el Valle de México, presentando distintos productos que permiten identificar las zonas de mayor celeridad. Según lo señalado por Juárez y col. (2021), el mapa de hundimiento regional de la zona lacustre del Valle de México, propuesto por Pérez (2009), se considera un gran aporte y ha servido de referencia en numerosos estudios. Este mapa se elaboró a partir de datos de BN medidos por el SACMEX abarcando el periodo 2000-2005. No obstante, presenta áreas donde no se dispone de información debido a la falta de incorporar datos recientes.

En el marco del trabajo de Auvinet, Méndez y Juárez (2017a), titulado "*El Subsuelo de la Ciudad de México, III*", el cual complementa a la tercera edición del libro de R.J. Marsal y M. Mazari; se presenta un mapa que describe las velocidades de hundimiento durante el periodo 1999-2008, utilizando información de BN recopilada por diversas dependencias (Figura 3.4). En dicho mapa, se evidencia que en varios sitios, la velocidad de hundimiento se acerca a los 40 cm por año. Además, según el mismo estudio, los lugares con mayor celeridad ya no están ubicados en la antigua traza de la ciudad, sino que ahora se encuentran dispersos en varios sectores del oriente y sur del Valle de México, coincidiendo con zonas donde el subsuelo tiene espesores más pronunciados de arcilla.

El estudio realizado por Juárez y col. (2021), contribuyó al desarrollo de un nuevo mapa que actualiza la cartografía regional de la subsidencia en el Valle de México (Figura 3.5). Este mapa fue elaborado a partir de datos recopilados entre 1983 y 2017, provenientes de una red de BN gestionada por diversas entidades gubernamentales, como SACMEX, el Grupo Aeroportuario de la Ciudad de México (GACM), la Comisión del Agua del Estado de México (CAEM) y el Organismo de Cuenca Agua del Valle de México (OCAVM). Los resultados del estudio revelan que las áreas con menores velocidades de hundimiento se ubican en las cercanías de las elevaciones topográficas que rodean el valle. Un claro ejemplo es la Sierra de las Cruces al oeste, donde las velocidades no superan los 10 cm/año, un patrón que también se observa en los límites de las Sierras de Guadalupe, Santa Catarina y Chichinautzin. Al norte del valle, la subsidencia disminuye debido a una reducción en los espesores del suelo lacustre. En la parte sur, correspondiente al lago de Xochimilco, los valores registrados son de 20 cm/año. Por otro lado, las áreas de los lagos de Texcoco y Chalco exhiben las velocidades más altas, con valores que oscilan entre 25 y 35 cm/año, alcanzando máximos de hasta 40 cm/año. Estos

resultados confirman las tendencias observadas en el mapa propuesto por Auvinet, Méndez y Juárez (2017a). Además, los autores corroboran la existencia de una clara correlación entre las velocidades de hundimiento y los espesores de arcilla, ya que las zonas con mayor espesor de este material tienden a registrar las mayores tasas de subsidencia.

A partir de la información recopilada en los estudios revisados, se ha determinado que la superficie lacustre en el Valle de México presenta altas tasas de desplazamiento vertical, atribuibles a la composición de sus suelos. Por consiguiente, dado que el objetivo de esta investigación es estudiar las zonas propensas a subsidencia, el polígono del área de análisis se delimita tomando como referencia la frontera utilizada en investigaciones con un enfoque similar, como se ilustra en la Figura 3.6.

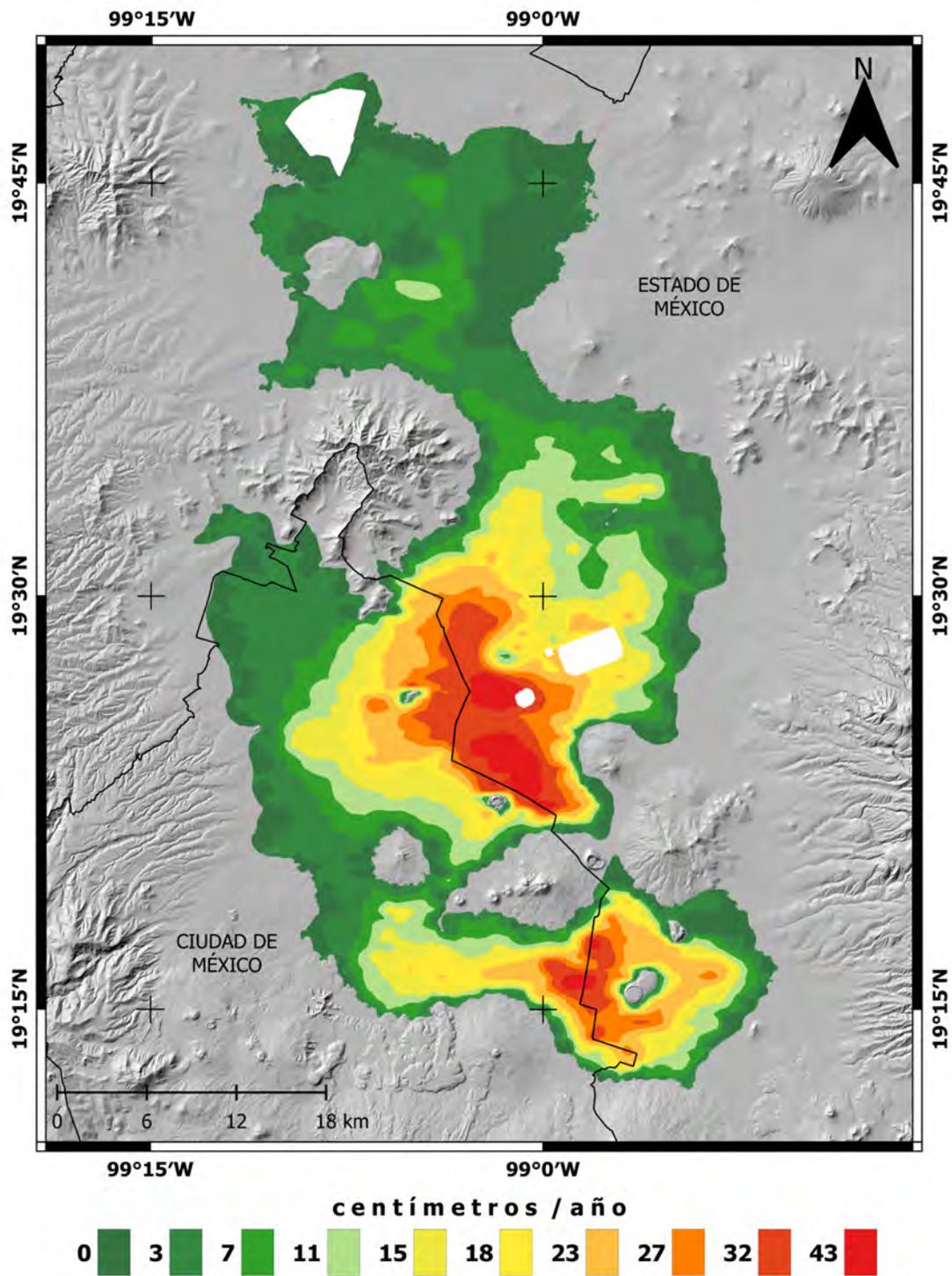
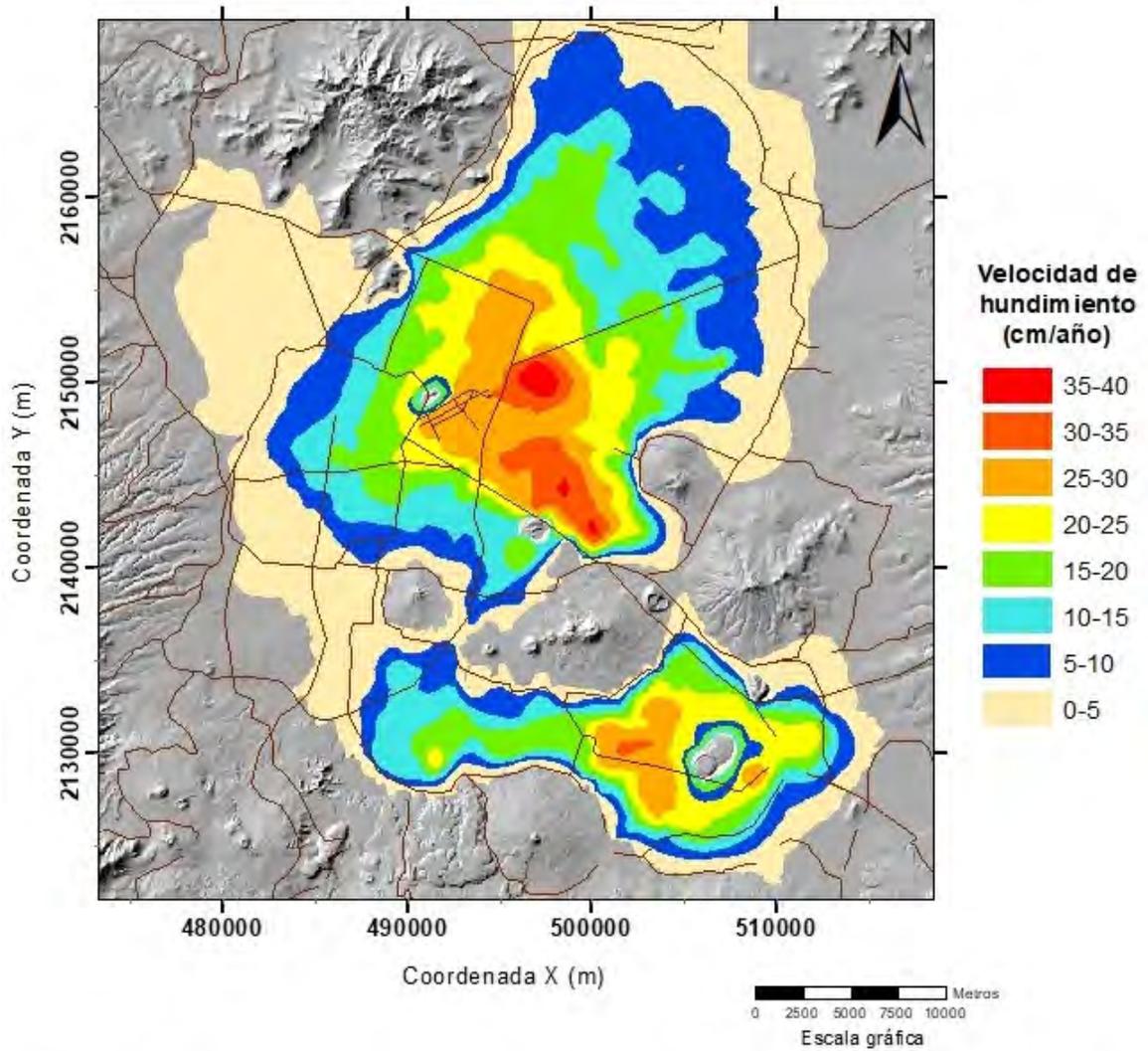


Figura 3.4: Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México (Auvinet, Méndez y Juárez, 2017a).



Mapa de velocidad de hundimiento del Valle de México (2017)

Figura 3.5: Contribución a la actualización del mapa de hundimiento regional para el Valle de México (Juárez y col., 2021).

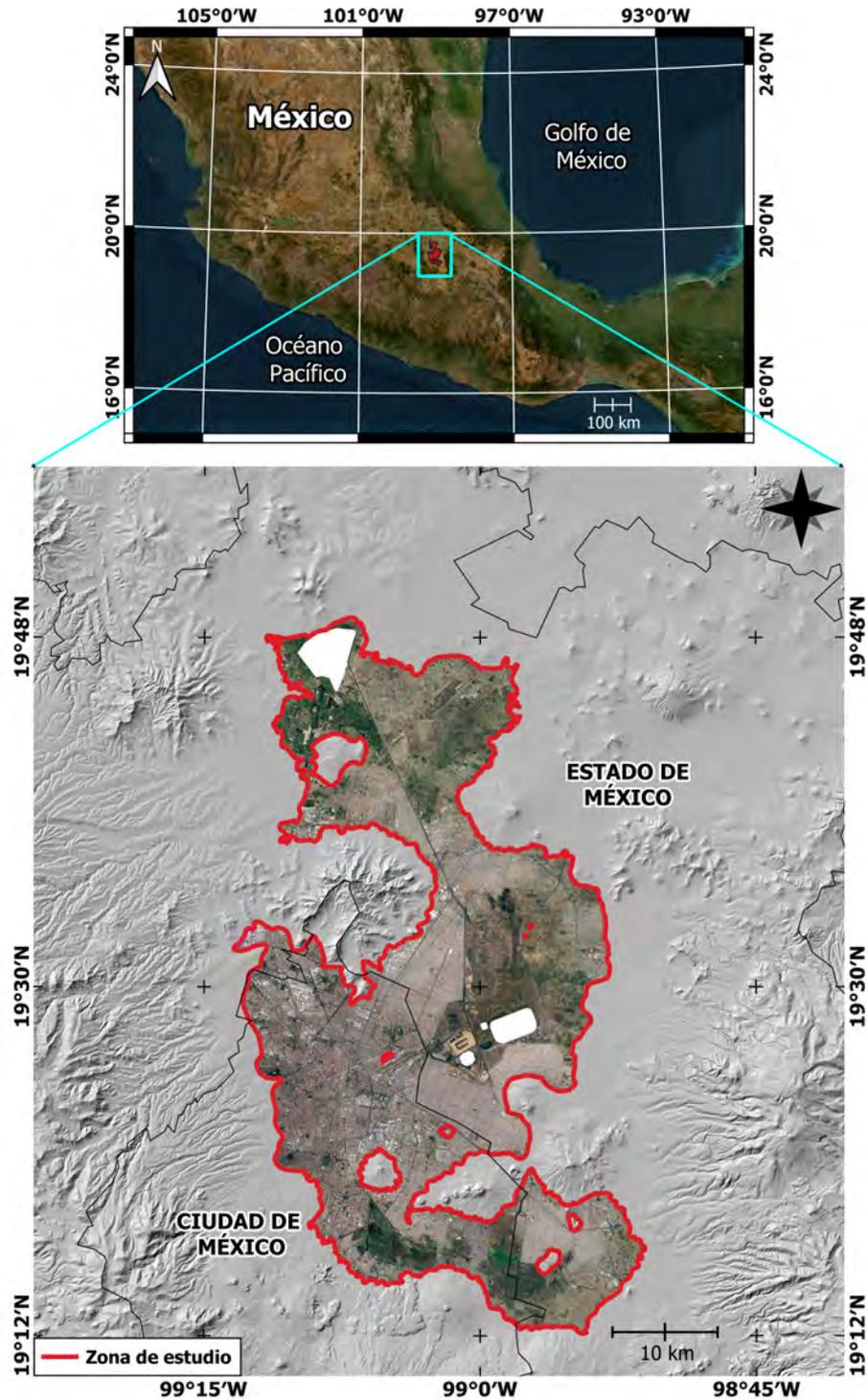


Figura 3.6: Delimitación del área de estudio, zona lacustre del Valle de México.

3.2. Selección de Plataforma Satelital

Para este estudio, se optó por emplear la plataforma satelital Sentinel-1 debido a su capacidad de ajustarse según sus parámetros a las necesidades específicas de esta investigación.

La constelación de Sentinel-1 (S1A/S1B) proporciona cobertura espacial completa en el área de estudio únicamente empleando el modo operacional IW, el cual incorpora una polarización dual (HH+HV, VV+VH) con un ángulo de incidencia de 31° a 46°. Este modo de operación garantiza una resolución espacial de 5 x 20 metros en términos de rango y azimut, con una periodicidad de observación de cada 12 días mediante un solo satélite (ver detalles de Sentinel-1 y el modo IW en la Sección 2.6.1).

3.2.1. Validación de Información Disponible

Para acceder a las imágenes SAR de Sentinel-1, es necesario realizarlo a través de plataformas digitales y servicios específicos que faciliten la descarga y el manejo de la información. Los principales medios son: *Copernicus Data Space Ecosystem* mediante su enlace oficial: <https://dataspace.copernicus.eu/> y el *Alaska Satellite Facility* (ASF Data Search Vertex) mediante: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. Ambas plataformas permiten el acceso totalmente gratuito, pero es necesario registrarse mediante un usuario, contraseña y responder un cuestionario sobre el uso previsto de los datos.

En esta investigación la descarga de las escenas se realizó mediante el servicio digital ASF Data Search Vertex (Figura 3.7). Al acceder al sistema, es necesario definir los parámetros del área de interés y configurar filtros adicionales de búsqueda, como el tipo de producto, nivel de procesamiento de la escena (L0/L1/L2), modo operacional (IW, EW, WV), polarización, trayectoria orbital (ascendente/descendente), satélite (S1A/S1B), así como la configuración del Paso (*Path*) y Cuadro (*Frame*) (Figura 3.8).

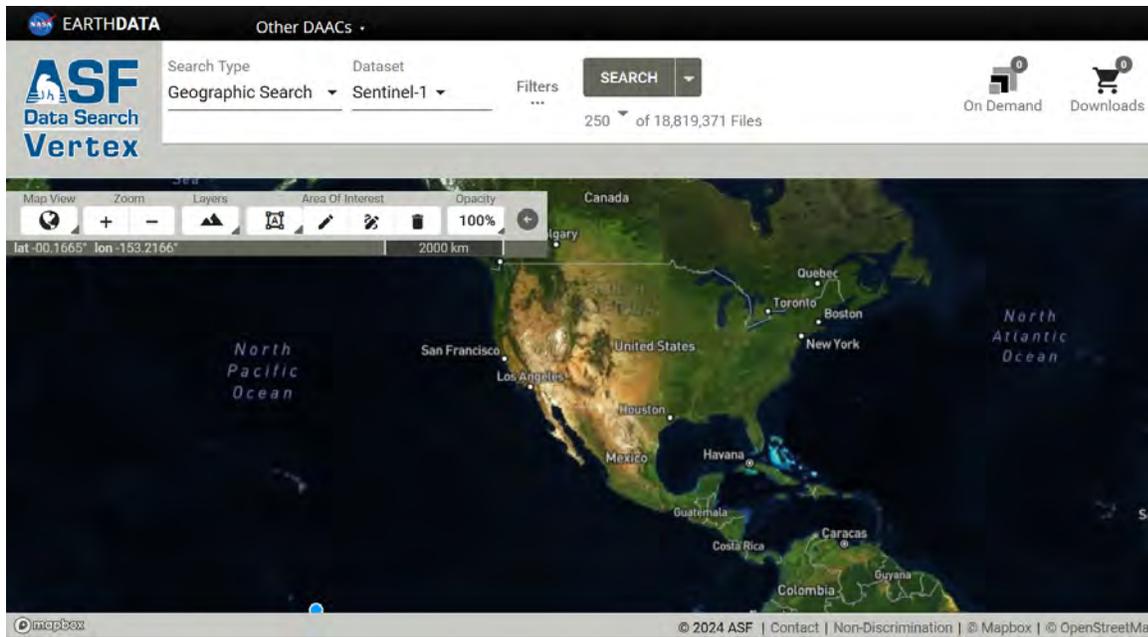


Figura 3.7: Interfaz gráfica de usuario de la plataforma digital ASF Data Search Vertex.

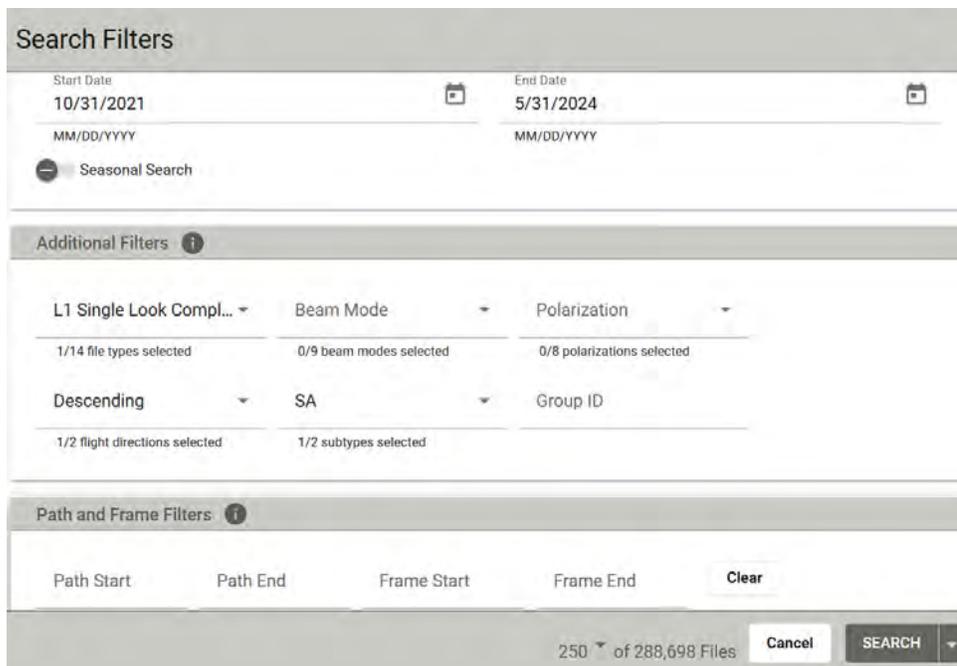


Figura 3.8: Configuración de parámetros de filtros de búsqueda en ASF Data Search Vertex.

Los criterios de búsqueda establecidos incluyeron un nivel de procesamiento L1 *Single Look Complex* (SLC), en modo operacional IW, con polarización Dual (HH+HV, VV+VH), proveniente del satélite S1A, en órbita descendente, correspondiente al Paso (*Path*) 143 y el Cuadro (*Frame*) 526 (Figura 3.9).

The screenshot shows the ASF Data Search Vertex interface. At the top, there's a search bar with 'Geographic Search' and 'Sentinel-1' selected. Below the search bar, a map of Mexico is displayed with a red polygon highlighting the study area. The map includes labels for various cities like Puebla City, Veracruz City, and Ciudad Guzmán. Below the map, there's a list of search results for 31 scenes. The first three results are visible, showing scene IDs, start times, and file counts. The interface also includes navigation controls like zoom and layers, and a footer with copyright information for ASF and Mapbox.

Figura 3.9: Búsqueda en ASF Data Search Vertex. El polígono en color rojo corresponde a la escena que abarca el área de estudio.

3.2.2. Adquisición de Datos de Radar

Se adquirieron un total de 167 escenas, abarcando del 2016 al 2023, segmentadas en intervalos anuales y un periodo extendido para 2021-2023. Este enfoque fue adoptado con el objetivo de analizar los desplazamientos verticales y las tendencias temporales en cada intervalo. Además, se buscó garantizar la coherencia de las imágenes, evitando grandes lapsos entre adquisiciones para asegurar la precisión en el análisis SAR.

Las Tablas B.1 a B.6, incluidas en el Apéndice B, reportan el número, ID de escena y fecha de las imágenes empleadas. Dichas escenas están disponibles en el ASF Data Search Vertex.

3.3. Procesamiento SAR

El procesamiento SAR se llevó a cabo utilizando el enfoque PSI, mediante el software *Stanford Method for Persistent Scatterers* (StaMPS) (ver detalles del enfoque de procesamiento PSI en la Sección 2.5.3). De acuerdo con el propio manual de StaMPS, este se considera un software que implementa los dispersores persistentes, diseñado para operar incluso en terrenos sin estructuras artificiales y/o con desplazamientos no constantes. El desarrollo original de StaMPS tuvo lugar en la Universidad de Stanford, mientras que sus complementos y desarrollos adicionales se llevaron a cabo en la Universidad de Islandia, la Universidad Técnica de Delft y la Universidad de Leeds. Además, el software cuenta con contribuciones de usuarios pertenecientes a otras instituciones (Hooper y col., 2012). El software puede descargarse desde el siguiente enlace: <https://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/>.

StaMPS es compatible con la salida generada por *Sentinel Application Platform* (SNAP), programa de la ESA, utilizado para la preparación inicial de las escenas. Esto posibilita al usuario cargar una serie de archivos con flujos de trabajo de procesamiento predefinidos, que pueden ejecutarse en modo por lotes mediante comandos específicos en su interfaz. Por otro lado, el complemento *snap2stamps* incluye un conjunto de gráficos y códigos de Python que facilitan la automatización de la cadena de procesamiento de interferogramas. La información sobre las funcionalidades y las instrucciones disponibles se pueden encontrar en el manual de usuario que se incluye en la página de GitHub (<https://github.com/mdelgadoblasco/snap2stamps/>) en su versión más reciente.

Para ejecutar StaMPS, se requieren algoritmos adicionales como el *Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping* (SNAPHU), que implementa el método de desenrollado de fase basado en costos estadísticos y flujo de red propuesto por Chen y Zebker (2000). Este enfoque aborda el desenrollado de fase como un problema de estimación de máxima a posteriori (MAP), con el objetivo de determinar la solución desenrollada más probable a partir de los datos observables de entrada. La distribución completa del código fuente se puede descargar en el siguiente enlace: <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>. Otro complemento es *A Two-Dimensional Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator* (Triangle), que genera triangu-

laciones de Delaunay exactas, restringidas y conformes, además de diagramas de Voronoi y mallas de alta calidad. Se puede obtener en la siguiente fuente: <http://www.cs.cmu.edu/~quake/triangle.html>.

Para reducir y estimar los retrasos atmosféricos se utilizó el paquete *Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise* (TRAIN), el cual ha sido desarrollada con el fin de incorporar métodos actuales de corrección troposférica al procesamiento SAR (Bekaert, Hooper y Wright, 2015; Bekaert y col., 2015). Las versiones publicadas se pueden descargar desde el enlace: <http://www.davidbekaert.com/#links> y la versión de desarrollo desde GitHub en el siguiente apartado: <https://github.com/dbekaert/TRAIN>.

