

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

TESIS DE MAESTRÍA

**Estimación de la deformación causada por el
sismo de Los Humeros (2016-02-08, M_w 4.2) en
Puebla-México, mediante DInSAR**

Presenta:

Reynaldo Santos-Basurto

Tutora:

Dra. Penélope López-Quiroz



*Tesis que para optar
por el grado de Maestro en Ciencias
de la Tierra*

Geología-Geomática
Centro de Geociencias

Declaración de autoría

Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, plasmado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí especificadas, aseguro mediante mi firma al calce que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Todas las citas de, o referencias, a la obra de otros autores aparecen debida y adecuadamente señaladas, así como acreditadas mediante los recursos editoriales convencionales.

Firma:

Resumen

La caldera de Los Humeros se localiza en la parte oriental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), al noreste del estado de Puebla. El 8 de febrero de 2016, fue registrado un sismo de M_w 4.2, mediante la red sísmica instalada por el Instituto de Ingeniería UNAM y Comisión Federal de Electricidad (CFE) en el interior del campo geotérmico. El sismo ocasionó algunos daños a la infraestructura de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), la cual opera el campo geotérmico de Los Humeros. Dicho sismo también afectó a las zonas aledañas al campo donde fueron reportados varios desplazamientos del terreno (e.g. deslizamientos) a lo largo de la falla de Los Humeros.

En este trabajo, se procesaron imágenes SAR adquiridas por la misión Sentinel-1A de la Agencia Espacial Europea (ESA), mediante la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética Diferencial (DInSAR). A partir del cálculo de un par de interferogramas, con dos ángulos de observación diferentes (paso ascendente y descendente), fue posible detectar el desplazamiento provocado por el evento del 8 de febrero de 2016, con epicentro en el interior de la caldera y asociado con la falla de Los Humeros. Los interferogramas fueron corregidos de errores topográficos, orbitales y atmosféricos, mediante el uso los softwares GAMMA y GACOS. Se estimaron las componentes del desplazamiento horizontal (Este-Oeste) y vertical (Arriba-Abajo) del vector del desplazamiento causado por el sismo. Así mismo, se utilizó el software Coulomb 3.3.1 de la United States Geological Survey (USGS) para modelar el desplazamiento esperado a causa del sismo.

Finalmente, los resultados de la estimación de la deformación superficial cosísmica fueron interpretados y validados con información generada de manera independiente (datos sísmicos y magnetotelúricos).

Abstract

Los Humeros caldera is located in the eastern part of the Trans-Mexican Volcanic Belt, North-East of Puebla. On February 8th, 2016, a M_w 4.2 earthquake was recorded by the seismic network installed by Institute of Engineering UNAM and Federal Electricity Commission (CFE) inside the geothermal field. The earthquake made some damages to the Comisión Federal de Electricidad (CFE) power plant infrastructure, which manages Los Humeros geothermal field. The earthquake also affected the population settlements around the field where several terrain displacements (e.g. landslides) were reported along Los Humeros fault.

In this work, Synthetic Aperture Radar (SAR) images acquired by the Sentinel-1A mission from the European Space Agency (ESA) were processed by means of the Differential SAR Interferometry (DInSAR) technique. Using two different look angle image pairs (ascending and descending passes), it was possible to detect the displacement due to the February 8th, 2016 earthquake related to Los Humeros fault and with epicenter inside the caldera. The interferograms were corrected by topographic, orbital and atmospheric errors, by using GAMMA and GACOS software. Horizontal (East-East) and vertical (Up-Down) components of the displacement vector due to the earthquake were estimated. Moreover, by means of United States Geological Survey (USGS) Coulomb 3.3.1 software, the expected displacement due to the earthquake was modeled.

Finally, the results of coseismic surface deformation estimation were interpreted and validated with independent information (seismic and magnetotelluric data).

Agradecimientos

Esta tesis de maestría se realizó con apoyo del proyecto P05 del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo) No. 207032 como parte del “Fondeo de Sustentabilidad” (SENER-CONACyT): “Innovación en la aplicación de técnicas modernas de prospección geotérmica a partir de la integración de métodos geológicos, geoquímicos y geofísicos, caso de estudio del campo volcánico-geotérmico de Los Humeros”.

A la Comisión Federal de Electricidad, por la información brindada.

A la Dra. Olga Sarychikhina (CICESE), por su colaboración. Este trabajo no hubiera sido posible sin su gran apoyo y asesoría.

Índice general

Declaración de autoría	III
Resumen	v
Agradecimientos	VII
Introducción	0
1. Percepción Remota: Sensores que operan en el rango de las microondas	3
1.1. Plataformas	3
1.2. Sensores	3
1.2.1. Sensores de una sola banda y multibanda	4
1.3. Imágenes satelitales	4
1.3.1. Tipos de resolución	5
1.4. Sistema RADAR	5
1.4.1. Radar de Apertura Real (RAR)	6
1.4.2. Radar de Apertura Sintética (SAR)	7
1.4.3. Geometría de la imagen de radar	9
1.4.4. Imagen compleja SAR 2D	9
1.4.4.1. Distorsiones geométricas en las imágenes de radar	10
1.4.5. Acerca de las imágenes Sentinel-1A	12
1.5. La técnica Interferometría SAR Diferencial (DInSAR)	12
1.5.1. Principio y geometría de adquisición DInSAR	12
1.5.2. Las imágenes raw y SLC	13
1.5.3. Cálculo del interferograma	15
1.5.4. Contenido de la fase del interferograma	15
1.5.4.1. Contribución de la fase orbital y errores	16
1.5.4.2. Contribución de la fase topográfica y errores	16
1.5.4.3. Contribución de la fase atmosférica y errores	16
1.5.4.4. Contribución del ruido o decorrelación	17
1.5.4.5. Contribución de la fase relacionada con la deformación y errores	18
1.5.5. Principales etapas del procesamiento DInSAR	18
1.5.6. Desenvolvimiento de la fase y sus errores	19
1.5.7. Principales limitaciones de la técnica DInSAR	19

2. La zona de estudio	21
2.1. Geología de la caldera de Los Humeros	21
2.2. El campo geotérmico de Los Humeros	24
2.2.1. Explotación del campo geotérmico	28
2.2.2. Sismicidad en Los Humeros	28
2.2.2.1. El sismo del 8 de febrero de 2016: Sismo de los Humeros	29
2.2.2.2. Deformación del campo geotérmico medida con InSAR	34
3. Metodología	39
3.1. Adquisición de imágenes de Radar de Apertura Sintética	39
3.2. Procesamiento DInSAR	41
3.2.1. Corrección atmosférica mediante GACOS	44
3.2.2. Cálculo de las componentes horizontal y vertical de la deformación	0
3.3. Deformación del sismo de Los Humeros mediante Coulomb	3
4. Resultados	7
4.1. Mapas de la deformación en LOS (paso ascendente y descendente)	7
4.2. Mapas de deformación vertical y horizontal (Este-Oeste)	0
4.3. Análisis	0
4.3.1. Modelado con Coulomb	0
4.3.1.1. Mecanismo focal DInSAR vs datos sísmicos	0
4.3.2. Deformación del campo geotérmico con otras técnicas interferométricas	1
5. Conclusiones	3
A. Disponibilidad de imágenes SAR en Los Humeros	1
A.1. Muestro en tiempo de imágenes SAR	1
Bibliografía	5

Índice de figuras

1.1. Rangos del espectro electromagnético usados en Percepción Remota	4
1.2. Penetración de la señal de radar en el suelo	6
1.3. Esquema que muestra la longitud de una antena sintética de radar	7
1.4. Geometría de adquisición de un sistema de radar	10
1.5. Esquema en el que se presentan las distorsiones geométricas en una imagen de radar satelital	11
1.6. Imagen en la que se muestran los diferentes modos de adquisición de las imágenes SAR S1A	12
1.7. Esquema que muestra la geometría de la técnica InSAR	13
1.8. Imagen compleja SAR	14
 2.1. Modelo digital de elevaciones de la República Mexicana	22
2.2. Imagen óptica satelital de la misión Sentinel-2A	23
2.3. Mapa geológico actualizado de la zona de la caldera de Los Humeros	25
2.4. Mapa de la distribución de las estructuras principales de la caldera	26
2.5. Mapa de la distribución espacial de los principales pozos	27
2.6. Mapa de ubicación epicentral de los sismos tectónicos detectados en el año 1977, en Los Humeros	30
2.7. Mapa de ubicación epicentral de tres principales sismos en el interior de la caldera de Los Humeros	31
2.8. Fotografías que muestran los daños presentes en la planta geotérmica debido al sismo del 25 de noviembre de 1994	32
2.9. Mapa de distribución epicentral para los sismos de 2015 y 2016 en la caldera de Los Humeros	33
2.10. Mapa de localizaciones epicentrales para el sismo del 2016-02-8 en Los Humeros	35
2.11. Mapa interpolado de la velocidad de deformación en LOS en el campo geotérmico de Los Humeros	37
2.12. Interferograma de la caldera de Los Humeros, contaminado por atmósfera turbulenta	38
 3.1. Diagrama de flujo del análisis de la deformación del sismo de Los Humeros	40
3.2. Mapa con la huella de los subswath de las imágenes Sentinel-A que cubren el área de la caldera de Los Humeros	42
3.3. Diagrama de flujo del procesamiento DInSAR	45
3.4. Mapas de desplazamientos en dirección de la Línea de Vista del Radar (LOS)	46
3.5. Mapas regionales de desplazamientos LOS de la caldera de Los Humeros	1
3.6. Acercamiento del mapa regional de desplazamiento LOS de caldera de Los Humeros	2

3.7. Geometría de adquisición de imágenes SAR para el paso ascendente y descendente	2
3.8. Mapas de desplazamiento vertical (Arriba-Abajo) y horizontal (Este-Oeste) causado por el sismo de Los Humeros.	4
3.9. Esquema de la geometría de una falla en Coulomb 3.3.1	6
3.10. Parámetros estructurales del deslizamiento de una falla	3
3.11. Esquema del cálculo del Dip slip	3
3.12. Imágenes del modelado directo en Coulomb del efecto cosísmico de Los Humeros, modelo No. 1	4
3.13. Imágenes del modelado directo en Coulomb del efecto cosísmico de Los Humeros, modelo No. 56	5
4.1. Desplazamiento en LOS a lo largo de la sección A-A'	8

Índice de tablas

1.1. Algunas misiones satelitales con sensor SAR	8
2.1. Información del sismo del 8 de febrero de 2016	34
3.1. Imágenes SAR de la misión Sentinel-1A usadas en InSAR	41
3.2. Parámetros de los pares interferométricos presentados en este trabajo	44
3.3. Parámetros geométricos de la adquisición de las imágenes SAR utilizadas en este trabajo y los componentes del vector de sensibilidad	0
3.4. Tabla (primera parte), de los parámetros de entrada en Coulomb	1
3.5. Tabla (segunda parte), de los parámetros de entrada en Coulomb	2
A.1. Disponibilidad de imágenes SAR ENVISAT	1
A.2. Disponibilidad de imágenes SAR TerraSAR-X	2
A.3. Disponibilidad de imágenes SAR ALOS-PALSAR-1/2	2
A.4. Disponibilidad de imágenes SAR Sentinel-1A primera parte	3
A.5. Disponibilidad de imágenes SAR Sentinel-1A segunda parte	4

Introducción

En México, existen tres campos geotérmicos principales, que están siendo explotados con el fin de generar energía eléctrica: Cerro Prieto, Los Humeros y Los Azufres. Dicha explotación puede generar deformación en la superficie aledaña al campo geotérmico. En Cerro Prieto, por ejemplo, la literatura reporta que la extracción de fluidos está acompañada por subsidencia de varias decenas de centímetros al año (Sarychikhina et al., 2011; Sarychikhina, Glowacka y Morro, 2016; Sarychikhina, Glowacka y Robles, 2018).

Para el estudio y monitoreo de actividades volcánicas y las consecuencias de la explotación de recursos geotérmicos, en términos de deformación superficial, se ha recurrido a diferentes métodos. Los métodos más utilizados para este propósito son los de levantamiento topográfico utilizando las icas de geodesia tradicional terrestre (e.g. nivelación de precisión) y espacial (e.g. el Global Positioning System (GPS) o Global Navigation Satellite System (GNSS)). Sin embargo, existe una técnica que tiene grandes ventajas con respecto a los métodos geodésicos convencionales mencionados; como una mayor cobertura espacial y temporal (periodo de adquisición de los datos). Dicha técnica se basa en el procesamiento de escenas de Radar de Apertura Sintética (Synthetic Aperture Radar (SAR)) y se conoce como Interferometría de Radar de Apertura Sintética (Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)). Su principio consiste en extraer la información relacionada con la deformación, a partir de la diferencia de fase entre dos imágenes, adquiridas en dos fechas distintas, sobre la misma escena (Hanssen, 2001).

El campo geotérmico de Los Humeros ha sido estudiado previamente para entender mejor su composición, estructura e historia evolutiva. Para ello se han utilizado diferentes métodos geofísicos y geológicos. Actualmente sigue siendo objeto de estudio, en el marco del Proyecto 05 financiado por el CeMIE-Geo (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica). El estudio con mayor duración es el monitoreo sísmico, el cual comenzó en 1994, con una breve interrupción en el año 2008 y retomado en el 2014 (Lermo J, 1999; Antayhua, 2007; Urban-Rascón, 2016). El 8 de febrero de 2016, la red sísmica del campo geotérmico de Los Humeros detectó un sismo de magnitud de momento sísmico, M_w 4.2 (Lermo Samaniego et al., 2016), conocido como “sismo de Los Humeros”. El sismo causó varios daños a la población aledaña al campo y a la infraestructura de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), ocasionando también movimientos de masas en algunos puntos de la falla Los Humeros.

En este trabajo, se utilizaron imágenes SAR de la misión Sentinel-1A de la Agencia Espacial Europea (ESA) para calcular un par de interferogramas mediante el uso de la técnica DInSAR (Diferencial Interferometric SAR). Estos interferogramas cubrieron el periodo de ocurrencia del sismo de Los Humeros (8 Feb 2016) y fueron corregidos de los errores topográficos, orbitales y atmosféricos. A partir de ellos, fue posible estimar los desplazamientos provocados por el sismo en las direcciones vertical y horizontal. Adicionalmente se modeló directamente la deformación cosísmica mediante el software Coulomb de la USGS (Toda et al., 2011). Los resultados están correlacionados con lo reportado por metodologías independientes que involucran análisis sísmicos y magnetotelúricos.

Los objetivos de este trabajo se describen a continuación:

- Estimar la magnitud de la deformación del terreno en el interior de la caldera de Los Humeros causada por el sismo del 8 de febrero de 2016, a través del procesamiento de imágenes SAR con la técnica Interferometría de Radar Satelital Diferencial (DInSAR).
- Estimar las componentes del desplazamiento vertical (Arriba-Abajo) y horizontal (Este-Oeste).

Capítulo 1

Percepción Remota: Sensores que operan en el rango de las microondas

Nuestro planeta es un sistema dinámico. En su superficie y atmósfera ocurren procesos o fenómenos que pueden ser monitoreados, estudiados y analizados, con el objetivo de entenderlos y caracterizarlos. Para cumplir con ese objetivo, se puede hacer uso de varias técnicas de la Percepción Remota.

El término de Percepción Remota, se refiere al estudio de cierto objeto de forma distante mediante el uso de instrumentos (sensores) montados en una plataforma (e.g. un avión o un satélite). La información registrada por dichos instrumentos es la energía reflejada y/o emitida por una superficie o cuerpo de interés. Esta energía puede provenir de una fuente de radiación natural o artificial (Purkis y Klemas, 2011).

1.1. Plataformas

Se define como plataforma, al vehículo que transporta al sensor, el cual puede ser aéreo o espacial.

- Vehículos aéreos: Viajan a altitudes menores que las de un satélite. Algunos ejemplos pueden ser los globos aerostáticos, aviones, helicópteros y recientemente los drones. Estas plataformas se usan generalmente para estudios que requieren mayor resolución espacial.
- Vehículos espaciales: Se trata de satélites a los que comúnmente se les asigna el nombre de una misión (e.g., Landsat, SPOT, GOES, Seawifs, Ikonos, Quickbird, Geoeye, WorldView, ERS, ENVISAT, Sentinel-1A, RADARSAT, COSMO-SkyMed, TerraSar-X, ALOS-PALSAR). Estas plataformas viajan en el exterior de la atmósfera terrestre.

1.2. Sensores

Los sistemas de Percepción Remota pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de sensores que utilizan. Cuando la fuente de energía puede ser emitida por el propio sensor, se conoce como sistema activo, y cuando el sensor solo registra la energía proveniente de una fuente externa es conocido como sistema pasivo (Chandra y Ghosh, 2006).

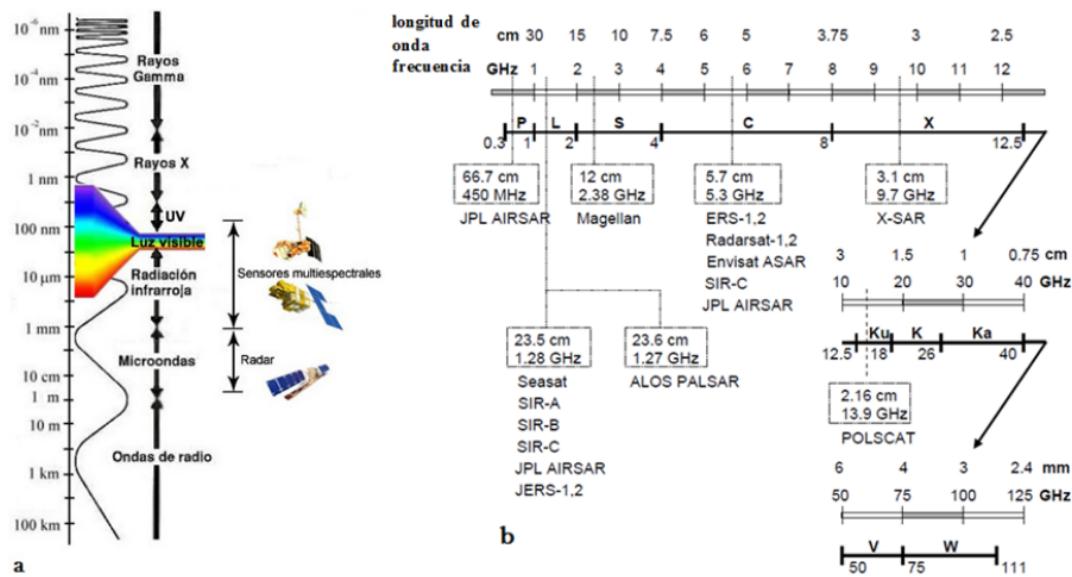


FIGURA 1.1: Rangos del espectro electromagnético usados en Percepción Remota. a) muestra los valores del rango para algunos sensores pasivos (multiespectrales) y para sensores activos (radar). b) muestra los valores de longitudes de onda para sensores de radar (tomado y modificado de Richards et al., (2009)).

1.2.1. Sensores de una sola banda y multibanda

El espectro electromagnético es el conjunto de todos los tipos de radiación electromagnética, organizado por bandas. Cada tipo de radiación tiene una frecuencia (f) y longitud de onda (λ) que la caracteriza. El espectro abarca: los rayos gamma, los rayos x, ultravioleta, visible, el infrarrojo, las microondas y las ondas de radio (Figura 1.1).

Los sensores utilizados en percepción remota están usualmente diseñados para captar señales en determinados rangos de longitudes de onda, denominados bandas o canales. Algunos sensores pasivos pueden registrar información en bandas relativamente estrechas (hiperespectrales) o anchas (multiespectrales). En el caso de los sensores activos, como el radar, la señal registrada será bajo una sola banda, en este caso en la región de las microondas del espectro electromagnético.

A diferencia de los sistemas ópticos, los sistemas radar, emiten su propia energía electromagnética y registran la retrodispersión de esta. Algunas de las ventajas de los sistemas radar son: la independencia del clima y de la iluminación solar. En el caso de un cielo nublado, la superficie terrestre estará oculta por dichas nubes para el sistema óptico; sin embargo, los satélites con un sensor radar pueden seguir ofreciendo imágenes útiles ya que las microondas atraviesan la capa de nubes debido a que la longitud de onda en que opera el instrumento es mucho mayor (Mitasova y Neteler, 2004).

1.3. Imágenes satelitales

Una imagen satelital puede estar conformada por una matriz o arreglo de números reales, en el caso de una imagen óptica, o bien, por una matriz de números complejos, como en el

caso de una imagen de radar; cada elemento de la matriz representará un pixel que contenga el valor de la radiación de la energía reflejada por un área determinada. A éste tipo de formato, se le conoce como ráster.

1.3.1. Tipos de resolución

De acuerdo con Chandra y Ghosh, (2006):

- Resolución espacial: está determinada por el área que representa cada pixel. Depende en gran medida del ángulo de visión del sensor, por lo que para sensores ópticos el pixel será cuadrado, mientras que en el caso de un sensor tipo radar, será rectangular. En el caso del radar, se define como la capacidad que tiene el sensor de identificar dos objetivos cercanos como puntos separados.
- Resolución espectral: se refiere al número y ancho de bandas espectrales que puede registrar un sensor.
- Resolución radiométrica: es la capacidad del sensor para detectar la diferencia más pequeña de radiación de energía. Describe el rango y el número discernible de valores discretos de brillo en una imagen. Frecuentemente, la resolución radiométrica es expresada en términos del número de dígitos binarios o bits, necesarios para representar el rango de los valores de brillo disponibles.
- Resolución temporal: se refiere al periodo en el que el satélite vuelve a visitar la misma escena y toma otra imagen. Suele expresarse en días.

1.4. Sistema RADAR

Radar, acrónimo en inglés de RAdio Detection And Ranging, es un sensor activo y se basa en la propagación de ondas electromagnéticas de microondas, con longitudes de onda en el orden 1 mm a 1 m y frecuencias en el orden de 300 megaHertz (MHz) a 300 gigaHertz (GHz), (Figura 1.1). En términos generales el radar emite un tren de pulsos electromagnéticos, el cual impacta sobre los objetos de la superficie estudiada y es reflejado de vuelta al radar para su registro (Richards et al., 2009).

Las principales bandas en las que operan los radares que forman imágenes de la superficie terrestre son: X ($f=8\text{-}12 \text{ GHz}$, $\lambda = 2.5\text{-}3.75 \text{ cm}$), C ($f = 4\text{-}8 \text{ GHz}$, $\lambda = 3.75\text{-}7.5 \text{ cm}$) y L ($f = 1\text{-}2 \text{ GHz}$, $\lambda = 15\text{-}30 \text{ cm}$).

Las variaciones de la señal retrodispersada atribuibles a λ están directamente relacionadas con la rugosidad de la superficie y con la constante dieléctrica. En general, entre más rugosa sea la superficie, más difusa es la retrodispersión. Por otro lado, la constante dieléctrica volumétrica depende fuertemente del contenido de humedad del terreno. A su vez, el contenido de humedad determina la penetración (Figura 1.2), en función de la longitud de onda, de la señal de radar incidiendo en el terreno (Lira, 2001; Lira, 2010).

Las propiedades dieléctricas del terreno, expresadas en la constante dieléctrica, afectan críticamente la señal retrodispersada ya que inciden directamente en la absorción y propagación de las ondas electromagnéticas. La parte real de la constante dieléctrica es la permitividad del

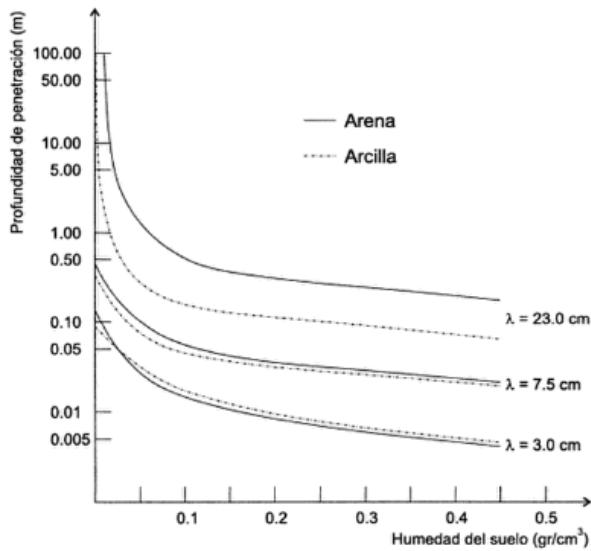


FIGURA 1.2: Gráfico que muestra los valores teóricos de penetración de la señal de radar en el suelo (tomado de Lira, (2001)).

medio y la parte imaginaria se expresa como la conductividad del medio. El valor de la constante dieléctrica depende del contenido de agua de la superficie: la penetración (Figura 1.2) de la señal electromagnética es mayor y la reflexión de la misma es menor para un bajo contenido de humedad. Inversamente, la penetración es menor y la reflexión es mayor cuando la humedad es alta. En cuanto a la conductividad, la penetración es mayor para grandes longitudes de onda (Lira, 2001; Lira, 2010).

Existen radares que son capaces de operar bajo diferentes esquemas de polarización al transmitir y recibir la señal; e.g., HH, HV, VH, VV, esto es, Horizontal-Horizontal, Horizontal-Vertical, Vertical-Horizontal, Vertical-Vertical, respectivamente. Las imágenes con diferentes esquemas de polarización tienen muchas aplicaciones en el área de distinción de texturas, e.g., tipos de cultivos, tipos de rocas, etc (Richards et al., 2009). Este trabajo sólo utilizó la polarización VV.

El radar observa de manera lateral, y no vertical como los sistemas ópticos, esto implica que la imagen resultante tendrá distorsiones geométricas (e.g. sombras e inversión del relieve) importantes para zonas con gradientes topográficos pronunciados.

Los sistemas radar que generan imágenes, pueden ser divididos en dos principales categorías, dependiendo de la técnica de formación de la imagen: Radar de Apertura Real (RAR-Radar Aperture Real) también conocido como Side Looking Airborne Radar (SLAR) y el Radar de Apertura Sintética (SAR-Synthetic Aperture Radar); ambos de observación lateral (side-looking).

1.4.1. Radar de Apertura Real (RAR)

En este sistema la señal es incoherente, ya que la información de la fase emitida y recibida no es retenida, esto quiere decir que sólo es registrada la amplitud. Una restricción es la longitud de

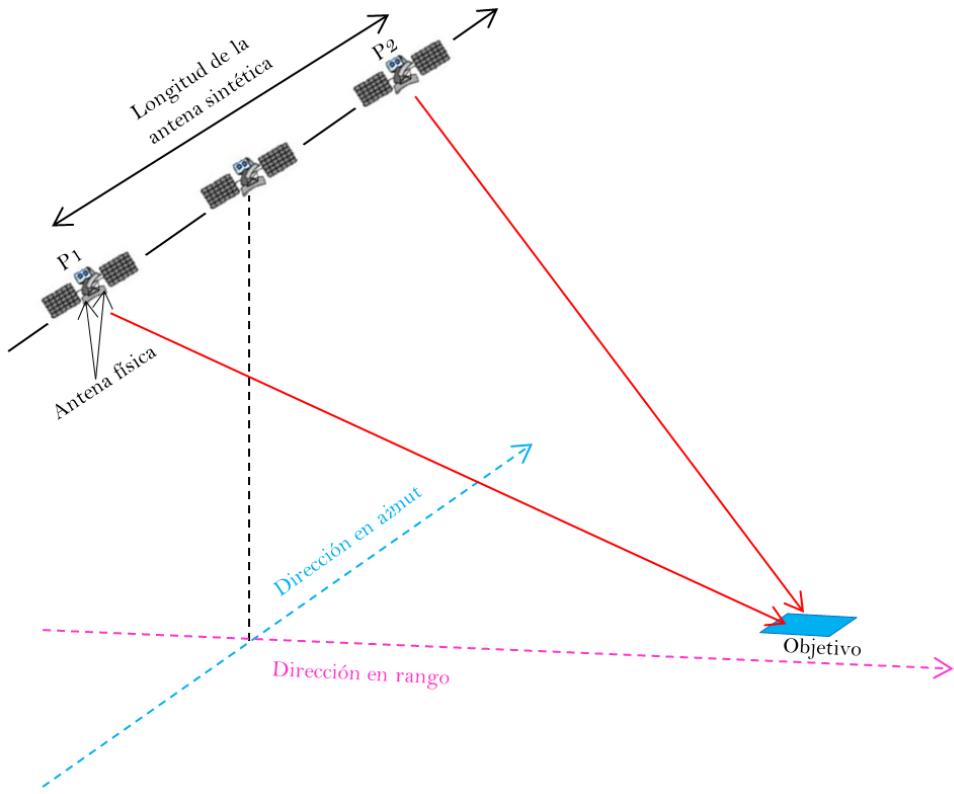


FIGURA 1.3: Esquema que muestra la longitud de una antena sintética de radar, además de indicar la antena real o física. Punto P1, representa el comienzo de la detección del objetivo y P2 es el fin de la observación múltiple del objetivo. La dirección en azimut, representa la dirección del vuelo del satélite, mientras que la dirección en rango es perpendicular al azimut (tomado y modificado de Sarychikhina, (2010)).

la antena, ya que esta afecta de manera directa la resolución en la dirección del vuelo (azimut) (Hanssen, 2001).

1.4.2. Radar de Apertura Sintética (SAR)

Opera mediante una señal coherente, por lo que la fase y la amplitud son registradas por el sensor de radar. El comportamiento de la fase necesita ser estable dentro del periodo de envío y recepción de la señal. Como resultado, una antena de mayor longitud puede ser creada sintéticamente usando el movimiento de la antena y combinando la información de los trenes de pulsos retrodispersados y recibidos dentro de la longitud de la antena sintética. Esto implica que el objeto en la escena, es observado múltiples veces por el sensor, al hacer esto, el sensor SAR registra la historia de la señal, esto es, la historia de rangos (rango, es la dirección perpendicular al azimut), la intensidad (amplitud) de la señal, la fase y el corrimiento Doppler o corrimiento en frecuencias (la frecuencia de los pulsos transmitidos no es la misma que la de los pulsos retrodispersados), (Figura 1.3) (Lira, 2001; Lira, 2010). En la Tabla 1.1, se muestran las principales misiones satelitales que transportan sensores SAR.

Nombre	Propietario	Longitud de onda	Fecha de operación
US Seasat	National Aeronautics and Space Administration (NASA)	Banda L $\lambda = 23.5 \text{ cm}$	Junio-Octubre 1978
ERS-1	European Space Agency (ESA)	Banda C $\lambda = 5.66 \text{ cm}$	1991-2000
JERS-1	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	Banda L $\lambda = 23.5 \text{ cm}$	1992-1998
ERS-2	European Space Agency (ESA)	Banda C $\lambda = 5.66 \text{ cm}$	1995-2011
Radarsat-1	Canadian Space Agency (CSA)	Banda C $\lambda = 5.66 \text{ cm}$	1995-2013
Envisat	European Space Agency (ESA)	Banda C $\lambda = 5.63 \text{ cm}$	2002-2012
ALOS-1	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	Banda L $\lambda = 23.6 \text{ cm}$	2006-2012
Radarsat-2	Canadian Space Agency (CSA)	Banda C $\lambda = 5.55 \text{ cm}$	2007-presente
TerraSAR-X	German Aerospace Center (DLR)	Banda X $\lambda = 3.1 \text{ cm}$	2007-presente
Cosmo-SkyMed	Italian Space Agency (ASI)	Banda X $\lambda = 3.1 \text{ cm}$	2007-presente
TanDEM-X	German Aerospace Center (DLR)	Banda X $\lambda = 3.1 \text{ cm}$	2010-presente
Sentinel-1A	European Space Agency (ESA)	Banda C $\lambda = 5.63 \text{ cm}$	2014-presente
Sentinel-1B	European Space Agency (ESA)	Banda C $\lambda = 5.63 \text{ cm}$	2016-presente

TABLA 1.1: Algunas misiones satelitales con sensor Radar de Apertura Sintética (SAR) (tomado y modificado de Lu y Dzurisin, (2014)).

1.4.3. Geometría de la imagen de radar

La geometría de la adquisición de una imagen de radar, se muestra en la Figura 1.4. A continuación se describe cada componente (Lira, 2001; Lira, 2010; Sarychikhina, 2010):

Altura (H): 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 en rango: Es la dirección en la que es emitida la señal del radar. Siendo también perpendicular a la dirección del azimut.

Rango inclinado o slant range (R): 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 terrestre.

Rango cercano: Es el comienzo del barrido (swath) de la imagen, donde el rango del terreno es cercano al nadir y el rango inclinado es el más corto en la imagen.

Rango lejano: Es el fin del barrido de la imagen. El rango del terreno se encuentra más alejado del nadir y el rango inclinado es mayor en este punto.

Ángulo de vista (θ): Es el ángulo que se forma entre la distancia vertical del nadir y el rango inclinado.

Ángulo de incidencia: Es el ángulo que se forma entre el eje del haz del radar y la normal de la topografía local.

