



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

INTERFEROMETRÍA DIFERENCIAL PARA EL
ANÁLISIS DEL DESPLAZAMIENTO VERTICAL EN
LA CORTEZA TERRESTRE DEBIDO A
TERREMOTOS EN SITIOS COSTEROS DE MÉXICO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO GEOMÁTICO

PRESENTA:

Ricardo Lau González

DIRECTORA DE TESIS:

M.C.T. MARÍA ELENA OSORIO TAI



Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 9 de octubre, 2023

*Si buscas resultados distintos,
no hagas siempre lo mismo.*

Dedicatoria

Dedico este logro a mis amados abuelos, Jorge y Bibiana. A pesar de no estar físicamente conmigo en este momento, su amor, apoyo y sabiduría siempre han sido mi faro. Ustedes son mi fuente de inspiración, y cada paso que doy en este camino lo hago con gratitud por los valores y la fortaleza que me inculcaron.

A mis queridos padres Alberto y Elda, así como a mí hermano Alberto, este trabajo está dedicado a ustedes. Gracias por enseñarme la importancia de la perseverancia y la creencia inquebrantable de que siempre podemos superar los desafíos. Su amor y respaldo constante son mi motor, y hoy celebro este logro con ustedes en mi corazón.

Por último, pero no menos importante quiero dedicar este trabajo a mí mismo. A lo largo de este camino, he aprendido a valorar mi propio esfuerzo y persistencia. Este logro es un testimonio de mi dedicación y me recuerda que merezco celebrar mis propios éxitos. Estoy emocionado por lo que el futuro me depara y estoy agradecido por la oportunidad de aprender y crecer. Esta dedicatoria es un recordatorio de que cuidar de uno mismo es fundamental para seguir avanzando y contribuir de manera positiva a la vida de quienes me rodean

Agradecimientos

Quiero expresar mi enorme agradecimiento a mis amigos de la preparatoria: Edson, Avner, Julio, Mike, Luis e Iván, así como a mis compañeros de la universidad: Vivaldo, Joshua, Ulises, Osvaldo, Samuel y Moisés. Ustedes son el refuerzo que siempre estuvo ahí para mí, y en serio, no puedo estar más agradecido. Sus amistades le han dado sabor y sabiduría a mis días, y eso, no hay manera de pagarlo. Las risas, los consejos, y su compañía son un regalo invaluable para mí.

También quiero extender mi gratitud a mi familia, quienes siempre han estado a mi lado, brindándome amor, apoyo y aliento en cada paso que he dado. Su inquebrantable respaldo ha sido mi fuente de fortaleza y confianza, y no puedo agradecerles lo suficiente.

Además, deseo expresar mi sincero agradecimiento al grupo IOA del ICAYCC, cuya contribución y apoyo en mi desarrollo académico y personal han sido invaluable. Quiero destacar especialmente al Dr. Jorge Zavala y a la Maestra María Elena Tai, cuyos consejos, orientación y dedicación han dejado una huella significativa en mi vida y en mi formación. Su compromiso y sabiduría han sido una fuente constante de inspiración y aprendizaje, y por eso estoy profundamente agradecido.

Por último, quisiera externar mi más profundo agradecimiento al programa UNAM-PAPIME PE116019 por la beca recibida para la realización de esta tesis.

Resumen

Siendo México un país altamente susceptible ante fenómenos sísmicos debido a su localización geográfica, es de suma importancia el estudio y uso de nuevas técnicas de análisis que permiten obtener información casi continua de la superficie del terreno y las zonas adyacentes, con una temporalidad adecuada para determinar la magnitud de las deformaciones y subsidencias asociadas a los sismos y sus características, aplicando técnicas de geomática y validando con datos del nivel del mar.

En este estudio se realizaron dos estudios de interferometría diferencial con el fin de determinar las deformaciones causadas por los sismos del: 7 de septiembre del 2021 en la bahía de Acapulco de Juárez, Guerrero, México; y del sismo del 23 de junio del 2020 en la bahía de Huatulco, Oaxaca, México.

Apoyados en el método de Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR), se analizaron cuatro imágenes del satélite Sentinel-1 que opera en el intervalo de la banda C y con polarización VV, las cuales fueron adquiridas mediante el repositorio de datos abiertos de la NASA.

Los productos finales fueron los mapas de deformación de la superficie sobre la bahía de Acapulco y la bahía de Huatulco, identificando desplazamientos asociados a dichos sismos, donde hubo una comparación del método DInSAR con los datos in situ de nivel del mar, obtenidos en los diferentes estaciones mareográficas de la zona. El desplazamiento que produjo el sismo del 23 de junio del 2020 en la bahía de Huatulco, alcanzó los 40 centímetros y del sismo del 7 de septiembre de 2021 en la bahía de Acapulco alcanzó los 25 centímetros.

Abreviaturas

InSAR	I nterferometry S ynthetic A perture R adar (Interferometría de radar de apertura sintética)
IW	I nterferometric W ide
NASA	N ational A eronautics and S pace A dministration
SAR	S ynthetic A perture R adar (Radar de Apertura Sintética)
SLC	S ingle L ook C omplex
RAR	R eal A perture R adar
DEM	D igital E levation M odel (Modelo Digital de Elevaciones)
CAT	C entro de A lerta de T sunamis (Centro de Alerta de Tsunamis)
SSN	S ervicio S ismológico N acional (Servicio Sismológico Nacional)
SMN	S ervicio M areográfico N acional (Servicio Mareográfico Nacional)
USGS	U nited S ates G eological S urvey (en español, Servicio Geológico de los Estados Unidos)
ESA	E uropean S pace A gency

Índice general

Portada	I
Dedicatoria	III
Agradecimientos	IV
Resumen	VII
Abreviaturas	VIII
Índice general	X
Índice de figuras	XV
Índice de tablas	XVII
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos particulares	3
1.3. Introducción a la percepción remota	3
1.3.1. Tipos de sensores en percepción remota	3
1.4. El Servicio Mareográfico Nacional (SMN) y datos del nivel del mar en México	4
1.4.1. ¿Qué es un tsunami?	7
1.5. Deslizamientos de tierra provocados por sismos	8
1.6. Reportes del sismo y Tsunami del 23 de junio del 2020 Oaxaca, México	9
1.7. Reportes del sismo y Tsunami del 7 de septiembre del 2021 Guerrero, México	11
2. Teoría de radar	15

2.1. Sistema Radar	15
2.2. Radar de Apertura Sintética (SAR)	16
2.3. Geometría de la imagen RADAR	18
2.4. Polarización	19
2.5. Interferometría SAR (InSAR)	21
2.6. Interferometría Diferencial (DInSAR)	22
2.6.1. DInSAR aplicado al estudio de sismos	23
2.7. Diferencia entre InSAR y DInSAR	24
3. Datos	25
3.1. Misión Sentinel - 1	25
3.1.1. Modos de adquisición	26
3.2. Adquisición y extracción de datos de imágenes radar	28
3.2.1. Materiales	28
3.3. Adquisición y extracción de datos de nivel del mar	29
4. Metodologías	31
4.1. Preprocesamiento de los datos SAR	31
4.1.1. Corregistro	31
4.2. Procesamiento de los datos SAR	32
4.2.1. Creación del interferograma	32
4.2.2. Eliminación de líneas o franjas (Deburst)	33
4.2.3. Remover la fase topográfica	33
4.2.4. Filtrado de ruido (Speckle)	33
4.2.5. Multilooking	34
4.2.6. Desenvolvimiento de la fase (phase unwrapping)	34
4.2.7. Conversión de la fase de radianes a desplazamiento en metros.	34
4.2.8. Corrección topográfica.	35
4.3. Procesamiento de los datos de nivel del mar	36
4.4. Modelado de los datos de nivel del mar	36
5. Resultados y Análisis	39
5.1. Evento de Huatulco del 23 de junio de 2020	39
5.2. Evento de Acapulco del 7 de septiembre de 2021	44
6. Discusión y conclusiones	51

6.1. Discusión	51
6.2. Conclusiones	52
Bibliografía	53

Índice de figuras

1.1. Mapa de actividad sísmica en México	2
1.2. Tipos de mareógrafos	5
1.3. Red Mareográfica del SMN de México	6
1.4. Características de la ola de tsunami por cambios en la altura	7
1.5. Tipos de deslizamientos de tierra	8
1.6. Movimiento de licuefacción	9
1.7. Esquema de datos de nivel del mar y pronóstico de marea astronómica en la estación de Huatulco, Oaxaca	10
1.8. Afectación por licuefacción en Huatulco	10
1.9. Afectación por deslizamiento de tierra en Huatulco	11
1.10. Registro de las estaciones mareográficas con registro del tsunami del 07/septiembre/2021	12
1.11. Afectación por licuefacción en Acapulco	13
1.12. Afectación por deslizamiento de tierra en Acapulco	13
2.1. Espectro electromagnético.	15
2.2. Proceso de obtención de información mediante técnicas satelitales.	16
2.3. Esquema de una antena sintética de Radar.	18
2.4. Geometría del RADAR.	18
2.5. Esquema de polarizaciones vertical y horizontal.	20
2.6. Región de la formación de un interferograma mediante la adquisición de dos imagenes SAR	23
3.1. Cobertura y frecuencia del satélite Sentinel 1	26
3.2. Modos de adquisición Sentinel 1	28
4.1. Diagrama de flujo simplificado del procesamiento DInSAR	36
4.2. Estación mareográfica de Tampico: datos y modelo	38

5.1. Interferograma de Huatulco en crudo.	39
5.2. Mapa de Huatulco en valores de coherencia.	40
5.3. Interferograma de Huatulco escalado.	40
5.4. Interferograma desenvuelto de Huatulco	41
5.5. Mapa de Huatulco en valores de coherencia corregida y proyectada	41
5.6. Mapa de desplazamientos por el sismo del 23 de junio del 2020 en Huatulco	42
5.7. Histogramas y estadísticos sobre la deformación superficial en Huatulco	42
5.8. Estación mareográfica de Huatulco: datos y modelo	43
5.9. Mapa de desplazamientos en Huatulco	44
5.10. Interferograma de Acapulco en crudo	45
5.11. Mapa de Acapulco en valores de coherencia	45
5.12. Interferograma de Acapulco escalado	45
5.13. Interferograma desenvuelto de Acapulco	46
5.14. Mapa de Acapulco en valores de coherencia corregida y proyectada	46
5.15. Mapa de desplazamientos por el sismo del 9 de septiembre del 2021 en Acapulco	47
5.16. Estación mareográfica de Acapulco: datos y modelo	47
5.17. Histogramas y estadísticos sobre la deformación superficial en Acapulco	48
5.18. Mapa de desplazamientos en la bahía de Acapulco	49

Índice de tablas

3.1. Imágenes procesadas para el sismo del 7 de septiembre 2021.	29
3.2. Imágenes procesadas para el sismo del 23 de junio 2020.	29
3.3. Nivel del mar proporcionados por el SMN.	29

Introducción

1.1. Antecedentes

El monitoreo, análisis y detección de zonas propensas a desplazamientos de tierra es benéfico para mitigar el gran impacto los problemas ocasionados por los sismos. En los últimos años, el monitoreo de dichos fenómenos ha evolucionado inmensamente, donde se complementa el enfoque clásico y el uso de técnicas de percepción remota. A su vez, el trabajo integrado entre el enfoque clásico y la percepción remota permiten tener un enfoque multi-temporal en el estudio del fenómeno, al poderse estimar tendencias en el movimiento estudiado (velocidad, aceleración, desplazamiento o deformación total, etc.)(Seppi et al., 2016).

México está situado en una de las zonas con mayor actividad sísmica del planeta, en el cinturón de fuego del Pacífico. Los estados más propensos a sismos son Oaxaca, Guerrero, Chiapas en el sur y Michoacán, Colima y Jalisco en la región oeste. Estos estados tienen una alta interacción con las placas de Cocos y Rivera, lo que les da mayor vulnerabilidad a los sismos debido a la colisión de las placas oceánicas de Cocos y Rivera con las de Norteamérica y Caribe en la costa del Pacífico, como se puede ver en la figura 1.1. Los datos utilizados para la creación de este mapa se obtuvieron del Center for Hazards and Risk Research (CHRR).

Las deformaciones y desplazamientos ocasionados por sismos son frecuentes, por lo que para este trabajo se realizaron dos estudios para la cuantificación del desplazamiento y cambio del terreno asociados a sismos. El primer estudio se enfoca en el sismo del 23 de junio del 2020 en el municipio de Santa María Huatulco, Oaxaca México. Y el segundo estudio se enfoca en el sismo del 7 de septiembre del 2021 en el Municipio de Acapulco de Juárez, Guerrero, México (Ver figura 1.1).

En el caso de Acapulco, al estar situado en la costa del estado de Guerrero, una región que forma parte de la subducción de la placa de Cocos bajo la placa de América del Norte. Esta subducción crea una zona de alto estrés tectónico, lo que significa que la corteza terrestre en esta área está bajo una

1. INTRODUCCIÓN

presión significativa. Como resultado, Acapulco y las zonas aledañas han experimentado numerosos sismos a lo largo de la historia, algunos de los cuales han tenido un impacto notable en la región.

Huatulco, por otro lado, se encuentra en el estado de Oaxaca, también en la costa del Pacífico. Al igual que Acapulco, Huatulco está en una zona donde la placa de Cocos se sumerge por debajo de la placa de América del Norte. Esta interacción tectónica crea tensiones significativas en la corteza terrestre, lo que resulta en eventos sísmicos periódicos.

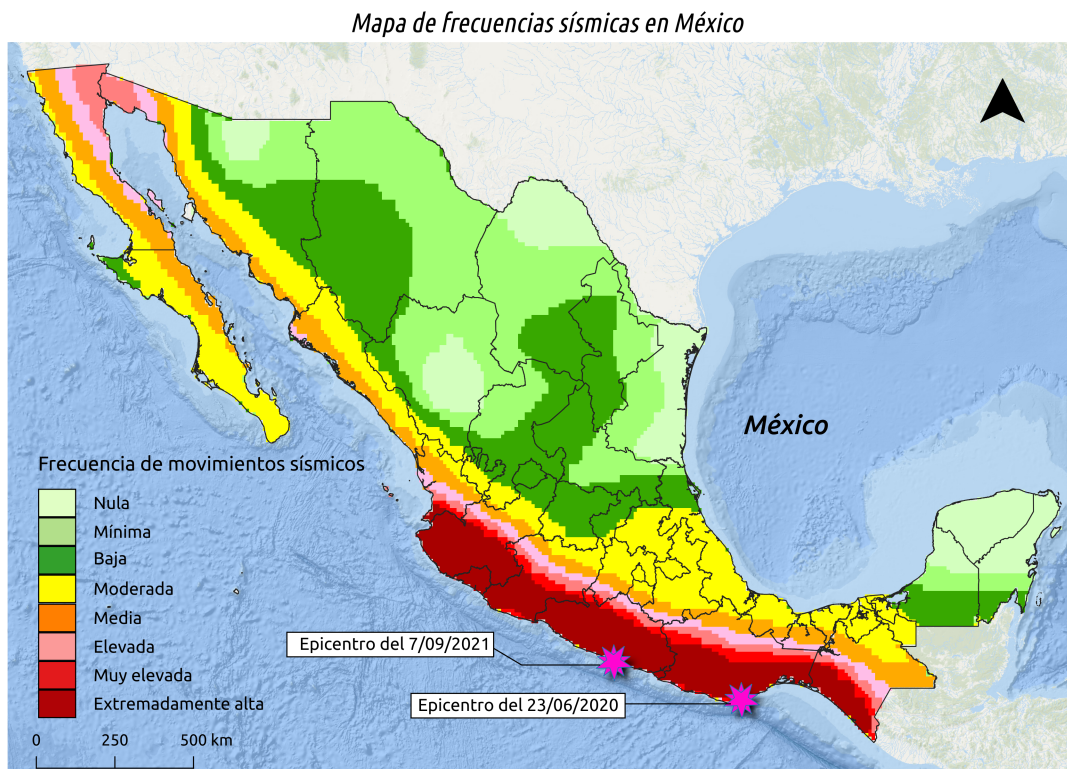


Figura 1.1: Mapa de actividad sísmica en México, con datos del USGS.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

- Determinar las zonas de deformación y calcular los desplazamientos verticales en la corteza terrestre asociados a los sismos presentados el 7 de septiembre de 2021 y el 23 de junio del 2020, con la aplicación del método de interferometría diferencial.

1.2.2. Objetivos particulares

- Comparar los resultados obtenidos del método interferométrico con los datos de nivel del mar obtenido de las estaciones mareográficas de Acapulco y Huatulco respectivamente.
- Analizar la viabilidad de la metodología de Interferometría Diferencial para el cálculo de deformaciones en la corteza vertical ocasionadas por sismos.

