



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Análisis de series de tiempo de desplazamiento
del terreno derivadas de Interferometría de
Radar de Apertura Sintética [InSar] para la
detección de componentes no lineares**

TESIS

Que para obtener el título de:

Ingeniero Geólogo

PRESENTA

Juan Carlos Cañas Manzo

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Darío Emmanuel Solano Rojas



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos

A mi madre, Eugenia Guillermina Manzo Echebarrena, por ser mi gran apoyo en toda mi vida y por siempre brindar su atención, cariño e importancia en todo lo que hago. Siempre te estaré eternamente agradecido por ayudarme a convertirme en el hombre que soy hoy.

A mi padre, Juan Martín Cañas Monroy, por enseñarme lecciones de toda índole y por todo lo que hiciste por mí a lo largo de tu dura vida. Ojalá estuvieras aquí para ver que tu hijo lo logró. Descansa en paz.

A mis hermanas, Daniela y María Eugenia Yadira Cañas Manzo y a mi sobrino Bruno Aaron Loredó Cañas, por dar alegría a mi vida y por darme la seguridad de que siempre tengo en quién contar.

A mi abuelo, Alberto Manzo Valenzuela, por creer en mí a lo largo de mi carrera, ser un gran sustento y por el continuo apoyo incondicional que siempre me brindaste.

A mis amigos, Juan José, Erick, Alan, Roberto T., Roberto M., Emma, Axel, Jen, Gio, Andrés, Mónica, Angie y Sarah por su constante cariño, risas, conocimientos y por prestarme su hombro en los momentos más difíciles y, sobre todo, por siempre hacerme sentir bienvenido. A todos ustedes los tengo presente como mi más grande tesoro.

Al Dr. Darío Emmanuel Solano Rojas, por el asesoramiento, paciencia y confianza. Por haberme recibido con gusto en mis labores académicas y por sus sabios consejos en materia profesional y también de investigación, lo admiro. Le estaré eternamente agradecido.

Al Dr. Saúl Arciniega Esparza, por su apoyo y ayuda durante los momentos difíciles. Es usted una gran persona y le agradezco por todo lo enseñado en clases y en el ámbito profesional.

*A la Mtra. Isabel Domínguez Trejo, por la **enorme** paciencia que tuvo para orientarme durante toda mi carrera y por siempre acordarse de mí: ¡gracias!*

A mis sinodales, el director José Antonio Hernández Espriú, el Dr. Saúl Arciniega Esparza, la Ingeniera Berenice de Jesús de la Cruz, el Dr. Darío Emmanuel Solano Rojas y el Ingeniero Javier Mancera Alejándrez por apoyarme durante mi proceso de titulación.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por brindar conocimiento y desarrollo académico desde mi bachillerato. Por hacerme parte de una comunidad y ofrecerme las oportunidades que me permitieron ser quien soy hoy.

Juan Carlos

Índice general

1	Introducción	5
2	Marco Teórico	7
2.1	Series de tiempo	7
2.2	Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) satelital	9
2.3	Técnica SBAS	10
2.3.1	Mintpy	10
2.4	Zona de estudio	11
2.4.1	Geología	12
2.4.2	Estratigrafía	13
2.4.3	Hidrología	17
2.5	Satélites Sentinel-1A y B	19
2.5.1	Sentinel-1A	19
2.5.2	Sentinel-1B	20
3	Materiales	21
4	Metodología	23
4.1	Tratamiento inicial de los datos	23
4.2	Detrend	23
4.2.1	Tasa de subsidencia	24
4.2.2	Residuales	25
4.3	Muestreo de datos	25
4.4	Descomposición Estacional y de Tendencia	25
4.4.1	Sismos	26
4.5	Filtrados	26
4.5.1	Comportamiento \cap (U invertida)	27
4.5.2	Comportamiento W	27
4.5.3	Comportamiento Zigzag	29
4.5.4	Delta Y (ΔY)	30
4.6	Visualización de datos	30

4.6.1	R^2	31
4.6.2	W y ZigZag	31
4.6.3	Delta Y	31
5	Resultados	32
5.1	Caracterización de la zona de estudio	32
5.2	Filtro de las diferentes bases de datos	35
6	Discusión y Conclusión	42
6.1	Sismos y fracturas	44
6.2	Hidrología	45
6.3	Geología	46
6.4	Recomendaciones para trabajos futuros	46

Índice de figuras

2.1	Ejemplo de tendencia creciente utilizando el PIB de México, 2008	7
2.2	Precipitación promedio en CDMX en 2022.	8
2.3	Valores mensuales de aprobaciones de construcción de la ACT. . .	8
2.4	Área de estudio.	11
2.5	Mapa de ubicación de acuíferos.	12
2.6	Hidroestratigrafía de la zona de estudio.	16
3.1	Histograma de la tasa de subsidencia de los datos.	21
4.1	Ejemplo de procesado de detrend	24
4.2	Comportamiento general de \cap (U invertida).	27
4.3	Comportamiento general de las gráficas tipo “W”.	28
4.4	Tipos de Zigzag.	29
5.1	Comportamiento de los valores de tendencia y valores estables. . .	33
5.2	Comportamiento de zonas de subsidencia.	34
5.3	Zonificación Geotécnica contra el área de estudio.	34
5.4	Comportamiento de las gráficas “W”.	35
5.5	Comportamiento de las gráficas “Zigzag”.	36
5.6	Comportamiento de las gráficas “U invertida”.	37

5.7	Mapa de ubicación de R^2	38
5.8	Mapa de ubicación de “W”	39
5.9	Mapa de ubicación de “Zigzag”	40
5.10	Mapa de ubicación de valores Delta Y.	41
6.1	Mapa de integración de variables.	43
6.2	Mapa correlativo del factor tectónico.	44
6.3	Mapa correlativo del factor hidrológico.	45

Índice de tablas

2.1	Tabla de características de los satélites gemelos Sentinel-1A1B	20
3.1	Estadística general de los datos.	22

Capítulo 1

Introducción

La Ciudad de México constituye uno de los conglomerados urbanos más extensos del mundo, contando con más de 9 millones de habitantes (INEGI 2020). La alta densidad poblacional implica una gran demanda de recursos, entre los que destacan el suministro de agua potable principalmente para consumo doméstico, industrial, agropecuario, público, urbano (Diario Oficial de la Federación 2013). El volumen de extracción de agua subterránea en la Ciudad de México se estima en 993.2 Mm³/año (CONAGUA 2023), mientras que el volumen de recarga se estima en 512.8 Mm³/año (CONAGUA 2023). Por ende, el acuífero se encuentra en un déficit de recarga ocasionando su sobreexplotación. Esto, en conjunto con las propiedades mecánicas del acuífero rico en arcillas (Palomera & Sanchez 1989), provoca la subsidencia del terreno a velocidades de hasta 400 mm/año (Poreh et al. 2021). Este fenómeno trae consigo severas repercusiones, como cambios en las propiedades de los materiales del subsuelo, agrietamiento, fracturamiento, subsidencia diferencial y daños a la infraestructura.

En la actualidad, se realizan diversos estudios acerca de la evolución de la subsidencia en la Ciudad de México entre los que se encuentran aquellos que utilizan datos InSAR (Osmanoğlu et al. 2011, Yan et al. 2012, Poreh et al. 2021, Avilés y Pérez-Rocha 2010). Estos estudios analizan la respuesta de este fenómeno ante los factores geológicos e hidrológicos involucrados mediante el análisis de series de tiempo InSAR. Las mediciones de subsidencia en la Ciudad de México indican una tendencia lineal pronunciada a lo largo del tiempo. Los estudios mencionados se enfocan al entendimiento de la subsidencia en la Ciudad de México a una escala espacial regional. A partir del sismo del 19 de septiembre del 2017, cobraron relevancia las evidencias de fracturamiento en regiones bien definidas, como en el piedemonte de la Sierra de Santa Catarina, resultado de la subsidencia diferencial (Carreón-Freyre et al. 2017), convirtiéndola en un gran prospecto para el estudio local de los cambios en el terreno provocado por eventos tectónicos

(Ovando-Shelley E., Ossa A., & Miguel P. 2007). Esta zona presenta una complejidad reconocida en cuanto al comportamiento mecánico del acuífero (Palma et al. 2022), asociada a la disposición del sistema acuífero en el subsuelo (Palomera & Sanchez 1989) y a los agresivos regímenes de extracción de agua subterránea (CONAGUA 2023).

Los estudios basados en series temporales de InSAR, hasta la actualidad, carecen de detalle al profundizar en el análisis de los desplazamientos del terreno en la Sierra de Santa Catarina. Así mismo, ningún estudio se ha centrado en caracterizar la zona de estudio considerando la respuesta del terreno tras sismos de importancia en la Ciudad. Sobre todo, no se han explorado las señales temporales que no corresponden al comportamiento altamente lineal asociado a la subsidencia regional del terreno.

En este trabajo, se realiza un análisis detallado de datos de series de tiempo InSAR procesados con una técnica de líneas base cortas utilizando datos obtenidos por los Satélites Sentinel-1A y B entre 2014 y el 2021. La contribución principal de este trabajo radica en el estudio de las componentes residuales de las series temporales, después de eliminar la componente lineal, en las cercanías de la Sierra de Santa Catarina. Esto permitirá identificar patrones de comportamiento que pueden ser de utilidad para predecir o entender los efectos de la subsidencia en la zona de la Sierra de Santa Catarina y localizarlos en el espacio.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Series de tiempo

Las series de tiempo son resultado de un proceso estocástico y consiste en una colección de datos dinámicos, obtenidos a través de repetidas observaciones a lo largo del tiempo, pueden estar igualmente espaciadas o no. Sus componentes principales son:

- **Tendencia:** Representa el movimiento creciente o decreciente de los datos a largo plazo controlado por agentes externos. Por ejemplo, la figura 2.1 muestra el comportamiento general del PIB de México desde el año 2003 hasta el 2008 en donde el incremento constante a través de los años está sujeto al crecimiento poblacional.

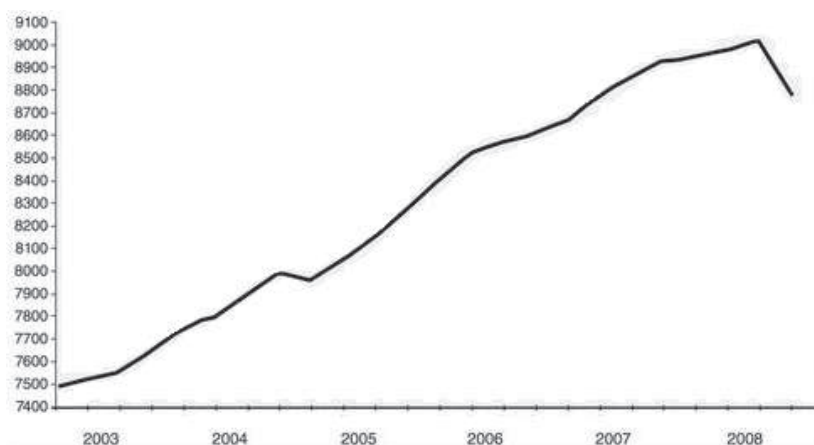


Figura 2.1: **Ejemplo de tendencia creciente utilizando el PIB de México, 2008** (eje x = años, y = billones de pesos). Obtenido de: jornada.com.mx

- **Estacional:** Representa la respuesta al efecto ocasionado por factores que tienen una duración determinada y cíclica comúnmente de meses o semanas. Por ejemplo, la precipitación es una variable estacional (Fig. 2.2) y está bien documentado que su periodo estacional para la Ciudad de México comprende a los meses de mayo a septiembre. La estacionalidad puede ser identificada mediante la observación de patrones repetidos de magnitudes comparables en las series temporales.

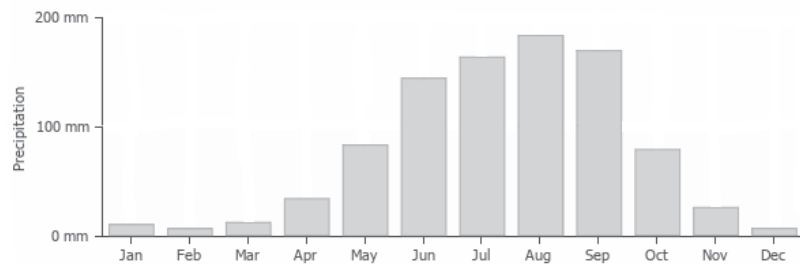


Figura 2.2: **Precipitación promedio en CDMX en 2022.** Obtenido y modificado de: weather-and-climate.com

- **Residuales:** Es resultado de extraer la temporalidad o la tendencia de los valores originales. Estos representan aquellos cambios que no son predecibles ni calculables a través del tiempo y están dominados por el cúmulo de ruido de variables no representativas.

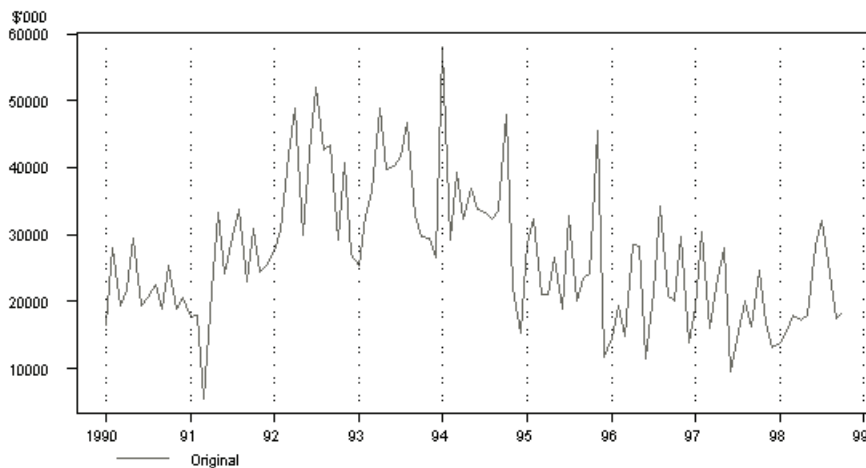


Figura 2.3: **Valores mensuales de aprobaciones de construcción de la ACT.** Obtenido de: abs.gov.au

2.2. Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) satelital

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR) es una técnica avanzada de procesamiento de imágenes complejas de radar, cuyo principal objetivo es estimar la deformación de sistemas de la Tierra Sólida (Hejmanowski et al. 2019). Las imágenes de radar son obtenidas desde el satélite, utilizando una fuente activa de pulsos de radiación electromagnética que se encuentran dentro de las longitudes de onda del espectro del radar (0.3 GHz a 12 GHz) (Guzmán et al. 2022). Las ondas emitidas por los satélites son capaces de penetrar la nubosidad de la atmósfera (An et al. 2023), por lo tanto, son perfectamente funcionales independientemente de la presencia de luz solar. Dichas ventajas permiten que el monitoreo de los cambios en la superficie terrestre puedan operar de forma constante incluso en climas poco favorables.

