



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería
División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
Departamento de Geofísica

Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) aplicada a una caldera volcánica: Los Humeros Puebla-México

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO GEOFÍSICO

P R E S E N T A

REYNALDO SANTOS BASURTO



DIRECTORA DE TESIS:

DRA. PENÉLOPE LÓPEZ-QUIROZ
Centro de Geociencias

CIUDAD UNIVERSITARIA,
MÉXICO, D.F.
Junio, 2015.



*A mis padres: Rei & Mago
A mis hermanitos: Kari, Leo, Yamel & Gio
A mis pequeños gigantes: Etienne & Monche
Con todo el cariño...*

*“Es cuestión de escala y tiempo, toda roca es una montaña en potencia”
Pablo Vargas-Lugo*

*"Vi milagros, vi milagros de esta tierra, de mujeres que sus manos
alimentan, la que invita, la que invita aunque nada tenga y pelea por las cosas
que sí son buenas".
Lila Downs*

Agradecimientos

A mi familia, el pilar de mi vida:

- A mi madre, Margarita: no hay manera de agradecer todo tu apoyo, en todo sentido, gracias por siempre escucharme y sobre todo entenderme a tu manera, gracias por esas pláticas “secretas” (me'phaa).

- A mi padre, Reinaldo: mi segundo gran ejemplo y gran héroe, no tengo palabras para expresar el gran cariño hacia ti, gracias por siempre estar pendiente de mí, mis hermanos y de mi mamá; gracias por todo tu apoyo y el temple que siempre muestras; gracias por enseñarme que no importa lo que venga, que siempre podemos estar mejor sí juntos estamos.

- A mis hermanos, que nunca me negaron su ayuda y que siempre estuvieron conmigo en mis momentos más críticos, más alegres y divertidos: Karina, Leonel, Yamel (mi confidente) y Giovanni (a tu dulce memoria).

- A mi pequeño gigante: Etienne, gracias por siempre hacerme ver que el mundo es tan frágil, pero que siempre hay un motivo para sonreír e imaginar mundos nuevos.

- A mis tíos: Rubí, gracias por mostrarme que siempre debo tener fe y nunca romper los lazos de familia; Braulia, siempre pendiente de mí, recuerdo con mucho cariño la bonita infancia que tuve en la cual tu formaste parte; Ponciano, un gran ejemplo, que cuando se tienen las ganas, no importa lo demás para cumplir nuestros sueños, gracias tío; Cira, Ana, Roma e Irineo, gracias por su apoyo.

A mi alma mater, la UNAM, y a la Honorable Facultad de Ingeniería, por todo el conocimiento y herramientas que me pudieron proporcionar a lo largo de toda mi formación.

A mi asesora, mentora y ahora amiga, Penélope. Gracias Dra., por todo su apoyo (académico y moral), paciencia y confianza, sobretodo, gracias por compartir todo su conocimiento sobre el gran mundo de la InSAR.

Al Dr. Jaime Urrutia-Fucugauchi, por introducirme por primera vez al mundo de la Geofísica, en una breve plática, previo a mi ingreso a la F. I., aún recuerdo con cariño dicha plática.

Al Ing. Eduardo Amador Terrazas, mi tutor en mi primer semestre de la F. I., gracias por las experiencias y consejos compartidos.

Al Ing. Carl Anthony Servín-Jungdorf, por su gran apoyo y confianza brindada en mi última materia en la facultad, le agradezco sobremanera por permitirme poder prepararme mejor profesionalmente.

Al director del Centro de Geociencias (CGEO-UNAM), Dr. Gerardo Carrasco-Núñez, por todo el apoyo brindado durante mi estancia en Juriquilla-Querétaro, y por su apoyo y asesoría para la realización de este trabajo.

A la Dra. Marie-Pierre Doin del ISTerre de la Universidad Joseph Fourier en Grenoble-Francia, por proporcionarnos varios scripts que fueron clave importante en el pre y post procesamiento de este trabajo y por sus recomendaciones para el trabajo a futuro del mismo.

A mis sinodales, Dra. Rosa María Prol-Ledesma, Dr. Osvaldo Sánchez-Zamora, Dr. Gerardo Carrasco-Núñez y el Dr. Enrique Cabral-Cano, por sus comentarios y observaciones a este trabajo.

Al proyecto “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”, que es que se desprende este trabajo, además de la beca otorgada para la realización de esta tesis.

A la familia Álvarez-Bañuelos, que siempre me hicieron sentir como en casa:

- Belem, no tengo manera de agradecer todo su apoyo, paciencia y sobre todo la confianza brindada durante toda mi estadía en Querétaro, gracias por compartir conmigo su espacio y cariño.
- Adolfo, estaré en deuda con usted, gracias también por su confianza y agradezco conocer su historia de vida, un gran ejemplo y figura.
- Andy y Yair, muchas gracias por compartir su espacio y tiempo, por ser siempre incluyentes.
- ¡Ary!, muchas gracias por compartir tu espacio que sin querer llegue a ocupar, agradezco infinitamente todas esas tardes de pláticas y experiencias compartidas.
- A Enrique Álvarez y Noelia, y su familia, por el apoyo brindado y también por estar pendientes.
- Baruc, gracias por esas charlas compartidas y la compañía brindada.

A mis amigos que estuvieron conmigo desde siempre, Jesús Joel (aprendí y descubrí contigo), Iveth y Gaby.