1.4.4. Imagen compleja SAR 2D

Una imagen SAR compleja puede ser vista como un mosaico de elementos pequeños conocidos como pixeles, formando un arreglo bidimensional de columnas y renglones. Cada pixel contiene un número complejo que proporciona información de la amplitud y la fase de la energía de la señal de radar reflejada por la superficie terrestre, dichos valores complejos son expresados como:

$$g(x, y) = u(x, y) + iv(x, y), \quad (1.1)$$

donde $u(x, y)$ y $v(x, y)$ son la parte real e imaginaria del número complejo. El número complejo puede ser expresado en términos de la amplitud, $|g(x, y)|$, y la fase, $\phi(x, y)$, tal que:

$$g(x, y) = |g(x, y)|e^{i\phi(x, y)}, \quad (1.2)$$

donde:

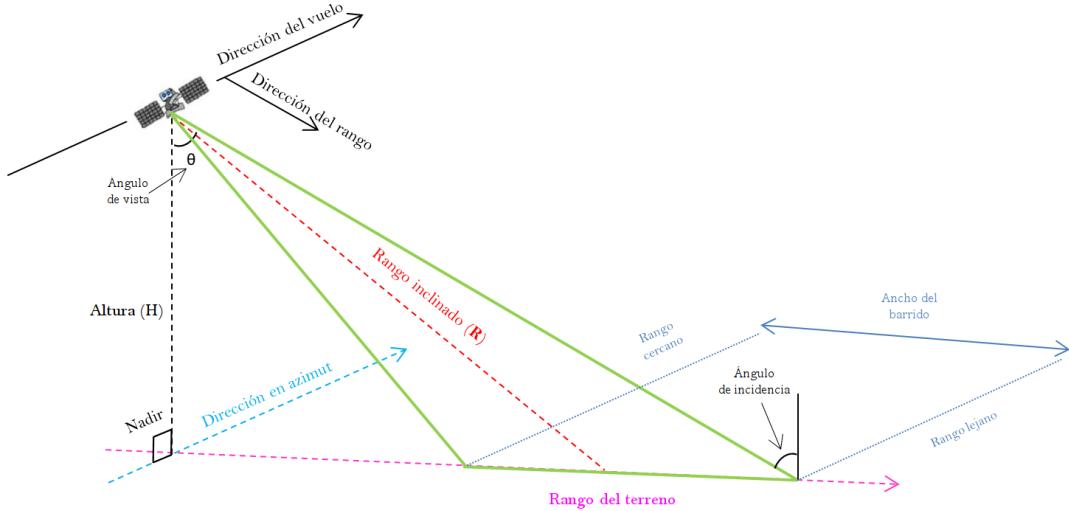


FIGURA 1.4: Geometría de adquisición de un sistema de radar. La dirección en la que el sensor SAR envía los pulsos electromagnéticos es conocida como Línea de Vista del radar (LOS-Line Of Sight) o bien como la dirección en rango inclinado (Slant Range). Sobre ella se mide la distancia R entre el sensor SAR y el objetivo o blanco en la escena. El ángulo θ formado entre la LOS y la vertical es conocido como ángulo de vista (modificado de Sarychikhina, (2010)).

$$|g(x, y)| = \sqrt{u^2(x, y) + v^2(x, y)}, \quad (1.3)$$

y

$$\phi(x, y) = \arctan \frac{v(x, y)}{u(x, y)}, \text{ para } u(x, y) \neq 0. \quad (1.4)$$

La fase de una imagen compleja SAR está compuesta de dos términos: 1) la fase propia, ligada a las propiedades de retrodifusión de los retrodispersores elementales y 2) la fase proporcional a la distancia entre la antena y el suelo. La fase propia es una variable determinista, resultado de las interferencias constructivas o destructivas dentro de la célula de resolución; por lo cual, es difícilmente modelable y variable de un pixel a otro, según la orientación del haz electromagnético. Por lo anterior se considera aleatoria, razón por la cual una sola imagen no es suficiente para extraer la información relacionada con la distancia suelo-satélite. Sin embargo, si se le mide bajo exactamente las mismas condiciones geométricas, es reproducible. Al calcular un interferograma, se multiplica una imagen por el complejo conjugado de la otra y la fase propia de cada célula de resolución se anula, permitiendo conservar solamente el término proporcional a la distancia.

1.4.4.1. Distorsiones geométricas en las imágenes de radar

La representación de la superficie terrestre en una imagen de radar, está influenciada por la topografía local, es decir, las pendientes del terreno, tanto en la dirección del rango y del azimut. En la dirección del azimut, está relacionada con la perspectiva de observación y no sufre deformaciones respecto a esta. Mientras que, en la dirección del rango, se ve afectada

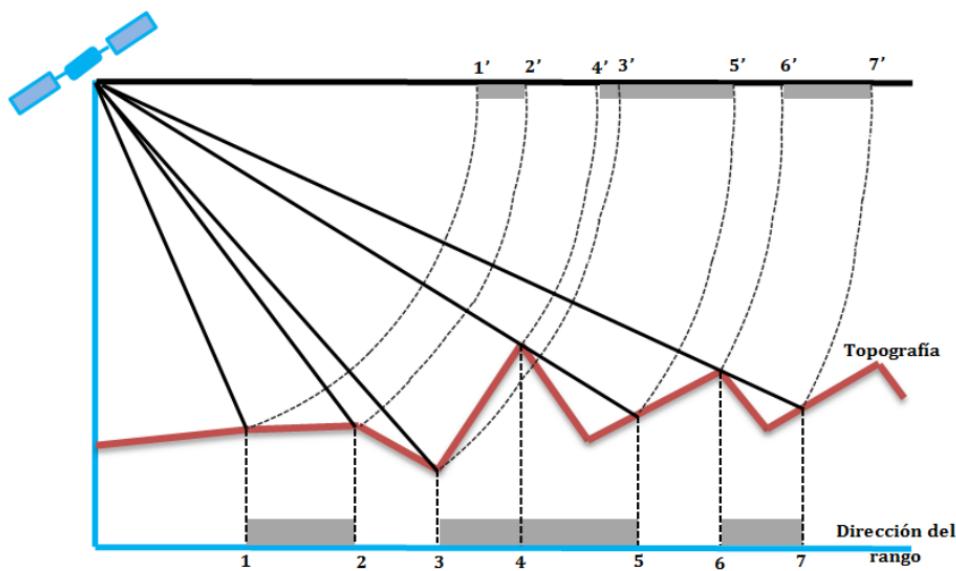


FIGURA 1.5: Esquema en el que se presentan las distorsiones geométricas en una imagen de radar satelital relacionadas con la topografía. El segmento 1'-2' presenta el efecto de acortamiento, el segmento 4'-3' presenta el efecto de inversión del relieve, mientras que en los segmentos 3'-5' y 6'-7' presentan el efecto de sombreado (tomado y modificado de Lillesand, Kiefer y Chipman, 1987).

claramente por distorsiones como: la inversión del relieve (layover), escorzo o acortamiento (foreshortening) y sombreado (shadowing) (Lira, 2001; Lira, 2010; Richards et al., 2009; Maitre, 2010).

Inversión o superposición del relieve (Layover): Consideremos que la escena presenta un cuerpo de gran altura, como una montaña. Al enviar el tren de pulsos electromagnéticos e impactar este cuerpo de gran tamaño y pendiente, la señal de retorno que primero llegará al sensor, será la de la cima de este cuerpo, mientras que la señal de retorno para la base, regresará después. Lo anterior, ocasiona una inversión en el relieve o traslape entre la cima y base (Figura 1.5).

Escorzo o acortamiento (Foreshortening): En el caso de una escena, que tiene una topografía con pendiente positiva, cuando el radar envíe sus pulsos electromagnéticos frente a esta pendiente, la distorsión consistirá en que la pendiente se verá acortada en el pixel. Una superficie plana no sufrirá dicho acortamiento (Figura 1.5).

Sombreado (Shadowing): Cuando el radar envía sus pulsos electromagnéticos sobre un objetivo, ilumina el frente de dicho objetivo, si del lado opuesto del objetivo existe una pendiente negativa, el haz del radar no será capaz de iluminarla por lo que no habrá información que retorne al sensor, lo cual se representará en la imagen como una sombra (Figura 1.5).

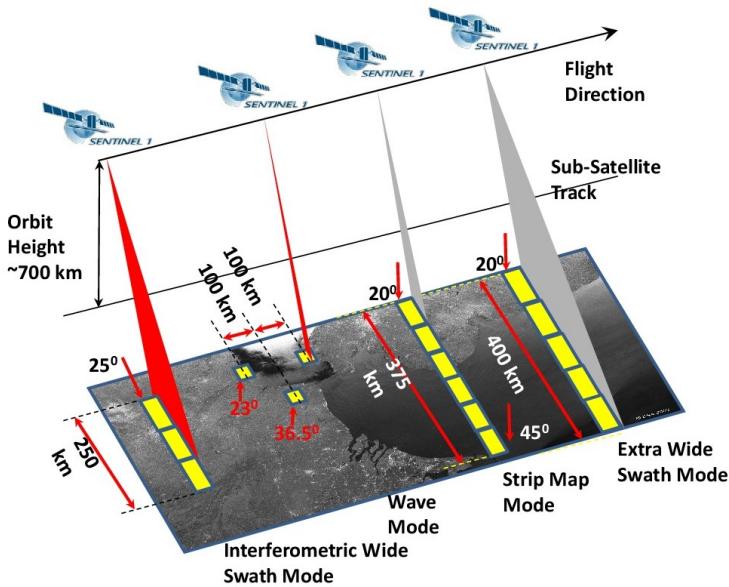


FIGURA 1.6: Imagen en la que se muestran los diferentes modos de adquisición de las imágenes SAR de la misión Sentinel-1A (tomado de https://sentinel.esa.int/documents/247904/685163/Sentinel-1_User_Handbook).

1.4.5. Acerca de las imágenes Sentinel-1A

La misión Sentinel-1A comprende una constelación de dos satélites (1A y 1B), operando día y noche con un sensor de Radar de Apertura Sintética (SAR) en la banda C, que pertenece al programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA). El satélite Sentinel-1A fue lanzado en Abril del 2014. Cuenta con cuatro modos de operación: Wave Mode (WM), Strip-Map Mode (SM), Extra-Wide Mode (EW) y el Interferometric Wide-Swath (IW) (Figura 1.6) (Yague-Martinez, Prats-Iraola y De Zan, 2016). Las imágenes utilizadas en este trabajo fueron adquiridas en modo Wide-Swath, por lo que a continuación se describe:

Interferometric Wide-Swath (IW): Este modo permite combinar una gran longitud de 250 km en dirección del rango con una resolución moderada de 5×20 m, en rango y azimut respectivamente, con ángulos de incidencia entre 31° y 46° . Este modo se caracteriza por comprender tres subswath (IW1, IW2, IW3) adquiridos mediante la técnica TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR), la cual, además de dirigir el haz de microondas en dirección del rango, también lo hace en la dirección del azimut desde adelante hacia atrás, en forma electrónica con cada ráfaga, obteniendo así una mejor calidad de imagen.

1.5. La técnica Interferometría SAR Diferencial (DInSAR)

1.5.1. Principio y geometría de adquisición DInSAR

La técnica de Interferometría SAR (InSAR) consiste, en detectar los cambios entre dos adquisiciones de imágenes SAR a partir de calcular la diferencia de sus valores de fase. Estas imágenes

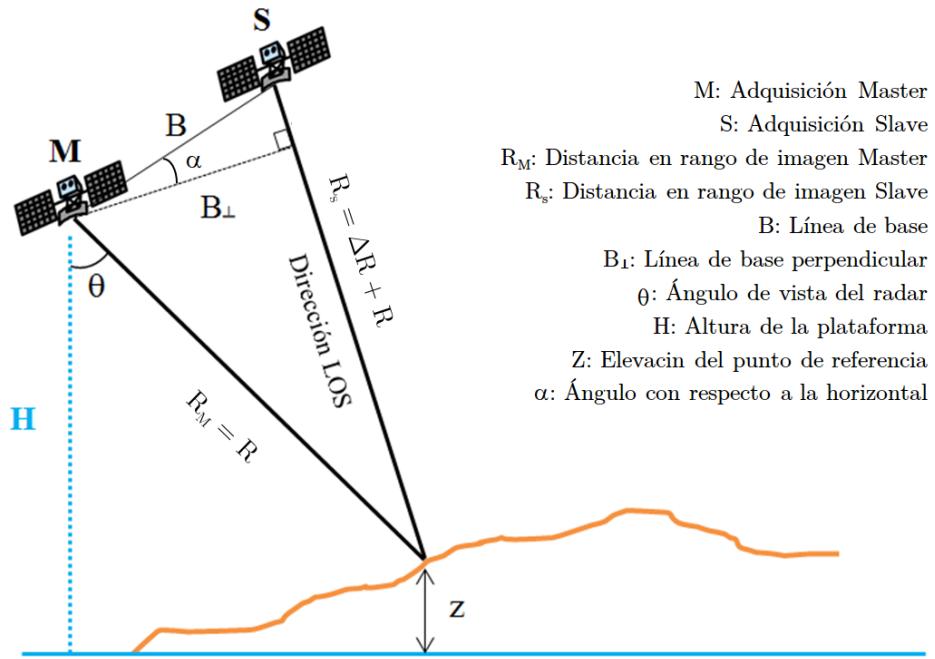


FIGURA 1.7: Esquema que muestra la geometría de la técnica InSAR (tomado y modificado de Hanssen, (2001)).

son tomadas en diferentes tiempos pero sobre la misma escena y con la misma geometría. La primera adquisición será referida como imagen master y será la de referencia, mientras que la segunda adquisición será nombrada como slave. El periodo entre la adquisición de la primera y la segunda imagen, es conocido como línea de base temporal (B_t) y por lo general se expresa en días. La separación en la posición del satélite, entre la primera y la segunda adquisición o distancia entre órbitas, es conocida como línea de base (B) y su proyección en la perpendicular a la dirección de vista del radar (LOS-Line Of Sight), es conocida como línea de base perpendicular (B_\perp). Las distancias del sensor al objetivo de la escena, para cada adquisición se conocen como rango y van en dirección de la LOS, R_M y R_S . En la Figura 1.7, se muestra la geometría general de la técnica InSAR. La diferencia de fase es conocida como fase interferométrica y su representación gráfica es conocida como interferograma.

1.5.2. Las imágenes raw y SLC

Los datos en crudo (raw), generados por un sistema SAR, contienen información de la señal reflejada por la superficie o blanco y capturada o registrada por el radar. Estos datos son procesados en términos del rango (compresión de los pulsos) y el azimut (síntesis SAR), eso significa que se reconstruye (usando el efecto Doppler de la señal) la respuesta de cada objeto sobre la escena, a partir de cada una de las señales retrodispersadas. El proceso anterior, es denominado “enfocamiento”, el resultado es un arreglo bidimensional de números complejos nuevamente, el cual es llamado imagen Single-Look Complex (SLC) (Figura 1.8) (Hanssen, 2001; Maitre, 2010).

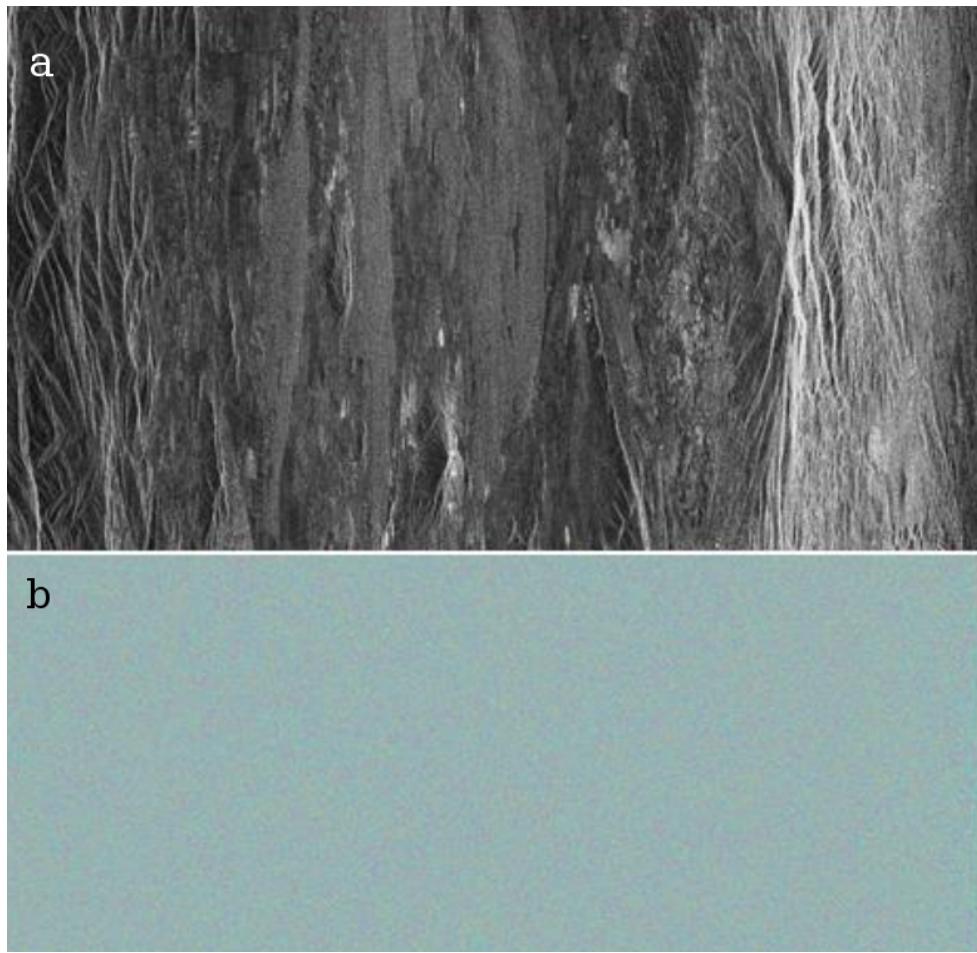


FIGURA 1.8: Imagen compleja SAR SLC, porción de la escena que cubre una parte de la caldera de Los Humeros en Puebla, México. Se observa que la imagen está alargada debido a que sus pixeles son rectangulares. a) muestra la imagen de amplitud, donde se pueden apreciar los flujos de lavas. b) muestra la imagen de fase, y sus valores aleatorios.

1.5.3. Cálculo del interferograma

Las imágenes SLC pueden descomponerse en amplitud y fase, por lo que la imagen master puede representarse como:

$$g_M(x, y) = |g_M(x, y)|e^{i\phi_M(x, y)}, \quad (1.5)$$

Mientras que la imagen slave puede representarse como:

$$g_S(x, y) = |g_S(x, y)|e^{i\phi_S(x, y)} \quad (1.6)$$

Los módulos $|g_M(x, y)|$ y $|g_S(x, y)|$ están asociados a la reflectividad del terreno.

Para obtener la diferencia entre los valores de fase de las imágenes master y slave, también conocida como fase interferométrica, se multiplica la imagen master por el complejo conjugado de la imagen slave. Por lo que el interferograma puede expresarse como:

$$g_M(x, y)\bar{g}_S(x, y) = |g_M(x, y)||g_S(x, y)|e^{i(\phi_M - \phi_S)}, \quad (1.7)$$

donde: $\phi_M - \phi_S$ es la fase interferométrica, la cual es una fase relativa debido a que se trata del módulo 2π de la fase absoluta (desconocida).

Para realizar la multiplicación de las imágenes es importante, que en la etapa de procesamiento primero se realice el co-registro, el cual consiste en hacer coincidir la geometría de la imagen slave con la de la imagen master. Para realizar dicho co-registro, se necesitan conocer los valores de desplazamientos en rango y azimut entre las dos imágenes, para lo cual se utiliza la operación de correlación cruzada.

1.5.4. Contenido de la fase del interferograma

La imagen de la fase interferométrica es una imagen de franjas o curvas cíclicas de isovalores de fase debido a la naturaleza cíclica de la misma. La fase interferométrica o interferograma, está compuesta por varios elementos y se puede expresar como, Ec. (1.8) (Hanssen, 2001).

$$\varphi_{int} = \phi_M - \phi_S = \varphi_{orb} + \varphi_{top} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \quad (1.8)$$

o bien:

$$\varphi_{int} = \frac{4\pi}{\lambda}B_{\parallel} + \frac{4\pi}{\lambda}\frac{B_{\perp}h}{R\sin\theta} + \frac{4\pi}{\lambda}D_{LOS} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \quad (1.9)$$

Donde:

φ_{orb} : Es la contribución de la fase orbital.

φ_{top} : Es la contribución de la fase topográfica.

φ_{def} : Es la contribución de la fase relacionada con la deformación.

φ_{atm} : Es la contribución de la fase atmosférica.

φ_{noise} : Es la contribución del ruido.

B_{\perp} : $B \cos(\theta - \alpha)$. Es la línea de base perpendicular de separación de las órbitas.

B_{||}: $B \sin(\theta - \alpha)$. Es la línea de base paralela entre órbitas.

λ: Es la longitud de onda del sensor SAR.

h: Es la elevación topográfica.

R: Es la diferencia de las distancias en rango inclinado.

θ: Es el ángulo de visión del sensor SAR.

D_{LOS}: Es la deformación medida en la dirección de la línea de vista del radar (LOS).

1.5.4.1. Contribución de la fase orbital y errores

Esta contribución está relacionada con la separación entre las antenas del sensor durante las adquisiciones de la imagen master y slave. Debido a que las trayectorias orbitales de cada imagen no coincidirán, se genera una diferencia. Para eliminar esta contribución en el interferograma, se realiza el proceso de aplanado del interferograma (Hanssen, 2001).

En ocasiones, a pesar de estimar esta contribución y removerla del interferograma, aún queda una parte residual, este tipo de error puede ser reducido mediante un plano que simula una rampa orbital (Cavalié et al., 2007; López-Quiroz et al., 2009).

1.5.4.2. Contribución de la fase topográfica y errores

La contribución de la fase topográfica resulta del efecto estereoscópico, debido a la geometría de adquisición diferente entre ambos pasos del satélite, lo cual se refleja como franjas en el interferograma correlacionadas con la topografía.

Para eliminar o reducir esta contribución, se utiliza un DEM, que se sustraerá a la fase interferométrica. Dicho DEM puede provenir de datos externos o bien, de otro par interferométrico donde se considere que la deformación es cero (Hanssen, 2001). La corrección de la fase topográfica dependerá de la precisión del DEM sustraído.

1.5.4.3. Contribución de la fase atmosférica y errores

Durante la adquisición de una imagen SAR, la señal electromagnética debe atravesar la atmósfera. Dicha señal es capaz de penetrar la nubes; sin embargo, las propiedades de la atmósfera (presión, temperatura y contenido de vapor de agua), pueden producir un retraso en ella y por lo tanto contribuir a la fase interferométrica.

Esta contribución es una de las principales limitaciones en la Interferometría de Radar Satelital, cuando se busca medir desplazamientos del terreno. En general, los retrasos de la señal debido a la atmósfera, pueden afectar cada pixel de la escena del radar y enmascarar por completo la señal de deformación, aunque potencialmente pueden ser modelados y corregidos (Doin et al., 2009).

Si hablamos con más detalle, los retrasos de propagación de la señal, pueden ser causados por efectos dispersivos en la ionósfera y por los gradientes de refractividad del aire en la tropósfera neutral. Una de las principales bandas de radar que se ven afectadas por efectos troposféricos, es la banda C. El retraso debido a la contribución troposférica total, es frecuentemente debida a dos componentes: verticalmente estratificada y turbulenta (Hanssen, 2001; Doin et al., 2009).

Atmósfera verticalmente estratificada: En este caso, la atmósfera sólo tiene variaciones verticales y se mantiene homogénea en la dirección horizontal. Una de las formas de disminuir esta contribución consiste en utilizar los propios datos del interferograma, mediante el análisis de la relación entre fase y elevación de la escena. Si dicha relación puede ser modelada, es posible sustraerla del interferograma (Remy et al., 2003; Taylor y Peltzer, 2006; Cavalie et al., 2007; Elliott et al., 2008). Otra forma de sustraer esta componente atmosférica es mediante el uso de datos externos, como los de estaciones meteorológicas, donde se estima la presión, temperatura y humedad para generar un modelo y se extrae en las elevaciones más grandes (Delacourt, Briole y Achache, 1998); a partir del uso de datos MODIS (MOderate Resolution Imaging Spectrometer, Li et al., (2005)), MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer montado en ENVISAT, Li et al., (2006)) o el uso de una gran red de datos GPS (Webley et al., 2002). La principal limitante de usar datos externos es la distribución espacial en el caso del GPS, y el hecho de que las fechas de adquisición SAR no siempre coinciden con las de los datos de MODIS-MERIS; además de que necesitan ser calibrados (Doin et al., 2009).

Atmósfera turbulenta o aleatoria: El resultado de procesos turbulentos en la atmósfera, las cuales producen heterogeneidades tridimensionales sobre la refractividad en el momento de adquirir las imágenes SAR, por lo que en el interferograma aparecerán patrones espaciales totalmente aleatorios, dificultando la interpretación de los datos y ocasionando que su modelado sea imposible.

1.5.4.4. Contribución del ruido o decorrelación

La decorrelación o ruido se liga a varias fuentes: la decorrelación térmica, la decorrelación geométrica y la temporal (Pepe y Calò, 2017).

Decorrelación térmica: depende de las características del sistema de adquisición.

Decorrelación geométrica o espacial: Este tipo de decorrelación está estrechamente relacionado con la diferencia en la geometría de adquisición de las dos escenas. Esta diferencia es proporcional a la magnitud de la línea de base perpendicular. Entre mayor sea este valor, más diferentes serán las condiciones de adquisición de dichas imágenes, ocasionando una pérdida de la coherencia de la señal. Este tipo de decorrelación puede limitarse reduciendo, en lo posible, la magnitud de la línea de base perpendicular.

Decorrelación temporal: Una escena está caracterizada por sus propiedades texturales (e.g. superficies rugosas y lisas), la distribución de los elementos dispersores de la señal (e.g. en zonas urbanas: obras e infraestructura, en zonas no urbanas: las cuerpos montañosos y las rocas expuestas) y el contenido de vegetación en ella. Al realizar un interferograma, la imagen de referencia puede tener ciertas características de distribución de elementos y propiedades de la superficie, pero puede haber ocurrido un cambio de estas características en la escena secundaria en un cierto periodo de tiempo. Un caso típico, ocurre en zonas con mucha vegetación, debido a los cambios estacionales. Por ejemplo para una misma escena, en temporada de primavera, la vegetación puede ser muy frondosa; y dicho follaje puede desaparecer en la temporada invernal. Lo anterior provoca decorrelación entre las dos adquisiciones. Este tipo de decorrelación puede limitarse reduciendo, mientras sea posible, la línea de base temporal.

1.5.4.5. Contribución de la fase relacionada con la deformación y errores

La fase relacionada con la deformación será igual a la fase interferométrica, una vez que el resto de las contribuciones (i.e. fase orbital, fase topográfica, fase atmosférica y ruido) sean eliminadas o reducidas. Puede representarse como:

$$\varphi_{def} = \frac{4\pi D_{los}}{\lambda} \quad (1.10)$$

1.5.5. Principales etapas del procesamiento DInSAR

Co-registro: Previo a la multiplicación de las imágenes SAR. A través de este proceso ambas imágenes se ponen en un misma geometría.

Interferograma en bruto: Una vez realizado el coregistro de las imágenes, se procede a la multiplicación punto a punto de la imagen master por el complejo conjugado de la imagen slave.

Multi-look: Este proceso sirve para reducir el ruido y aumentar la calidad de la señal, mediante un promedio de ventanas en las direcciones de azimut y rango, aunque ello reduce la resolución espacial original de la imagen.

Imagen de coherencia: Con este mapa es posible medir la calidad del interferograma resultante, teniendo un rango de 0 a 1, donde cero significa que no existe correlación, mientras que 1 significa que ambas imágenes están altamente correlacionadas.

Reducción de la fase orbital: Usando vectores de posición de las órbitas.

Reducción de la fase topográfica: Usando un DEM.

Filtrado del interferograma: Se utiliza un filtro sensitivo al cambio espacial de las franjas, con el objeto de incrementar la relación señal/ruido, como uno de tipo adaptativo Goldstein (Goldstein y Werner, 1998).

Desenvolvimiento de la fase: Se trata de eliminar la ambigüedad del módulo 2π del interferograma. De manera general, el proceso consiste en agregar múltiplos enteros de 2π para estimar el valor absoluto de la fase del pixel.

Reducción de la señal atmosférica: Una primera aproximación es, cuando se tiene conocimiento a priori, que la fase está correlacionada con la elevación, se procede a realizar el análisis de esta relación mediante una regresión, y se reduce la señal de atmósfera verticalmente estratificada.

Obtención de desplazamientos en LOS: Una vez que se está desenvuelta la fase, esta puede ser convertida a valores centimétricos, mediante la ecuación 1.10.

Geocodificado: En esta etapa final, mediante un DEM, es posible georeferenciar los datos convertidos en la dirección LOS, ya sea en coordenadas métricas o geográficas.

1.5.6. Desenvolvimiento de la fase y sus errores

Existen diversos algoritmos para desenvolver la fase, i.e., para conocer el múltiplo adecuado de 2π y obtener la fase absoluta. El procedimiento más simple para desenvolver la fase, consiste en realizar una suma de las diferencias de fase (intregración de los gradientes de fase) alrededor de un camino en bucle, comenzando por un punto de referencia. Se supone que la fase es lisa con variaciones lentas, por lo que las diferencias de fase entre dos pixeles vecinos deberían estar comprendidas entre $\pm\pi$ radianes. La hipótesis anterior es casi siempre válida, sin embargo, existen discontinuidades provocadas por decorrelación o gradientes de deformación elevados, lo cual causa inconsistencias y produce resultados distintos dependiendo del camino de integración seguido. Para resolver este problema, se han desarrollado diferentes métodos. El software empleado para construir los interferogramas en este trabajo (Gamma) utiliza los métodos de costo mínimo (Costantini, 1998) y branch-cut (Goldstein, Zebker y Werner, 1988).

1.5.7. Principales limitaciones de la técnica DInSAR

Como se mencionó anteriormente, la fase interferométrica puede verse afectada por la contribución orbital, atmosférica y de ruido de decorrelación; algunas de las cuales pueden eliminarse o reducirse considerablemente. Adicionalmente, existen limitantes para medir la señal correspondiente al desplazamiento de la superficie mediante DInSAR. Las principales variables que determinan la detección de dicha señal son: el tamaño de pixel, el ancho de la huella del radar, el gradiente de deformación y la relación entre su magnitud y la incertidumbre.

En cuanto al tamaño de pixel y el ancho de la huella del radar, es importante señalar que la deformación generalmente se visualiza a lo largo de varios pixeles, por lo cual el ancho de la huella del radar debe ser suficiente para mapear la extensión espacial del fenómeno estudiado. Por otro lado, la deformación que ocurra a la escala de un sólo pixel no será visible mediante DInSAR.

Con respecto al gradiente, los fenómenos con magnitud de deformación elevada producen gradientes de deformación que pueden alcanzar más de una franja por pixel, produciendo aliasing en la señal y entorpeciendo la detección del patrón correspondiente en el interferograma.

Finalmente, es importante recordar que la señal relacionada con la deformación, extraída del interferograma, será significativa, siempre y cuando su magnitud sea mayor a la de la incertidumbre producida por los residuales debidos al resto de las contribuciones interferométricas.

Capítulo 2

La zona de estudio

La estructura volcánica de la caldera de Los Humeros se localiza en la parte oriental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), al noreste del estado de Puebla. Su escarpe oriental limita con el estado de Veracruz (Figura 2.1). Al sureste de la caldera, la estructura más cercana es el cuerpo volcánico del Cofre de Perote, mientras que al sur se encuentra el Cerro Pizarro (Figura 2.2).

2.1. Geología de la caldera de Los Humeros

La caldera de Los Humeros forma parte de la Cuenca Oriental Serdán. Al Este, esta cuenca está delimitada por la cadena volcánica Cofre de Perote-Citlaltépetl; y al Oeste, por la cordillera Tlaxco-Cerro Grande. La caldera está conformada por un basamento antiguo de rocas metamórficas e intrusivas del Paleozoico-Cretácico, que a su vez están cubiertas por una sucesión de lutitas, calizas y areniscas del Jurásico-Cretácico. En las cercanías de la caldera, el basamento que corresponde al Jurásico-Cretácico está mejor expuesto, como remanente del plegamiento de calizas y lutitas (Carrasco-Núñez, Gomez-Tuena y Lozano, 1997; Carrasco-Núñez et al., 2017). De acuerdo con lo reportado previamente (Viniegra Osorio, 1965; Yanez-García y García-Durán, 1982; Ferriz y Mahood, 1984; Garduño Monroy, Romero Ríos y Torres Hernández, 1985; Campos-Enriquez y Garduño-Monroy, 1987), dicho basamento fue extensamente afectado por la orogenia Laramide, que tuvo lugar a finales del Cretácico y durante el terciario inferior, con esfuerzos compresivos en dirección NE-SW, fallando y plegando la sucesión sedimentaria que conforma la Sierra Madre Oriental (SMO). Al término del evento orogénico se produjo una intrusión de una granodiorita y sienita del terciario, la cual afectó de manera local la secuencia sedimentaria. Las rocas volcánicas más jóvenes, previas a la formación de la caldera, están representadas por lavas andesíticas y ferrobásalticas con edades de 3.5 Ma y 1.55 Ma (Plioceno tardío y Pleistoceno temprano), respectivamente (Dávila-Harris y Carrasco-Núñez, 2014). El Cofre de Perote, es un volcán tipo escudo de composición andesítica, formado por varios domos, durante un periodo de 0.5 a 0.2 Ma (Pleistoceno medio) (Figura 2.3) (Carrasco-Núñez et al., 2010; Carrasco-Núñez et al., 2017).

La evolución geológica de la caldera de Los Humeros ha sido dividida en cuatro etapas, identificadas por productos de grandes erupciones explosivas, ampliamente distribuidas (Ferriz y Mahood, 1984), los cuales se describen a continuación.