Para crear los mapas de deformación del terreno, se emite un pulso de energía desde los satélites que orbitan alrededor de la Tierra, este pulso es devuelto al satélite recaudando información de la amplitud (es decir, la intensidad de la señal) y la fase (las diferencias entre dos amplitudes medidas de un punto en específico). El conjunto de información permite crear una figura que representa entonces, los cambios en la superficie. Más aún, se puede usar un conjunto de datos abundantes adquiridos a través del tiempo para hacer inversiones robustas de pares interferométricos, lo cual permite reducir la incertidumbre de las mediciones asociadas a diversas fuentes de ruido (Rosen 2011).

Por otro lado, la interferometría es el proceso de combinar dos imágenes de radar que cubren un mismo área pero que son tomadas en tiempos diferentes con puntos de observación suficientemente similares que permitan ser comparados uno contra otro, es decir, que dos imágenes tengan alta coherencia en relación a la fase de la señal (Hermosilla Díaz 2016). La comparación entre estas imágenes permite revelar cuanto se mueve el terreno.

La técnica InSAR puede cubrir vastas áreas con una resolución de sólo centímetros (Guzmán et al. 2022). Es principalmente utilizada en áreas cuyo acceso esté limitado o que suponga un riesgo a la vida humana o bien, cuando el área de estudio es muy extensa. Esta técnica tiene aplicaciones en el monitoreo de procesos terrestres tales como el tectonismo o la actividad volcánica (Lazeký et al. 2020), además del seguimiento a procesos antropogénicos como la extracción intensiva de agua subterránea (Castellazzi et al. 2016) o extracción de hidrocarburos (Mora & Posada s.f.).

2.3. Técnica SBAS

Por sus siglas en inglés: *Small Baseline Subset*, SBAS es una técnica utilizada para apoyar el procesamiento de imágenes InSAR.

Se encarga de seleccionar un par de imágenes InSAR utilizando líneas base cortas como método de criterio. Al hablar de “líneas base cortas”, se refiere aquellas mínimas diferencias entre las posiciones de los satélites al momento de capturar información satelital, por lo que el procesamiento de imágenes obtenidas por InSAR utilizando SBAS da como resultado imágenes de alta calidad y alta resolución y es aplicado en amplios campos de investigación como: subsidencias (Zhao et al. 2011), desplazamientos (Casu et al. 2011, citeZhang2021) y monitoreo de infraestructura (An et al. 2023).

2.3.1. Mintpy

Mintpy (Miami INSAR Time-series in Python) es un paquete de código abierto en Python para el análisis de series de tiempo y es utilizada con el objetivo de extraer información valiosa acerca del movimiento de la superficie terrestre a partir de imágenes de radar.

Mintpy utiliza algoritmos de procesamiento de radar de apertura sintética (InSAR) para obtener bases de datos procesables:

- **Interferometría:** El proceso de combinar pares de imágenes de radar para capturar cambios entre el radar y la superficie terrestre.
- **Filtrado y correcciones:** Mediante varios procesos de filtrado tales como el filtrado espacial, filtrado temporal y técnicas de corrección como las correcciones topográficas y correcciones atmosféricas reducen el ruido de los datos InSAR.
- **Modelado de fases:** Consiste en separar y cuantificar las fuentes de información con el objetivo de modelar la información valiosa acerca del desplazamiento del terreno y además la información temporal.
- **Inversión geodésica:** Utilizando los modelos de fase y los interferogramas se estiman las deformaciones del terreno y su evolución a través del tiempo mediante ajustes de modelos matemáticos.
- **Visualización y análisis:** Herramienta utilizada para validar la deformación del terreno.

2.4. Zona de estudio

La Zona de estudio se encuentra regionalmente en el sector occidental de la Ciudad de México dentro de lo que se conoce como la Cuenca del Valle de México. La cuál está acotada por cuatro grandes conjuntos volcánicos: Al este se encuentra limitado por la Sierra Río Frío, al sur está limitado por la Sierra de Chichinautzin, al oeste colinda con la Sierra de Las Cruces y por último, al norte limita con los conjuntos volcánicos de Apan-Tezontepec.

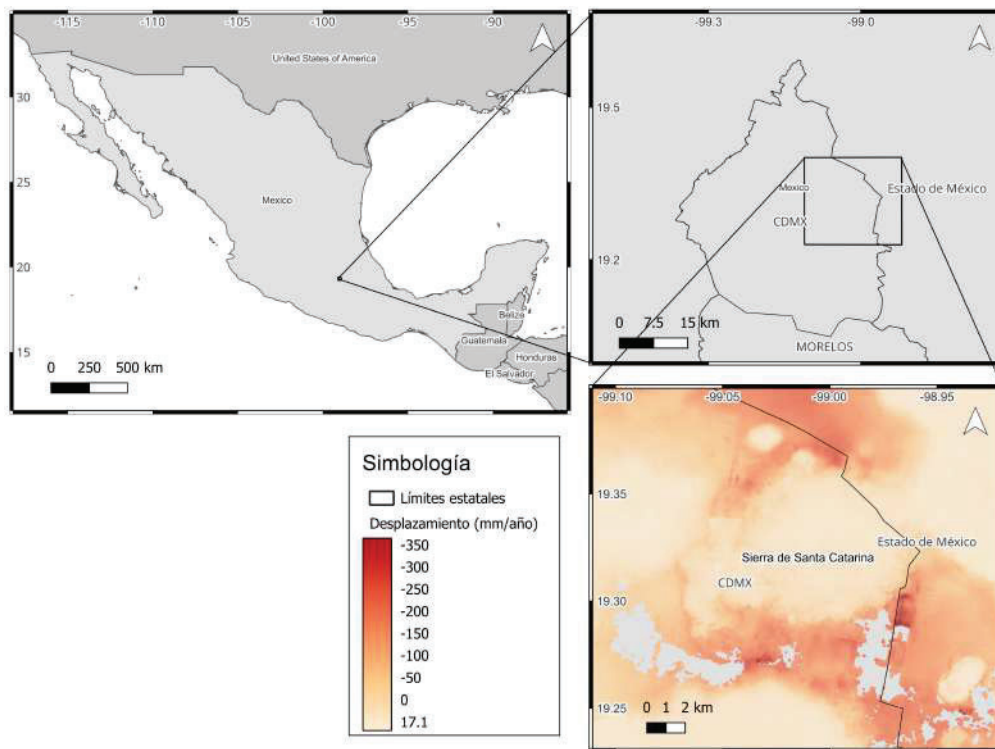


Figura 2.4: Área de estudio.

Localmente, está acotada por un cuadrilátero cuyos vértices están localizados en las cercanías de la Colonia Grabiél Ramos Millán, la Colonia Santa Inés, La Colonia San Lorenzo Chimalpa y la Colonia Emiliano Zapata (Figura 2.4).

Los antecedentes revelan la vulnerabilidad de este sector a diversos riesgos geológicos como hundimiento, fracturamiento, asentamiento en riesgo y zonas de procesos de remoción en masa, presencias de fracturas y hundimiento diferencial (Secretaría de Protección Civil 2014a) debido a la extracción desmedida de agua subterránea (Avilés & Pérez-Rocha 2010) y por la ocurrencia anual de sismos (Carreón-Freyre et al. 2017). Por otro lado, las propiedades mecánicas y físicas inherentes del suelo, no favorecen la construcción y longevidad de infraestructura.

El conjunto de los factores de riesgo y las propiedades mecánicas del subsuelo, representan un peligro para la población que habitan en este sector.

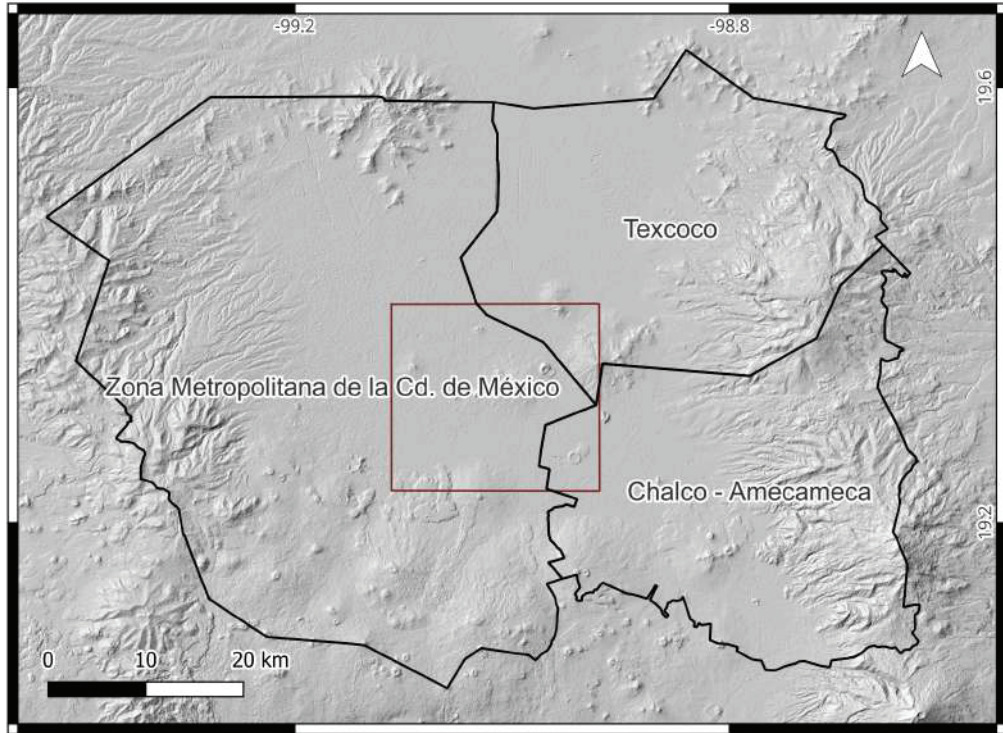


Figura 2.5: **Mapa de ubicación de acuíferos** que comprenden el área de estudio resaltados en un borde negro. El área de estudio está mostrado como un rectángulo rojo.

2.4.1. Geología

La Cuenca del Valle de México tiene origen en el Cretácico con la deposición de material calcáreo y terrígenos (Palomera & Sanchez 1989). Dentro de la creación de la Cuenca del Valle de México, se identificaron tres eventos tectónicos determinantes (Arce et al. 2019), el primero está relacionado con el cabalgamiento que dio origen a la Orogenia Laramide, cuyo papel fue desarrollar los estadios iniciales de la cuenca, es de-cir, la creación de depresiones tectono-volcánicas y su posterior relleno de material volcánico asociado a actividad temprana del vulcanismo de la Faja Volcánica Transmexicana (Arce et al. 2019).

Posteriormente, un segundo evento tectónico en el Mioceno provoca un conjunto de grabens con orientación NW-SE, entre las cuales se emplazó la Sierra de Las Cruces del Plioceno hasta el Pleistoceno.

El tercer y último evento tectónico tuvo inicio en el Pleistoceno cuyo efecto se vio relacionado con la formación de sistema de fallas NE-SW que afectan a la Sierra de Santa Catarina, Sierra de las Cruces y Sierra de Guadalupe. Este sistema de fallas sigue activo desde su origen, por lo que esta zona está sujeta a daños durante eventos tectónicos (Palomera & Sanchez 1989).

2.4.2. Estratigrafía

Debido a que la zona de estudio es parte de la Cuenca del Valle de México, se utilizan las unidades estratigráficas que describen los informes de acuíferos realizados por CONAGUA 2023.

Formación Xochicalco: Forma parte del basamento y aflora al occidente de la Cuenca del Valle de México, formada por una secuencia de calizas calciutíticas y calcilimolíticas, dispuestas en laminación fina y cuyo contenido carbonatado es abundante cuyas características sugieren un ambiente de deposición marino (Aptiano).

Formación Morelos: Con grandes espesores de hasta menos de 1 km, esta unidad aflora al sur de la cuenca y se adelgaza al oriente y poniente, y está constituida por una interestratificación (intercalación) de capas gruesas de calizas y dolomías con láminas de anhidritas.

Formación Doctor: Esta formación corresponde a calizas tipo mudstone (Dunham, 1962), que tienen capas delgadas de nódulos y lentes de pedernal con intercalaciones de lutitas. Facies de cuenca y de banco (Albiano medio - Cenomaniano temprano).

Formación Cuautla: Esta formación afloran al sur de la Sierra de Tepozotlán, y al norte de Zumpango. Está constituida por calizas calcáreas estratificadas de gran espesor, con abundantes fósiles de biostromas y rudistas. Facies de cuenca, banco y litoral (Cenomaniano tardío - Turoniano tardío).

Formación Mexcala: Aflora tanto al sur de la Cuenca como al noreste. Con grandes espesores hasta de 1.5 km, está constituido por una interestratificación gradual de grauvacas, limolitas y lutitas. Facies de aguas someras (Coniaciano - Campaniano).

Granito Colotepec: Ubicado al suroeste, intrusionando a la formación Xochi-

calco en el núcleo del anticlinal de Colotepec, está relacionado genéticamente con el tronco Coaxcatlán, que fue emplazados dentro del mismo tiempo geológico y que intrusionó varias de las formaciones cretácicas (Eoceno medio).

Grupo Balsas: Formado por depósitos continentales y de un espesor de 500 m, es representada por conglomerado calizo con matriz limoarcilloza y cementada por calcita con presencia de óxido de hierro (Eoceno tardío - Oligoceno Temprano). Debido a los esfuerzos tectónicos, esta capa está interdigitada por una secuencia de arcilla, limo y arena deleznable de 800 a 2000 m de espesor.

Rocas volcánicas del Oligoceno tardío - Mioceno temprano: Aflorando en los cerros de Picacho y Pulpito del Diablo, esta secuencia volcánica está fuertemente erosionada y fracturada, cuya composición varía de andesítica a riódacítica. Contienen capas de material aluvial asociado con periodos de reposo de actividad volcánica previa.

Grupo Pachuca: Este grupo está representado por abundantes derrames de lavas de composición basalto a riolitas, en las cuales predomina la andesita y dacita, con presencia de brechas volcánicas y depósitos piroclásticos. (Oligoceno - Plioceno).

Rocas Extrusivas del Mioceno Medio y Tardío: Este grupo está representado por secuencias de tobas, brechas volcánicas y lavas. Afloran a lo largo de toda la Cuenca pero lo hacen en áreas pequeñas, en su mayoría cubiertos de material reciente. Cuyos vestigios se pueden ver representados por los cerros: El Elefante, Los Remedios, Peñón de los Baños, El Judío, la base de la Sierra de Guadalupe, la base de la Sierra de las Cruces, El cerro Patlachique, entre otros.

Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano: Conjunto de rocas volcánicas de composición andesítica a dacítica que representan un segundo periodo magmático dentro de la Cuenca. Afloran principalmente en los flancos de las siguientes sierras: Las Cruces, Zempoala y Río Frío, Guadalupe y Tepozotlán.

Formación Otomí: Conformado por flujos piroclásticos intercalados con coladas de lava que afloran en el occidente de la Cuenca de México.

Rocas Volcánicas Máficas del Plioceno Tardío: Compuesto por derrames de lava de composición máfica interestratificado con capas muy delgadas de brecha volcánica y piroclastos.