Entre otras dependencias y módulos clave se encuentran los programas *The GAMMA Software* (Gamma) (<https://www.gamma-rs.ch/software>) y *Delft object-oriented radar interferometric software* (Doris) (<http://doris.tudelft.nl/>), que proporcionan diversas herramientas para el procesamiento SAR. Estas incluyen corrección de geometría, geocodificación, generación de DEM, análisis de desplazamiento superficial, entre otras funciones esenciales. Además, Doris emplea mediciones precisas de radiofrecuencia para calcular la órbita de satélites y mejorar el posicionamiento global.

El pre-procesamiento es el siguiente:

1. Clasificar las imágenes esclavas en directorios separados según su fecha de adquisición.
2. Segmentación de las imágenes esclavas y reemplazo de órbitas anotadas por órbitas precisas.
3. Corregistro y generación de interferogramas con el soporte de archivos complementarios.
4. La exportación a StaMPS se lleva a cabo proporcionando productos compatibles para cada par de pila coregistrada e interferograma.

El procesamiento es el siguiente:

1. Cargar los candidatos a puntos persistentes.
2. Estimación del ruido de fase.
3. Calcular la coherencia temporal y selección inicial de los puntos persistentes.
4. Descartar PS que se ven afectados por la contribución de la señal de elementos vecinos y que se consideran ruidosos.
5. Corrección de fase.
6. Desenrollado de fase.
7. Corrección y filtrado atmosférico.
8. Estimación de velocidad, desviación estándar y series temporales.

Para cada intervalo de procesamiento PSI, se seleccionó una imagen maestra única, sobre la cual se alinearon las esclavas. La selección de esta referencia requiere evaluar tanto la calidad radiométrica, que asegura la precisión en los valores de reflectancia, como la calidad geométrica, que garantiza una representación espacial exacta. También, es fundamental considerar los aspectos de temporalidad y cobertura espacial (ver Sección 2.5 para más detalles sobre la relación entre la imagen maestra y la esclava). El software SNAP optimiza este proceso mediante algoritmos que analizan estas métricas y recomiendan la escena más adecuada para el análisis PSI.

Los parámetros de separación espacial y temporal, junto con la información sobre coherencia, ambigüedad de altura y diferencia Doppler de cada imagen SAR, se presentan en las Tablas C.1 a C.6 del Apéndice C. Esta información, clasificada como metadatos, permite la comprensión de la distribución espacio-temporal. El análisis gráfico se ilustra en las Figuras D.1 a D.6 del Apéndice D, donde se visualizan los pares de datos interferométricos con su correspondiente umbral de línea base espacial y temporal. En estas representaciones gráficas, los puntos en rojo representan las imágenes esclavas, mientras que el punto en azul indica la imagen maestra o de referencia.

3.4. Datos GNSS

Diversos estudios han confirmado la alta precisión de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) en el monitoreo de desplazamientos de la superficie terrestre. Por esta razón, como complemento y método de comparación con los resultados obtenidos mediante la técnica SAR, se integraron datos de las estaciones de monitoreo permanente MMX1 y TNGF (Tabla 3.1). La incorporación de solo dos estaciones GNSS se justifica por la disponibilidad actual, con MMX1 ubicada dentro del polígono de estudio y TNGF en sus cercanías.

Tabla 3.1: Coordenadas y parámetros de estaciones de monitoreo permanente MMX1 y TNGF.

Estación	TNGF	MMX1
Latitud (ϕ)	19.326944° N	19.431653° N
Longitud (λ)	99.176065° W	99.068389° W
Altura (m)	2,273.000	2,235.640
Receptor	TRIMBLE-NETR9	NOV WAASGII
Antena	TRM59800.00	MPL_WAAS_2225NW
Gestor/Red	UNAVCO/TLALOCNet	NGS/CORS

La estación MMX1 está situada en el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (oficialmente Aeropuerto Internacional Benito Juárez) y ha estado en funcionamiento desde 2008. Esta forma parte de la red de estaciones *Continuously Operating Reference Station* (CORS) (https://geodesy.noaa.gov/cgi-cors/cors_age.prl?site=MMX1). Por su parte, la estación TNGF, localizada en las instalaciones de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) al sur de la Ciudad de México, comenzó a operar en 2015, aunque actualmente no está activa. A pesar de ello, se cuenta con datos GNSS que coinciden en intervalos temporales con las imágenes Sentinel-1. Esta estación se encuentra integrada en la red *Trans-boundary, Land and Atmosphere Long-term Observational and Collaborative Network* (TLALOCNet) (<https://www.unavco.org/instrumentation/networks/status/nota-affiliated/health/TNGF>) (Figura 3.10).

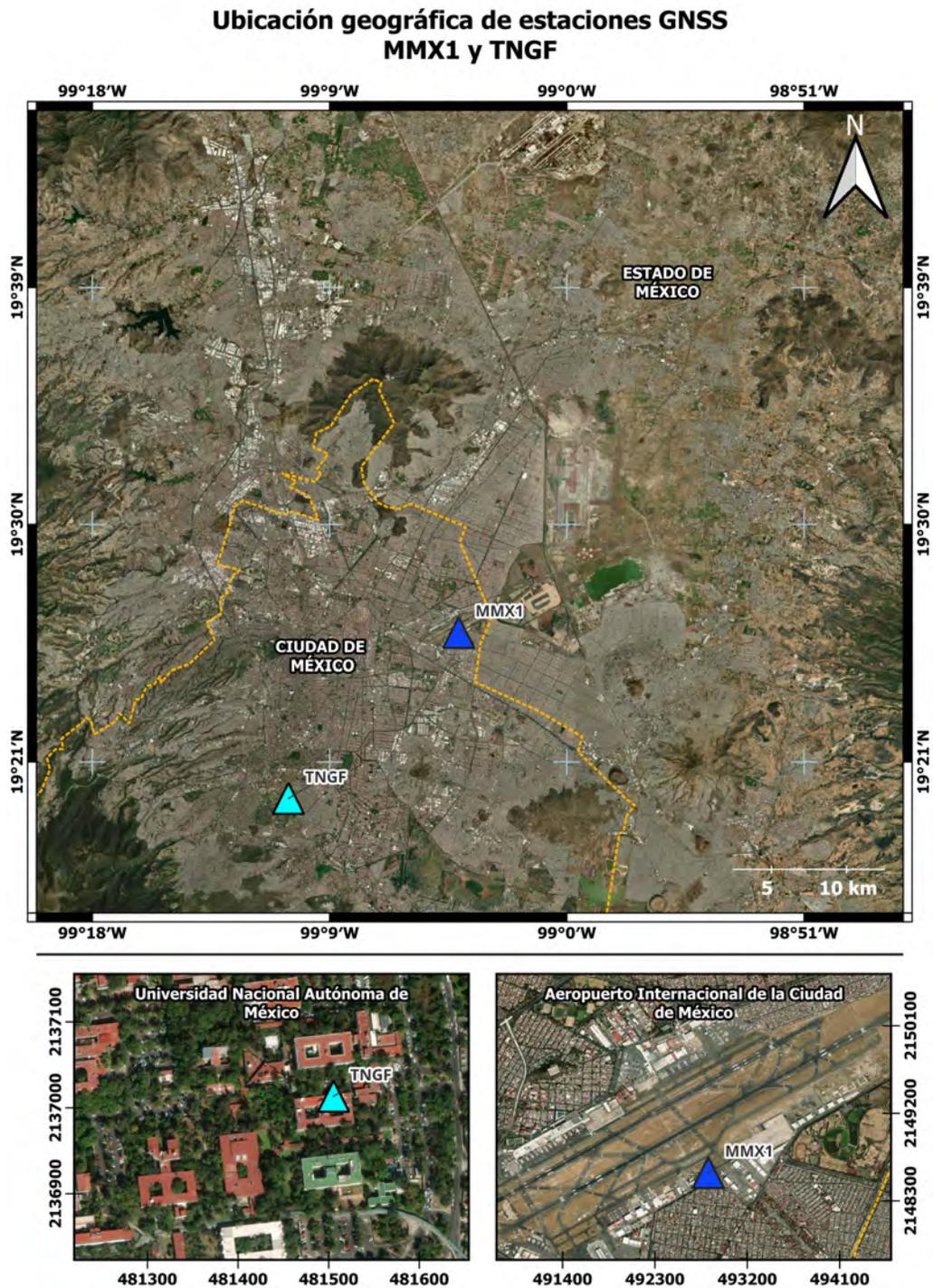


Figura 3.10: Ubicación geográfica de estaciones de monitoreo permanente MMX1 y TNGF.

El Laboratorio de Geoinformática del Instituto de Ingeniería de la UNAM proporcionó los datos GNSS y realizó el procesamiento necesario para los intervalos requeridos. El software científico PRIDE PPP-AR (Geng y col., 2019) se utilizó para este fin, aplicando la resolución de ambigüedades de fase (AR) y el Posicionamiento Puntual Preciso (PPP). PRIDE PPP-AR se compone principalmente de dos módulos, uno para el procesamiento de datos GPS no diferenciados de un único receptor GNSS y otro para la resolución de ambigüedades enteras utilizando productos precisos como órbita, reloj, parámetros de rotación terrestre, entre otros (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Parámetros de procesamiento, modelos y características aplicadas en el procesamiento con PRIDE PPP-AR.

Parámetro de Procesamiento	PRIDE PPP-AR
Strategy	Precise Point Positioning with Ambiguity Resolutions (single station PPP - AR)
Pre-procesamiento	Análisis de calidad
Tasas de Muestreo	30 segundos
Ángulo de Elevación	10°
Carga Oceánica	FES2014
Marea Terrestre Sólida	IERS 2010
Marea del Polo Terrestre	IERS 2010
Parámetros de Orientación Terrestre	IERS Boletín A
Órbitas Precisas y Reloj	Final orbits and clocks
Calibración de Antena	IGS14 (Archivo ATX)
Ionosfera	Combinación libre de ionosfera de L1 y L2
Troposfera	GMF (Global Mapping Function); mapeo hidrostático y húmedo en los modelos GPT2 (Presión y Temperatura Global) y VMF1 (Función de Mapeo de Viena)
Observables	L1 + L2, código y fase

Finalizado el procesamiento GNSS, se generaron las series temporales de cada estación, las cuales se analizaron mediante *TSVIEW* (Herring, 2003) con el fin de eliminar errores que superen tres veces la incertidumbre del procesamiento,

valores atípicos ajustando la tendencia lineal y modelando señales periódicas (términos anuales y semianuales). Además, se aplicó el algoritmo *realistic-sigma* el cual asume la inclusión de ruido blanco (*white noise*) y ruido correlado temporalmente (*random walk noise*) para una estimación realista de la incertidumbre en la velocidad determinada.

3.5. Análisis Geoestadístico

La metodología teórica del análisis geoestadístico es adaptable al estudio de la subsidencia en el Valle de México mediante el uso de imágenes SAR, siguiendo un proceso ordenado y secuencial, como se observa en la Figura 3.11.



Figura 3.11: Esquema metodológico general empleado para el análisis geoestadístico.

3.5.1. Recopilación de Información

Como punto de partida del análisis geoestadístico, se llevó a cabo la recopilación de los datos por analizar, los cuales se derivan del procesamiento SAR mediante el enfoque PSInSAR. Dado que los resultados abarcan distintos años de procesamiento y la imagen SLC en la franja IW3 y subfranja 4-9 se extiende más allá del área de interés, las matrices de cada producto se exportaron desde un punto de referencia único con un radio de 35 km, asegurando la cobertura total de cada escena. Luego, se filtraron los datos experimentales para conservar únicamente aquellos que se encontraban dentro del polígono de estudio (Figura 3.6). Los datos se capturaron en formato numérico y se almacenaron en archivos CSV y TXT para facilitar su manejo en los análisis posteriores.

3.5.2. Construcción de Bases de Datos

El segundo paso consistió en la elaboración de un conjunto de bases de datos, cuyo formato general se estructuró en una tabla con tres columnas y n número de filas. Los datos numéricos se organizaron en el orden: *Coordenada X*, *Coordenada Y*, y el parámetro ΔZ , que representa el valor de subsidencia analizado. La Tabla 3.3 presenta una muestra de la estructura del primer archivo de datos del 2017, destacando los primeros y últimos tres renglones. Este archivo incluye un total de 289, 125 valores que corresponden a los puntos que el SAR logró medir dentro del polígono de estudio. Este proceso se replicó para cada año dentro del período comprendido entre 2016 y 2023, resultando en seis archivos iniciales con una estructura similar y un promedio de 300 mil valores por archivo.

Tabla 3.3: Estructura del primer archivo generado para la aplicación del análisis geoestadístico (ejemplo archivo de datos del 2017).

ID	X	Y	ΔZ
1	504942.6234	2124011.308	-0.000191327
2	504111.1064	2124179.291	-0.000664492
3	504910.0278	2124045.601	-0.002812991
⋮	⋮	⋮	⋮
289123	496808.5913	2183074.474	-0.01566524
289124	496884.0259	2183060.075	-0.02149368
289125	498402.1737	2182779.912	-0.000132316

3.5.3. Análisis Exploratorio

El tercer paso implicó realizar el análisis exploratorio, utilizando algunas de las herramientas proporcionadas por los programas Excel y R para procesamiento y análisis de datos. En esta etapa, se llevó a cabo un análisis estadístico preliminar que permitió obtener una visión general del comportamiento de los datos, incluyendo medidas de tendencia central, dispersión y gráficos descriptivos (ver detalles en la Sección 2.7.1). Posteriormente, se aplicó una regresión lineal para modelar la relación matemática entre la variable ΔZ , y las coordenadas espaciales X e Y . El objetivo principal de esta representación fue determinar si el campo de estudio es estacionario o no estacionario. Para el caso de un dominio bidimensional, la tendencia puede evaluarse a partir de los coeficientes de regresión lineal, adoptando una función de la forma:

$$\text{Regresión} = Ax + By + C \quad (3.1)$$

Donde: A , B y C representan los coeficientes del modelo de regresión lineal (Tabla 3.4). Con la ecuación de regresión establecida, se procedió a calcular los residuos, que corresponden a las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo:

$$\text{Residuo} = VA - \text{Regresión} \quad (3.2)$$

Así, se evaluó la precisión del modelo de regresión y se identificaron posibles patrones sistemáticos que no habían sido capturados. Además, se eliminó la tendencia global del modelo, lo que redujo el sesgo introducido y permitió centrarse en la variabilidad residual.

Tabla 3.4: Coeficientes de regresión lineal (ejemplo archivo de datos del 2017).

a	b	c
4.12462E-07	4.13502E-07	-1.165336936

3.5.4. Análisis Estructural

La cuarta etapa se centró en implementar el análisis estructural de los datos, utilizando el programa WinGslib (Deutsch, Clayton V., 1997) para la generación de

los semivariogramas. En este sentido, se procedió a la elaboración del segundo archivo, el cual se compone por cuatro columnas que contienen las *Coordenadas X*, *Coordenadas Y*, así como los valores correspondientes a la regresión y los residuos. Además, se organizó con un encabezado que incluye el título, el número de columnas y los nombres de cada variable (Tabla 3.5). Es importante señalar que este archivo se almacena en un formato tipo .DAT, el cual se carga en el programa para proceder con la siguiente etapa de este análisis.

Tabla 3.5: Estructura del segundo archivo generado (.DAT) a cargar en programa WinGslib (ejemplo archivo de datos del 2017).

ID	INSAR_2017			
	4			
	X			
	Y			
	REGRESION			
	RESIDUOS			
1	504942.6234	2124011.308	-0.078784833	0.078593506
2	504111.1064	2124179.291	-0.079058341	0.078393849
3	504910.0278	2124045.601	-0.078784097	0.075971106
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
289123	496808.5913	2183074.474	-0.057717086	0.042051846
289124	496884.0259	2183060.075	-0.057691926	0.036198246
289125	498402.1737	2182779.912	-0.057181596	0.05704928

Para asegurar la generación precisa de los semivariogramas, es importante tener en cuenta diversos parámetros y tolerancias que determinan la fiabilidad y la interpretación del resultado obtenido (Figura 3.12). Primero, es fundamental definir el número de desfases (*Number of lags*), que indica los intervalos o distancias a lo largo de los cuales se calculará el semivariograma. Segundo, se debe especificar la separación entre puntos (*Unit lag separation distance*), que establece la distancia a la cual se agrupan los pares de datos para el cálculo. Tercero, la tolerancia de desfase (*Lags tolerance*), que especifica el rango en el que se permiten los pares de datos, asegurando que se mantengan dentro de una distancia aceptable. Cuarto, y en el caso de un estudio en dos o tres dimensiones, es importante determinar el grado de anisotropía. Esto se realiza calculando el semivariograma en diferentes direcciones; si los resultados son consistentes en todas las direcciones, el campo se considera isótropo; si se observan variaciones, el campo es anisotrópico. En este sentido, la anisotropía suele representarse en forma geométrica, mediante la elip-

se de anisotropía, revelando la estructura espacial en distintas orientaciones. Esta evaluación es importante para ajustar correctamente los parámetros y mejorar la precisión de la interpolación. Finalmente, se deben considerar los parámetros de azimut, tolerancia angular y rango de banda, ya que proporcionan detalles sobre la agrupación de los datos en el análisis.

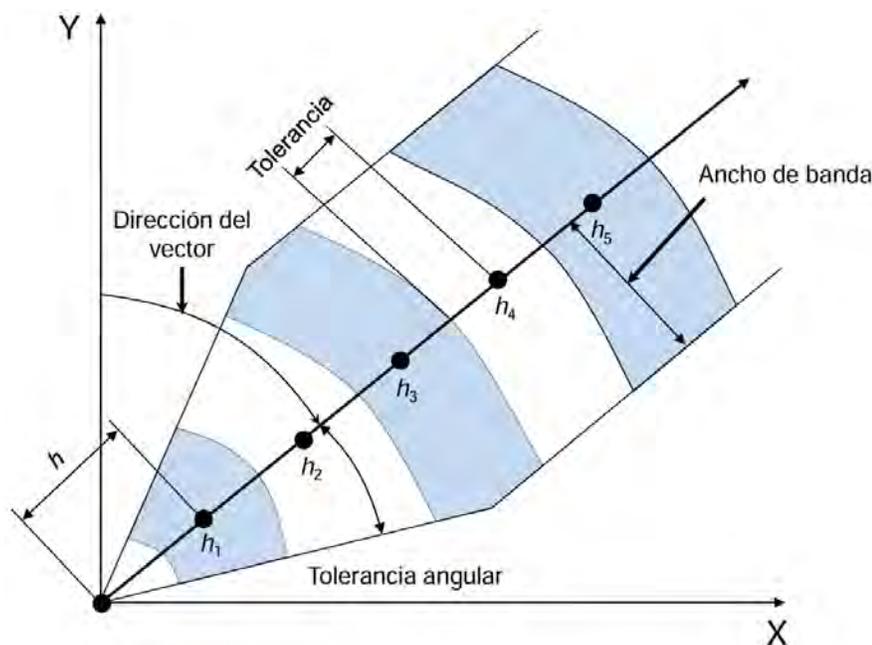


Figura 3.12: Definición de tolerancias (Juárez, 2015). En el caso de que los datos se encuentren distribuidos en forma aleatoria es necesario proporcionar los parámetros que definen las tolerancias lineales y angulares.

Una vez establecidos los parámetros para la generación de los semivariogramas (Tabla 3.6), se procedió a ejecutar el programa, generando el tercer archivo correspondiente a cada intervalo, obteniendo resultados en cuatro direcciones (0° , 45° , 90° , 135°). La Tabla 3.7 presenta los valores del semivariograma calculado para los residuos en la dirección 1 (0°). La primera columna refleja el número de lag o incremento de distancia entre puntos, mientras que la segunda columna indica la distancia de separación de los datos. Las siguientes columnas contienen los valores semivariográficos calculados. Es importante destacar que, debido al volumen de datos y a las exigencias computacionales, la creación de este tercer archivo puede requerir un tiempo considerable, extendiéndose a lo largo de varias horas.

Tabla 3.6: Parámetros de entrada adoptados para la generación de semivariogramas.

Parámetro	Valor	Descripción
Variable de estudio	Residuos	Datos resultantes tras la eliminación de la tendencia.
Número de lags	650	Cantidad de intervalos de distancia (normalmente en metros).
Distancia entre lags	50	Distancia típica entre datos (normalmente en metros).
Tolerancia de lags	25	Rango aceptable para agrupar puntos dentro de cada intervalo.
Direcciones	4	Direcciones en las que se analiza la anisotropía referidas al azimut geográfico, $Az = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$.
Tolerancia angular	22.5°	Rango en grados para incluir datos alrededor de una dirección específica en el análisis.

Tabla 3.7: Estructura del tercer archivo con los valores generados para los semivariogramas (ejemplo archivo de datos del 2017).

Semivariogram		tail:RESIDUOS	head:RESIDUOS	direction	1
1	0.000	0.00000 304484	0.00000	0.00000	
2	15.416	0.00476 13501	-0.00224	-0.00223	
3	55.040	0.00802 453679	-0.00445	-0.00450	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
648	32299.968	.93832 14226786	.00136	.03676	
649	32349.973	.93738 14194886	.00134	.03694	
650	32399.967	.93777 14127001	.00128	.03705	

Para la siguiente etapa, se procedió con la elaboración de los modelos de semivariograma y se ajustaron a los datos experimentales, empleando una función matemática de tipo exponencial como se especifica en la Ecuación 2.41. Además, se definieron los valores de sill y alcance en las cuatro direcciones. En este sentido, la Figura 3.13 ejemplifica este ajuste basado en los resultados del tercer archivo de datos del 2017. Como muestran los gráficos, en la dirección de 0°, se asignó un sill

de 1.4 con un alcance de 20,000 m, lo que indica un nivel de variabilidad que se estabiliza a esta distancia. En la dirección de 45°, el sill se mantuvo en el valor de 1.4, pero el alcance se redujo a 14,000 m, lo que sugiere una dependencia espacial más corta. Para la dirección de 90°, el sill aumentó a 1.5 y el alcance disminuyó a 12,000 m, lo que señala una mayor variabilidad y una distancia menor para alcanzar el límite de dependencia espacial. Finalmente, en la dirección de 135°, el sill disminuyó a 1.2 y el alcance se extendió a 22,000 m, indicando una dependencia espacial más prolongada y una menor variabilidad.

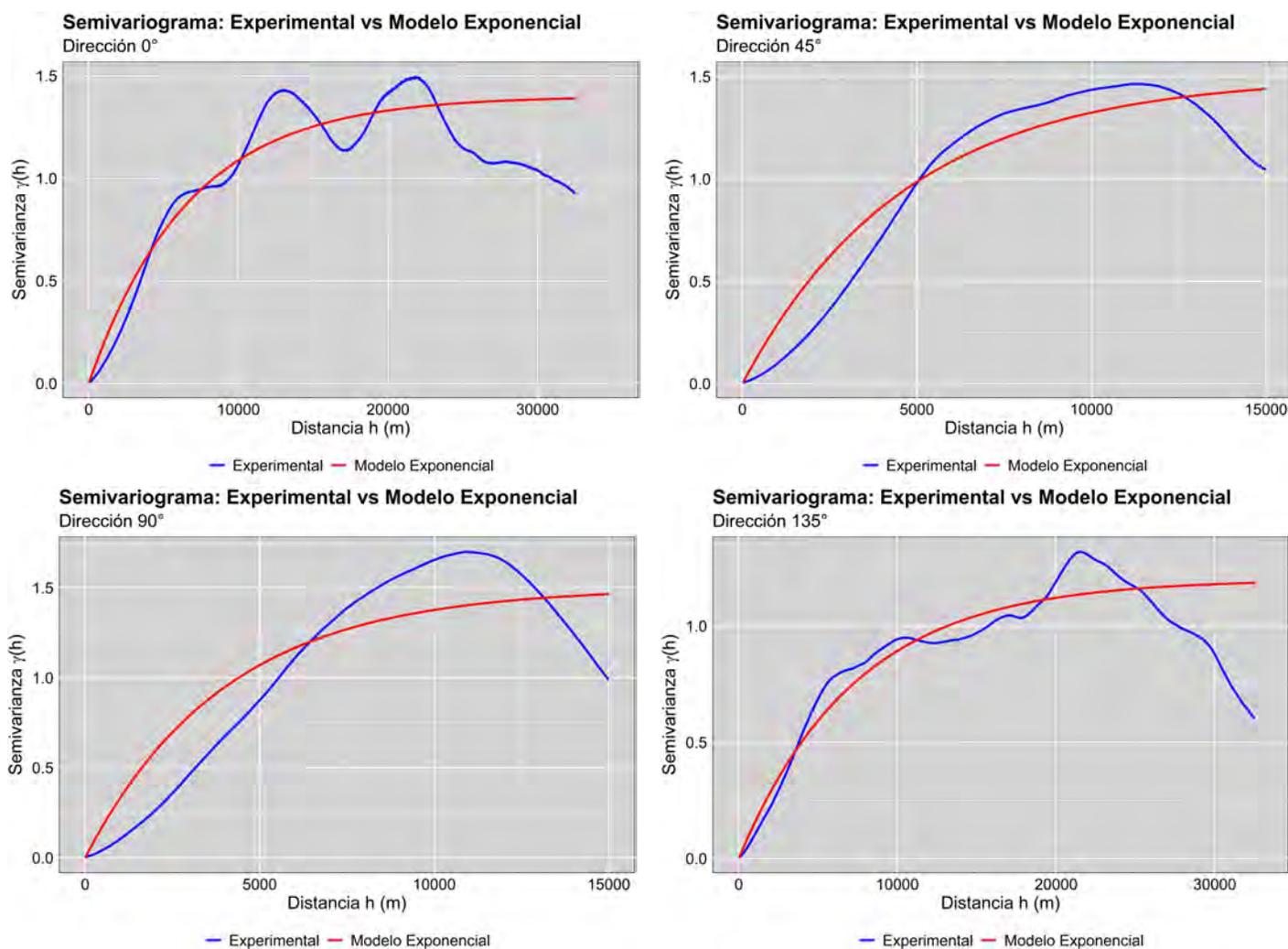


Figura 3.13: Análisis del semivariograma con ajuste del modelo exponencial en cuatro direcciones (ejemplo archivo de datos del 2017).