A mis amigos del Colegio de Ciencias y Humanidades Plantel Sur: Jhonathan (Spunkis), Kari, Belén, Carmen, Areli, Ale, Rosy, Pao (Pablanela), Vic Contreras, Richie (Rodrodrigo), Marianna Calera, Ale Toby, José de Jesús (Pepé), Francisco, Paola Betanzos, Karla, Miriam Ávila, David Chávez, Neto, Luis Rodrigo González, Rebecca (Rony), Mari López, Yuri, Selene, Sergio Ramos, Nancy y a Cynthia Alarcón-Campos.

A mis amigos y compañeros de Ing. Geofísica: Doris Arlette, por siempre estar conmigo y siempre creer en mí, aún tengo presente con mucho cariño, nuestra primera plática en la facultad, colegas y amigos-hermanitos. Antonio Daniel (Conito), por compartir momentos de estudio y diversión, que sin darnos cuenta el tiempo "volaba". Erick Acevedo, por los momentos dentro y fuera de las aulas. Roberto Carlos. Miguel Maldonado, por creer en mí. Dionicio, amigo, que no hay manera de agradecerte todo lo brindado. Iván Granados, nunca antes había conocido a un amigo tan leal, bondadoso, inteligente y solidario, muchas gracias por todo lo compartido, tanto en clase como afuera. Checo Valderrama, por esas asesorías cuando se trata de códigos y por contagiarme el espíritu deportivo. Rosy, por siempre saber escucharme y por compartir las experiencias académicas. René Solano, por las palabras de aliento y lo compartido en ese semestre tan crítico para mí. Alicia y Karla, por compartir los momentos dentro y fuera de clases. Raquel, por la confianza y creer en mí, gracias por enseñarme que para ser ingeniero no se necesita de un "papel" sino de un buen "coco". Mike Carillo, por al apoyo en cada semestre compartido. Jesús Ángel (Rastaman), aún recuerdo nuestro primer semestre y el día de la práctica de campo en Oaxaca. Juanito Méndez, por los buenos ratos fuera de la Universidad. Luis Iván Vivar, que tuvimos que compartir la misma experiencia: la crisis de una última materia. Mike Vargas, amigo gracias por todo, por lo compartido en clase y por las pláticas de madrugada por la web. Ale Robles, por el apoyo y los consejos brindados que siempre ayudaron aclararme mi mente y estar más tranquilo. Checo Aguilar, por la confianza y amistad brinda, sobre todo, por siempre el apoyo, tanto, académico y moral, y los ratos de diversión. Daniel Elizalde, muchas gracias Dani por creer en mí y sobre todo por esas pláticas tan productivas, gracias por siempre compartir. Emi Arrollo, por las experiencias compartidas tanto en clase y fuera de ella, como en Qro. Karen Onofre, por los momentos compartidos. Nadia Nayelli y Zaida, por sus pláticas personales e impersonales, y por las risas brindadas. Alan Juárez, por el apoyo brindado y aclarar dudas, durante el procesamiento de la práctica profesional y por la ayuda académica en 4to semestre (Ecs diferenciales), y por permitirme conocernos un poco más. Sandra (Sandy) Esteves, por las charlas y por todo el apoyo. Diana Yael y Diego Quiroz, mi primer approach con la SAGFI, les agradezco los buenos consejos. Jacob Esdras, por el apoyo académico, mi segundo tutor en la facultad. Niza y Julie, como no recordar los

buenos momentos pasados de ñero. A mis amiguitos más pequeños: Dani Castillo, Pablo Guerrero, Gus, Sam, Angélica, Itzel y Vero. A mis dos amiguitos del IPN, Marianna y Pablo. A Esteban Sandoval, Toño Barrera, David “El abuelo”, Diego Benítez, Gerardo “Niño”, Javi “Moto-ratón”, Tania Alejandra, Mayra Sólis, Pedro (Risos) Reséndiz, Miguel Soberano, Mariannita Lagunas, Ray, Estaban (STB), Ketza, Betty, Diana Vargas, gracias por los buenos momentos compartidos (clases, frisbee, ninja “warrior”, pláticas y consejos). A mi “Pepé grillo”, Luz Elva, por siempre estar conmigo, las pláticas y experiencias “locochonas” vividas. A todos por su apoyo, gracias.

A mis amigos y compañeros de Ing. Geológica: Angy, por nunca apartarme de tu lado, recuerdo con mucha alegría ese primer día en CCH, por nunca dejar de creer en quién soy. Vane, mi gran colega, que suerte tenerte mí amiga, por esas pláticas tan filosóficas y las risas interminables. Hatziry, por compartir toda tu experiencia y por esos ratos dentro y fuera de clases. Luz Gisela, Lupita, por lo compartido en la universidad y fuera de ella, más por esas sesiones de estudio con “leche y galletas”. Chuby (Alexander), por las pláticas y experiencias compartidas. Casandra (Casi “ilda”), por siempre escucharme y ser una buena consejera. Memo Dolores, por los buenos ratos, como en Juriquilla y Pto. Vallarta. Rosa, por las mini charlas y cómo no olvidar Cancún. Guillen, por lo compartido en clase y sobre todo por el apoyo moral. Diana, por compartir buenos momentos conmigo y más por esas risas, aún recuerdo a la profa Emma y nuestras risas en clase. Saraí, muchas gracias por los buenos ratos compartidos durante nuestras clases en el propedéutico en el IGEF, más por esas risas por mi errores mentales y fuera de las aulas también. Daniel (Vago), muchas gracias por los consejos y aclarar varias dudas en el camino del trámite de titulación.