1.3. Introducción a la percepción remota

La Percepción Remota (PR) es una disciplina que permite obtener información sobre la superficie terrestre sin tener que estar en contacto directo con ella. Se basa en la captura de información a través de sensores que se encuentran en plataformas, ya sea en satélites orbitando la Tierra o en aviones que realizan sobrevuelos a baja altura (Campbell, 2011), o incluso sensores desde tierra.

Los datos capturados por estos sensores son procesados y transformados en imágenes que nos permiten conocer características de la superficie terrestre, como cobertura vegetal, temperatura superficial, topografía, humedad del suelo, entre otros. Esta información es muy valiosa para diversos campos de estudio, como la agricultura, la cartografía, la gestión de recursos naturales, el monitoreo de desastres naturales, entre otros (Jensen, 2016).

En la actualidad, la PR se ha convertido en una herramienta muy importante para el estudio del medio ambiente y la gestión de recursos naturales. La capacidad de obtener información a gran escala y en tiempo casi real es esencial para el monitoreo y la toma de decisiones en diversas áreas (Campbell, 2011).

Sin embargo, es importante destacar que el uso de la PR también conlleva algunos desafíos. La complejidad de los datos capturados y su procesamiento requiere de una formación especializada para su análisis. Además, la interpretación de las imágenes generadas puede variar dependiendo del sensor utilizado, la resolución espacial y temporal, entre otros factores (Lillesand et al., 2014).

1.3.1. Tipos de sensores en percepción remota

Los instrumentos utilizados en PR detectan y registran (miden) la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos del entorno, tomando en cuenta aspectos espaciales y temporales de la superficie terrestre, dichas variaciones son principalmente ocasionadas por la interacción del sol, la atmósfera y el entorno de estudio.

Principalmente existen dos tipos de sensores en PR los cuales son denominados: sensores pasivos y sensores activos. Los sensores pasivos usan las radiaciones de la energía solar para poder captar

información, como la fotografía aérea y los escáneres multispectrales. Estos sensores captan la energía reflejada por los objetos de interés. En cambio los sensores activos emiten su propia energía, es decir, no utilizan la energía solar como fuente de energía para capturar información, por ejemplo el radar.

Los sensores pasivos y activos se pueden encontrar en distintas plataformas, estas plataformas, tienen la función de transportar al sensor. Entre las plataformas más conocidas, se encuentra la plataforma satelital, dicha plataforma cuenta con la ventaja de ser un recolector de información continua de la superficie evitando fuentes de error climáticas, como lo son las turbulencias, vientos, etc. Según Murillo Sandoval et al., (2012), los principales satélites para la observación de la Tierra son heliosincrónicos, es decir, que pasan por un área determinada a la misma hora local; su órbita es circular y casi polar y tienen una altitud entre los 700 km y los 900 km.

Otro tipo de sensores pasivos son las cámaras fotográficas, que captan imágenes en diferentes bandas del espectro electromagnético, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo cercano (ver figura 2.1). Las cámaras fotográficas se utilizan para obtener imágenes de alta resolución de la superficie terrestre y analizar cambios en la cobertura terrestre, la vegetación y otros elementos.

En resumen, los sensores de PR se dividen en activos y pasivos. Los sensores activos emiten una señal y miden la señal reflejada o retrodispersada, mientras que los sensores pasivos miden la radiación electromagnética emitida que es reflejada por la superficie terrestre. Entre los sensores activos se encuentran los radares, mientras que entre los sensores pasivos se encuentran los espectrómetros y las cámaras fotográficas. Cada tipo de sensor tiene sus propias ventajas y limitaciones, y su elección depende del objetivo de la investigación y las condiciones ambientales (Chuvieco, 1991).

1.4. El Servicio Mareográfico Nacional (SMN) y datos del nivel del mar en México

A partir del año 1952, el Instituto de Geofísica de la UNAM asumió la responsabilidad de la Red Mareográfica en colaboración con el Servicio Geodésico Interamericano y la Secretaría de Marina. Esta iniciativa abarcó tanto la operación de la red de estaciones como los estudios relacionados. En su inicio, la Red Mareográfica contaba con cuatro estaciones instaladas en el Golfo de México y cinco en el Océano Pacífico. A lo largo de 70 años el número de estaciones se ha incrementado, en las primeras décadas y gracias al Servicio Geodésico Interamericano, que proporcionó mareógrafos, y a la Secretaría de Marina, que suministró casetas de mampostería a partir del 2007 a la fecha, no obstante a partir del 2000 a la fecha el Instituto de Geofísica de la UNAM ha modificado toda la red (Ver figura 1.3). El personal del Instituto de Geofísica se encarga de la instalación, mantenimiento, interpretación, cálculo y publicación de la información mareográfica recopilada (SMN, 2023).

El dispositivo tradicional utilizado para medir las mareas es conocido como “mareógrafo” y en la actualidad se les llama “mareómetro” y existen varios tipos de ellos. Estos dispositivos van desde una regla graduada sencilla, fija y sumergida en el agua, que es atendida por un observador que toma nota manualmente del nivel del agua en la graduación de la regla en un cuaderno de registro, hasta un instrumento electroacústico encapsulado y conectado a una computadora con comunicación vía satélite, completamente automatizado (SMN, 2023).

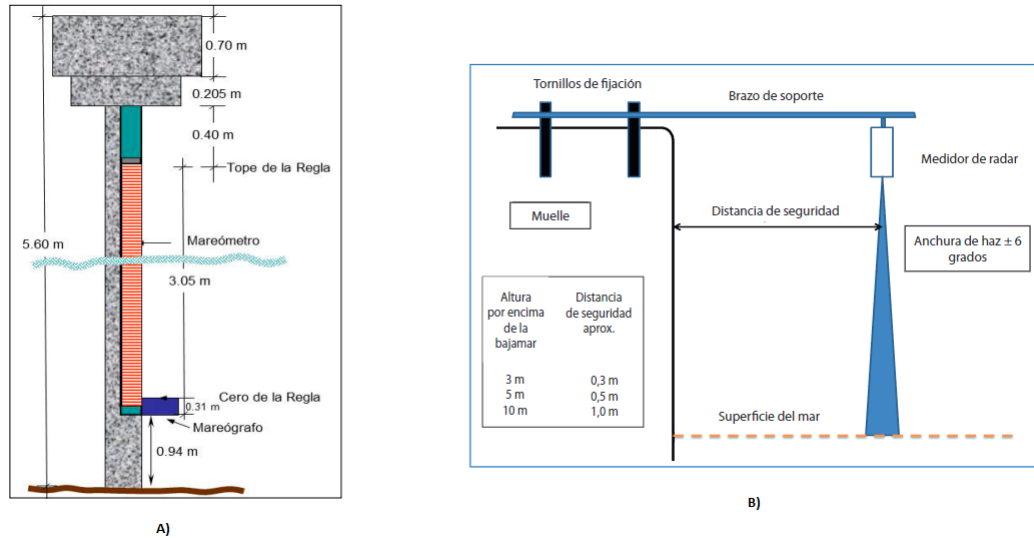


Figura 1.2: La figura A hace referencia a un mareógrafo tradicional con regla y todos sus componentes; la figura B hace referencia a un mareógrafo más nuevo el cual cuenta con un sistema de radar. Modificadas de : (UNESCO, 2016) y (HIDRONAV, 2013)

Los parámetros indispensables en la medición de la marea son:

- La altura del nivel del mar y su continua evolución temporal con respecto a un nivel de referencia fijo, una vez que se ha eliminado el efecto del oleaje local.
- El tiempo (momento) en que se realiza cada medición de la altura del nivel del mar, referido al sistema internacional de medición del tiempo.
- Localización precisa, latitud, longitud y altura con respecto a un ‘nivel de referencia fijo’ con relación al cual se mide localmente el nivel del mar, y se establece el cero de la regla.

El objetivo principal es determinar la altura del nivel del mar en un sitio específico con respecto a un punto de referencia en tierra firme, tras eliminar el efecto del oleaje local. La medición tradicional se realiza en una ubicación donde se pueda filtrar el oleaje, como puede ser un muelle dentro de un puerto. Sin embargo, las olas producidas por el tráfico marítimo también pueden interferir en las mediciones. Por lo tanto, es común utilizar un tubo vertical fijo, lo suficientemente largo y bien sumergido en el

1. INTRODUCCIÓN

agua para no ser afectado por el oleaje (SMN, 2023).

El extremo sumergido del tubo se tapa para evitar que el agua fluya libremente, pero se hacen orificios laterales con el tamaño adecuado para que el agua fluya hacia dentro y fuera del tubo de manera relativamente lenta, de modo que filtre las oscilaciones del oleaje exterior y mantenga el nivel medio del agua exterior en su interior. Una vez que se logra este objetivo, existen diversos dispositivos para medir la distancia vertical recorrida por el nivel del agua dentro del tubo. Uno de los dispositivos más comunes consiste en un **flotador** conectado a una polea y un mecanismo sencillo que registra de manera continua el movimiento lento del nivel del agua en un rollo de papel. Este dispositivo debe estar sincronizado con un reloj para marcar el momento de cada medición con la mayor precisión posible. De esta forma se obtienen gráficos que muestran la evolución de la marea en cada lugar donde se realiza la medición (SMN, 2023). Con el avance de la tecnología moderna, se han diseñado y fabricado instrumentos para medir la marea, por ejemplo:

- **Sensores de presión:** Los sensores de presión miden la presión hidrostática en el agua, y por lo tanto, miden continuamente la variación de altura en el nivel del mar.
- **Sensores de radar:** Los sistemas de radar utilizan ondas electromagnéticas para medir la distancia desde la superficie del agua hasta el sensor.

Ambos tipos de sensores están conectados a sistemas electrónicos que registran las mediciones y las transmiten en tiempo casi real a estaciones de monitoreo en tierra.



Figura 1.3: Red mareográfica mexicana Fuente: (SMN,2023)

1.4.1. ¿Qué es un tsunami?

Los tsunamis, cuyo nombre proviene de las palabras japonesas *tsu* (puerto) y *namis* (olas), son ondas de gravedad de gran tamaño generadas por un impulso. Aunque la mayoría de los tsunamis importantes se generan por desplazamientos verticales del suelo oceánico durante sismos, en zonas de subducción, no son la única causa. Erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra e incluso la caída de un meteorito pueden desplazar grandes cantidades de agua y generar un tsunami. A más de 3 kilómetros de profundidad, las ondas de tsunami se desplazan a una velocidad alta, que oscila entre 600 y 800 km/h, y tienen una altura inferior a un metro, dicha velocidad se calcula mediante la ecuación 1.1. Cuando el tsunami entra en aguas someras, la velocidad de las ondas disminuye considerablemente a varias decenas de km/h y la amplitud de las ondas aumenta, lo que las hace más peligrosas para las poblaciones que viven en zonas costeras (Ver figura 1.4).

$$V = \sqrt{gH} \quad (1.1)$$

La magnitud del tsunami depende de varios factores, como la energía liberada en el origen del evento y la profundidad del agua en la que se genera. Cuando las ondas de tsunami llegan a la costa, pueden causar inundaciones que pueden afectar áreas costeras extensas y causar daños materiales significativos, así como pérdida de vidas humanas.

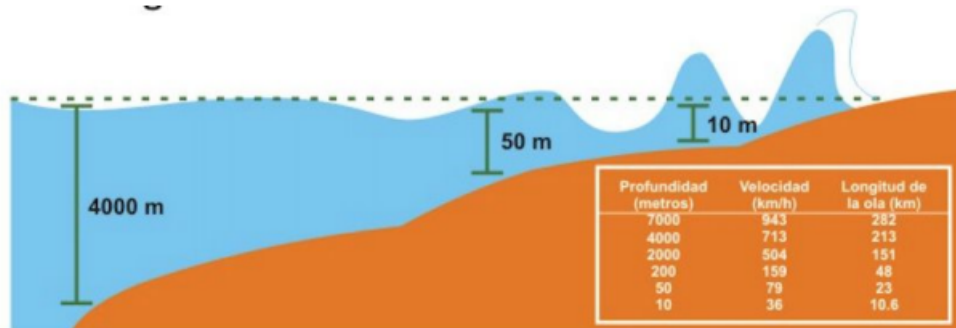


Figura 1.4: Cambio en la altura y velocidad de la onda de tsunami a medida que disminuye la profundidad. Fuente: (SMN, 2023).

1.5. Deslizamientos de tierra provocados por sismos

Los deslizamientos de tierra provocados por los sismos son fenómenos geológicos en los cuales el movimiento telúrico induce el desplazamiento y la deformación de masas de suelo y rocas (Ver figura 1.5). Estos deslizamientos pueden ocurrir en laderas empinadas y son causados por el incremento de las fuerzas y presiones generadas durante un sismo. Se puede encontrar información adicional sobre los tipos de deslizamientos de tierra en Highland and Bobrowsky (2008). En este trabajo se estudiaron diferentes tipos de desplazamientos de tierra que se pueden observar alrededor de la región del sismo.

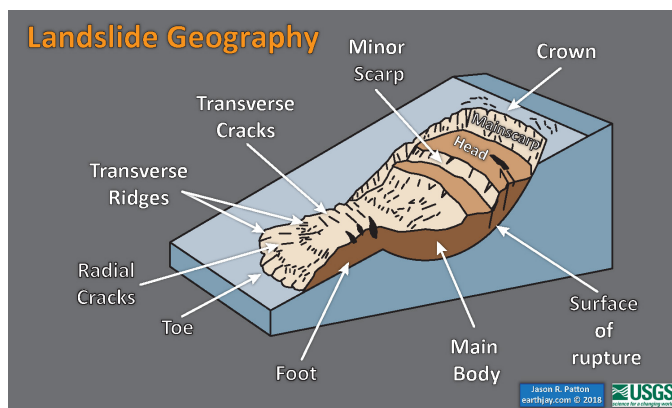


Figura 1.5: Tipos de deslizamientos de tierra. Fuente: (USGS, 2018).

Durante un sismo, las ondas sísmicas pueden generar una serie de efectos que contribuyen a los desplazamientos de tierra. Estos efectos incluyen la vibración del suelo, la pérdida de la cohesión entre las partículas del suelo, el aumento de las presiones de poros y la reducción de la fricción interna del suelo. Estos factores debilitan la estabilidad de las pendientes y pueden desencadenar deslizamientos.

La licuefacción, por otro lado, es un fenómeno relacionado pero distinto. Se refiere al comportamiento del suelo saturado de agua, en la cual pierde momentáneamente su resistencia y se comporta como un líquido debido al aumento de la presión de poros durante un sismo (Ver figura 1.6). La licuefacción puede resultar en el colapso y el hundimiento de estructuras y la formación de sumideros (Highland and Bobrowsky, 2008).

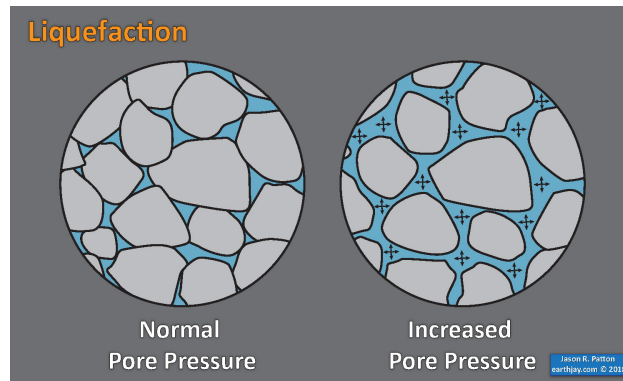


Figura 1.6: Proceso de licuefacción: (Patton, 2018).

1.6. Reportes del sismo y Tsunami del 23 de junio del 2020 Oaxaca, México

El 23 de junio de 2020, el Servicio Sismológico Nacional (SSN) emitió un informe preliminar sobre un sismo de magnitud 7.1 localizado a 12 km al sureste de la Crucecita, Oaxaca. El evento ocurrió a las 10:29:03 horas (hora del centro de México) en las coordenadas Latitud: 15.68N y Longitud: -96.07W, a una profundidad de 10 km. Más tarde, la información se actualizó para indicar una magnitud de 7.4 en las coordenadas Latitud: 15.57N y Longitud: -96.09W, a una profundidad de 5 km (SMN, 2020).

El Centro de Alerta de Tsunamis (CAT) es la entidad oficial encargada de emitir alertamientos por tsunamis. Emitió un primer boletín a las 10:33:31 (Centro de México CDT) en el cual esperaban una variación máxima de 1.03 m, y los sitios para los cuales se pronosticaron las mayores alturas fueron El Coyul, Oaxaca (1.03 m) y Huatulco, Oaxaca (0.71 m). Posteriormente a las 12:35 el CAT emitió un boletín de seguimiento con las alturas máximas registradas, las cuales fueron de 0.47 m para Acapulco, 0.66 m para Huatulco y 0.36 m para Salina Cruz. Finalmente, a las 15:25 hrs. (Centro de México CDT) el CAT emitió un boletín de cancelación de la alerta de tsunami (SMN, 2020).