Posteriormente a la generación de los semivariogramas correspondientes a los intervalos procesados, se procedió al cálculo de los coeficientes de anisotropía para las direcciones 0° - 90° y 45° - 135° , como se muestra en la Tabla 3.8. Para la estimación, y nuevamente a modo de ejemplo, se utilizan los resultados del archivo de datos de 2017, se optó por la utilización conservadora de la elipse asociada a las menores distancias de correlación, estableciéndose un coeficiente de anisotropía de 0.60 con una dirección preferencial de 90° . A través de este análisis, se identificaron las diferencias en la dependencia espacial entre las distintas direcciones, resaltando la variabilidad y el comportamiento anisotrópico de la subsidencia en las áreas evaluadas.

Tabla 3.8: Coeficientes de anisotropía (ejemplo archivo de datos del 2017).

Elipse	Azimut	Alcance	Sill	Anisotropía
1	0	20000	1.4	0.60
	90	12000	1.5	
2	45	14000	1.5	0.64
	135	22000	1.2	

3.5.5. Estimación

Con base en los datos experimentales y los valores obtenidos del análisis estructural, se estimaron puntualmente los valores de la variable de interés ΔZ mediante la aplicación de kriging ordinario. De este modo, se estableció la malla de estimación en función de los parámetros que se indican en la Tabla 3.9. El proceso genera un archivo con dos resultados principales: el valor estimado ΔZ y la varianza asociada.

Tabla 3.9: Parámetros de la malla de estimación utilizados en los intervalos procesados.

Parámetro	Valor
XMIN (m)	475000
YMIN (m)	2122900
Tamaño Cel. (m)	80
Mín. puntos	3
Máx. puntos	12
Radio Búsqueda	10000

Posteriormente, se incorporaron las coordenadas X e Y a los resultados mediante el módulo ADDCORD de WinGslib. Este proceso generó un nuevo archivo que contiene las coordenadas correspondientes a cada vértice de la malla de interpolación, la estimación calculada y la varianza asociada. La estimación final se obtiene regresando la tendencia al campo residual estimado.

3.5.6. Visualización

Con el objetivo de representar visualmente los resultados obtenidos, se hace uso de herramientas de graficación especializadas y Sistema de Información Geográfica (SIG). En particular, se utilizó el software Surfer, versión 13 (Golden Software, 2017), para la visualización de isolíneas, mientras que QGIS, versión 3.28 (QGIS Development Team, 2022), se empleó para la generación de mapas de velocidades de hundimiento. El archivo usado para la visualización presenta una estructura similar a la que se detalla en la Tabla 3.3. Para asegurar una correcta representación de los resultados, se garantizó que los nodos de la malla de graficación coincidieran con los nodos originales de la malla de estimación.

Capítulo 4

Resultados y Análisis

En este capítulo se muestran los resultados del trabajo de investigación, destacando que la Figura 4.1 ilustra el esquema general del proceso seguido para la generación de los productos.

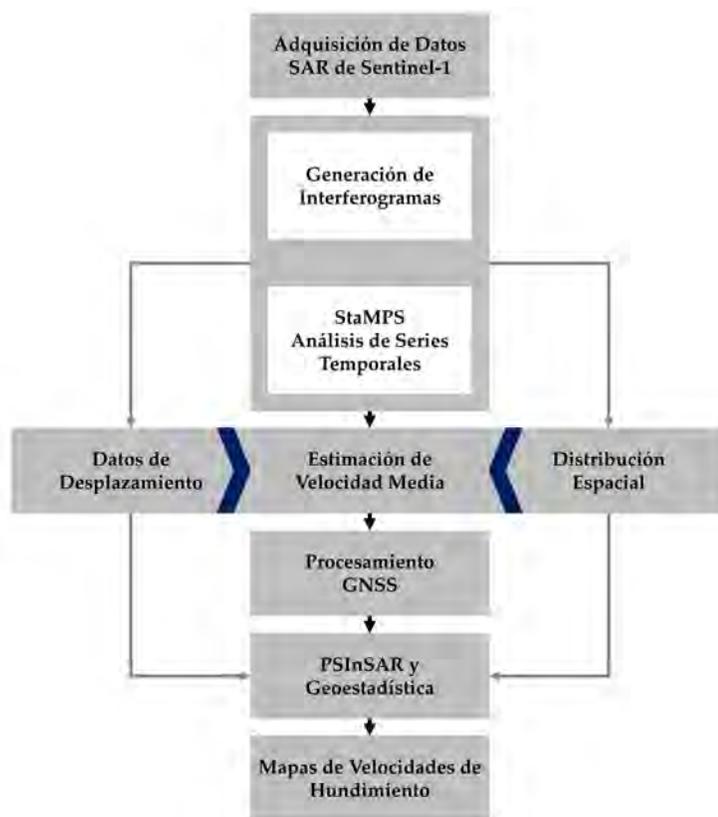


Figura 4.1: Esquema general del proceso para la generación de resultados principales.

4.1. Fase Enrollada

La representación de la fase de las ondas de radar confinada a un rango limitado entre $-\pi$ y π radianes se denomina fase enrollada (o envuelta) (Figura 4.2, color azul). Este fenómeno se debe a la naturaleza cíclica de las señales de radar, que esencialmente hace que el sistema SAR mida la fase en intervalos limitados, como resultado del proceso de adquisición. En las Figuras 4.3 y 4.4 se presentan los resultados obtenidos, empleando, por razones de simplicidad, únicamente una escena representativa del mes de noviembre en cada intervalo. Si bien aún no se cuentan con las magnitudes reales de desplazamiento, ya es posible identificar los patrones emergentes, visibles en los anillos de tonalidades cambiantes. Asimismo, se distinguen claramente las áreas potenciales para la obtención de puntos PS, así como aquellas donde no será viable su detección. Cabe destacar que en estos resultados se muestra la escena completa, obteniendo información tanto dentro como fuera del polígono de estudio, dado que corresponde a una de las primeras etapas del procesamiento SAR.

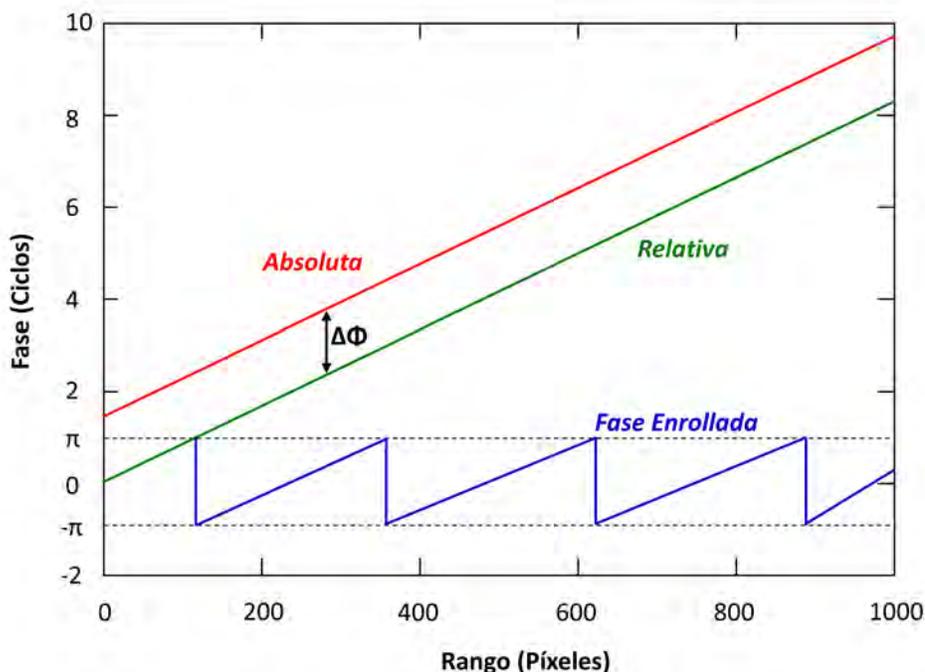


Figura 4.2: Representación de fase enrollada, desenrollada relativa y absoluta.

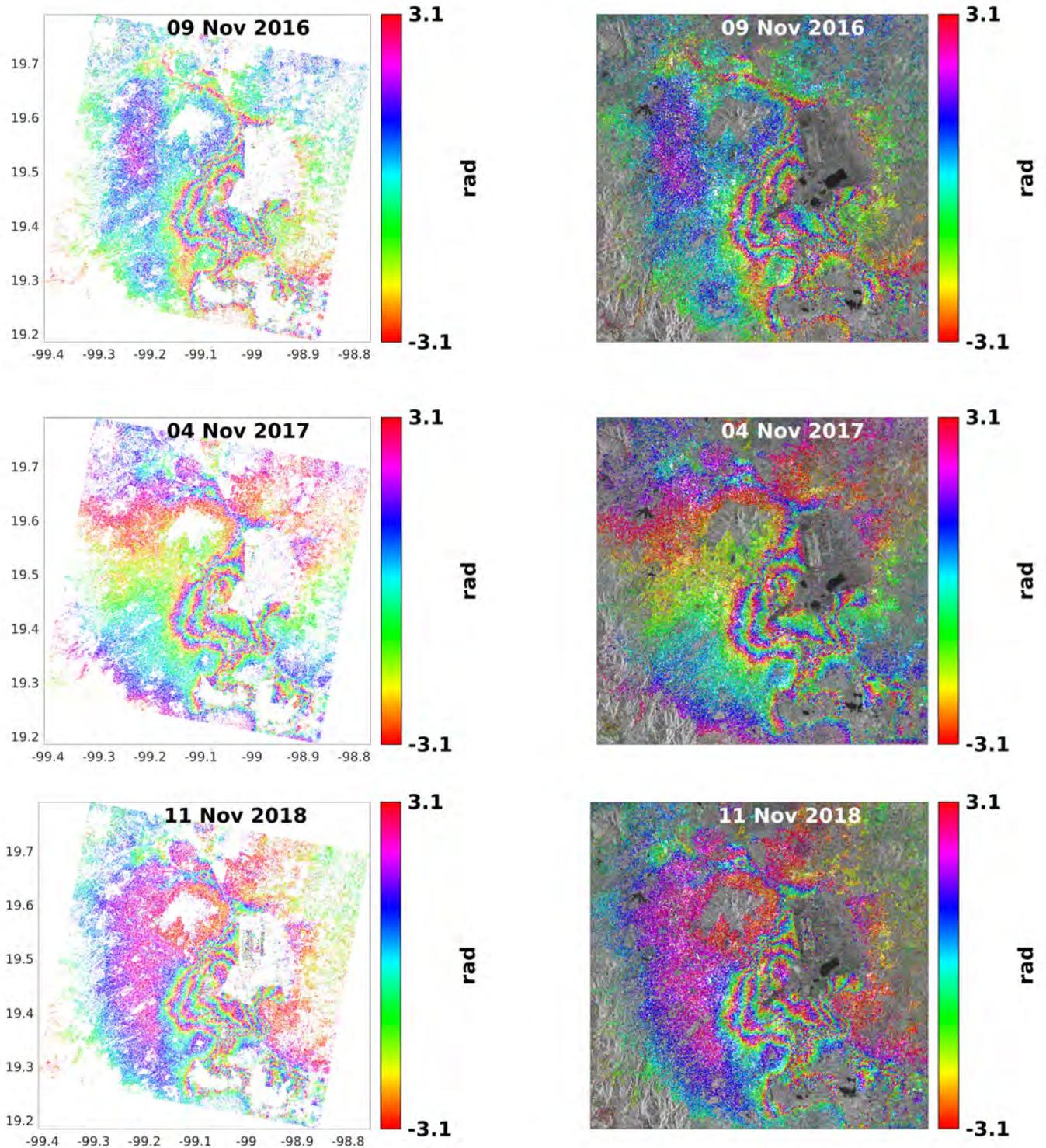


Figura 4.3: Fase enrollada obtenida durante el procesamiento SAR (intervalos 2016, 2017, 2018). A la izquierda, las escenas se despliegan sobre un fondo blanco, mientras que a la derecha, sobre uno de amplitud media.

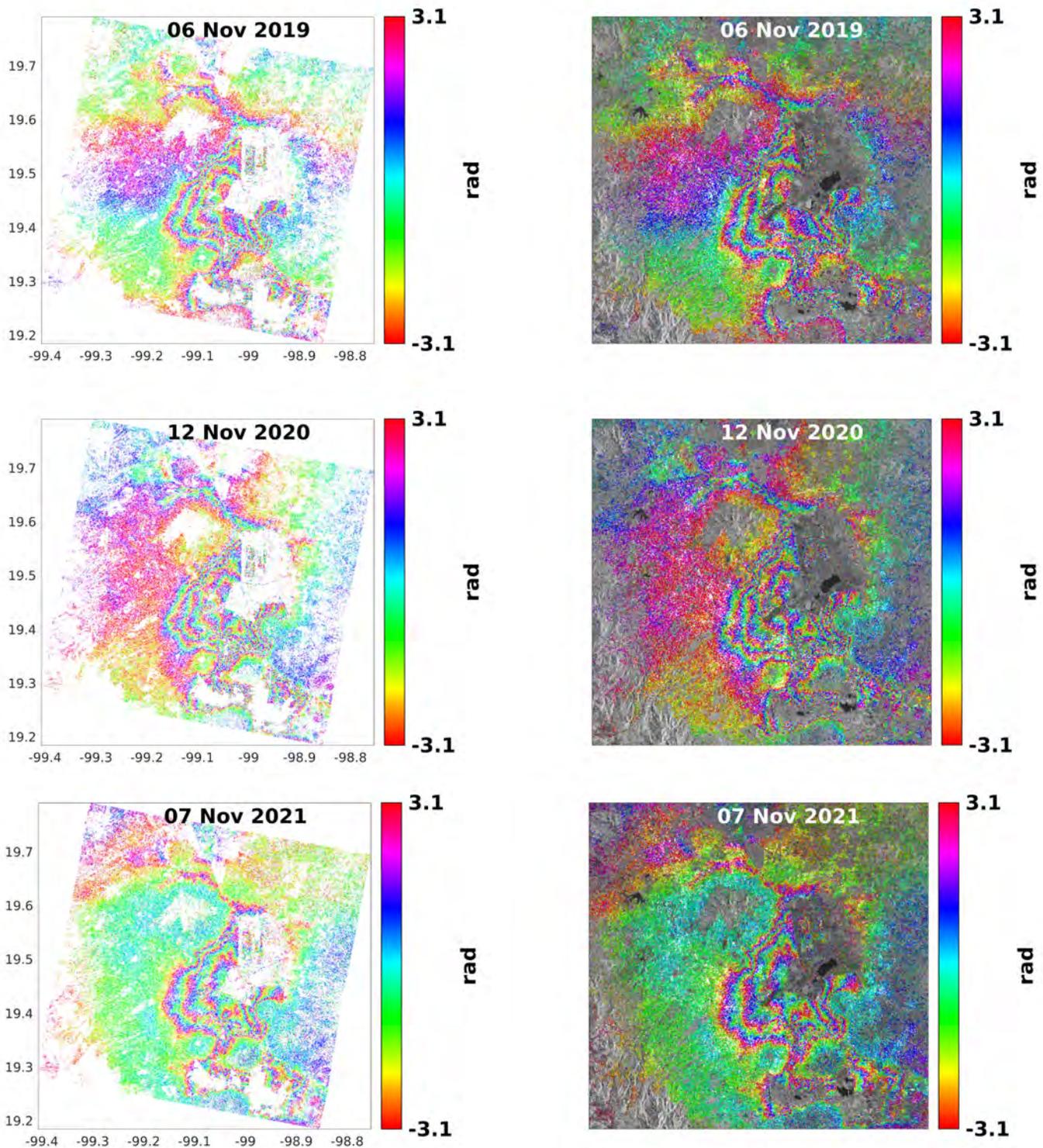


Figura 4.4: Fase enrollada obtenida durante el procesamiento SAR (intervalos 2019, 2020, 2021). A la izquierda, las escenas se despliegan sobre un fondo blanco, mientras que a la derecha, sobre uno de amplitud media.

4.2. Fase Desenrollada

Para lograr una fase continua en el procesamiento SAR, es necesario aplicar el proceso de desenrollado (Figura 4.2, donde la fase relativa se representa en color verde y la fase absoluta en color rojo). Este procedimiento elimina las discontinuidades de la fase enrollada, permitiendo una representación precisa de los valores medidos. El desenrollado se lleva a cabo analizando los valores de fase en los píxeles adyacentes de la imagen interferométrica para garantizar transiciones suaves. Si se detecta un salto abrupto, se suman o restan múltiplos de 2π a los valores de fase, ajustando así las diferencias significativas. Esto resulta en una representación más fluida que refleja las alteraciones en el área estudiada. Según Braun y Veci (2021), la fiabilidad del desenrollado de fase está relacionada con la coherencia de los datos de origen, siendo más confiable en áreas de alta coherencia, que se sugiere que sea al menos 0.3 para obtener resultados válidos. En zonas de baja coherencia, el ruido puede afectar los resultados y dificultar la interpretación de las variaciones en la superficie del terreno.

Las Figuras 4.5 y 4.6 ilustran los resultados obtenidos tras el desenrollado de fase. Siguiendo el planteamiento de la sección anterior, se incluye únicamente una escena representativa del mes de noviembre para cada intervalo, con el fin de simplificar la presentación. A diferencia de los valores de fase enrollada, la visualización se enriquece mediante la asignación de un color específico a cada valor de fase, permitiendo identificar variaciones a lo largo de la escena. Sin embargo, dado que los datos siguen expresándose en radianes, es necesario convertirlos a unidades más comprensibles, como milímetros o centímetros, para estimar la velocidad media de los desplazamientos. Como se puede observar en las escenas sobre un fondo de amplitud media (lado derecho), el proceso de estimación de puntos PS se fortalece a medida que avanza el análisis, logrando una alta reflectividad en las áreas urbanas, mientras que en las zonas con vegetación y entornos cambiantes la reflectividad es baja, como era de esperarse debido a las particularidades del enfoque PSInSAR. En esta fase del análisis, la información continúa siendo visualizada dentro y fuera del polígono de estudio, como parte de las etapas preliminares para la obtención de los productos finales.

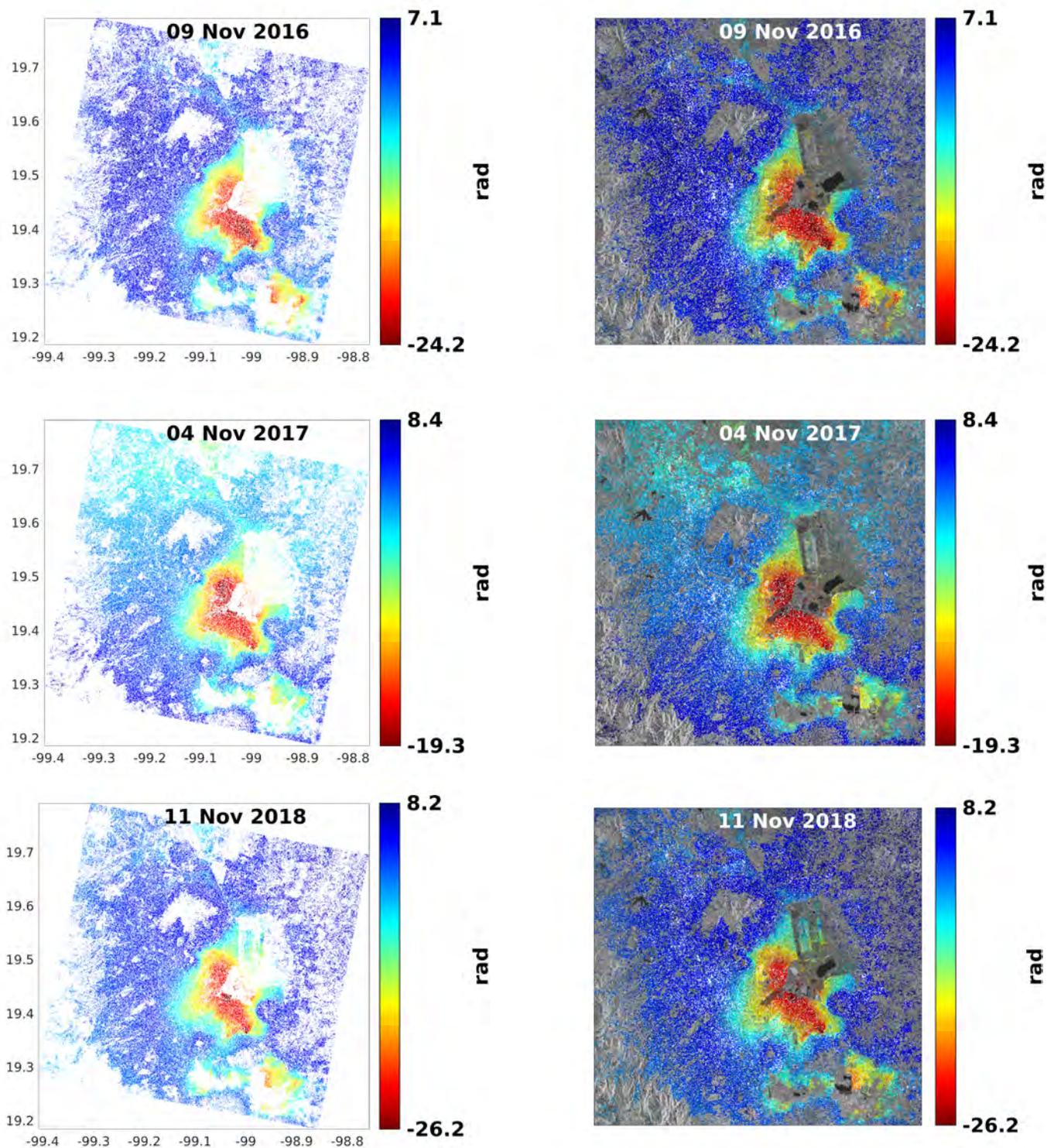


Figura 4.5: Fase desenrollada obtenida durante el procesamiento SAR (intervalos 2016, 2017, 2018). A la izquierda, las escenas se despliegan sobre un fondo blanco, mientras que a la derecha, sobre uno de amplitud media.

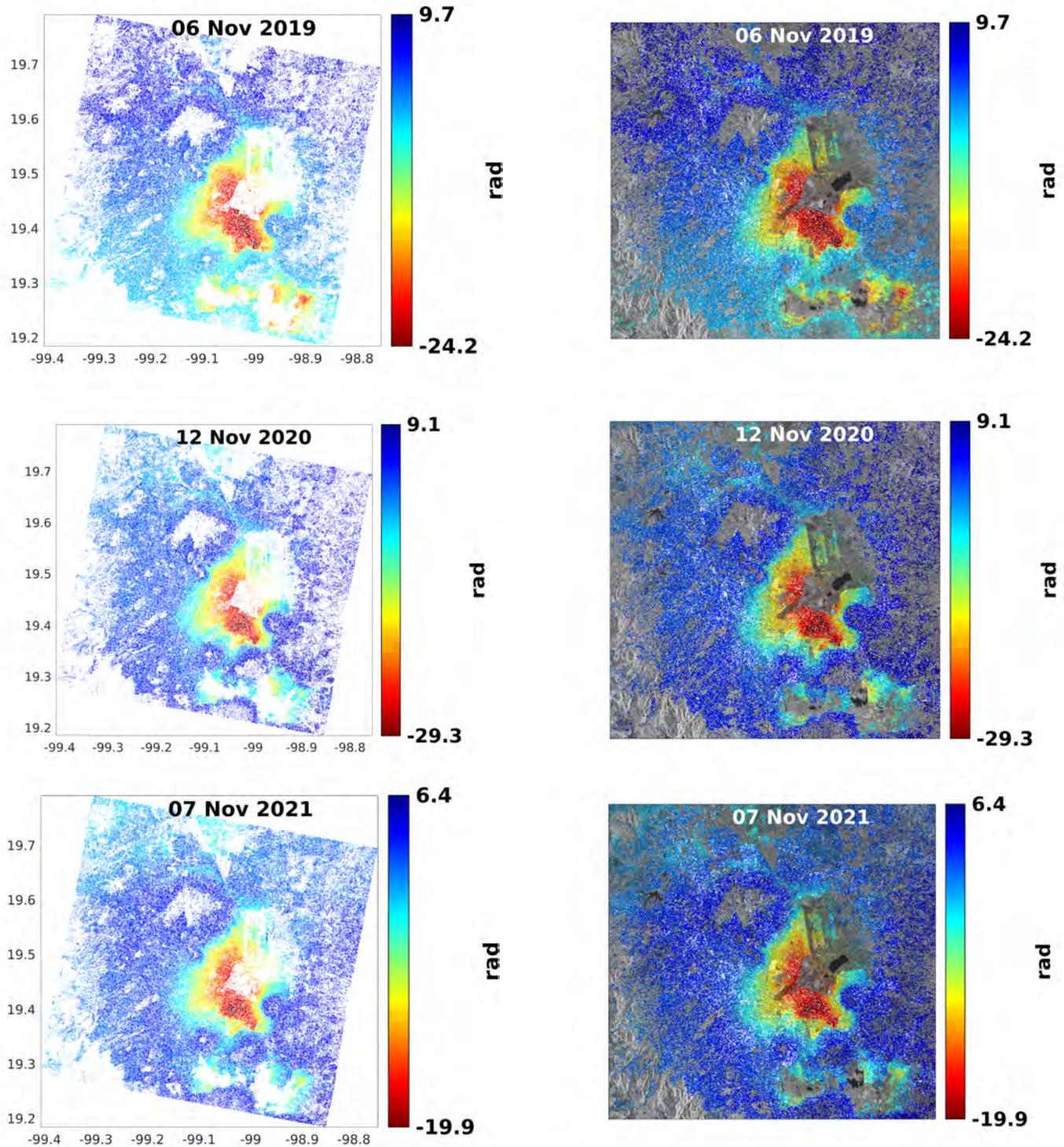


Figura 4.6: Fase desenrollada obtenida durante el procesamiento SAR (intervalos 2019, 2020, 2021). A la izquierda, las escenas se despliegan sobre un fondo blanco, mientras que a la derecha, sobre uno de amplitud media.