Formación Las Cruces: Esta formación se encuentra al suroeste de la Cuenca, aflora en el Desierto de los Leones y La Marquesa, y en la carretera de Naucalpan-

Jiquipilco. Esta compuesto por depósitos piroclásticos de pómez y cenizas. Su espesor máximo es de menos de 1 km. Representado por tres estratovolcanes alineados norte a sur, sus edades también están sujetas a la disposición lo que sugiere que existió migración de vulcanismo de norte a sur. (Plioceno tardío).

Formación Zempoala: Se localiza al suroeste de la cuenca y cuenta con espesores de 1 km en el cerro de Zempoala, posiblemente contemporáneo a la formación de Las Cruces, está representada por una secuencia de lavas andesíticas cuya característica va de afaníticas - porfiríticas (Plioceno tardío).

Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno: Aflorando al poniente de Cuautla y con espesores de hasta 400 m, esta unidad está conformada por rocas sedimentarias clásticas de origen volcánico, entre los que se encuentran: gravas, arenas, limos y arcillas.

Formación Llano Grande: Aflorando en la base noroccidental de la sierra Nevada, esta formación está compuesta por una secuencia de andesitas y riodacitas con presencia de lapilli y flujos de cenizas vítreas (Pleistoceno inferior).

Formación El Pino: Esta formación comprende los cerros La Estrella, El Pino, Chimalhuacán, Chiconautla y los campos volcánicos de Tezontepec-Otumba. Con espesores de hasta 750 metros, esta formación está compuesta por flujos de lava de composición máfica con intercalaciones de cenizas cristalinas, lapilli, y escoria. Los flujos de lava contienen fenocristales de labradorita, olivino, pigeonita, hiperstena, augita y piroxenos (Palomera & Sanchez 1989).

Formación Tláloc: Coladas de lava que afloran en la Sierra Río Frío de composición andesítica y dacítica, cuya sucesión está definida en la base por pomez y líticos con gradación inversa. (Pleistoceno inferior).

Formación Iztaccíhuatl: Con espesores de hasta 2.5 km, esta formación comprende a los volcanes Llano Grande Iztaccíhuatl y Nexpayantla. Está formada por secuencias de andesita basáltica dacítica. (Pleistoceno superior).

Formación Popocatepetl: Con espesor inferido de 3.5 km. Esta formación está compuesta por flujos de lava de composición andesítica y dacítica (Pleistoceno superior-Holoceno).

Formación Chichinautzin: Su espesor es de 1.8 km, y se encuentra aflorado en la Sierra con el mismo nombre, cuya composición es principalmente andesítico-basáltico y andesítico con presencia de fenocristales de olivino y piroxenos (Holoceno).

Depósitos aluviales: Ubicadas al norte y sur de la Cuenca, esta unidad con espesores de 500 m está compuesto por fragmentos de tamaño grava, arena, limo y arcilla (Holoceno).

Depósitos lacustres: Productos de la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra de Chichinautzin, estos depósitos con espesores de 30 hasta 300 m, están compuestos por sedimentos de tamaño grava, arena, limo y arcilla, alcanzando extensiones desde Zumpango hasta Chalco, y desde Texcoco hasta Chapultepec (Holoceno).

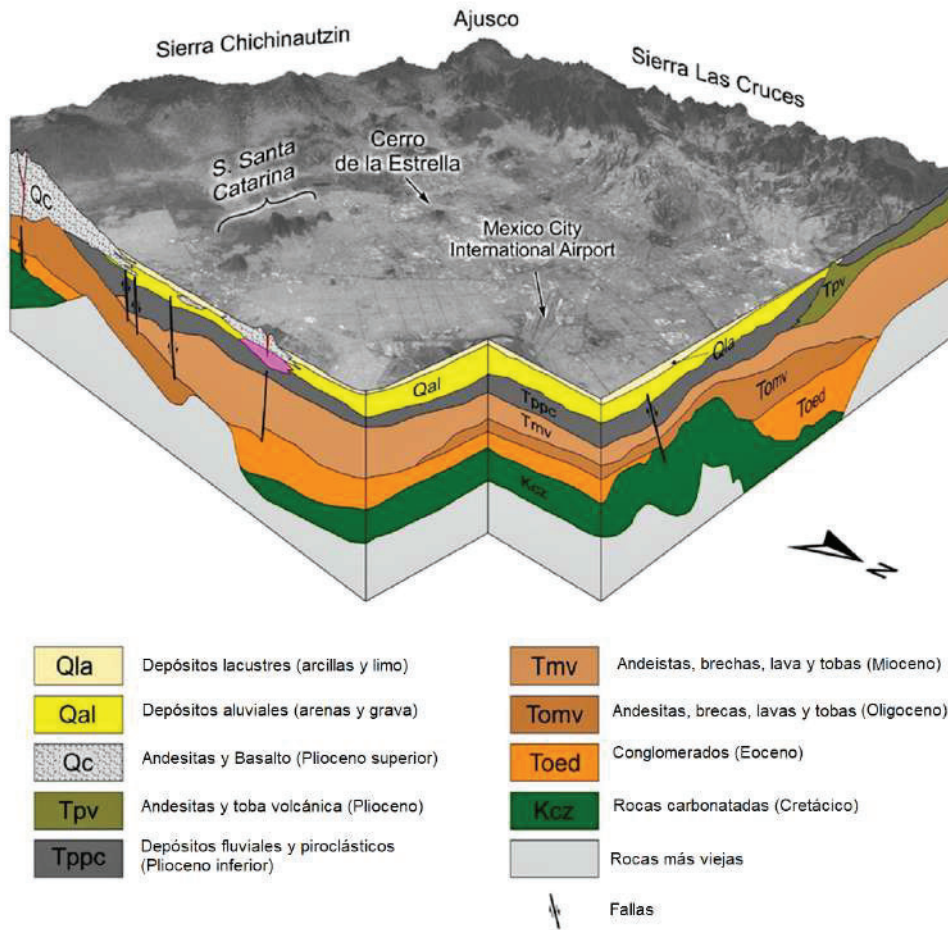


Figura 2.6: **Hidroestratigrafía de la zona de estudio.** Esquema tomado y modificado de (Palma et al. 2022).

2.4.3. Hidrología

La zona de estudio se encuentra en la región hidrológica XIII: Aguas del valle de México y Sistema Cutzamala (Consejo de Cuenca Valle de México 2014). Esta región destaca por:

- Ubicación geográfica: La región hidrológica XIII es una de las regiones más importantes del Valle de México debido a la alta densidad poblacional
- Importancia económica: El Valle de México se considera como el centro económico, cultural y político del país.
- Dependencia de fuentes de abastecimiento lejanas (Sistema Cutzamala): El Sistema Cutzamala está compuesto de varias obras importantes de infraestructura (presas, acueductos, túneles y embalses) que apoyan a la busca de suministro de fuentes lejanas debido a la sobreexplotación de los acuíferos locales.

Dentro de esta región hidrológica, se encuentran tres acuíferos principales que se encargan de abastecer completamente la zona de estudio (Palma et al. 2022): Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, acuífero Chalco-Amecameca y el Acuífero de Texcoco.

Hidrogeología

Los depósitos lacustres y parcialmente cubiertos de rocas volcánicas del Paleógeno que están en el suelo del Valle de México permiten la infiltración del agua subterránea (Secretaría de Protección Civil 2014b). En especial, las rocas volcánicas fracturadas del Paleógeno afloran al este y oeste, quienes permiten la infiltración de agua a través de las fracturas y se han converten así en zonas de recarga. El acuífero superior es la principal fuente de explotación de agua subterránea (Secretaría de Protección Civil 2014a).

Características de los acuíferos

1. Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: Abarca casi la totalidad de la Ciudad de México y una pequeña porción norte del Estado de México (CONAGUA 2023).

Este acuífero es clasificado en la literatura como semiconfinado (CONAGUA 2023) y está conformado por tres paquetes generales: como parte del paquete superior del acuífero, se encuentra material arcilloso dispuesta de manera irregular, de baja porosidad y muy heterogénea, el siguiente paquete

corresponde con el que almacena el recurso hídrico y está representado por material volcánico como piroclastos y conglomerados (Palomera & Sanchez 1989). Por último, debajo de este último paquete se encuentra la base del acuífero, conformado por rocas volcánicas fracturadas.

Su conductividad hidráulica inferida es $K = 10^{-2}$ a 10^{-9} m/s. La precipitación anual es de 500 a 600 mm. Con porosidad eficaz del 10 a 30 % y coeficiente de almacenamiento de $s=0.000825$. La profundidad del nivel estático: de 20 a 40 en el sur, hasta valores de 70 a 170 m en zonas de recarga. En la porción central de 60 a 65 m.

2. Acuífero Chalco-Amecameca: Este sistema acuífero comprende las alcaldías de Milpa alta y Tláhuac, así como los municipios del Estado de México: Amecameca, Atlautla, Ayapango, Cocotitlán, Chalco, Ixtapaluca, Juchitepec, Temamatla, Tengango del aire y Tlalmanalco (CONAGUA 2023). Clasificado como un acuífero semiconfinado (CONAGUA 2023), está constituido por una formación arcillosa de baja permeabilidad. Este acuífero presenta estratificación con mineralización y cuenta con espesores de 300 a 400 m, constituido por un acuitardo y un acuífero confinado, donde en las márgenes se considera libre (CONAGUA 2023). Su conductividad hidráulica varía de 10^{-1} a 10^{-9} m/s. Porosidad efectiva de 1 a 10 %. Coeficiente de almacenamiento $S=0.000825$. La profundidad del nivel estático varía de 150 m a 80 m en zonas de recarga, en la parte central 8 a 35 m y en la porción norte de 50 a 75 m.

3. Acuífero de Texcoco: Este acuífero engloba a los municipios de Chicoloapan, Chimalhuacán, Chiconcuac, Papalotla y Texcoco, casi la totalidad de Atenco, Chiautla, Ixtapaluca, Nezahualcóyotl, La Paz y Tepetlaoxtoc (CONAGUA 2023). El acuífero se clasifica como semiconfinado (CONAGUA 2023) en las zonas profundas y libre en los márgenes, es heterogéneo: como parte del paquete superior se encuentran arcillas lacustres, como material almacenador de agua, se encuentra material aluvial y depósitos volcánicos con intercalaciones de sedimentos arcillosos, el paquete más profundo está compuesto por rocas volcánicas fracturada. Conductividad hidráulica = 2.3×10^{-6} y 7.6×10^{-4} m/s. Coeficiente de almacenamiento de 0.1 a 0.00001. Profundidad del nivel estático: varía de 40 a 130 m, donde las zonas más someras se encuentran al suroeste (lago nabor carrillo). Y los valores más elevados hasta el volcán Tláloc.

Evolución hidrológica

Diversos factores en todo el valle de México ha provocado depresión en el subsuelo que se ha visto afectado mediante la evolución de los acuíferos de esta zona (Palma et al. 2022).

En específico, los factores principales (Palma et al. 2022) al que está expuesto la evolución del acuífero son:

- Cambio en los balances químicos del agua.
- Actividad antropogénica, la extracción del agua subterránea y urbanización.
- Reducción dramática o completa de la infiltración de agua en ciertas zonas.
- Cambios en la descarga del agua subterránea ante la desaparición de lagos superficiales.
- Compactación de capas superficiales.
- Cambios en las condiciones confinadas y semiconfinadas de los acuíferos.
- Daños en la capacidad de infiltración de recarga.

2.5. Satélites Sentinel-1A y B

Los satélites gemelos Sentinel-1A y Sentinel-1B operan en órbitas polares (aquella órbita que cruza la línea imaginaria que conecta los polos geográficos) y pertenecen a la Agencia Espacial Europea, por sus siglas en inglés ESA, diseñados con una vida útil de 7 años y cuyo objetivo es crear información de observaciones de percepción remota (Schubert et al. 2017).

2.5.1. Sentinel-1A

El satélite Sentinel-1A fue lanzado en 2014, con el propósito de adquirir imágenes InSAR de alta resolución inclusive en condiciones meteorológicas adversas, oscuridad y alta nubosidad. Entre las aplicaciones que ofrecen los datos adquiridos de este satélite se encuentran: el monitoreo del desplazamiento del terreno, cobertura forestal, detección de derrames de petróleo en el mar, planificación agrícola y gestión de desastres (Krebs 2020).

2.5.2. Sentinel-1B

El satélite Sentinel-1B es un satélite gemelo a Sentinel-1A que fue lanzado en 2016. Su propósito es complementar al satélite Sentinel 1A mediante aumento de la cantidad de datos InSAR disponibles, su vigencia y extender la cobertura limitada del satélite Sentinel-1A, cubriendo la totalidad del planeta (Krebs 2020).

Características	Sentinel-1AB
Lanzamiento	2014 y 2015 respectivamente
Altitud de órbita	693 km
Resolución espacial	Hasta 5m
Frecuencia de imágenes	16 días
Rango de datos	Desde su lanzamiento hasta el presente

Cuadro 2.1: **Tabla de características de los satélites gemelos Sentinel-1A1B** (Krebs 2020).

Capítulo 3

Materiales

Descripción de datos

El conjunto de datos es resultado del procesado de imágenes de los satélites gemelos Sentinel-1A1B utilizando el paquete *mintpy* de Python. La base de datos contiene información del desplazamiento del terreno a través de los años en un rango desde el 3 de octubre del 2014 al 13 de octubre del 2020 con un espaciado de 12 días entre cada medición. Entre la información que proporciona la base de datos se encuentra: velocidad de subsidencia, desviación estándar, latitud y longitud, elevación y desplazamiento.

Para medir la estadística de los datos de velocidad, se tomó un muestreo general aleatorio (Casal & Mateu 2003) y se generó un histograma representativo para el desplazamiento del terreno.

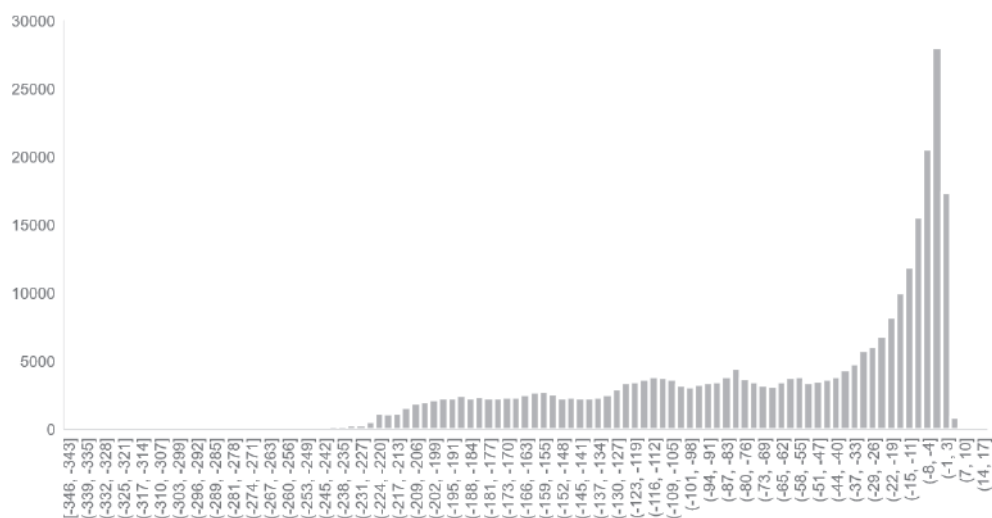


Figura 3.1: Histograma de la tasa de subsidencia de los datos.