El SMN, operado por el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, reportó que la estación de Salina Cruz, Oaxaca, registró una variación máxima de cresta a valle de alrededor de 1.40 m en relación al nivel de la marea, mientras que la estación de Huatulco registró una variación de 0.60 m y la de Puerto Chiapas de 0.26 m. En las demás estaciones no se observaron variaciones significativas del nivel del mar. Es importante destacar que en la estación de Huatulco, la señal de nivel del mar registró un desplazamiento vertical de aproximadamente 0.55 m (Ver figura 1.7), lo que sugiere un movimiento vertical de la corteza en esa zona (SMN, 2020).

El sismo ocurrió como resultado de fallas de cabalgamiento poco profundas, probablemente en la interfaz de la zona de subducción entre las placas tectónicas de Cocos y Norteamérica. Según los

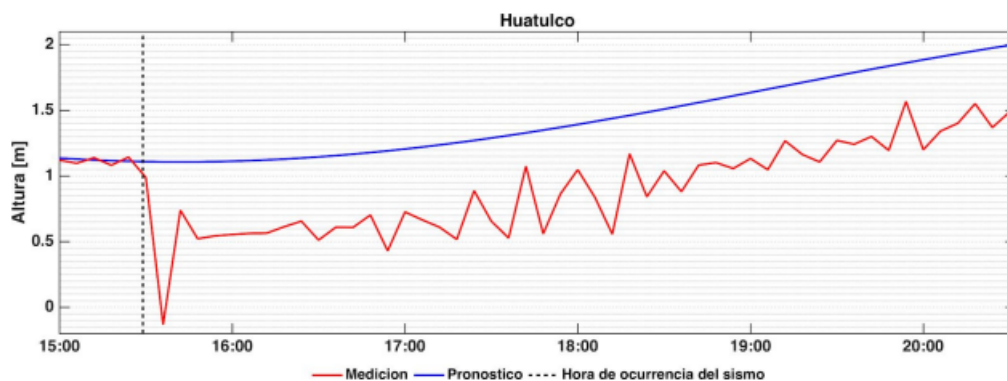


Figura 1.7: Datos medidos (rojo) y pronóstico de marea astronómica (azul) en la estación mareográfica de Huatulco, Oaxaca. La gráfica inicia a las 15:00 UTC, 29 minutos antes de la ocurrencia del sismo, el cual está indicado con una línea punteada en color negro. Fuente: SMN, (2023).

datos preliminares recopilados por el *United State Geological Survey* (USGS), las consecuencias de deslizamientos de tierra y licuefacción fueron de gran magnitud. El evento sísmico causó daños significativos en la infraestructura de la zona, lo cual se puede apreciar en las representaciones gráficas mostradas en las Figuras 1.8 y 1.9. Estas figuras proporcionan una descripción detallada de la extensión de los deslizamientos de tierra y la licuefacción, teniendo en cuenta factores como el área afectada en kilómetros cuadrados y el porcentaje de impacto en la región.

Liquefaction

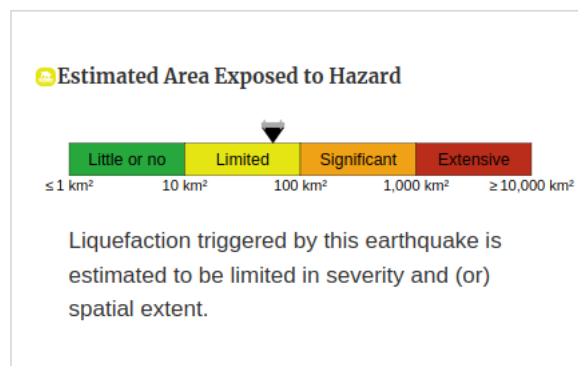


Figura 1.8: Afectación por licuefacción en Huatulco Fuente: (U.S. Geological Survey, 2020).

Landslides

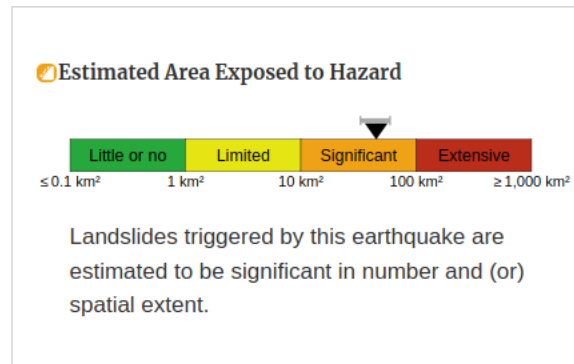


Figura 1.9: Afectación por deslizamiento de tierra en Huatulco Fuente: (U.S. Geological Survey, 2020).

1.7. Reportes del sismo y Tsunami del 7 de septiembre del 2021 Guerrero, México

El 7 de septiembre de 2021 a las 20:55 horas del centro de México se registró un sismo de magnitud 7.1 localizado a 11 kilómetros al suroeste de Acapulco, Guerrero, con un epicentro ubicado en la latitud: 16.78°N y una longitud: 99.93°W , a una profundidad de 10 kilómetros (SMN, 2021).

La estación que experimentó la mayor perturbación en el nivel del mar asociada al sismo fue la ubicada en la Administración Portuaria Integral (API) de Acapulco (Ver figura 1.3), en las coordenadas latitud: $16^{\circ} 50.276' \text{ N}$, longitud: $99^{\circ} 54.180' \text{ W}$. Esta estación se encuentra aproximadamente a 8 km en línea recta desde el epicentro del sismo (Ver figura 1.1). Inicialmente, se registró una disminución del nivel del mar de más de 60 centímetros por debajo del pronóstico de marea astronómica, seguida de un incremento de aproximadamente 35 centímetros por encima del pronóstico, lo que resultó en una amplitud de 95 centímetros, la más alta registrada durante todo el evento (Ver figura 1.10). Después de la primera onda, la señal se fue atenuando gradualmente. La duración total del evento fue de aproximadamente 28 minutos de perturbación en el océano (SMN, 2021).

Además, se observa que después del sismo, el nivel del mar tuvo valores aproximadamente 30 centímetros por debajo del nivel pronosticado. Esto indica que probablemente ocurrió una elevación del terreno en el área como consecuencia del sismo (SMN, 2021).

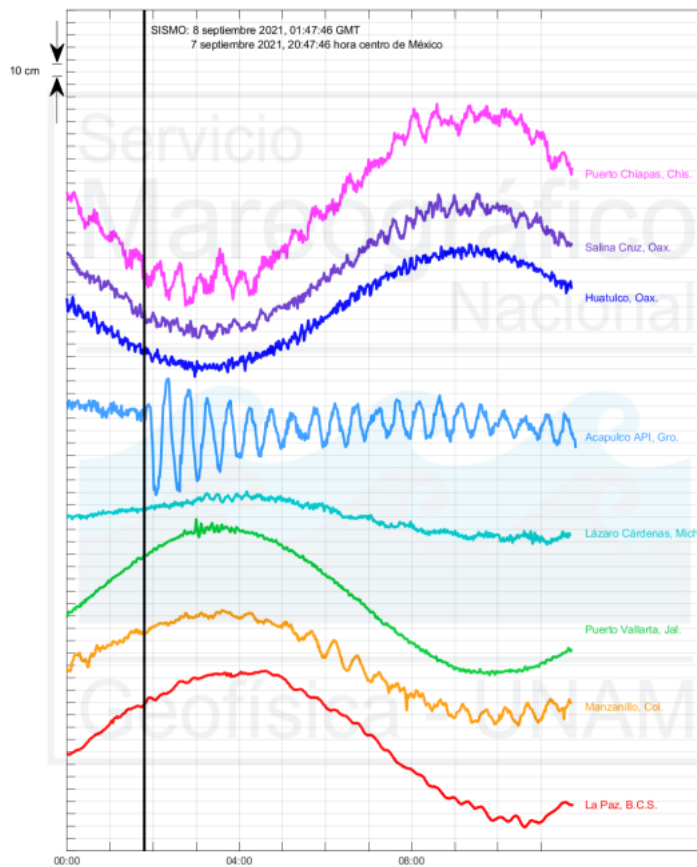


Figura 1.10: Registro del nivel del mar en las estaciones mareográficas que registraron el tsunami de Guerrero el 7 de septiembre de 2021. En el eje vertical se encuentra la altura, donde cada segmento representa 10 cm, y en el eje horizontal el tiempo en UTC. Fuente: (SMN, 2021).

El sismo fue el resultado de una falla en la zona de subducción entre las placas del Cocos y la Norteamericana, donde la placa de cocos se subduce en el manto debajo de la placa Norteamericana. Al igual que en el estudio realizado en Huatulco, los datos preliminares recopilados por el USGS para Acapulco indican que los deslizamientos de tierra y la licuefacción tuvieron un impacto significativo en la zona afectada por el sismo. La infraestructura de la región sufrió daños considerables, lo cual se refleja en las representaciones gráficas presentadas en las Figuras 1.11 y 1.12. Estas figuras ofrecen una descripción detallada de la extensión de los deslizamientos de tierra y la licuefacción, teniendo en cuenta parámetros como el área afectada en kilómetros cuadrados y el porcentaje de impacto en la región.

Liquefaction

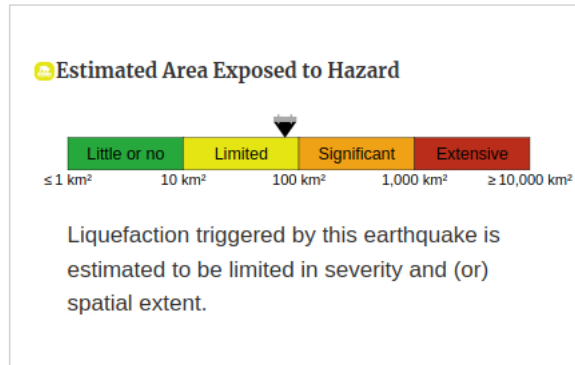


Figura 1.11: Afectación por licuefacción en Acapulco. Fuente: (U.S. Geological Survey, 2021).

Landslides

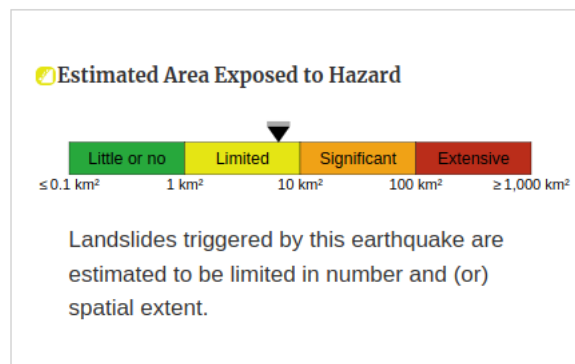


Figura 1.12: Afectación por deslizamiento de tierra en Acapulco. Fuente: (U.S. Geological Survey, 2021).

2.1. Sistema Radar

RADAR, acrónimo en inglés de *RADio Detection And Ranging* (Detección y alcance por Radio) es una técnica que funciona mediante un sensor activo y funciona mediante la propagación de ondas electromagnéticas en el intervalo correspondiente a las microondas cuya longitud de onda (λ) se encuentra entre [1 mm y 1 m] (Ver figura 2.1).

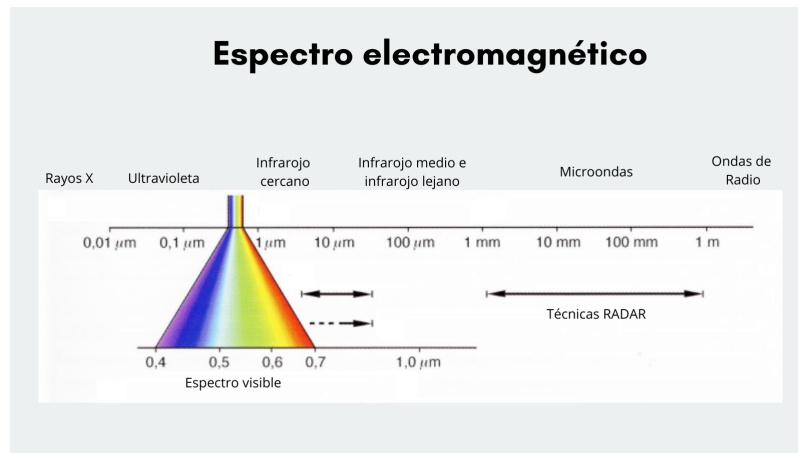


Figura 2.1: Espectro electromagnético.

En términos generales el sistema RADAR emite un flujo constante de pulsos electromagnéticos que impactan sobre la superficie de interés y sólo una pequeña fracción de esta energía regresa al sensor y es capturada a la cual se le conoce como retrodispersión (Ver figura 2.2). La retrodispersión dependerá de varias características físicas de la superficie como son la rugosidad, la humedad y la constante dieléctrica, esta última se calcula mediante la siguiente ecuación 2.1

$$\epsilon = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{\epsilon_0} = \epsilon_r \tag{2.1}$$

- ϵ es la constante dieléctrica
- ϵ_0 es la permitividad del vacío, que es una constante universal con un valor de aproximadamente 8.854×10^{-12} [F/m].
- ϵ_r es la permitividad relativa o constante dieléctrica relativa del material, que es una medida adimensional que indica cómo el material responde al campo eléctrico en comparación con el vacío.

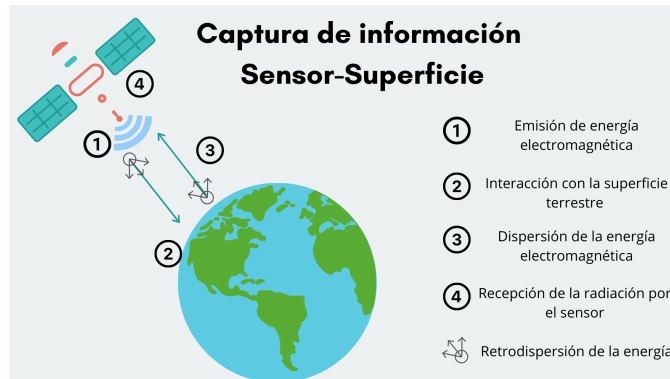


Figura 2.2: Proceso de obtención de información mediante técnicas satelitales.

El radar se utiliza para una amplia variedad de aplicaciones como:

- Medición de temperatura superficial
- Estudio de las capas de hielo
- Identificación de capas de contaminación
- Determinación de la velocidad del viento
- Observación de olas
- Análisis del desplazamientos por sismos

Sin embargo, interpretar imágenes de radar puede ser un desafío debido a las distorsiones causadas por proyecciones oblicuas y la complejidad de la técnica de radar.

2.2. Radar de Apertura Sintética (SAR)

Existen dos tipos de radar utilizados en satélites de observación terrestre: el radar de apertura real (RAR) y el radar de apertura sintética (SAR). El RAR es un sistema mono-estático que mide los pulsos reflejados desde una zona iluminada por un haz coherente de radiación. El pulso emitido cuenta como una fase inicial con una alta frecuencia de repetición controlada. El haz de radar está compuesto

por pulsos cortos en el tiempo (δt) y una repetición de alta frecuencia. La frecuencia de los pulsos generados por la antena se alterna de emisor a receptor con una frecuencia igual a la frecuencia de repetición, en dirección perpendicular a la trayectoria del vuelo, por lo que es conocido como radar de apertura real. Una de las limitaciones clave del RAR es su tamaño físico, que puede hacerlo menos adecuado para aplicaciones en satélites pequeños o plataformas con restricciones de espacio. Además, la resolución espacial del RAR suele estar vinculada al tamaño de su antena, lo que puede limitar su capacidad para detectar detalles pequeños en la superficie.

El SAR, por sus siglas en inglés, es una variación del *RADAR* que opera mediante la emisión de una señal coherente que registra tanto la fase como la amplitud de las ondas. En este contexto, la fase se refiere a la posición relativa de una onda electromagnética en un punto específico de su ciclo. Específicamente en SAR, la fase se transmite hacia un objetivo y luego se refleja de vuelta hacia el radar, donde puede experimentar cambios. Estos cambios en la fase están relacionados con la distancia entre el radar y el objetivo, así como con otros factores, como el movimiento relativo entre el radar y el objetivo. Por otro lado, la amplitud se refiere a la intensidad de la señal de radar, lo que se utiliza para determinar la intensidad de la señal reflejada, estableciendo así una relación entre la composición y características del objetivo con la señal obtenida.