- En la primera etapa, ocurrió una erupción de lavas riolíticas precaldera ricas en sílice, la cual fue interrumpida por una erupción explosiva que formó la caldera de Los Humeros

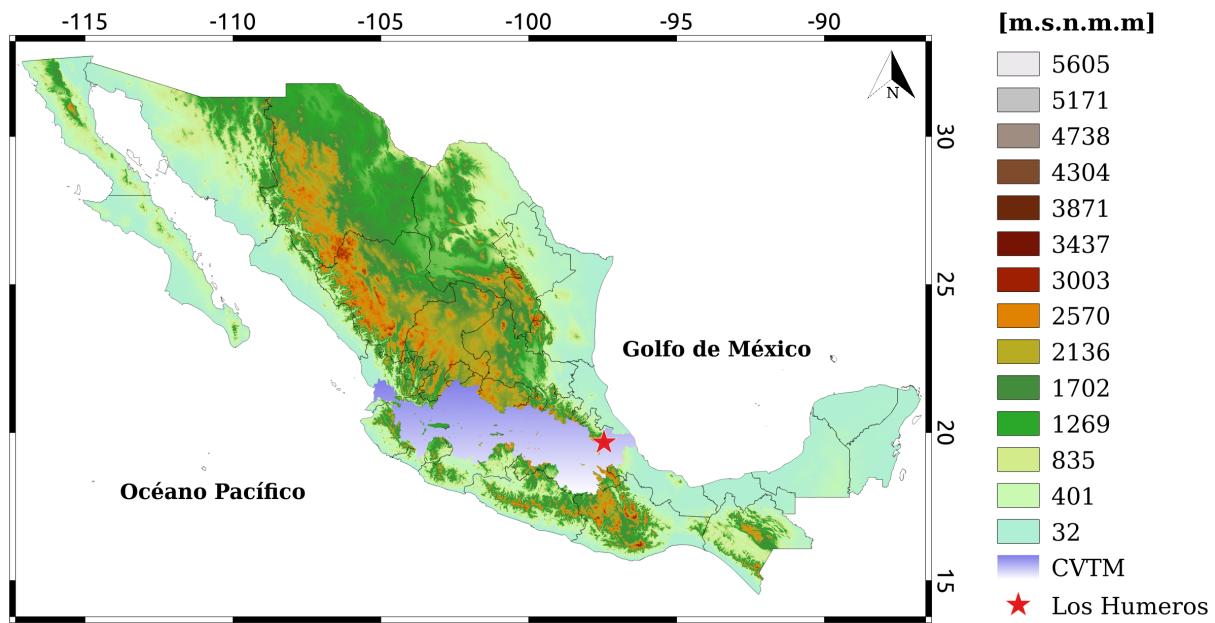


FIGURA 2.1: Modelo digital de elevaciones de la República Mexicana, información ráster procesada a partir de datos del Contínuo de Elevaciones de INEGI, 90 m de resolución espacial (descargado de <http://www.beta.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/index.jsp>). La ubicación de la caldera de Los Humeros (estrella en rojo), se muestra en el mapa, además se indica la zona del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM) (modificado de Dávila-Harris y Carrasco-Núñez, 2014).

con gran extensión (aproximadamente 21 km por 15 km), geometría irregular y un volumen de 115 km³, hace 460 a 450 ka (Ferriz y Mahood, 1984). Este evento fue asociado con el emplazamiento de la ignimbrita Xáltipan de riolita alta en sílice y de gran volumen, ampliamente distribuida de manera radial desde la caldera (Figura 2.4).

- La segunda etapa ocurrió aproximadamente hace 360 a 140 ka. Incluye el emplazamiento de domos de riolitas ricas en sílice a lo largo del anillo de la caldera y en su parte interna, seguido por una serie de erupciones plinianas y subplinianas explosivas que produjeron cerca de 10 km³ de volumen de caída de pómex riodacítica-andesítica conocida como Toba Faby (Ferriz y Mahood, 1984). Dicha toba fue dispersada principalmente al oriente y sureste durante el periodo comprendido entre 240 y 140 ka (Ferriz y Mahood, 1984; Willcox, 2011).
- Durante la tercera etapa, la cual comenzó hace 140 ka, una segunda erupción, formadora de caldera, produjo la caldera de Los Potreros, con geometría casi circular y diámetro aproximado de 9 km, anidada dentro de la caldera de Los Humeros. Dicha erupción produjo cerca de 15 km³ de volumen de una doble zonificación composicional (de riolítica a andesítica y a pómex) de la ignimbrita Zaragoza (Figura 2.4), (Ferriz y Mahood, 1984).
- Finalmente, durante la cuarta etapa, ocurrió la erupción de lavas riodacíticas y andesíticas hace 60 ka, seguido por unas erupciones menores, incluyendo un depósito de caída de pómex dacítica de 0.6 km³ (Toba Xoxoctic, aproximadamente hace 50 ka), además de diversos flujos piroclásticos y depósitos de brecha agrupados como la Toba Llano (Ferriz

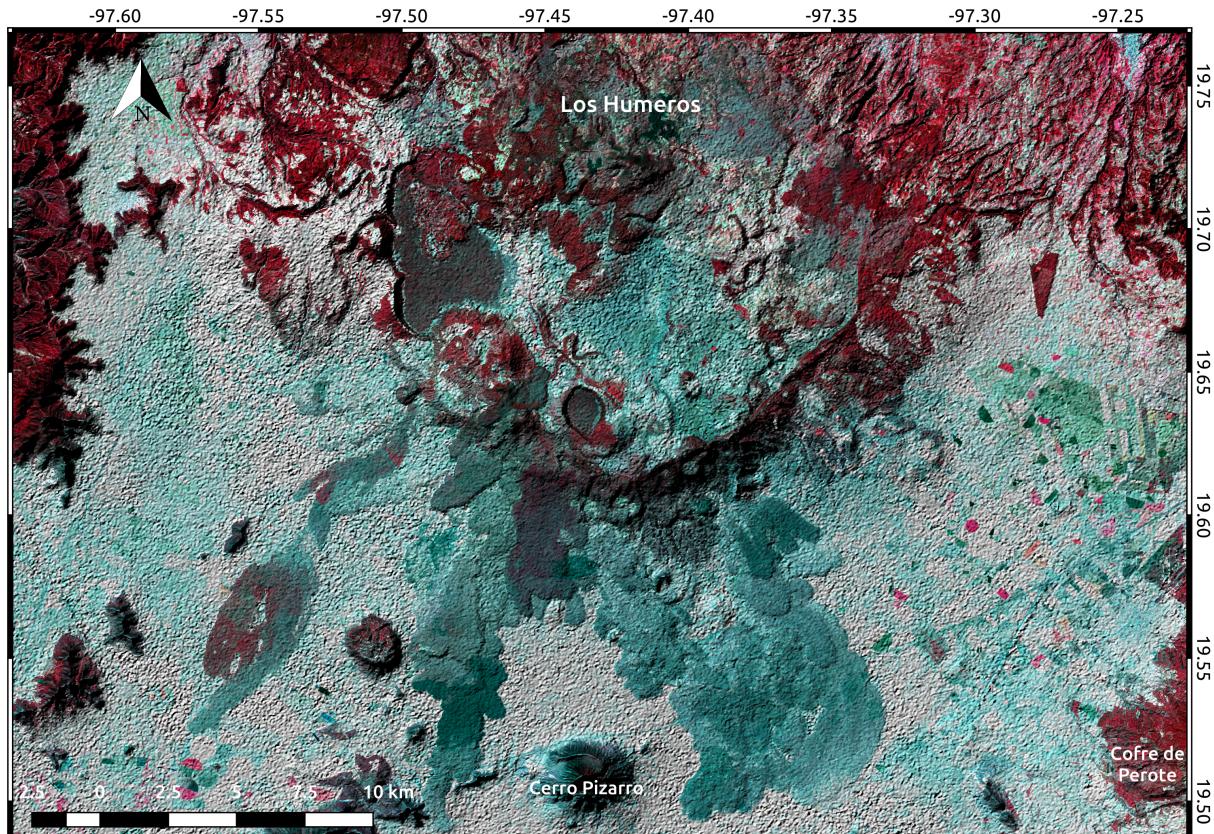


FIGURA 2.2: Imagen óptica satelital de la misión Sentinel-2A (composición falso color de las bandas: infrarrojo cercano B-08, rojo B-04, verde B-03, con 10 m de resolución espacial), sobre un modelo digital de elevaciones sombreado (proveniente del sensor ALOS-PALSAR-1, con 12.5 m de resolución espacial). La caldera es identificada morfológicamente como una estructura semianillada, además que los flujos de la caldera son identificables en tonos azul claro saturado (cian), mientras que las zonas con vegetación sana presentan tonos rojos.

y Mahood, 1984; Willcox, 2011), la cual tiene una edad mínima de 28 ka (Rojas, 20016). El volcanismo reciente comprende lavas andesíticas y basálticas con alguna actividad explosiva datadas con una fecha de 40 a 20 ka (Ferriz y Mahood, 1984). La actividad más joven produjo una alteración rítmica de caída de capas con composición traquiandesítica y basáltica (Toba Cuicuiltic), que fue asociada con la formación del cráter del Xalapazco, el cual tiene un diámetro de 1.7 km y está ubicado en la parte sur de la caldera (Figura 2.4) (Ferriz y Mahood, 1984). Estudios recientes demostraron que esto ocurrió desde la actividad simultánea de muchas bocas eruptivas que están localizadas en el centro, oriente y sureste de la caldera de Los Humeros, alrededor de 6.8 ka (Dávila-Harris y Carrasco-Núñez, 2014). La actividad final está asociada con flujos de lavas andesíticas basálticas con cerca de 0.25 km^3 , que fueron extruidos desde la parte sur del anillo de Los Humeros (Carrasco-Núñez et al., 2017).

2.2. El campo geotérmico de Los Humeros

El campo geotérmico de Los Humeros se localiza dentro de una estructura volcánica caldérica compleja, llamada Los Humeros. Dentro de las estructuras geológicas de Los Humeros se encuentran: la caldera de Los Potreros, en donde se ubica la zona productora del campo, y los sistemas de fallas con dirección principal N-S (Los Humeros y Loma Blanca), NO-SE (Maxtalloya) y E-O (Las Papas, Las Cruces y Las Víboras). Los dos primeros sistemas de fallas son los más importantes, ya que son los que permiten el movimiento de fluidos geotérmicos (Figura 2.5) (Arellano et al., 2000; Armenta y Montes, 2010; Urban y Lermo, 2013; Norini et al., 2015).

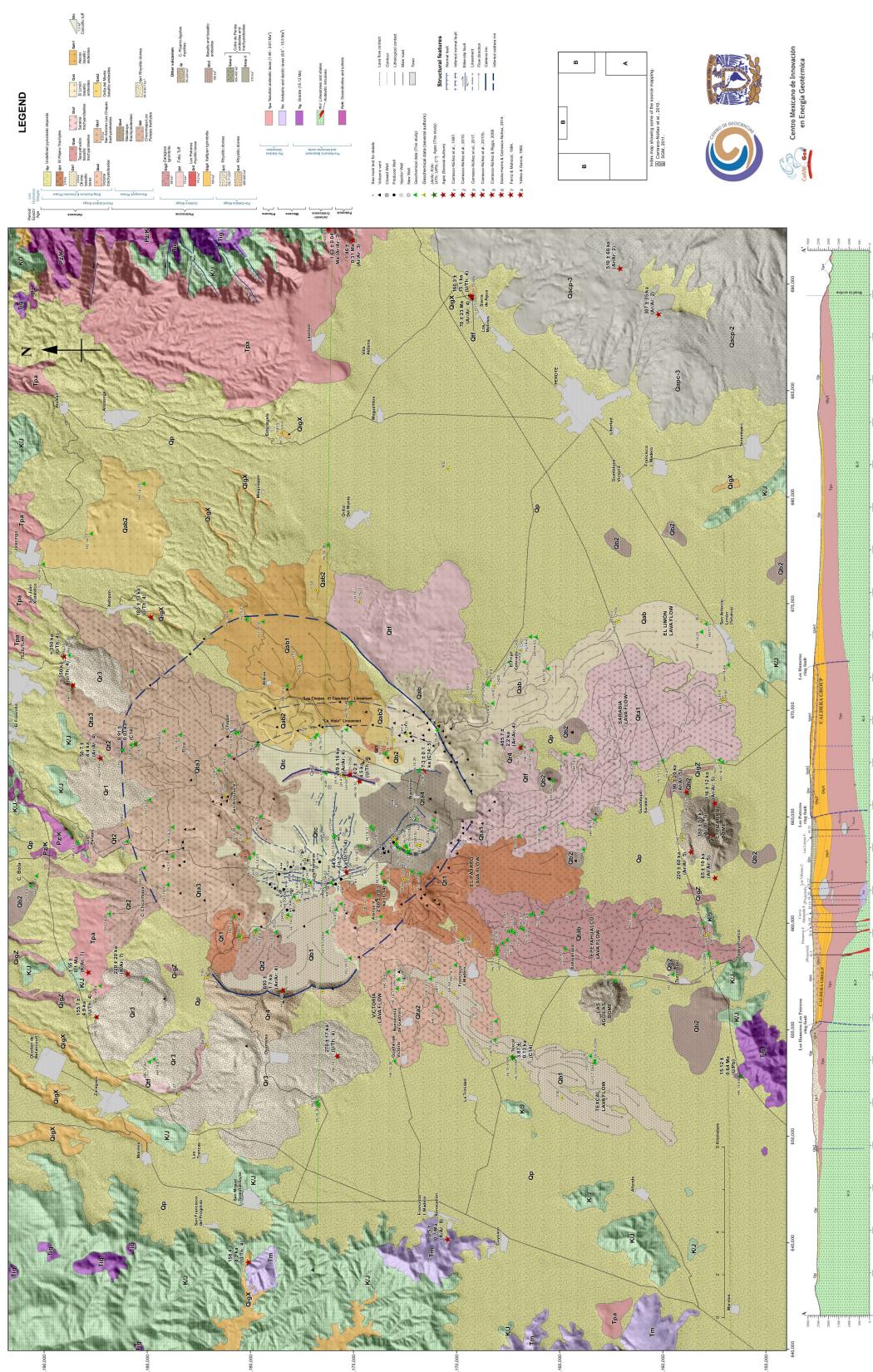


FIGURA 2.3: Mapa geológico actualizado de la zona de la caldera de Los Humeros basado en un análisis cuidadoso de trabajos previos y de verificación en campo (Carrasco-Nuñez et al., 2017). Se muestra de manera general la distribución de las unidades litoestratigráficas principales, los flujos de lava, domos y el basamento expuesto, además de la estructura volcánica del Cofre de Perote. El mapa se muestra en la proyección UTM zona 14 (tomado de Carrasco-Nuñez et al., (2017)).

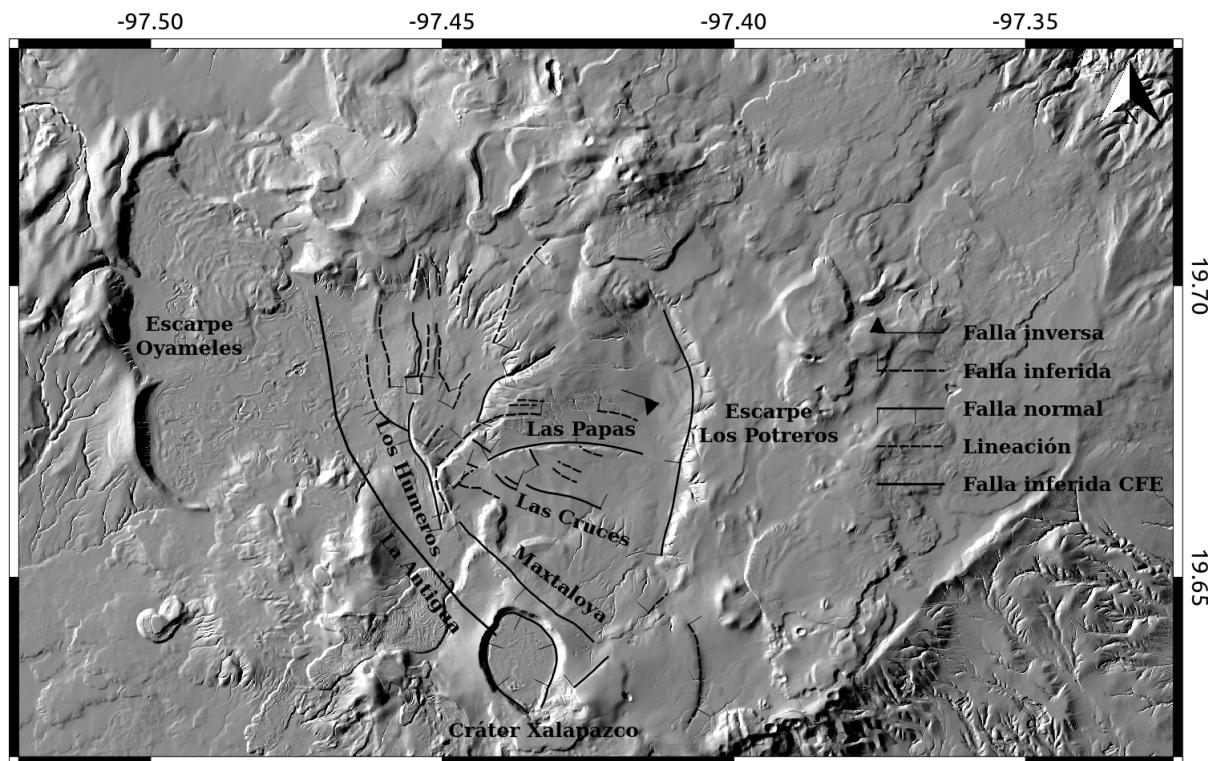


FIGURA 2.4: Mapa de la distribución de las estructuras principales de la caldera de Los Humeros. El mapa base es un Modelo Digital de Elevaciones sombreado de 1 m de resolución espacial, construido mediante estereoscopía de imágenes World-View 3. Se indican los sistemas de fallas NO-SE y N-S (Maxtaloya, La Antigua y Los Humeros), y las fallas E-W (Las Papas y Las Cruces) (modificado de Carrasco-Núñez et al., 2017).

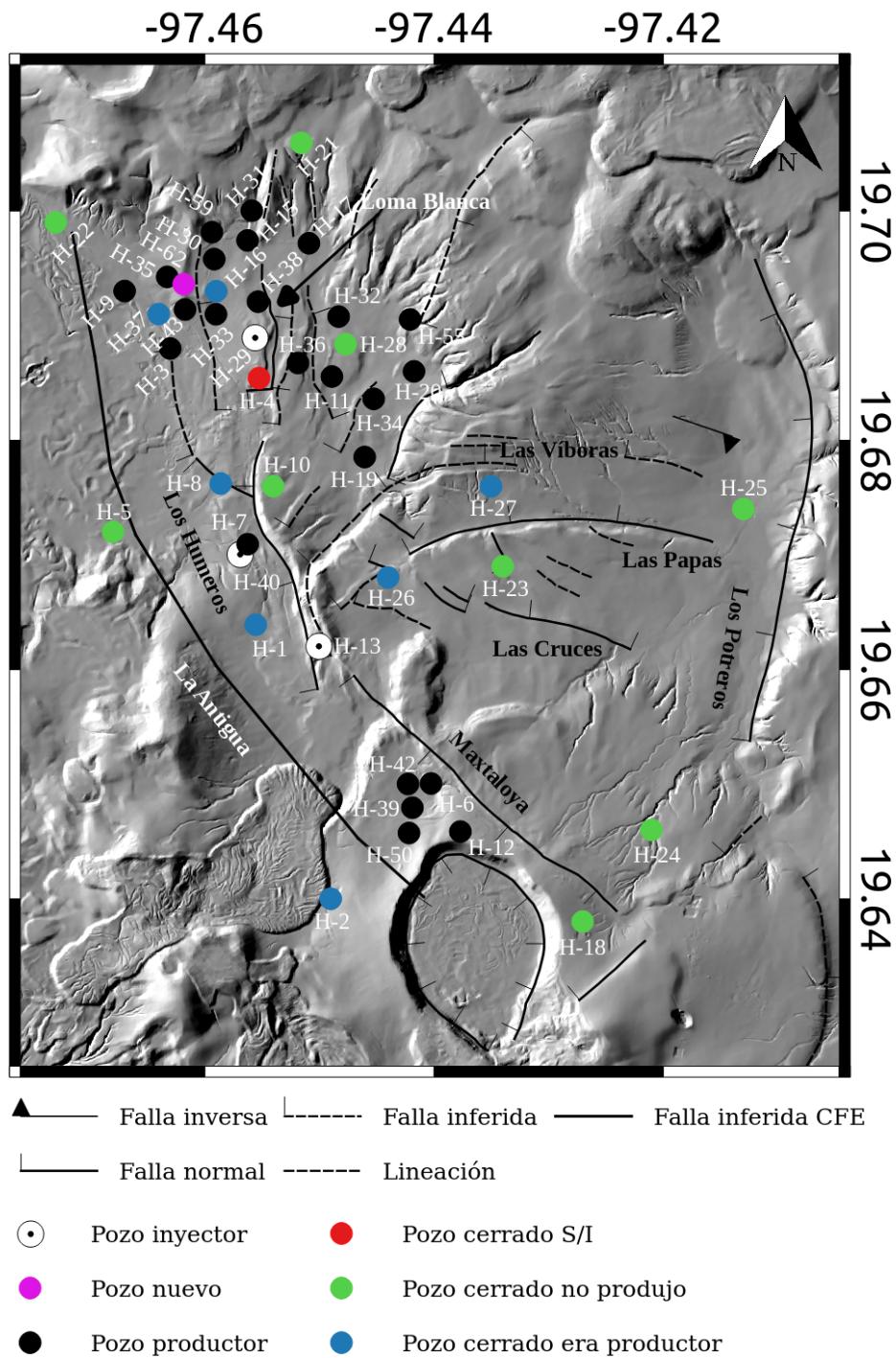


FIGURA 2.5: Mapa de la distribución espacial de los principales pozos dentro del campo geotérmico de Los Humeros, donde se indican las principales estructuras que conforman a la caldera. El mapa base es un Modelo Digital de Elevaciones sombreado de 1 m de resolución espacial, construido mediante estereoscopía de imágenes World-View 3. S/I refiere a sin información (actualizado y modificado de Carrasco-Núñez et al., (2017)).

2.2.1. Explotación del campo geotérmico

En la actualidad se han localizado en la República Mexicana varios prospectos de campos geotérmicos para ser explotados, 13 de los cuales han sido identificados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). La mayoría de estos campos geotérmicos son asociados con grandes calderas, tal como Los Azufres (Michoacán), Los Humeros (Puebla) o el prospecto de La Primavera-Cerritos Colorados (Jalisco). Estas calderas son de varios km de diámetro (aunque < 10 km), alimentadas por cuerpos magmáticos con largos períodos de vida que permiten la formación de sistemas geotérmicos que pueden ser explotados (Carrasco-Núñez et al., 2017).

El campo geotérmico de Los Humeros ocupa el tercer lugar en importancia a nivel nacional, después de los campos de Cerro Prieto en Baja California (primero) y Los Azufres en Michoacán (segundo); operados por la CFE. En 1968, la CFE comenzó los primeros estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos, en el campo de Los Humeros. Sin embargo, no fue hasta 1990 que se inició la explotación comercial del yacimiento con la instalación de la primera unidad de 5 MW (Arellano et al., 2000). Este campo geotérmico, actualmente produce electricidad a partir de 20 pozos de un total de 50 perforados. Con la reciente instalación de dos nuevas unidades, el campo produce 65 MW (Figura 2.5) (Gutiérrez-Negrín, citado en (Carrasco-Núñez et al., 2017)).

2.2.2. Sismicidad en Los Humeros

Previo a la explotación del campo geotérmico, de acuerdo con Ponce y Rodríguez, (1977), se realizó un monitoreo sísmico, aunque únicamente contempló la instalación de tres estaciones sísmicas que operaron del 12 al 24 de enero de 1977. En este corto periodo de tiempo, los sensores registraron siete sismos locales, con profundidades menores a 1 km y con magnitudes de duración sísmica de coda en grados menores a $M_d = 1$, los cuales fueron localizados en la periferia del campo geotérmico (i.e. fuera de la zona de explotación), por lo que se estimó que estos sismos estaban asociados a la actividad tectónica (Figura 2.6), (Ponce y Rodríguez, 1977; Antayhua, 2007).

El monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Los Humeros comenzó poco después del evento sísmico superficial del 25 de noviembre de 1994, $M_d = 4.6$ magnitud de duración sísmica, o bien $M_w = 3.9$ magnitud de momento sísmico, 2.0 km profundidad hipocentral (Figura 2.7). Este evento ocasionó algunos daños en la infraestructura de la CFE (Figura 2.8), (Lermo J, 1999). El sismo fue percibido en las ciudades de Teziutlán (al norte de la caldera de Los Humeros) y Puebla (Antayhua, 2007). La primera estación sísmica fue instalada dos días después de dicho evento, con el objeto de monitorear las réplicas del sismo principal y sus efectos en el campo (Antayhua, 2007; Urban y Lermo, 2013).

A partir de estudios realizados para el período de diciembre de 1997 (mes en el que fue instalada la Red Sísmica Telemétrica Permanente) a enero de 1999, se encontró que la sismicidad se concentraba principalmente en la zona norte del campo geotérmico, en los alrededores de los pozos inyectores (H-29 y H-38), alcanzando profundidades de hasta 4

km; aunque a partir de febrero de 1999, empezó a registrarse también actividad sísmica en la zona sur del campo (Urban y Lermo, 2013; Urban-Rascón, 2016).

En el período de diciembre 2005 a octubre de 2006, se lograron localizar, con un nuevo sistema de telemetría, un total de 51 sismos locales, cuyas profundidades hipocentrales no sobrepasaban 5 km y cuyas magnitudes de duración sísmica se encontraban entre 0.9 y 1.8. Del total, 35 de los eventos presentaron una mayor concentración sobre la falla La Antigua (falla inferida por CFE), justo en la zona de pozos de mayor producción (H-09, H-35 y H-37). En el período de marzo a octubre de 2007 (Lermo et al., 2008), se localizaron un total de 39 sismos locales, con una profundidad de 4 km y magnitudes de duración sísmica en el rango de 1 a 3. Su distribución espacial era muy semejante a la del año 2006; la mayor concentración de los sismos locales ocurrió sobre los pozos con mayor índice de productividad. Para el año 2008, se presentó una reactivación sísmica en la zona sur del campo, sin embargo, el Instituto de Ingeniería de la UNAM, quién realizaba el monitoreo del campo, lo interrumpió durante ese año, reanudándolo en 2014 y continuándolo hasta la fecha. Para el período del 2015 y los dos primeros meses de 2016, se localizaron 107 sismos locales (Figuras 2.1 y 2.2). Estos eventos presentaron órdenes de magnitud de coda en grados (M_d) en el rango de 0.9 a 3.6, siendo la máxima magnitud observada en la historia del monitoreo sísmico del reservorio, con profundidades de 0.6 a 3.8 km (Urban-Rascón, 2016).

https://download.geoservice.dlr.de/SRTM_XSAR/#download

2.2.2.1. El sismo del 8 de febrero de 2016: Sismo de los Humeros

Por lo que se tiene reportado, los días 16 de agosto de 2015 y 8 de febrero de 2016, se registraron dos sismos localizados sobre la traza del sistema de fallas Los Humeros, esto mediante la red sísmica del Instituto de Ingeniería de la UNAM, con magnitudes estimadas de M_w 2 y M_w 4.2 (Figura 2.7), respectivamente (Lermo Samaniego et al., 2016). El sismo de menor magnitud, así como sus réplicas, ocurrieron en la parte norte de la falla antes mencionada, mientras que el de mayor magnitud y sus réplicas se localizaron en la parte sur del campo. En Lermo Samaniego et al., (2016), se hace la suposición de que el sismo del 16 de agosto de 2015 y sus réplicas fueron precursores del sismo del 8 de febrero del 2016, el cual es denominado “sismo de Los Humeros”. De acuerdo con la información del Servicio Sismológico Nacional (SSN), el sismo del 16 de agosto fue localizado a 24 km al NW de Libres-Puebla, a una profundidad de 29 km, con magnitud de momento sísmico de M_w 3.5; mientras que el sismo del 8 de febrero de 2016, “sismo de Los Humeros”, fue localizado a 7 km al E de Teziutlán-Puebla, a una profundidad de 7 km, con una magnitud de momento sísmico de M_w 4.6 (Figura 2.10), Tabla 2.1.

De acuerdo con Lermo Samaniego et al., (2016), los mecanismos de ruptura del primer sismo (2015-08-16), corresponden con una falla de tipo oblícua (inversa y lateral izquierda), cuyos parámetros de fuente son: rumbo 332° , echado 61° y un rake de 42° , cabe mencionar que de acuerdo al trabajo de Lermo Samaniego et al., (2016), para la parte más al norte de la falla de Los Humeros tiene un echado hacia el Este. Para el caso del segundo

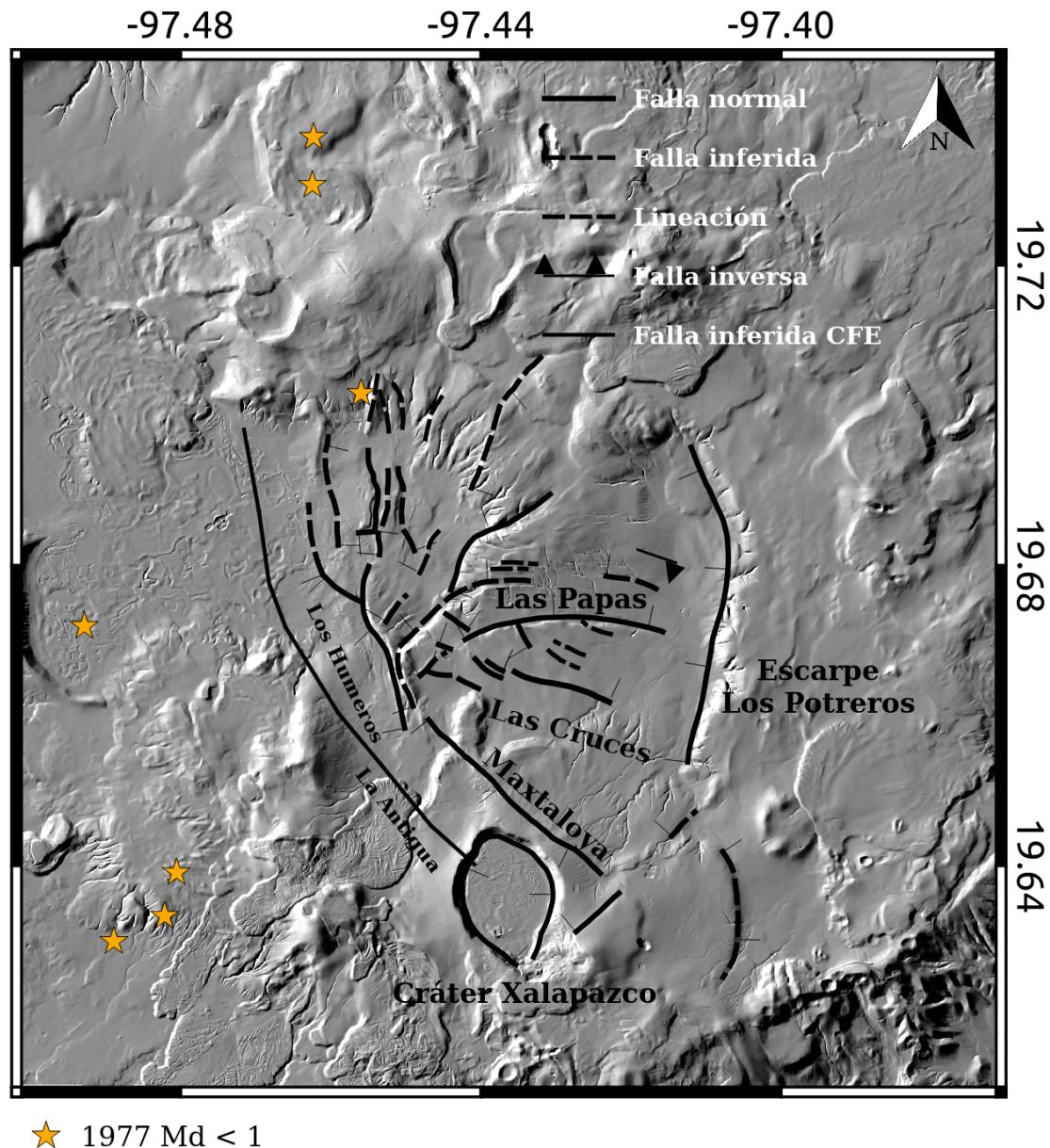


FIGURA 2.6: Mapa de ubicación epicentral de los siete sismos tectónicos detectados en 1977 en Los Humeros (tomado y modificado de Ponce y Rodríguez, (1977)).