4.3. Estimación de Velocidad Media

Después del desenrollado de fase, el siguiente paso, en términos generales, consiste en estimar la velocidad media de desplazamiento de los dispersores persistentes PS. Este procedimiento se basa en la acumulación de los cambios de posición obtenidos a partir de la serie temporal. Para cada PS, se compara su fase en cada imagen esclava (E) con la imagen maestra (M), lo que permite calcular el desplazamiento acumulado en función del tiempo (Figura 4.7). La velocidad media se determina dividiendo este acumulado por el intervalo temporal cubierto por las imágenes analizadas, expresándose en milímetros por año. Es importante señalar que estos valores son relativos, dado que el procesamiento se fundamenta en un valor medio calculado a partir de los puntos más estables en el tiempo. Esto implica que no representan desplazamientos absolutos en relación con una referencia fija, como el nivel del mar. En su lugar, estos datos son comparativos, ya que reflejan cómo se comportan los desplazamientos de cada PS en relación con la velocidad media de toda la escena. En las Figuras 4.7 y 4.8 se presentan los resultados de estimación de velocidad media, con un producto generado para cada año teniendo en cuenta las características del enfoque PSInSAR.

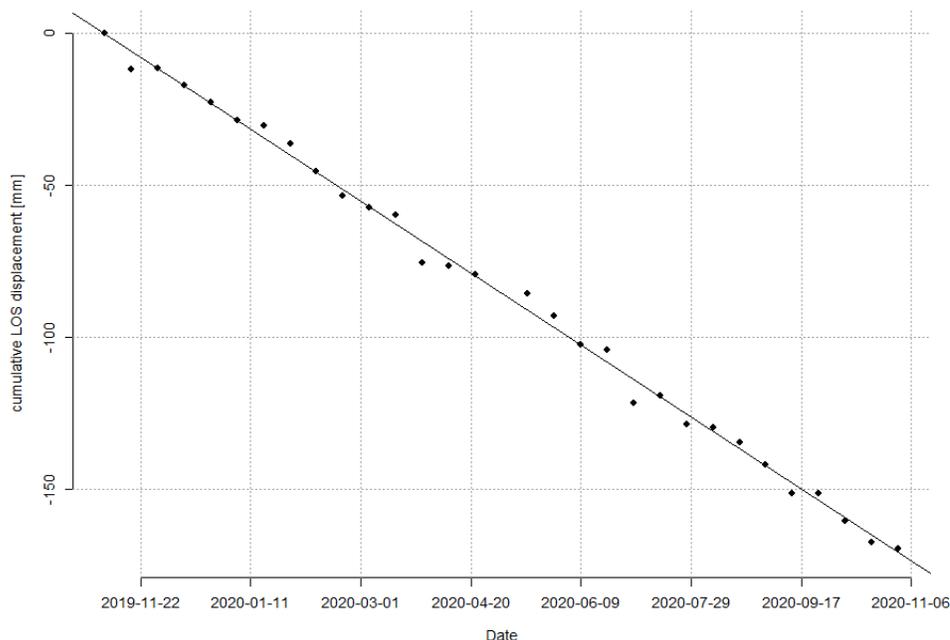


Figura 4.7: Desplazamiento vertical acumulado en LOS asociado a un determinado PS.

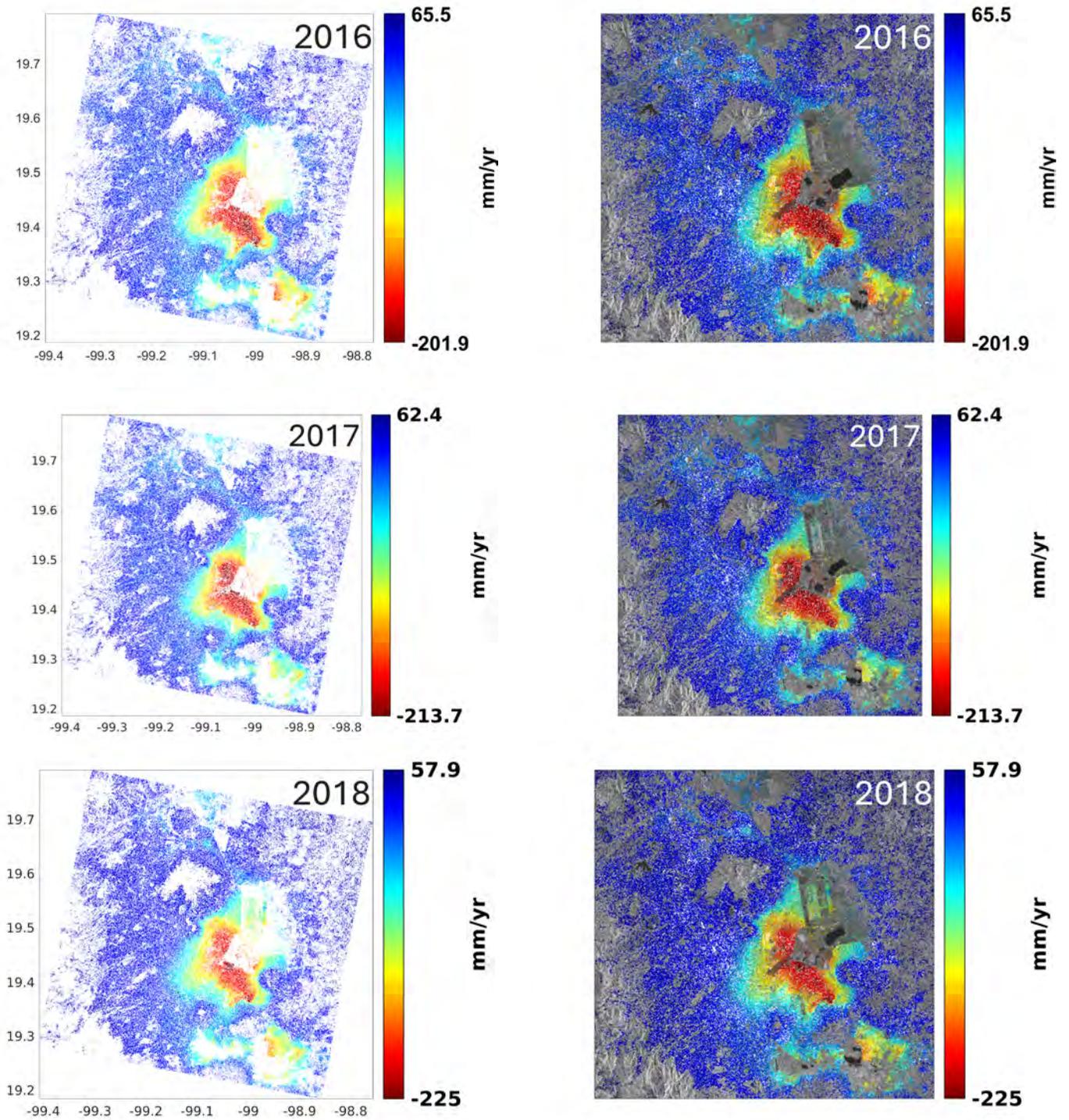


Figura 4.8: Velocidad media estimada durante el procesamiento SAR (intervalos 2016, 2017, 2018). Las escenas ubicadas a la izquierda se proyectan sobre fondo blanco, mientras que las de la derecha se presentan con un fondo de amplitud media.

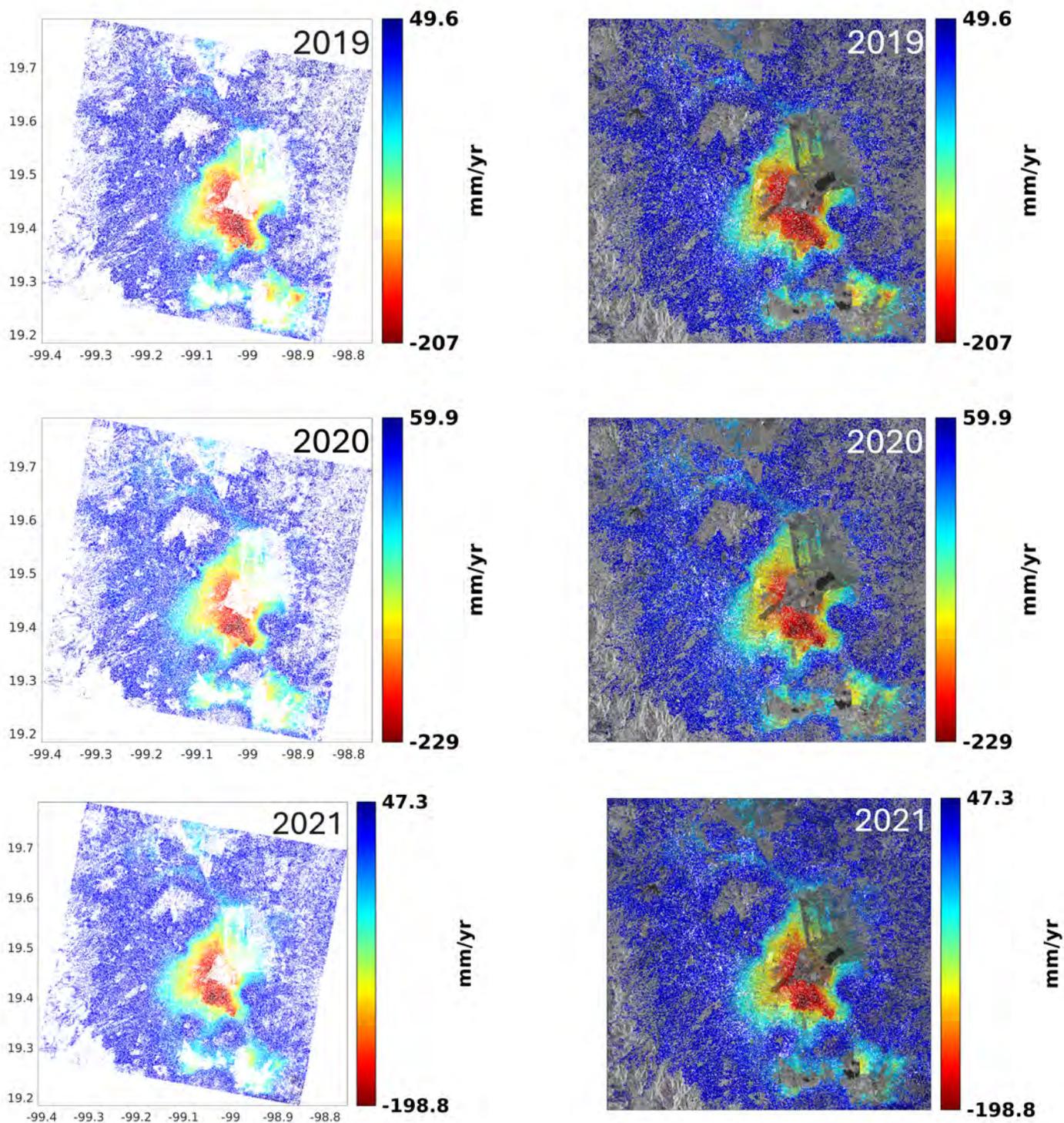
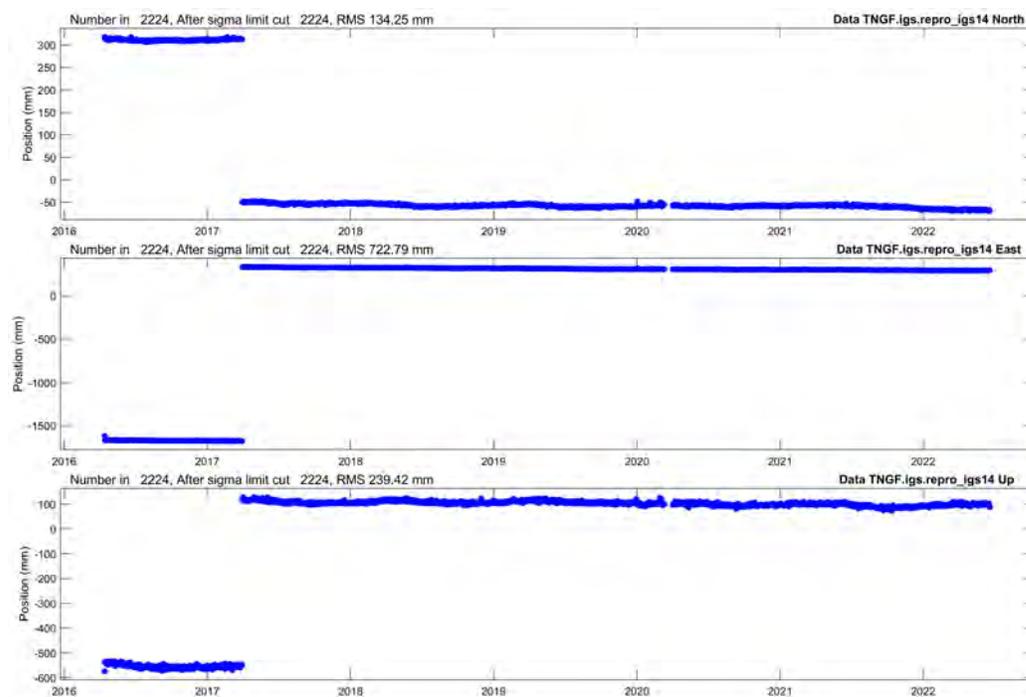


Figura 4.9: Velocidad media estimada durante el procesamiento SAR (intervalos 2019, 2020, 2021). Las escenas ubicadas a la izquierda se proyectan sobre fondo blanco, mientras que las de la derecha se presentan con un fondo de amplitud media.

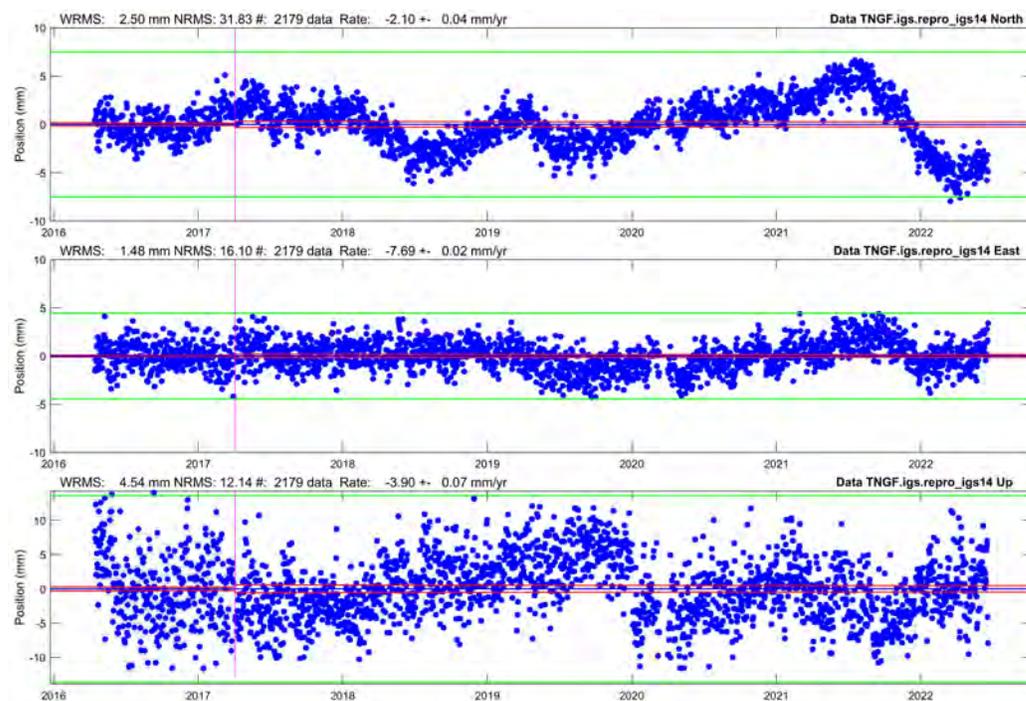
4.4. Procesamiento GNSS

La información generada por los sistemas GNSS proporciona soluciones de coordenadas diarias, las cuales, de acuerdo con el estado del arte, aseguran una precisión milimétrica. Mediante el análisis de series temporales, es posible detectar cambios en la posición espacial y calcular las velocidades de desplazamiento en las tres direcciones (norte, este y altura). Por lo general, la comparación entre los sistemas GNSS y SAR se realiza identificando puntos PS con propiedades de reflectividad constantes, localizados en la superficie del área de monitoreo, seguido del análisis de los valores registrados. Este trabajo se apoya en las estaciones de referencia TNGF y MMX1, que son las únicas situadas actualmente dentro del polígono de estudio y que disponen de datos compatibles con las imágenes de Sentinel-1. De este modo, las Figuras 4.10 y 4.11 muestran las series temporales de ambas estaciones en el intervalo considerado. En los gráficos superiores (a), se pueden observar las tendencias ajustadas que reflejan las variaciones en los desplazamientos para cada dirección. Por otro lado, los gráficos inferiores (b) exhiben los residuales menores a tres veces su desviación estándar, valores que se emplean para el cálculo de la velocidad y la incertidumbre en cada estación.

Como resultado, se ha determinado que en la componente vertical (up), que es la de mayor interés, la estación TNGF presenta una velocidad de $-3.90 \text{ mm} \pm 0.07 \text{ mm/año}$, mientras que para la estación MMX1, la velocidad calculada es de $-283.87 \text{ mm} \pm 0.13 \text{ mm/año}$. Aunque no se identifican puntos PS en el sitio de la estación TNGF mediante el sistema SAR, los valores cercanos oscilan entre 0 y 10 mm/año, mientras que en la estación MMX1 se registran valores del orden de 180 mm/año. Desde el punto de vista analítico, TNGF está ubicada en la región sur del área de estudio, donde los suelos son más estables, en contraste con MMX1, situada en el noreste del polígono, donde predominan suelos arcillosos y blandos, propensos a la subsidencia. Estos resultados coinciden con los datos del procesamiento GNSS, que revelan estabilidad en la primera estación y un incremento en el desplazamiento vertical en la segunda. De igual manera, el sistema SAR evidencia un patrón similar, aunque se observa una discrepancia en los valores de las velocidades de hundimiento en la estación MMX1, tema que se abordará con mayor profundidad en las conclusiones.

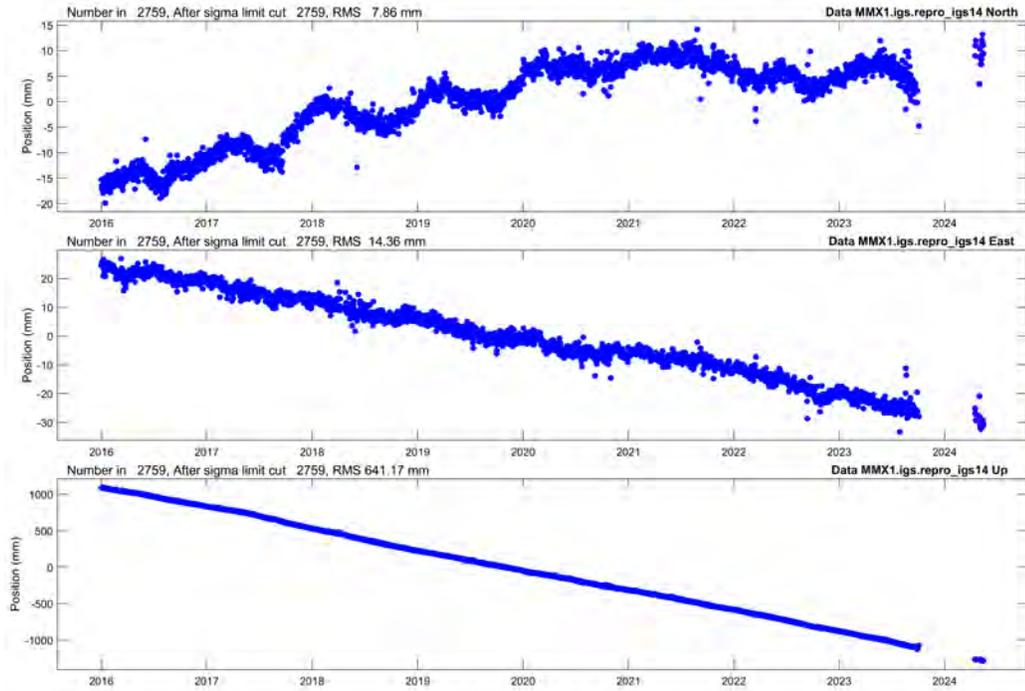


(a)

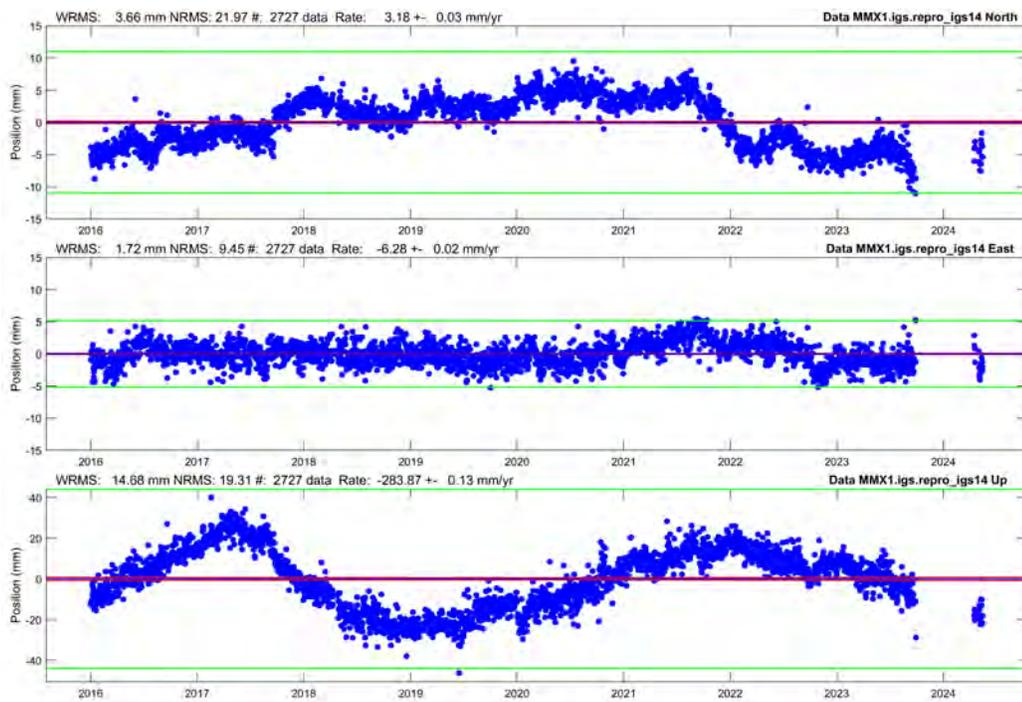


(b)

Figura 4.10: Procesamiento de series temporales en la estación TNGF para el intervalo 2016-2022. a) gráficos de tendencia. b) gráficos de velocidad e incertidumbre. Se presenta la componente vertical (up), con una velocidad calculada de -3.90 ± 0.07 mm/año.



(a)



(b)

Figura 4.11: Procesamiento de series temporales en la estación MMX1 para el intervalo 2016-2024. a) gráficos de tendencia. b) gráficos de velocidad e incertidumbre. Se presenta la componente vertical (up), con una velocidad calculada de $-283.87 \text{ mm} \pm 0.13 \text{ mm/año}$.

4.5. PSInSAR y Geoestadística

Al revisar trabajos pertinentes que abordan el estudio de la subsidencia mediante imágenes SAR, se ha determinado que una parte significativa presenta interpretaciones ambiguas en los resultados. Si bien ofrecen productos generados, la claridad en la distribución espacial de la subsidencia es limitada y a menudo se asume de manera implícita, lo que puede resultar confuso para quienes no dominan el tema de InSAR. Esta situación podría atribuirse tanto a la complejidad técnica del método como a la falta de consenso en los criterios de análisis. En este sentido, y como se describe en la Sección 3.5, este trabajo de investigación implementa el procedimiento PSInSAR en conjunto con metodología geoestadística, proporcionando así una representación explícita de la variabilidad espacial del fenómeno de subsidencia. Derivado de la integración de estos enfoques, se generaron mapas que ilustran las velocidades de hundimiento para los distintos intervalos evaluados (Figuras 4.12 a 4.17). En estos mapas, las capas que reflejan los patrones de subsidencia se visualizan sobre un sombreado de relieve del terreno, el cual ha sido mostrado anteriormente. A modo de referencia, se presenta la división política entre la Ciudad de México y el Estado de México, destacando el polígono del área de estudio.

Con base en los resultados obtenidos, se observa que la distribución de los patrones de desplazamiento vertical coincide con estudios discutidos en este documento, los cuales destacan las ubicaciones con las tasas de subsidencia más significativas. Estas zonas se localizan específicamente en el sur y oriente del Valle de México, incluyendo sectores como Xochimilco, Chalco y Texcoco. Por otro lado, los lugares con configuraciones menores se encuentran cerca de las partes altas que circundan el valle. En este sentido, por medio de las imágenes SAR se logra corroborar lo expuesto en Juárez y col. (2021), evidenciando la correlación existente entre las tasas de subsidencia y los espesores de arcilla mediante la identificación de estos lugares. No obstante, es importante destacar que estos valores de velocidades en cm/año, obtenidos a través del radar, presentan diferencias en algunas áreas con respecto a las estimaciones derivadas de otras técnicas, como la nivelación entre BN. El radar ha registrado un máximo de hasta 25 cm/año, mientras que la nivelación indica valores de hasta 40 cm/año. Esta discrepancia será analizada en detalle en las conclusiones.