A Tania Osiris y Alexis Jazmín, por compartir la experiencia de estancia de verano de investigación en CGEO y del primer approach con InSAR, cómo no olvidar las tardes de caminata de regreso a casa.

A Juan Manuel, mi estimado amigo, por confiar siempre en mí, por creer en mí y el apoyo brindando, por enseñarme a formar me también como un líder.

A Alberto Aarón, mi estimado colega, por esas charlas en el CCA y en el IGEF.

A Darío Solano, por la experiencia compartida en la AGU y por el apoyo brindado durante todo el congreso.

A la profa. Ma. Guadalupe Salazar, por ese payo inmenso fuera de clase.

Resumen

La caldera de Los Humeros se localiza en la parte oriental del sector del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), justo al NE del estado de Puebla. El borde Este de la caldera hace frontera con el límite político del estado de Veracruz, por lo que el cuerpo volcánico del Cofre de Perote es muy próximo a ella. Ésta caldera está conformada geológicamente por un basamento antiguo de rocas metamórficas e intrusivas, que a su vez están cubiertos por una sucesión de lutitas, calizas y areniscas. Estudiar la caldera de Los Humeros es importante para poder entender mejor su historia evolutiva, su composición estructural y generar un modelo conceptual más reciente, además de monitorear el campo geotérmico que opera actualmente en su interior, donde se están extrayendo fluidos geotérmicos, lo cual genera cambios sobre la superficie del terreno, que aún no han sido detectados y reportados.

Para tratar de estimar la deformación sobre la caldera y los alrededores mediante el procesamiento de imágenes SAR (Radar de Apertura Sintética) con la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), se utilizaron 21 imágenes que cubren el periodo entre abril de 2003 y marzo de 2007, provenientes de la misión ENVISAT del sensor ASAR de la Agencia Espacial Europea (ESA), las cuales fueron procesadas mediante el software libre ROI_PAC. Para seleccionar los pares interferométricos se construyeron las líneas de base perpendicular y temporal ($B_{\perp} \leq 500$ m y $B_t \leq 365$ días); por lo que fueron calculados 34 interferogramas. La mayoría de ellos mostraban decorrelación de la señal de fase cuando el tiempo era mayor a los 70 días, esto puede ser debido a la presencia de áreas altamente vegetadas alrededor de la caldera, por lo que, de los 34, sólo se eligieron 11 interferogramas, ya que eran los que tenían menor pérdida de la señal interferométrica o mayor coherencia sobre la caldera y alrededores. El análisis de los interferogramas permitió detectar que todos estaban contaminados por la contribución de fase atmosférica, la cual enmascaraba por completo la señal de deformación, por lo anterior se procedió a implementar una metodología para corregir la contribución de fase atmosférica verticalmente estratificada o correlacionada con la elevación.

A pesar de haber aplicado dicha corrección, la señal de atmósfera se mantuvo presente en los interferogramas, empañando por completo la deformación sobre la caldera de Los Humeros y alrededores. Dicha señal contiene la componente verticalmente estratificada y la componente turbulenta, ya que la caldera es relativamente cercana a la costa del Golfo de México, todos los cambios en la atmósfera (temperatura, presión y contenido de vapor de agua) afectan

severamente a la señal interferométrica causando una gran dificultad para recuperar la señal de deformación.

Abstract

Los Humeros caldera is located in the Eastern sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB), just at the NE of the state of Puebla. The East caldera's border is limited for the frontier of the state of Veracruz, so the structure volcanic of the Cofre de Perote is next to it. This caldera geologically is formed by an oldest basement of intrusive and metamorphic rocks, which are in turn covered by a succession of shale, limestone and sandstone. Study the Los Humeros caldera is important for understand better its evolutionary history, its composition structural and making a more recent conceptual model, also of monitoring to the geothermal field that works inside of it, because the geothermal fluids are being extracted, whereby makes changes over the terrain surface, that still haven't been sensed and reported.

For trying to estimate the deformation over the caldera and surroundings by SAR (Synthetic Aperture Radar) images processing with the Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) technique, 21 images were used that spanning the period between April 2003 and March 2007, acquired by the ENVISAT mission from the sensor ASAR from the European Space Agency (ESA), which ones were processed by the free software ROI_PAC, For select the interferometric pairs it constrain to the baselines perpendicular and temporal ($B_{\perp} \leq 500\text{m}$ y $B_t \leq 365\text{days}$); so it was calculated 34 interferograms. Most of them show decorrelation of the phase signal when time spans are greater than 70 days, this can be due to the presence of highly vegetated areas surrounding the caldera, so, of the 34, just were selected 11 interferograms, because they were had less loss of the inteferometric signal or major coherence over the caldera and surroundings. The analysis of the interferogramas allows to detect that all of them were contaminated by the atmospheric phase contribution, which it masked completely to the deformation signal, therefore it proceeded to implement a methodology to correct the contribution of atmosphere phase vertically stratified o correlated to the elevation.

Despite having applied that correction, the atmospheric signal is remained present in the interferograms, blurring completely the deformation over the Los Humeros caldera and surroundings. That signal contains the vertically stratified component and the turbulent component, as the caldera is relatively close to the coast of the Gulf of Mexico, all the changes in the atmosphere (temperature, pressure and water vapor) affect severely to the interferometric signal causing a big difficulty for retrieve to the deformation signal.