Velocidad [mm/año]					
Media	Desviación Estándar	Máx	Mín	Asimetría	Curtosis
-68.2999	67.318	17.11	-346.26	-0.807	-0.485

Tabla 3.1: Estadística general de los datos.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Tratamiento inicial de los datos

Previo al procesamiento de datos se inició la etapa de tratamiento, que tiene por objetivo adecuar el formato de las fechas contenidas en los encabezados. Fue necesario diseñar una función que fuera capaz de convertir las fechas al formato estándar “aaaa-mm-dd” para facilitar la manipulación en las impresiones.

Se optó por transformar el tipo de dato de las fechas en su forma decimal. Obteniendo dos listas de fechas: la primera lista comprendida con datos tipo *datetime* para gráficas y la segunda lista con datos tipo *decimal*.

4.2. Detrend

El proceso de *Detrend* tiene por objetivo conocer el comportamiento real de los datos crudos sin la presencia de la tendencia. El proceso de inicio a fin del *detrend* permite conocer la pendiente o tasa de subsidencia [mm/año] de cada punto y también obtener los valores residuales. Para explorar cómo es la variación de estos dos indicadores de forma grupal, se realizaron dos gráficas: Uno para la tasa de subsidencia y otro para los valores residuales. Ambas gráficas se caracterizaron por una malla de datos de dimensiones X*Y (determinado por el usuario) donde permitía la comparación entre varios puntos.

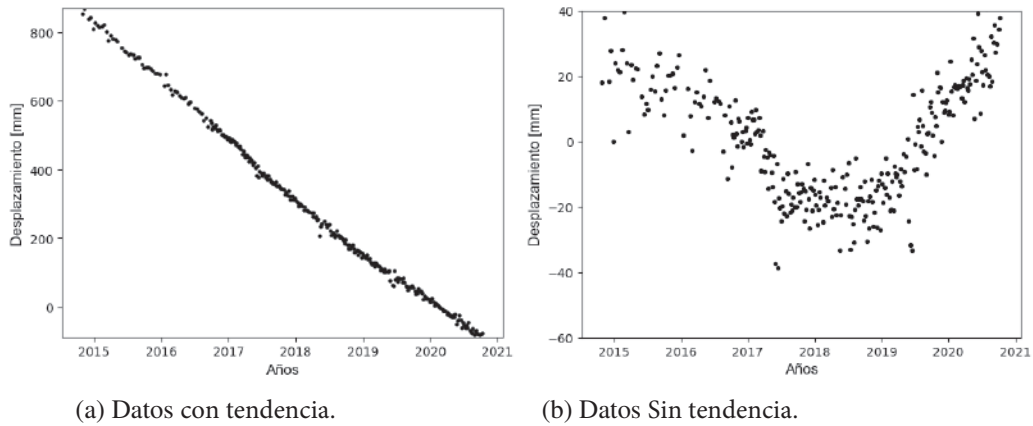


Figura 4.1: Ejemplo de procesado de detrend para un mismo punto.

4.2.1. Tasa de subsidencia

La tasa de subsidencia es resultado de una regresión lineal, es decir, encontrar aquella recta con pendiente que mejor se ajuste a los datos crudos, encontrando el polinomio de forma:

$$y = amx + b$$

Donde:

- x: representa el tiempo [años].
- m: representa la tasa de subsidencia [mm/años].
- a y b: represenan los coeficientes a encontrar.

Se utilizó el método de mínimos cuadrados, que consiste en encontrar aquellos coeficientes a y b que minimicen la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores de los datos crudos y dicha recta $amx + b$. El proceso se llevó a cabo de la siguiente forma:

1. **Base de datos:** Se selecciona el conjunto de datos crudos de desplazamiento del terreno en [mm] de cada punto y la lista de fechas en su formato decimal.
2. **Obtención de los coeficientes a y b:** Empleando el método de mínimos cuadrados, se calculan los coeficientes de cada punto.
3. **Comparación de tasas de subsidencia:** Después de obtener los coeficientes de la función polinomial, se valida la confianza de la función ajustada mediante la comparación entre la tasa de subsidencia predicha del modelo contra la tasa de subsidencia de los datos crudos (datos originales).

4.2.2. Residuales

Los valores residuales fueron definidos como la resta de los valores reales (datos crudos) menos los valores predichos:

$$Resid = Y_{reales} - Y_{predichos}$$

Donde:

Resid: representa el valor residual en [mm].

Y_{reales} : Lista de datos crudos de desplazamiento [mm].

$Y_{predichos}$: Lista de datos obtenidos a partir de la tasa de subsidencia del paso anterior) [mm]

4.3. Muestreo de datos

El procesamiento de una enorme base de datos requiere de grandes cantidades de tiempo, por lo que se priorizó la eficiencia de carga de datos. Para esto se optó por crear un tratamiento adicional, cuyo objetivo es extraer los puntos dentro de una “caja” espacial definida. La restricción se llevó a cabo de la siguiente forma:

1. Carga: Los datos crudos son leídos, guardando su posición en el espacio mediante su información geométrica.
2. Selección de cuatro coordenadas: Las coordenadas pueden estar en cualquier formato, pero deben formar un cuadrilátero.
3. Obtención de nueva base de datos acotada: El resultado de este tratamiento es una nueva base de datos más pequeña y específica espacialmente, que permite explorar el área de estudio en lugares puntuales.

Con las bases de datos zonificadas, estudiar el comportamiento regional de los datos previo a un análisis general es más sencillo. Así mismo, es muy útil para procesar la base de datos en partes al trabajar una gran cantidad de información.

4.4. Descomposición Estacional y de Tendencia

Para comprobar que los datos están sujetos a temporalidad, se optó por utilizar el procedimiento de “Descomposición Estacional y de Tendencia” mediante el método LOESS.

El método LOESS es especialmente útil cuando se tratan con datos que no se ajustan a patrones lineales (en este caso, los “datos” son los valores residuales).

Este método asigna un peso a los puntos en función de la distancia a una curva predicha:

$$w(X_i) = \begin{cases} (1 - |u|^3)^3 & \text{si } |u| < 1 \\ 0 & \text{si } |u| \geq 1 \end{cases}$$

Donde:

X_i : Corresponde al punto actual

$u : \frac{x_i - x}{\text{anchodebanda}}$ Representa la distancia normalizada entre x_i y x

x : Valor del punto central (a partir de la función polinómica calculada).

Ancho de banda: Parámetro que controla qué datos se consideran cercanos y cuáles lejos, es decir, si una curva es suavizada o sensible a ruidos.

El método LOESS devuelve una función polinómica $w(X_i)$ que se ajusta a los datos residuales. Por lo tanto, el procedimiento para aplicar la decomposición estacional y de tendencia es:

1. **Carga de datos:** Se utilizan los valores residuales derivados del procedimiento de detrend.
2. **Seasonal-Trend Decomposition:** Se aplica la decomposición para un punto utilizando el método LOESS.
3. **Obtención de componentes:** El método devuelve tres componentes: Tendencia de los datos residuales, estacionalidad y los valores sobrantes.

4.4.1. Sismos

Se aprovechó de la componente de tendencia de los datos residuales para comprobar si los sismos tienen alguna influencia en el comportamiento, para esto, se optó por realizar una gráfica indicando los sismos de mayor relevancia de los últimos nueve años, la relevancia de los sismos fue elegida con base a la intensidad relativa de los mismos desde la Ciudad de México, así como la cercanía del epicentro y la magnitud (Servicio Sismológico Nacional 2023).

Este análisis fue recreado para varios puntos con diferentes geometrías. Los principales factores de discriminación fueron quiebres, cambios de tendencias y cambios en la tasa de subsidencia.

4.5. Filtrados

Para esta sección fue necesaria la implementación de técnicas matemáticas y de observación con el objetivo de identificar concentraciones de comportamientos

similares a lo largo del área de estudio. Se identificaron tres comportamientos generales que fueron agrupados en: \cap (U invertida), W y Zigzag.

4.5.1. Comportamiento \cap (U invertida)

Esta agrupación de datos se describen como gráficas bien definidas, arqueadas. Dada su naturaleza geométrica, se optó por crear un ajuste polinomial de segundo grado utilizando el método de mínimos cuadrados para los valores residuales obteniendo el coeficiente de determinación (R^2). Con base a estas características, se eligieron dos discriminantes que permitieran filtrar los datos hasta obtener una base de datos que contenga únicamente las \cap . Dichos discriminantes son: $R^2 > 40$ y tasas de subsidencia ≤ 30 [mm/año].

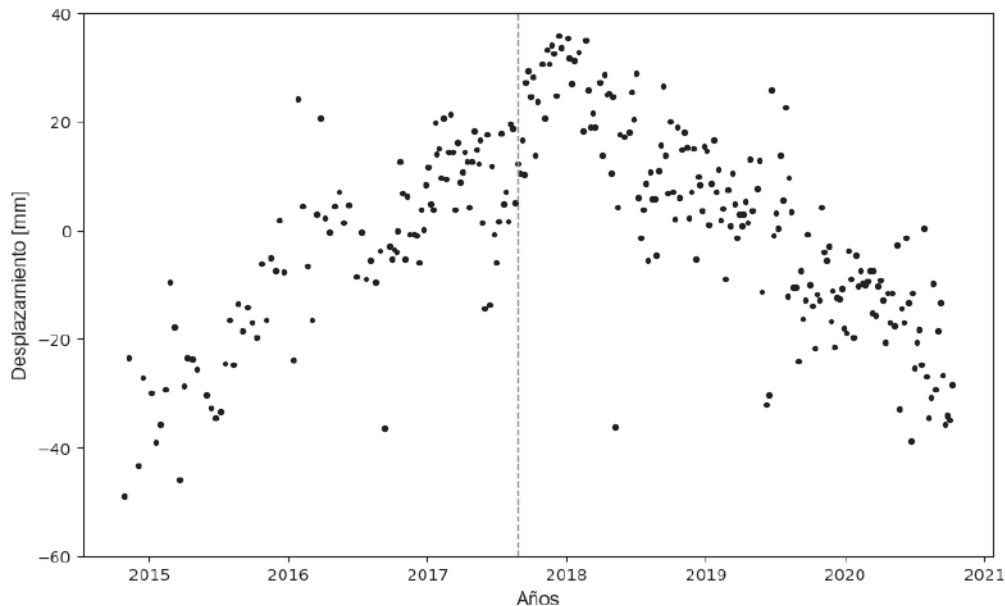


Figura 4.2: **Comportamiento general de \cap (U invertida)**. La línea gris punteada corresponde a la fecha de ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017

4.5.2. Comportamiento "W"

Esta agrupación de conjunto de datos se definen por un comportamiento caótico, con una geometría mal definida cuyos puntos de interés se identifican únicamente en fechas significativas. La estrategia para restringir este filtrado consistió, en particionar la base de datos en cuatro partes: desde el inicio de la base de datos

hasta el 10 de septiembre de 2016, del 10 de septiembre de 2016 al 22 de diciembre de 2017, del 22 de diciembre de 2017 al 01 de agosto del 2018 y desde el 01 de agosto del 2018 hasta el final de la base de datos. Posteriormente, se realizaron regresiones cuadráticas de grado 1, una vez obtenidas las funciones ajustadas a cada línea, se estudió el comportamiento para varios puntos, por último, se estableció un límite máximo para los valores de las tres pendientes utilizando los valores promedio.

Los valores discriminantes promediados fueron:

- Promedio de la primer pendiente <-8
- Promedio de la segunda pendiente >1
- Promedio de la tercera pendiente <-17
- Promedio de la cuarta pendiente >2

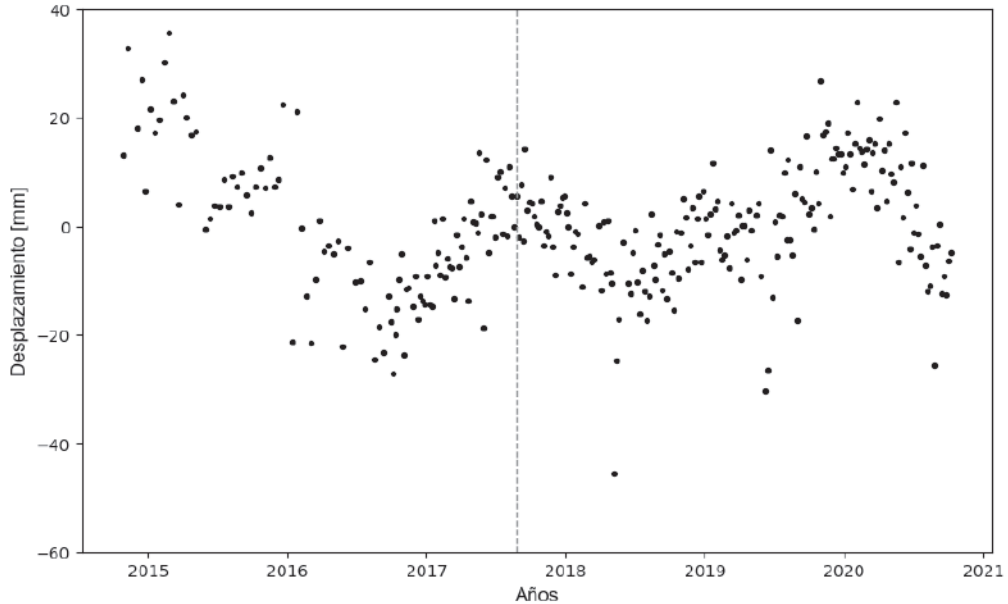


Figura 4.3: **Comportamiento general de las gráficas tipo “W”**. La línea gris punteada corresponde a la fecha de ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017

4.5.3. Comportamiento "Zigzag"

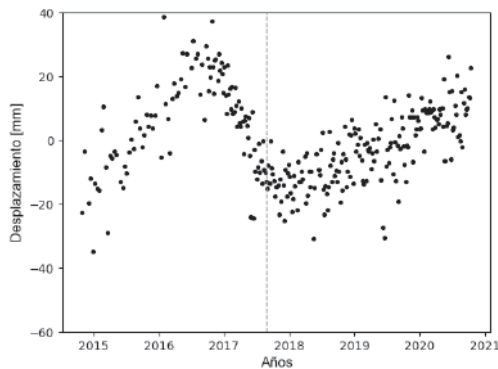
Por último, la agrupación de tipo "Zigzag" se destaca por tener un comportamiento sinusoidal de forma $a \cdot \sin(b \cdot x)$ con una geometría muy bien definida.

Al momento de caracterizar este tipo de gráficas, se observan dos tipos de zigzag generales: Las gráficas zigzag 2016, y las gráficas zigzag 2017, cuyo nombre fue atribuido utilizando la ubicación del primer pico observable en las gráficas (4.4).