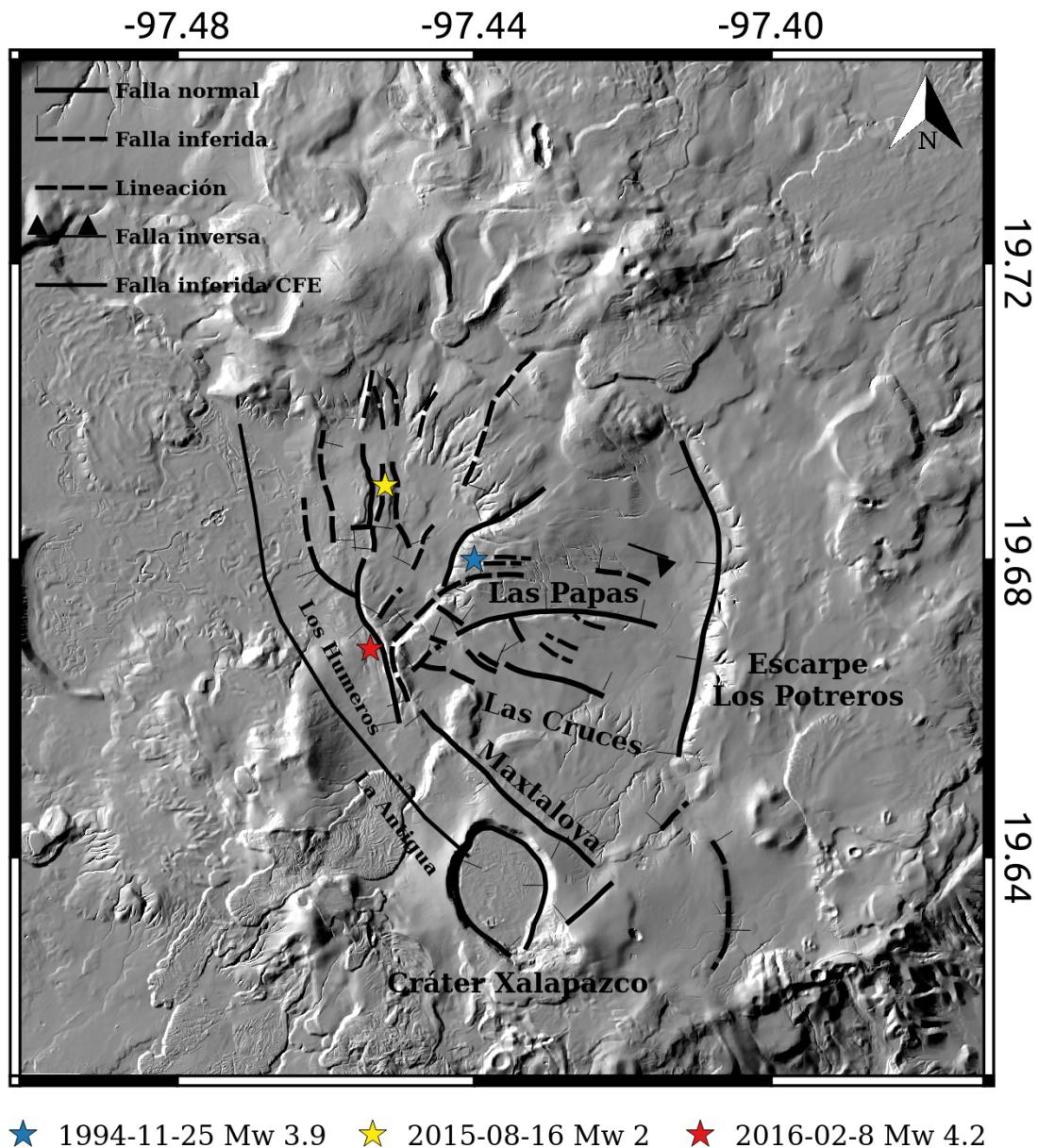


FIGURA 2.7: Mapa de ubicación epicentral de tres principales sismos en el interior de la caldera de Los Humeros. Cada estrella representa la ubicación epicentral con su respectiva fecha del evento sísmico. M_w es la magnitud de momento sísmico.



FIGURA 2.8: Fotografías que muestran los daños presentes en la planta geotérmica debido al sismo del 25 de noviembre de 1994, donde las unidades de gran peso fueron desplazadas aproximadamente 10 cm al norte de su posición original (tomado de Antayhua, (2007)).

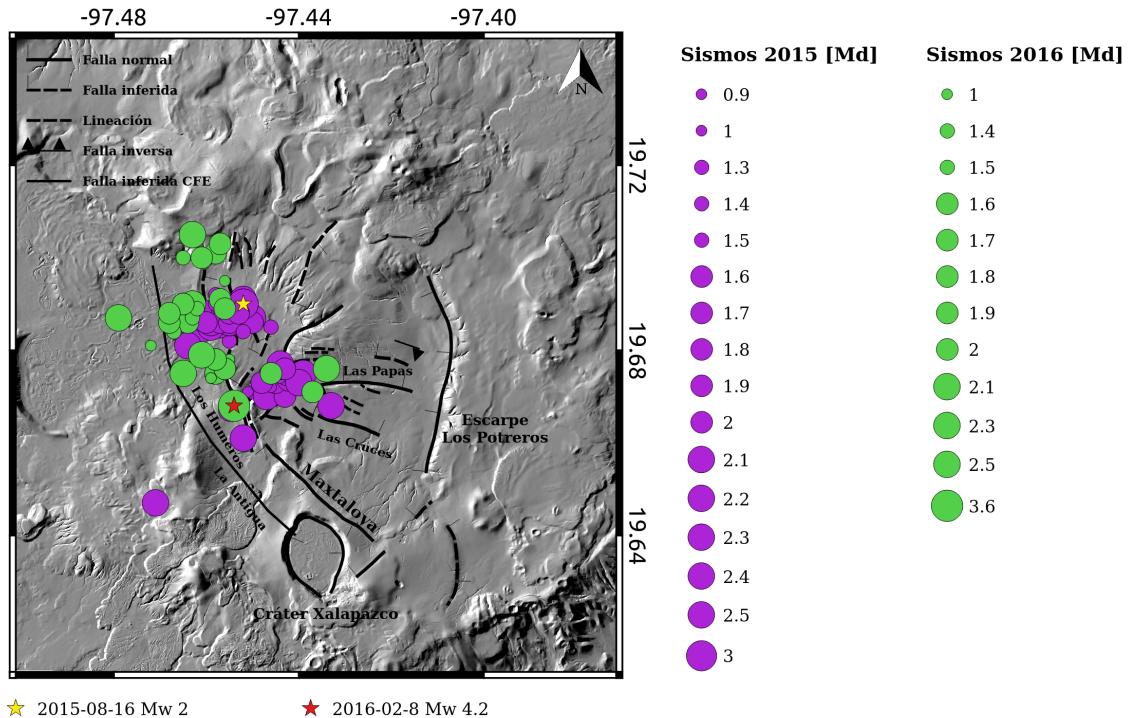


FIGURA 2.9: Mapa de distribución epicentral para los sismos de 2015 y 2016 en la caldera de Los Humeros. La magnitud de estos sismos se expresa en M_d (duración sísmica de coda), además de los sismos principales en magnitud de momento sísmico M_w indicadas por las estrellas de colores.

Institución	Magnitud	Latitud	Longitud	Profundidad
SSN	M_w 4.6	19.66	-97.35	7 km
IRIS	M_d 4.7	19.575	-97.403	34.73 km
USGS	M_w 4.7	19.6837	-97.416	10 km
Lermo 2016	M_w 4.2	19.668	-97.454	2 km

TABLA 2.1: Información del sismo del 8 de febrero de 2016 (Sismo de los Humeros) en la caldera de Los Humeros, donde se muestran la magnitud y el epicentro del sismo, calculados por diversas instituciones (Servicio Sismológico Nacional = SSN, Incorporated Research Institutions for Seismology = IRIS, United States Geological Survey = USGS)

sismo (2016-02-08), “sismo de Los Humeros”, se utilizaron los siguientes parámetros de fuente: rumbo 154°, echado 64° y rake de 56°; cuya solución se interpreta como una falla de tipo inversa con componente lateral izquierda (Urban-Rascón, 2016). Los efectos debidos al sismo de Los Humeros, incluyen daños a la infraestructura de las instalaciones de CFE y a las viviendas del poblado que está en las cercanías de la falla de Los Humeros, así como presencia de deslizamientos de masa, agrietamientos y fracturamiento del terreno (Lermo Samaniego et al., 2016).

2.2.2.2. Deformación del campo geotérmico medida con InSAR

La deformación en el campo geotérmico de Los Humeros, no había sido detectada, hasta ahora, mediante ninguna técnica geodésica.

Como consecuencia del financiamiento proporcionado por CeMIE-Geo y Gemex, a partir del 2013, comenzaron a aplicarse distintas metodologías que emplean InSAR, con el objetivo de estimar la deformación en el campo.

Los trabajos de Santos Basurto et al., (2014) y Santos-Basurto, (2015), presentan un primer análisis de los datos SAR disponibles sobre Los Humeros y de la factibilidad de poder estimar la deformación a partir de ellos. Como resultado, se utilizaron 21 imágenes ENVISAT, de paso descendente, adquiridas durante el periodo de abril 2003 a marzo 2007, para calcular 34 imágenes de coherencia y sus respectivos interferogramas diferenciales, con líneas de base temporal y perpendicular menores a 365 días y 500 m, respectivamente. Se consideró una gran línea de base temporal con el objetivo de no descartar posibles interferogramas con una buena señal interferométrica, incluso si el riesgo de decorrelación para grandes líneas de base es mayor. A partir del análisis visual de las imágenes de coherencia, se pudo detectar que los interferogramas con línea de base temporal mayor a 70 días y línea de base perpendicular mayor a 156 m, perdían la coherencia, particularmente en las zonas con vegetación dentro de la caldera. Como resultado, sólo 11 interferogramas fueron seleccionados y corregidos de la contribución atmosférica verticalmente estratificada y la contribución orbital residual. Sin embargo, debido a la cercanía de la caldera con la costa del Golfo de México, la contribución atmosférica turbulenta estaba presente en todos

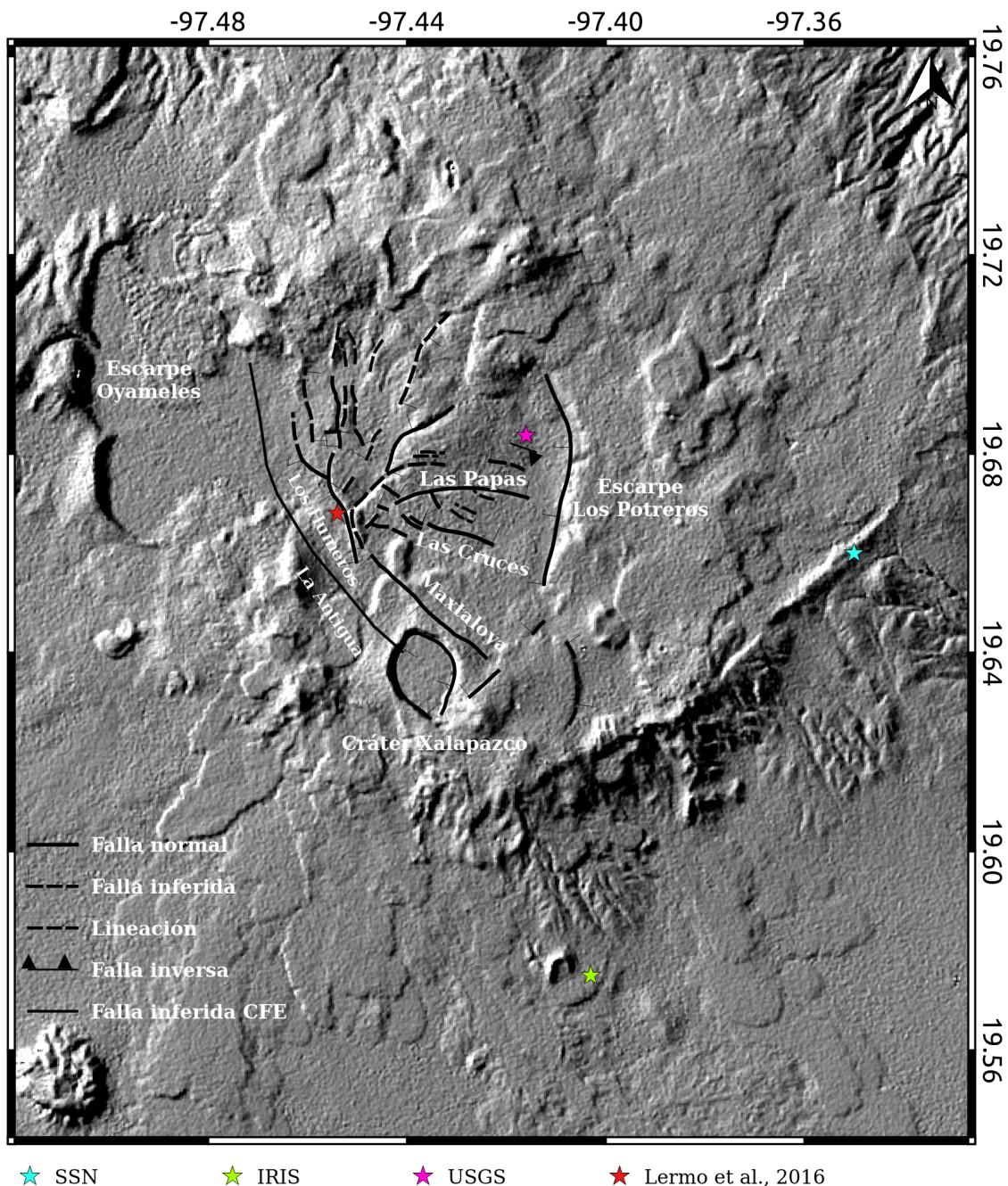


FIGURA 2.10: Mapa de localizaciones epicentrales para el sismo del 2016-02-8 en Los Humeros, el cual fue localizado por: Servicio Sismológico Nacional = SSN, Incorporated Research Institutions for Seismology = IRIS, United States Geological Survey = USGS y Lermo Samaniego et al., (2016).

los interferogramas y, por su gran magnitud, dominaba completamente la señal interferométrica (Figura 2.12). Las perspectivas de dichos trabajos incluían el uso de algoritmos para corregir los interferogramas por atmósfera y utilizar una metodología de procesamiento interferométrico que permitiera generar las series de tiempo, principalmente.

Por su parte, Békési et al., (2018), estimaron la deformación presente en el interior de la caldera de los Humeros, utilizando el mismo conjunto de imágenes ENVISAT mencionado anteriormente. En su trabajo, reportan haber utilizado la técnica de cálculo de series de tiempo para **Dispersores Persistentes** de Hooper, Segall y Zebker, (2007a), sin embargo únicamente muestran un mapa de deformación promedio donde se aprecia una tasa de subsidencia de 8 mm/año en la parte norte del campo, es decir, en los alrededores de los pozos de producción, del lado Este de la falla de Los Humeros (Figura 2.11).

El 8 de febrero de 2016, se detectó un sismo de magnitud de momento sísmico de M_w 4.2, en el interior de la caldera de Los Humeros (Lermo Samaniego et al., 2016). Dicho evento sísmico ocasionó varios daños en zonas aledañas al campo geotérmico y en la infraestructura de la Comisión Federal de Electricidad. Mediante el uso de DInSAR, este trabajo de maestría estimó la deformación producida por el sismo.

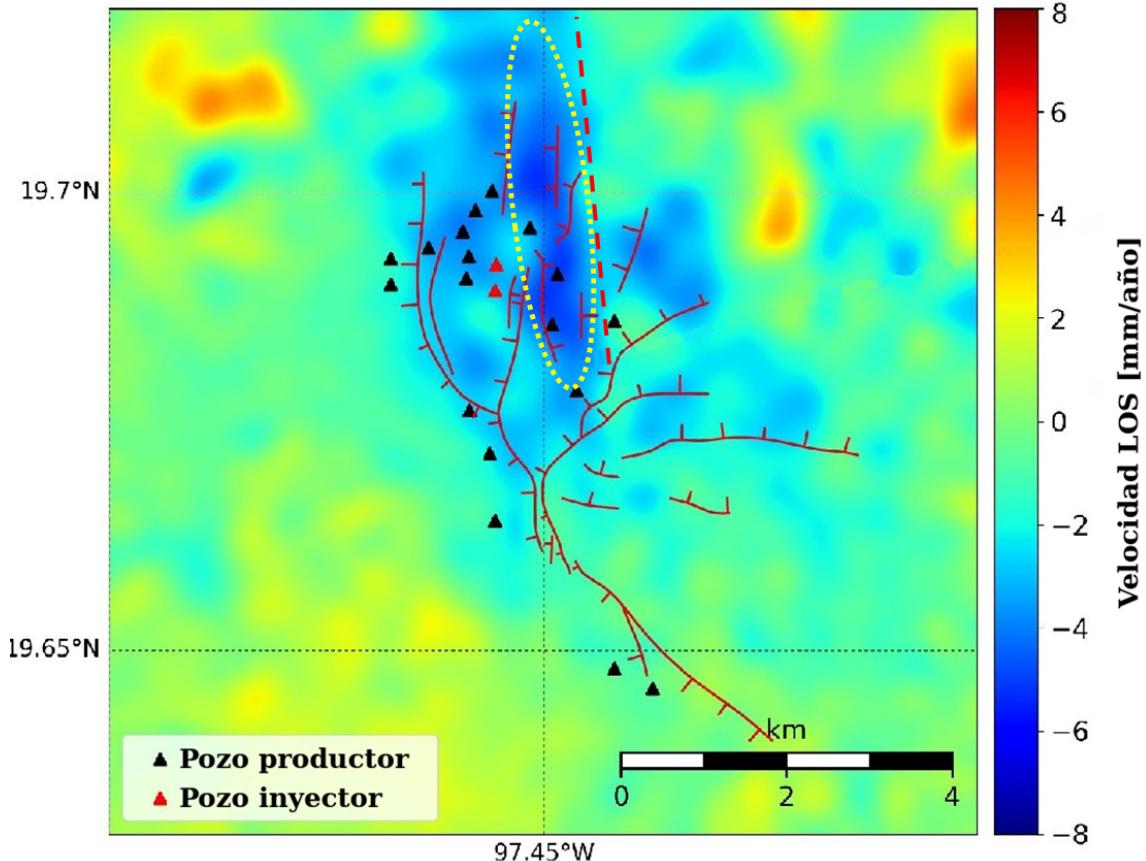


FIGURA 2.11: Mapa interpolado de la velocidad de deformación en LOS en el campo geotérmico de Los Humeros. Los valores negativos indican movimiento alejándose del radar (subsistencia) y los positivos indican movimiento hacia el radar (levantamiento). La zona donde se concentra mayoritariamente la subsidencia es la parte norte del campo, alrededor de los pozos de producción, con la falla de los Humeros como aparente límite Occidental e impermeable. El límite Oriental podría estar determinado por la línea discontinua en color rojo en dirección N-S (tomado y modificado de Békési et al., (2018)).

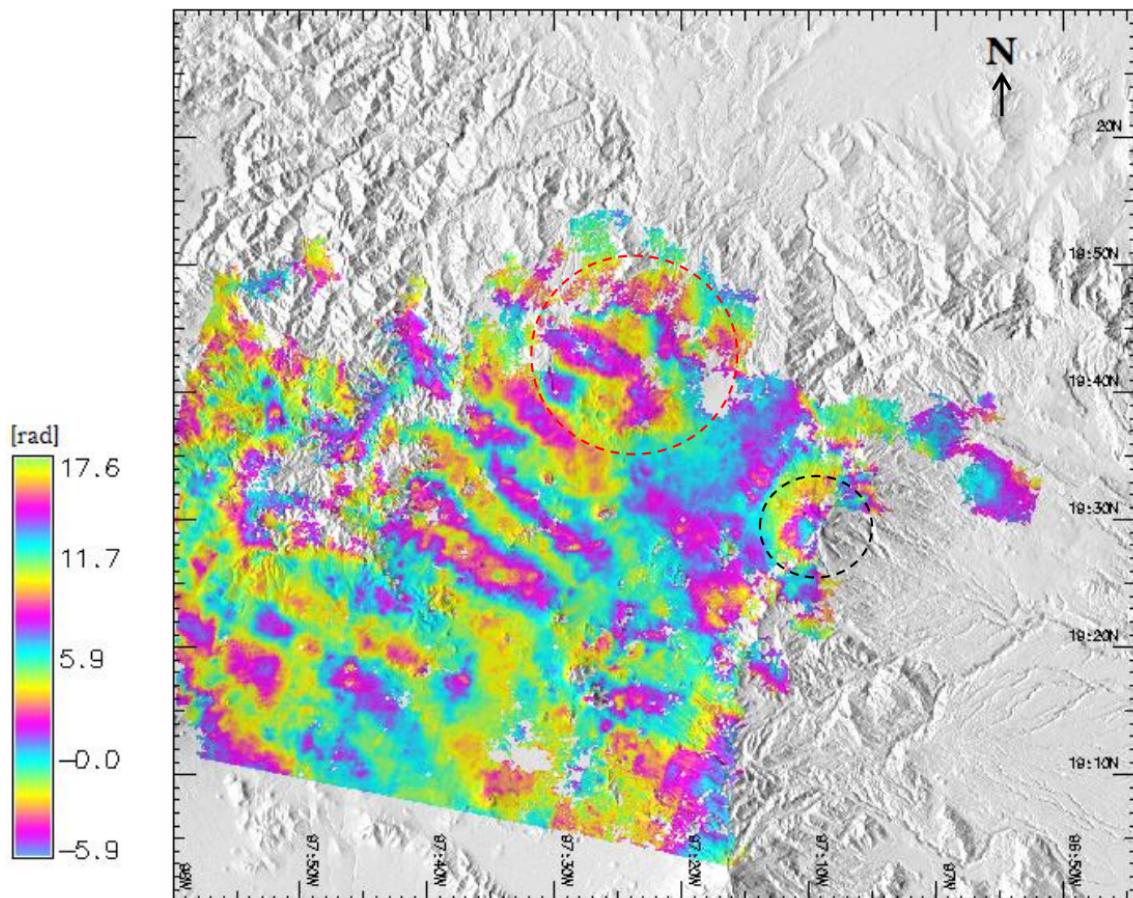


FIGURA 2.12: Interferograma de la caldera de Los Humeros, que cubre el periodo 2004-12-28 al 2005-03-08. La caldera de Los Humeros está enmarcada por la circunferencia en rojo, mientras que la estructura volcánica Cofre de Perote en color negro. Se observa que están presentes patrones o franjas debidas a los efectos de la atmósfera de tipo turbulenta. Dichas franjas tienen una orientación noroeste-sureste, y una de ellas se localiza sobre la caldera (tomado de Santos-Basurto, (2015)).

Capítulo 3

Metodología

Para estimar la deformación del terreno debida al sismo de Los Humeros, se realizaron varias etapas (Figura 3.1), las cuales contemplan:

- Búsqueda y adquisición de imágenes SAR. Se utilizaron pares de la misión Sentinel-1A.
- El cálculo de interferogramas diferenciales mediante distintos programas, como: GAMMA, GMTSAR y SNAP (Wegmüller, Werner y Strozzi, 1998; Werner et al., 2000; Sandwell et al., 2011; Veci et al., 2017).
- Selección de interferogramas calculados con GAMMA, ya que dicho software efectúa la corrección atmosférica verticalmente estratificada y la corrección orbital. En cambio GMTSAR y SNAP no relazan las correcciones antes mencionadas.
- Corrección de interferogramas por atmósfera aleatoria y residuales orbitales, mediante la aplicación del software GACOS (Yu, Penna y Li, 2017; Yu, Li y Penna, 2018; Yu et al., 2018).
- El cálculo de las componentes vertical (Arriba-Abajo) y horizontal (Este-Oeste) de la deformación.
- Utilización del software Coulomb 3.4 (Toda et al., 2011), para relazar **modelamiento directo** de los mapas de deformación esperada para un sismo con mecanismo inverso y comparar con los mapas obtenidos mediante DInSAR.

3.1. Adquisición de imágenes de Radar de Apertura Sintética

Se realizó una búsqueda de la disponibilidad de imágenes SAR provenientes de diversas misiones satelitales (revisar Apéndice A). Sólo una misión contaba con imágenes que abarcaban el evento sísmico de Los Humeros (8 de febrero de 2016). Se procesaron

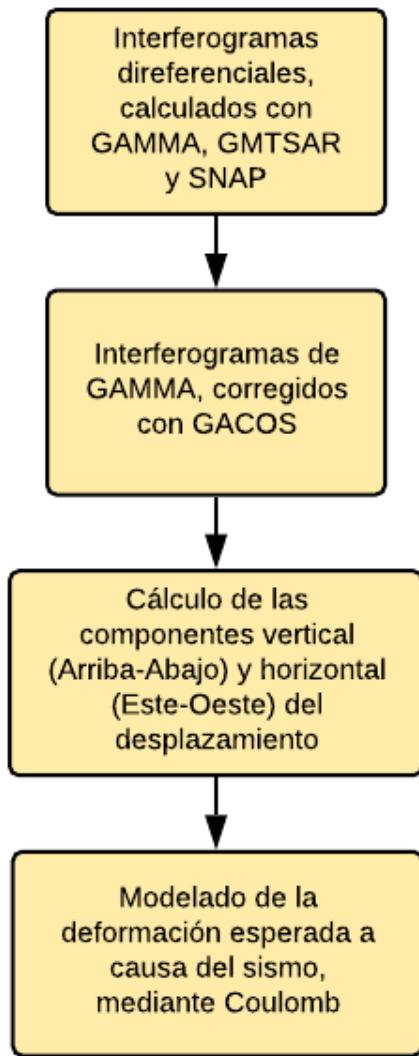


FIGURA 3.1: Diagrama de flujo que muestra las etapas que involucran la estimación de la deformación del sismo de Los Humeros y su modelado.

No.	Fecha	Paso	Track	Frame	Órbita
1	29-enero-2016	Ascendente	5	58	9702
2	10-febrero-2016	Ascendente	5	58	9877
3	7-febrero-2016	Descendente	143	528	9840
4	19-febrero-2016	Descendente	143	528	10015

TABLA 3.1: Tabla en la que se muestran las imágenes SAR de la misión Sentinel-1A utilizadas para la estimación de la deformación causada por el sismo de Los Humeros del 8 de febrero de 2016 en Puebla.

dos pares de imágenes de la misión Sentinel-1A de la Agencia Espacial Europea (European Space Agency, ESA), con modo de adquisición “Interferometric Wide o IW”, conformadas por tres subfranjas llamadas “subswath” en modo TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans), con resolución espacial promedio de 2.3×14.1 m, en azimut y rango, respectivamente. El sensor opera en la banda C de la región de microondas del espectro electromagnético, con una longitud de onda de $\lambda = 5.6$ cm, un ángulo de observación de aproximadamente 33° a 43° (el cual varía para cada “subswath”) y un período de revisita de 12 días. Esta misión es operada por el programa Copernicus de la ESA. Uno de los pares de imágenes seleccionados es ascendente y el otro descendente, Tabla 3.1 (Figura 3.2).

3.2. Procesamiento DInSAR

La Figura 3.3, muestra las principales etapas del procesamiento de los datos y el orden en el que fueron aplicadas. Para el cálculo de los interferogramas diferenciales (paso ascendente y descendente) se usó el programa comercial GAMMA (Wegmuller, Werner y Strozzi, 1998; Werner et al., 2000). El procesamiento de los interferogramas, mediante GAMMA, se realizó en las instalaciones y con el equipo de cómputo del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), que posee la licencia de dicho programa y en el marco de colaboración con la Dra. Olga Sarychikhina. Adicionalmente se utilizaron los programas libres GMTSAR (Sandwell et al., 2011) y SNAP (Veci et al., 2017). Los tres arrojaron resultados muy similares, sin embargo, en este trabajo sólo se reportan los resultados obtenidos con GAMMA, ya que este software permite corregir los errores orbitales y atmosféricos verticalmente estratificados en los interferogramas.

El procesamiento interferométrico con GAMMA, incluyó los siete pasos básicos del método DInSAR convencional de doble paso:

1. Importación de imágenes SAR.
2. Co-registro de imágenes.
3. Cálculo del interferograma en bruto (crudo) e interferograma diferencial con corrección topográfica y orbital.

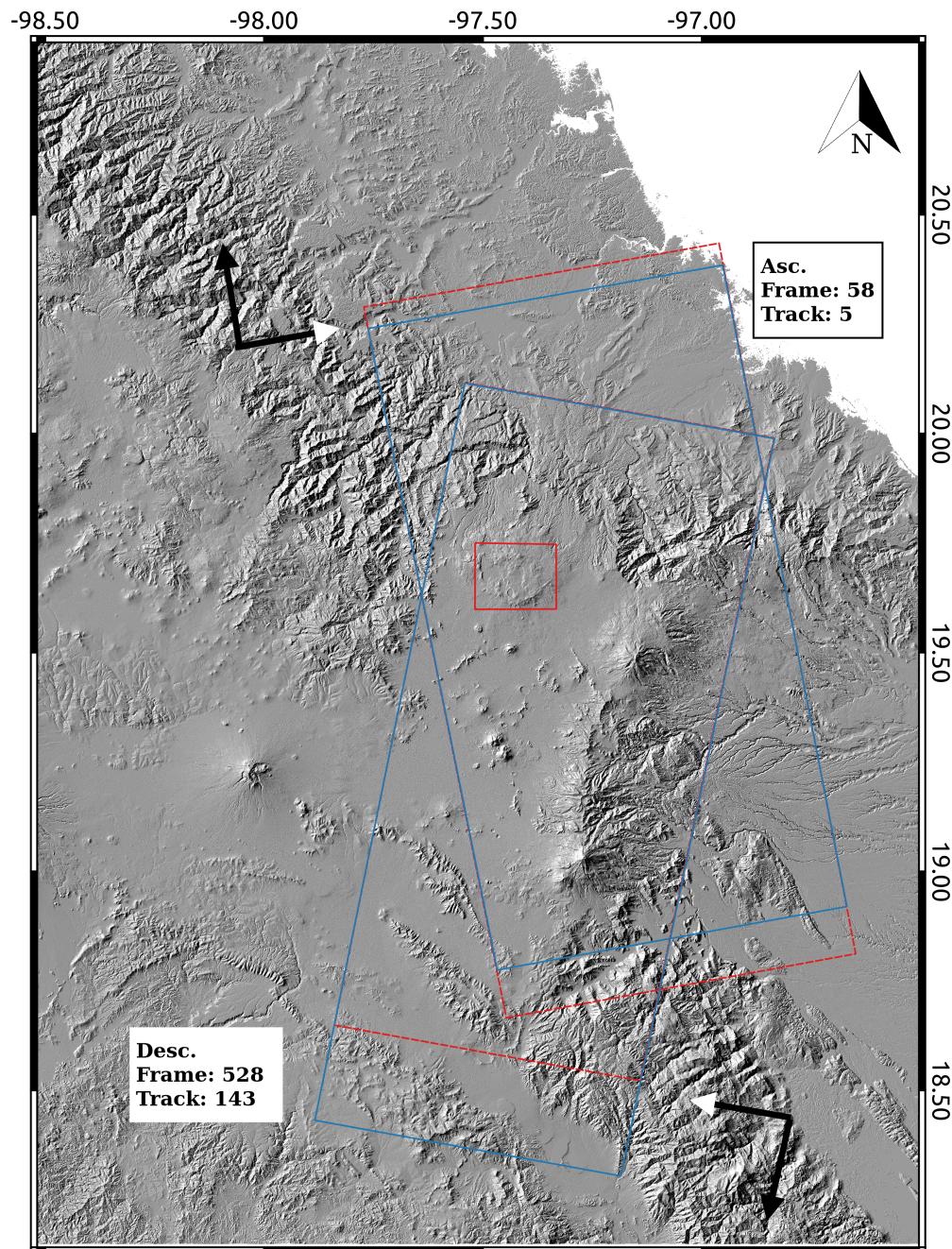


FIGURA 3.2: Mapa con la huella de los subswath de las imágenes Sentinel-1A que cubren el área de la caldera de Los Humeros (indicada en un recuadro en rojo). El mapa base es un modelo digital de elevaciones sombreado de la misión SRTM-1 de la NASA con 30 m de resolución espacial. La cobertura de las imágenes master o de referencia está indicada por líneas punteadas en rojo, mientras que las imágenes slave, están enmarcadas por líneas continuas en azul. Las imágenes ascendentes corresponden a un número de Track 5 y Frame 58; las imágenes de paso descendente corresponden a un Track 143 y un Frame 528. La flecha con punta negra, indica la dirección en azimuth. La flecha con punta blanca, indica la dirección en LOS.

4. Filtrado del interferograma diferencial.
5. Desenvolvimiento de la fase interferométrica.
6. Corrección atmosférica verticalmente estratificada y residuales orbitales.
7. Conversión de fase desenvuelta a distancia en dirección de la línea de vista del radar (LOS).
8. Geocodificación del mapa de desplazamiento LOS.

Para calcular los interferogramas con imágenes adquiridas en el modo TOPS, es necesaria una precisión de co-registro de milésimos de píxel (< 0.005) en dirección del azimut, de lo contrario se observan saltos de fase entre “bursts” subsecuentes. Utilizando el software GAMMA, se logró dicha precisión gracias al script llamado S1_coreg_TOPS, que permite la realización automática del co-registro. Dicho procedimiento incluye la obtención de tablas precalculadas o lookup tables (LUT) de co-registro, basándose en la geometría de adquisición de las imágenes y la topografía del terreno. También se realiza el refinamiento de las tablas precalculadas (LUT), usando métodos de correlación de la intensidad de las imágenes y de diversidad espectral.

Para el cálculo del interferograma diferencial, se utilizó un modelo digital de elevaciones SRTM-1 (Shuttle Radar Topography Mission) de 30 m de resolución espacial. Las órbitas fueron corregidas utilizando los datos del Restituido de Efemérides Orbitales POD-Precise Orbit Ephemerides. Posteriormente, se aplicó la operación multilooking, con factor 10:2 en el azimut y el rango, respectivamente, con el objetivo de obtener píxeles de 23 x 24 m y adicionalmente reducir el ruido en los interferogramas.