Índice

Resumen	i
Abstract.....	iii
Introducción.....	1
1. Percepción Remota.....	4
1.1 Configuración de un sistema de Percepción Remota	4
1.2 Plataformas en Percepción Remota	5
1.2.1 Vehículos aéreos	5
1.2.2 Vehículos espaciales (satélites)	5
1.2.2.1 Acerca de los satélites	6
1.2.2.2 Órbitas satelitales	6
1.3 Radiación electromagnética	7
1.3.1 Espectro electromagnético	7
1.4 Sensores	10
1.5 Imagen Satelital	12
1.6 Tipos de Resolución	12
2. Imágenes de radar satelital	14
2.1 Radar	14
2.2 Sistema Radar de Apertura Real (RAR)	15
2.3 Sistema Radar de Apertura Sintética (SAR)	16
2.3.1 Generalidades de un sistema SAR	17
2.4 Información en una imagen SAR	19
2.4.1 Imagen compleja SAR	19
2.4.2 Propiedades de una imagen SAR: amplitud y fase	20
2.4.2.1 Amplitud	20
2.4.2.2 Fase	21
2.4.3 Efecto speckle, “sal y pimienta”	22
2.4.4 Geometría de una imagen SAR y sus distorsiones	24
2.4.4.1 Inversión o superposición del relieve (Layover)	26
2.4.4.2 Escorzo o acortamiento (Foreshortening)	26
2.4.4.3 Sombreado (Shadowing)	27

2.5	Acerca de la misión ENVISAT	28
3.	Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)	30
3.1	El principio de InSAR	32
3.2	Las imágenes SAR en crudo, la Single-Look Complex (SLC) y el Multi-Look	33
3.3	El cálculo de interferogramas	36
3.3.1	Obtención de la fase interferométrica	37
3.4	Contenido de la fase interferométrica	38
3.4.1	Contribución de fase orbital	39
3.4.2	Contribución de fase topográfica	39
3.4.3	Contribución de fase de deformación (desplazamientos en la superficie o terreno)	40
3.4.4	Contribución de fase atmosférica	42
3.4.4.1	Atmósfera verticalmente estratificada	43
3.4.4.2	Atmósfera turbulenta	43
3.4.5	Contribución del ruido de decorrelación	44
3.4.5.1	Decorrelación geométrica	44
3.4.5.2	Decorrelación temporal	44
3.5	Metodologías InSAR	45
3.5.1	Análisis de un solo interferograma o interferogramas	45
3.5.2	Una pila o stack de interferogramas	45
3.5.3	Series de tiempo: SBAS (Small Baseline Subset) y PSI (Persistent Scatterer Interferometry)	45
3.5.3.1	SBAS (Small Baseline Subset)	46
3.5.3.2	PSI (Persistent Scatterer Interferometry)	46
4.	La zona de estudio: la caldera de Los Humeros	47
4.1	Ubicación geográfica	47
4.1.1	Clima	49
4.1.1.1	El clima templado	51
4.1.2	Topografía y relieve	51
4.1.3	Vegetación	51
4.2	Geología de la caldera	52

4.3	El campo geotérmico de Los Humeros	59
5.	InSAR en la caldera de Los Humeros.....	62
5.1	Metodología en el cálculo de interferogramas	62
5.1.1	Disponibilidad de imágenes SAR	62
5.1.2	Software para realizar InSAR	62
5.2	Procesamiento InSAR	66
5.2.1	El conjunto de datos SAR en la zona de estudio	66
5.2.2	Selección de escenas para el cálculo de interferogramas	68
5.2.3	El cálculo de interferogramas	70
5.2.3.1	Reducción de la contribución orbital	71
5.2.3.2	Reducción de la contribución topográfica	73
5.2.3.3	Filtrado de la fase interferométrica y desenvolvimiento de la fase	75
5.2.4	Post procesamiento	77
5.2.4.1	Selección de mejores interferogramas	77
5.2.4.2	Análisis de los interferogramas	78
5.2.4.3	Corrección de contribución atmosférica	81
5.2.4.3.1	Relación fase-elevación	83
6.	Análisis y discusión de resultados	85
6.1	Interferogramas procesados con ROI_PAC	85
6.1.1	Interferogramas de acuerdo a sus líneas de base	85
6.1.2	Patrones atmosféricos presentes en los interferogramas	88
6.2	Postprocesamiento de interferogramas	91
6.2.1	Análisis de interferogramas corregidos por contribución de atmósfera verticalmente estratificada.	91
6.2.1.1	Análisis de gráficos fase contra elevación	91
6.2.1.2	Patrones presentes en interferogramas corregidos	95
7.	Conclusiones, perspectivas y recomendaciones.....	99
7.1	Conclusiones	99
7.2	Perspectivas y recomendaciones	100
	Referencias	101
	Anexo A: Interferogramas.....	112

Anexo B: Interferogramas con corrección de fase atmosférica y plots de fase-elevación	118
Anexo C: Imágenes de coherencia.....	124

Introducción

Una de las más importantes herramientas de las últimas décadas, para el estudio de diversos fenómenos que ocurren sobre la superficie terrestre e incluso en la atmósfera, es la Percepción Remota. Mediante ésta herramienta es posible obtener, para una gran cantidad de aplicaciones, una mayor cantidad de información en menor tiempo, relativamente a menor costo y con una mayor cobertura en términos espaciales.