Para garantizar la estabilidad durante el periodo de emisión y recepción de la señal, se emplean antenas sintéticas de gran longitud que combinan la información de los trenes de pulsos de energía retrodispersados y recibidos dentro de la longitud de la antena sintética. Mientras ocurre todo este proceso, el sensor observa la escena, es decir, toma múltiples imágenes de la superficie terrestre en diferentes momentos. (García Malvaéz and Dávila Hernández, 2014).

Para crear una imagen SAR, se transmiten pulsos sucesivos de ondas de radio para iluminar una escena objetivo, posteriormente se recibe y registra el eco de cada pulso. Los pulsos se transmiten y los ecos se reciben utilizando una antena de formación de haz único. El procesamiento de la señal proveniente de las continuas emisiones de energía del radar son registradas y esto permite combinar las grabaciones de estas múltiples posiciones de antena. Este proceso forma la apertura de la antena sintética y permite generar imágenes, mediante el uso de antenas físicas (Broquetas Ibars, 1997). En este sentido las imágenes SAR son denominadas complejas debido al uso de números complejos en la representación de los datos de radar. Estos números complejos incorporan dos componentes clave: la parte real y la parte imaginaria. Donde la parte real hace referencia a la amplitud de la señal radar. Y la parte imaginaria representa la fase de la señal, que refleja la diferencia en tiempo (o fase) entre la señal transmitida y la señal reflejada. En conjunto, la parte real y la parte imaginaria de la imagen compleja ofrecen una representación integral de los datos de radar (Callacondo Pérez, 2020).

La figura 2.3 detalla como se captura la información a partir de una antena SAR, además de indicar la posición de la antena real o física, representando el comienzo de la detección del objetivo y el Punto 2 muestra el fin de la observación múltiple del objeto. La dirección en azimut, representa la dirección del vuelo del satélite, mientras que la dirección en rango es perpendicular al azimut λ . En este sentido,

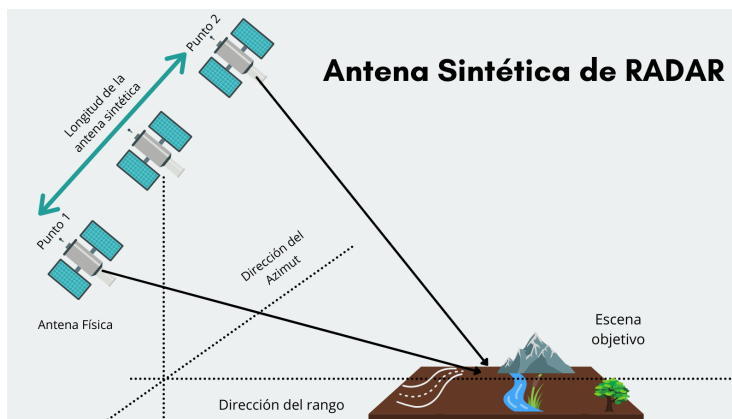


Figura 2.3: Esquema de una antena sintética de Radar.

es importante denotar

2.3. Geometría de la imagen RADAR

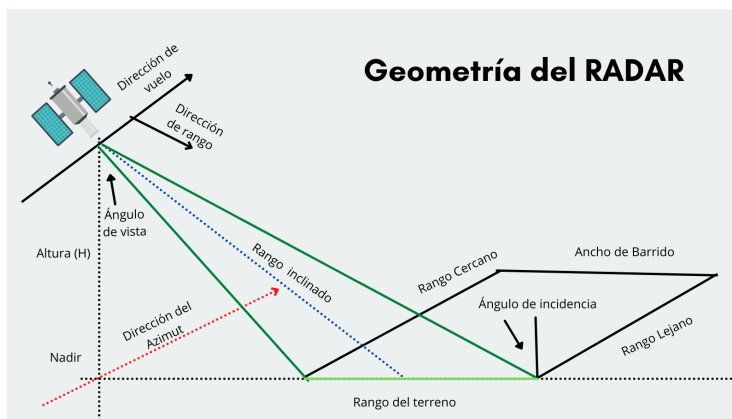


Figura 2.4: Geometría del RADAR.

En la figura 2.4, se muestran los elementos que conforman la geometría del radar, y son descritos a continuación:

- **Altura:** Es la distancia vertical entre un punto de la superficie terrestre y el satélite.
- **Nadir:** Es el punto que se forma con la intersección de la distancia vertical entre el terreno y el satélite.

- **Azimut:** Es la dirección paralela al vuelo del satélite, o la traza en el terreno de dicha trayectoria.
- **Dirección de rango:** Es la dirección en la que es emitida la señal del radar y perpendicular a la dirección del azimut.
- **Rango inclinado (*slant range*):** Es la distancia R entre el radar y un punto sobre la superficie de la escena, dicha distancia se mide en la dirección de vista del radar (*LOS - Line of sight*).
- **Rango del terreno:** Es la proyección del rango inclinado sobre la superficie del terreno.
- **Rango cercano:** Es el comienzo del barrido *radarswath* de la imagen, donde el rango del terreno es cercano al nadir y el rango inclinado es el más corto en la imagen.
- **Ángulo de vista :** Este ángulo es formado mediante la altura de la órbita del satélite y la apertura del haz del radar. Cuanto más bajo sea el satélite en su órbita y más ancho sea el haz del radar, mayor será el ángulo de vista.
- **Ángulo de incidencia:** Es el ángulo que se forma entre el eje del haz del radar y la normal a la topografía local.

Las imágenes obtenidas a través de un sistema radar pueden verse alteradas debido a distorsiones geométricas causadas por diversos factores. Es importante considerar estas distorsiones separadamente en rango y en azimut, ya que la geometría SAR varía en ambos. Por lo general, las distorsiones en rango son más evidentes y están relacionadas con cambios en la topografía, mientras que las distorsiones en azimut son más sutiles pero más difíciles de corregir y están relacionadas principalmente a las condiciones atmosféricas, como la presencia de humedad o cambios en la velocidad del viento.

La posición de un objeto específico se mide en función del tiempo que tarda la señal o pulso en viajar desde el sensor hasta la superficie, lo que está directamente relacionado con la distancia entre el sensor y el objeto. En el plano de rango oblicuo, esto puede causar una compresión de la superficie iluminada, conocida como distorsión de escala de rango oblicuo. Esto resulta en un cambio en la escala de la imagen a medida que nos alejamos del rango cercano. Para solucionar este problema, se puede realizar una proyección en rango horizontal.

2.4. Polarización

La energía electromagnética está compuesta por 4 elementos característicos que son frecuencia, longitud de onda, amplitud y polarización (Hermosillo Camacho et al., 2018). Al utilizar radiación coherente en la formación de imágenes de radar, se pueden utilizar diferentes modalidades de polarización.

La polarización se refiere a la orientación de la vibración del campo eléctrico de la onda electromagnética que forma la señal de radar. En el sistema radar se dice que una señal está linealmente polarizada en horizontal cuando el campo eléctrico de la radiación electromagnética es perpendicular al plano de incidencia, y cuando vibra paralela al plano de incidencia hablamos de polarización vertical (ver figura 2.5). La polarización es una de las características de la radiación electromagnética más importante que influye en la retrodispersión. Existen radares que son capaces de operar bajo diferentes esquemas de polarización en la cual se transmite y recibe la señal.

Por ejemplo:

- Horizontal-Horizontal (HH)
- Horizontal-Vertical (HV)
- Vertical-Vertical (VV)
- Vertical-Horizontal (VH)

Las polarizaciones HV y VH se pueden considerar cruzadas.

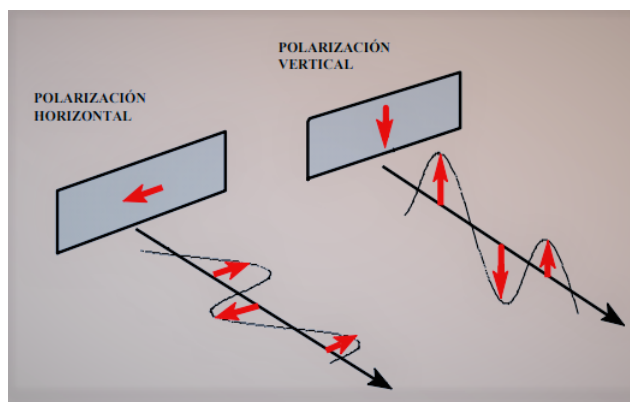


Figura 2.5: Esquema de polarizaciones vertical y horizontal.

Esto significa que los radares SAR operan en una o más polarizaciones y después pueden recibir la onda dispersada en la misma o en diferente polarización, tal como se describió anteriormente. Dependiendo de la polarización con la que sean obtenidas las imágenes pueden tener diferentes aplicaciones, por ejemplo:

- Estimación biofísica de cultivos: Polarizaciones VH o HV.
- Estudio de suelos y tipos de rocas: Polarización VV.
- Estudios tectónicos, subsidencias y deslizamientos de tierra: VV o VH.
- Detección de derrames de petróleo: HH o HV.

Si la energía transmitida y recibida tienen la misma orientación, se le llama “polarización similar”, por ejemplo, HH significa que ambas están polarizadas horizontalmente, es decir, la energía de ida está polarizada horizontalmente y regresa igual. En cambio, si la energía transmitida y recibida están polarizadas en direcciones ortogonales, se denomina “polarización cruzada”. Por ejemplo, VH significa que se transmite polarización vertical y se recibe horizontalmente.

2.5. Interferometría SAR (InSAR)

La Interferometría SAR (InSAR) es una técnica de percepción remota comúnmente utilizada para el monitoreo de la superficie terrestre. Esta técnica consiste en empalmar y comparar las señales de radar recibidas por un sensor SAR en dos o más momentos diferentes, para analizar las interferencias entre ellas y obtener información sobre la topografía y los cambios en la superficie terrestre (Ferretti et al., 2007).

En la metodología InSAR, es necesario contar con mínimo dos imágenes complejas que contienen la magnitud (intensidad) y la fase de la señal. En este contexto, a la primera de estas imágenes se le asigna la etiqueta de **Maestra**, mientras que la segunda es reconocida como **Esclava**. La imagen designada como **Maestra** desempeña el papel de referencia primordial, ejerciendo su influencia como punto de partida. En contraste, las imágenes **Esclavas** representan aquellas que serán contrastadas y comparadas con la imagen **Maestra**, permitiendo así evaluar y analizar sus diferencias. En este sentido, para un análisis interferométrico de un evento sísmico, es necesario disponer de una imagen tomada antes del sismo y otra después del evento. Esta metodología nos permite evaluar el impacto y las alteraciones ocasionadas por el evento. En este caso, la imagen **Maestra** corresponde a la capturada previamente al sismo, mientras que la imagen **Esclava** corresponde a la obtenida posteriormente al suceso. Este enfoque nos permite realizar una comparación detallada y un contraste de las condiciones antes y después del evento sísmico.

Un interferograma es la combinación de dos imágenes complejas procesadas, donde se compara la fase de cada imagen reflejadas por la superficie en ambos momentos. La diferencia de las dos fases se traduce en el interferograma y se emplea para calcular las variaciones en la distancia entre el sensor y la superficie. Cuando observamos el interferograma, vemos patrones de franjas de interferencia que son representativas de estas diferencias de distancia, donde cada franja completa corresponde a un ciclo completo de cambio de fase. El análisis de estas franjas da como resultado el cálculo de las alteraciones en la distancia entre el sensor y la superficie en relación con la longitud de onda del radar (Ferrer Rubio et al., 2016).

La decorrelación, también conocida como pérdida de coherencia, se refiere al ruido en la fase presente

en los interferogramas y puede tener varias causas, como la diferencia en los ángulos de incidencia (decorrelación geométrica), la penetración de onda del radar en el medio dispersor (decorrelación volumétrica), las características de la antena (decorrelación térmica), los cambios físicos en el terreno (decorrelación temporal), y los algoritmos elegidos para procesar los datos (decorrelación debida al procesamiento InSAR) (Seppi et al., 2016).

El proceso de creación de un interferograma SAR implica multiplicar, pixel por pixel, la primera imagen con el complejo conjugado de la segunda. Este proceso da como resultado una imagen compleja, en la que la amplitud del interferograma es igual a la multiplicación de las amplitudes de las dos imágenes originales, y su fase interferométrica es la diferencia de fase entre ambas.

$$I(x, y) = A1(x, y) * A2(x, y)^{(j*\phi(x,y))} \quad (2.2)$$

Donde:

- $I(x,y)$ es el interferograma SAR en el punto (x,y)
- $A1(x,y)$ y $A2(x,y)$ son las amplitudes de las dos imágenes originales en el punto (x,y)
- $\phi(x,y)$ es la diferencia de fase en el punto (x,y) entre las dos imágenes originales
- j es la unidad imaginaria ($j*j = -1$)

La ecuación 2.2 muestra como se crea el interferograma SAR a través de la multiplicación de las dos imágenes originales y la incorporación de la diferencia de fase.

2.6. Interferometría Diferencial (DInSAR)

La técnica de la interferometría diferencial (conocida como DInSAR) es una variante del InSAR que permite medir deformaciones, desplazamientos o cambios en la superficie a partir de dos imágenes complejas capturadas en diferentes momentos. Al aplicar esta técnica, se generan mapas de desplazamiento terrestre y se determina la coherencia relativa (Ver figura 2.6).

DInSAR es una técnica ampliamente utilizada para realizar análisis multitemporal a lo largo de meses o incluso años, mediante la adquisición de varias imágenes a lo largo del tiempo. Hay diversas técnicas de procesamiento de DInSAR. Por ejemplo, la obtención de desplazamientos se realiza a partir de áreas alejadas del fenómeno, que se consideran libres de cambios y con geometría constante, lo que permite filtrar diferencias no reales causadas por cambios atmosféricos. Desde estas áreas alejadas, se integran hacia el centro de la zona de estudio para obtener los desplazamientos totales. La fase relacionada con el desplazamiento terrestre se puede extraer del interferograma generado por el par

interferométrico. Una vez aislada la fase, es posible estimar la componente de desplazamiento.

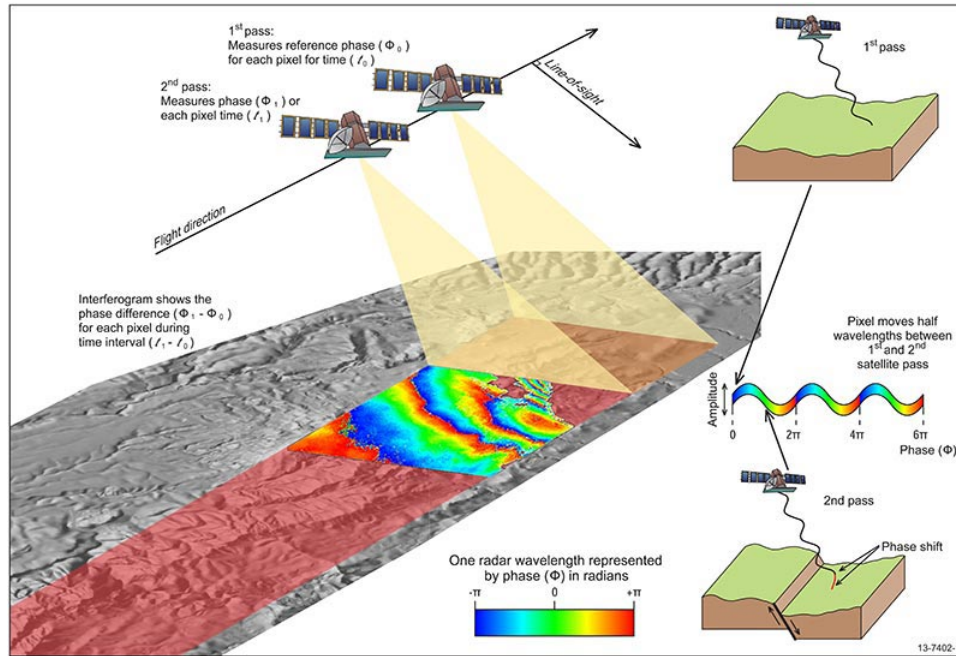


Figura 2.6: Región de la formación de un interferograma mediante la adquisición de dos imágenes SAR de la misma región en momentos diferentes. Si la superficie se mueve entre las dos adquisiciones, se registra un cambio de fase. Un interferograma mapea este cambio de fase espacialmente. Consultada de: Geoscience Australia.