Los interferogramas diferenciales fueron filtrados utilizando el filtro adaptativo de Goldstein (Goldstein y Werner, 1998) para reducir el ruido de fase y mejorar los resultados de desenvolvimiento de la fase (unwrapping). Se realizó el desenvolvimiento de la fase interferométrica mediante el algoritmo de flujo de coste mínimo (MFC) (Costantini, 1998; Costantini, Farina y Zirilli, 1999). Las áreas con coherencia menor a 0.2 en los interferogramas diferenciales filtrados, se enmascararon y fueron descartadas antes del desenvolvimiento de la fase.

La rampa lineal residual causada por errores orbitales fue estimada y sustraída de los interferogramas desenvueltos. Adicionalmente, los interferogramas fueron corregidos de la contribución atmosférica verticalmente estratificada. Para ello se estimó el modelo lineal que relaciona las alturas del terreno y los valores de la fase (desenvuelta) y se sustrajo de esta última. La fase (desenvuelta) corregida se convirtió en cambio de distancia en LOS, generando así los mapas de desplazamientos en LOS. En la etapa final del procesamiento interferométrico, se realizó la geocodificación de los productos interferométricos (interferogramas diferenciales, interferogramas diferenciales desenvueltos, mapa de desplazamiento LOS e imágenes de coherencia), la cual consiste en reproyectar dichos productos, que se encuentran en la geometría radar, a la proyección geográfica con datum WGS84.

No.	master	slave	B_{\perp} [m]	B_t [días]	Paso
1	29-enero-2016	10-febrero-2016	45.36	12	Ascendente
2	7-febrero-2016	19-febrero-2016	38.42	12	Descendente

TABLA 3.2: Parámetros de los pares interferométricos presentados en este trabajo. B_{\perp} es la línea de base perpendicular, mientras que B_t es la línea de base temporal.

Los productos interferométricos georeferenciados tienen una resolución espacial de 30 x 30 m.

En la Tabla 3.2, se muestran los valores de línea de base perpendicular (B_{\perp}) y temporal (B_t) de los interferogramas generados. En la etapa de post-procesamiento, se refirieron los desplazamientos LOS a una zona (ventana de 5 x 5 pixeles) considerada estable (con desplazamiento nulo), alejada de la zona influenciada por el sismo.

Los mapas de desplazamiento LOS de ambos pasos orbitales, presentados en la Figura 3.4, fueron inspeccionados de manera visual.

De manera general, los valores positivos en LOS pueden implicar desplazamiento de la superficie terrestre hacia el radar y los valores negativos, desplazamiento en la dirección contraria. La Figura 3.4a presenta el interferograma de paso ascendente (29-enero-2016 y 10-febrero-2016), donde se observa que tanto el bloque al Oeste como al Este de la falla de Los Humeros (estructura NO-SE), tiene valores de desplazamiento LOS positivos, esto quiere decir que el desplazamiento fue hacia el radar. La Figura 3.4b presenta el interferograma de paso descendente (7-febrero-2016 y 19-febrero-2016), donde se observa que el bloque al Oeste de la falla de Los Humeros tiene valores de desplazamiento LOS positivos, es decir, hacia el radar, mientras que el bloque al Este presenta valores negativos, es decir, alejándose del radar. Para poder interpretar el desplazamiento causado por el sismo y observado por la InSAR, hay que tomar en cuenta que el vector de desplazamiento en LOS puede representarse en función de sus tres componentes del vector de desplazamiento: Norte-Sur, Este-Oeste y Arriba-Abajo. Este concepto se explica con mayor detalle en el subcapítulo 3.2.2.

3.2.1. Corrección atmosférica mediante GACOS

Al realizar una inspección visual de los interferogramas ascendente y descendente regionales, fue posible detectar que existía una componente de atmósfera residual (Figura 3.5a y c). Para reducir las contribuciones mencionadas, se realizaron los siguientes pasos, mediante GACOS (Yu et al., 2018):

1. Se solicitaron datos de retrasos atmosféricos para cada imagen SAR, obtenidos mediante el servidor en línea de GACOS (<http://ceg-research.ncl.ac.uk/v2/gacos/>).
2. Con los algoritmos de GACOS, se calculó la diferencia entre ambos mapas de retrasos atmosféricos (ztd), y se generó un nuevo mapa de diferencia atmosférica (dtdz).

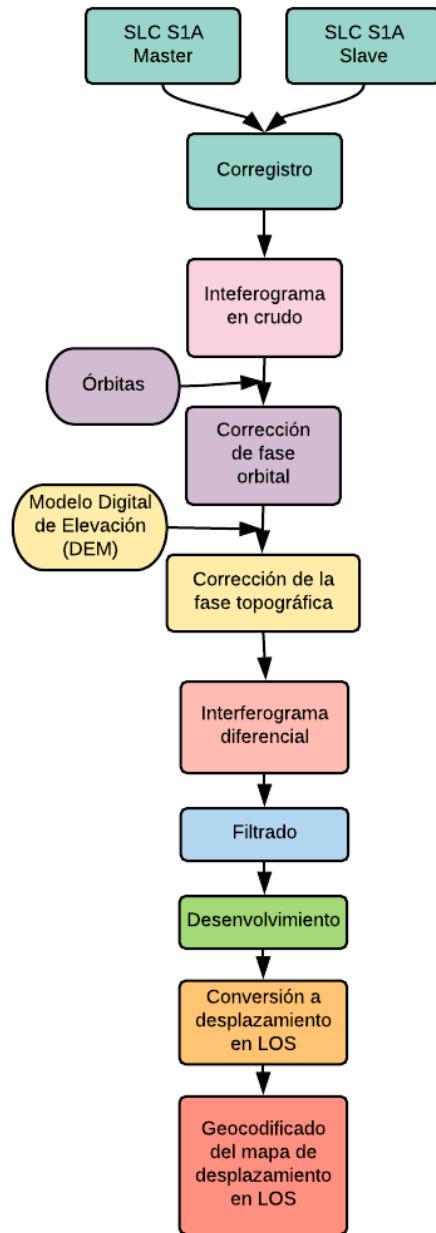


FIGURA 3.3: Diagrama de flujo del procesamiento de imágenes SAR, que muestra los pasos de la técnica DInSAR aplicada con GAMMA.

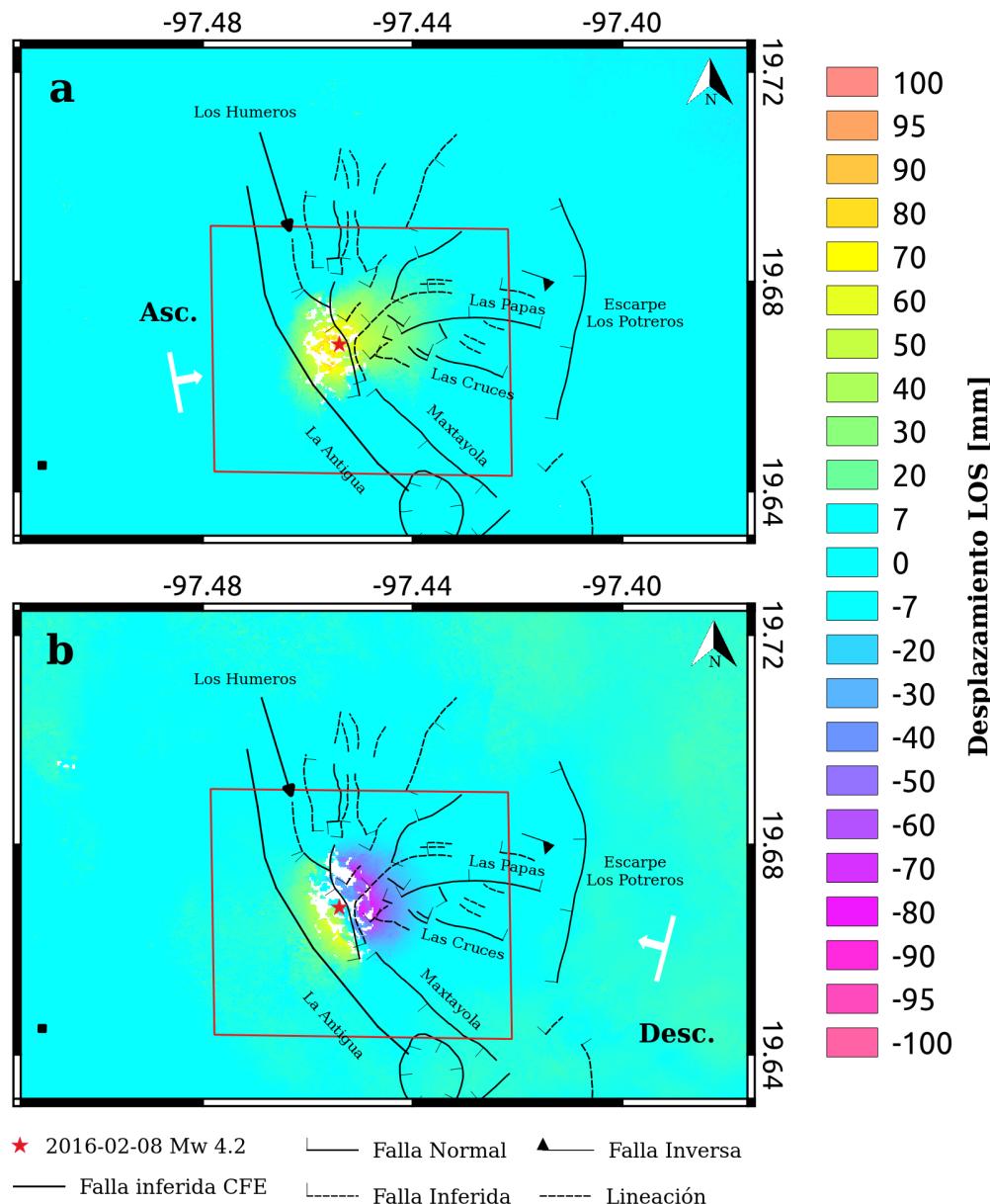


FIGURA 3.4: Mapas de desplazamientos en dirección de la Línea de Vista del Radar (LOS) en milímetros. El recuadro en rojo indica el acercamiento de la zona de Los Humeros de la Figura 3.2. a) mapa del paso ascendente, presenta un mínimo de -23.76 mm y máximo de 94.56 mm; y b) mapa del paso descendente, presenta un mínimo de -86.56 mm y máximo de 69.65 mm. Las áreas con baja coherencia, menor a 0.2, fueron enmascaradas y aparecen en blanco. La dirección de la LOS está indicada con la flecha blanca. La zona de referencia, con desplazamiento nulo, está indicada por el recuadro negro.

	Frame	Track	Master	Slave	Ángulo azimutal (°)	Ángulo de incidencia (°)	Vector de sensibilidad		
Ascendente	58	5	2016-01-29	2016-02-10	348 (-12)	43	Este-Oeste	Norte-Sur	Arriba-Abajo
Descendente	528	143	2016-02-07	2016-02-19	192 (-168)	33	-0.667	-0.1417	0.7314
							0.5327	-0.1132	0.8387

TABLA 3.3: Parámetros geométricos de la adquisición de las imágenes SAR utilizadas en este trabajo y valores de las componentes del vector de sensibilidad.

3. A los mapas de desplazamientos LOS, se les sustrajo el mapa con valores de diferencia atmosférica (dztd).
4. El mapa resultante, LOS-dztd, muestra la disminución de los efectos troposféricos en la señal.

Los mapas regionales de desplazamientos LOS, corregidos por atmósfera, se muestran en las Figuras 3.5b y d. La Figura 3.6, muestra un acercamiento sobre la zona de la caldera de Los Humeros.

3.2.2. Cálculo de las componentes horizontal y vertical de la deformación

El vector de desplazamiento del terreno tiene tres componentes (3-D), cuya proyección a la línea de vista de radar puede ser expresada de la siguiente manera (Wright, Parsons y Lu, 2004; Fialko, 2004; Samsonov y Tiampo, 2006; González et al., 2015):

$$D_{LOS} = [-D_E, D_N, D_U]^T [(\sin\theta \cos\alpha) (\sin\theta \sin\alpha) \cos\theta] \quad (3.1)$$

Donde: N : Componente de desplazamiento Norte-Sur. E : Componente de desplazamiento Este-Oeste. U : Componente de desplazamiento Arriba-Abajo.: θ : Ángulo de incidencia del radar.: α : Ángulo azimutal de la dirección del vuelo del satélite (Figura 3.7).

La ecuación (3.1) puede reescribirse de la forma siguiente:

$$D_{LOS} = D_U \cos\theta - D_E \sin\theta \cos\alpha + D_N \sin\theta \sin\alpha \quad (3.2)$$

De acuerdo con la ecuación (3.2), la sensibilidad del radar a las componentes del vector de desplazamiento puede expresarse como derivadas parciales (Wright, Parsons y Lu, 2004):

$$\frac{\partial D_{LOS}}{\partial D_U} = \cos\theta; \quad \frac{\partial D_{LOS}}{\partial D_E} = -\sin\theta \cos\alpha; \quad \frac{\partial D_{LOS}}{\partial D_N} = \sin\theta \sin\alpha \quad (3.3)$$

Para los interferogramas procesados, los datos de los vectores de sensibilidad se presentan en la Tabla 3.3.

El vector 3D del desplazamiento, puede ser calculado usando DInSAR, si existen al menos tres conjuntos de datos independientes, o en su defecto, se asumen los supuestos necesarios (basados en el conocimiento previo) acerca de las componentes de deformación del terreno.

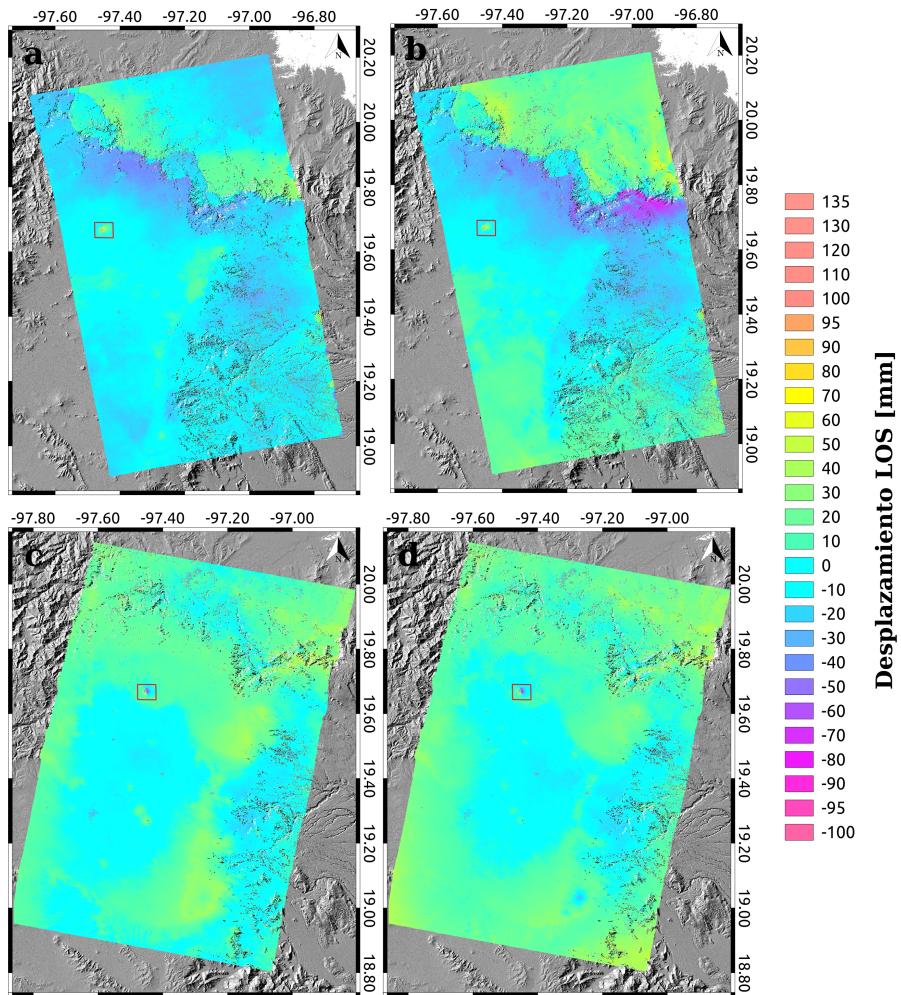


FIGURA 3.5: Mapas regionales de desplazamientos LOS en Los Humeros. El racuadro en rojo, enmarca Los Humeros. a) Mapa LOS del paso ascendente, con contribución residual atmosférica; b) Mapa LOS del paso ascendente después de haber sido corregido mediante GACOS; c) Mapa LOS del paso descendente, con contribución residual atmosférica; d) Mapa LOS del paso descendente después de haber sido corregido utilizando GACOS.

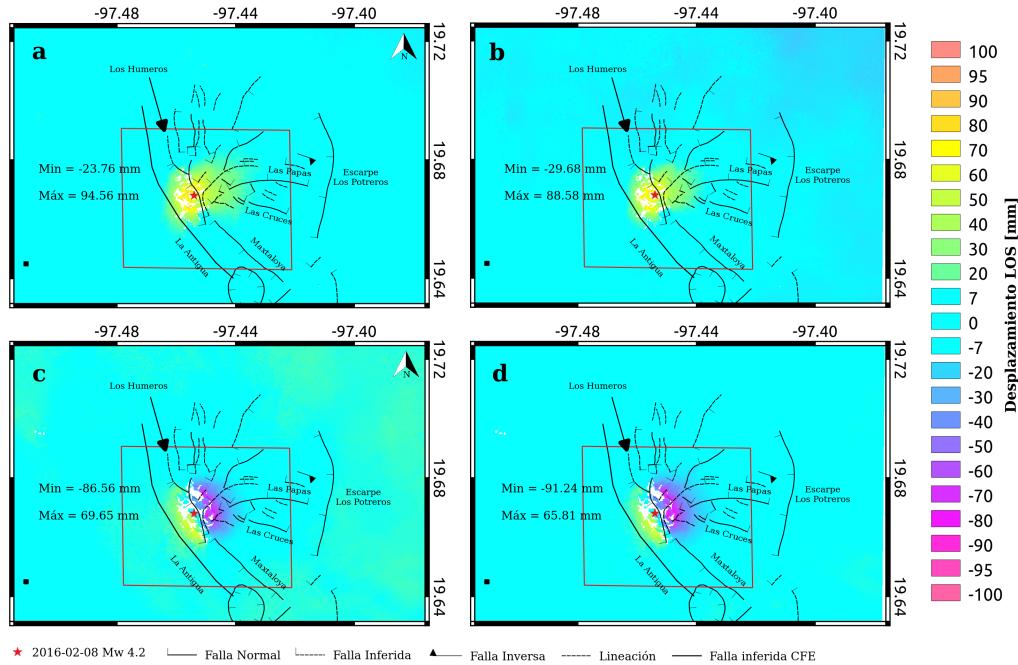


FIGURA 3.6: Acercamiento del mapa regional de desplazamiento LOS sobre la caldera de Los Humeros (el recuadro indica el acercamiento del interferograma regional corregido, Figura 3.5). Se muestran las principales estructuras geológicas en el interior de la caldera. El epicentro del sismo de Los Humeros está indicado por la estrella en rojo. La zona de referencia, donde se asume que la deformación es nula, está marcada por el recuadro negro. Paso ascendente: a) mapa LOS generado con GAMMA, b) mapa LOS corregido por residuales de atmósfera mediante GACOS. Paso descendente: c) mapa LOS generado con GAMMA, d) mapa LOS corregido por residuales de atmósfera mediante GACOS.

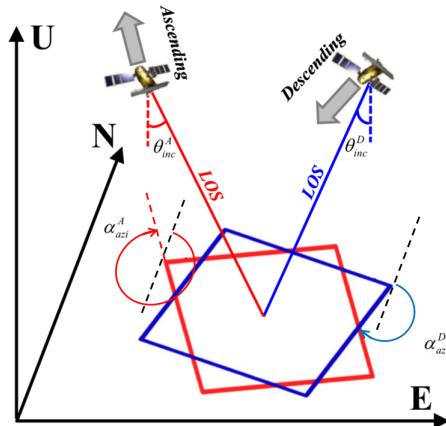


FIGURA 3.7: Geometría de adquisición de imágenes SAR para el paso ascendente y descendente. El θ_{inc} y α_{azi} representan los ángulos de incidencia y azimutal del satélite. Los superíndices A y D denotan el paso ascendente y descendente, respectivamente. U: Dirección Up-Down (Arriba-Abajo); N: Dirección North-South (Norte-Sur); E: Dirección East-West (Este-Oeste) (modificado de Hu et al., (2014)).

Generalmente, es posible disponer de imágenes, y por lo consiguiente de interferogramas, con dos geometrías distintas; la del paso ascendente del satélite y la del descendente. De este modo, es posible contar con dos conjuntos de datos independientes. Además, **dado que la sensibilidad del radar en la dirección Norte-Sur es ima debido a las órbitas casi polares del satélite Sentinel-1A**, es posible asumir que la componente D_N es nula; con lo cual la ecuación 3.2 se simplifica.

Resolviendo el sistema lineal de ecuaciones (3.2) se obtienen las siguientes expresiones para las componentes Este-Oeste (D_E) y Arriba-Abajo (D_U):

$$D_U = \frac{D_{LOS_D} \sin\theta_A \cos\alpha_A - D_{LOS_A} \sin\theta_D \cos\alpha_D}{\sin\theta_A \cos\alpha_A \cos\theta_D - \cos\theta_A \sin\theta_D \cos\alpha_D} \quad (3.4)$$

$$D_E = \frac{D_{LOS_D} \cos\theta_A - D_{LOS_A} \cos\theta_D}{\sin\theta_A \cos\alpha_A \cos\theta_D - \cos\theta_A \sin\theta_D \cos\alpha_D} \quad (3.5)$$

En las ecuaciones anteriores, los subíndices A y D indican el paso ascendente y descendente, respectivamente.

Los desplazamientos en la dirección vertical (D_U) y horizontal (D_E) se muestran en la Figura 3.8.

El mapa de desplazamientos en la dirección vertical D_U (Arriba-Abajo), Figura 3.8a, muestra dos bloques, separados por la falla de Los Humeros. Del lado Oeste de la falla, los valores son positivos, lo cual corresponde a un levantamiento del terreno; mientras que del lado Este se aprecian valores negativos que corresponden a un hundimiento del terreno.

En el mapa de desplazamiento en la dirección horizontal D_E (Este-Oeste), Figura 3.8b, se visualizan tres bloques o sectores:

Del lado Este de la falla: El “bloque Este”: presenta valores negativos, indicando un desplazamiento hacia el Oeste.

Del lado Oeste de la falla: El “bloque superior Oeste”: muestra valores negativos, los cuales corresponden a desplazamientos hacia la dirección Oeste. El “bloque inferior Oeste”: presenta valores positivos, indicando desplazamientos hacia el Este.

3.3. Deformación del sismo de Los Humeros mediante Coulomb

Con el objeto de generar los mapas de deformación esperada como consecuencia del sismo de Los Humeros, se utilizó el software Coulomb 3.3.1 del Servicio Geológico de los Estados Unidos (Toda et al., 2011).

Con Coulomb, es posible estimar la deformación del terreno asociada a un sismo, debida a la ruptura de una o varias fallas; ya sean de rumbo, normal, inversa e incluso oblicuas. Todo el cálculo se realiza en un semiespacio elástico con propiedades elásticas isotrópicas de acuerdo a Okada, (1992).

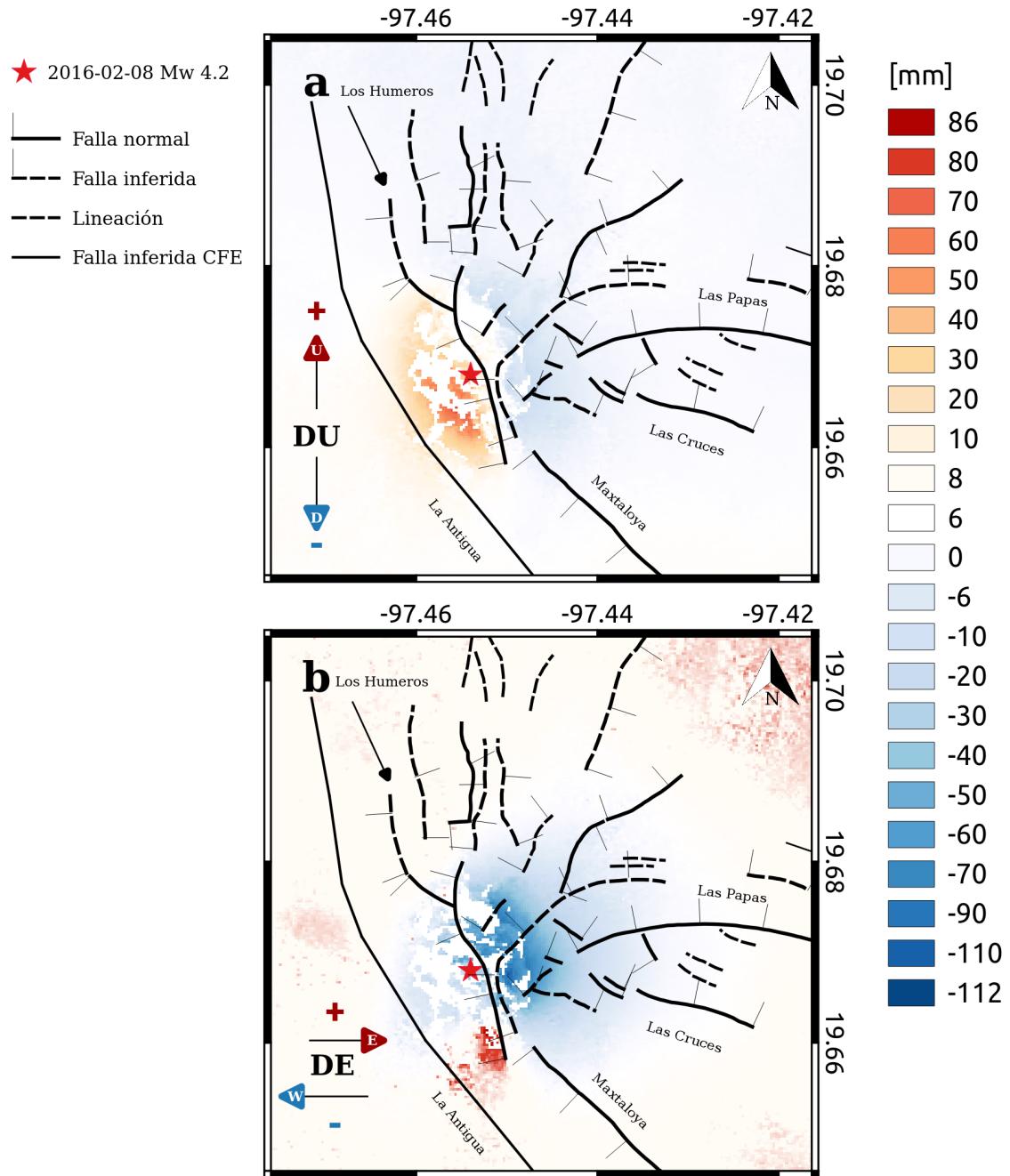


FIGURA 3.8: Mapas de desplazamiento a) vertical D_U (Arriba-Abajo) y b) horizontal D_E (Este-Oeste), causado por el sismo de Los Humeros. Las curvas de isovalor de deformación, aparecen cada 20 mm. En a) los valores positivos (en rojo) corresponden al levantamiento del terreno, mientras que negativos corresponden al hundimiento de este. En b) los valores positivos corresponden al movimiento del terreno hacia el Este (rojo), mientras que los valores negativos corresponden al desplazamiento del terreno hacia el Oeste (azul).

Para el cálculo de la deformación esperada debido a la ruptura de una falla (sismo), los datos de entrada a considerar son: las coordenadas iniciales (X_{ini} , Y_{ini}) y finales (X_{fin} , Y_{fin}) de la parte superior de la falla, el ángulo del echado (la dirección del echado se determina según la regla de la "mano derecha"), la profundidad de la parte superior (top) e inferior (bottom) de la falla, los valores de los desplazamientos laterales (derecho, tendrá signo positivo, e izquierdo signo negativo) y el desplazamiento sobre la dirección del echado (normal tendrá signo negativo e inverso será signo positivo), (Figura 3.9).

Para este trabajo, se realizaron 60 iteraciones. Los parámetros de entrada se muestran en las Tablas 3.4 y 3.5, y se determinaron de la siguiente manera:

- Mecanismo focal: Presentado por Lermo Samaniego et al., (2016), quién reporta un mecanismo focal de tipo inverso oblicuo.
- Echado de la falla: Observaciones realizadas durante trabajos de campo, con el objetivo de obtener información estructural sobre la falla de Los Humeros, reportan un echado de entre 70 y 80 grados (comunicación personal M. Javier Hernández-Rojas). De manera similar, Norini et al., (2015) reportan echados promedio de 60 a 80 grados, como resultado de un análisis estructural sobre las fallas con orientación NO-SE, dentro de la caldera.
- Ubicación de la falla: Se obtuvo a partir del análisis del patrón espacial de la deformación presente en los interferogramas calculados. Como la deformación se presenta, principalmente, como un par de bloques de uno y otro lado de la falla, se utilizaron los límites de ambos bloques para estimar la ubicación de la falla.
- Magnitud del desplazamiento del deslizamiento de la falla (componentes del rake): Las magnitudes de los desplazamientos en la dirección del echado (Dip slip) y horizontal (Rt.lat) también se derivaron de los valores obtenidos a partir de los interferogramas calculados. Para esto se considera la geometría mostrada en la Figura ???. En el Dip slip, se considera la geometría de un plano que corta de manera vertical al plano de la falla y este plano contiene al echado, aunque se consideran dos casos (Figura 3.11): a) cuando se desconoce el valor de x (vertical), pero se considera el valor del echado ($\rho = 64^\circ$), el valor del ángulo del rake ($\alpha = 56^\circ$), además que el valor de D_E máxima se toman en cuenta los valores del bloque Oeste de la componente horizontal de la deformación cosísmica 2D, por lo que se consideran dos valores, el del bloque superior Oeste de 0.07526 m y el del blqque inferior Oeste de 0.04611 m, y el Dip slip y el Rt.lat pueden ser calculado de manera trigonométrica, Ecuaciones 3.6, 3.7 y 3.8; b) cuando x ya no es desconocida, sino se toma en cuenta el valor D_{Umx} de la componente vertical del bloque Oeste de la deformación cosísmica 2D, la cual es de 0.08632 m, se pueden calcular de manera trigonométrica el Dip slip y el Rt.lat, Ecauciones 3.9 y 3.8.

$$x = D_{Emx} \tan \rho \quad (3.6)$$

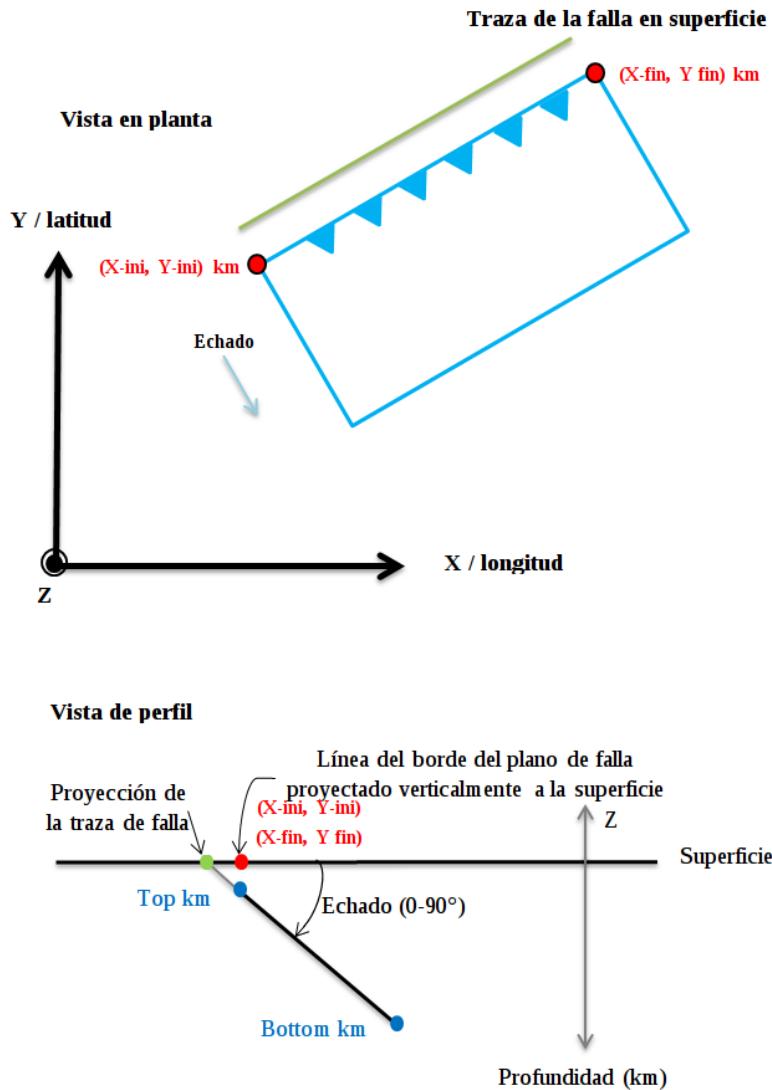


FIGURA 3.9: Esquema de la geometría de una falla en Coulomb 3.3.1, donde se muestran los parámetros de entrada para la modelación directa de la deformación debida a un sismo (modificado de Okada, (1992)).

$$Dipslip = \sqrt{(D_{Emx})^2 + (x)^2} \quad (3.7)$$

$$Rt.lat = \frac{Dipslip}{\tan\alpha} \quad (3.8)$$

$$Dipslip = \sqrt{(D_{Emx})^2 + (D_{Um})^2} \quad (3.9)$$

- Profundidad de la falla: Se calculó con trigonometría, considerando el echado y el área de influencia de la deformación presente en los interferogramas calculados y como límite el valor del hipocentro reportado por Lermo Samaniego et al., (2016).