Velocidades de Hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística

2016 - 2017

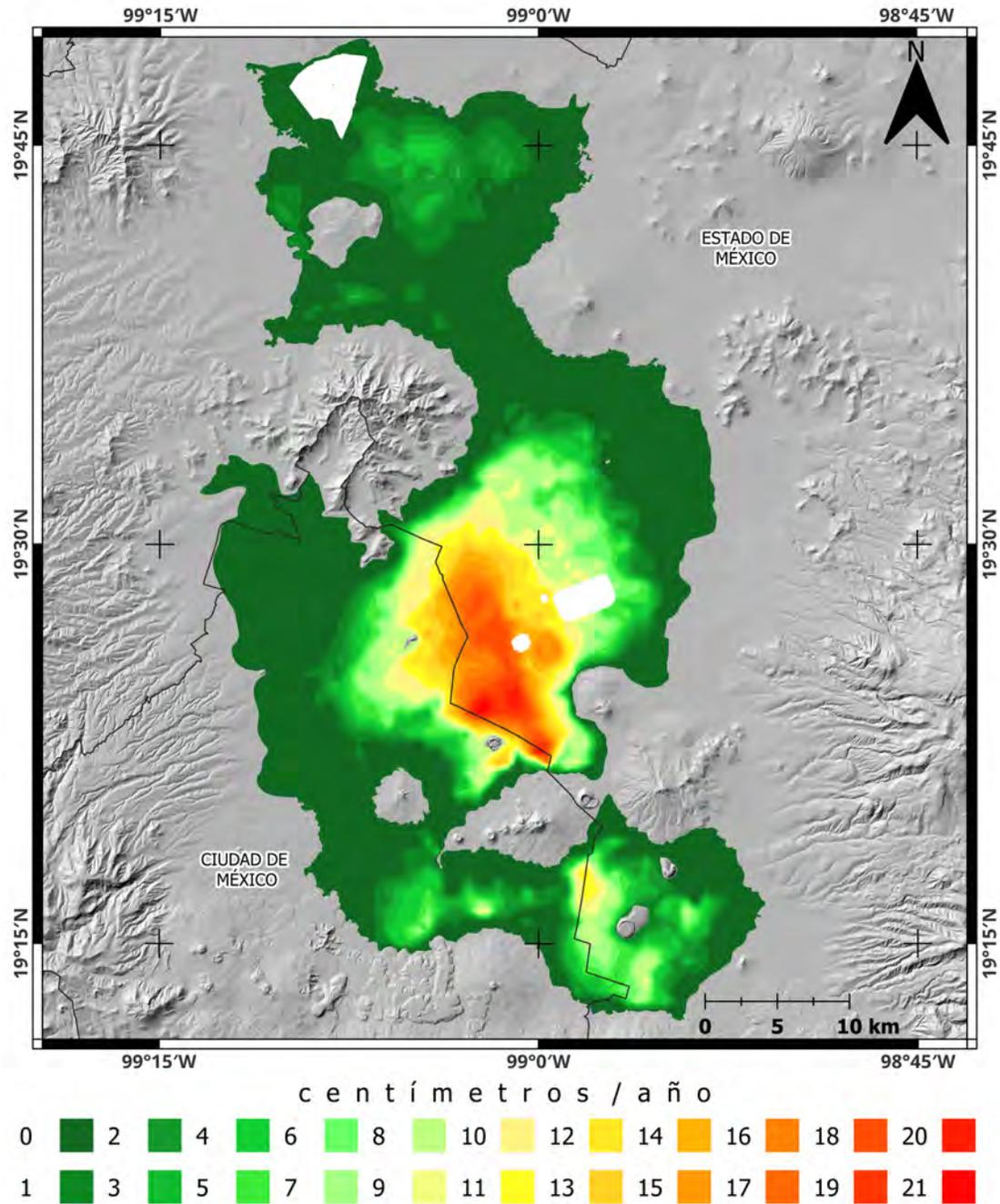


Figura 4.12: Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2016-2017.

**Velocidades de Hundimiento en el Valle de México a través de
PSInSAR y Geoestadística
2017 - 2018**

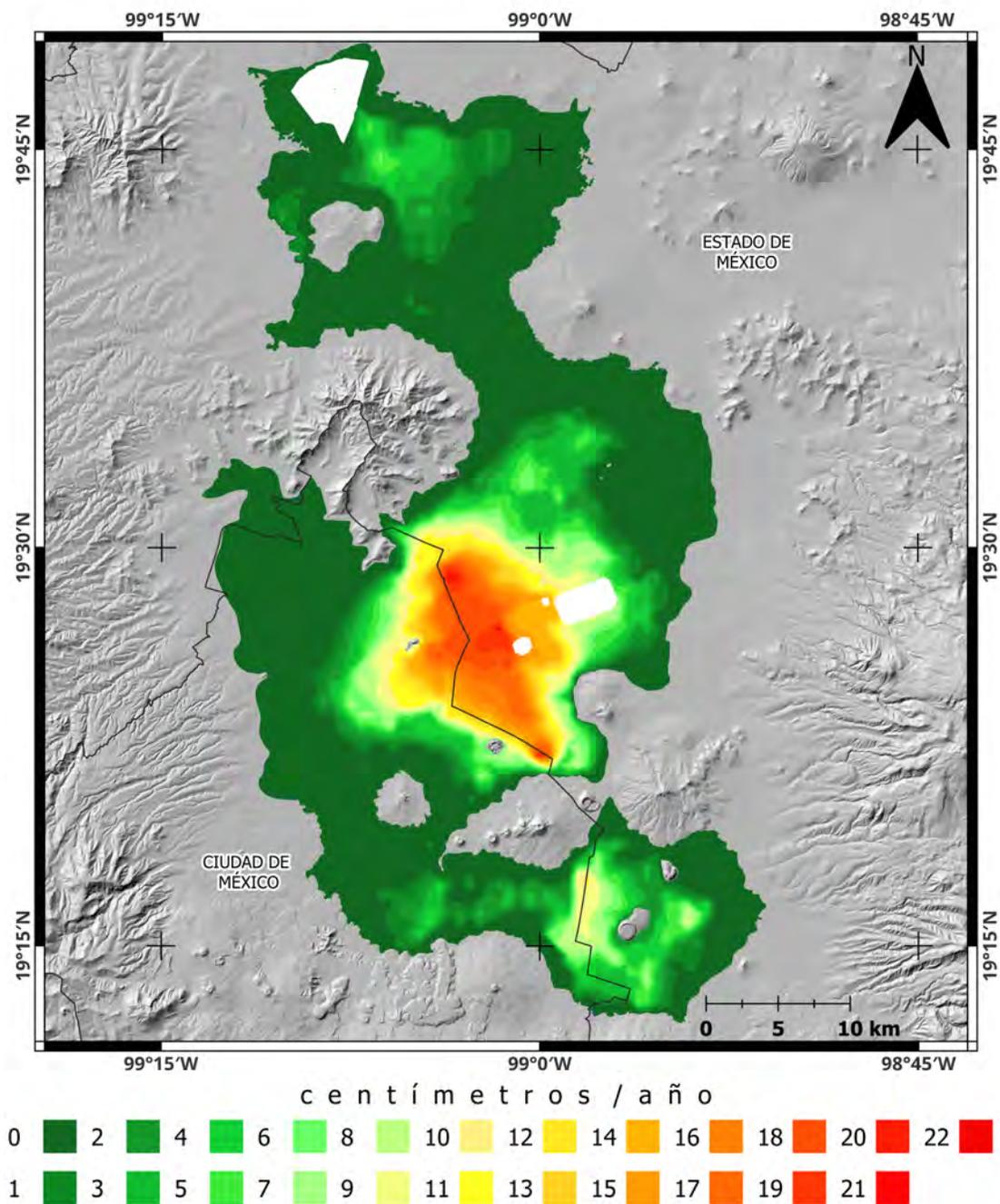


Figura 4.13: Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2017-2018.

Velocidades de Hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística
2018 - 2019

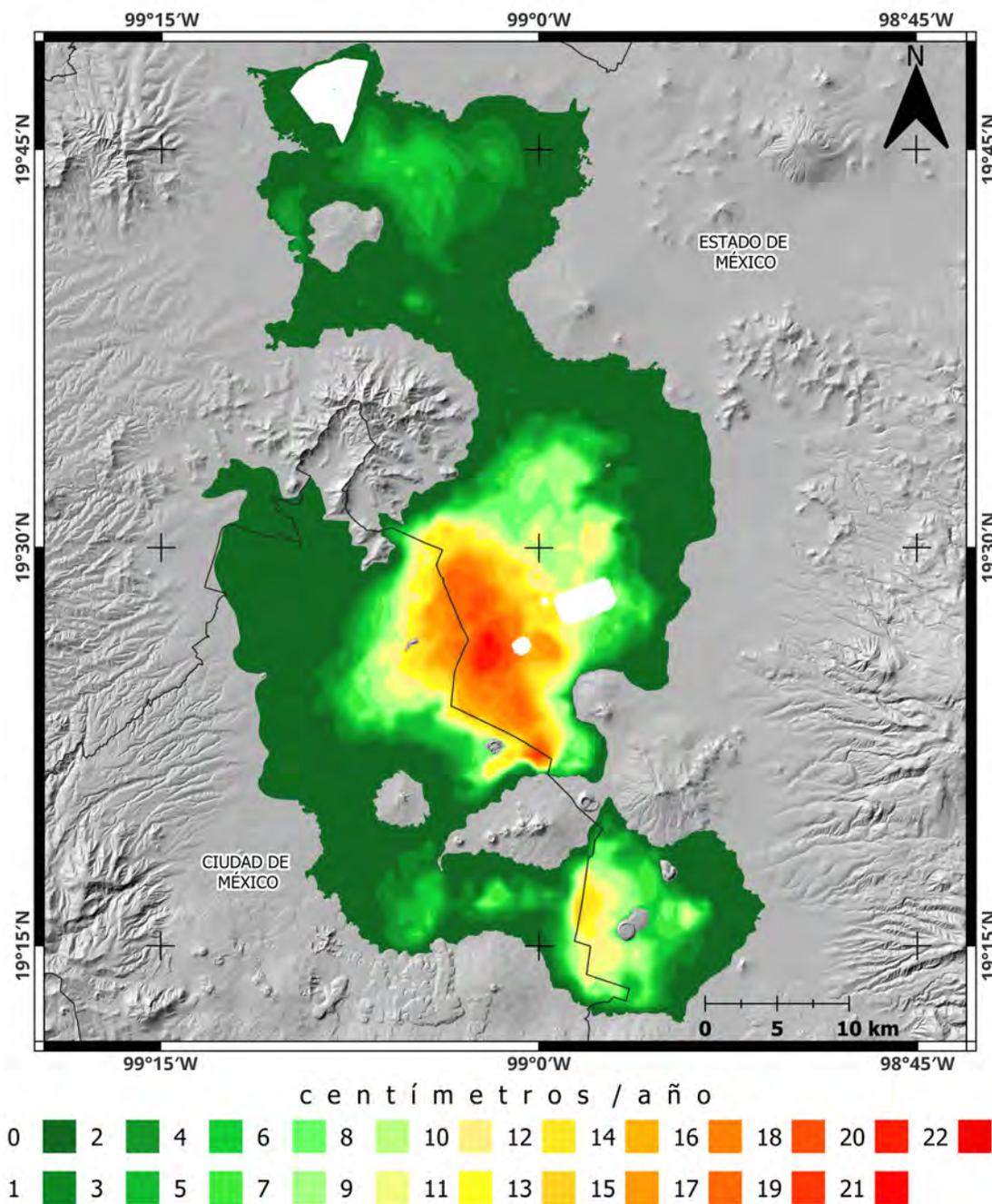


Figura 4.14: Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2018-2019.

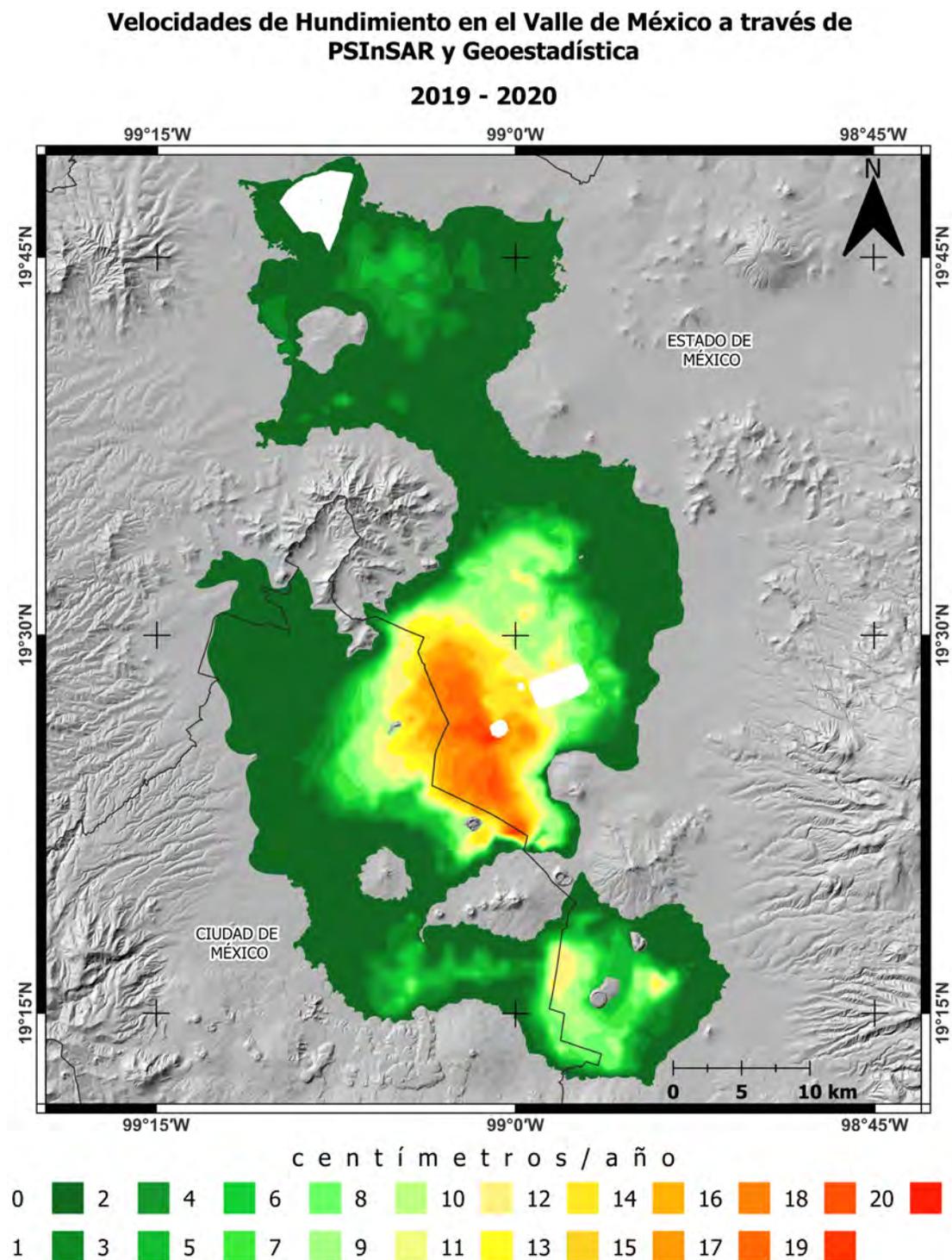


Figura 4.15: Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2019-2020.

Velocidades de Hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística

2020 - 2021

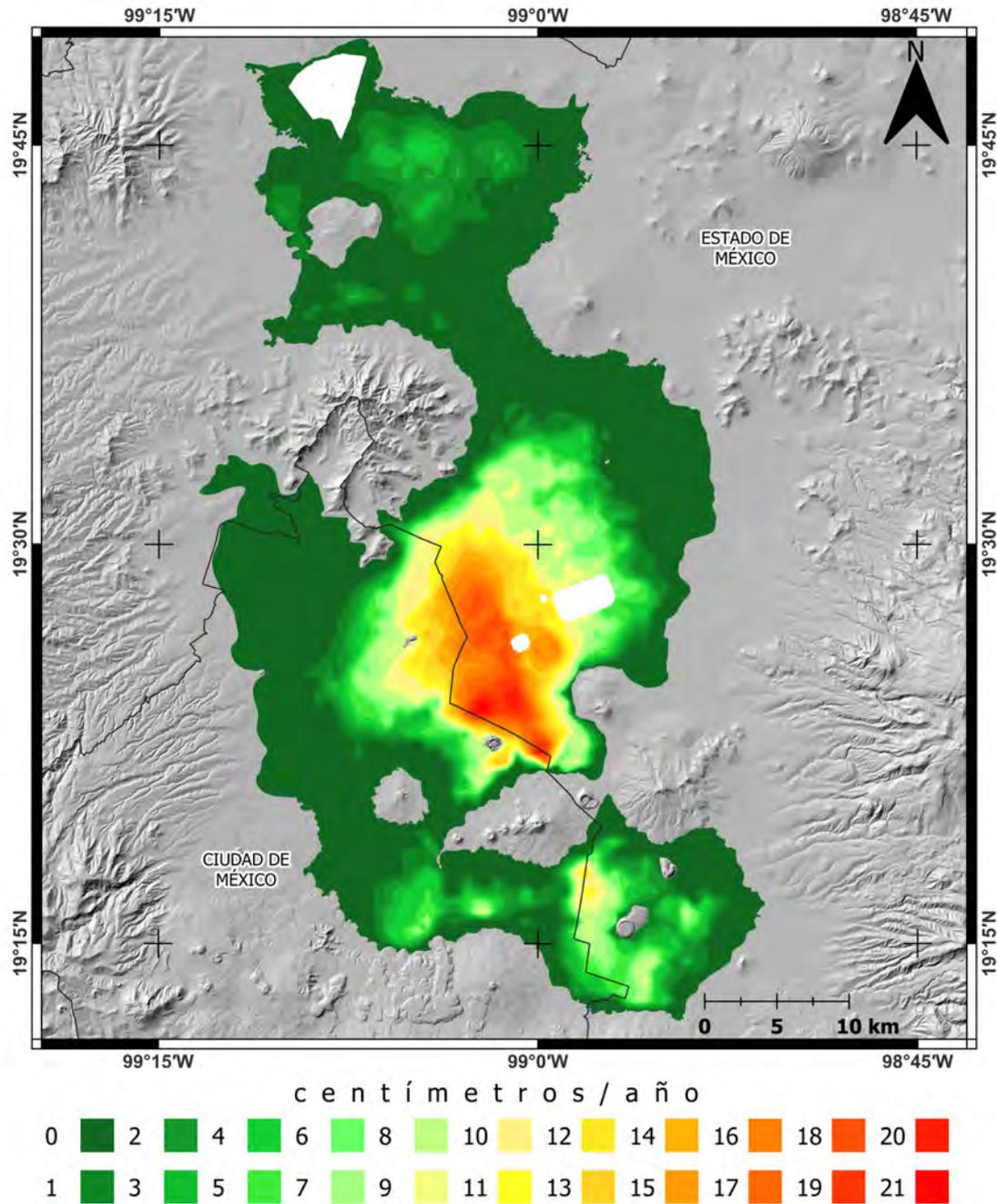


Figura 4.16: Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2020-2021.

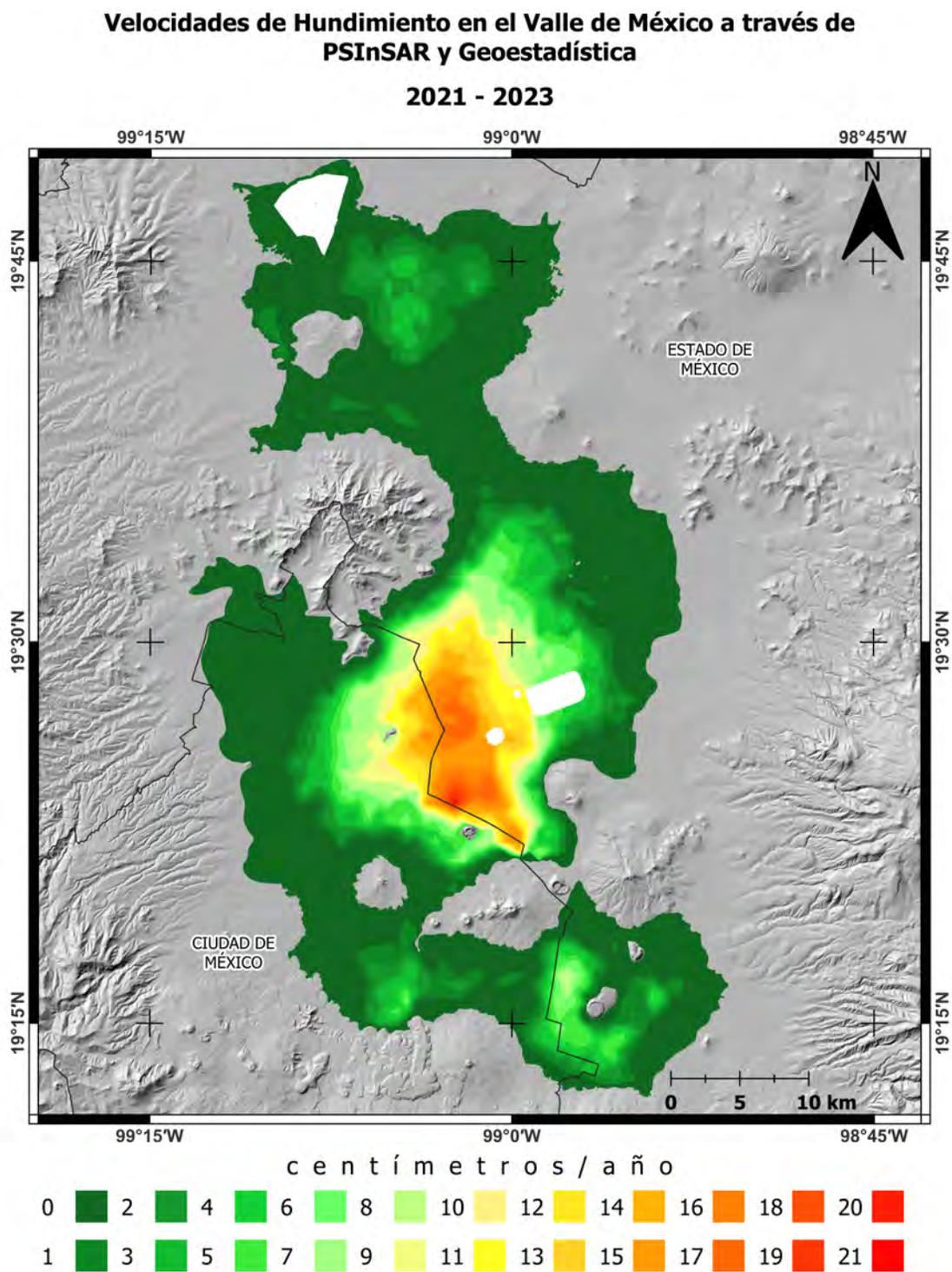


Figura 4.17: Mapa de velocidades de hundimiento en el Valle de México a través de PSInSAR y Geoestadística periodo 2021-2023.

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Conclusiones

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo principal estudiar la subsidencia que se registra en las zonas propensas del Valle de México, mediante la implementación de Interferometría de Radar (InSAR), con el propósito de identificar los cambios verticales ocurridos durante los últimos años. El insumo principal del estudio se compuso de 167 imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR) de libre acceso, recopiladas por el sensor C-SAR de la plataforma satelital Sentinel-1, operando en modo IW, formato SLC, polarización dual, resolución espacial 5 x 20 metros en rango y azimut, ciclo de repetición de 12 días, órbita descendente, paso 143 y cuadro 526. Estas imágenes fueron procesadas mediante la técnica de identificación de reflectores puntuales de Dispersión Persistentes (PSInSAR), utilizando el software de código abierto StaMPS. Las escenas se analizaron en intervalos anuales, abarcando del 2016 al 2023, y como complemento a la investigación, se incorporaron también las estaciones de monitoreo permanente MMX1 y TNGF, situadas dentro y en las proximidades del polígono de estudio. Derivado del procesamiento, se determinó la velocidad de hundimiento y su distribución espacial, empleando interpolación mediante metodología geoestadística.

Con base en los resultados del estudio, se concluye que las imágenes capturadas por SAR tienen la capacidad y el potencial para identificar patrones de desplazamiento vertical en regiones afectadas por subsidencia. Los resultados son consistentes con investigaciones previas que destacan los lugares con mayores tasas de subsidencia, los cuales se asocian a la presencia de elevados espesores de arcilla

en el subsuelo. Las zonas que muestran un patrón de desplazamiento significativo se localizan en el sur y oriente del Valle de México, abarcando regiones como Xochimilco, Chalco y Texcoco. Sin embargo, se observa una discrepancia entre los valores estimados con SAR y los obtenidos a partir de datos de nivelaciones entre Bancos de Nivel (BN). Por ejemplo, si retomamos los mapas de velocidades de hundimiento que se presentan en el Capítulo 3 de este documento, elaborados a partir de nivelaciones, se evidencia que en algunos sitios el valor máximo se aproxima a los 40 cm/año (Figuras 3.4 y 3.5). A través de las imágenes de radar, se logran detectar velocidades de hasta 25 cm/año, lo que indica una diferencia en la magnitud de los valores registrados. Estas discrepancias pueden atribuirse a las particularidades propias de cada técnica, pero es pertinente destacar que entre los métodos geodésicos, la nivelación es reconocida como uno de los más robustos para estudios de desplazamientos verticales. En este sentido, este enfoque se mantiene como un método altamente confiable, convirtiéndose en un estándar de referencia para otras técnicas de monitoreo, razón por la cual se aplica en este trabajo como método de comparación. Por otro lado, es necesario considerar las limitaciones específicas del SAR, entre las cuales se incluyen la resolución espacial y temporal de las escenas, las distorsiones topográficas, la variabilidad en las características reflectivas del radar, así como la pérdida de coherencia, especialmente ocasionada por cambios en la vegetación y el contenido de humedad del suelo. Además, otros factores como la geometría de adquisición, los efectos atmosféricos y los saltos en la fase de los interferogramas, lo cual se ha demostrado que puede influir en la calidad de las observaciones.