2.6.1. DInSAR aplicado al estudio de sismos

En general, la metodología DInSAR ofrece resultados confiables para estudiar sismos, ya que proporciona una medición precisa de la deformación total en la superficie terrestre de la zona afectada. Estos resultados son fundamentales para calcular el desplazamiento ocasionado por los sismos de manera precisa y detallada. Para llegar a estos resultados, es necesario seguir varios pasos como:

1. Adquirir imágenes de radar adecuadas para la región de estudio, asegurándose de contar con al menos una imagen correspondiente a momentos diferentes antes y después del sismo. Este enfoque temporal permitirá analizar los cambios en la superficie terrestre y obtener una visión completa de la evolución del terreno durante el evento sísmico.
2. Se debe realizar el proceso de corrección, que implica la corrección de las imágenes para asegurar que los píxeles correspondan a la misma ubicación en la superficie terrestre en ambas imágenes. Este proceso es esencial para garantizar la precisión de los resultados de DInSAR.
3. Se calculan las diferencias de fase entre ellas. Estas diferencias de fase se utilizan para crear interferogramas, que son mapas de las deformaciones en la superficie terrestre. Los

interferogramas se utilizan para medir la amplitud y la dirección de las deformaciones causadas por el sismo.

4. Por último los datos del interferograma se procesan para obtener una medida de la deformación total en la superficie terrestre, que puede ser utilizada para calcular el desplazamiento causado por el sismo.

Es importante destacar que la metodología de DInSAR para interferometría de sismos puede ser afectada por varios factores, como la topografía, la vegetación y la humedad del suelo. Estos factores pueden influir en la medición de las deformaciones en la superficie terrestre y, por lo tanto, deben ser considerados durante el procesamiento de los datos.

2.7. Diferencia entre InSAR y DInSAR

Existen varias diferencias entre la metodología InSAR y DInSAR, la diferencia principal y más destacable entre estas metodologías es la precisión, donde la metodología DInSAR es más precisa que su predecesora, esto es debido al uso de distintos filtros para corregir los efectos de la topografía en las mediciones de deformación. Así mismo se utiliza una componente adicional para corregir la fase de deformación en la imagen maestra, para poder eliminar cualquier componente de deformación que ya se había medido en la primera diferencia de fase (imagen maestra), esto con el fin de poder contener únicamente valores de deformación asociados al evento sísmico.

3.1. Misión Sentinel - 1

Sentinel-1A es un proyecto de la Agencia Espacial Europea (ESA), cuya misión es observar la Tierra utilizando tecnología de radar y forma parte del programa global de estudio de la Tierra “*Copernicus*”. Su objetivo es proporcionar datos precisos y rápidos de la superficie terrestre y la atmósfera de Europa y del resto del mundo.

Lanzado el 3 de abril de 2014, el satélite Sentinel-1A se encuentra equipado con un radar de apertura sintética (SAR por sus siglas en inglés), lo que ha impulsado significativamente la investigación mediante la incorporación de tecnología de vanguardia. Los resultados obtenidos mediante este satélite han aportando avances notables gracias a las innovaciones que lo caracterizan como son:

- La disponibilidad de imágenes en día o de noche.
- La captura de información independientemente de las condiciones meteorológicas.
- Y que el radar equipado es capaz de capturar datos de la superficie con una resolución de hasta cinco metros.

La misión Sentinel-1A tiene aplicaciones en una amplia gama de campos como son:

- La gestión de desastres naturales.
- El monitoreo de la deforestación y el cambio climático.
- La detección del desplazamiento generado por sismos.
- El monitoreo y vigilancia de glaciares.

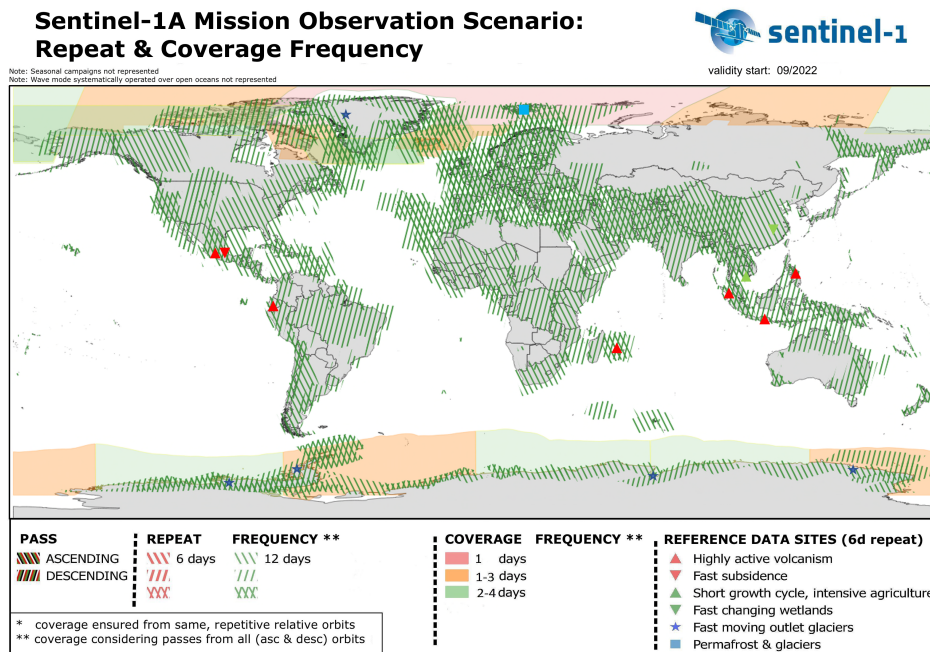


Figura 3.1: Cobertura y frecuencia del satélite Sentinel 1 Fuente: (ESA, 2023).

La misión Sentinel-1A ha sido un gran éxito, proporcionando información valiosa y en tiempo casi real sobre nuestro planeta. Además, la ESA ya ha lanzado la misión Sentinel-1B, que complementa la capacidad del Sentinel-1A y mejora la cobertura y resolución de las imágenes (Ver figura 3.1). Con la continua evolución y mejora de esta misión, se espera que siga siendo una herramienta vital para la monitorización y gestión del medio ambiente en todo el mundo.

En términos de investigación científica, la misión Sentinel-1A ha demostrado una versatilidad excepcional al ser empleada en una diversidad de propósitos. Ha posibilitado el análisis detallado de la superficie terrestre, fomentando una mayor comprensión de procesos geológicos fundamentales, como el desplazamiento de las placas tectónicas y la alteración de la corteza terrestre. Asimismo, ha resultado esencial en la investigación de la dinámica de los glaciares y las transformaciones en la capa de hielo de los polos, un componente crucial en la evaluación del cambio climático.

3.1.1. Modos de adquisición

El satélite Sentinel-1 puede adquirir datos SAR en cuatro modos de adquisición diferentes: Interferométrico de Ancho de Banda (IW), Interferométrico de Estrecho Ancho de Banda (SM), Ancho de Banda (WV) y Extra Ancho de Banda (EW) (Ver figura 3.2).

El modo IW es el modo de adquisición principal del Sentinel-1. En este modo, el satélite emite pulsos de radar de alta potencia con una duración de 5 a 20 microsegundos y una frecuencia central de

5.405 GHz (Ver figura 2.1). Los datos se adquieren en una franja de 250 kilómetros de ancho y con una resolución espacial de 5x20 metros. La polarización de la señal se puede configurar en modo de polarización simple (HH o VV) o en modo de polarización dual (HH+HV o VV+VH).

El modo IW es ideal para aplicaciones que requieren una alta resolución espacial y una cobertura amplia, como la detección de cambios en la superficie terrestre, la cartografía del terreno, el monitoreo de la vegetación y la detección de derrames de petróleo. Además, el modo IW también se puede utilizar para la medición precisa de deformaciones en la superficie terrestre mediante técnicas de interferometría de radar.

El modo SM es similar al modo IW, pero utiliza pulsos de radar de menor duración y una frecuencia central más alta (3.055 GHz) para lograr una resolución espacial más fina de 5x5 metros. La cobertura del modo SM es más limitada, solo adquiriendo datos en una franja de 100 kilómetros de ancho, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren una mayor resolución espacial en áreas más pequeñas, como la detección de estructuras y objetos de tamaño pequeño, como edificios y embarcaciones.

El modo EW, por otro lado, utiliza una frecuencia central de 9.650 GHz y una duración de pulso de 100 microsegundos para lograr una cobertura aún más amplia que los modos IW y SM. Los datos del modo EW se adquieren en una franja de 400 kilómetros de ancho y con una resolución espacial de 20x40 metros, lo que lo hace adecuado para aplicaciones que requieren una cobertura global con una resolución espacial moderada, como la detección de la humedad del suelo y la clasificación de la cobertura terrestre.

Similar al modo EW, el modo WV también está diseñado para la obtención de imágenes de franjas amplias, pero con una resolución espacial un poco mayor. En este modo, Sentinel-1A adquiere imágenes en una sola polarización y es especialmente útil para aplicaciones como la cartografía y el seguimiento de cambios en la cubierta terrestre a gran escala.

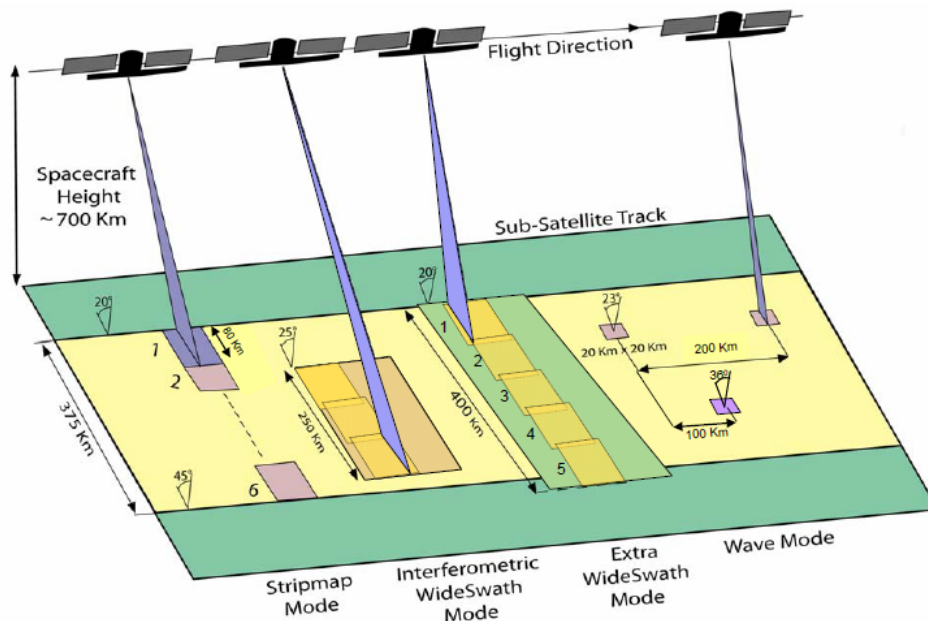


Figura 3.2: Modos de adquisición Sentinel 1 Fuente: (ESA, 2023).

3.2. Adquisición y extracción de datos de imágenes radar

El uso de imágenes radar se ha convertido en una herramienta esencial en la observación y comprensión de la Tierra desde el espacio como se ha comentado previamente y a través de la utilización de tecnología avanzada, estas imágenes brindan una visión única y detallada de la superficie terrestre. En este contexto, un componente fundamental en la obtención de estas imágenes es el repositorio de datos abiertos de la NASA, una fuente invaluable de información que ha ayudado al acceso de imágenes de radar y ha permitido a investigadores, científicos y profesionales en todo el mundo explorar y aprovechar su potencial. Anteriormente, la obtención de datos radar solía ser costosa y restringida, limitando su uso a unas pocas instituciones y proyectos selectos. Sin embargo, con la apertura de estos datos, se ha creado un ambiente de colaboración global en el que investigadores de diversas disciplinas pueden aprovechar la información proporcionada por las imágenes radar para llevar a cabo investigaciones originales y descubrimientos innovadores.

3.2.1. Materiales

Los datos utilizados fueron 4 imágenes Sentinel 1-A consultadas y descargadas del repositorio de datos abiertos de la NASA (EARTH DATA Open Access for Open Science)¹, y en las tablas 3.1 y 3.2 se resume la información de las mismas.

¹<https://earthdata.nasa.gov/>

Tabla 3.1: Imágenes procesadas para el sismo del 7 de septiembre 2021.

Misión	Especificaciones		
Satelital	<i>Fecha de adquisición</i>	<i>Beam mode</i>	<i>Polarización</i>
Sentinel 1-A	01/09/2021	IW	VV+VH
Sentinel 1-A	13/09/2021	IW	VV+VH

Tabla 3.2: Imágenes procesadas para el sismo del 23 de junio 2020.

Misión	Especificaciones		
Satelital	<i>Fecha de adquisición</i>	<i>Beam mode</i>	<i>Polarización</i>
Sentinel 1-A	19/06/2020	IW	VV+VH
Sentinel 1-A	01/07/2020	IW	VV+VH

3.3. Adquisición y extracción de datos de nivel del mar

En este trabajo se emplearon datos del nivel del mar correspondientes a los días 23 de junio de 2020 y 7 de septiembre de 2021, los cuales fueron suministrados por el SMN, como ejemplo se puede ver en la tabla 3.3 los datos del día 23 de junio del 2020, los cuales están compuestos por el valor del nivel del mar a cada 6 minutos.

Tabla 3.3: Nivel del mar proporcionados por el SMN.

Año	Mes	Día	Hora	Minuto	Segundo	Nivel de Mar
2020	6	23	0	0	0	3.200
2020	6	23	0	6	0	3.175
2020	6	23	0	12	0	3.170
2020	6	23	0	18	0	3.138
2020	6	23	0	24	0	3.121
2020	6	23	0	30	0	3.187
2020	6	23	0	36	0	3.126
2020	6	23	0	42	0	3.160
2020	6	23	0	48	0	3.180
2020	6	23	0	54	0	3.157
2020	6	23	1	0	0	3.169

4.1. Preprocesamiento de los datos SAR

El preprocesamiento de los datos de radar de apertura sintética (SAR) juega un papel esencial en la obtención de información precisa y coherente de la superficie terrestre. Antes de que los datos SAR puedan ser utilizados para análisis e interpretación, es necesario llevar a cabo una serie de pasos de preprocesamiento que abordan factores como la corrección de imperfecciones y artefactos inherentes a la adquisición y procesamiento de los datos como lo son: la adquisición de orbitas de cada imagen y la selección de polarización a utilizar. Esta etapa inicial es fundamental para asegurar la calidad y la fiabilidad de los resultados obtenidos a partir de los datos SAR, sentando las bases para análisis posteriores en diversos campos como la cartografía, la monitorización ambiental, etc.

4.1.1. Corregistro

El corregistro es un paso importante en la metodología de DInSAR, el cual consiste en alinear las imágenes SAR de manera precisa para poder extraer información sobre la deformación del terreno. Este proceso se realiza utilizando un conjunto de técnicas que permiten corregir las distorsiones y variaciones geométricas entre las imágenes, lo que resulta fundamental para obtener resultados precisos (Hanssen, 2001).

Una de las técnicas más utilizadas en el corregistro es el método de ajuste de fase, el cual se basa en la correlación de las fases de las imágenes SAR. En mi proceso, empleé específicamente este método de correlación de fase para encontrar la fase relativa entre las dos imágenes SAR. Esta técnica implica la utilización de un algoritmo de correlación de patrones que permite obtener una imagen de fase corregida (Zebker and Goldstein, 1986). Además de la correlación de fase, también utilicé otros métodos como la corrección de la geometría y la corrección de la trayectoria de la plataforma para mejorar la precisión del corregistro.

Estos métodos se utilizan para determinar de manera precisa la diferencia de la fase, así como la generación de Modelos Digitales de Elevación y, por consiguiente, el análisis de deformación de la superficie, esto mediante la correlación pixel a pixel de las imágenes procesadas (Hermosillo Camacho et al., 2018).

Es importante destacar que el corregistro no solo es fundamental para la precisión del DInSAR, sino que también es un paso crítico en otras aplicaciones de percepción remota, como la clasificación de imágenes, la detección de cambios y la generación de mapas topográficos (Massonnet and Feigl, 1998).

4.2. Procesamiento de los datos SAR

4.2.1. Creación del interferograma

Una vez que se haya hecho el corregistro de las imágenes, se realiza el procesamiento del interferograma, el cual consiste en la correlación de la parte real y la parte imaginaria de la señal con el complejo conjugado de la primera imagen (Maestra) por la segunda (Esclava) (Calderhead et al., 2011). Cuando se efectúan dos observaciones desde la misma ubicación espacial, pero en momentos distintos, la fase interferométrica se relaciona directamente con cualquier alteración en la distancia de un atributo en la superficie. Esto es válido siempre y cuando se realice un proceso de desenrollado de la fase; en caso contrario, se presentará una ambigüedad en la fase, lo que limita la capacidad de utilizar la información para identificar características del terreno (García Malvaéz and Dávila Hernández, 2014). Es esencial resaltar que la fase interferométrica está compuesta por diversos componentes asociados a varias fuentes, tales como la influencia de la superficie terrestre (debida a la curvatura de la Tierra), la topografía, el desplazamiento, las condiciones atmosféricas y el ruido. La reducción o eliminación de estos componentes es necesaria y depende del tipo específico de estudio a llevar a cabo.