Cada vez que se realizaba una iteración, se exportaban los datos (transformados a LOS en mm), se inspeccionaba visualmente el modelo y se calculaba el residual, si la magnitud del residual era grande se hacían variar los desplazamientos verticales y horizontales y se repetía el modelado. Los mejores resultados reportan valores de raíz del error cuadrático medio pequeño siendo esta la métrica la cual mostraba cuando el residual disminuía.

Como resultado del modelado, Coulomb arroja la estimación de las tres componentes del vector de desplazamiento: Arriba-Abajo, desplazamiento Norte-Sur y desplazamiento Este-Oeste. Los resultados de la modelación se proyectaron a la dirección LOS de paso ascendente y de paso descendente, utilizando los parámetros del vector de sensibilidad correspondiente. Las Figuras 3.12(c,f) y 3.13(c,f) presentan los mapas de desplazamiento LOS residual o diferencia entre el desplazamiento LOS observado y el desplazamiento LOS modelado.

No	X-ini km	Y-ini km	X-fin km	Y-fin km	Rt.lat m	Dip Slip m	Echado °	Top km	Bottom km	Ascendente modelo mm		Descendente modelo mm		RECMa mm	RECMd mm
										Min	Máx	Min	Máx		
1	6.6417	8.4832	7.4153	6.9803	-0.1158	0.1717	64	0	2	-16.5289	83.1167	-85.3816	120.2984	9.7543947546	6.3898122858
2	6.6417	8.4832	7.4153	6.9803	-0.0709	0.1052	64	0	2	-10.1151	50.9224	-52.3066	73.6957	9.4497762363	5.3470063148
3	6.6417	8.4832	7.4153	6.9803	-0.0772	0.1145	48	0	2	-12.912	33.7681	-41.668	98.5524	9.5004326057	6.4144061057
4	6.6417	8.4832	7.4153	6.9803	-0.066	0.0979	61	0	2	-9.861	44.3897	-46.278	72.0395	9.4344398387	5.4299986329
5	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	-0.1158	0.1717	64	0.0989	2	-5.7873	75.4132	-48.1635	86.5477	9.6628070621	5.3365623051
6	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	-0.0709	0.1052	64	0.0989	2	-8.0346	48.8153	-31.9887	57.8207	9.4908742939	5.2392401932
7	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	-0.0772	0.1145	48	0.0989	2	-6.8605	42.2912	-18.1135	70.8971	9.487607256	5.9106334758
8	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	-0.066	0.0979	61	0.0989	2	-3.0007	42.1613	-25.1089	51.7068	9.5053840294	5.4072798799
9	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0	0.2	70	0.0989	1.4011	-2.5383	16.6453	-17.3756	16.4059	9.3798720578	5.1061544312
10	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	0	0.015	70	0.0989	1.4011	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	6.3829163849
11	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.19	0.19	70	0.0989	1.4011	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
12	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.2	0.2	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
13	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.19	0.19	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
14	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.18	0.18	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	11.549616884	5.1926407651
15	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.17	0.17	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
16	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.15	0.15	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
17	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.12	0.12	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
18	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.1	0.1	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	11.549616884	5.1926407651
19	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.1	0.1	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
20	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.1	0.1	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
21	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.1	0.1	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
22	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.09	0.09	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
23	6.6579	8.3731	7.3351	7.0574	-0.07	0.07	70	0.0989	1.5	-0.547039	6.93398	-69.7732	96.1585	9.815714491	5.1926407651
24	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0.005	0.2	70	0.0989	1.4011	-7.08691	91.96	-56.0037	75.8354	9.8425985636	5.113683349
25	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0.01	0.2	70	0.0989	1.4011	-7.08691	91.96	-56.0037	75.8354	9.8425985636	5.113683349
26	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0.2	0.2	70	0.0989	1.4011	-7.08691	91.96	-56.0037	75.8354	9.8425985636	5.113683349
27	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0.05	0.2	70	0.0989	1.4011	-7.08691	91.96	-56.0037	75.8354	9.8425985636	5.113683349
28	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0.1	0.2	70	0.0989	1.4011	-7.08691	91.96	-56.0037	75.8354	9.8425985636	5.113683349
29	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0.005	0.2	72	0.0989	1.4011	-7.08691	91.96	-56.0037	75.8354	9.8667023415	5.0587827991
30	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0.005	0.2	74	0.0989	1.4011	-7.08691	91.96	-56.0037	75.8354	9.8667023415	5.0587827991

TABLA 3.4: Tabla (primera parte), de los parámetros de entrada en Coulomb, para estimar la deformación causada por el sismo de Los Humeros. Rt.lat es la componente de desplazamiento lateral (derecho tendrá signo positivo e izquierdo es signo negativo) y Dip slip es el desplazamiento sobre la dirección del echado (normal tendrá signo negativo, e inverso será signo positivo). RECMa es la raíz del error cuadrático medio del paso ascendente y RECMd es para el paso descendente.

Nº	X-initio km	Y-initio km	X-final km	Y-final km	Rt.lat. m	Dip Slip m	Echado °	Top km	Bottom km	Ascendente modelo mm		Descendente modelo mm		RECMA mm	RECMD mm
										Min	Máx	Min	Máx		
31	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0.005	0.2	76	0.0989	1.4011	-7.08691	91.96	-56.0037	75.8354	9.8667023415	5.0587827991
32	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0.005	0.2	78	0.0989	1.4011	-7.08691	91.96	-56.0037	75.8354	9.8667023415	5.0587827991
33	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0.005	0.2	80	0.0989	1.4011	-9.00622	92.0283	-58.6868	72.8539	10.7241398963	5.0587827991
34	6.6555	8.3728	7.2807	6.89	0	0.2	70	0.0989	2	-50.1527	43.3404	-91.0714	98.5516	10.8405807806	7.7574445031
35	6.6555	8.3728	7.2807	6.89	0	0.2	70	0.0989	2	-41.9912	50.0547	-90.5462	98.5175	10.6548096188	7.6093843066
36	6.6555	8.3728	7.2807	6.89	-0.1	0.2	70	0.0989	2	-41.0129	66.41	-104.8319	116.5592	10.2070511115	7.3339663262
37	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.077	0.086	70	0.02	1.9	-25.6795	32.0524	-51.7708	55.3001	9.8588366415	6.1237837392
38	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.077	0.086	70	0.01	1.9	-22.7638	38.9588	-51.442	55.8094	9.566460178	5.8538235858
39	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.077	0.086	70	0.01	1.9	-17.5175	40.4817	-50.1612	56.5226	9.566460178	5.5046169235
40	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.077	0.08	70	0.01	1.9	-17.3776	38.7786	-47.5042	53.5531	9.5707569739	5.5268792386
41	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.077	0.08	72	0.01	1.9	-18.3764	43.3805	-47.7175	52.4967	9.5848631474	5.5032580335
42	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.077	0.08	74	0.01	1.9	-19.4501	42.6615	-49.3017	51.8623	9.5995340516	5.4871565972
43	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.077	0.08	76	0.01	1.9	-20.626	40.8038	-49.8178	50.2952	9.6166178668	5.4653109899
44	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.077	0.08	78	0.01	1.9	-21.569	39.2915	-51.929	49.4774	9.6334651545	5.4494305021
45	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.077	0.08	80	0.01	1.9	-20.8587	39.0559	-51.7976	48.4835	9.6538152639	5.4335007821
46	6.6555	8.26	7.2	6.98	-0.077	0.08	80	0.01	1.4011	-11.0202	44.8663	-47.5498	39.0222	9.4872905673	5.428369268
47	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.1	0.08	80	0.01	1.9	-25.4618	43.0529	-55.9067	52.9179	9.644902396	5.4233498901
48	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.15	0.09	80	0.01	1.9	-37.0791	56.5384	-69.6088	66.7625	9.6829085879	5.4248168732
49	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.12	0.085	80	0.01	1.9	-29.805	48.7151	-61.8574	58.8762	9.6517125692	5.4054705853
50	6.66	8.26	7.2	6.98	-0.13	0.09	80	0.01	1.9	-32.1468	52.2163	-66.0215	62.9066	9.6611358138	5.3974133517
51	6.66	8.26	7.524	6.502	-0.13	0.09	80	0.01	1.9	-32.0591	52.5885	-68.8077	62.9969	10.0483720469	5.3028700641
52	6.66	8.26	7.524	6.502	-0.12	0.085	80	0.01	1.9	-29.725	49.0586	-64.4128	58.9357	9.9964599264	5.2505524407
53	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	-0.12	0.085	80	0.0989	1.4011	-8.0968	39.7115	-38.9584	34.8955	9.4685530763	5.2157245855
54	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	-0.08	0.095	80	0.0989	1.4011	-8.4059	41.3278	-38.8888	34.8321	9.5057056235	5.2432893829
55	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	-0.05	0.1	80	0.0989	1.4011	-8.6438	43.3807	-38.2641	34.1136	9.5592607705	5.295107436
56	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	-0.01	0.18	80	0.0989	1.4011	-15.8143	80.5485	-63.1678	55.5202	9.8302105923	4.9379331937
57	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	-0.01	0.15	80	0.0989	1.4011	-13.1567	67.0556	-52.7514	46.3847	9.7296155719	5.0741787
58	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	-0.001	0.17	80	0.0989	1.4011	-15.0644	76.4926	-59.0961	51.8387	9.821641452	5.0007184685
59	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0	0.17	80	0.0989	1.4011	-15.0815	76.5427	-59.031	51.768	9.8250209963	5.0035297386
60	6.6555	8.3728	7.2339	7.1868	0	0.17	80	0.0989	1.9	-15.3353	78.2152	-60.56	53.0935	10.093943934	4.8227761542

TABLA 3.5: Tabla (segunda parte), de los parámetros de entrada en Coulomb, para estimar la deformación causada por el sismo de Los Humeros. Rt.lat es la componente de desplazamiento lateral (derecho tendrá signo positivo e izquierdo es signo negativo) y Dip slip es el desplazamiento sobre la dirección del echado (normal tendrá signo negativo, e inverso será signo positivo). RECMA es la raíz del error cuadrático medio del paso ascendente y RECMD es para el paso descendente.

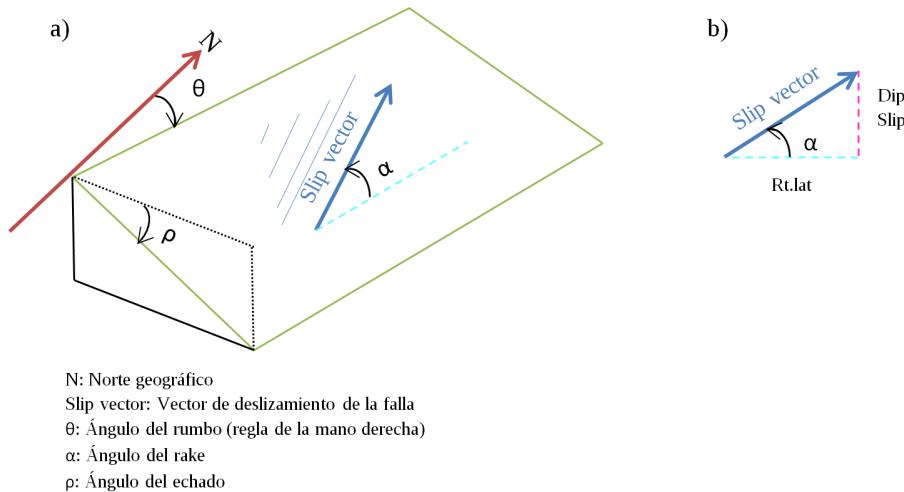


FIGURA 3.10: Esquema que ilustra los parámetros estructurales que definen el deslizamiento de una falla cuando ocurre su ruptura. Slip vector, es el vector de deslizamiento de la falla después de ocurrir la ruptura y está definido también por el ángulo alfa. Los términos Rt.lat hace referencia a la componente horizontal o lateral del vector de deslizamiento de la falla y el Dip slip es la componente vertical del deslizamiento de la falla o también es la proyección del echado sobre el plano de la falla.

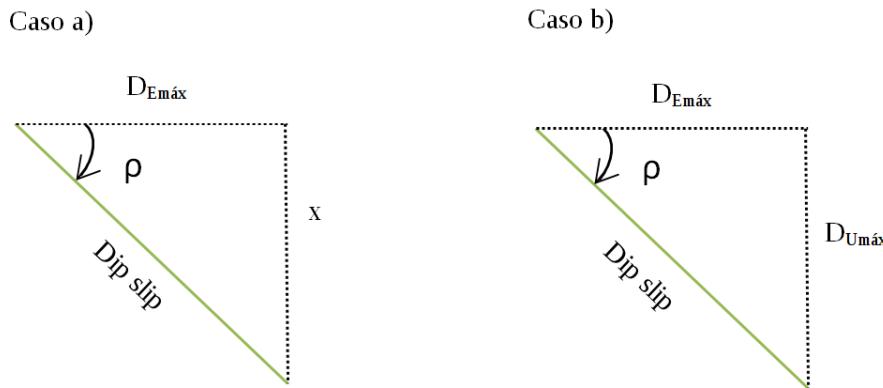


FIGURA 3.11: Esquema que muestra la geometría del Dip slip, con el cual puede calcularse con trinometría conociendo el valor del ángulo del echado (θ), la componente horizontal D_{Emx} y D_{Umx} de la deformación cosísmica 2D.

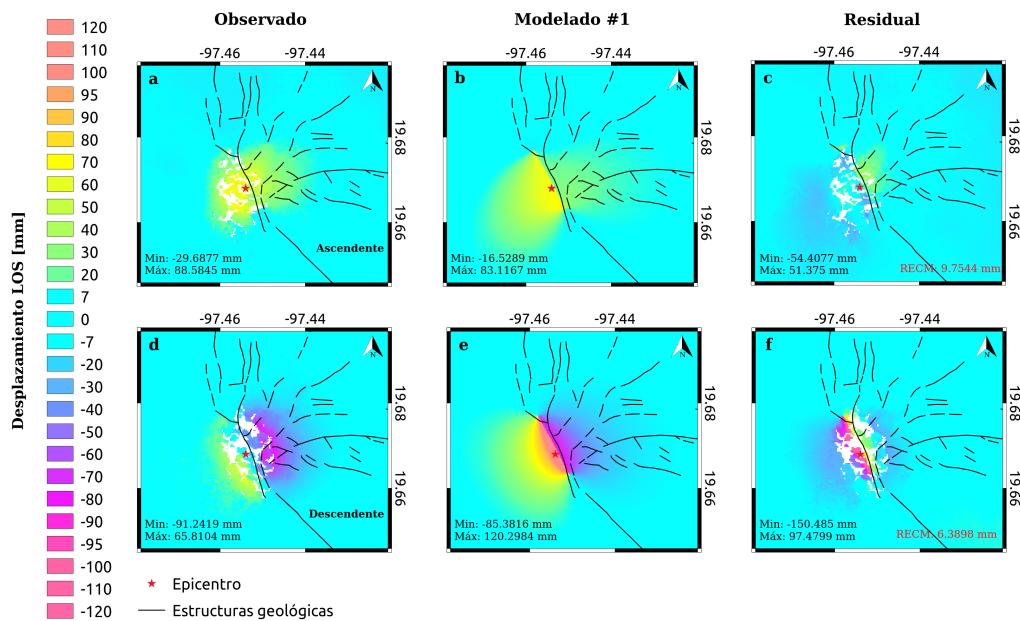


FIGURA 3.12: (a) Desplazamiento LOS observado del paso ascendente. (d) Desplazamiento LOS observado del paso descendente. (b) y (e) Desplazamiento LOS obtenido mediante el modelado directo en Coulomb. Se presentan los resultados de la iteración 56 (Tabla 3.4). (c) y (f) Residuos entre el desplazamiento LOS observado y modelado. En la esquina inferior derecha se muestra la raíz del error cuadrático medio (RECM).

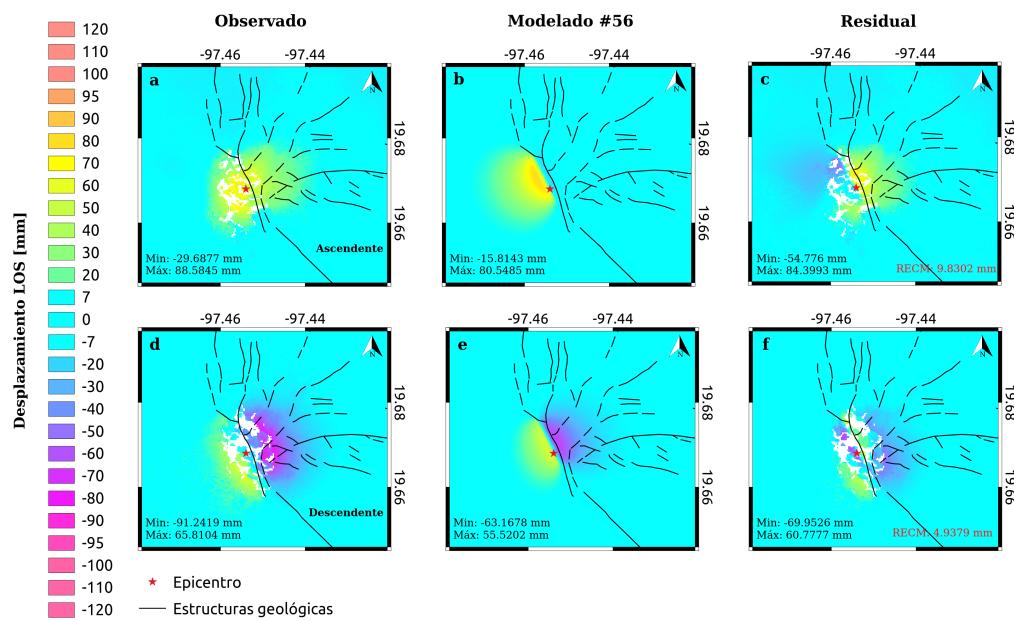


FIGURA 3.13: (a) Desplazamiento LOS observado del paso ascendente. (d) Desplazamiento LOS observado del paso descendente. (b) y (e) Desplazamiento LOS obtenido mediante el modelado directo en Coulomb. Se presentan los resultados de la iteración 56 (Tabla 3.5). (c) y (f) Residuos entre el desplazamiento LOS observado y modelado. En la esquina inferior derecha se muestra la raíz del error cuadrático medio (RECM).

Capítulo 4

Resultados

Como resultado de esta tesis, fue posible estimar la deformación producida por el sismo de Los Humeros (2016-02-08, $M_w = 4.2$), utilizando DInSAR (ascendentes: 2016-01-29 y 2016-02-10; descendentes: 2016-02-07 y 2016-02-19), lo cual arrojó los siguientes productos:

- 4.1 Mapas de deformación (paso ascendente y descendente) en dirección de LOS.
- 4.2 Mapas de deformación vertical y horizontal (Este-Oeste).

4.1. Mapas de la deformación en LOS (paso ascendente y descendente)

- Paso ascendente: La deformación de manera espacial se presenta en dos bloques, denotados como Este y Oeste, aproximadamente de uno y otro lado de la falla de Los Humeros. Ambos bloques presentan deformación en la dirección del radar (valores positivos en la dirección de la LOS), Fig. 3.6b.
 - Bloque Oeste: Presenta deformación en LOS positiva (levantamiento) con un máximo de 88.58 mm.
 - Bloque Este: Presenta deformación en LOS positiva (levantamiento) con un máximo de 75.6 mm.
- Paso descendente: La deformación se presenta también en dos bloques, al lado Este y Oeste de la falla de Los Humeros, Fig. 3.6d.
 - Bloque Oeste: Presenta deformación en LOS positiva con un máximo de 65.81 mm.
 - Bloque Este: Presenta deformación en LOS negativa con un máximo de 91.24 mm.

El comportamiento descrito, puede confirmarse en la Fig. 4.1, donde se muestran el desplazamiento en LOS a lo largo de una sección casi paralela al trazo de la falla Los Humeros para el paso ascendente (puntos en magenta), y descendente (puntos en cian).

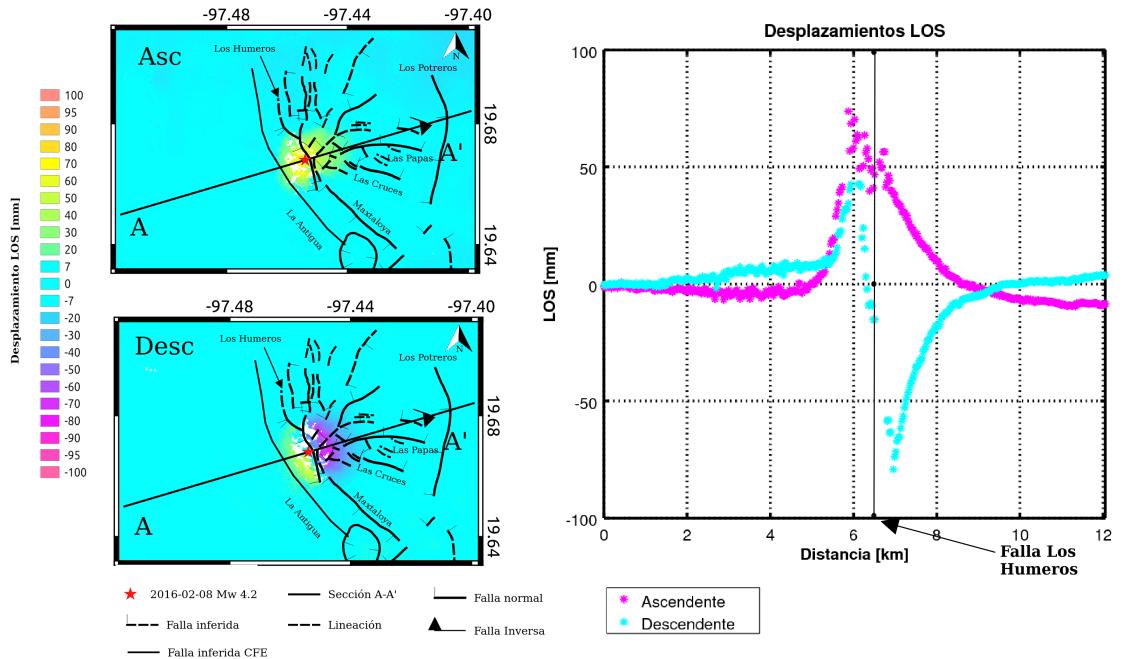


FIGURA 4.1: (Izquierda) Mapas de desplazamiento en la LOS para paso ascendente (Asc) y descendente (Desc), donde se muestra la ubicación de la sección A-A'. (Derecha) Desplazamiento en la LOS a lo largo de la sección A-A'. Magenta: paso ascendente, Cian: paso descendente. La intersección de la sección con la falla Los Humeros, está indicada por la línea continua negra.

4.2. Mapas de deformación vertical y horizontal (Este-Oeste)

- Componente D_U : Ver Fig. 3.8a
 - Bloque Este: Presenta hundimiento (valores negativos) con un máximo de -40.63 mm.
 - Bloque Oeste: Presenta levantamiento (valores positivos) con un máximo de 86.32 mm.
- Componente D_E : Ver Fig. 3.8b
 - Bloque Este: Presenta desplazamiento en la dirección Oeste (valores negativos) con un máximo de -111.77 mm.
 - Bloque superior Oeste: Presenta desplazamiento en la dirección Oeste (valores negativos) con un máximo de -75.26 mm.
 - Bloque inferior Oeste: Presenta desplazamiento en la dirección Este (valores positivos) con un máximo de 46.11 mm.

4.3. Análisis

4.3.1. Modelado con Coulomb

Con el objeto de confirmar los hallazgos obtenidos a partir de los mapas de deformación vertical, D_U , y horizontal, D_E , se utilizó el software Coulomb 3.3.1 para modelar los mapas de deformación esperada para un sismo con mecanismo inverso, utilizando los parámetros reportados por Lermo Samaniego et al., (2016) (rumbo 154°, echado 64° y rake de 56°), datos estructurales de campo y análisis estructural por Javier Hernández-Rojas y Norini et al., (2015), además de la distribución espacial del campo de deformación presente en los interferogramas calculados. Se realizaron 60 iteraciones, los cuales se muestran en el Apéndice ??.

Los valores calculados del desplazamiento del efecto cosísmico mediante Coulomb, son compatibles con los valores de los interferogramas obtenidos mediante DInSAR. Tal como se muestran en los modelos número 1 y 56 (Figuras ?? y ??). Para los modelos mencionados, los parámetros corresponden a los siguientes datos estructurales:

- Modelo No. 1: rumbo 152.76°, echado 64°, rake 56° (Rt.lat: -0.1158 m, y Dip slip: 0.1717 m). Estructuralmente representa a una falla de tipo inversa con componente lateral izquierda. Los resultados del modelo muestran deformaciones compatibles con los datos observados InSAR, aunque para el paso descendente modelado en los valores positivos se sobreestiman casi al doble comparado a lo observado con InSAR. Como se observa en los residuales del paso ascendente, en el bloque Oeste

presenta valores menores de residuales, mientras que en el Este, espacialmente presenta un área pequeña de valores altos de residuales. Aunque en el paso descendente, este presenta en la parte central de la falla, valores mayores de residuales, donde es evidente que se sobreestimaron esos datos en el modelo.

- Modelo No. 52: rumbo 144° , echado 80° , rake 56° (Rt.lat: -0.01 m, y Dip slip: 0.18 m). Estructuralmente representa a una falla de tipo inversa con componente lateral izquierda. Los resultados del modelo muestran deformaciones compatibles con los datos observados InSAR. En el paso ascendente, fue casi imposible recuperar la deformación presente en el bloque Este, por lo tanto este bloque presenta valores grandes en el residual. Mientras que en el paso descendente, los residuales presentes disminuyeron comparados con lo calculado en el modelo número 1, esto se refleja en el RECM calculado.

Sin embargo, los resultados de estas 60 iteraciones presentan residuales elevados, lo cual, indica que representan los efectos de la topografía abrupta de la zona, la complejidad del sistema de fallas que conforman a Los Humeros, ya que estos efectos no fueron considerados durante el modelado directo. La falla presenta una componente lateral, cuyos efectos se ven reflejados en el mapa de desplazamiento en la dirección Este-Oeste, en el bloque Oeste superior izquierdo, donde un patrón de deformación negativa (hacia el Oeste) evidencia esta componente lateral, generando este tipo de desplazamiento no uniforme, y refleja la complejidad de la geometría de la falla de Los Humeros. Para los parámetros estructurales, que tiene gran influencia en poder estimar de mejor manera la deformación sísmica son el ángulo del echado y el rake, y son consistentes con lo que reportaron en campo Javier Herez y el análisis estructural mostrado en Norini et al., (2015), como lo revelaron los modelos 1 y 56, a comparación del resto de los modelos donde los residuales eran exagerados o variaban muy poco respecto a estos modelos.

Lo anterior puede ser causado por diversas razones, entre ellas: a) El mecanismo focal debe ser mejor constreñido debido a que varias fuentes reportaron un mecanismo inverso pero utilizaron epicentro, rake, rumbo y echado distintos (Lermo Samaniego et al., (2016), Rodríguez-Pérez (Comunicación personal), Iglesias-Mendoza (Comunicación personal)). Utilizando un modelo de velocidades adecuado y definiendo con mayor calidad la profundidad y ubicación del epicentro, podría mejorar el ajuste entre el modelo y la observación. b) La deformación mapeada con DInSAR sea una deformación compleja, esto es, compuesta no solamente por la deformación debida al sismo.

4.3.1.1. Mecanismo focal DInSAR vs datos sísmicos

- Del mapa de desplazamiento vertical (Figura a): El bloque Oeste presenta levantamiento, siendo mayor en magnitud contra el bloque Este (hundimiento), por lo que el mecanismo de falla es inverso. Considerando lo anterior, el echado de la falla tendría que estar hacia el bloque Oeste. Esto coincide con el mecanismo que reporta

Lermo Samaniego et al., (2016), pero no coincide con el mapa geológico donde la falla Los Humeros es normal y echado hacia el Este. Ahora, si consideramos que el mecanismo no es inverso, sino normal, y el echado hacia el Este. El bloque Oeste presenta mayor magnitud de deformación, posiblemente a que existe una contribución de una inflación, que fue exacerbada durante el sismo, recientemente por Arzate et al., (2018) (también mencionan este cuerpo en Lermo Samaniego et al., (2016)) se ha propuesto que debajo de este bloque existe un cuerpo propilítico que actúa como un cuerpo intrusivo, esto quiere decir, podría estar funcionando como pivote en la rotación del bloque Oeste y como soporte, lo cual podría explicar su levantamiento. En el caso de la componente Este-Oeste derivada de DInSAR, pensando en esta inflación, tendría que presentar una contribución mayormente en dirección al Este, esto se vería en el bloque Este (bloque que cae), mientras que el bloque Oeste tendría un desplazamiento en dirección Oeste.

- Del mapa de desplazamiento horizontal (Este-Oeste) (Figura b): el patrón de desplazamiento del bloque Este y bloque inferior Oeste, indican claramente presencia de la componente lateral en el movimiento cosísmico, una compresión, por lo que el mecanismo observado sea oblicuo, con movimiento lateral izquierdo. Aunque, Lo que no coincide con esto es el movimiento en el bloque superior Oeste, cuyo movimiento contribuye a que el campo de desplazamiento sea complejo. Sin embargo, no hay que descartar del todo los posibles errores (atmosféricos remanentes, decorrelación, de desenvolvimiento, etc.).
- El campo de desplazamiento obtenido es resultado de varios procesos (no solamente movimiento en la falla, efecto cosísmico y postsísmico), ya que el sismo presenta una magnitud pequeña en términos de detección con InSAR. Ya que la magnitud mínima teórica de un evento sísmico para que su campo de desplazamiento sea detectado es de 4.5 (en condiciones ideales, el movimiento sea vertical, sismo superficial, ambiente sedimentario, poco ruido) (Earle et al., 2001; Dawson et al., 2008; Sarychikhina et al., 2015). Pero de acuerdo a trabajos más recientes, como Merryman Boncori, (2019), es posible detectar efectos cosísmicos para magnitudes a $M_w = 4$. Es muy probable que otros procesos "simultáneos" contribuyan al campo de desplazamiento para que este sea detectable. Para este evento, dichos procesos pueden ser: la contribución de los cambios de esfuerzos locales debido a las zonas de producción del campo, esto es que, debido a los cambios de presión de poros por la extracción e inyección contribuyen al campo de esfuerzos locales, y esto se ve reflejado en una deflación o subsidencia en la zona de producción (bloque Este de la falla de Los Humeros); y un posible cuerpo que está actuando como un cuerpo intrusivo o propilítico, esto es, el efecto de la resurgencia que presenta Los Humeros (bloque Oeste de la falla de Los Humeros). Entonces, existe un campo de esfuerzo tectonomagnético (esfuerzo local) que prevalece sobre el esfuerzo regional, originando el carácter actual de falla tipo inversa a Los Humeros.

4.3.2. Deformación del campo geotérmico con otras técnicas interferométricas

En el marco del proyecto liderado por GEMex se presentaron resultados relacionados con la estimación de la evolución espacio temporal de la deformación en el campo de Los Humeros. El período de estudio comprendió las fechas en que el satélite ENVISAT cubre la zona de estudio, entre 2002 y 2007. Al respecto, Békési et al., (2018) muestran los resultados de aplicar la técnica PSInSAR (Hooper, Segall y Zebker, 2007b), es decir, calculan las series de tiempo para cada pixel y el mapa de deformación promedio en el campo. Békési et al., (2018) reporta hundimientos máximos del orden de -8 y se positiva de la misma magnitud (+8). Los resultados del patrón espacial de subsidencia (alrededores de los pozos productores) coincide con la se negativa presente en el efecto cosísmico que estimamos (bloque Este de la falla), aunque no en magnitud. En ambos trabajos es posible detectar una deflación debido al cambio de los esfuerzos local debio a los pozos de producción.

Capítulo 5

Conclusiones

La técnica de DInSAR mediante el uso de imágenes SAR de Sentinel-1A, se utilizó con éxito para obtener el campo de desplazamiento cosísmico causado por el sismo de Los Humeros (08-02-2016, $M_w = 4.2$). Las interferogramas de paso ascendente y descendente han sido obtenidas, lo que permitió estimar la componente vertical y horizontal (Este-Oeste) del vector de desplazamiento cosísmico.

Los resultados interferométricos reportan levantamientos máximos de orden de 86.32 mm, hundimiento máximo de orden de -40.63 mm y desplazamiento horizontal hacia el Oeste máximo de -111.77 mm y en dirección hacia el Este de orden máximo de 46.11 mm.

El modelado directo mediante el software Coulomb 3.3.1 usando los parámetros de falla cosísmica estimados por Lermo Samaniego et al., (2016), fue complicado en reproducir sin residuales importantes los datos interferométricos. La simplicidad para el modelo (geometría simple, solo una falla con el desplazamiento uniforme a lo largo de su plano), generaron errores en estimación de los parámetros de la falla del efecto cosísmico, así como los posibles errores en los datos de DInSAR pueden ser causantes de tal resultado. Aunque los valores calculados con Coulomb son compatibles con los valores de los interferogramas obtenidos mediante DInSAR. El modelado directo realizado no es tan robusto, debido a los altos valores en los residuales.