Con respecto al enfoque de procesamiento por PSInSAR, se identifica una clara consistencia en la firma espectral de las zonas urbanas, lo cual es un resultado esperado debido a la naturaleza propia de esta técnica. Esto es particularmente evidente en una sección de la Ciudad de México, donde los píxeles exhiben una reflectividad uniforme y constante en todas las escenas, siendo la infraestructura la que contribuye significativamente a mantener una alta densidad de Puntos Persistentes (PS). No obstante, es importante considerar que la dimensión del polígono de estudio no solo incluye la parte urbana, sino que también abarca múltiples entornos, especialmente aquellos con vegetación y humedales. Estos lugares suelen inducir variaciones significativas en la señal radar, lo cual se asocia a cambios estacionales y condiciones ambientales. Por ello, en el procesamiento SAR, se seleccionan únicamente los píxeles candidatos a PS, estimando con mayor precisión

la coherencia temporal de cada uno y descartando aquellos que se consideran ruidosos. Para dar mayor claridad a esta explicación, la Figura 5.1 muestra las áreas donde no hay cobertura de datos, que corresponden a las zonas donde el radar no opera de manera óptima debido a la dispersión y absorción de la señal. Como se observa, la capa denominada FRON abarca la totalidad del polígono de estudio, con un área de 1,326,229 km² (100 %). En cambio, las capas clasificadas bajo la clave ZC abarcan 609,500 km² (46 %), que indican estos sectores donde no se dispone de información. De este modo, se realizó un cálculo que resta la superficie de los polígonos ZC del área total de FRON, determinando que el SAR solo opera en el 54 % del área de estudio. Esto significa que casi la mitad de la superficie no puede ser medida adecuadamente por esta técnica, lo que subraya la necesidad de complementar el estudio con otras alternativas.

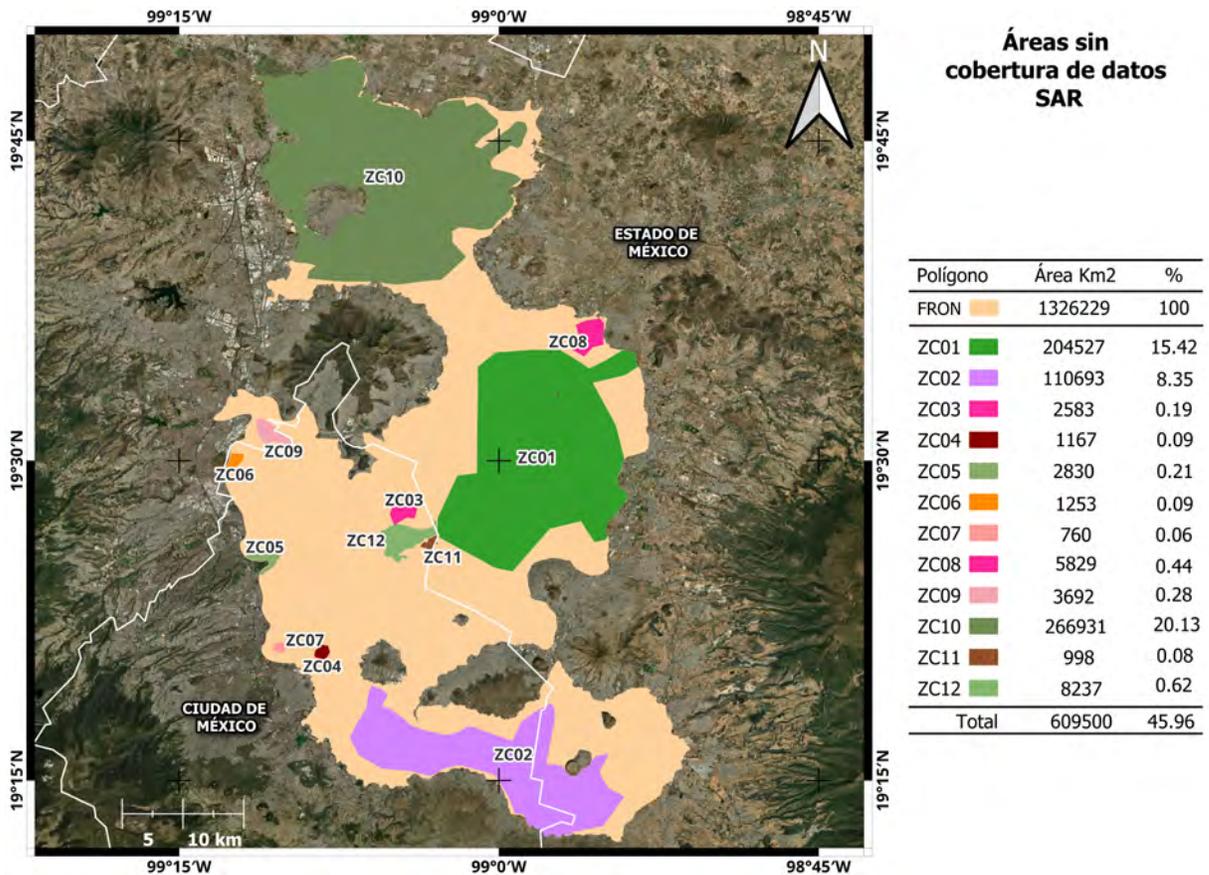


Figura 5.1: Áreas sin cobertura de datos SAR dentro del polígono de estudio.

En cuanto a los resultados obtenidos a partir de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS), en la componente vertical (up), que es la relevante en

este estudio, TNGF registra una velocidad de hundimiento de 0.39 cm/año. A pesar de que el radar no identifica puntos PS con reflectividad constante en esa ubicación específica, los valores cercanos oscilan entre 0 y 1 cm/año. En este sentido, ambas técnicas ofrecen resultados bastante coherentes, lo que se alinea con la ubicación de esa zona al sur del polígono de estudio, donde los suelos son más estables y la subsidencia prácticamente no tiene impacto. Por otra parte, MMX1 señala una velocidad significativamente mayor, de 28 cm/año, mientras que los valores reportados por el radar se encuentran en el orden de 18 cm/año. Esta clara diferencia de 10 cm entre ambas técnicas sugiere que el radar podría estar subestimando la magnitud de la subsidencia en esta región, caracterizada por suelos predominantemente arcillosos que experimentan una subsidencia continua. Diversos factores podrían contribuir a esta situación, incluyendo la variabilidad de los datos de reflectividad y la naturaleza de los materiales del suelo, los cuales pueden afectar la capacidad del sistema para detectar con precisión los cambios en la superficie del terreno. De igual forma, estudios sugieren que los resultados del SAR tienden a ser un tanto menores que aquellos obtenidos por los sistemas GNSS. Es importante señalar que este trabajo consideró únicamente dos estaciones de referencia, dado que actualmente son las únicas disponibles dentro y cerca del polígono de estudio. La instalación de nuevas estaciones en diversas zonas en el Valle de México generará una mayor cantidad de resultados, enriqueciendo el análisis y fortaleciendo ambas metodologías aplicadas.

Respecto a la aplicación de la metodología geoestadística, se puede concluir que constituye una herramienta apropiada para analizar los datos derivados de PSInSAR de manera práctica y efectiva. Este enfoque permitió ampliar el alcance del estudio al estimar valores en áreas sin cobertura de mediciones experimentales directas. Si bien la precisión de los resultados fue producto de la modelización de la variabilidad espacial, representada a través del semivariograma, en términos generales, la calidad de las predicciones depende de factores como la cantidad y confiabilidad de las mediciones disponibles, la distribución de los datos en el dominio de estudio, y la correcta definición tanto de las distancias de influencia como del modelo utilizado. De este modo, se mejoró significativamente la cobertura espacial y se generaron mapas de velocidades de hundimiento, proporcionando una representación detallada de los desplazamientos verticales. Es importante reconocer que el Valle de México se distingue por tener un suelo con características excepcionales, lo que convierte su estudio mediante diversas metodologías en una contribución relevante. Aunque los sistemas GNSS y los instrumentos de nivelación ofrecen

un alto grado de precisión, su implementación presenta limitaciones debido a los elevados costos, la exigente demanda de trabajo de campo y su capacidad para proporcionar información de manera puntual y aislada. En este contexto, a pesar de las desventajas señaladas del método InSAR, se debe destacar su principal ventaja; la capacidad de cubrir grandes extensiones de terreno de forma remota. Por lo tanto, los resultados alcanzados por esta técnica son prometedores y exponen un gran potencial que no debe ser subestimado en futuras investigaciones.

La subsidencia tiene un considerable impacto económico y social, ya que afecta una vasta extensión territorial que abarca diversas entidades de la República Mexicana. Esto trae consigo efectos cada vez más pronunciados en la sociedad y la administración pública, incidiendo en las finanzas públicas y privadas, el patrimonio, las necesidades de protección civil en las zonas afectadas, y la distribución de responsabilidades y funciones entre los tres órdenes de gobierno. Para mejorar la evaluación de la subsidencia, es fundamental emplear un criterio y juicio ingenieril que permita involucrar a todas las mediciones geodésicas satelitales que emanan de la Geodesia Espacial y con ello, resolver las dificultades que tienen tanto los métodos y técnicas de la geodesia terrestre clásica (nivelaciones geométricas de precisión, triangulaciones, entre otras) que se empleaban en el pasado. La técnica InSAR por sí sola, no es capaz, de resolver de forma satisfactoria la evaluación de la subsidencia en el Valle de México debido a la cubierta vegetal y a los humedales alojados en algunas zonas. Sin embargo, para resolver las dificultades, se puede adicionar las tecnologías de los sistemas GNSS (InSAR + GNSS) y con ello, adquirir una mayor cobertura espacial y temporal. La continuidad en la voluntad para llevar a cabo estos estudios y en la movilización de los medios requeridos para su realización resultará esencial para que se logren resultados cada vez más satisfactorios.

5.2. Trabajos Futuros y Recomendaciones

En el presente trabajo de investigación se utilizaron únicamente imágenes SAR de los satélites Sentinel-1. Para estudios futuros, se recomienda incorporar datos provenientes de otras plataformas satelitales, accesibles mediante acuerdos institucionales o programas académicos. Esto permitirá trabajar con resoluciones más altas y explorar una mayor variedad de modos de adquisición.

Este estudio se limita a la evaluación de desplazamientos en la componente vertical, al igual que muchos otros en el ámbito. En este sentido, resulta pertinente avanzar en la adopción de metodologías que posibiliten la estimación de desplazamientos en dos dimensiones, integrando tanto la dirección horizontal (este-oeste) como la vertical, a partir de escenas adquiridas mediante trayectorias ascendentes y descendentes.

Por último, dado el elevado costo computacional del procesamiento SAR, es necesario desarrollar métodos que optimicen las etapas de análisis y manejo de datos. Además, la incorporación de algoritmos de aprendizaje automático, impulsada por los avances en Inteligencia Artificial (IA), será determinante para futuras investigaciones, con el objetivo de optimizar el estudio de los desplazamientos causados por subsidencia.

Apéndice A.
Plataformas Satelitales de Radar

Tabla A.1: Plataformas satelitales de radar.

Satélite	Agencia	Banda	Resolución espacial (m)	Ciclo de repetición	Operatividad
Seasat	NASA	L	25	17 días	(1978 - 1978)
JERS-1	JAXA	L	18	44 días	(1992 - 1998)
ERS-1	ESA	X	25	35 días	(1991 - 2000)
ERS-2	ESA	X	25	35 días	(1995 - 2011)
RADARSAT-1	CSA	C	8-100	24 días	(1995 - 2013)
Envisat	ESA	C	12.5	35 días	(2002 - 2012)
ALOS-1	JAXA	L	10-100	46 días	(2006 - 2011)
TerraSAR-X	DLR	X	1-16	11 días	(2007 -)
COSMO-SkyMed-1	ASI	X	1-100	16 días	(2007 -)
RADARSAT-2	CSA	C	3-100	24 días	(2007 -)
COSMO-SkyMed-2	ASI	X	1-100	16 días	(2007 -)
TanDEM-X	DLR	L	1-16	11 días	(2010 -)
RISAT-1	ISRO	C	1-50	25 días	(2012 - 2016)
COSMO-SkyMed-3	ASI	X	1-100	16 días	(2019 -)
COSMO-SkyMed-4	ASI	X	1-100	16 días	(2019 -)
Sentinel-1A	ESA	C	5-40	12 días	(2014 -)
KOMPSAT-5	KARI	X	1-20	28 días	(2013 -)
ALOS-2	JAXA	L	1-100	30 días	(2014 -)
Sentinel-1B	ESA	C	5-40	12 días	(2016 -)
Gaofen-3	CNSA	C	1-500	29 días	(2016 -)
SAOCOM-1A	CONAE	L	7-100	16 días	(2018 -)
PAZ	INTA	X	1-16	11 días	(2018 -)
NovaSAR-1	SSTL	S	6-400	16 días	(2018 -)
Asnaro-2	JAXA	X	1-16	12 días	(2018 -)
SAOCOM-1B	CONAE	L	7-100	12 días	(2020 -)
ICEYE	ESA	X	5-10	17 días	(2018 -)
NISAR	ISRO, NASA	L, S	3-10	12 días	Programado para 2024
Tandem-L	DLR	L	7	16 días	Programado para 2024
ALOS-4	JAXA	L	10	12 días	No disponible

Apéndice B.
ID de Imágenes SAR Adquiridas

Tabla B.1: Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2016.

Número	ID de Escena	Fecha
1	S1A_IW_SLC__1SSV_20161109T122533_20161109T122559_013865_0164D3_936C	09/11/2016
2	S1A_IW_SLC__1SSV_20161203T122532_20161203T122559_014215_016F9B_B990	03/12/2016
3	S1A_IW_SLC__1SSV_20161227T122531_20161227T122558_014565_017A9B_FF6F	27/12/2016
4	S1A_IW_SLC__1SSV_20170120T122529_20170120T122556_014915_01856C_17FA	20/01/2017
5	S1A_IW_SLC__1SSV_20170213T122529_20170213T122556_015265_019031_B5CC	13/02/2017
6	S1A_IW_SLC__1SDV_20170225T122529_20170225T122556_015440_019589_15D7	25/02/2017
7	S1A_IW_SLC__1SDV_20170309T122529_20170309T122556_015615_019AD5_4767	09/03/2017
8	S1A_IW_SLC__1SDV_20170321T122529_20170321T122556_015790_01A00C_76C7	21/03/2017
9	S1A_IW_SLC__1SDV_20170402T122529_20170402T122556_015965_01A53C_481F	02/04/2017
10	S1A_IW_SLC__1SDV_20170414T122530_20170414T122557_016140_01AA90_C10C	14/04/2017
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20170426T122530_20170426T122557_016315_01AFEB_D5CA	26/04/2017
12	S1A_IW_SLC__1SDV_20170508T122531_20170508T122558_016490_01B53B_7360	08/05/2017
13	S1A_IW_SLC__1SDV_20170520T122532_20170520T122559_016665_01BA94_DEC9	20/05/2017
14	S1A_IW_SLC__1SDV_20170601T122532_20170601T122559_016840_01BFF9_0F11	01/06/2017
15	S1A_IW_SLC__1SDV_20170613T122533_20170613T122600_017015_01C568_6D97	13/06/2017
16	S1A_IW_SLC__1SDV_20170625T122534_20170625T122601_017190_01CABF_8CC7	25/06/2017
17	S1A_IW_SLC__1SDV_20170707T122534_20170707T122601_017365_01D000_6CFA	07/07/2017
18	S1A_IW_SLC__1SDV_20170719T122535_20170719T122602_017540_01D55B_495C	19/07/2017
19	S1A_IW_SLC__1SDV_20170731T122536_20170731T122603_017715_01DAB5_642F	31/07/2017
20	S1A_IW_SLC__1SDV_20170812T122536_20170812T122603_017890_01E005_EC40	12/08/2017
21	S1A_IW_SLC__1SDV_20170824T122537_20170824T122604_018065_01E54F_7DAF	24/08/2017
22	S1A_IW_SLC__1SDV_20170905T122538_20170905T122604_018240_01EAA3_B28A	05/09/2017
23	S1A_IW_SLC__1SDV_20170917T122538_20170917T122605_018415_01F017_2C3F	17/09/2017
24	S1A_IW_SLC__1SDV_20170929T122538_20170929T122605_018590_01F56D_AB19	29/09/2017
25	S1A_IW_SLC__1SDV_20171011T122539_20171011T122605_018765_01FABD_3E95	11/10/2017
26	S1A_IW_SLC__1SDV_20171023T122539_20171023T122606_018940_02001F_52F3	23/10/2017

Tabla B.2: Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2017.

Número	ID de Escena	Fecha
1	S1A_IW_SLC__1SDV_20171104T122539_20171104T122606_019115_020575_95D3	04/11/2017
2	S1A_IW_SLC__1SDV_20171116T122538_20171116T122605_019290_020AEA_92E8	16/11/2017
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20171128T122538_20171128T122605_019465_021073_0C3D	28/11/2017
4	S1A_IW_SLC__1SDV_20171210T122537_20171210T122604_019640_0215E9_703B	10/12/2017
5	S1A_IW_SLC__1SDV_20171222T122537_20171222T122604_019815_021B4B_0B0B	22/12/2017
6	S1A_IW_SLC__1SDV_20180103T122536_20180103T122603_019990_0220D0_11F4	03/01/2018
7	S1A_IW_SLC__1SDV_20180115T122536_20180115T122603_020165_02265C_5BD2	15/01/2018
8	S1A_IW_SLC__1SDV_20180127T122536_20180127T122603_020340_022BE7_7585	27/01/2018
9	S1A_IW_SLC__1SDV_20180220T122535_20180220T122602_020690_023710_2B24	20/02/2018
10	S1A_IW_SLC__1SDV_20180304T122535_20180304T122602_020865_023C9A_F546	04/03/2018
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20180316T122535_20180316T122602_021040_024227_6246	16/03/2018
12	S1A_IW_SLC__1SDV_20180328T122536_20180328T122603_021215_0247B7_AB02	28/03/2018
13	S1A_IW_SLC__1SDV_20180409T122536_20180409T122603_021390_024D37_AEA6	09/04/2018
14	S1A_IW_SLC__1SDV_20180421T122536_20180421T122603_021565_0252A8_F21B	21/04/2018
15	S1A_IW_SLC__1SDV_20180503T122537_20180503T122604_021740_025829_0F60	03/05/2018
16	S1A_IW_SLC__1SDV_20180515T122538_20180515T122604_021915_025DC6_1A0C	15/05/2018
17	S1A_IW_SLC__1SDV_20180620T122540_20180620T122607_022440_026E28_03AD	20/06/2018
18	S1A_IW_SLC__1SDV_20180702T122540_20180702T122607_022615_027340_84A8	02/07/2018
19	S1A_IW_SLC__1SDV_20180714T122541_20180714T122608_022790_02787B_9B8E	14/07/2018
20	S1A_IW_SLC__1SDV_20180726T122542_20180726T122609_022965_027E01_42CA	26/07/2018
21	S1A_IW_SLC__1SDV_20180807T122543_20180807T122610_023140_028379_E2FF	07/08/2018
22	S1A_IW_SLC__1SDV_20180819T122543_20180819T122610_023315_028925_897F	19/08/2018
23	S1A_IW_SLC__1SDV_20180831T122544_20180831T122611_023490_028EB4_726F	31/08/2018
24	S1A_IW_SLC__1SDV_20180912T122544_20180912T122611_023665_02944B_7DFB	12/09/2018
25	S1A_IW_SLC__1SDV_20180924T122545_20180924T122612_023840_029A00_AB0A	24/09/2018
26	S1A_IW_SLC__1SDV_20181006T122545_20181006T122612_024015_029FB7_FEAC	06/10/2018
27	S1A_IW_SLC__1SDV_20181018T122545_20181018T122612_024190_02A56D_DFB6	18/10/2018
28	S1A_IW_SLC__1SDV_20181030T122545_20181030T122612_024365_02AB0D_54D7	30/10/2018

Tabla B.3: Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2018.

Número	ID de Escena	Fecha
1	S1A_IW_SLC__1SDV_20181111T122545_20181111T122612_024540_02B164_DD86	11/11/2018
2	S1A_IW_SLC__1SDV_20181123T122545_20181123T122612_024715_02B7D4_BECC8	23/11/2018
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20181205T122544_20181205T122611_024890_02BDC0_F157	05/12/2018
4	S1A_IW_SLC__1SDV_20181217T122544_20181217T122611_025065_02C40D_FEA3	17/12/2018
5	S1A_IW_SLC__1SDV_20181229T122543_20181229T122610_025240_02CA66_30D4	29/12/2018
6	S1A_IW_SLC__1SDV_20190110T122543_20190110T122610_025415_02D0AF_7FC2	10/01/2019
7	S1A_IW_SLC__1SDV_20190122T122543_20190122T122610_025590_02D711_22FA	22/01/2019
8	S1A_IW_SLC__1SDV_20190203T122542_20190203T122609_025765_02DD70_8D99	03/02/2019
9	S1A_IW_SLC__1SDV_20190215T122542_20190215T122609_025940_02E3A8_890E	15/02/2019
10	S1A_IW_SLC__1SDV_20190227T122542_20190227T122609_026115_02E9DF_8518	27/02/2019
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20190311T122542_20190311T122609_026290_02F037_17CA	11/03/2019
12	S1A_IW_SLC__1SDV_20190323T122542_20190323T122609_026465_02F6AD_9ECA	23/03/2019
13	S1A_IW_SLC__1SDV_20190404T122542_20190404T122609_026640_02FD28_8CCD	04/04/2019
14	S1A_IW_SLC__1SDV_20190416T122543_20190416T122609_026815_030385_F05E	16/04/2019
15	S1A_IW_SLC__1SDV_20190428T122543_20190428T122610_026990_0309D7_5EE5	28/04/2019
16	S1A_IW_SLC__1SDV_20190522T122544_20190522T122610_027340_03156D_E7A6	22/05/2019
17	S1A_IW_SLC__1SDV_20190615T122545_20190615T122612_027690_032025_E687	15/06/2019
18	S1A_IW_SLC__1SDV_20190627T122546_20190627T122613_027865_03255C_31A4	27/06/2019
19	S1A_IW_SLC__1SDV_20190709T122547_20190709T122614_028040_032AB3_592F	09/07/2019
20	S1A_IW_SLC__1SDV_20190721T122548_20190721T122615_028215_032FF8_0EE6	21/07/2019
21	S1A_IW_SLC__1SDV_20190802T122548_20190802T122615_028390_03354D_ECD9	02/08/2019
22	S1A_IW_SLC__1SDV_20190814T122549_20190814T122616_028565_033B0D_E0A1	14/08/2019
23	S1A_IW_SLC__1SDV_20190826T122550_20190826T122617_028740_034118_270D	26/08/2019
24	S1A_IW_SLC__1SDV_20190907T122550_20190907T122617_028915_034732_FB1C	07/09/2019
25	S1A_IW_SLC__1SDV_20190919T122551_20190919T122618_029090_034D3D_D219	19/09/2019
26	S1A_IW_SLC__1SDV_20191001T122552_20191001T122618_029265_035342_5A38	01/10/2019
27	S1A_IW_SLC__1SDV_20191013T122551_20191013T122618_029440_035949_09E9	13/10/2019
28	S1A_IW_SLC__1SDV_20191025T122551_20191025T122618_029615_035F4C_6B7C	25/10/2019

Tabla B.4: Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2019.

Número	ID de Escena	Fecha
1	S1A_IW_SLC__1SDV_20191106T122551_20191106T122618_029790_036573_11AA	06/11/2019
2	S1A_IW_SLC__1SDV_20191118T122551_20191118T122618_029965_036B8B_D6A4	18/11/2019
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20191130T122551_20191130T122618_030140_03719C_4804	30/11/2019
4	S1A_IW_SLC__1SDV_20191212T122550_20191212T122617_030315_0377A6_F08A	12/12/2019
5	S1A_IW_SLC__1SDV_20191224T122550_20191224T122617_030490_037DB3_B342	24/12/2019
6	S1A_IW_SLC__1SDV_20200105T122549_20200105T122616_030665_0383BE_D596	05/01/2020
7	S1A_IW_SLC__1SDV_20200117T122549_20200117T122616_030840_0389DE_CC66	17/01/2020
8	S1A_IW_SLC__1SDV_20200129T122549_20200129T122615_031015_039005_D843	29/01/2020
9	S1A_IW_SLC__1SDV_20200210T122548_20200210T122615_031190_03961E_0594	10/02/2020
10	S1A_IW_SLC__1SDV_20200222T122548_20200222T122615_031365_039C24_A31E	22/02/2020
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20200305T122548_20200305T122615_031540_03A230_CB4E	05/03/2020
12	S1A_IW_SLC__1SDV_20200317T122548_20200317T122615_031715_03A840_ODBC	17/03/2020
13	S1A_IW_SLC__1SDV_20200329T122548_20200329T122615_031890_03AE68_6A4B	29/03/2020
14	S1A_IW_SLC__1SDV_20200410T122549_20200410T122616_032065_03B498_6529	10/04/2020
15	S1A_IW_SLC__1SDV_20200422T122549_20200422T122616_032240_03BABA_5D16	22/04/2020
16	S1A_IW_SLC__1SDV_20200504T122550_20200504T122617_032415_03C0E6_2B80	04/05/2020
17	S1A_IW_SLC__1SDV_20200516T122550_20200516T122617_032590_03C657_3E93	16/05/2020
18	S1A_IW_SLC__1SDV_20200528T122551_20200528T122618_032765_03CB9F_E09B	28/05/2020
19	S1A_IW_SLC__1SDV_20200609T122552_20200609T122619_032940_03D0C8_EFA1	09/06/2020
20	S1A_IW_SLC__1SDV_20200621T122553_20200621T122620_033115_03D615_CA68	21/06/2020
21	S1A_IW_SLC__1SDV_20200703T122553_20200703T122620_033290_03DB66_8CD3	03/07/2020
22	S1A_IW_SLC__1SDV_20200715T122554_20200715T122621_033465_03E0BD_1025	15/07/2020
23	S1A_IW_SLC__1SDV_20200727T122555_20200727T122622_033640_03E61B_96C6	27/07/2020
24	S1A_IW_SLC__1SDV_20200808T122555_20200808T122622_033815_03EBA8_057C	08/08/2020
25	S1A_IW_SLC__1SDV_20200820T122556_20200820T122623_033990_03F1CA_2816	20/08/2020
26	S1A_IW_SLC__1SDV_20200901T122557_20200901T122624_034165_03F7F9_26E7	01/09/2020
27	S1A_IW_SLC__1SDV_20200913T122557_20200913T122624_034340_03FE19_6AFC	13/09/2020
28	S1A_IW_SLC__1SDV_20200925T122558_20200925T122625_034515_040442_BC96	25/09/2020
29	S1A_IW_SLC__1SDV_20201007T122558_20201007T122625_034690_040A67_3926	07/10/2020
30	S1A_IW_SLC__1SDV_20201019T122558_20201019T122625_034865_04108A_E68E	19/10/2020
31	S1A_IW_SLC__1SDV_20201031T122558_20201031T122625_035040_04167F_13BB	31/10/2020

Tabla B.5: Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2020.