Derivado del cálculo del interferograma, obtenemos varios productos, en los que destacan la fase interferométrica, la amplitud (intensidad) y la imagen de coherencia que indica los cambios en la geometría sobre la superficie de las escenas en términos de magnitud de la señal y es un valor normalizado entre 0 y 1, donde 0 implica total pérdida de correlación y 1 máximo nivel de correlación entre los píxeles de la imagen, por lo tanto, la preservación de la geometría en el periodo de tiempo estudiado (Ver figuras 5.2 y 5.11). El parámetro más común para medir la calidad de la fase interferométrica es la coherencia, la cual es susceptible a tener pérdidas por diversos factores. Esto se debe principalmente al cambio de la topografía, la deformación del terreno, a la contribución atmosférica, etc. Estos factores pueden afectar a la calidad de los datos, por lo que es necesario realizar filtros y correcciones a los productos generados (Hermosillo Camacho et al., 2018).

4.2.2. Eliminación de líneas o franjas (Deburst)

Es fundamental destacar una característica importante al trabajar con datos de la misión Sentinel-1, especialmente en el modo de adquisición IW. En los productos generados en este modo, se observan franjas que delimitan la imagen. Estas franjas son el resultado de la captura de información mediante sub-barridos (pases) durante la adquisición de datos. Sin embargo, es crucial tener en consideración que estas franjas o líneas presentan una alta decorrelación en la imagen. Por esta razón, resulta muy importante eliminar o reducir al máximo estas franjas durante el procesamiento de los datos.

Es esencial comprender que estas franjas en particular se originan como un error sistemático inherente generado por el método de adquisición IW. Al eliminarlas, el error sistemático se convierte en no sistemático, lo que implica que ya no siguen un patrón regular y, como resultado, se vuelven difíciles de identificar visualmente en la imagen. Este procedimiento de eliminación o reducción de las franjas comúnmente se le denomina **Deburst**

4.2.3. Remover la fase topográfica

Después de corregir el espaciamiento entre los pases del satélite (Deburst), se procede con el aislamiento de la deformación relacionada con el evento sísmico. Para lograr esto, es esencial eliminar la influencia de la topografía en el interferograma. Esto se logra mediante la utilización de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM). En este estudio, se empleó un DEM derivado de la misión Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) con una resolución de un segundo de arco, que equivale a aproximadamente 30 metros. Esto permite obtener el término asociado únicamente a la deformación temporal del terreno más las componentes atmosféricas y de ruido, generando así a un Interferograma Diferencial (DInSAR) (Ferretti et al., 2007).

4.2.4. Filtrado de ruido (Speckle)

El interferograma procesado aún conserva el efecto speckle, ruido inherente a la formación de la imagen SAR que no es posible eliminar totalmente, pero mediante la aplicación de filtros se puede reducir de manera importante. El programa SNAP cuenta con un filtro especializado para interferogramas denominado Goldstein Filtering es un algoritmo no lineal adaptativo propuesto por Goldstein y Werner en 1998. Dicho filtro suaviza el dominio de la fase y se emplea con el propósito de eliminar discontinuidades y reducir el ruido. Este filtro se fundamenta en la estimación de una fase cuadrática que se adapta a los datos de la fase y se debe realizar previo al desenvolvimiento de la fase (Ver sección 4.2.6) para reducir el ruido y mejorar la calidad del desenvolvimiento (Ver figuras 5.1 y 5.10) (Ferretti et al., 2007).

4.2.5. Multilooking

Otro método ampliamente utilizado para reducir el speckle es el multilooking. Este método se combina con el filtro de Goldstein para reducir aún más el efecto del speckle. Sin embargo, es importante tener en cuenta que si no se reduce o elimina completamente el speckle, puede dar lugar a errores y dificultar la interpretación y el análisis de la imagen.

El método de multilooking consiste en promediar una serie de píxeles. La aplicación de esta técnica inevitablemente conlleva la pérdida de resolución espacial, por lo que debe utilizarse considerando los resultados del interferograma, como el espaciado entre franjas (Deburst), y la resolución deseada en la imagen de salida, por lo que es necesario evaluar nuestro interferograma sin procesar (Ver figuras 5.1 y 5.10) y compararlos con los productos filtrados (Ver figuras 5.3 y 5.12), al comparar estos productos, debemos de observar una mejoría visual.

4.2.6. Desenvolvimiento de la fase (phase unwrapping)

El desenvolvimiento de fase es una etapa muy importante en la metodología DInSAR, debido a la formación envuelta de la fase en los interferogramas. Si bien la fase en un interferograma representa la diferencia en el tiempo que tarda una señal de radar en viajar desde el sensor hasta un punto en la superficie y regresar al sensor. Sin embargo, esta diferencia de tiempo se mide en ciclos de onda, lo que significa que la fase se presenta en un rango limitado de $-\pi$ a π o de 0 a 2π radianes. Cuando la diferencia de fase excede estos límites, ocurre un “envolvimiento” y la fase se reinicia desde $-\pi$ o 0, lo que crea saltos abruptos en los valores de fase. Esto hace que sea imposible obtener mediciones precisas de distancias, ya que no sabemos cuántos ciclos de onda completos se han acumulado en la diferencia de fase. Lo que se desea lograr con la técnica es recuperar la fase original o al menos una estimación válida de la misma sin estos saltos abruptos. (Biescas et al., 2003).

4.2.7. Conversión de la fase de radianes a desplazamiento en metros.

En el procesamiento de imágenes SAR, los valores de los píxeles en el interferograma desenvuelto siguen expresados en radianes. Sin embargo, para comprender las deformaciones en la superficie de la Tierra, es esencial convertir estos valores de radianes a unidades de desplazamiento, es decir, metros. Esta conversión se logra extrayendo la fase desenvuelta de cada píxel y dividiéndola entre 4π . Luego, se multiplica por la longitud de onda del sensor utilizado en el estudio.

Para este análisis, se emplea el sensor Sentinel-1 con banda C, que tiene una longitud de onda (λ) en el rango de 3.75 a 7.5 cm. La relación fundamental entre la fase (ϕ) y el desplazamiento (\mathbf{d}) se rige por la siguiente ecuación:

$$d = \frac{\lambda}{4\pi} * \phi \quad (4.1)$$

Donde:

- ϕ es la fase en radianes.
- λ es la longitud de onda del radar.
- d es el desplazamiento en metros.

4.2.8. Corrección topográfica.

Las imágenes SAR inicialmente están en coordenadas radar, esto imposibilita la interpretación si se desea comparar la imagen o ubicarla en el espacio respecto de una proyección cartográfica. Debido a las variaciones topográficas en la imagen y la inclinación del radar en el satélite, las distancias pueden distorsionarse en la imagen (López-Quiroz et al., 2009). Las correcciones topográficas en el terreno están destinadas a compensar estas distorsiones de manera que la representación de la geometría de la imagen sea lo más cercano posible a la realidad (Ver figuras 5.5 y 5.14).

Para realizar las correcciones mencionadas se utilizó un operador llamado “Range Doppler Terrain Correction”, que geocodifica las imágenes de SAR a partir de una única geometría de radar en 2D. Utiliza las anotaciones cronológicas de radar, los parámetros de conversión de rango inclinado a tierra, junto con los datos DEM de referencia para obtener la información de geolocalización precisa (Ferretti et al., 2007).

En resumen, la metodología DInSAR es una técnica compleja que en los últimos años se ha estado desarrollando y mejorando de modo que los resultados obtenidos cuentan con una gran precisión. En este trabajo se utilizó una metodología propuesta por la Agencia Espacial Europea (Braun and Veci, 2021), como se muestra en la figura 4.1

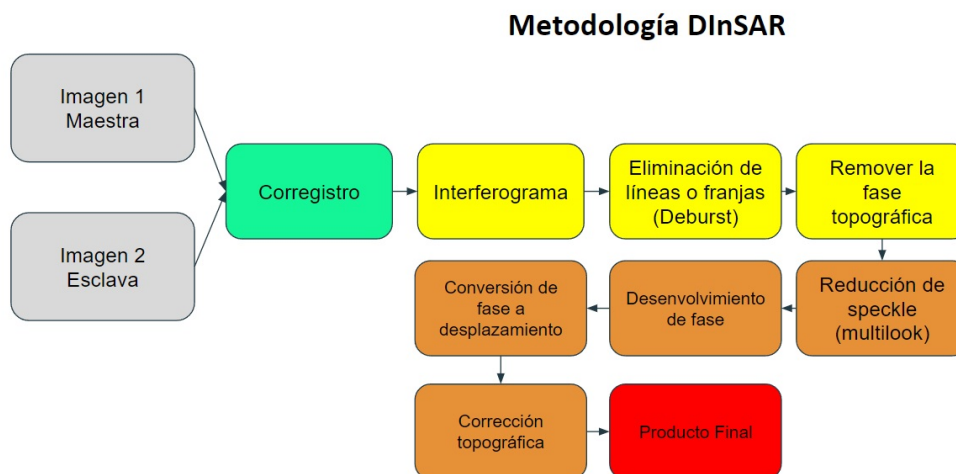


Figura 4.1: Diagrama de flujo simplificado del procesamiento DInSAR.

4.3. Procesamiento de los datos de nivel del mar

Para el procesamiento de los datos del nivel del mar se empleó lenguaje Matlab, donde se generaron scripts para poder organizar, filtrar y gráficar a los distintos valores del nivel del mar, para así poder aplicar distintos modelos matemáticos para calcular la tendencia y pronóstico, dando como resultado la obtención de gráficas representativas de los datos del nivel del mar capturados in situ, así como los pronósticos derivados de los datos capturados, estas gráficas se pueden observar en las figuras 5.8 y 5.16.

4.4. Modelado de los datos de nivel del mar

El modelamiento del nivel del mar es una área muy importante en la oceanografía y la meteorología. Como sabemos, el nivel del mar tiene un impacto significativo en el clima, la ecología y la infraestructura costera. Para pronosticar su comportamiento futuro, se utilizan modelos matemáticos y estadísticos (NOAA, 2023).

Uno de los métodos más comunes para pronosticar el nivel del mar es a través de modelos armónicos. Estos modelos se basan en la teoría de las mareas, que establece que el nivel del mar se mueve en respuesta a las fuerzas gravitacionales de la Luna, el Sol y otros planetas. Los modelos armónicos utilizan una serie de funciones sinusoidales para representar las variaciones en el nivel del mar causadas por las mareas (University of Hawaii, 2023).

Para construir un modelo armónico del nivel del mar, se utiliza un conjunto de datos históricos

del nivel del mar medido en un punto de observación en particular. Estos datos se analizan para determinar las componentes armónicas que mejor se ajustan a los patrones de marea observados. Las componentes armónicas pueden incluir términos con períodos semidiurnos, diarios, mensuales, anuales y de largo plazo, cada uno con su propia amplitud y fase. Un ejemplo es el uso de los componentes de marea, representados por símbolos como M2, K1, S2 y N2, son términos utilizados en la teoría de las mareas para describir las diferentes frecuencias y amplitudes de las variaciones en el nivel del mar. Estos componentes de marea son fundamentales para entender y predecir los patrones de marea en diferentes lugares del mundo (NOAA, 2023).

Los componentes de marea se desglosan principalmente en mareas diurnas y semidiurnas, dependiendo de la frecuencia de su ciclo. Las mareas diurnas tienen un ciclo de aproximadamente 24 horas y son influenciadas principalmente por las fuerzas gravitacionales del Sol. Por otro lado, las mareas semidiurnas tienen un ciclo de aproximadamente 12 horas y están principalmente influenciadas por las fuerzas gravitacionales de la Luna. Veamos algunos de los componentes de marea más comunes:

- **M2 (Lunar semidiurna principal):** Este es uno de los componentes más significativos y representa las mareas semidiurnas causadas principalmente por la atracción gravitacional de la Luna. El período de M2 es de aproximadamente 12 horas y 25.2 minutos.
- **S2 (Solar semidiurna principal):** Las mareas semidiurnas solares son representadas por el componente S2, influenciado por la fuerza gravitacional del Sol. El período de S2 es de 12 horas.
- **K1 (Lunar diurna):** Representa las mareas diurnas causadas por la Luna y tiene un período de aproximadamente 23 horas y 56 minutos.
- **O1 (Lunar diurna):** Otro componente diurno causado por la Luna, con un período de aproximadamente 25.8 horas.
- **N2 (Lunar semidiurna mayor):** Este componente de marea tiene un período de aproximadamente 12 horas y 42.6 minutos y es influenciado principalmente por la Luna.
- **P1 (Solar diurna):** Representa las mareas diurnas causadas por el Sol, con un período de aproximadamente 24 horas.

Una vez que se han identificado las componentes armónicas, se pueden usar para predecir el nivel del mar futuro en ese punto de observación. Esto se hace al proyectar cada componente armónica en el futuro y sumarlas para obtener una predicción global del nivel del mar. Los modelos armónicos también pueden incluir correcciones para factores que influyen en el nivel del mar, como la presión atmosférica, la temperatura del agua, la salinidad y la atracción gravitatoria de cuerpos celestes, como lo son el sol y la luna, está última tiene una gran importancia (USGS, 2023).

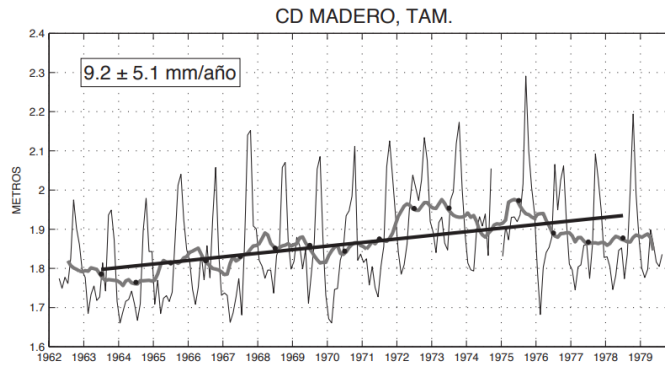


Figura 4.2: Modelado del nivel del mar en Ciudad Madero, México y tendencias del año 1962 a 1979. Tomado de (Zavala-Hidalgo et al., 2011).

Es importante tener en cuenta que los modelos armónicos son solo una herramienta para pronosticar el nivel del mar (Ver figura 4.2) y no pueden tener en cuenta todos los factores que pueden afectar el nivel del mar, como el cambio climático y las variaciones en la circulación oceánica. Por lo tanto, es esencial seguir investigando y desarrollando modelos más precisos y completos para predecir el comportamiento del nivel del mar y sus posibles efectos en la sociedad y el medio ambiente (NOAA, 2023).

5.1. Evento de Huatulco del 23 de junio de 2020

Los resultados obtenidos son mapas que representan los desplazamientos producidos por el sismo en valores métricos (Ver figura 5.6). Los valores positivos indican que el terreno se acercó al satélite y los valores negativos que el terreno se alejó del satélite, lo que sugiere un desplazamiento en la vertical (Ver figura 5.7).

En el interferograma no existe el cero absoluto de deformación, por lo que los desplazamientos son relativos (Ver figura 5.4). Es necesario identificar las zonas de cero deformaciones para calcular los desplazamientos absolutos sobre el interferograma y esto se hace mediante la interpretación y diversos análisis apoyados de datos externos, en este caso en especial, al tener los datos del mareógrafo de la bahía de Huatulco, se realizó una interpretación precisa de los desplazamientos obtenidos por el método DInSAR, así como por el modelado de los datos del nivel del mar, revisando y comparando los datos estadísticos del desplazamiento.

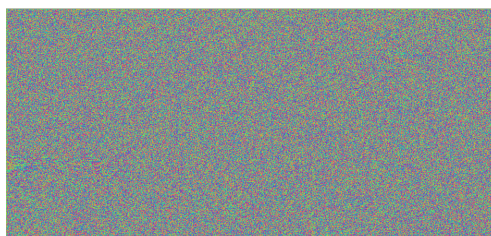


Figura 5.1: Interferograma en bruto. Se puede observar la presencia del ruido denominado Speckle que no puede ser eliminado totalmente, pero mediante la utilización de filtros puede ser reducido.