El estudio de la deformación de la superficie terrestre, ocasionada por la naturaleza o actividades humanas, es un área de gran importancia e interés científico. La estimación de la deformación, resulta fundamental para comprender la dinámica de diversos fenómenos. Dichos fenómenos pueden ser causados por procesos naturales, o sea, procesos geológicos (como la ruptura de una falla durante un terremoto, la deformación en un volcán, el deslizamiento del suelo); aunque también puede ser causado por procesos antropogénicos, debido a actividades humanas: es el caso de subsidencia por extracción excesiva de agua en mantos acuíferos, extracción e inyección de fluidos, extracción de materiales en minas. Las deformaciones por dichos fenómenos pueden tener una magnitud desde pocos milímetros hasta varios metros durante periodos de tiempo que varían desde minutos, días, meses o hasta años (Tómas *et al.*, 2010).

En el monitoreo de la deformación terrestre, un gran campo de importancia es el del área de la vulcanología y, de forma implícita, lo relacionado a la explotación de recursos geotermales. En el caso de México, en el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, existen grandes estructuras volcánicas que se mantienen activas, por lo cual es importante monitorearlas, registrar su actividad y conocer más acerca de su historia evolutiva y génesis. Para ello existen diversas técnicas e instrumentos como: estaciones sísmicas, levantamientos gravimétricos, levantamientos electromagnéticos y magnetométricos, estaciones GPS y la percepción remota (Brunori *et al.*, 2013). En México, tres campos geotérmicos están siendo explotados con el fin de generar energía eléctrica: Cerro Prieto en Baja California, Los Azufres en Michoacán y Los Humeros en Puebla. La literatura reporta que, en alguno de ellos, la extracción de fluidos puede estar acompañada por subsidencia de varias decenas de centímetros por año (Sarychikhina *et al.*, 2011a; Sarychikhina *et al.*, 2011b).

En 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 tipos de métodos, técnicas e instrumentos. Dentro de la instrumentación habitual tenemos el método topográfico (nivelación de precisión)

y/o geodésico (GPS); pero alrededor del mundo existe una técnica que ha tenido gran impacto en este tipo de estudios, además de tener grandes ventajas con respecto a los métodos tradicionales geodésicos, como el de una mayor cobertura en términos espaciales y la resolución temporal; dicha técnica se basa en el procesamiento de imágenes de radar satelital y se conoce como Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). Su principio consiste en hacer la interferencia o diferencia de las fases contenidas en dos imágenes SAR adquiridas en diferentes periodos de tiempo pero sobre la misma escena monitoreada, para así obtener el valor de la deformación superficial.

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) es una técnica que a pesar de su eficiencia probada en muchas áreas del mundo para estimar la deformación superficial, hasta ahora ha sido poco explotada en México, donde las posibilidades de aplicación son vastas en áreas como la sismología, la vulcanología, industria petrolera e incluso en la exploración de recursos hídricos (e.g., monitoreo de manglares y humedales) o en el monitoreo ambiental (e.g., estimación de biomasa forestal).

Por lo anterior, se evaluó la factibilidad de estimar la deformación mediante InSAR en la caldera de Los Humeros, donde existe un campo geotérmico, con la intención de contribuir a entender mejor la historia evolutiva de la caldera y mejorar el modelo conceptual de la misma.

El campo geotérmico de Los Humeros ha sido estudiado previamente para entender mejor su composición, estructura e historia evolutiva mediante diferentes técnicas excepto InSAR. Dichos estudios incluyen: la exploración sísmica, para determinar riesgos a la planta y estimar el estado de esfuerzos de la zona, ya sea generados de forma antropogénica o de forma natural (Lermo *et al.*, 2008); el estudio gravimétrico para inferir a profundidad la estructura de la caldera y la composición geológica (Campos-Enriquez & Arredondo-Fragoso, 1992), y el análisis del procesamiento de imágenes satelitales ópticas para estimar fallas y fracturas relacionados con la permeabilidad secundaria de las rocas del yacimiento (Prol-Ledesma *et al.*, 1993). Hasta donde sabemos, no se han realizado estudios de monitoreo de la caldera con InSAR lo cual resultaría útil para evaluar el riesgo del campo geotérmico debido a la deformación del terreno y las poblaciones aledañas.

Por todo lo anterior, los objetivos del presente trabajo, se muestran a continuación:

General

- Evaluar la factibilidad de realizar InSAR para estimar la deformación en la caldera, la zona del campo geotérmico de Los Humeros y alrededores.

Específicos

- Aplicar InSAR sobre la zona de estudio y analizar los resultados.
- Emitir recomendaciones relacionados con el procesamiento con InSAR.

Capítulo 1

Percepción Remota

Nuestro planeta es un sistema dinámico, el cual tiene una forma y estructura. En la superficie y la atmósfera, ocurren procesos o fenómenos; los cuales pueden ser monitoreados, estudiados y analizados, con el objetivo de entenderlos y caracterizarlos.

En la última década, la tecnología ha avanzado de una forma muy vertiginosa, muchas técnicas e instrumentos han sido mejorados para poder explorar y monitorear a la Tierra. Una de las técnicas que han tenido gran explotación alrededor del mundo, es la Percepción Remota.