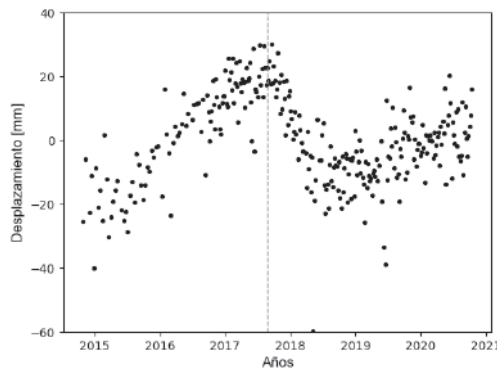
El método de filtrado para las gráficas de zigzag es el siguiente: Se identificó el valor promedio del punto más alto de la primera cresta observable y punto más bajo del primer valle observable. Por último, se hizo una regresión lineal utilizando el método de mínimos cuadrados del último segmento a partir del primer valle.

Al promediar varios datos muestreados, se eligieron los valores discriminantes como:

- Primer cresta para 2016 >20, para 2017 >13
- Primer valle <-13 para ambos
- Promedio de pendiente de la función ajustada >3



(a) ZigZag 2016.



(b) ZigZag 2017.

Figura 4.4: **Tipos de Zigzag.** La línea gris punteada corresponde a la fecha de ocurrencia del sismo del 19 de septiembre de 2017.

4.5.4. Delta Y (ΔY)

Este proceso tiene por objetivo analizar aquellas gráficas cuyo comportamiento se ve afectado por el sismo del 19 de septiembre del 2017. Esto se determinó definiendo a una gráfica afectada como: aquella gráfica en la que la fecha del sismo presenta un “salto” en los datos. Para lograr esto, se dividió la base de datos en dos partes:

- Izquierda: Del inicio de la base de datos al sismo del 19 de septiembre de 2017.
- Derecha: Del sismo del 19 de septiembre de 2017 al final de la base de datos.

Posteriormente, se realizó una regresión lineal utilizando el método de mínimos cuadrados en cada extremo, dando como resultado dos funciones ajustadas a sus curvas correspondientes. Al evaluar en aquellas funciones la fecha del sismo, se obtuvo un valor diferente para cada extremo. Por lo tanto, se definió a ΔY de la siguiente forma:

$$\Delta Y = |Y_{izq} - Y_{der}|$$

Donde:

Y_{izq} : Valor evaluado en la función obtenida de los datos de la izquierda.

Y_{der} : Valor evaluado en la función obtenida de los datos de la derecha.

4.6. Visualización de datos

Para interpretar los resultados obtenidos de los datos filtrados anteriormente y, utilizando el Sistema de Información Geográfico QGIS, se llevó a cabo el próximo seguimiento para cada uno de los conjuntos filtrados:

1. Carga de datos: Carga a QGIS de los conjuntos de datos (\cap (U invertida), W, zigzag y ΔY).
2. Dar formato a los datos: De cada conjunto, elegir parámetros a cuantificar. Por ejemplo, graduar utilizando un valor, o simplemente su ubicación espacial.
3. Creación de mapas: Una vez analizados cada uno de los conjuntos de datos, se crearon mapas regionales relevantes y comparables.

Para cada uno de los mapas se utilizaron diferentes visualizaciones:

4.6.1. Datos para R^2

Mapa de valores de R^2 que van desde 0 hasta 1, que representan aquellas zonas en las cuáles el modelo matemático de la regresión lineal se ajusta más a función cuadrática, siendo los valores cercanos a 1 los más fiables.

4.6.2. Datos para W y ZigZag

Para estos dos comportamientos se determinaron simplemente su posición geográfica, con el objetivo de revelar patrones y/o aglomeraciones particulares en zonas específicas.

4.6.3. Delta Y

Debido a que la regla empírica (Data Science Team 2020) para la desviación estándar considera a un valor mayor a 3 desviaciones estándar como un valor anómalo, se empleó un mapa de valores de desviación estándar que van desde -1 hasta >3 , para señalar aquellos valores cuyo comportamiento de desplazamiento post sismo está fuera de lo común.

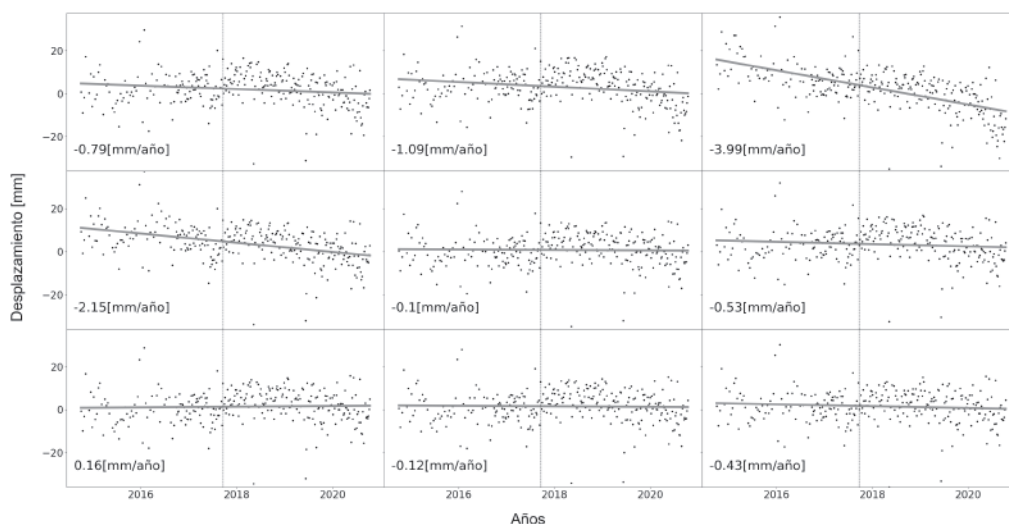
Capítulo 5

Resultados

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos del trabajo, producto de los análisis matemáticos anteriormente mencionados.

En primera instancia, se muestran los resultados de la caracterización de la zona de estudio, lo cual describe los diferentes rasgos físicos distintivos de la zona de estudio. Después, se muestran los resultados de los proceso de filtrados, que comprenden gráficas de tendencia y valores residuales para todos los tipos de gráfica y procedimientos realizados.

5.1. Caracterización de la zona de estudio



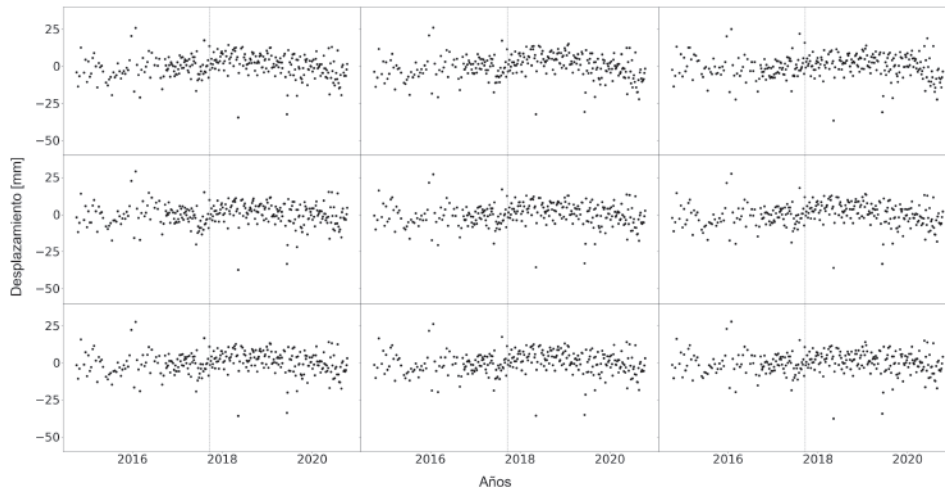
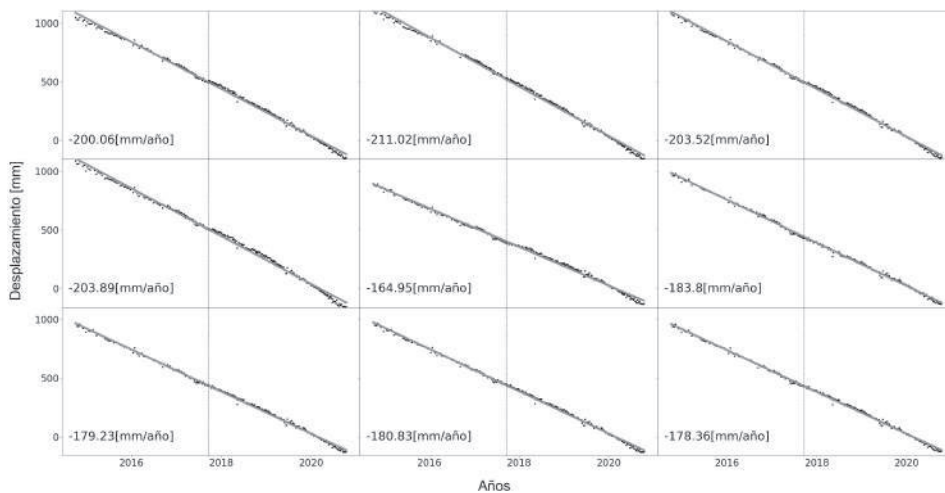


Figura 5.1: **Comportamiento de los valores de tendencia y valores estables.** Se muestra la geometría promedio que toman aquellas figuras dentro de las áreas denominadas como “lomas” dentro de la zonificación geotécnica. La tendencia de las zonas estables se caracteriza por una tasa de subsedencia baja. Una vez aplicado el proceso de *detrend* se obtiene como resultado el mosaico inferior de la figura 5.1, donde se pueden encontrar los valores residuales. Los valores residuales de las zonas estables se generalizan con patrones con muy poca variación, lo cuál se puede traducir en que las características mecánicas y físicas de esta zona, lo definen como de baja perturbación a eventos geológicos.



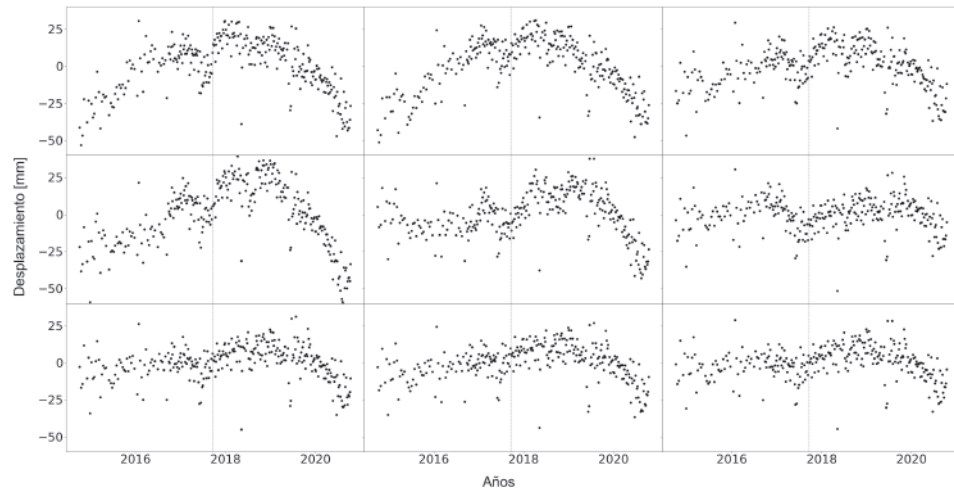


Figura 5.2: **Comportamiento de zonas de subsidencia.** Esta zona se identifica por tener una tasa de subsidencia negativa de gran magnitud. Las gráficas de los valores residuales están constituidos por una morfología muy más definida, predecibles y más homogénea en relación a las gráficas de las zonas estables.

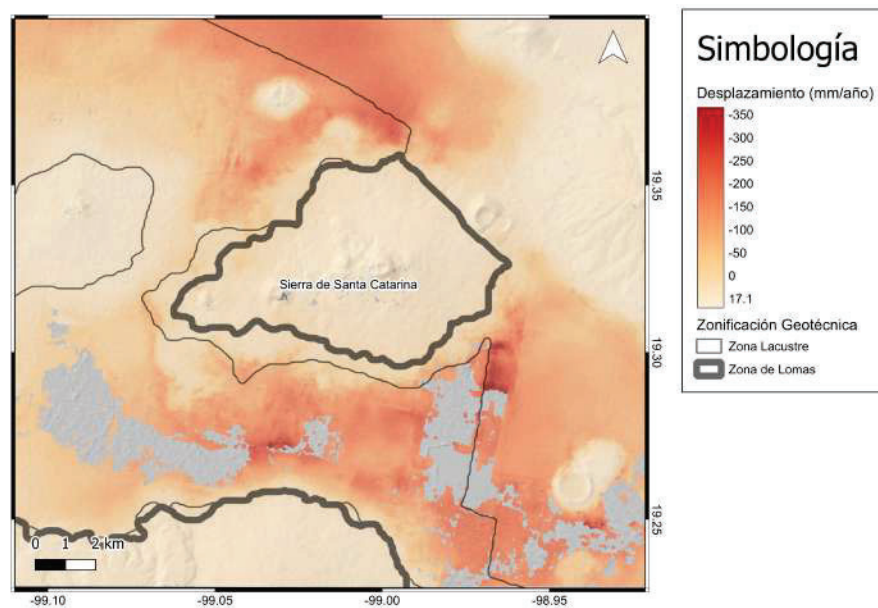


Figura 5.3: **Zonificación Geotécnica contra el área de estudio.**

5.2. Filtro de las diferentes bases de datos

A continuación se presentan las gráficas de los diversos datos filtrados y agrupados en bases de datos correspondientes. Cada par de mosaicos pretende mostrar el comportamiento promedio de las gráficas asociado a cada proceso de filtrado

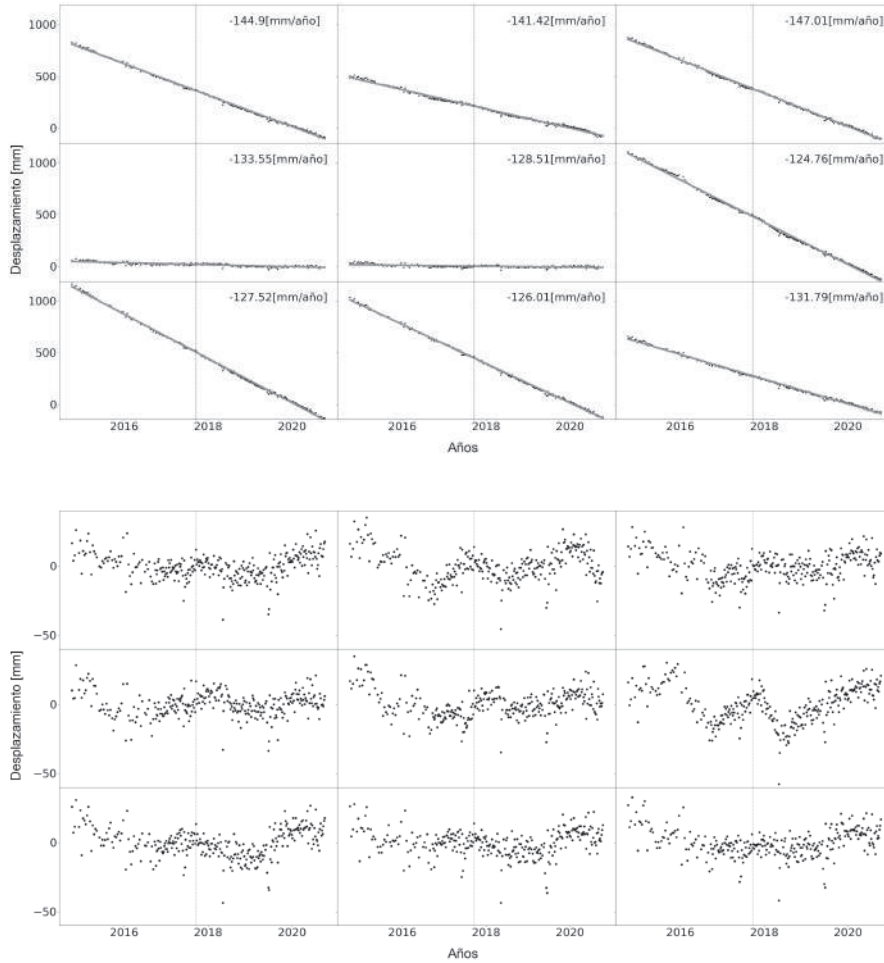


Figura 5.4: Comportamiento de las gráficas “W”.