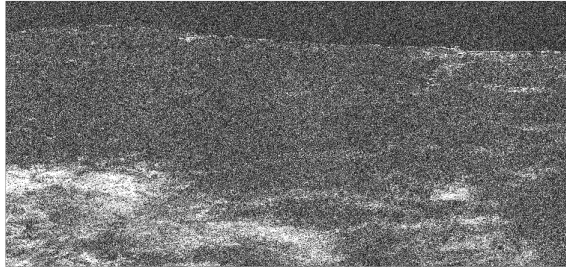


Figura 5.2: Mapa de Huatulco en valores de coherencia. Indica el índice de coherencia en la imagen en el rango normalizado de 0 a 1 donde 0 (color negro) es total pérdida de coherencia y 1 (color blanco) indica máximo índice de coherencia.

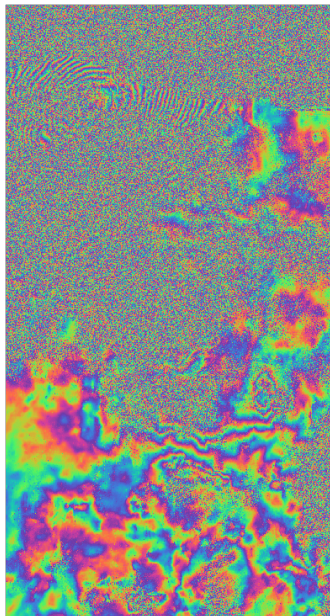


Figura 5.3: La imagen muestra la diferencia de fase entre las imágenes utilizadas después del filtrado y multilooking. Se observa que son más visibles las franjas interferométricas, así como zonas con alta decorrelación por el cambio de geometría en el periodo estudiado

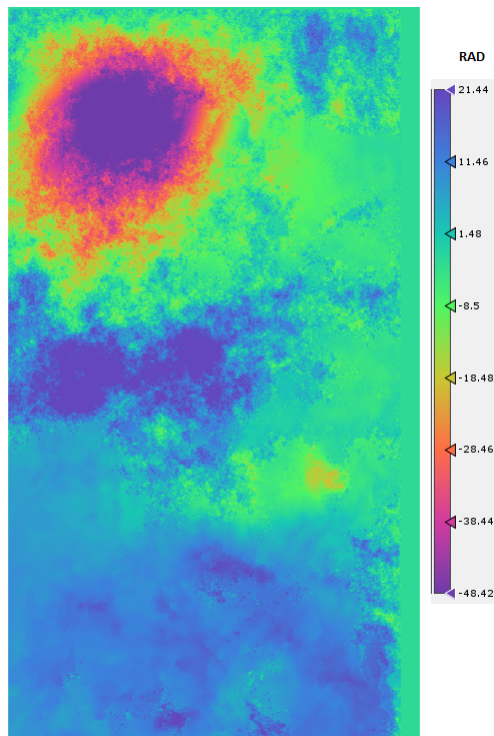


Figura 5.4: En la Imagen se observa la fase desenvuelta a través de la utilización del software SNAPHU. Los valores de deformación aún están en radianes.

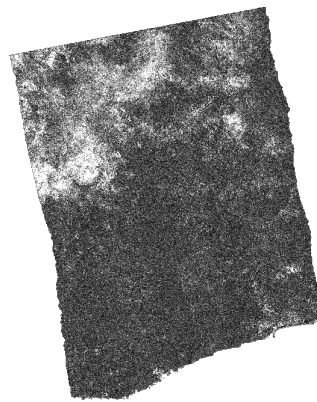


Figura 5.5: Al igual que en la 5.2 está imagen representa la coherencia, no obstante esta imagen ya está corregida topográficamente

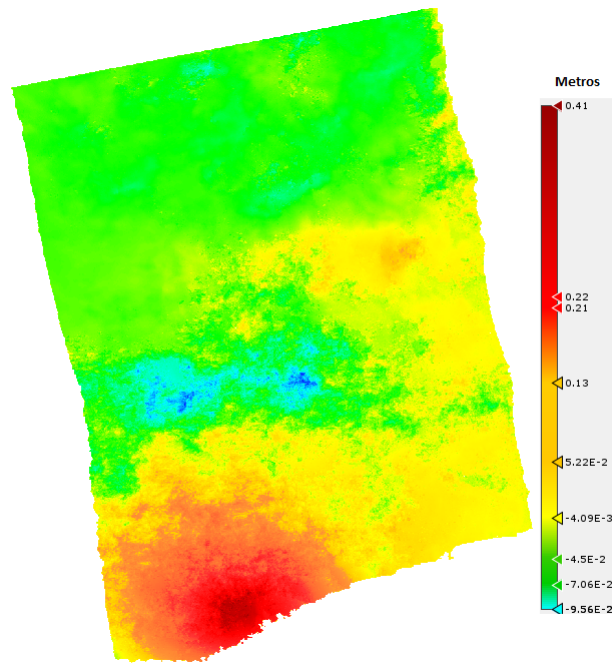


Figura 5.6: Mapa de desplazamientos sobre la superficie donde se observa la deformación a causa del sismo del 23 de junio del 2020 al centro de la imagen en color azul corresponde a los distintos cuerpos de agua de la zona. Los desplazamientos han sido calculados con los valores de la fase desvenuelta en radianes y fueron transformados a metros.

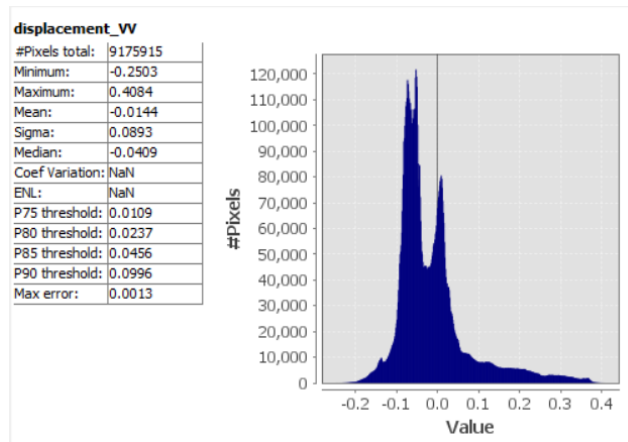


Figura 5.7: Las estadísticas descriptivas de la zona de estudio indican que hubo un desplazamiento en la dirección del rango con valor positivo, donde el máximo es 0.41 metros y el mínimo -0.25 metros.

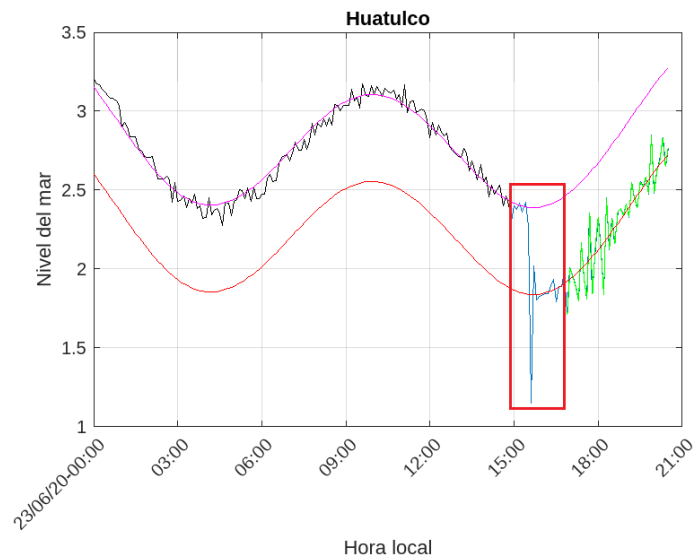


Figura 5.8: Observaciones y análisis del nivel del mar en la estación mareográfica de Huatulco entre el 23/06/20 a las 0:00hrs tiempo local y a las 21:00hrs tiempo local. Los datos observados se segmentan de la siguiente manera: la representación armónica para el pronóstico previo al sismo se destaca en color rosa, mientras que la proyección armónica para el pronóstico posterior al sismo se resalta en color rojo. Los registros del nivel del mar antes del evento sísmico se presentan en color negro, mientras que los registros durante el transcurso del tsunami causadas por el sismo se visualizan en tono azul. Por último, los datos correspondientes al nivel del mar después del sismo se muestran en un tono verde distintivo.

Como se puede ver en la figura 5.8 se modelaron los datos de la estación mareográfica de Huatulco, como se logra observar en la figura, hay una variación muy pronunciada en los datos del nivel del mar (cuadro rojo), mostrando un desplazamiento preliminar de 37-40 cm entre los datos antes del sismo y después del mismo, así mismo los valores entre el interferograma y el nivel del mar modelado son muy parecidos donde los datos obtenidos por el interferograma fueron de 40 centímetros de desplazamiento para el sitio en donde se encuentra el mareógrafo, mientras que los datos del nivel del mar fueron de 38 centímetros aproximadamente, lo que demuestra que los datos in situ y los datos obtenidos por el interferograma son muy similares.

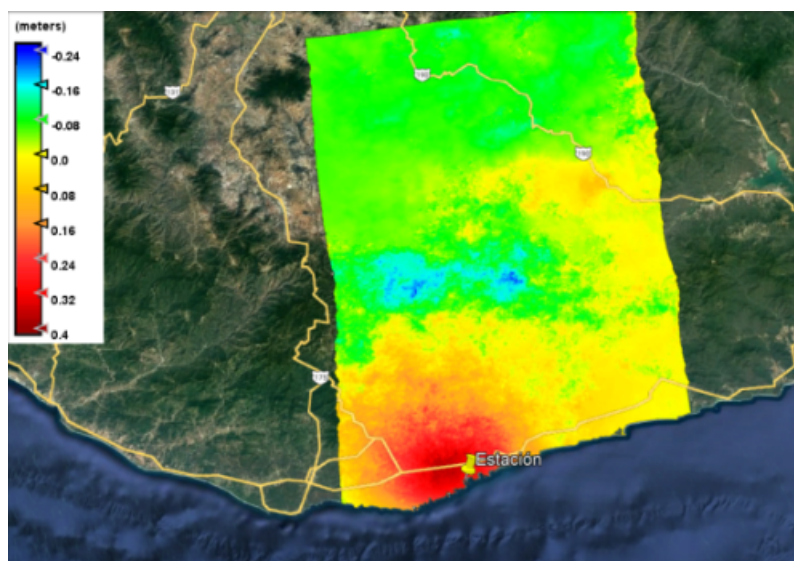


Figura 5.9: Mapa de desplazamientos en Huatulco, junto con la estación mareográfica. Este mapa contiene una escala métrica, por lo que el desplazamiento sobre la superficie máxima fue de 40 centímetros.

5.2. Evento de Acapulco del 7 de septiembre de 2021

Al obtener el mapa de desplazamientos sobre el área de interés, el comportamiento del desplazamiento se torna de manera positiva, lo que indica que el desplazamiento del terreno fue en dirección del satélite de manera que el mayor desplazamiento se dio cerca del epicentro del sismo (Ver figuras 5.17 y 5.15).

Para precisar los datos del desplazamiento, se realizó un análisis comparativo que diferencia entre la magnitud desplazada obtenida a partir del interferograma, con datos in situ, tomados de la estación mareográfica de la bahía de Acapulco, dando como resultados un desplazamiento de 16-18 cm, donde se aprecia una variación muy pronunciada en los datos del nivel del mar (ver figura 5.16).

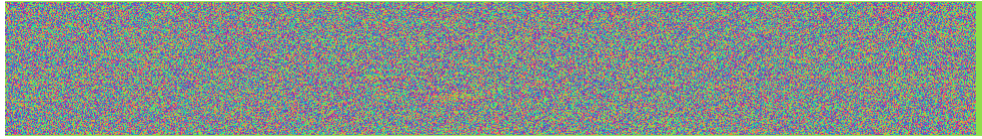


Figura 5.10: Interferograma en crudo. El interferograma se obtiene del cálculo del complejo conjugado de la primera imagen (maestra) por la segunda (esclava) obteniendo la diferencia de fase. Se puede observar la presencia del ruido denominado *Speckle* que no puede ser eliminado totalmente, pero mediante la utilización de filtros puede ser reducido.

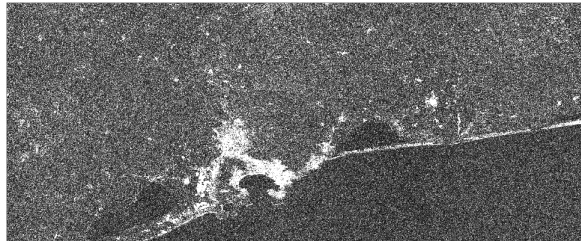


Figura 5.11: Mapa de coherencia. Indica el índice de coherencia en la imagen en el rango normalizado de 0 a 1 donde 0 (color negro) es total pérdida de coherencia y 1 (color blanco) indica máximo índice de coherencia.

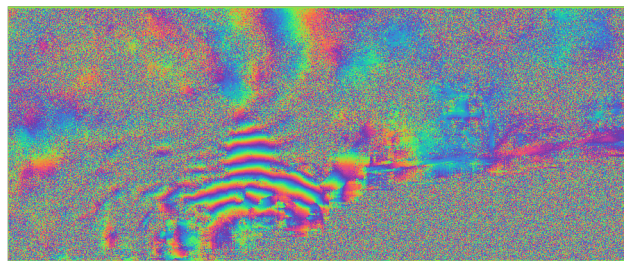


Figura 5.12: La imagen muestra la diferencia de fase entre las imágenes utilizadas después del filtrado y multilooking. Se observa que son más visibles las franjas interferométricas, así como zonas con alta decorrelación por el cambio de geometría en el periodo estudiado

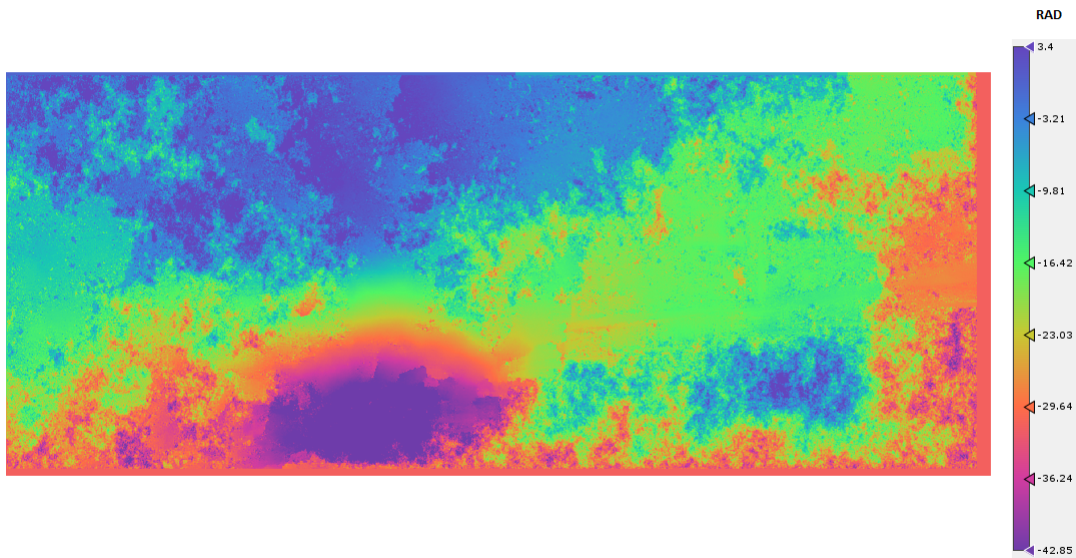


Figura 5.13: En la imagen se observa la fase desenvuelta a través de la utilización del software SNAPHU. Los valores de deformación están en radianes.

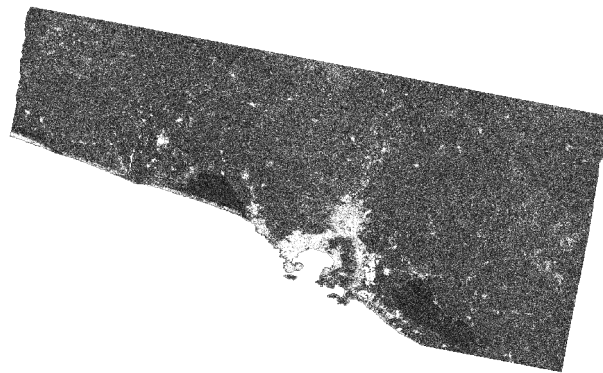


Figura 5.14: Coherencia de la imagen corregida topográficamente.