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

1.1 Configuración de un sistema de Percepción Remota

Un sistema de percepción remota, puede tener la siguiente configuración:

- **Plataforma:** se le llama plataforma al vehículo en el cual serán transportados los instrumentos o sensores, por lo que la plataforma puede ser desde un avión hasta un satélite.
- **Sensor:** es el instrumento con el cual será medida o registrada la energía reflejada o emitida por la superficie de la Tierra. Un sensor es capaz de obtener información en diferentes longitudes de onda, de acuerdo al objetivo de estudio o de la misión.
- **Fuente de energía:** la energía puede ser producida o no por el sensor, es decir; puede ser emitida de forma natural, como la radiación solar o emitida de manera artificial, como las ondas electromagnéticas de un radar o el haz de luz de un sistema LiDAR.
- **Superficie o escena:** ésta puede ser la superficie terrestre o la atmósfera. En dicha escena, se pueden detectar los elementos que la conforman;

desde la cobertura vegetal, el suelo, estructuras geológicas, manchas urbanas, la temperatura superficial de los mares o la emisión de energía asociada al calor interno de la Tierra, valores de precipitación, presión y contenido de vapor de agua. Por lo tanto, se pueden registrar las propiedades físicas, químicas y hasta biológicas de la escena.

- Imagen: el sensor o instrumento recaba o registra la información reflejada o emitida por la superficie terrestre. Los valores de radiación de energía recibida, son procesados y almacenados en una matriz o arreglo de números, que puede visualizarse como una imagen, a través de la cual, puede ser detectado el fenómeno monitoreado. Sin embargo, estos datos (imágenes), pueden requerir un procesamiento adicional antes de poder visualizar el fenómeno de interés.

- Procesamiento de la señal y obtención de un producto final: es posible aplicar diferentes procesamientos digitales y estadísticos a la imagen satelital. De ésta manera obtenerse: clasificación de material geológico, índices de vegetación, mapas de anomalías de temperaturas, mapas de contaminantes, estimación de biomasa, mapas de desplazamientos del terreno, etc.

1.2 Plataformas en Percepción Remota

Se entiende por plataforma, el objeto en el cual está montado el sensor. Por lo que dicho objeto son los vehículos aéreos y espaciales.

1.2.1 Vehículos aéreos

El sensor o sensores, e.g., cámaras fotográficas, cámaras digitales, videograbadoras, radiómetros, espectrómetros, gravímetros, magnetómetros, radares y láser, pueden ser montados o transportados en un vehículo que viaja a altitudes menores a las de un satélite. Tal como, globos aerostáticos, aviones, helicópteros y recientemente los drones. Estos tipos de plataformas son usados para estudios que requieren mayor detalle.

1.2.2 Vehículos espaciales (satélites)

El sensor es montado sobre un satélite y comúnmente se le asigna un nombre de acuerdo a la misión (e.g., Landsat, SPOT, GOES, Seawifs, MODIS, Ikonos, Quickbird, Geoeye, WorldView, ERS, ENVISAT, Sentinel-1A,

RADARSAT, COSMO-SkyMed, TerraSar-X, ALOS-PALSAR). Dicha plataforma viaja en el exterior de la atmósfera terrestre.

1.2.2.1 Acerca de los satélites

Se entiende como un satélite artificial, una nave que ha sido diseñada, fabricada y lanzada al espacio por el hombre; con la finalidad de observar la Tierra, cuerpos celestes e incluso galaxias.

Un satélite tiene una trayectoria u órbita definida, la cual recorre a la Tierra a diferentes altitudes. La selección de la órbita dependerá de la altura en la que estará el satélite, su orientación y rotación relativa a la Tierra (Chandra & Ghosh, 2006).

1.2.2.2 Órbitas satelitales

La órbita de un satélite describe la trayectoria y la ubicación del mismo, respecto a la Tierra de forma relativa.

Existen dos principales tipos de órbitas satelitales:

- Órbita geoestacionaria: éste tipo de órbitas corresponden a una altitud de 36000 km del ecuador de la Tierra, son las que utilizan los satélites empleados en diversos tipos de telecomunicaciones, incluida la televisión.

Un satélite estacionario aporta la ventaja de que siempre ve la Tierra desde la misma perspectiva, lo que quiere decir, que, puede registrar la misma imagen en breves intervalos de tiempo. Esto es particularmente útil para observar las condiciones meteorológicas.

Una desventaja de éste tipo de órbitas, es la gran distancia a la Tierra, por lo que reduce la resolución espacial que se puede lograr. Existen diversos satélites meteorológicos, e.g., GOES, METEOSAT, GMS, MODIS e INSAT; distribuidos regularmente sobre éste tipo de órbita, cubriendo todo el mundo y proporcionando una visión global (European Space Agency ESA, 2014).

- Órbita heliosincrónica: en éste tipo de órbitas, el movimiento del satélite es cuasi polar (el satélite pasa por encima de los polos de nuestro planeta o muy cerca de ellos), lo que permite que las imágenes sean tomadas siempre a la misma hora solar local (European Space Agency ESA, 2014).

Mientras el satélite recorre su órbita, la Tierra gira sobre su eje, por lo que cada vez que el satélite completa una vuelta se escanea una nueva franja de la superficie de la Tierra y, pasado un cierto número de vueltas, se habrá obtenido toda la superficie de la Tierra. Algunos satélites escanean una franja ancha cada vez y pueden, de éste modo, cubrir la totalidad de la superficie de la Tierra en unas pocas vueltas. Los satélites de alta resolución que escanean sólo tiras finas, tardan varios días en completar la cobertura de la Tierra (European Space Agency ESA, 2014).