La magnitud del evento ($M_w = 4.2$) teóricamente no es suficiente para producir el desplazamiento del terreno y poder ser detectable por DInSAR, lo que junto con el campo complejo de desplazamiento obtenido con DInSAR, es difícil de explicar con sólo considerar el movimiento cosísmico a lo largo de una falla, por lo que indica posible contribución de otros procesos (mecanismos) al campo de desplazamiento cosísmico. Aunque ya es reportado por otro trabajo que fue posible estimar efectos cosísmicos para una magnitud de $M_w = 4$.

Posibles procesos que contribuyen al campo de deformación cosísmica son el efecto de la resurgencia que presenta Los Humeros; los cambios de esfuerzos locales debido a la zonas de producción del campo, esto es que, debido a los cambios de presión de poros por la extracción e inyección contribuyen al campo de esfuerzos locales, esto se ve claro en el mapa de velocidades LOS interpolados (PSI), se detecta una deflación, y en el bloque derecho del mapa de desplazamientos Arriba-Abajo de este trabajo. Entonces, existe un esfuerzo tectonomagnético (esfuerzo local) que prevalece sobre el esfuerzo regional,

originando el carácter actual de la falla de Los Humeros de tipo inversa. Además que es probable que se esté sumando el efecto postsísmico del evento.

La sismicidad que se ha reportado, a partir de que entró en operación el campo, es que existe una sismicidad inducida (un 90 %) debido al campo. Como lo reportado en Lermo Samaniego et al., (2016), es que previo a que ocurriera el sismo de Los Humeros, los gatos de los pozos aumentaron, siendo anómalo esta actividad, indicando que un detonador del sismo haya sido la sobre inyección.

Recomendaciones a futuro de este trabajo incluyen, el cálculo de un tercer interferograma que permita conocer la verdadera magnitud del desplazamiento en la dirección Norte-Sur; asegurar que el mecanismo focal presenta uno de tipo inverso, como bien se mencio en el trabajo de Lermo Samaniego et al., (2016) esta no es la única solu ya que existen otras metodologías para estimar los parámetros de fuente y valores del mecanismos focal, por ejemplo, la inversión del tensor de momento (Dreger, 2003). Con lo anterior, mejoraría los parámetros que alimentan al modelado con Coulomb, y así obtener parámetros precisos que definan el sismo de Los Humeros, y adicionalmente realizar un modelado inverso de los datos DInSAR mediante Geodetic Bayesian Inversion Software (Bagnardi y Hooper, 2018) considerando una deformación compuesta.

Apéndice A

Disponibilidad de imágenes SAR en Los Humeros

A.1. Muestro en tiempo de imágenes SAR

Tablas en las que se muestran fechas y datos del sensor SAR de diferentes misiones satelitales que cubren la zona de la caldera de Los Humeros.

Misión	Sensor/Banda	Propietario	Modo adquisición	R [m]	Área [km ²]	T [días]	Actividad	No. Img	Fecha [dd/mm/yyyy]	Paso	Frame	Path/Track
ENVISAT	ASAR/C $\lambda = 5.6 \text{ [cm]}$ $f = 5.3 \text{ [GHz]}$	European Space Agency (ESA)	Image Mode (IM)	20x5	100x100	35	2002-2012	1	04/08/03			
								2	06/17/03			
								3	08/26/03			
								4	11/04/03			
								5	01/13/04			
								6	03/23/04			
								7	06/01/04			
								8	07/06/04			
								9	08/10/04			
								10	10/19/04			
								11	12/28/04	D	3213	212
								12	03/08/05			
								13	06/21/05			
								14	08/30/05			
								15	11/08/05			
								16	01/17/06			
								17	02/21/06			
								18	03/28/06			
								19	01/02/07			
								20	02/06/07			
								21	03/13/07			

TABLA A.1: Tabla en la que se muestra la disponibilidad de imágenes SAR sobre la caldera de Los Humeros, para la misión ENVISAT. La R, indica la resolución espacial; la T, indica el tiempo de adquisición entre imágenes. D, es para paso descendente.

Misión	Sensor/Banda	Propietario	Modo adquisición	R [m]	Área [km ²]	T [días]	Actividad	No. Img	Fecha [dd/mm/yyyy]	Paso	Frame	Path/Track
TerraSAR-X	Sin nombre/X $\lambda = 3.1 \text{ [cm]}$, $f = 9.6 \text{ [GHz]}$	German Aerospace Center (DLR)	Strip-Map Scan-SAR	3x3 18.5x18.5	30x50 100x150	11	2007-Presente	1	01/03/09	D		
								1 2 1 2	14/08/09 05/09/09 01/09/13 29/09/13	Sin información A	Sin información	

TABLA A.2: Tabla en la que se muestra la disponibilidad de imágenes SAR sobre la caldera de Los Humeros, para la misión TerraSAR-X. La R, indica la resolución espacial; la T, indica el tiempo de adquisición entre imágenes; D, es para paso descendente, y A, es el paso ascendente.

Misión	Sensor/Banda	Propietario	Modo adquisición	R [m]	Área [km ²]	T [días]	Actividad	No. Img	Fecha [dd/mm/yyyy]	Paso	Frame	Path/Track
ALOS-1	PALSAR/L $\lambda = 23.6 \text{ [cm]}$, $f = 1.27 \text{ [GHz]}$	Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA)	Fine Beam Single Fine Beam Dual Fine Beam Single Fine Beam Dual Scan-SAR Wide Beam	5x10 5x20 5x10 5x20 5x10 5x20 5x10 5x20 5x10 5x20 5x10 5x20 1	70x70 5x10 5x20 5x10 5x20 5x10 5x20 5x10 5x20 5x10 5x20 5x10 100x100	46 2006-2012	2006-2012	1	06/02/07	A	380	183
								2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3 4 5 6 7 8	09/08/07 24/09/07 26/03/08 11/08/08 26/09/08 01/04/10 17/08/10 02/10/10 02/01/11 17/02/11 17/11/11 21/09/07 06/11/07 08/02/09 02/12/06 05/12/07 06/03/08 21/04/08 07/12/08 09/09/09 10/12/09 13/12/10	D	3220	494
ALOS-2	PALSAR/L $\lambda = 23.6 \text{ [cm]}$, $f = 1.27 \text{ [GHz]}$	Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA)	Spotlight Scan-SAR Wide Beam	3x3 100x100	25x25 350x355	14 2014-presente	2014-presente	1	15/03/15	D	3220	153
								2 3 4 5 6 1 2 3 4 5 1 2 3 4 5 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17	29/03/15 13/03/16 08/05/16 17/07/16 29/01/17 03/10/14 20/02/15 02/10/15 19/02/16 30/09/16 14/09/14 26/10/14 18/01/15 12/04/15 24/05/15 05/07/15 02/08/15 13/09/15 06/12/15 17/01/16 28/02/16 10/04/16 22/05/16 31/07/16 11/09/16 23/10/16 04/12/16	A	380	56

TABLA A.3: Tabla en la que se muestra la disponibilidad de imágenes SAR sobre la caldera de Los Humeros, para las misiones ALOS-PALSAR-1/2. La R, indica la resolución espacial; la T, indica el tiempo de adquisición entre imágenes; D, es para paso descendente, y A, es el paso ascendente.

Misión	Sensor/Banda	Propietario	Modo adquisición	R [m]	Área [km ²]	T [días]	Actividad	No. Img	Fecha [dd/mm/yyyy]	Paso	Frame	Path/Track
Sentinel-1A	SAR/C $\lambda = 5.6 \text{ [cm]}$ $f = 5.405 \text{ [GHz]}$	European Space Agency (ESA)	Interferometric Wide (IW)	5x20	250x150	12	2014-presente	1	26/04/17	D	526	143
								2	14/04/17			
								3	02/04/17			
								4	21/03/17			
								5	09/03/17			
								6	25/02/17			
								7	13/02/17			
								8	01/02/17	528		
								9	20/01/17	526		
								10	08/01/17	528		
								11	27/12/16	526		
								12	15/12/16	528		
								13	03/12/16	526		
								14	09/11/16			
								15	28/10/16	528		
								16	16/10/16	526		
								17	04/10/16	528		
								18	22/09/16	530		
								19	10/09/16			
								20	29/08/16			
								21	17/08/16			
								22	05/08/16	528		
								23	24/07/16			
								24	12/07/16			
								25	30/06/16	529		
								26	06/06/16			
								27	25/05/16	528		
								28	13/05/16	529		
								29	01/05/16			
								30	19/04/16	527		
								31	07/04/16	528		
								32	26/03/16	527		
								33	14/03/16	528		
								34	02/03/16	527		
								35	19/02/16	528		
								36	07/02/16			
								37	26/01/16			
								38	14/01/16	527		
								39	21/12/15			
								40	09/12/15	529		
								41	27/11/15	528		
								42	15/11/15	529		
								43	03/11/15			
								44	22/10/15	530		
								45	10/10/15			
								46	28/09/15			
								47	16/09/15	529		
								48	04/09/15	530		
								49	23/08/15	529		
								50	11/08/15			
								51	30/07/15			
								52	18/07/15			
								53	06/07/15			
								54	24/06/15			
								55	12/06/15			
								56	31/05/15			
								57	07/05/15	528		
								58	25/04/15			
								59	13/04/15			
								60	01/04/15			
								61	20/03/15			
								62	08/03/15			
								63	24/02/15			
								64	12/02/15			
								65	31/01/15			
								66	19/01/15			
								67	07/01/15			
								68	26/12/14			
								69	14/12/14			
								70	02/12/14			
								71	08/11/14			
								72	27/10/14	529		
								73	15/10/14	528		
								74	03/10/14	529		

TABLA A.4: Tabla en la que se muestra la disponibilidad de imágenes SAR sobre la caldera de Los Humeros, para las misión Sentinel-1A, primera parte. La R, indica la resolución espacial; la T, indica el tiempo de adquisición entre imágenes; D, es para paso descendente, y A, es el paso ascendente.

Misión	Sensor/Banda	Propietario	Modo adquisición	R [m]	Área [km ²]	T [días]	Actividad	No. Img	Fecha [dd/mm/yyyy]	Paso	Frame	Path/Track
Sentinel-1A	SAR/C $\lambda = 5.6 \text{ [cm]}$ $f = 5.405 \text{ [GHz]}$	European Space Agency (ESA)	Interferometric Wide (IW)	5x20	250x150	12	2014-presente	1	29/04/17	A	58	5
								2	17/04/17		58	
								3	05/04/17		58	
								4	02/04/17		59	
								5	24/03/17		58	
								6	12/03/17		58	
								7	23/01/17		58	
								8	30/12/16		58	
								9	06/12/17		58	
								10	12/11/16		58	
								11	19/10/16		58	
								12	25/09/17		58	
								13	18/12/16		59	
								14	24/11/16		59	
								15	31/10/16		59	
								16	07/10/16		59	
								17	08/08/16		58	
								18	15/07/16		58	
								19	28/05/16		59	
								20	22/04/16		58	
								21	10/04/16		58	
								22	29/03/16		58	
								23	17/03/16		58	
								24	05/03/16		59	
								25	10/02/16		58	
								26	29/01/16		58	
								27	17/01/16		58	
								28	05/01/16		58	
								29	24/12/15		58	
								30	12/12/15		58	
								31	03/06/15		59	
								32	22/05/15		59	
								33	28/04/15		59	
								34	16/04/15		59	
								35	04/04/15		59	
								36	23/03/15		59	
								37	11/03/15		59	
								38	27/02/15		59	
								39	15/02/15		59	
								40	03/02/15		59	
								41	22/01/15		59	
								42	10/01/15		59	
								43	29/12/14		59	
								44	17/12/14		59	
								45	05/12/14		59	
								46	23/11/14		59	
								47	11/11/14		59	
								48	30/10/14		59	
								49	18/10/14		59	
								50	06/10/14		59	

TABLA A.5: Tabla en la que se muestra la disponibilidad de imágenes SAR sobre la caldera de Los Humeros, para las misión Sentinel-1A, segunda parte. La R, indica la resolución espacial; la T, indica el tiempo de adquisición entre imágenes; D, es para paso descendente, y A, es el paso ascendente.

Apéndice B

Resultados con Coulomb 3.3.1

B.1. Resultados del paso ascendente

Mosaicos en los que se muestran los resultados del modelado directo del efecto cosís-mico del sismo del 8 de febrero de 2016, en el interior de la caldera de Los Humeros. Se muestran los resulados del paso ascendente. La columna derecha muestra el modelos y su número de iteración, y la columna izquierda muestra el residual del modelo. Los valo-res máximos y mínimos del modelado, y la ríaz del error cuadrático medio, consultar las Tablas 3.4 y 3.5.

B.2. Resultados del paso descendente

Mosaicos en los que se muestran los resultados del modelado directo del efecto cosís-mico del sismo del 8 de febrero de 2016, en el interior de la caldera de Los Humeros. Se muestran los resulados del paso descendente. La columna derecha muestra el modelos y su número de iteración, y la columna izquierda muestra el residual del modelo. Los valo-res máximos y mínimos del modelado, y la ríaz del error cuadrático medio, consultar las Tablas 3.4 y 3.5.

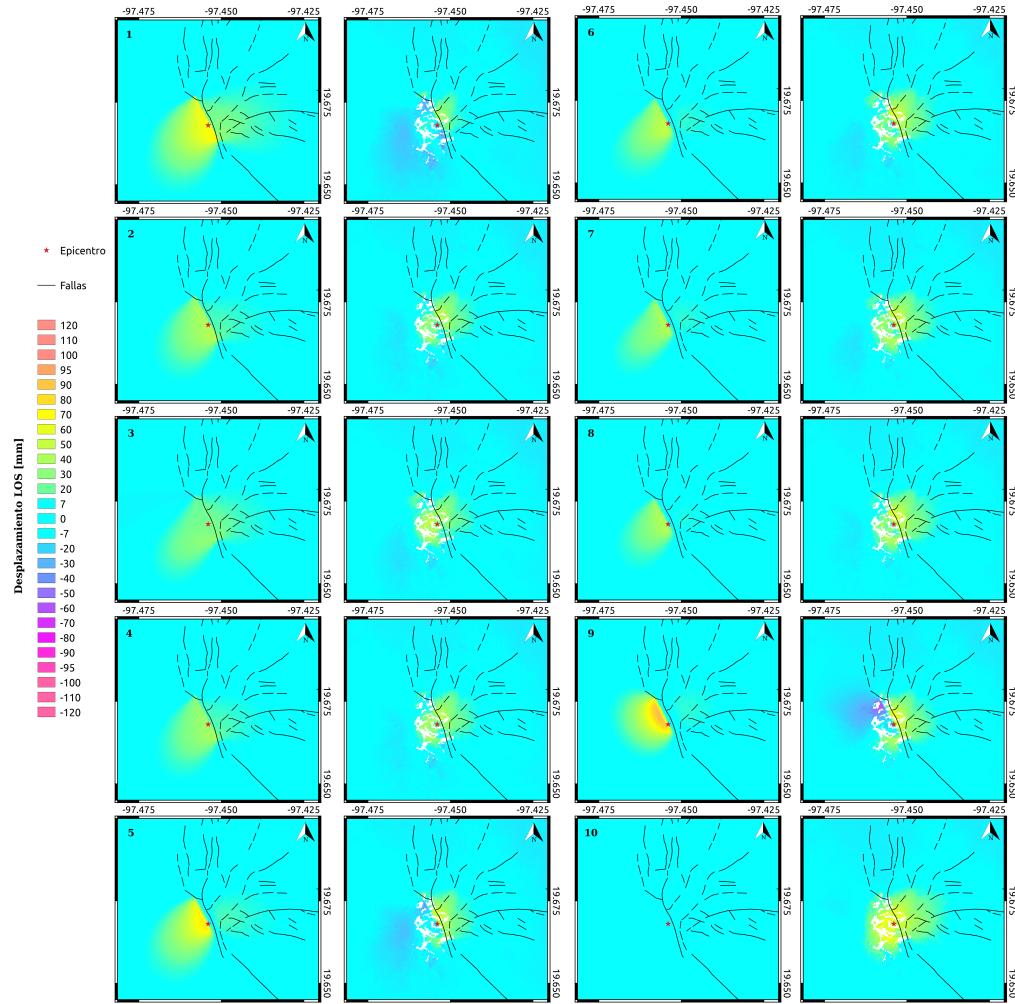


FIGURA B.1: Mosaico del modelado en Coulomb del paso ascendente No. 1-10.

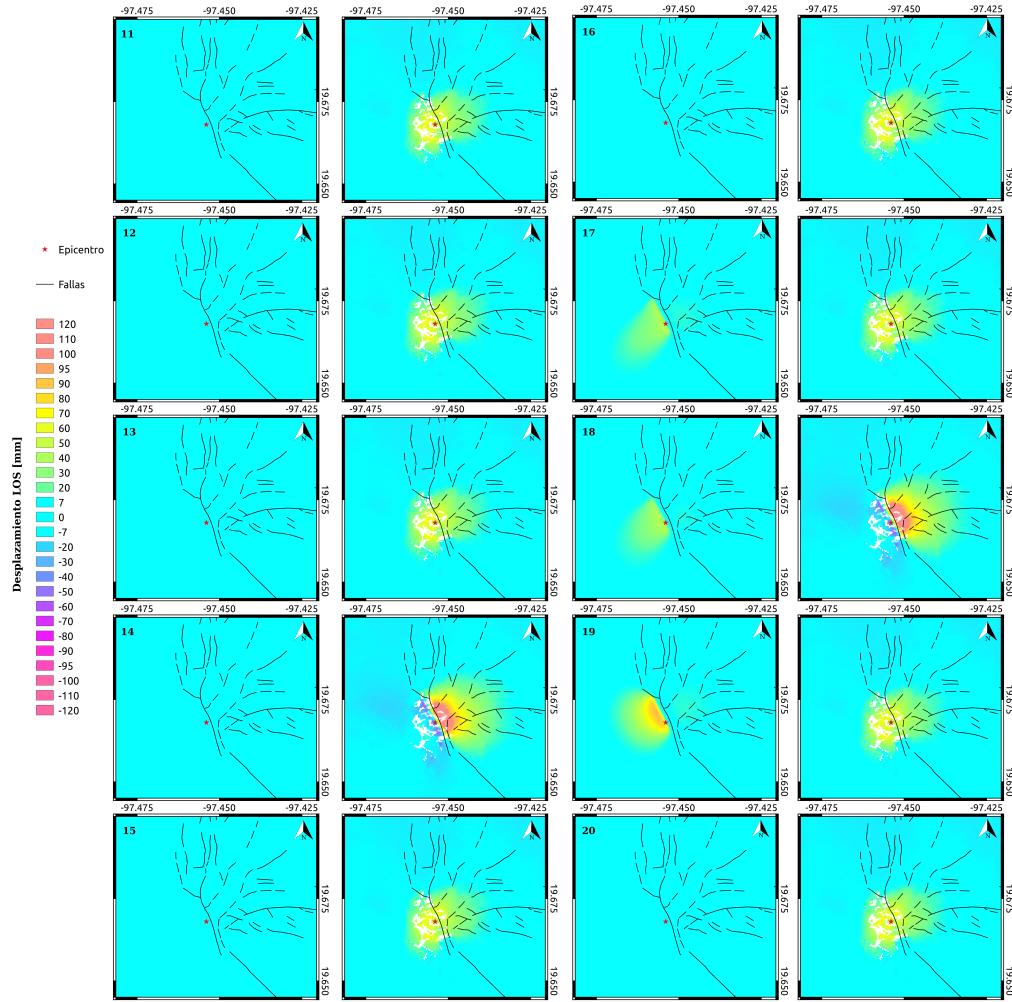


FIGURA B.2: Mosaico del modelado en Coulomb del paso ascendente No. 11-20.

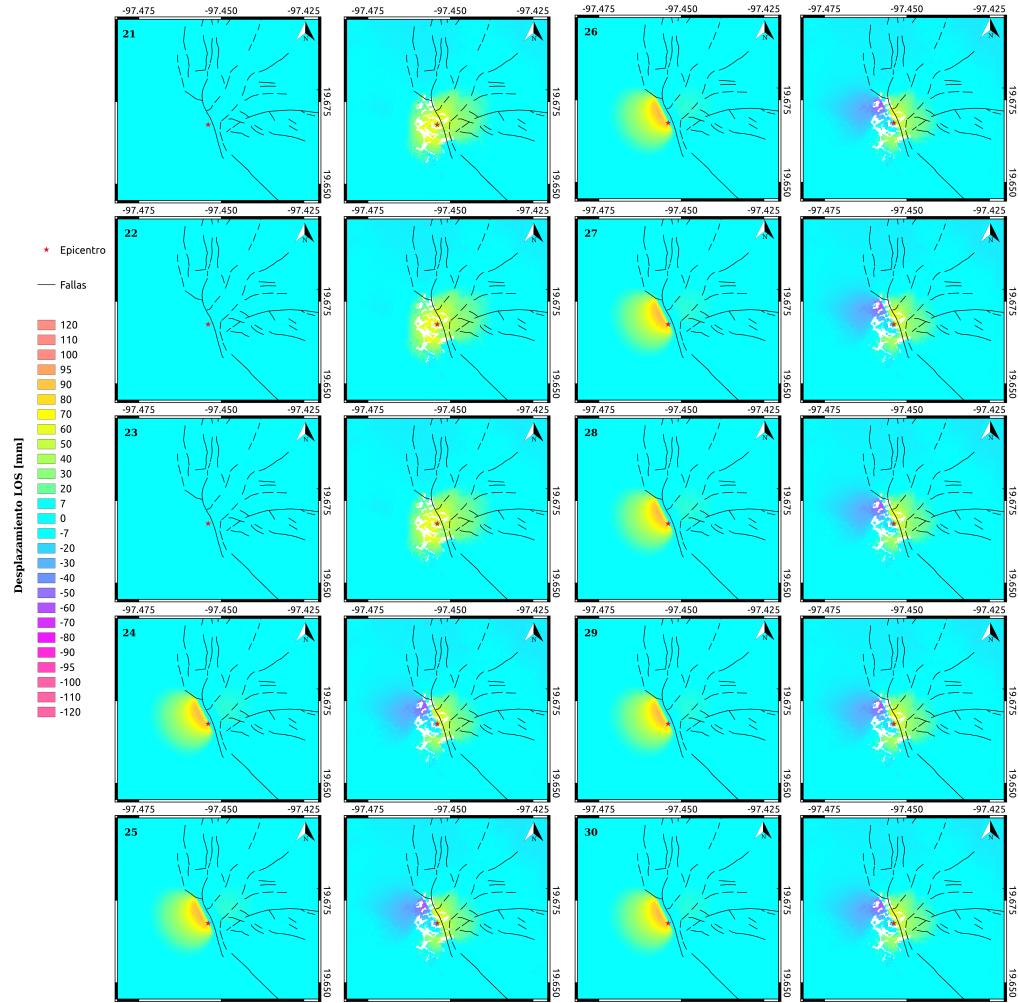


FIGURA B.3: Mosaico del modelado en Coulomb del paso ascendente No. 21-30.

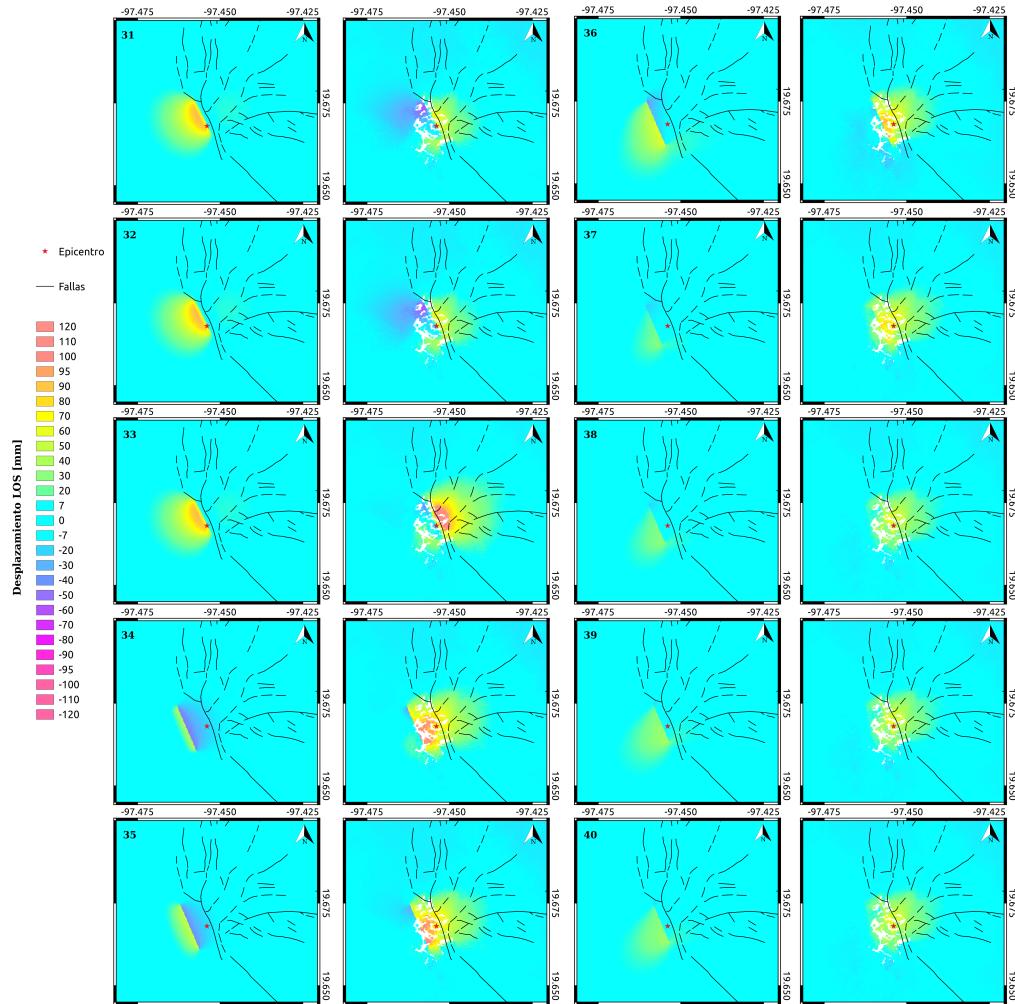


FIGURA B.4: Mosaico del modelado en Coulomb del paso ascendente No. 31-40.

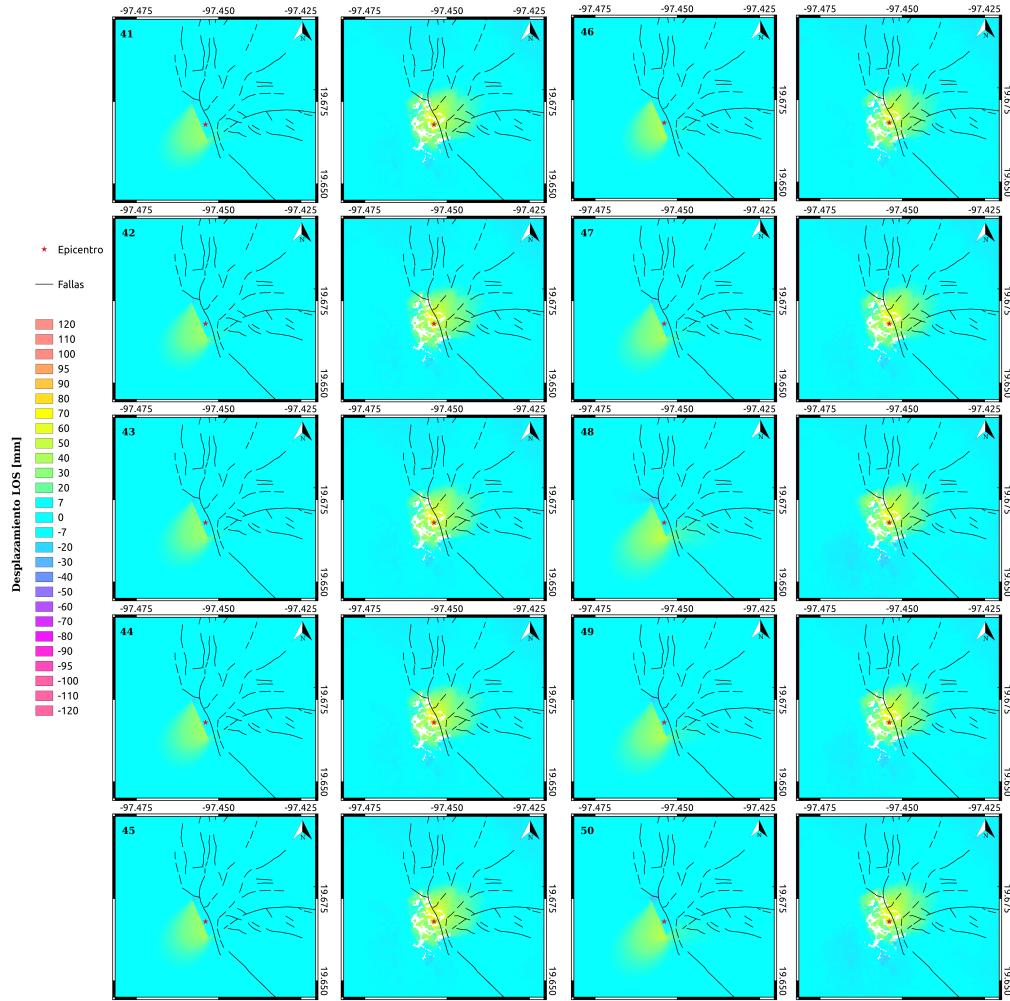


FIGURA B.5: Mosaico del modelado en Coulomb del paso ascendente No. 41-50.

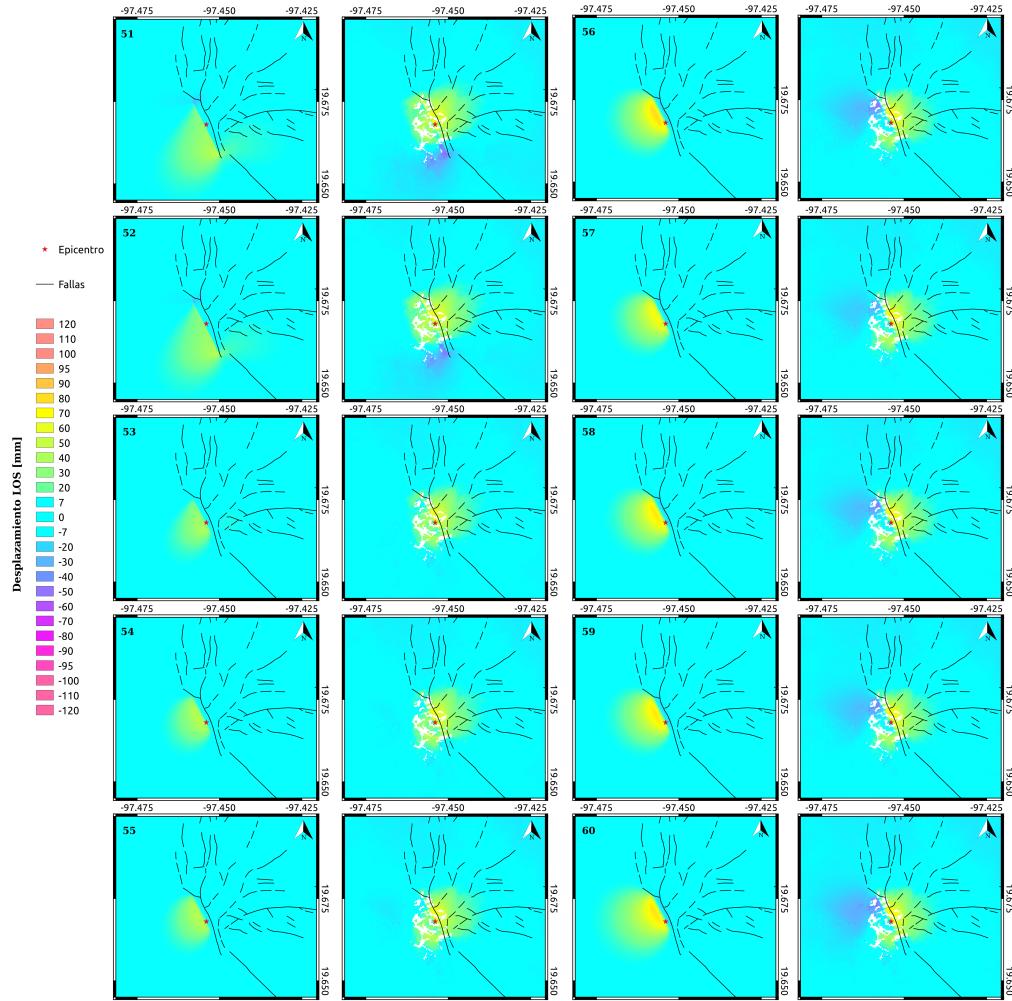


FIGURA B.6: Mosaico del modelado en Coulomb del paso ascendente No. 51-60.