En la figura 5.4, se observa el comportamiento de las gráficas tipo "W". Cuentan con una morfología general, sin embargo, existen variaciones que permiten afirmar que no obedecen un sólo patrón, ni de tendencia ni de los valores residuales. Por otro lado, los valores residuales no son completamente simétricos y están geográficamente zonificados.

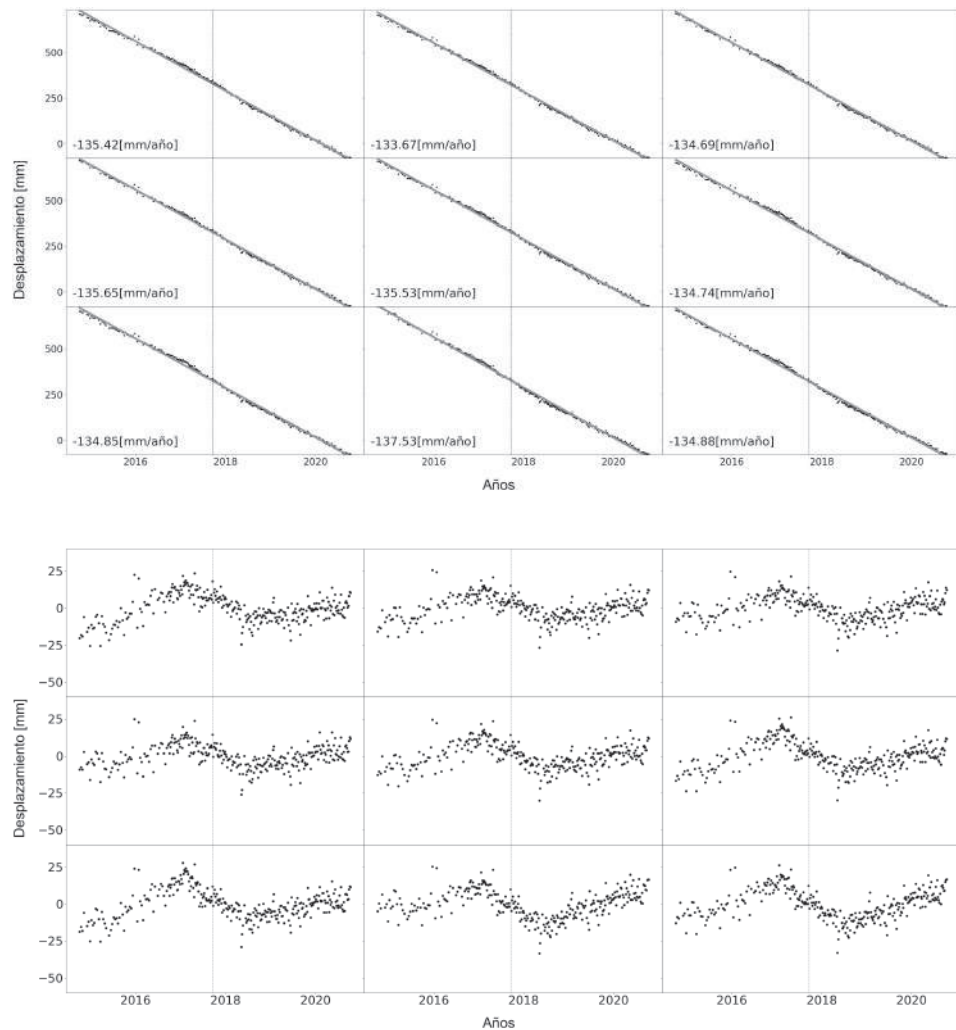


Figura 5.5: **Comportamiento de las gráficas “Zigzag”**. Posterior al proceso de *detrend*, este tipo de gráficas presenta una tasa de subsidencia muy similares (del orden de -135 mm/año) independientemente de las variaciones que presentan y de su localización geográfica.

Por otro lado, los valores residuales de estas gráficas comprenden un conjunto de datos bien definido donde se encuentran dos casos tomando como referencia la posición de la cresta más vieja cronológicamente: Primer cresta ubicada en el año 2016 y primera cresta ubicada directamente en la fecha del terremoto del 2017.

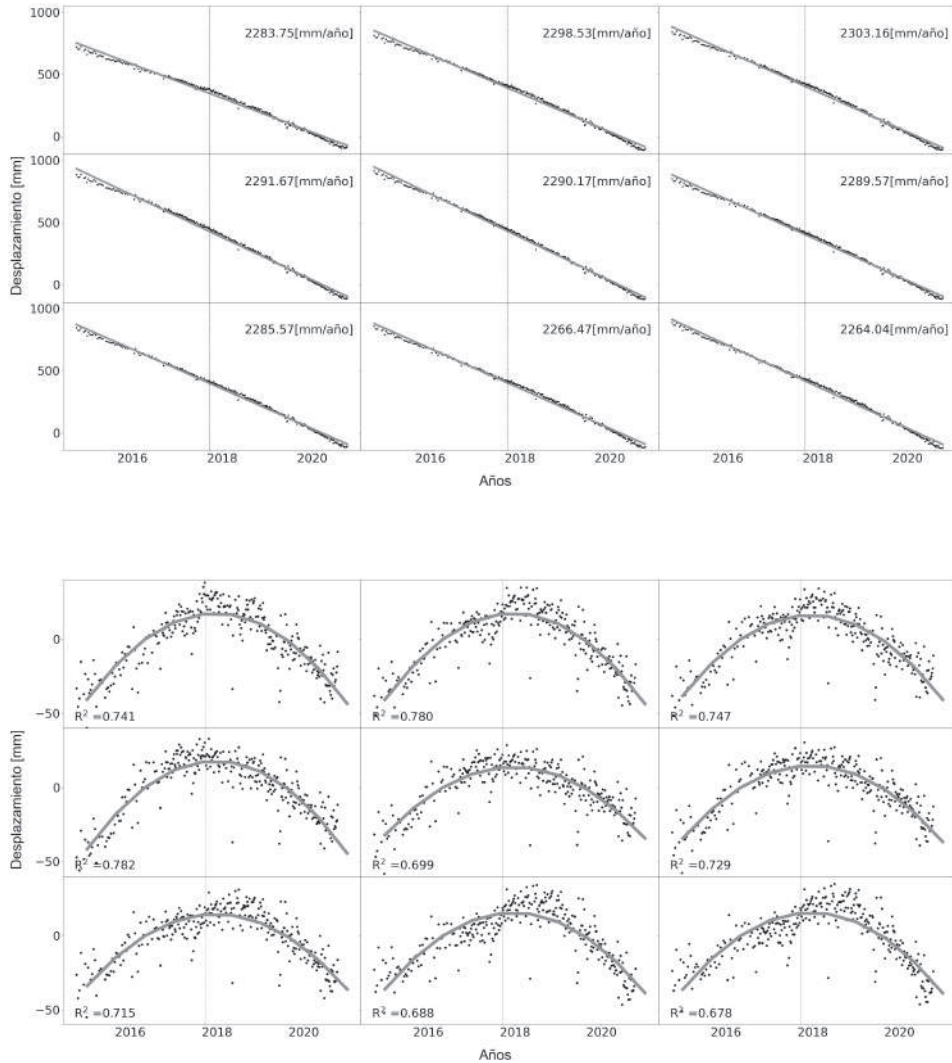
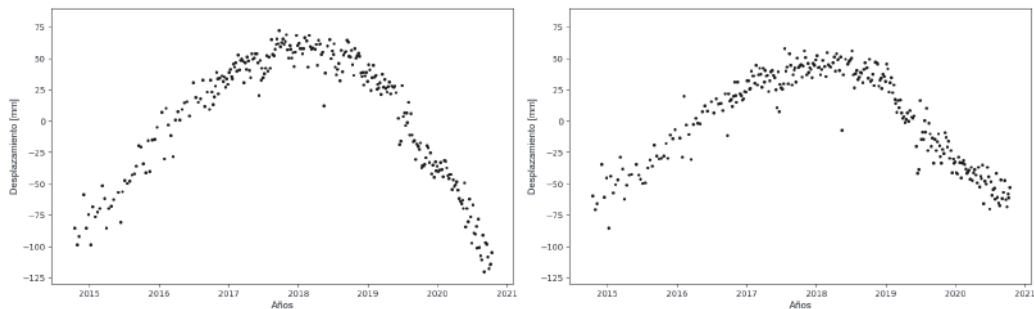
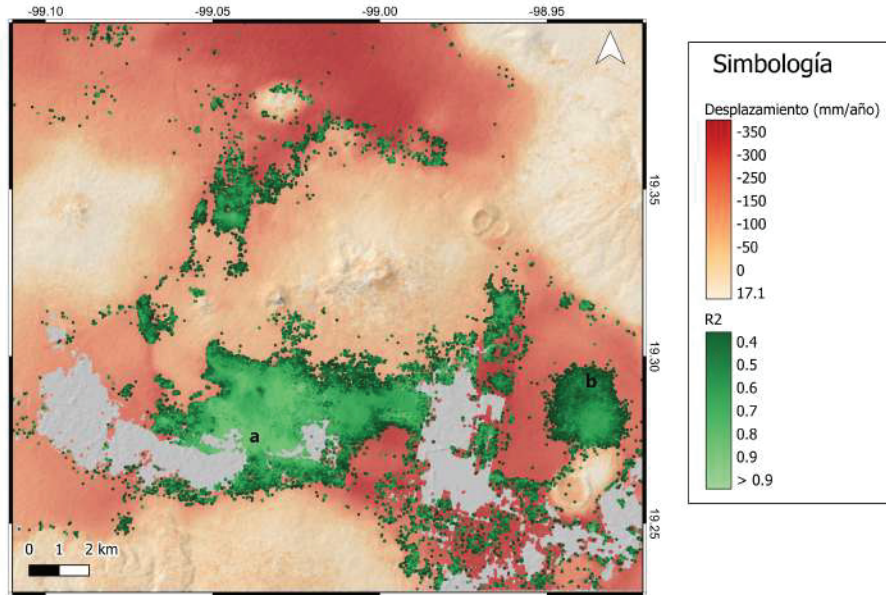


Figura 5.6: **Comportamiento de las gráficas “U invertida”**. Mantienen una tendencia constante a mínimamente variable, sin embargo, estas gráficas no se encontrarán en zonas estables, de baja tasa de tendencia o las zonas de lomas (según la zonificación geotécnica).

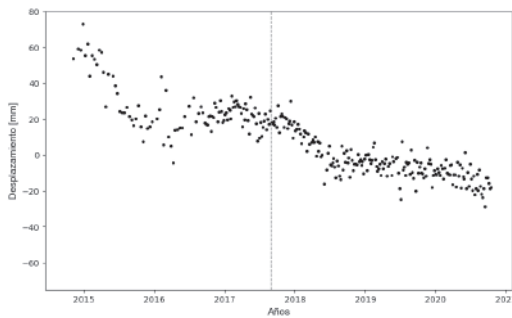
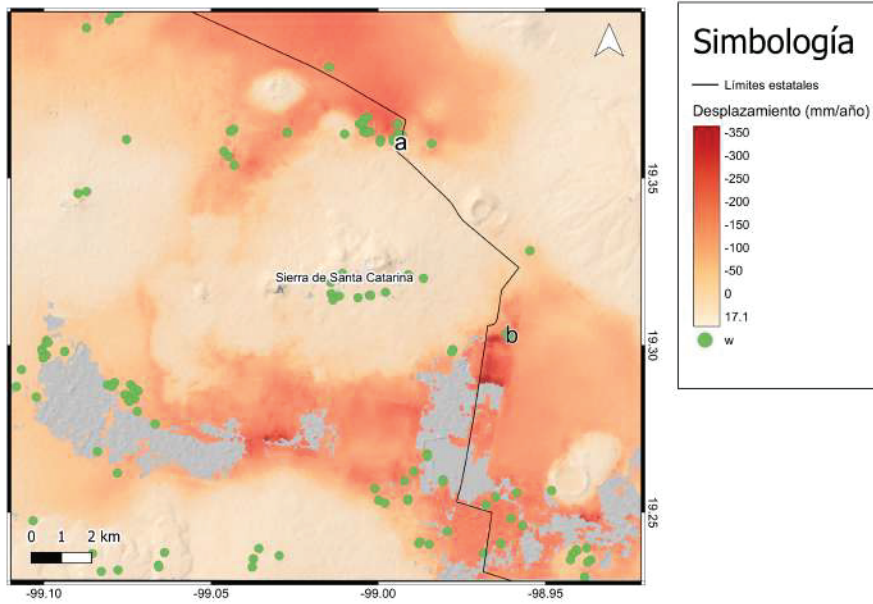
Por otro lado, los valores residuales se caracterizan por tener picos importantes cercanos a las fechas del terremoto de septiembre del 2017 (línea gris punteada). También, se indican los valores de R2 representan qué tan bien se ajustan los datos a la regresión cuadrática realizada. La visualización gráfica se observa en la figura 5.7



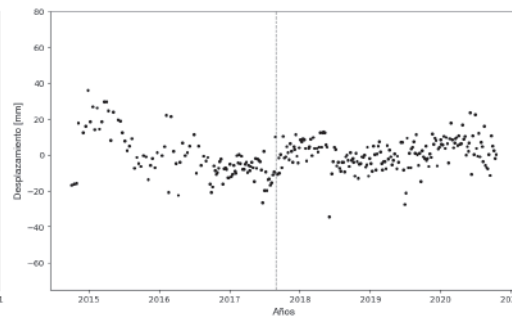
(a) Cercanías de la Colonia "La Conchita".

(b) Norte del volcán "El Xico".

Figura 5.7: Mapa de ubicación de " R^2 " superpuesto con el mapa de desplazamiento [mm/año], junto con puntos de observación con muestra de gráficas. La imagen anterior representa que, para las zonas de mayor " R^2 ", los datos seguirán una trayectoria cuadrada de mayor amplitud.