El swath o ancho de barrido de la imagen tomada por el satélite en cada pasada; está relacionado con la escala espacial y el ángulo de visión del sensor. Si el swath es pequeño, el área de una imagen estará directamente debajo del sensor, lo que implica que la observación es de tipo nadir. Generalmente los sensores ópticos o pasivos tienen éste tipo de observación, pero en el caso de un sensor radar tiene una observación de tipo lateral o side-looking.

1.3 Radiación electromagnética

La adquisición de la información sobre las características de la superficie terrestre mediante plataformas de percepción remota, depende del registro o medición de la radiación de la energía electromagnética en cierta región del espectro electromagnético. La energía puede ser irradiada por la Tierra misma, como resultado de su temperatura finita, o puede ser la reflexión de la energía incidente sobre la superficie terrestre proveniente de una fuente externa como el Sol. Aunque también dicha energía puede provenir de una fuente artificial como lo es un láser o un radar (Richards, 2009).

Una de las fuentes de energía electromagnética más importantes, es el Sol, ya que provee energía en casi todas las longitudes de onda. Algunas de las longitudes de onda más utilizadas son: la región del visible, infrarrojo cercano, medio, térmico y la región de microondas (Chandra & Ghosh, 2006).

1.3.1 Espectro electromagnético

La energía electromagnética puede ser modelada por ondas o por partículas llamadas fotones. En el modelo de onda, se considera que la energía electromagnética se propaga a través de un espacio en forma de ondas sinusoidales. Éstas ondas están caracterizadas por el campo eléctrico (E) y el

campo magnético (M), ambos son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda y perpendiculares una de otra, Fig. 1.1 (Chandra & Ghosh, 2006).

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, Fig. 1.2.

La longitud de onda (λ) de la energía electromagnética, es particularmente importante ya que define la distancia entre cresta y cresta de la onda. La longitud de onda es medida en metros (m) o algunas fracciones de metros, tal como los nanómetros (nm, 10^{-9} metros) o los micrómetros (μ m, 10^{-6} metros). La frecuencia (f) de la energía electromagnética, es el número de ciclos en un periodo de tiempo en específico (Chandra & Ghosh, 2006; Lillesand *et al.*, 2004).

Los sistemas de percepción remota están usualmente diseñados para captar señales en determinados rangos de longitudes de onda, denominados bandas o canales. Dependiendo de la aplicación, pueden seleccionarse sensores con bandas relativamente estrechas (hiperespectrales) o anchas (multiespectrales), en el caso de los sensores pasivos; mientras que en el caso de un sensor activo, como el de un radar, sólo la señal registrada será bajo una sola banda o región del espectro de microondas.

A diferencia de los sistemas ópticos, los sistemas radar activos, emiten su propia energía electromagnética y miden la retrodispersión de dicha energía. Algunas de las ventajas de los sistemas radar son: la independencia del clima y los efectos de la iluminación solar. En 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 (Neteler & Mitsova, 2004).

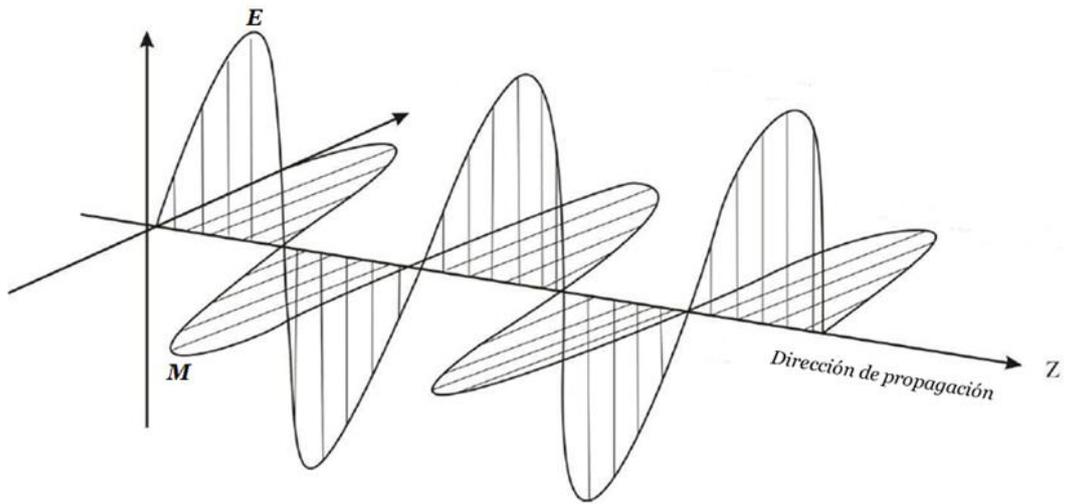


Fig. 1.1 Esquema de una onda electromagnética, el campo eléctrico (E) es perpendicular al plano del campo magnético (M), por lo que ambos campos son perpendiculares a la dirección de propagación de la onda (tomado y modificado de Lee & Pottier, 2009, citado en Dávila-Hernández, 2011).