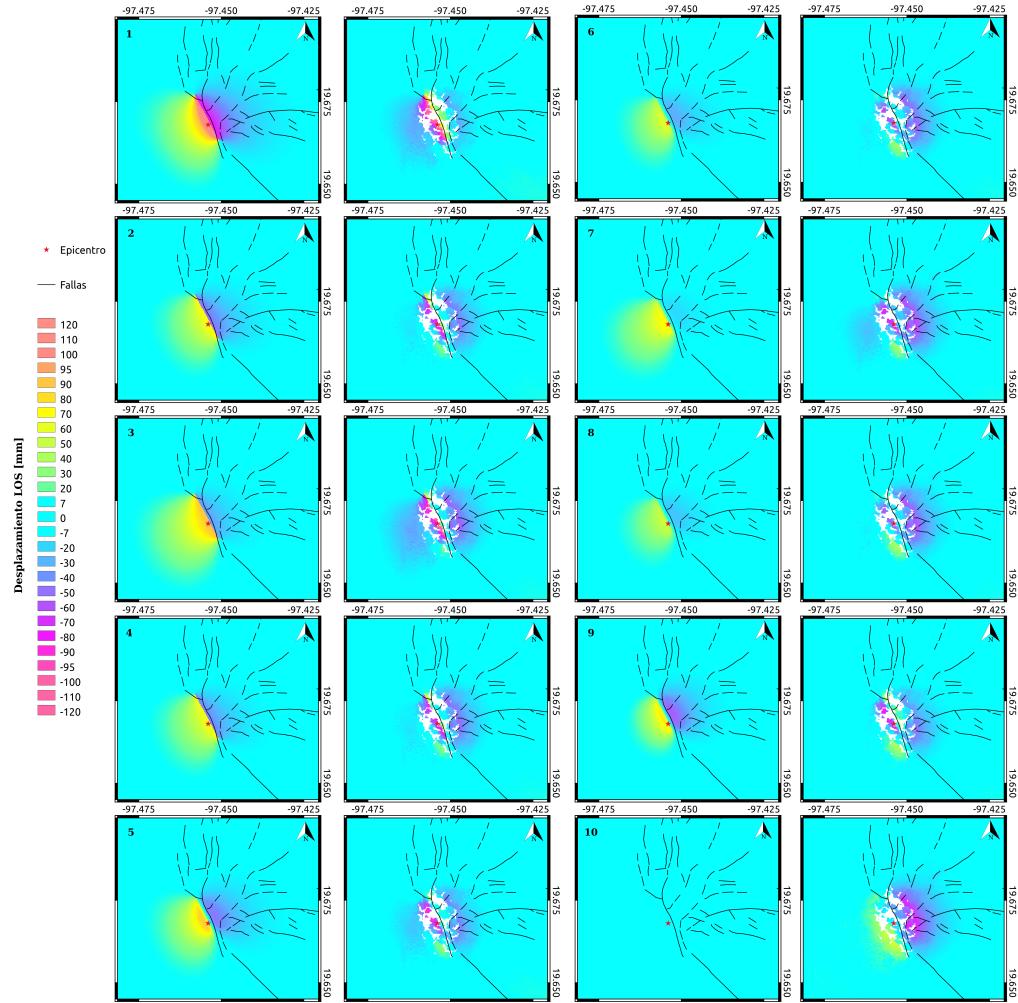


FIGURA B.7: Mosaico del modelado en Coulomb del paso descendente No. 1-10.

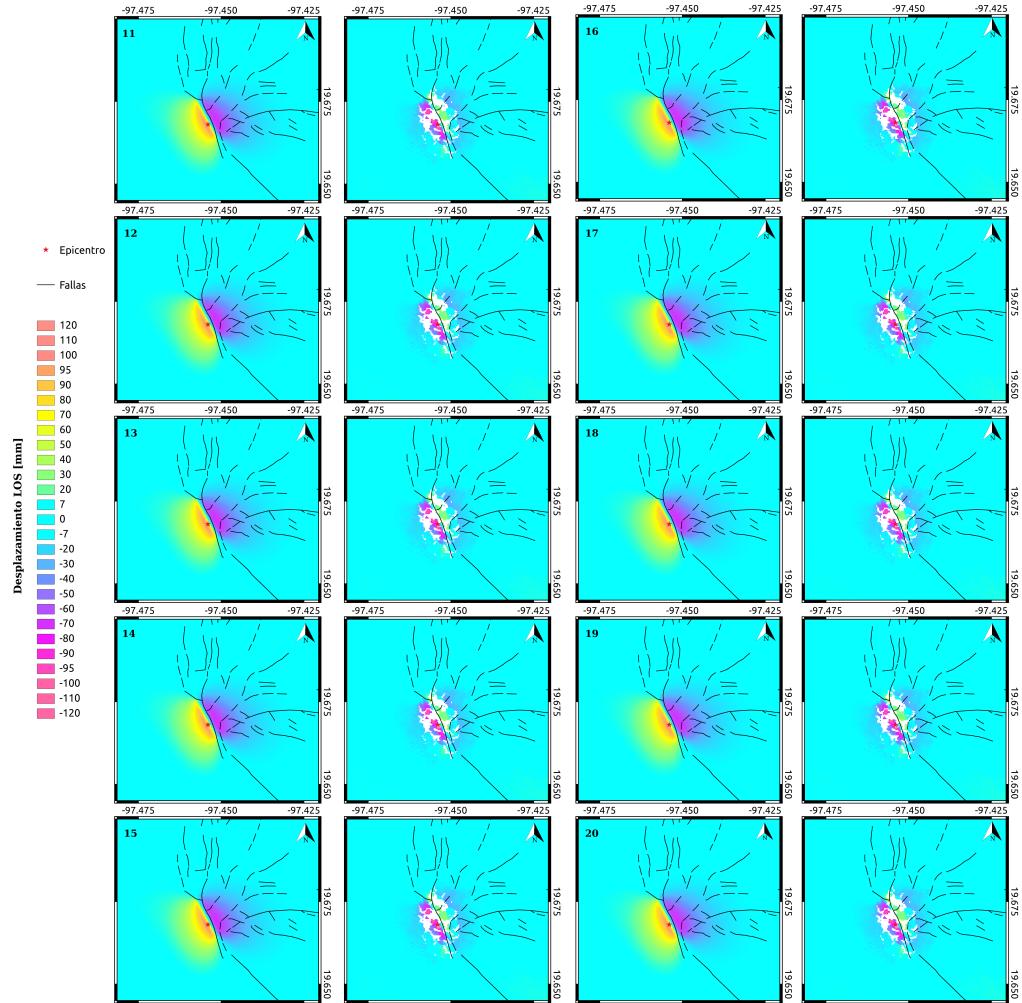


FIGURA B.8: Mosaico del modelado en Coulomb del paso descendente No. 11-20.

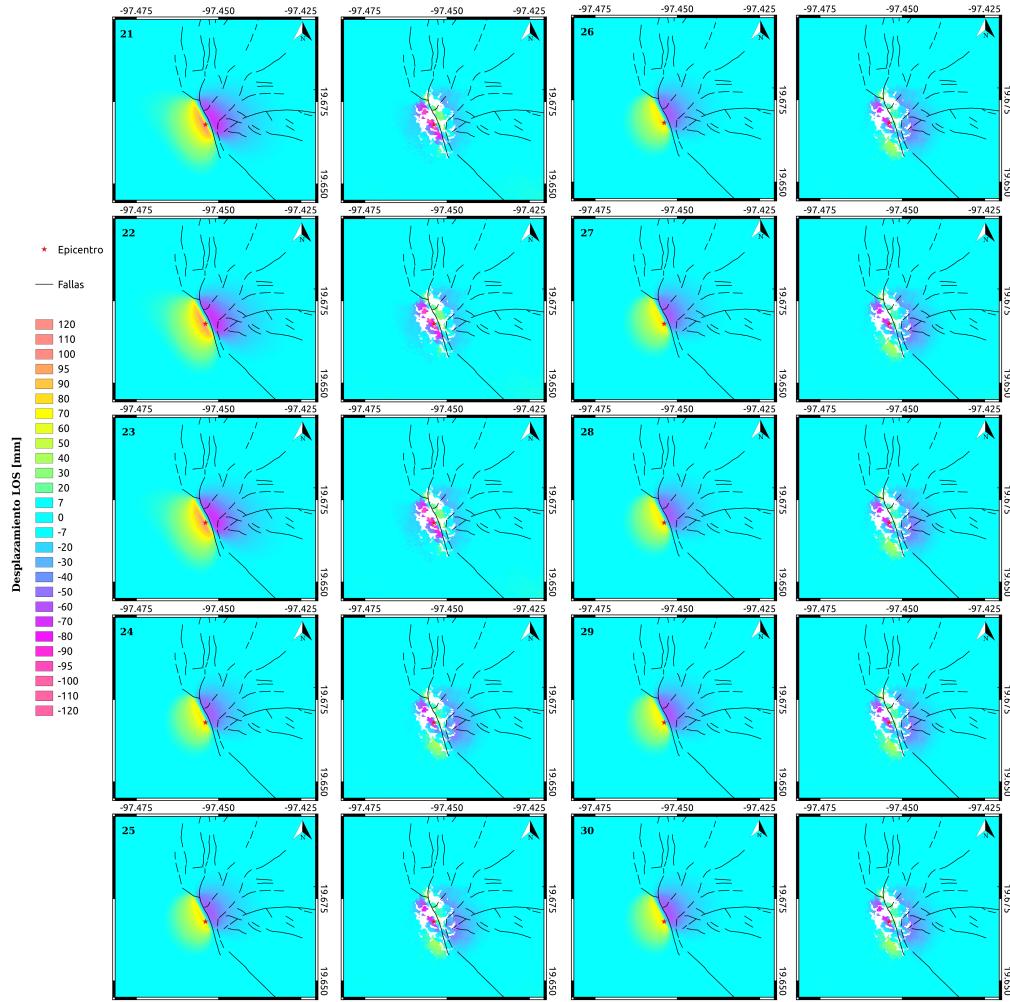


FIGURA B.9: Mosaico del modelado en Coulomb del paso descendente No. 21-30.

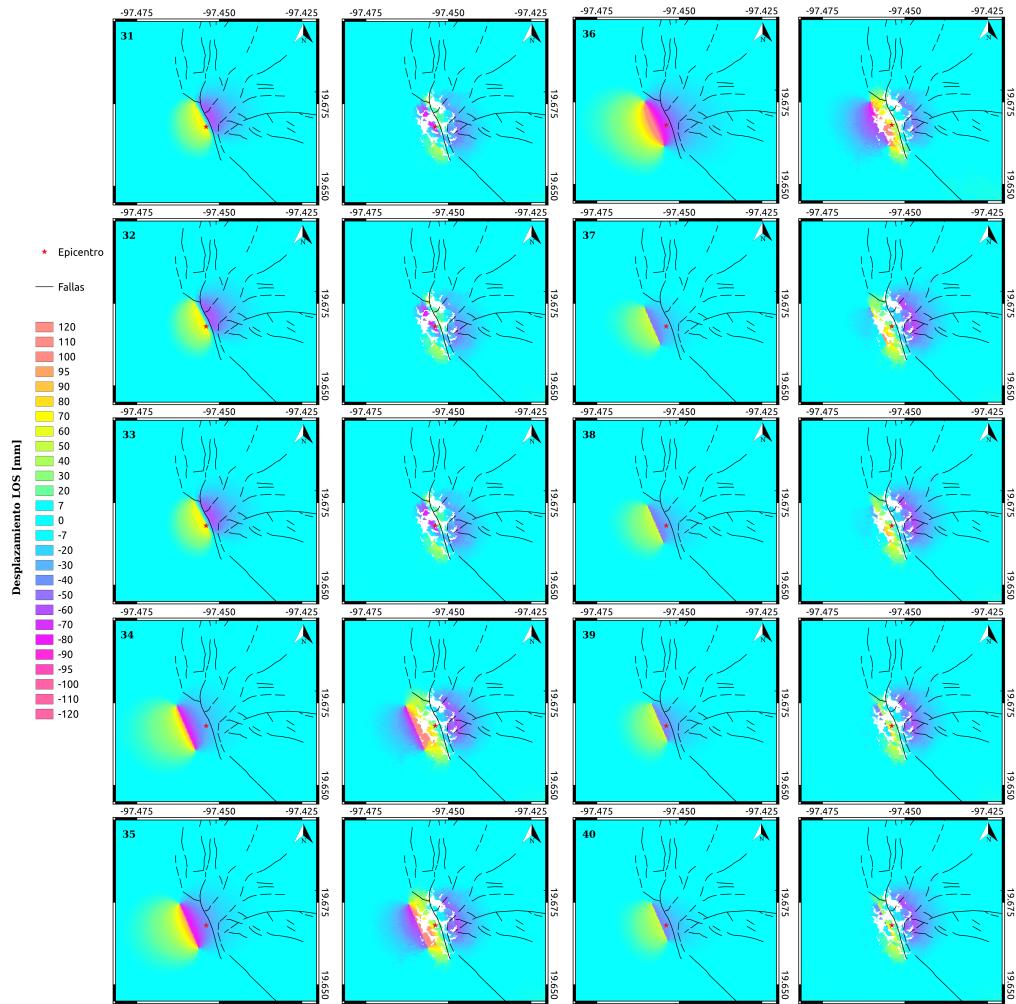


FIGURA B.10: Mosaico del modelado en Coulomb del paso descendente No. 31-40.

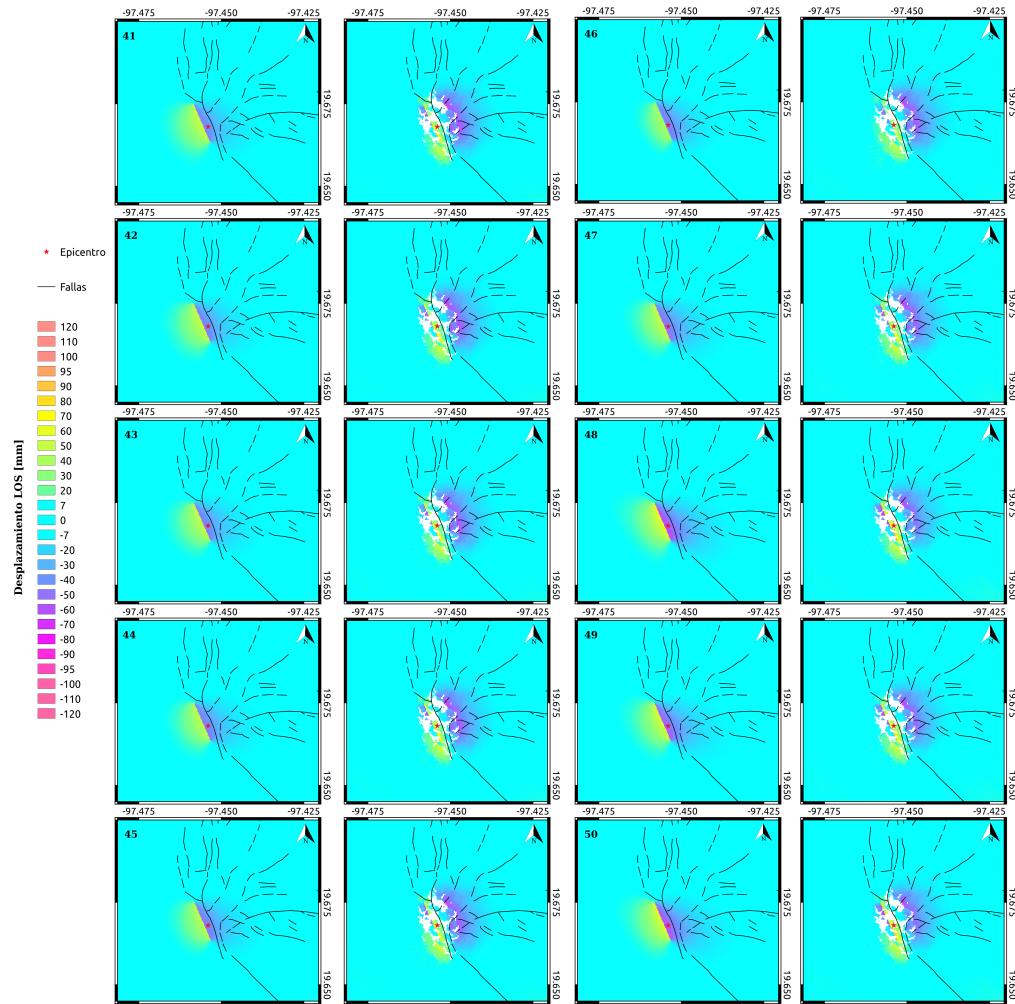


FIGURA B.11: Mosaico del modelado en Coulomb del paso descendente No. 41-50.

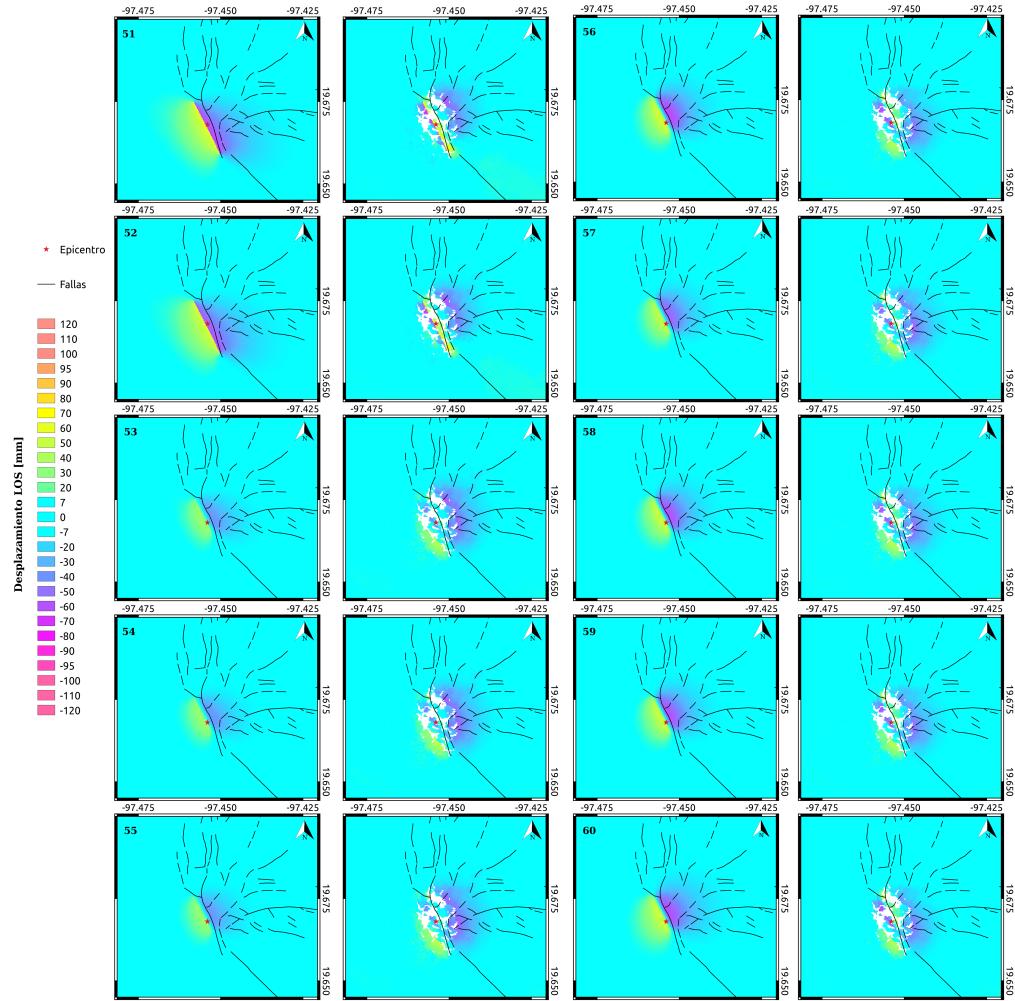


FIGURA B.12: Mosaico del modelado en Coulomb del paso descendente No. 51-60.

Bibliografía

- Antayhua, Y (2007). «Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros-Puebla (1997-2004), su relación con los pozos y la tectónica local. Universidad Nacional Autónoma de México». Tesis de maestría. Posgrado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México. 136 pp.
- Arellano, Víctor M et al. (2000). «Distribución inicial de presión y temperatura del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla». En: *Boletín iie julio-agosto* 1.
- Armenta, Magaly del Carmen Flores y Miguel Ramírez Montes (2010). «Perforación de pozos bilaterales: análisis y selección de pozos en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue.» En: *GEOTERMIA*, pág. 61.
- Arzate, Jorge et al. (2018). «The Los Humeros (Mexico) geothermal field model deduced from new geophysical and geological data». En: *Geothermics* 71, págs. 200-211.
- Bagnardi, Marco y Andrew Hooper (2018). «Inversion of surface deformation data for rapid estimates of source parameters and uncertainties: A Bayesian approach». En: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 19.7, págs. 2194-2211.
- Békési, Eszter et al. (2018). «Active deformation of the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt based on InSAR persistent scatterers». En: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. Vol. 20, pág. 15520.
- Campos-Enriquez, JoséOscar y Victor Hugo Garduño-Monroy (1987). «The shallow structure of Los Humeros and Las Derrumbadas geothermal fields, Mexico». En: *Geothermics* 16.5-6, págs. 539-554.
- Carrasco-Núñez, G, A Gomez-Tuena y L Lozano (1997). «Geologic map of Cerro Grande volcano and surrounding area». En: *Central Mexico: Geological Society of America Maps and Charts series MCH* 81.10.
- Carrasco-Núñez, G et al. (2017). «Subsurface stratigraphy and its correlation with the surficial geology at Los Humeros geothermal field, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt». En: *Geothermics* 67, págs. 1-17.
- Carrasco-Núñez, Gerardo et al. (2010). «Evolution and hazards of a long-quiescent compound shield-like volcano: Cofre de Perote, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt». En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 197.1, págs. 209-224.
- Carrasco-Núñez, Gerardo et al. (2017). «Geologic map of Los Humeros volcanic complex and geothermal field, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt». En: *Terra Digitalis* 1.2.
- Cavalié, O et al. (2007). «Ground motion measurement in the Lake Mead area, Nevada, by differential synthetic aperture radar interferometry time series analysis: Probing

- the lithosphere rheological structure». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112.B3.
- Chandra, AM y Santi Kumar Ghosh (2006). *Remote sensing and geographical information system*. Alpha Science Int'l Ltd.
- Costantini, Mario (1998). «A novel phase unwrapping method based on network programming». En: *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 36.3, págs. 813-821.
- Costantini, Mario, Alfonso Farina y Francesco Zirilli (1999). «A fast phase unwrapping algorithm for SAR interferometry». En: *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 37.1, págs. 452-460.
- Dávila-Harris, Pablo y Gerardo Carrasco-Núñez (2014). «An unusual syn-eruptive bimodal eruption: the Holocene Cuicuitl Member at Los Humeros caldera, Mexico». En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 271, págs. 24-42.
- Dawson, John et al. (2008). «Shallow intraplate earthquakes in Western Australia observed by interferometric synthetic aperture radar». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 113.B11.
- Delacourt, C, P Briole y JA Achache (1998). «Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography. Application to Etna». En: *Geophysical Research Letters* 25.15, págs. 2849-2852.
- Doin, M-P et al. (2009). «Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models». En: *Journal of Applied Geophysics* 69.1, págs. 35-50.
- Dreger, Douglas S (2003). «TDMT_INV: Time domain seismic moment tensor inversion». En: *International Geophysics*. Vol. 81. Elsevier, pág. 1627.
- Earle, Paul S et al. (2001). «Potential of InSAR for routine earthquake analysis». En: *AGU Fall Meeting Abstracts*.
- Elliott, JR et al. (2008). «InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, in the presence of topographically correlated atmospheric delays». En: *Geophysical Research Letters* 35.12.
- Ferriz, Horacio y Gail A Mahood (1984). «Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, Mexico». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 89.B10, págs. 8511-8524.
- Fialko, Yuri (2004). «Probing the mechanical properties of seismically active crust with space geodesy: Study of the coseismic deformation due to the 1992 Mw7.3 Landers (southern California) earthquake». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 109.B3.
- Garduño Monroy, VH, F Romero Ríos y R Torres Hernández (1985). «Análisis estructural del campo geotérmico de Los Humeros, Pue». En: *Comisión Federal de Electricidad, Informe interno* 26, pág. 85.
- Goldstein, Richard M y Charles L Werner (1998). «Radar interferogram filtering for geophysical applications». En: *Geophysical research letters* 25.21, págs. 4035-4038.
- Goldstein, Richard M, Howard A Zebker y Charles L Werner (1988). «Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping». En: *Radio science* 23.4, págs. 713-720.

- González, Pablo J et al. (2015). «The 2014–2015 eruption of Fogo volcano: Geodetic modeling of Sentinel-1 TOPS interferometry». En: *Geophysical research letters* 42.21, págs. 9239-9246.
- Hanssen, Ramon F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis*. Vol. 2. Springer Science & Business Media.
- Hooper, Andrew, P. Segall y H. Zebker (2007a). «Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112.B7.
- Hooper, Andrew, P Segall y Howard Zebker (2007b). «Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 112.B7.
- Hu, Jun et al. (2014). «Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review». En: *Earth-Science Reviews* 133, págs. 1-17.
- Lermo, Javier et al. (2008). «Estudio sismológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos». En: *GEOTERMIA (Revista Mexicana de Geoenergía)* 21.1, págs. 25-41.
- Lermo J Guerrero J, Soto J., ed. (1999). "Procesado e Interpretación de Datos Sísmicos de la Red Sismológica del Campo Geotérmico de Los Humeros, Pue." (Morelia, Mich., México). Vol. 1, págs. 127-136.
- Lermo Samaniego, Javier Francisco et al. (2016). «Sísmica pasiva en el campo geotérmico de los Humeros, Puebla-Méjico y su relación con los pozos inyectores». En: *XVIII Congreso Peruano de Geología, realizada por la Sociedad Geológica del Perú*, pág. 5.
- Li, Zhenhong et al. (2005). «Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 110.B3.
- Li, Zhenhong et al. (2006). «Assessment of the potential of MERIS near-infrared water vapour products to correct ASAR interferometric measurements». En: *International Journal of Remote Sensing* 27.2, págs. 349-365.
- Lillesand, TM, RW Kiefer y JW Chipman (1987). «Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, New York.» En: *Remote sensing and image interpretation. John Wiley & Sons, New York*.
- Lira, J (2010). «Tratamiento digital de imágenes multiespectrales». En: *UNAM (Electronic BOOK: www. lulu. com)*.
- Lira, Jorge (2001). «Sistema radar de imágenes». En: *Monografías del Instituto de Geofísica/5, UNAM*, págs. 28-31.
- López-Quiroz, Penélope et al. (2009). «Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry». En: *Journal of Applied Geophysics* 69.1, págs. 1-15.
- Lu, Zhong y Daniel Dzurisin (2014). «InSAR imaging of Aleutian volcanoes». En: *InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes*. Springer, págs. 87-345.
- Maitre, Henri (2010). *Processing of Synthetic Aperture Radar (SAR) Images*. Wiley.
- Merryman Boncori, John Peter (2019). «Measuring Coseismic Deformation with Spaceborne Synthetic Aperture Radar: a Review». En: *Frontiers in Earth Science* 7, pág. 16.

- Mitasova, Helena y Markus Neteler (2004). «GRASS as open source free software GIS: accomplishments and perspectives». En: *Transactions in GIS* 8.2, págs. 145-154.
- Norini, G et al. (2015). «Structural analysis and thermal remote sensing of the Los Humeros Volcanic Complex: Implications for volcano structure and geothermal exploration». En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 301, págs. 221-237.
- Okada, Yoshimitsu (1992). «Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space». En: *Bulletin of the Seismological Society of America* 82.2, págs. 1018-1040.
- Pepe, Antonio y Fabiana Calò (2017). «A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements». En: *Applied Sciences* 7.12, pág. 1264.
- Ponce, L y C Rodríguez (1977). «Microearthquake activity associated to Los Humeros caldera, Mexico: Preliminary survey». En: *Geofísica Internacional* 17.4.
- Purkis, Sam J y Victor V Klemas (2011). *Remote sensing and global environmental change*. John Wiley & Sons.
- Remy, D et al. (2003). «Accurate measurements of tropospheric effects in volcanic areas from SAR interferometry data: Application to Sakurajima volcano (Japan)». En: *Earth and Planetary Science Letters* 213.3-4, págs. 299-310.
- Richards, John Alan et al. (2009). *Remote sensing with imaging radar*. Vol. 1. Springer.
- Rojas, E. (20016). «Litoestratigrafía, petrografía, y geoquímica de la Toba Llano, y su relación con el cráter El Xalapazco, Caldera De Los Humeros, Puebla.» Tesis de maestría. Programa de maestría y doctorado en Ciencias de la Tierra, IPICYT, México. 206 pp.
- Samsonov, Sergey y Kristy Tiampo (2006). «Analytical optimization of a DInSAR and GPS dataset for derivation of three-dimensional surface motion». En: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 3.1, págs. 107-111.
- Sandwell, David et al. (2011). «Open radar interferometry software for mapping surface deformation». En: *Eos, Transactions American Geophysical Union* 92.28, págs. 234-234.
- Santos-Basurto, Reynaldo (2015). «Interferometría de Radar de Apertura Sinética (InSAR) aplicada a una caldera volcánica: Los Humeros Puebla-México». Tesis de licenciatura. Facultad de Ingeniería UNAM, México. 127 pp.
- Santos Basurto, Reynaldo et al. (2014). «Surface Deformation of Los Humeros Caldera, Mexico, Estimated by Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)». En: American Geophysical Union Fall Meeting, Fall Meeting 2014, abstract id. G31A-0378.
- Sarychikhina, O (2010). «The spatial and temporal distribution of the ground deformations in the Mexicali Valley in the context of tectonic, anthropogenic and seismic processes». Tesis de doctorado. CICESE, Mexico.
- Sarychikhina, O, E Glowacka y J Mojarro (2016). «Surface deformation associated with geothermal fluids extraction at the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico revealed by DInSAR technique». En: *Living Planet Symposium*. Vol. 740, pág. 294.
- Sarychikhina, Olga, Ewa Glowacka y Braulio Robles (2018). «Multi-sensor DInSAR applied to the spatiotemporal evolution analysis of ground surface deformation in Cerro Prieto basin, Baja California, Mexico, for the 1993–2014 period». En: *Natural Hazards* 92.1, págs. 225-255.

- Sarychikhina, Olga et al. (2011). «Land subsidence in the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico, from 1994 to 2005: An integrated analysis of DInSAR, leveling and geological data». En: *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 204.1, págs. 76-90.
- Sarychikhina, Olga et al. (2015). «Estimation of Seismic and Aseismic Deformation in Mexicali Valley, Baja California, Mexico, in the 2006–2009 Period, Using Precise Leveling, DInSAR, Geotechnical Instruments Data, and Modeling». En: *Pure and Applied Geophysics* 172.11, págs. 3139-3162.
- Taylor, Michael y Gilles Peltzer (2006). «Current slip rates on conjugate strike-slip faults in central Tibet using synthetic aperture radar interferometry». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111.B12.
- Toda, Shingi et al. (2011). *Coulomb 3.3 graphic-rich deformation and stress-change software for earthquake, tectonic, and volcano research and teaching-user guide*. Inf. téc. US Geological Survey.
- Urban, Edgar y Javier F Lermo (2013). «Local seismicity in the exploitation of Los Humeros geothermal Field, Mexico». En: *PROCEEDINGS of thirty-eighth workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, Stanford, California, SGP-TR-198*.
- Urban-Rascón, E. (2016). «Análisis y determinación de la magnitud de los esfuerzos in situ, con la actividad sísmica local, en la explotación del campo geotérmico Los Humeros, Puebla». Tesis de maestría. Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería, FI UNAM, México. 206 pp.
- Veci, Luis et al. (2017). «ESA's Multi-mission Sentinel-1 Toolbox». En: *EGU General Assembly Conference Abstracts*. Vol. 19, pág. 19398.
- Viniegra Osorio, F (1965). «Geología del macizo de Teziutlán y la cuenca Cenozoica de Veracruz». En: *Bol. Asoc. Mex. Geólogos Petroleros* 17, págs. 100-135.
- Webley, PW et al. (2002). «Atmospheric water vapour correction to InSAR surface motion measurements on mountains: results from a dense GPS network on Mount Etna». En: *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 27.4-5, págs. 363-370.
- Wegmüller, U, Charles Werner y Tazio Strozzi (1998). «SAR interferometric and differential interferometric processing chain». En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium PROCEEDINGS, 1998. IGARSS'98. 1998 IEEE International*. Vol. 2. IEEE, págs. 1106-1108.
- Werner, Charles et al. (2000). «Gamma SAR and interferometric processing software». En: *Proceedings of the ers-envisat symposium, gothenburg, sweden*. Vol. 1620, pág. 1620.
- Willcox, Christopher Philip (2011). «Eruptive, magmatic and structural evolution of a large explosive caldera volcano, Los Humeros, Central Mexico». Tesis de doctorado. University of Leicester.
- Wright, Tim J, Barry E Parsons y Zhong Lu (2004). «Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR». En: *Geophysical Research Letters* 31.1.
- Yague-Martinez, Nestor, Pau Prats-Iraola y Francesco De Zan (2016). «Coregistration of interferometric stacks of Sentinel-1A TOPS data». En: *EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar, PROCEEDINGS of. VDE*, págs. 1-6.

- Yanez-Garcia, C y S Garcia-Durán (1982). «Exploración de la Región Geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, Estados de Puebla y Veracruz. Comisión Federal de Electricidad». En: *Reporte Técnico*.
- Yu, Chen, Zhenhong Li y Nigel T Penna (2018). «Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model». En: *Remote Sensing of Environment* 204, págs. 109-121.
- Yu, Chen, Nigel T Penna y Zhenhong Li (2017). «Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations». En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122.3, págs. 2008-2025.
- Yu, Chen et al. (2018). «Generic atmospheric correction model for Interferometric Synthetic Aperture Radar observations». En: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*.