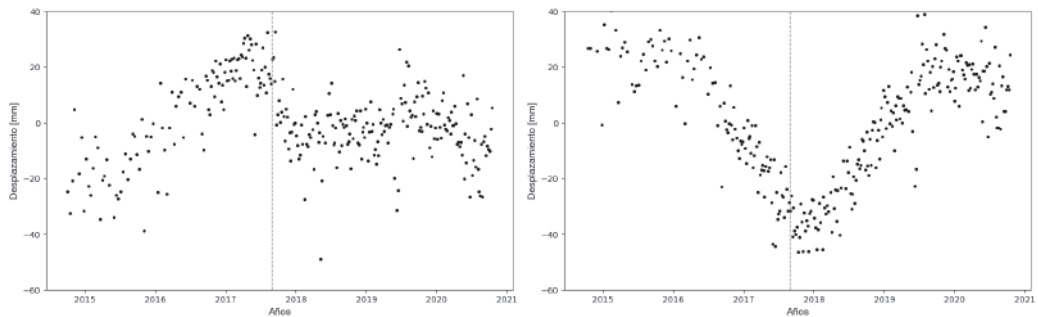
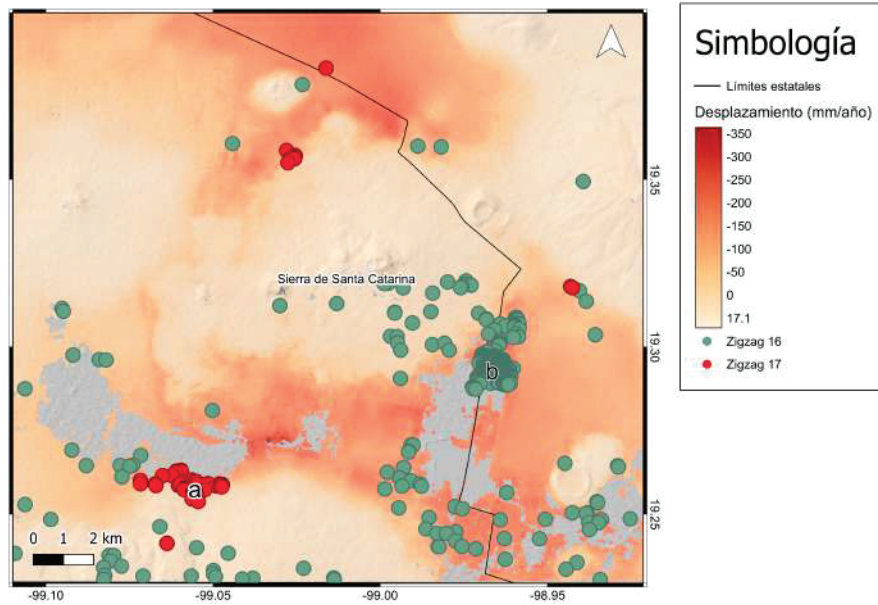


(a) Norte de la Sierra de Santa Catarina.



(b) Sureste de la Sierra de Santa Catarina.

Figura 5.8: **Mapa de ubicación de “W”**. Esta base de datos filtrada en particular está presente tanto en zonas estables como de subsidencia, sus aglomeraciones más considerables se pueden ubicar en zonas de media a alta subsidencia (desde transición hasta lomas según la zonificación geotécnica), aunque también tiene presencia en zonas estables.

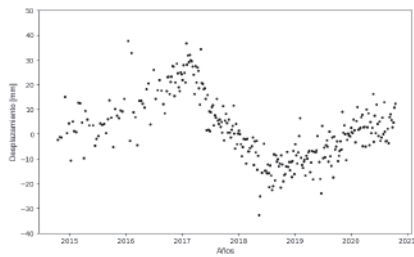
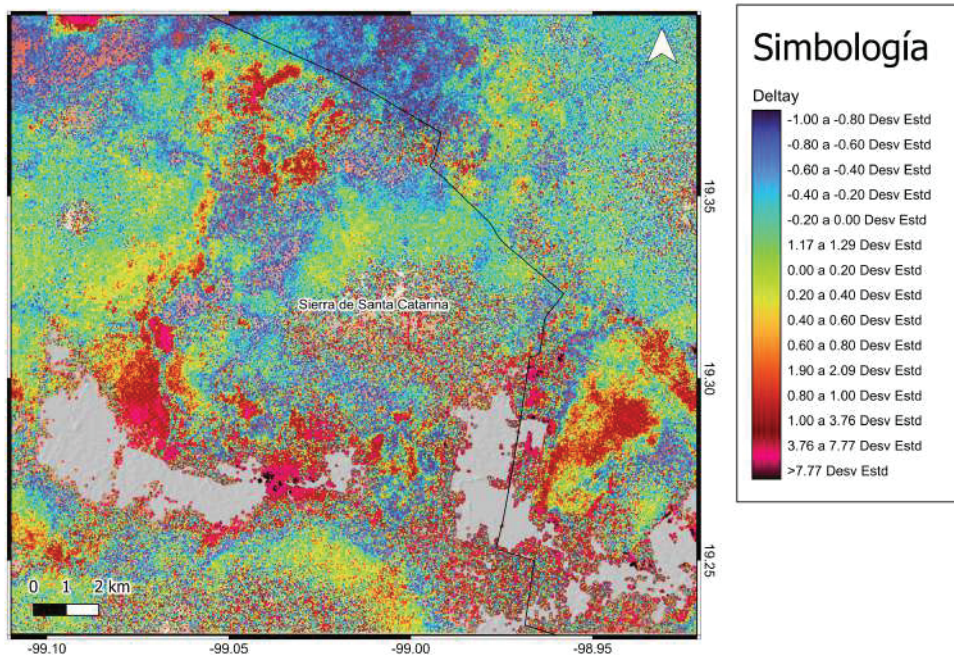


(a) Colonia Ampliación Miguel Hidalgo.

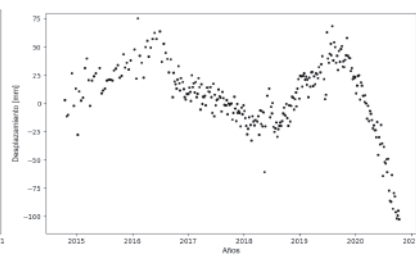
(b) Noroeste de la Colonia Xochimilco.

Figura 5.9: Mapa de distribución de “Zigzag”. Existen dos aglomeraciones dominantes (a y b) en las que se pueden agrupar los comportamientos de estos dos tipos de gráficas.

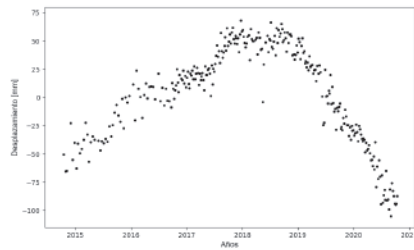
El primero (a) se encuentra en los alrededores del barrio de Chililico en Xochimilco. Por otro lado, el segundo (b) se encuentra ubicado en el sureste de la Sierra de Santa Catarina, entre la Colonia Ampliación Miguel Hidalgo y la Colonia Santa Catarina Yecahuitzotl.



(a) Cluster noroeste



(b) Cluster oriental



(c) Cluster occidental

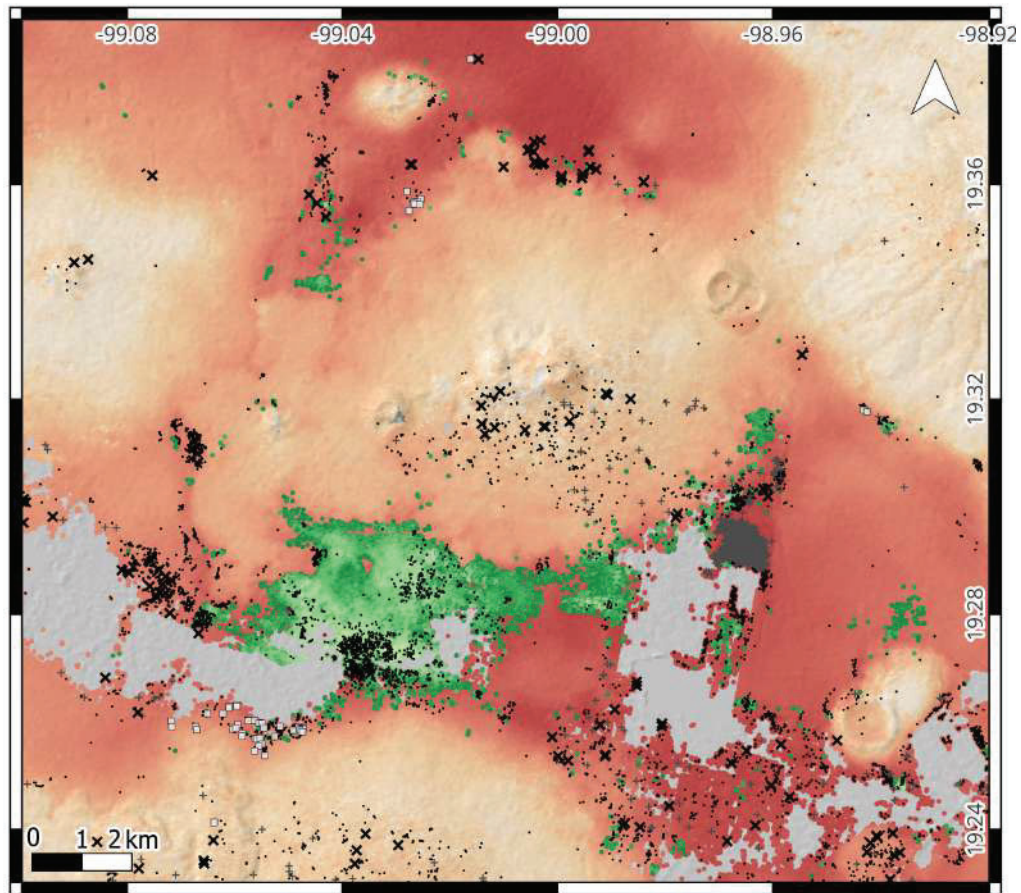
Figura 5.10: Mapa de ubicación de valores Delta Y. Los valores más altos para esta representación coinciden con la zona sur de la Sierra de Santa Catarina (en negro). Las imágenes a, b y c representan las gráficas de los valores residuales en ubicaciones de interés.

Capítulo 6

Discusión y Conclusión

Los resultados principales revelan que dentro de la zona de estudio, se encuentran patrones no lineales distinguibles obtenidos mediante el análisis de los valores residuales de las series de tiempo de los datos InSAR. Y en la figura 6.2 se presentan las zonificaciones principales de cada tipo de variable encontradas en este trabajo.

- Los valores más representativos (> 0.7) de R^2 se encuentran, en su mayoría, al sur de la Sierra de Santa Catarina
- Los valores más representativos de W se localizan generalmente en los márgenes de la Sierra de Santa Catarina, sin embargo, existen pocos valores dispersos en toda la zona de estudio.
- Los valores más representativos de Zigzag 17 se ubican al noreste de Xochimilco, cercano a los cuerpos de agua.
- Los valores más representativos de Zigzag 16 están dentro de la Colonia Ampliación San Miguel.



Simbología

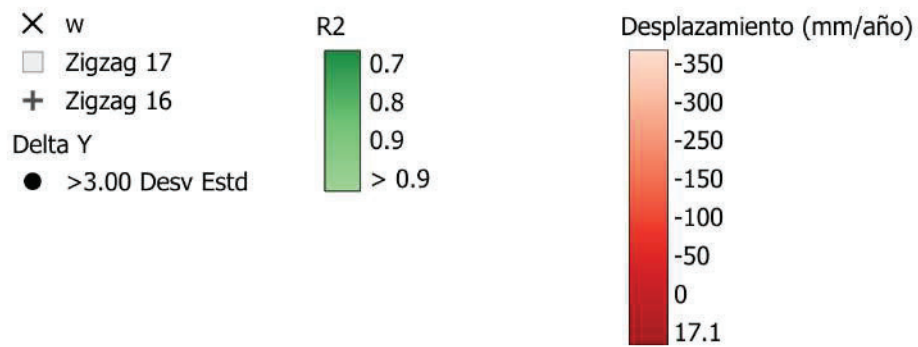


Figura 6.1: Mapa de integración de variables.

Los resultados encontrados, en conjunto con los estudios anteriores revelan coincidencias con dos factores geológicos principales: Hidrología y sismos y frac-

turas.

6.1. Sismos y fracturas

La integración del mapeo de fracturas (CENAPRED 2020), en conjunto con la información de los Atlas de Riesgo de las alcaldías que abarcan el área de estudio (CONAGUA 2023), permite establecer una correlación entre las gráficas tipo "w" y aquellas de tipo "Zigzag 17". La disposición espacial revela coincidencias con los datos de fracturas, y se encuentran ubicadas en áreas caracterizadas por una subsidencia significativa. Esto permite proponer que el sismo del 19 de septiembre de 2017 pudo haber desencadenado la reactivación de fallas. Por otro lado, en regiones donde no se dispone de información estructural previa, existe la posibilidad de que el movimiento producido por sismos genere la formación de nuevas fracturas y provoque hundimientos diferenciales en el terreno. Investigaciones previas (Hejmanowski et al. 2019) demuestran que los sismos, ya sean de baja o alta magnitud, tienen impacto en la subsidencia de las áreas urbanas.

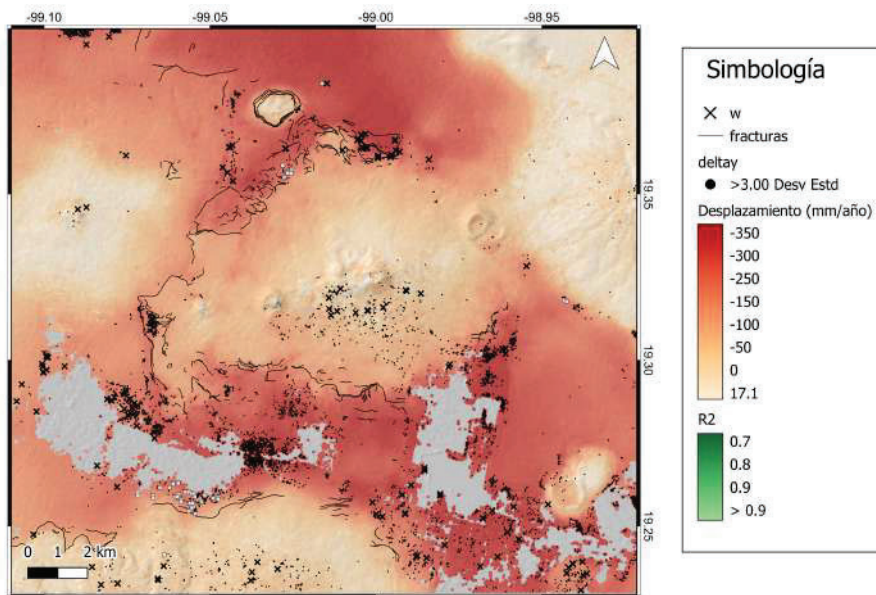


Figura 6.2: Mapa correlativo del factor tectónico.