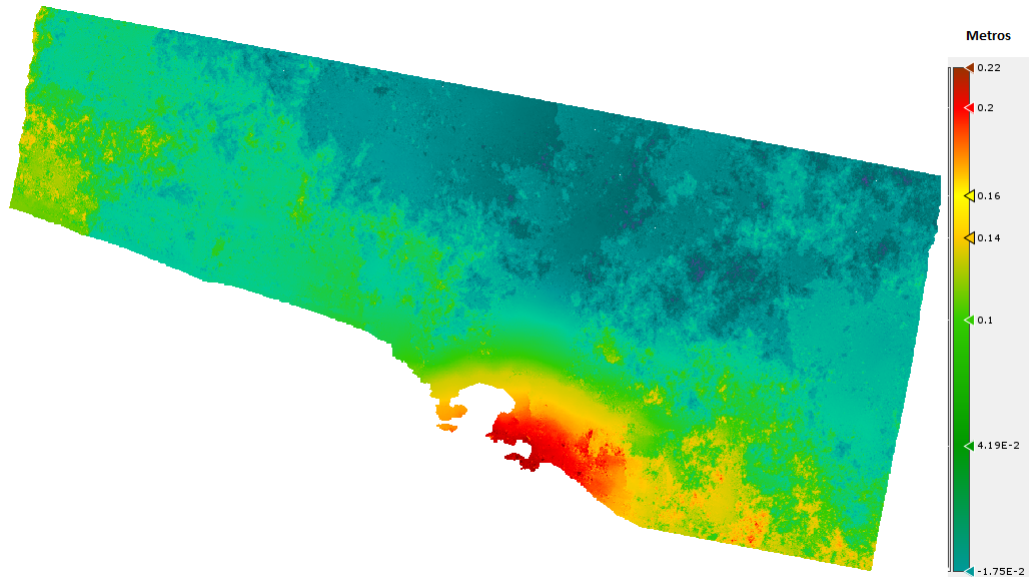


Figura 5.15: Mapa de desplazamientos sobre la superficie donde se observa la deformación a causa del sismo del 7 de septiembre del 2021 al sur oriente de la imagen. Los desplazamientos han sido calculados con los valores de la fase desmenuada en radianes y fueron transformados a metros.

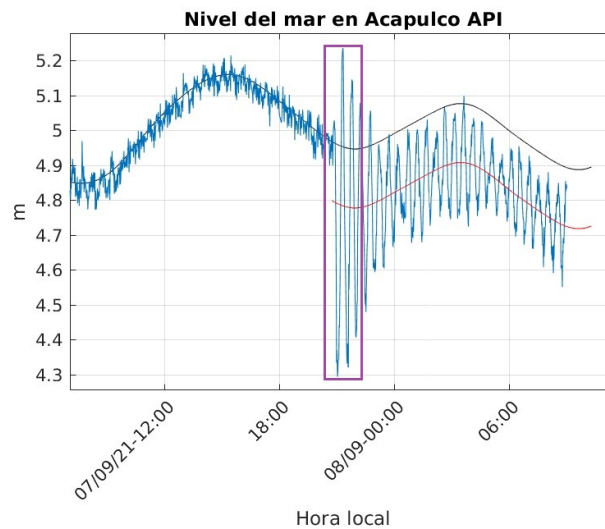


Figura 5.16: Observaciones y análisis del nivel del mar en el sitio de la estación mareográfica de Acapulco. Los datos observados se segmentan de la siguiente manera: la representación armónica para el pronóstico previo al sismo se destaca en color negro, mientras que la proyección armónica para el pronóstico durante y posterior al sismo se resalta en color rojo. Los registros del nivel del mar antes del evento sísmico se presentan en color azul al igual que los registros del nivel del mar durante y posterior al sismo.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Al observar el histograma del desplazamiento en la bahía de Acapulco (Ver figura 5.17), se aprecia que el rango de valores es variado, por lo que para precisar de manera concreta y dar validez a los datos obtenidos por el interferograma, se procedió a exportar el mapa de desplazamientos a Google Earth, para unir el mapa de desplazamientos con la estación mareográfica como se hizo en el caso de Huatulco.

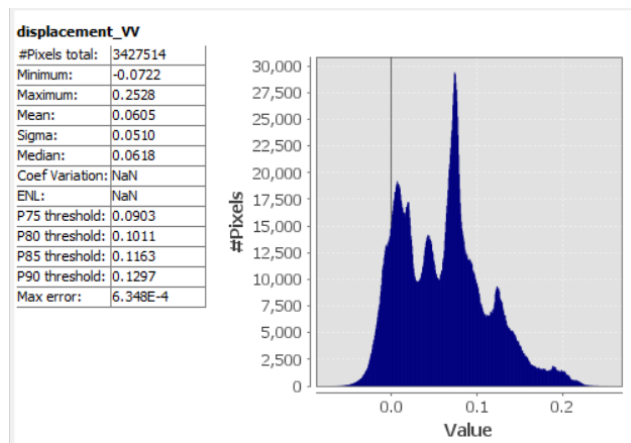


Figura 5.17: Las estadísticas descriptivas de la zona de estudio indican que hubo un desplazamiento en la dirección del rango con valor positivo, donde el máximo es 0.2528 metros y el mínimo -0.0722 metros.

Como se puede ver en la figura 5.18 la estación mareográfica se encuentra en una zona de desplazamiento alrededor de los 16-17 cm, esto indica que los valores obtenidos por el mareógrafo y los obtenidos por el interferograma, son muy parecidos ya que la variación del nivel del mar fue aproximadamente de 18 centímetros, lo que demuestra una alta correlación entre los datos in situ y los datos obtenidos por el interferograma.

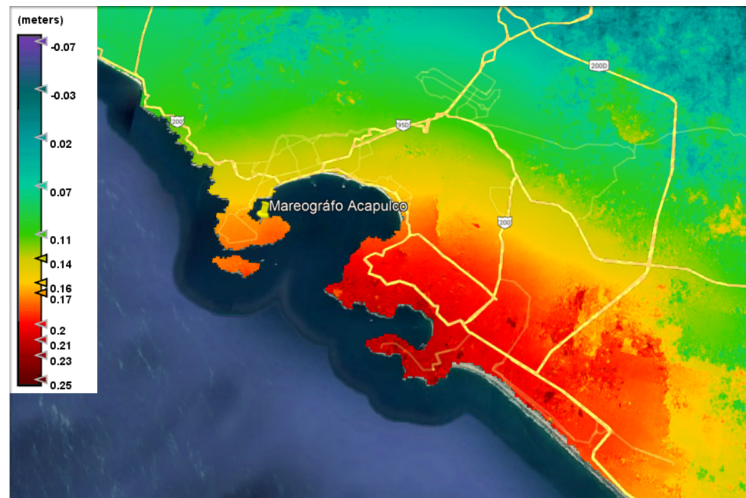


Figura 5.18: Mapa de desplazamientos en la bahía de Acapulco, junto con la estación mareográfica

Discusión y conclusiones

6.1. Discusión

Se ha utilizado la técnica de interferometría diferencial (DInSAR) para la detección de la deformación del terreno en dos casos distintos, a causa de diferentes fenómenos sísmológicos, uno fue el del 23 de junio de 2020 en la bahía de Huatulco y otra el 7 de septiembre de 2021 en la bahía de Acapulco.

El resultado del procesamiento de ambos casos fueron dos mapas de deformación de la superficie transformado a desplazamientos (metros) para medir la magnitud del cambio ocasionado por los fenómenos sísmicos presentados.

En ambos casos al contar con datos in situ de la estación mareográfica, se procedió a realizar un modelo matemático para los datos del nivel del mar, así como el análisis de la fluctuación del nivel del mar para la determinación del desplazamiento en la zona del día del sismo.

Los resultados obtenidos en el caso de Huatulco revelaron un desplazamiento medio de -0.144 metros, con un valor máximo de 0.4084 metros y un mínimo de -0.2503 metros. La desviación estándar de estos resultados fue de 0.0893. En términos de dirección, los datos sugieren una inclinación hacia la izquierda, como se ilustra en el gráfico estadístico de la Figura 5.8, lo que indica un predominio de desplazamiento vertical negativo. Sin embargo, es importante señalar que al evaluar estos datos junto con la coherencia obtenida en el mismo proceso, se observa que las zonas con desplazamiento vertical negativo tienen una baja coherencia. Esto sugiere que estos resultados pueden carecer de la calidad necesaria para ser considerados como fiables. En contraste, las zonas con desplazamiento vertical positivo presentan una coherencia significativamente alta, lo que respalda su calidad y confiabilidad. Es importante destacar que estos resultados se derivaron del análisis del interferograma

Los resultados en Acapulco revelaron un desplazamiento promedio de 0.0605 metros, con valores máximos de 0.2528 metros y mínimos de -0.0722 metros, y una desviación estándar de 0.0510. En términos de dirección, los datos sugieren un predominio de desplazamiento vertical positivo, como

se muestra en el gráfico estadístico de la Figura 5.17. Es importante destacar que al evaluar estos datos junto con la coherencia obtenida durante el proceso, se observa que en general, todas las áreas con desplazamiento vertical, tanto negativo como positivo, exhiben una alta coherencia. Esta alta coherencia respalda la fiabilidad y calidad de los resultados.

Ambos casos fueron validados mediante la comparación de los datos del nivel del mar obtenidos en las estaciones mareográficas de Acapulco y Huatulco respectivamente y los datos de desplazamiento obtenidos por el método DInSAR, lo que resultó en una comparación muy acertada entre ambos resultados, denotando así, una gran similitud en los datos obtenidos mediante métodos remotos y datos in situ

6.2. Conclusiones

Mediante el uso de la interferometría diferencial (DInSAR), se logro identificar y cuantificar con precisión las zonas de deformación asociadas a los sismos del 7 de septiembre de 2021 y el 23 de junio de 2020 en las regiones de Huatulco y Acapulco. Estos eventos sísmicos generaron desplazamientos máximos de hasta 40 cm en Huatulco y 22 cm en Acapulco, en un área de deformación de 10,245 y 2,694 kilómetros cuadrados, respectivamente. Estos hallazgos proporcionan información valiosa sobre el impacto de los sismos en estas regiones costeras. Estos resultados tienen importantes implicaciones para futuras investigaciones y estrategias de mitigación de riesgos en áreas propensas a eventos sísmicos.

Al comparar los resultados del método interferométrico con los datos de nivel del mar de las estaciones mareográficas en Huatulco y Acapulco, se encontró una similitud bastante estrecha y coherente. Los desplazamientos verticales obtenidos a través del interferograma, de aproximadamente 40 cm en el sitio del mareógrafo en Huatulco y de 16-17 cm en Acapulco, concuerdan de manera notable con las mediciones de nivel del mar, que registraron alrededor de 38 cm en Huatulco y 18 cm en Acapulco. Estos resultados respaldan la utilidad y precisión del método interferométrico.

En conclusión, los resultados obtenidos respaldan de manera sólida la eficacia de la Interferometría Diferencial en la medición precisa de las deformaciones verticales inducidas por sismos. Este metodología se presenta como una herramienta confiable y valiosa para el monitoreo de eventos sísmicos.

Bibliografía

- [1] Abbott, B. P., Abbott, R., Abbott, T., Abernathy, M., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adams, T., Addesso, P., Adhikari, R., et al. (2016). Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. *Physical review letters*, 116(6):061102.
- [2] Biescas, E., Agudo, M., Monserrat, O., Ibañez, C., and Crosetto, M. (2003). Aplicaciones de la interferometría sar para la medida de deformaciones del terreno. *Instituto de Geomática, Castelldefels, España*. 34
- [3] Braun, A. and Veci, L. (2021). Tops interferometry tutorial. *ESA: Paris, France*. 35
- [4] Broquetas Ibars, A. (1997). Obtención de modelos digitales del terreno y detección de pequeños movimientos de la superficie terrestre mediante interferometría radar desde satélite. In *AET 1997: Teledetección aplicada a la gestión de recursos naturales y medio litoral marino: VII Congreso Nacional de Teledetección: Santiago de Compostela: 26-28 junio 1997*, pages 252–255. 17
- [5] Calderhead, A. I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R., and Garfias, J. (2011). Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of insar and field data in the toluca valley, mexico. *Advances in Water Resources*, 34(1):83–97. 32
- [6] Callacondo Pérez, H. W. (2020). Técnica dinsar-psi aplicada a la detección de deformaciones pre-eruptivas en el volcán ubinas (perú), 2017-2019. 17
- [7] Campbell, J. B. (2011). *Introduction to Remote Sensing*. Taylor & Francis Group. 3
- [8] Catuna, N. (1995). La percepción remota y el análisis del espacio geográfico. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 5(2):83–106.
- [9] Center for Hazards and Risk Research - CHRR - Columbia University and Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University (2005). Global Earthquake Hazard Distribution - Peak Ground Acceleration. <https://doi.org/10.7927/H4BZ63ZS>. Accessed 20 mayo de 2023.

- [10] Chávez, J. L. (2010). *Tratamiento digital de imágenes multiespectrales*.
- [11] Chuvieco, E. (1991). Remote sensing. 4
- [European Space Agency] European Space Agency. Sentinel-1. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1. Accessed on April 13, 2023.
- [13] Ferrer Rubio, L. L. et al. (2016). Deformación observada a través de radar interferométrico de apertura sintética insar del volcán nevado del ruíz, colombia. 21
- [14] Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., Massonnet, D., and Lichtenegger, J. (2007). Esa/esrin (retired), frascati, italy. 21, 33, 35
- [15] García Malvaéz, C. and Dávila Hernández, N. (2014). Discriminación de unidades volcánicas a partir de imágenes ópticas y radar: estudio de caso volcán de colima, periodo 2004-2014. 17, 32
- [16] Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*, volume 2. Springer Science Business Media. 31
- [17] Hermosillo Camacho, G. D. et al. (2018). Interferometría radar para la detección de cambio, desplazamientos y posibles afectaciones a causa del sismo del 19 de septiembre de 2017 en el proyecto del nuevo aeropuerto internacional de méxico (naim). 19, 32
- [18] HIDRONAV (2013). *Manual de procedimientos para el estudio de mareas*. 5
- [19] Highland, L. M. and Bobrowsky, P. (2008). Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes. *Reston, Virginia, EE. UU.: Sistema Geológico de los EUA*, pages 1–176. 8
- [20] Jensen, J. R. (2016). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Pearson Education. 3
- [21] Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., and Chipman, J. W. (2014). *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons. 3
- [22] López-Quiroz, P., Doin, M.-P., Tupin, F., Briole, P., and Nicolas, J.-M. (2009). Time series analysis of mexico city subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69:1–15. 35
- [23] Massonnet, D. and Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36(4):441–500. 32

- [24] Murillo Sandoval, P. J., Gonzalez, C., and Ali, J. (2012). *Principios y aplicaciones de la percepción remota en el cultivo de la caña de azúcar en Colombia*. Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación. 4
- [25] NOAA (2023). Tidal science. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 36, 37, 38
- [26] Patton, J. R. (2018). Earthquake report (and tsunami) Oaxaca, Mexico. 9
- [27] Seppi, S. et al. (2016). Uso de interferometría diferencial para monitorear deformaciones de terreno en la comuna de Corvara, provincia de Bolzano, Italia. *Universidad Nacional de Córdoba*. 1, 22
- [28] Sillerico, E., Marchamalo, M., Rojas, J., and Martínez, R. (2010). La técnica DInSAR: bases y aplicación a la medición de subsidencias del terreno en la construcción. *Informes de la Construcción*, 62(519):47–53.
- [29] SMN (2020). Reporte del tsunami producido por el sismo de magnitud 7.5 ocurrido el día 23 de junio de 2020 al sureste de Crucecita, Oaxaca. Technical report, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. 9
- [30] SMN (2021). Reporte Rápido: Registro en las Estaciones del Servicio Mareográfico Nacional del Tsunami Producido por el Sismo de Magnitud 7.1 Ocurrido en Acapulco, Gro. Technical report, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. 11
- [31] SMN (2023). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica. 4, 5, 6
- [32] UNESCO, C. O. I. (2016). *Manual de medición e interpretación del nivel del mar v. V: medidores de radar*. 5
- [33] University of Hawaii (2023). Tides and water levels. United States Geological Survey (USGS). 36
- [34] U.S. Geological Survey (2020). Magnitude 7.4 earthquake offshore Oaxaca, Mexico. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000ah9t/executive>. 10, 11
- [35] U.S. Geological Survey (2021). Magnitude 7.0 earthquake in Acapulco, Oaxaca, Mexico. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us7000f93v/executive>. 13
- [36] USGS (2022). M 7.0 - 125 km WSW of Port-Vila, Vanuatu. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000ah9t/ground-failure/summary>. [Accedido el 4 de mayo de 2023].

- [37] USGS (2023). Harmonic analysis of tidal data. University of Hawaii. 37
- [38] Zavala-Hidalgo, J., De Buen Kalman, R., Romero-Centeno, R., Hernández-Maguey, F., et al. (2010). Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*, pages 249–268. 38
- [39] Zebker, H. A. and Goldstein, R. M. (1986). Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B5):4993–4999. 31