Número	ID de Escena	Fecha
1	S1A_IW_SLC__1SDV_20201112T122558_20201112T122625_035215_041C9D_EFAF	12/11/2020
2	S1A_IW_SLC__1SDV_20201124T122557_20201124T122624_035390_0422A6_A2B6	24/11/2020
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20201206T122557_20201206T122624_035565_0428AE_F5DC	06/12/2020
4	S1A_IW_SLC__1SDV_20201218T122556_20201218T122623_035740_042EB0_496D	18/12/2020
5	S1A_IW_SLC__1SDV_20201230T122556_20201230T122623_035915_0434DA_11A9	30/12/2020
6	S1A_IW_SLC__1SDV_20210111T122555_20210111T122622_036090_043AF1_07E3	11/01/2021
7	S1A_IW_SLC__1SDV_20210123T122555_20210123T122622_036265_044108_1CAE	23/01/2021
8	S1A_IW_SLC__1SDV_20210204T122554_20210204T122621_036440_044713_8EE1	04/02/2021
9	S1A_IW_SLC__1SDV_20210216T122554_20210216T122621_036615_044D31_F912	16/02/2021
10	S1A_IW_SLC__1SDV_20210228T122554_20210228T122621_036790_045348_E108	28/02/2021
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20210312T122554_20210312T122621_036965_045961_1F51	12/03/2021
12	S1A_IW_SLC__1SDV_20210324T122554_20210324T122621_037140_045F71_D981	24/03/2021
13	S1A_IW_SLC__1SDV_20210405T122554_20210405T122621_037315_046580_2482	05/04/2021
14	S1A_IW_SLC__1SDV_20210417T122555_20210417T122622_037490_046B84_18B8	17/04/2021
15	S1A_IW_SLC__1SDV_20210429T122555_20210429T122622_037665_04719D_980D	29/04/2021
16	S1A_IW_SLC__1SDV_20210511T122556_20210511T122623_037840_047754_E16C	11/05/2021
17	S1A_IW_SLC__1SDV_20210523T122557_20210523T122624_038015_047C9C_E973	23/05/2021
18	S1A_IW_SLC__1SDV_20210604T122557_20210604T122624_038190_0481D7_5C22	04/06/2021
19	S1A_IW_SLC__1SDV_20210616T122558_20210616T122625_038365_048706_20C7	16/06/2021
20	S1A_IW_SLC__1SDV_20210628T122559_20210628T122626_038540_048C4A_FE2E	28/06/2021
21	S1A_IW_SLC__1SDV_20210710T122600_20210710T122626_038715_04918C_2F81	10/07/2021
22	S1A_IW_SLC__1SDV_20210722T122600_20210722T122627_038890_0496C9_7526	22/07/2021
23	S1A_IW_SLC__1SDV_20210803T122601_20210803T122628_039065_049BFB_1255	03/08/2021
24	S1A_IW_SLC__1SDV_20210815T122602_20210815T122629_039240_04A1F5_FAF9	15/08/2021
25	S1A_IW_SLC__1SDV_20210827T122602_20210827T122629_039415_04A7F4_7FB1	27/08/2021
26	S1A_IW_SLC__1SDV_20210908T122603_20210908T122630_039590_04AE04_6CE1	08/09/2021
27	S1A_IW_SLC__1SDV_20210920T122603_20210920T122630_039765_04B3F5_0F86	20/09/2021
28	S1A_IW_SLC__1SDV_20211002T122604_20211002T122631_039940_04BA03_5955	02/10/2021
29	S1A_IW_SLC__1SDV_20211014T122604_20211014T122631_040115_04C009_570C	14/10/2021
30	S1A_IW_SLC__1SDV_20211026T122604_20211026T122631_040290_04C627_48C6	26/10/2021

Tabla B.6: Listado de identificadores y fechas de adquisición escenas Sentinel-1 empleadas durante el año 2021.

Número	ID de Escena	Fecha
1	S1A_IW_SLC__1SDV_20211107T122603_20211107T122630_040465_04CC43_83EC	07/11/2021
2	S1A_IW_SLC__1SDV_20211119T122603_20211119T122630_040640_04D247_5F64	19/11/2021
3	S1A_IW_SLC__1SDV_20211201T122603_20211201T122630_040815_04D867_5254	01/12/2021
4	S1A_IW_SLC__1SDV_20211213T122602_20211213T122629_040990_04DE68_5EAA	13/12/2021
5	S1A_IW_SLC__1SDV_20211225T122602_20211225T122629_041165_04E433_2768	25/12/2021
6	S1A_IW_SLC__1SDV_20220106T122601_20220106T122628_041340_04EA25_90EB	06/01/2022
7	S1A_IW_SLC__1SDV_20220130T122600_20220130T122627_041690_04F5D6_145D	30/01/2022
8	S1A_IW_SLC__1SDV_20220211T122600_20220211T122627_041865_04FBDF_71A5	11/02/2022
9	S1A_IW_SLC__1SDV_20220223T122600_20220223T122627_042040_0501FF_00B6	23/02/2022
10	S1A_IW_SLC__1SDV_20220307T122600_20220307T122626_042215_0507EE_90ED	07/03/2022
11	S1A_IW_SLC__1SDV_20220319T122600_20220319T122627_042390_050DDD_CBB2	19/03/2022
12	S1A_IW_SLC__1SDV_20220331T122600_20220331T122627_042565_0513CC_B94C	31/03/2022
13	S1A_IW_SLC__1SDV_20220412T122600_20220412T122627_042740_0519AC_B2A6	12/04/2022
14	S1A_IW_SLC__1SDV_20220424T122601_20220424T122628_042915_051F7E_3E07	24/04/2022
15	S1A_IW_SLC__1SDV_20220506T122601_20220506T122628_043090_052545_CB04	06/05/2022
16	S1A_IW_SLC__1SDV_20220518T122602_20220518T122629_043265_052ABA_5DD3	18/05/2022
17	S1A_IW_SLC__1SDV_20220611T122604_20220611T122631_043615_053512_E8AD	11/06/2022
18	S1A_IW_SLC__1SDV_20220810T122608_20220810T122635_044490_054F23_4436	10/08/2022
19	S1A_IW_SLC__1SDV_20220927T122609_20220927T122636_045190_0566B2_2AFE	27/09/2022
20	S1A_IW_SLC__1SDV_20221208T122609_20221208T122635_046240_058973_17EF	08/12/2022
21	S1A_IW_SLC__1SDV_20230206T122606_20230206T122633_047115_05A6FE_A097	06/02/2023
22	S1A_IW_SLC__1SDV_20230302T122606_20230302T122632_047465_05B2D3_1E5B	02/03/2023
23	S1A_IW_SLC__1SDV_20230314T122605_20230314T122632_047640_05B8C2_7D88	14/03/2023
24	S1A_IW_SLC__1SDV_20230326T122606_20230326T122633_047815_05BEA7_6DA2	26/03/2023

Apéndice C.
Parámetros de Separación
Espacio-Temporal

Tabla C.1: Relación maestra-esclava del 2016, tomando como referencia escena capturada el 20 de mayo de 2017.

Línea de Base [m]	Separación Temporal [días]	Coherencia	Ambigüedad de Altura [m]	Diferencia Doppler [Hz]
0	0	1	0	0
-46.65	72	0.9	334.98	-0.89
10.93	84	0.91	-1429.39	-4.37
-92.53	60	0.87	168.9	-0.9
-48.59	48	0.92	321.64	-0.56
10.72	36	0.96	-1458.37	-1.03
-80.51	-12	0.92	194.11	-4.63
-37.97	24	0.95	411.59	0.26
69.19	12	0.93	-225.88	-2.61
-32.54	-24	0.95	480.31	-0.09
16.66	-36	0.95	-938.29	-3.37
-56.09	-48	0.91	278.61	-0.66
-86.19	-60	0.88	181.32	-2.53
-1.6	-72	0.93	9771	-2.15
-15.25	-84	0.91	1024.82	-2.14
-15.49	-96	0.9	1008.94	-0.97
-33.22	-108	0.88	470.42	0.8
-12.42	-144	0.86	1258.72	0.78
24.4	-120	0.87	-640.42	-3.9
26.15	-156	0.84	-597.62	0.58
-11.68	-132	0.87	1337.77	-2.43
7.41	192	0.82	-2109.31	-0.75
55.1	168	0.81	-283.63	-3.03
76.61	144	0.81	-204	0.59
-76.25	120	0.83	204.94	1.38
30.58	96	0.89	-511.07	3.68

Tabla C.2: Relación maestra-esclava del 2017, tomando como referencia escena capturada el 28 de marzo de 2018.

Línea de Base [m]	Separación Temporal [días]	Coherencia	Ambigüedad de Altura [m]	Diferencia Doppler [Hz]
0	0	1	0	0
61.66	144	0.82	-253.47	0.23
17.21	132	0.87	-908.09	2.9
22.79	120	0.87	-685.77	4.18
-27.82	108	0.88	561.68	2.64
-31.19	96	0.89	501.14	3.19
15.08	84	0.91	-1036.59	4.14
65.01	72	0.88	-240.4	1.77
-14.85	60	0.93	1052.58	2.71
21.06	36	0.95	-742.24	2.07
30.3	24	0.95	-515.8	2.08
38.57	12	0.96	-405.23	0.08
-36.12	-12	0.96	432.72	-0.26
-75.72	-24	0.92	206.38	-0.9
70.38	-48	0.9	-222.05	-0.14
-21.67	-36	0.95	721.35	3.27
-60.62	-84	0.87	257.81	2.98
9.65	-108	0.89	-1618.97	2.28
5.22	-132	0.88	-2993.97	0.92
-53.09	-96	0.87	294.36	4.06
-11.06	-120	0.88	1412.5	0.07
-19.53	-144	0.85	800.25	0.92
44.35	-156	0.83	-352.41	-0.49
9.9	-180	0.83	-1577.85	0.57
-26.04	-168	0.83	600.16	2.97
-15.58	-192	0.81	1002.8	0.82
55.88	-204	0.77	-279.67	3.64
58.42	-216	0.76	-267.54	2.47

Tabla C.3: Relación maestra-esclava del 2018, tomando como referencia escena capturada el 22 de mayo de 2019.

Línea de Base [m]	Separación Temporal [días]	Coherencia	Ambigüedad de Altura [m]	Diferencia Doppler [Hz]
0	0	1	0	0
52.39	168	0.81	-298.26	-5.1
29.72	192	0.8	-525.74	-2.84
-7.03	180	0.83	2222.59	0.17
-93.38	156	0.79	166.26	-0.82
-2.12	144	0.86	7355.75	-3.34
55.11	120	0.85	-283.55	-4.09
-24.84	132	0.86	629.11	-2.45
49.41	108	0.86	-316.22	-1.03
-47.2	96	0.87	331.08	3.99
-12.93	72	0.92	1208.08	0.44
16.24	84	0.91	-962.37	-4.31
35.65	60	0.92	-438.24	-2.55
49.29	48	0.92	-317	-1.37
32.28	36	0.94	-483.99	-1.21
46.73	24	0.94	-334.34	-2.7
-77.98	-24	0.91	200.37	-3.04
-105.99	-48	0.87	147.42	-0.92
-58.62	-36	0.92	266.56	0.61
-57.66	-72	0.89	271	-2.49
-26.34	-60	0.92	593.19	-6.8
13	-84	0.91	-1201.86	-3.45
-16.87	-96	0.9	926.43	0.31
-30.03	-108	0.88	520.36	-3.41
-42.75	-120	0.86	365.52	-0.2
72	-132	0.83	-217.01	-1.94
-96.87	-156	0.79	161.31	-2.14
-51.97	-144	0.83	300.66	-1.55

Tabla C.4: Relación maestra-esclava del 2019, tomando como referencia escena capturada el 04 de mayo de 2020.

Línea de Base [m]	Separación Temporal [días]	Coherencia	Ambigüedad de Altura [m]	Diferencia Doppler [Hz]
0	0	1	0	0
24.17	180	0.82	-646.66	-4.59
49.71	168	0.81	-314.45	2.57
57.57	156	0.82	-271.47	-0.92
44.66	144	0.83	-349.9	3.33
36.48	132	0.85	-428.39	1.58
-26.32	120	0.87	593.76	4.11
-34.94	108	0.87	447.23	2.74
-19.56	96	0.9	799.02	1.02
74.93	84	0.86	-208.57	1.85
30.21	72	0.91	-517.21	-1.69
11.63	60	0.94	-1343.87	1
15.47	48	0.94	-1010.15	1.85
-14.01	36	0.95	1115.58	2.98
-6.21	24	0.97	2517.42	0.48
47.18	12	0.95	-331.22	-0.92
-39.16	-12	0.96	399.1	1.07
-62.81	-24	0.93	248.78	-0.26
-40.34	-36	0.93	387.38	4.9
42.4	-48	0.92	-368.56	2.94
-54.8	-60	0.9	285.16	-1.37
-79.79	-72	0.87	195.85	-0.35
49.43	-84	0.89	-316.16	0.03
-12.28	-96	0.9	1272.89	1.64
-48.81	-108	0.86	320.17	-0.2
-14.41	-120	0.88	1084.55	0.49
33.06	-132	0.86	-472.73	0.12
39.26	-144	0.84	-398.06	1.89
70.92	-156	0.81	-220.35	-0.95
14.27	-168	0.84	-1094.78	-1.05
27.78	-180	0.82	-562.62	-1.79

Tabla C.5: Relación maestra-esclava del 2020, tomando como referencia escena capturada el 16 de junio de 2021.

Línea de Base [m]	Separación Temporal [días]	Coherencia	Ambigüedad de Altura [m]	Diferencia Doppler [Hz]
0	0	1	0	0
-7.85	216	0.79	1990.64	-6.8
-68.29	204	0.76	228.85	-6.13
36.82	192	0.8	-424.44	-2.33
81.45	180	0.78	-191.88	-0.44
7.92	156	0.85	-1974.22	-5.45
65.91	168	0.8	-237.12	-4.91
-39.19	144	0.84	398.77	-1.7
-15.89	132	0.86	983.73	-5.41
-2.06	120	0.89	7600.3	0.74
28.52	108	0.88	-547.9	-4.49
26.34	96	0.89	-593.27	0.86
-39.4	84	0.89	396.61	-2.28
-70.66	72	0.88	221.17	-3.5
-51.85	60	0.9	301.43	-0.86
-93.96	48	0.88	166.32	-2.73
48.36	36	0.92	-323.17	-5.4
19.92	24	0.96	-784.61	-2.77
-28.96	-12	0.96	539.72	-1.1
-33.45	12	0.96	467.25	-0.67
16.97	-24	0.96	-920.91	-3.87
-19.15	-36	0.95	816.16	-6.32
-16.52	-60	0.93	946.2	-1.9
1.3	-72	0.93	-11986.42	4.62
12.43	-48	0.94	-1257.66	-3.65
-19	-96	0.9	822.48	2.35
30.76	-108	0.88	-507.99	2.2
-30.98	-84	0.9	504.38	-2.17
-8.9	-120	0.88	1755.08	-3.99
54.66	-132	0.84	-285.93	-4.58

Tabla C.6: Relación maestra-esclava del 2021, tomando como referencia escena capturada el 31 de marzo de 2022.

Línea de Base [m]	Separación Temporal [días]	Coherencia	Ambigüedad de Altura [m]	Diferencia Doppler [Hz]
0	0	1	0	0
17.75	144	0.85	-880.28	-2.99
69.41	132	0.83	-225.16	0.86
12.13	120	0.88	-1288.69	2.05
25.77	108	0.88	-606.43	0.11
-27.82	96	0.89	561.66	-1.5
25.87	84	0.9	-604.04	-0.72
-7.57	60	0.94	2065.2	-2.14
-20.98	48	0.94	744.93	-0.82
29.53	36	0.94	-529.29	-1.13
-23.49	24	0.96	665.29	-0.78
-67.5	-12	0.93	231.52	-0.5
49.51	12	0.95	-315.64	-1.68
18.79	-24	0.96	-831.81	-3.84
-171.64	-36	0.83	91.05	1.52
-152.54	-48	0.83	102.45	0.78
82.73	-72	0.87	-188.91	-0.09
-20.92	-132	0.86	746.96	-7.2
-35.82	-180	0.81	436.27	2.67
103.68	-252	0.7	-150.73	0.53
45.28	-336	0.67	-345.15	-2.03
34.78	-312	0.69	-449.3	-1.09
-178.89	-348	0.58	87.36	-3.49
-13.7	-360	0.66	1140.76	-2.28

Apéndice D.
Análisis Gráfico de Separación
Espacio-Temporal

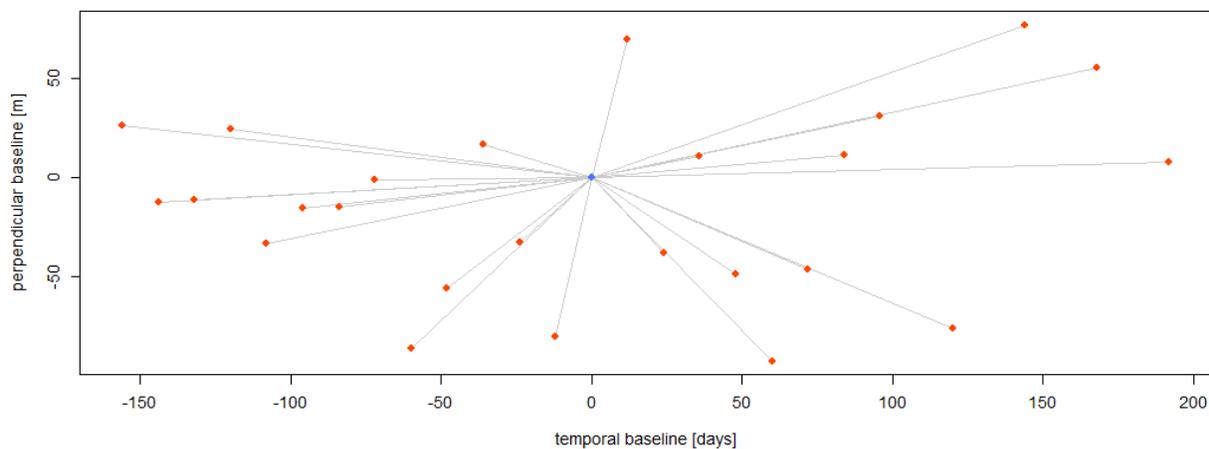


Figura D.1: Separación espacial y temporal para el periodo 2016-2017 (26 escenas SAR). Las líneas continuas representan pares de datos interferométricos con umbrales de línea de base espacial de 100 metros y temporal de 365 días.

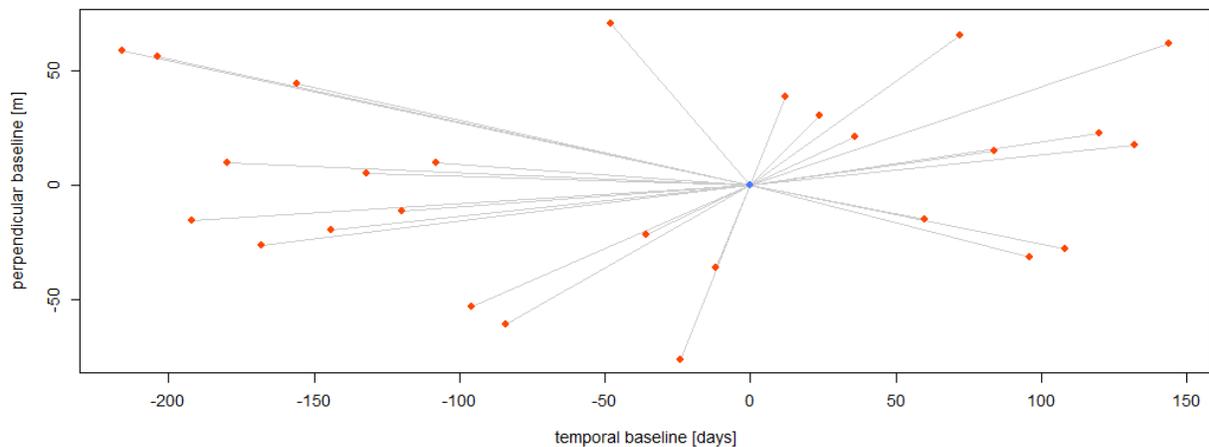


Figura D.2: Separación espacial y temporal para el periodo 2017-2018 (28 escenas SAR). Las líneas continuas representan pares de datos interferométricos con umbrales de línea de base espacial de 100 metros y temporal de 365 días.

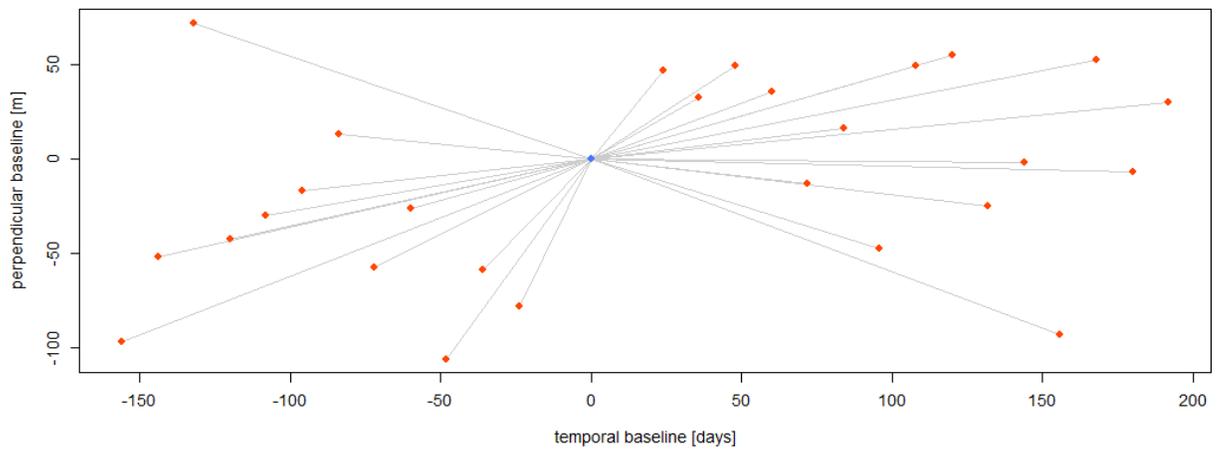


Figura D.3: Separación espacial y temporal para el periodo 2018-2019 (28 escenas SAR). Las líneas continuas representan pares de datos interferométricos con umbrales de línea de base espacial de 200 metros y temporal de 365 días.

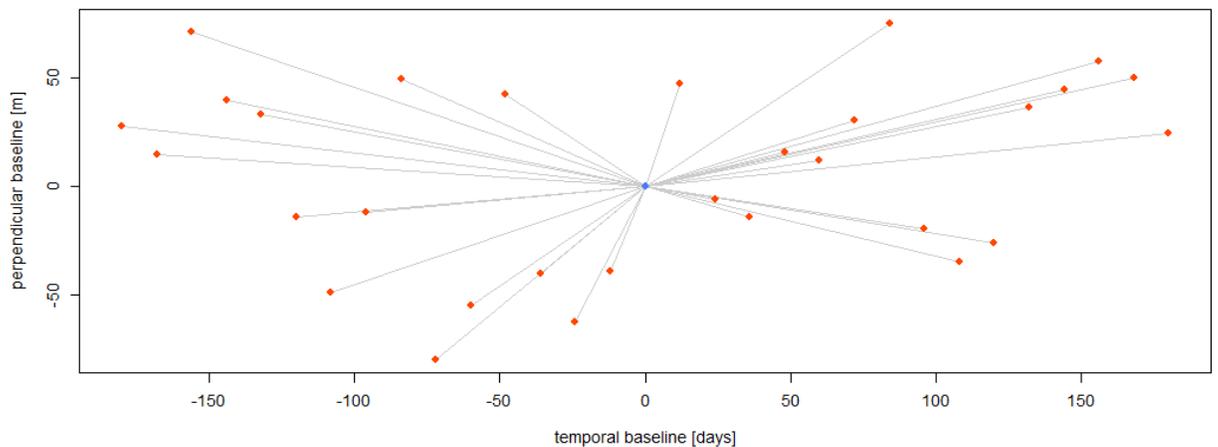


Figura D.4: Separación espacial y temporal para el periodo 2019-2020 (31 escenas SAR). Las líneas continuas representan pares de datos interferométricos con umbrales de línea de base espacial de 100 metros y temporal de 365 días.