6.2. Hidrología

Por otro lado, existe una correlación entre las gráficas tipo “R²”, “Zigzag 16”, “W”. Estudios acerca del agua subterránea de la Ciudad de México en (Lesser 2005, Palma et al. 2022) detallan el desarrollo actual de los acuíferos y permiten establecer que el comportamiento subterráneo de los acuíferos está en armonía con las zonas de más alta subsidencia (figura 6.3)

Por otro lado, en 2016, se decreta un cambio en la política de extracción por uso de suelo (Ley de Aguas Nacionales, 2016), lo cual podría explicar la concentración de estos puntos en áreas residenciales como respuesta a una explotación inmediata de los acuíferos. Las gráficas tipo “W” también cuentan con un componente hidrológico que podría atribuirse a la respuesta ante los eventos climáticos temporales, que pueden provocar la compactación y expansión de suelos.

Finalmente, la apertura de las gráficas “R²” muestran sus valores más elevados en el sector sur de la Sierra de Santa Catarina, lo cual concuerda con aquellas zonas en donde el acuífero subyacente tiene un comportamiento predominantemente semiconfinado. El patrón general de este tipo de gráficas pueden explicarse con los cambios en el nivel de agua subterránea debido al drenaje de los acuíferos y, debido a su posición geográfica, es posible que exista levantamiento por raíces de vegetación.

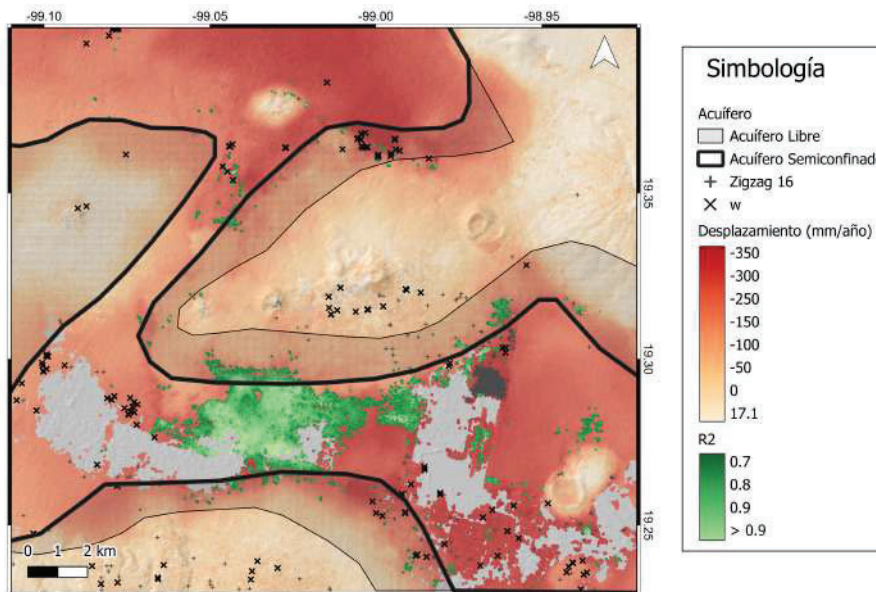


Figura 6.3: Mapa correlativo del factor hidrológico.

6.3. Geología

La geología representa la parte correlativa de aquellas zonas en las que se sitúan fuera del rango explicativo tanto de la hidrología, como del aspecto tectónico.

Este escenario abarca tanto a las gráficas de tipo “W” como a aquellos puntos remanentes de los valores de R^2 . En el primer caso, la geología local de los alrededores puede ejercer influencia en la inestabilidad de subsidencia de amplitud moderada. Por otra parte, los valores de R^2 más distantes de las zonas aglomeradas pueden atribuirse a la presencia de capas de arcillas expansibles, rocas sedimentarias inclinadas o estructuras complejas que influyen en la subsidencia.

6.4. Recomendaciones para trabajos futuros

A lo largo de este estudio, se revelaron diversos resultados que generan incógnitas que pueden ser explorados por futuras investigadoras o investigadores. A continuación, se sugieren las siguientes líneas de investigación:

1. Valores atípicos en la cima de las Sierras: Presencia de valores atípicos para casi todos los filtros ubicados en las zonas estables.
2. Estudios a detalle para el comportamiento hidrológico de la zona.
3. Patrones intermedios: El análisis exhaustivo de las series de tiempo revelan que existen patrones combinados entre los diferentes tipos de gráficas. Por lo que se recomienda profundizar en los procesos de filtrados para lograr la zonificación completa del área de estudio y tener un control más preciso de dichos comportamientos.

Bibliografía

- An, B., Jiang, Y., Wang, C., Shen, P., Song, T., Hu, C., & Liu, K. (2023). Ground infrastructure monitoring in coastal areas using time-series inSAR technology: the case study of Pudong International Airport, Shanghai. *International Journal of Digital Earth*, 16(1), 2171144.
- Arce, J., Layer, P., Macías, J., Morales-Casique, E., García-Palomo, A., Jiménez-Domínguez, F., Benowitz, J., & Vásquez-Serrano, A. (2019). Geology and Stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), Central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*, 15(2), 320-332. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1593251>
- Australian Bureau of Statistics. (2023). *Time Series Analysis: The Basics*. <https://www.abs.gov.au/websitedbs/d3310114.nsfhome/time+series+analysis:+the+basics>
- Avilés, J., & Pérez-Rocha, L. E. (2010). Regional subsidence of Mexico City and its effects on seismic response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30(10), 981-989.
- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Gutiérrez-Calderón, R., López-Quiroz, P., Alcántara-Durán, C., González-Hernández, M., & Centeno-Salas, F. (2017). Posible influencia de la subsidencia y fracturamiento en la Ciudad de México en las construcciones dañadas por el sismo del 19 de Septiembre de 2017. *Laboratorio de Mecánica de Geosistemas, Centro de Geociencias, UNAM Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) Centro de Evaluación del Riesgo Geológico (CERG), Iztapalapa*.
- Casal, J., & Mateu, L. (2003). Tipos de Muestreo. *Revista Epidemiología y Medicina Preventiva*, (1), 3-7.

- Castellazzi, P., Martel, R., Rivera, A., Huang, J., Pavlic, G., Calderhead, A. I., Chaussard, E., Garfias, J., & Salas, J. (2016). Groundwater depletion in Central Mexico: Use of GRACE and InSAR to support water resources management. *Water resources research*, 52(8), 5985-6003.
- Casu, F., Manconi, A., Pepe, A., & Lanari, R. (2011). Deformation time-series generation in areas characterized by large displacement dynamics: The SAR amplitude pixel-offset SBAS technique. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(7), 2752-2763.
- CENAPRED. (2020). *Análisis de vulnerabilidad física a la subsidencia, hundimiento y agrietamiento en la Ciudad de México*.
- Chaussard, E., Havazli, E., Fattahi, H., Cabral-Cano, E., & Solano-Rojas, D. (2021). Over a century of sinking in Mexico City: No hope for significant elevation and storage capacity recovery. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(e2020JB020648).
- Colesanti, C., & Wasowski, J. (2006). Investigating Landslides with Space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. *Engineering Geology*, 88(3-4), 173-199. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.09.013>
- CONAGUA. (2023). *Actualización de la Disponibilidad de Agua en el Acuífero Zona Metropolitana de la Cd. de México, Ciudad de México*.
- Consejo de Cuenca Valle de México. (2014). Programa de Medidas Preventivas y de Mitigación de la Sequía [1a. versión].
- Data Science Team. (2020). *Regla Empírica*. <https://datascience.eu/es/matematica-y-estadistica/regla-empirica-que-es/>
- Diario Oficial de la Federación. (2013). *Ley de Aguas Nacionales*.
- EOS Data Analytics. (2023). *Sentinel 1 Satellite Images*. <https://eos.com/find-satellite/sentinel-1/>
- European Union Agency for The Space Program. (2023). *What is SBAS?* <https://www.euspa.europa.eu/european-space/eu-space-programme/what-sbas>
- García-Tovar, G., Martínez-Serrano, R., Solé, J., Correa-Tello, J. C., Núñez-Castillo, E., Guillou, H., & Monroy-Rodríguez, E. (2015). Geología, geocronolo-

- gía y geoquímica del vulcanismo Plio-Cuaternario del Campo Volcánico Apan-Tecocomulco. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), 100-122.
- Government, A. (2023). *Interferometric Synthetic Aperture Radar*. <https://www.ga.gov.au/scientific-topics/positioning-navigation/geodesy/geodetic-techniques/interferometric-synthetic-aperture-radar>
- Guzmán, G., Quintana, J., Vázquez, G., Gasca, H., Martínez, L., Hernández, J., Montes, M., Flores, O., García, J., Carrión, F., Porres, A., & Machorro, J. (2022). *Análisis del terreno aledaño al puente El Carrizo mediante InSAR*. Instituto Mexicano del Transporte.
- Hejmanowski, R., Malinowska, A. A., Witkowski, W. T., & Guzy, A. (2019). An Analysis Applying InSAR of Subsidence Caused by Nearby Mining-Induced Earthquakes. *Geosciences*, 9(12), 490.
- Hermosilla Díaz, D. E. (2016). *Interferometría a radar de apertura sintética (InSAR) aplicada al estudio del movimiento de ladera aledaña al volcán Calbuco con ayuda de imágenes Sentinel 1A* [Tesis de maestría, Universidad Técnica Federico Santa María]. <http://hdl.handle.net/11673/22701>
- Hyndman, R., & Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and Practice*. <https://otexts.com/fpp2/>
- INEGI. (2020). *Población total (Número de habitantes)*. [https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P#:~:text=Ciudad%20de%20M%C3%A9xico%20\(9%2C209%2C944\)%20y](https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/habitantes.aspx?tema=P#:~:text=Ciudad%20de%20M%C3%A9xico%20(9%2C209%2C944)%20y)
- Jornada, L. (2008). Cayó el PIB 1.6% en el cuarto trimestre de 2008, reportó Inegi. <https://www.jornada.com.mx/2009/02/21/economia/015n1eco>
- Krebs, G. D. (2020). *Sentinel 1A, 1B, 1C, 1D* [Retrieved November 24, 2023]. https://space.skyrocket.de/doc_sdat/sentinel-1.htm
- Krivochieva, S., & Chouteau, M. (2002). Integrating TDEM and MT methods for characterization and delineation of the Santa Catarina aquifer (Chalco Sub-Basin, Mexico). *Journal of Applied Geophysics*, 52, 23-23.
- Lazecký, M., Spaans, K., González, P. J., Maghsoudi, Y., Morishita, Y., Albino, F., Elliott, J., Greenall, N., Hatton, E., & Hooper. (2020). LiCSAR: An

automatic InSAR tool for measuring and monitoring tectonic and volcanic activity. *Remote Sensing*, 12(15), 2430.

Lesser, J. (2005). *El agua subterránea de la Ciudad de México*.

Macías, C., & Mazari, M. (2018). *Estudio sobre el estado actual de mantos acuíferos, la explotación de pozos, el abasto real y la demanda actual y potencial del líquido en la Ciudad de México*. Instituto de Ecología, UNAM.

Massonnet, D., & Feigl, K. (1998). Radar Interferometry and Its Application to Changes in the Earth's Surface. *Rev. Geophys.*, 36(4), 441-500.

Mintpy Developers. (2023). *Mintpy*. <https://mintpy.readthedocs.io/en/latest/>

Mora, N. L. N., & Posada, E. (s.f.). Aplicación de datos de radar con técnicas interferométricas en el diagnóstico de subsidencia en campos de hidrocarburos.

Novelo-Casanova, D., Suárez, G., Cabral-Cano, E., Fernández-Torres, E., Fuentes-Mariles, O., Havazli, E., Jaimes, M., López-Espinoza, E., Martín-Del Pozo, A., Morales-Barrera, W., Morales-Rodríguez, H., Nieto-Torres, A., Rodríguez-Elizarrarás, S., Solano-Rojas, D., & Velasco-Herrera, V. (2022). The Risk Atlas of Mexico City, Mexico: a tool for decision-making and disaster prevention. *Nat Hazards*, 111, 411-437.

Osmanoğlu, B., Dixon, T., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., & Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(1), 1-12.

Ovando-Shelley E., Ossa A., & Miguel P. (2007). The sinking of Mexico City: Its effects on soil properties and seismic response. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 27(4), 333-343.

Palma, A., Rivera, A., & Carmona, R. A. (2022). Unified Hydrogeological Conceptual Model of the Mexico Basin Aquifer after a Century of Groundwater Exploitation. *Water*, 14, 1584.

Palomera, J., & Sanchez, E. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2), 133-190.

- Poreh, D., Pirasteh, S., & Cabral-Cano, E. (2021). Assessing subsidence of Mexico City from InSAR and LandSat ETM+ with CGPS and SVM. *Geoenvironment Disasters*, 8, 7.
- PySAR Developers. (2023). *PySAR - Python Sequence Activity Relationship*. <https://pypi.org/project/pySAR/>
- Rosen, P. A. (2011). Principles and Theory of Radar Interferometry. *Jet Propulsion Laboratory, NASA*.
- Schubert, A., Miranda, N., Geudtner, D., & Small, D. (2017). Sentinel-1A/B combined product geolocation accuracy. *Remote sensing*, 9(6), 607.
- Secretaría de Protección Civil. (2014a). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México: Alcaldía Iztapalapa*.
- Secretaría de Protección Civil. (2014b). *Atlas de Peligros y Riesgos de la Ciudad de México: Alcaldía Tláhuac*.
- Servicio Sismológico Nacional. (2023). *Sitio web del Servicio Sismológico Nacional*. <http://www.ssn.unam.mx/>
- Systems, J. (2018). *What is SBAS and how does it work? | Free SBAS coverage map*. <https://blog.junipersys.com/how-does-sbas-improve-gps-free-sbas-coverage-map/>
- Tomás, R. (2022). Aplicaciones de la interferometría radar de satélite en ingeniería civil. *Revista de Obras Públicas*, 3635, 97-103. <https://www.revistadeobraspublicas.com/articulos/aplicaciones-de-la-interferometria-radar-de-satelite-en-ingenieria-civil/>
- U.S. Geological Service. (s.f.). *InSAR—Satellite-based technique captures overall deformation "picture"*. <https://www.usgs.gov/programs/VHP>
- Yan, Y., Doin, M.-P., Lopez-Quiroz, P., Tupin, F., Fruneau, B., Trouvé, E., & Pinel, V. (2012). Mexico City Subsidence Measured by InSAR Time Series: Joint Analysis Using PS and SBAS Approaches. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(4).
- Zhang, L., Dai, K., Deng, J., Ge, D., Liang, R., Li, W., & Xu, Q. (2021). Identifying Potential Landslides by Stacking-InSAR in Southwestern China and

Its Performance Comparison with SBAS-InSAR. *Remote Sens.*, 13, 3662.
<https://doi.org/10.3390/rs13183662>

Zhao, C.-y., Zhang, Q., Yang, C., & Zou, W. (2011). Integration of MODIS data and Short Baseline Subset (SBAS) technique for land subsidence monitoring in Datong, China. *Journal of Geodynamics*, 52(1), 16-23.