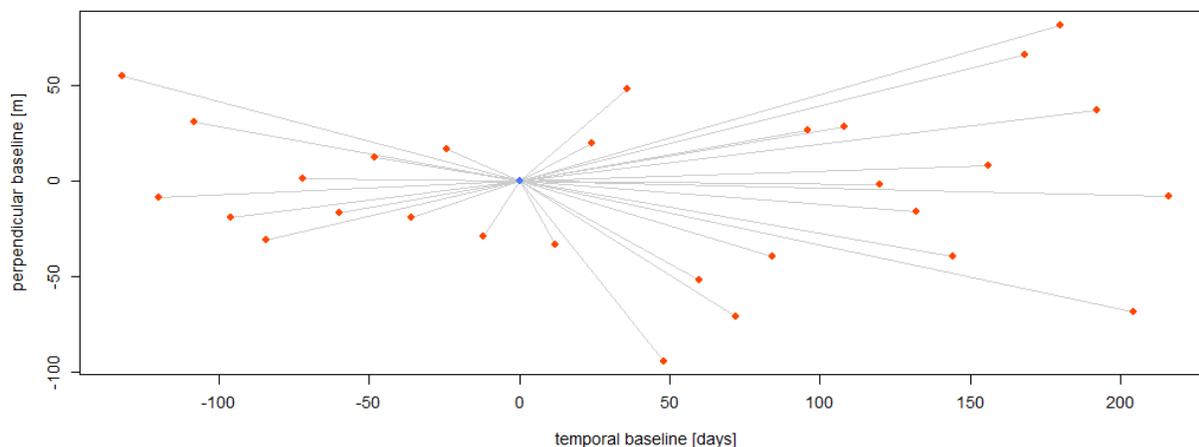


Figura D.5: Separación espacial y temporal para el periodo 2020-2021 (30 escenas SAR). Las líneas continuas representan pares de datos interferométricos con umbrales de línea de base espacial de 200 metros y temporal de 365 días.

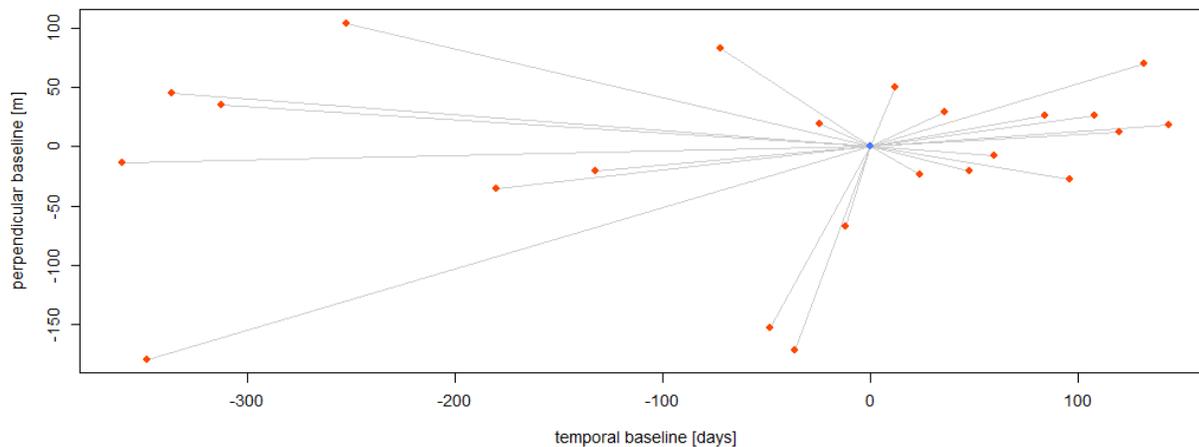


Figura D.6: Separación espacial y temporal para el periodo 2021-2023 (24 escenas SAR). Las líneas continuas representan pares de datos interferométricos con umbrales de línea de base espacial de 250 metros y temporal de 365 días.

Bibliografía

Adamo, N., Al-Ansari, N., Ali, S. H., Laue, J. y Knutsson, S. (2021). «Dams Safety: Review of Satellite Remote Sensing Applications to Dams and Reservoirs». En: *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering* 11 (1), págs. 347-438. DOI: <https://doi.org/10.47260/jesge/1119>.

Amardeep, Singh V., Amanpreet, S. y Sudesh Kumar, M. (2018). «Advanced MT-InSAR Landslide Monitoring: Methods and Trends». En: *Journal of Remote Sensing and GIS* 7 (1), pág. 1000225. DOI: <https://doi.org/10.4172/2469-4134.1000225>.

Aswathi, J., Binoj Kumar, R. B., Oommen, T., Bouali, E. H. y Sajinkumar, K. S. (2022). «InSAR as a tool for monitoring hydropower projects: A review». En: *Energy Geoscience* 3 (2), págs. 160-171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.12.007>.

Auvinet Guichard, G., Méndez Sánchez, E. y Juárez Camarena, M. (2013). «Soil fracturing induced by land subsidence in Mexico City». En: *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, París 2013*. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).

Auvinet Guichard, G., Méndez Sánchez, E. y Juárez Camarena, M. (2015). «New information on regional subsidence and soil fracturing in Mexico City Valley». En: *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences* 372, págs. 39-44. DOI: <https://doi.org/10.5194/piahs-372-39-2015>.

Auvinet Guichard, G., Méndez Sánchez, E. y Juárez Camarena, M. (2017a). *El Subsuelo de la Ciudad de México, III*. Vol. 3. Complemento a la Tercera Edición del libro de R.J. Marsal y M. Mazari: Volumen adicional (Vol.3) sobre avances en el conocimiento del subsuelo 1959-2016, publicado con el motivo del 60 aniversario de la fundación del Instituto de Ingeniería. UNAM.

- Auvinet Guichard, G., Méndez Sánchez, E. y Juárez Camarena, M. (2017b). «Recent information on Mexico City subsidence». En: *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul 2017*. International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).
- Bagheri-Gavkosh, M., Mossa-Hosseini, S., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimi, H., Morovat, F. y Ashrafi, S. (2021). «Land subsidence: A global challenge». En: *Science of The Total Environment* 778, pág. 146193. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146193>.
- Bekaert, D.P.S., Hooper, A.J. y Wright, T.J. (2015). «A spatially-variable power-law tropospheric correction technique for InSAR data». En: *J. Geophys. Res* 120.
- Bekaert, D.P.S., Walters, R.J., Wright, T.J., Hooper, A.J. y Parker, D.J. (2015). «Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques». En: *Remote Sensing of Environment* 170, págs. 40-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.035>.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R. y Sansosti, E. (2002). «A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms». En: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 40.11, págs. 2375-2383. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>.
- Braun, A. y Veci, L. (2021). *Sentinel-1 Toolbox TOPS Interferometry Tutorial*. Tutorial, 25 p. URL: <https://pdf4pro.com/amp/view/sentinel-1-toolbox-tops-interferometry-tutorial-7363e6.html>.
- Brown, S. y Nicholls, R. J. (2015). «Subsidence and human influences in mega deltas: The case of the Ganges–Brahmaputra–Meghna». En: *Science of The Total Environment* 527-528, págs. 362-374. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.124>.
- Camara, K. A. (2007). «New processing methodology for airborne repeat-pass SAR interferometry». Tesis doct. Karlsruhe: Universitat Fridericiana Karlsruhe.
- Campbell, J.B. y Wynne, R.H. (2011). *Introduction to Remote Sensing, Fifth Edition*. 5.^a ed. New York: Guilford Publications.

- Carrillo, N. (1947). «Influencia de los pozos artesianos en el hundimiento de la Ciudad de México». En: *Anuario de la Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica*.
- Carrillo, N. (1951). «Mecanismo Productor de grietas en el subsuelo del Valle de México». En: *Congreso Científico Mexicano de la UNAM*.
- Chen, C. W. y Zebker, H. A. (2000). «Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms». En: *Journal of the Optical Society of America A* 17, págs. 401-414.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 2.^a ed. Madrid, España: Ediciones Rialp.
- Cigna, F. y Tapete, D. (2022). «Land Subsidence and Aquifer-System Storage Loss in Central Mexico: A Quasi-Continental Investigation With Sentinel-1 InSAR». En: *Geophysical Research Letters* 49 (15), e2022GL098923. doi: <https://doi.org/10.1029/2022GL098923>.
- Cohen, C. J. (2000). *Early History of Remote Sensing*. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society.
- Crosetto, M., Oriol, M., Cuevas-González, M., Devanthéry, N. y Crippa, B. (2016). «Persistent Scatterer Interferometry: A review». En: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 115, págs. 78-89. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011>.
- De Zan, F. y Monti Guarnieri, A. (2006). «TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans». En: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44.9, págs. 2352-2360. doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873853>.
- Deutsch, C. V. y Journel, A. G. (1997). *GSLIB Geostatistical Software Library and Users Guide*. 2.^a ed. Oxford University Press.
- Deutsch, Clayton V. (1997). *WinGslib (versión 1.5)*. Software. URL: <https://www.geostatistics.com/wingslib/>.

- Dinar, A., Encarna, E., Calvo, E., Herrera, G., Pietro, T., Tomás, R., Yang, L., Ezquerro, P. y Albiac, J. (2021). «We lose ground: Global assessment of land subsidence impact extent». En: *Science of The Total Environment* 786, pág. 147415. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147415>.
- Du, Zheyuan, Ge, Linlin, Ng, Alex Hay-Man, Zhu, Qinggaozi, Zhang, Qi, Kuang, Jianming y Dong, Yifei (2019). «Long-term subsidence in Mexico City from 2004 to 2018 revealed by five synthetic aperture radar sensors». En: *Land Degradation & Development* 30.15, págs. 1785-1801. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.3347>.
- Díaz González, F. A., Quintero Torres, S. V., Triana Correa, J. S. y Morón Hernández, D. C. (2014). *Aproximación a los sistemas de percepción remota en satélites pequeños*. Bogotá: Universidad Sergio Arboleda. Escuela de Ingeniería.
- Díaz Viera, Martin A. (2002). «Geoestadística Aplicada». En: *Instituto de Geofísica, UNAM, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente de Cuba*. 131 págs. 2002.
- ESA (2007). *ASAR Product Handbook*. European Space Agency, EnviSat ASAR Product Handbook, Issue 2.2, 27 February 2007.
- ESA (2012). *Sentinel-1: ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services*. European Space Agency, ESA's Radar Observatory Mission for GMES Operational Services, (ESA SP-1322/1), March 2012.
- ESA (2018a). *About ERS*. Inf. téc. European Space Agency. URL: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/ers> (visitado 09-06-2024).
- ESA (2018b). *About Seasat*. Inf. téc. European Space Agency. URL: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/seasat> (visitado 09-06-2024).
- ESA (2018c). *The Sentinel-1 mission*. Inf. téc. European Space Agency. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1> (visitado 03-02-2024).
- ESA (2022). *Ride into orbit secured for Sentinel-1C*. Inf. téc. European Space Agency. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Ride_into_orbit_secured_for_Sentinel-1C (visitado 05-02-2024).

- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F. y Massonnet, D. (2007). *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA Publications, TM-19. ISBN 92-9092-233-8.
- Ferretti, A., Prati, C. y Rocca, F. (2001). «Permanent scatterers in SAR interferometry». En: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39.1, págs. 8-20. DOI: <https://doi.org/10.1109/36.898661>.
- Foroughnia, F., Nemati, S., Maghsoudi, Y. y Perissin, D. (2019). «An iterative PS-InSAR method for the analysis of large spatio-temporal baseline data stacks for land subsidence estimation». En: *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 74, págs. 248-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.018>.
- Gade, Martin (2015). «Synthetic Aperture Radar Applications in Coastal Waters». En: *Proceedings of the Twelfth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment*. MEDCOAST 2015.
- Gayol, R. (1925). «Estudio de las perturbaciones que en el fondo del Valle de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo por las obras del Desagüe, y rectificación de los errores que ha dado lugar una incorrecta interpretación de los hechos observados». En: *Revista Mexicana de Ingenieros y Arquitectos*. Vol. III, No.2.
- Geng, J., Chen, X., Pan, Y., Mao, S., Li, C., Zhou, J y Zhang, K. (2019). «PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution». En: *GPS Solutions* 91 (23). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0888-1>.
- Gheorghe, Mihaela y Armas, Iuliana (2016). «Comparison of Multi-Temporal Differential Interferometry Techniques Applied to the Measurement of Bucharest City Subsidence». En: *Procedia Environmental Sciences* 32, págs. 221-229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.03.027>.
- Golden Software (2017). *Surfer (versión 13)*. Software. URL: <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>.

- Gómez Hernández, J. Jaime (2005). «Geostatistics». En: *Hydrogeophysics*. Ed. por Yoram Rubin y Susan S. Hubbard. Dordrecht: Springer Netherlands, págs. 59-83. URL: https://doi.org/10.1007/1-4020-3102-5_3.
- Gonzalez Arias, A. (2001). *¿Qué es el Magnetismo?* Salamanca: Ediciones Universidad de Salamanca.
- González, J., Guerra, F. y Gómez, H. (2007). «Conceptos Básicos de Geoestadística en Geografía y Ciencias de la Tierra: Manejo y Aplicación». En: *Geoenseñanza* 12, págs. 81-90.
- González Méndez, P. J. (2010). «Medida y caracterización de deformaciones usando técnicas geodésicas y de teledetección. Aplicación en volcanología y sismotectónica.» Tesis doct. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Gutiérrez, C. P. y Muñoz, A. L. (2002). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. Salamanca: Ediciones Universidad de Salamanca.
- Hanssen, R.F. (2001). *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Springer Netherlands.
- Harbering, M. y Schlüter, J. (2020). «Determinants of transport mode choice in metropolitan areas the case of the metropolitan area of the Valley of Mexico». En: *Journal of Transport Geography* 87, pág. 102766. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102766>.
- Herrera García, G., Ezquerro, P., Tomás, R., Béjar Pizarro, M., López, Vinielles J., Rossi, M., Mateos, R. M., Carreón Freyre, D., Lambert, J., Teatini, P., Cabral Cano, E., Erkens, G., Galloway, D., Chia Hung, W., Najeebullah, K., Sneed, M., Tosi, L., Wang, H. y Ye, S. (2021). «Mapping the global threat of land subsidence». En: *Science* 371.6524, págs. 34-36. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abb8549>.
- Herring, T. (2003). «MATLAB Tools for viewing GPS velocities and time series». En: *GPS Solutions* 7 (3), págs. 194-199. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0068-0>.

- Hilal, Aatira, Bangroo, Shabir Ahmed, Kirmani, Nayar Afaq, Wani, Javaid Ahmed, Biswas, Asim, Bhat, Mohammad Iqbal, Farooq, Khushboo, Bashir, Owais y Shah, Tajamul Islam (2024). «Chapter 19 - Geostatistical modeling—a tool for predictive soil mapping». En: *Remote Sensing in Precision Agriculture*. Ed. por Salim Lamine, Prashant K. Srivastava, Ahmed Kayad, Francisco Muñoz-Arriola y Prem Chandra Pandey. Earth Observation. Academic Press, págs. 389-418. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91068-2.00011-4>.
- Hooper, Andrew, Bekaert, David, Spaans, Karsten y Arikan, Mahmut (2012). «Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation». En: *Tectonophysics* 514-517, págs. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>.
- INEGI (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Inf. téc. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. URL: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/> (visitado 03-02-2023).
- Jiménez, B. y Marín, L. (2004). *El agua en México vista desde la academia*.
- Jinwoo, Kim, Coe, Jeffrey A., Zhong, Lu, Avdievitch, Nikita N. y Hulst, Chad P. (2022). «Spaceborne InSAR mapping of landslides and subsidence in rapidly deglaciating terrain, Glacier Bay National Park and Preserve and vicinity, Alaska and British Columbia». En: *Remote Sensing of Environment* 281, pág. 113231. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2022.113231>.
- JPL (2022). *Get to know SAR: Polarimetry*. Inf. téc. Jet Propulsion Laboratory. URL: <https://nisar.jpl.nasa.gov/mission/get-to-know-sar/polarimetry/> (visitado 18-12-2023).
- Juárez Camarena, M. (2015). «Análisis Geoestadístico del Subsuelo de la Zona Lacustre del Valle de México». Tesis doct. México, D. F.: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Juárez Camarena, M., Auvinet Guichard, G. y Méndez Sánchez, E. (2016). «Geotechnical Zoning of Mexico Valley Subsoil». En: *Ingeniería, investigación y tecnología* 17 (3), págs. 297-308. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.07.001>.

- Juárez Camarena, M., Román Rosario, H., Auvinet Guichard, G. y Méndez Sánchez, E. (2021). «Contribución a la actualización del mapa de hundimiento regional para el Valle de México». En: *XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. Marzo, Plataforma Online.
- Kang, Y., Zhong, L., Chaoying, Z. y Wei, Q. (2023). «Inferring slip-surface geometry and volume of creeping landslides based on InSAR: A case study in Jinsha River basin». En: *Remote Sensing of Environment* 294, pág. 113620. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2023.113620>.
- Krige, Daniel G (1951). «A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand: By DG Krige». Tesis doct. University of the Witwatersrand.
- Kumar, Amit, Manisha, Preet, Lal, Prasad, Alisha, Pratyush, Tripathy y Purabi, Saikia (2022). «Analyzing urban damage and surface deformation based hazard-risk in Kathmandu city occurred during Nepal earthquake (2015) using SAR interferometry». En: *Advances in Space Research* 70 (12), págs. 3892-3904. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2022.02.003>.
- Lanari, Ricardo, Casu, Francesco, Manzo, Mariarosaria y Lundgren, Paul (2007). «Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California». En: *Remote Sensing of Environment* 109.1, págs. 20-28. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.003>.
- Lillesand, T. M. y Kiefer, R. W. (1994). *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3.^a ed. Chichester: John Wiley & Sons.
- Lira, J. (1987). *La percepción remota: nuestros ojos desde el espacio*. QE33. L57 1987. México: FCE, SEP, CONACyT.
- Manunta, M., De Luca, C., Zinno, I., Casu, F., Manzo, M., Bonano, M., Fusco, A., Pepe, A., Onorato, G., Berardino, P., De Martino, P. y Lanari, R. (2019). «The Parallel SBAS Approach for Sentinel-1 Interferometric Wide Swath Deformation Time-Series Generation: Algorithm Description and Products Quality Assessment». En: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 57.9, págs. 6259-6281. DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2019.2904912>.

- Marsal, R. J., Hiriart, F. y Sandoval, R. (1951). «Hundimiento de la Ciudad de México. Observaciones y estudios analíticos». En: *Ediciones ICA*. serie B, núm.3, Ciudad de México, México.
- Marsal, R. J. y Mazari, M. (1959). *El subsuelo de la Ciudad de México*. Contribución al Ier Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e Ingeniería de Cimentaciones, Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Marsal, R. J. y Sáinz Ortiz, I. (1956). «Breve descripción del hundimiento de la Ciudad de México». En: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol.19, No.2.
- Matheron, Georges (1962). *Traité de géostatistique appliquée. Tome 1: La théorie et ses applications*. Paris: Editions Technip.
- Mazari, M. y Alberro, J. (1990). *Hundimiento de la Ciudad de México*. Problemas de la Cuenca de México, El Colegio de México, pp.83-114, Ciudad de México, México.
- Mejía Rivera, O., Betancur Vargas, T. y Londoño Ciro, L. (2007). «Aplicación de técnicas geoestadísticas en la hidrogeología del bajo cauca antioqueño». En: *Dyna* 74 (152), págs. 137-149.
- Molina Berbeyer, R. (1957). «Hundimiento de la Ciudad de México y su relación con los estudios de Mecánica de suelos, Geoquímicos, Geofísicos y Geológicos de las aguas del Subsuelo de la Cuenca del Valle de México». En: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. Vol.20, No.2.
- Mooser, F., Montiel, A. y Zúñiga, Á. (1996). *Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla: estratigrafía, tectónica regional y aspectos geotérmicos*. México: Comisión Federal de Electricidad.
- Moreira, A., Prats Iraola, P., Younis, M., Gerhard, K., Hajnsek, I. y Papathanassiou, Konstantinos P. (2013). «A tutorial on synthetic aperture radar». En: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine* 1.1, págs. 6-43. doi: <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2248301>.
- OECD (2015). *OECD Territorial Reviews: Valle de México, Mexico*. OECD Territorial Reviews, OECD Publishing, Paris. URL: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264245174-en> (visitado 31-01-2023).

- Ohring, Milton y Kasprzak, Lucian (2015). «Chapter 2 - Electronic Devices: How They Operate and Are Fabricated». En: *Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices (Second Edition)*. Ed. por Milton Ohring y Lucian Kasprzak. Second Edition. Boston: Academic Press, págs. 39-109. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-088574-9.00002-1>.
- Ovalles, F. (1992). *Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad*. Venezuela: FONAIAP-CENIAP-IIAG.44p.SERIE B.
- Panozzo Zénere, M. y Solorza, R. (2021). «Herramientas de teledetección óptica y SAR». En: *Introducción a la teoría SAR*. UNCordobaX.
- Percuoco, R. (2014). «Chapter 1 - Plain Radiographic Imaging». En: *Clinical Imaging (Third Edition)*. Ed. por Dennis M. Marchiori. 3.ª ed. Saint Louis: Mosby, págs. 1-43. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-08495-6.00001-4>.
- Perló, M. y González, A. (2009). *Guerra por el agua en el Valle de México: estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y el Estado de México*. 2.ª ed. UNAM: Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad.
- Poreh, Davod y Pirasteh, Saied (2019). «InSAR and Landsat ETM+ incorporating with CGPS and SVM to determine subsidence rates and effects on Mexico City». En: Preprints 2019. doi: <https://doi.org/10.20944/preprints201909.0082.v1>.
- Pérez, D. (2009). «Modelado del hundimiento de la zona lacustre del Valle de México. Aspectos estratigráficos y piezométricos». Tesis de maestría. Ciudad de México, México: ESIA-Instituto Politécnico Nacional.
- QGIS Development Team (2022). *QGIS Geographic Information System (versión 3.28.10)*. Software. URL: <https://www.qgis.org>.
- Raspini, F., Caleca, F., Del Soldato, M., Festa, D., Confuorto, P. y Bianchini, S. (2022). «Review of satellite radar interferometry for subsidence analysis». En: *Earth-Science Reviews* 235, pág. 104239. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104239>.

- Reséndiz Nuñez, D., Auvinet Guichard, G., Juárez Camarena, M. y Méndez Sánchez, E. (2019). «Saving the Valley of Mexico from a Disaster: The need and the method». En: *Serie Investigación y desarrollo*. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- Reséndiz Nuñez, D., Auvinet Guichard, G. y Méndez Sánchez, E. (2016). «Subsidencia de la Ciudad de México: un proceso centenario que se vuelve insostenible». En: *Serie Investigación y desarrollo*. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- Robinson, Julie A., Amsbury, David L., Liddle, Donn A. y Evans, Cynthia A. (2002). «Astronaut-acquired orbital photographs as digital data for remote sensing: Spatial resolution». En: *International Journal of Remote Sensing* 23 (20), págs. 4403-4438. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160110107798>.
- Rodríguez Castillo, R. y Rodríguez Velázquez, I. (2006). «Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia». En: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 58 (2), págs. 265-269. DOI: <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n2a10>.
- Sabins, F.F. y Ellis, J.M. (2020). *Remote Sensing: Principles, Interpretation, and Applications, Fourth Edition*. 4.^a ed. Long Grove, Illinois: Waveland Press.
- Santoyo, E., Ovando, E. S., Mooser, F. y León, E. P. (2005). *Síntesis geotécnica de la cuenca del Valle de México*. TGC Geotecnia, 172 pp., Ciudad de México, México.
- Shuhab, D. Khan, Muhammad, I. Faiz, Otto, C.A. Gadea y Laeiq, A. (2023). «Study of land subsidence by radar interferometry and hot spot analysis techniques in the Peshawar Basin, Pakistan». En: *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science* 26 (1), págs. 173-184. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.EJRS.2023.02.001>.
- Siegel, J.A., Saukko, P.J. y Houck, M. M. (2012). *Encyclopedia of Forensic Sciences*. 2.^a ed. Elsevier Science.
- SMIG (2021). «Leonardo Zeevaert Wiechers. Breve Semblanza». En: *XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A. C. Marzo, Plataforma Online.
- Smith, G.S. (1997). *An Introduction to Classical Electromagnetic Radiation*. Cambridge University Press.

- Sreejith, K. M., Agrawal, R., Agram, P. y Rajawat, A. S. (2020). «Surface deformation of the Barren Island volcano, Andaman Sea (2007–2017) constrained by InSAR measurements: Evidence for shallow magma reservoir and lava field subsidence». En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 407, pág. 107107. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.JVOLGEORES.2020.107107>.
- Tsokas, A., Rysz, M., Pardalos, P. M. y Dipple, K. (2022). «SAR data applications in earth observation: An overview». En: *Expert Systems with Applications* 205, pág. 117342. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117342>.
- UNOOSA (2023). Inf. téc. United Nations Office for Outer Space Affairs. URL: <https://www.unoosa.org/> (visitado 10-11-2023).
- Volkan Yazici, B. y Tunc Gormus, E. (2022). «Investigating persistent scatterer InSAR (PSInSAR) technique efficiency for landslides mapping: a case study in Artvin dam area, in Turkey». En: *Geocarto International* 37.8, págs. 2293-2311. DOI: <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1818854>.
- Yilin, Liu, Jinqing, Liu, Xingfan, Xia, Haibo, Bi, Haijun, Huang, Renwei, Ding y Lihong, Zhao (2021). «Land subsidence of the Yellow River Delta in China driven by river sediment compaction». En: *Science of The Total Environment* 750, pág. 142165. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142165>.