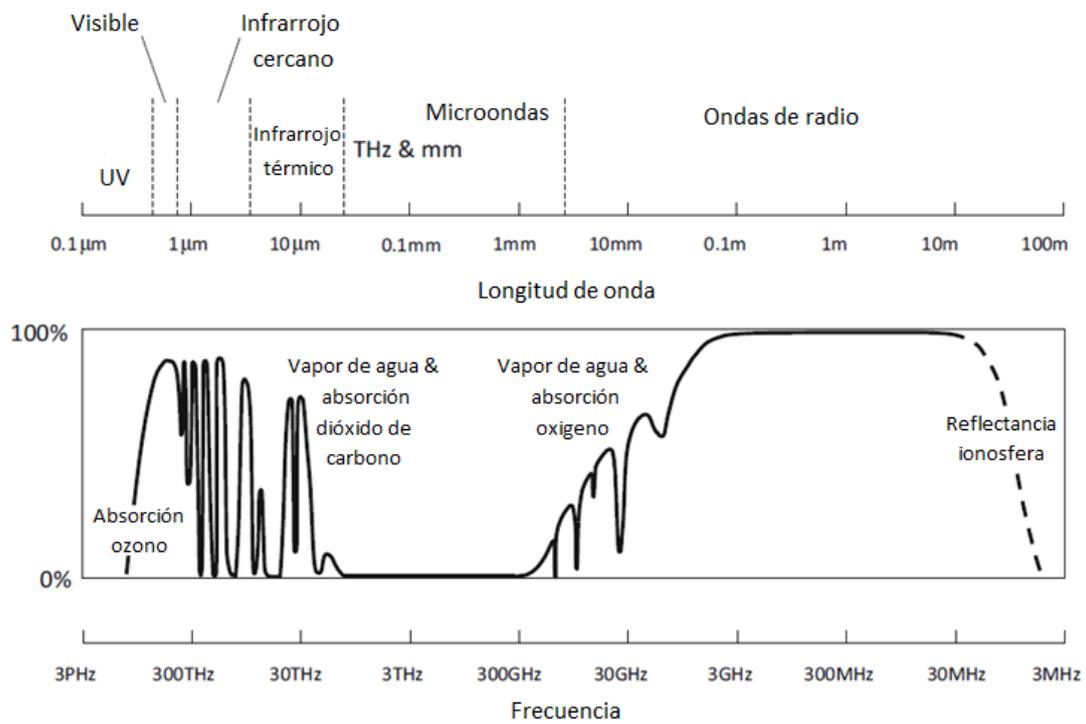


Fig. 1.2 Representación gráfica del espectro electromagnético y de la transmitancia de la atmósfera terrestre (tomado y modificado de Richards, 2009).

1.4 Sensores

Los sensores pueden ser clasificados con base a la fuente de energía que registran. Los que registran los valores de la radiación electromagnética de una fuente de energía externa, ajena, como el Sol; son conocidos como sensores pasivos. Mientras que los sensores que cuentan con su propia fuente de energía, son conocidos como sensores activos (Chandra & Ghosh, 2006).

A continuación se describen las características de las imágenes captadas por sensores remotos:

- Imágenes ópticas adquiridas por sensores pasivos: estas imágenes pertenecen al rango visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio del espectro electromagnético. La fuente de energía es natural, como la emitida por el Sol, y es reflejada por la superficie terrestre y capturada por el sensor. Las aplicaciones de estas imágenes comprenden áreas como la geología (clasificación de litología y prospección de minerales), edafología (clasificación de suelos), monitoreo ambiental (contaminación de aguas superficiales, distribución de desechos mineros, derrames petroleros, deforestación e incendios forestales) y monitoreo de manchas urbanas, Fig. 1.3a.

- Imágenes térmicas adquiridas por sensores pasivos: éste tipo de imágenes pertenecen al rango del infrarrojo térmico o lejano del espectro electromagnético. En éste caso la fuente de energía es el cuerpo en estudio y dicha energía es captada por el sensor. Éstas imágenes suelen utilizarse en el monitoreo de la temperatura superficial de los mares y la exploración geotérmica, Fig. 1.3a.

- Imágenes del espectro de microondas o sistemas radar: estas imágenes son obtenidas por sensores activos. La energía es emitida por el mismo sensor, en este caso un radar, el cual envía un tren de pulsos electromagnéticos que impactan en el terreno, la energía es reflejada por la superficie o cuerpo y captada de vuelta por el sensor, que también funciona como receptor. Las aplicaciones para éste tipo de imágenes son dentro de la vulcanología (estimación de la deformación), monitoreo ambiental (manchas de derrame petrolero, estimación de biomasa), monitoreo atmosférico, riesgo geológico (monitoreo de desplazamientos verticales y/o horizontales del terreno) y generación de Modelos Digitales de Elevación de alta precisión (DEM, por sus siglas en inglés), Fig. 1.3b.

- Imágenes en el rango del espectro del visible, ultravioleta e infrarrojo cercano, obtenidas por un sensor activo: el sistema LiDAR (Light

Detection and Ranging) funciona mediante un pulso de láser, el cual mide la distancia variable del sensor al terreno, permitiendo obtener elevaciones del terreno, es decir, la topografía. El láser opera en el espectro del infrarrojo cercano y en el caso de la obtención de la batimetría, utiliza una luz verde de penetración acuática. El sistema LiDAR es un método que permite generar DEMs con muy buena precisión en la vertical, Fig. 1.3c.

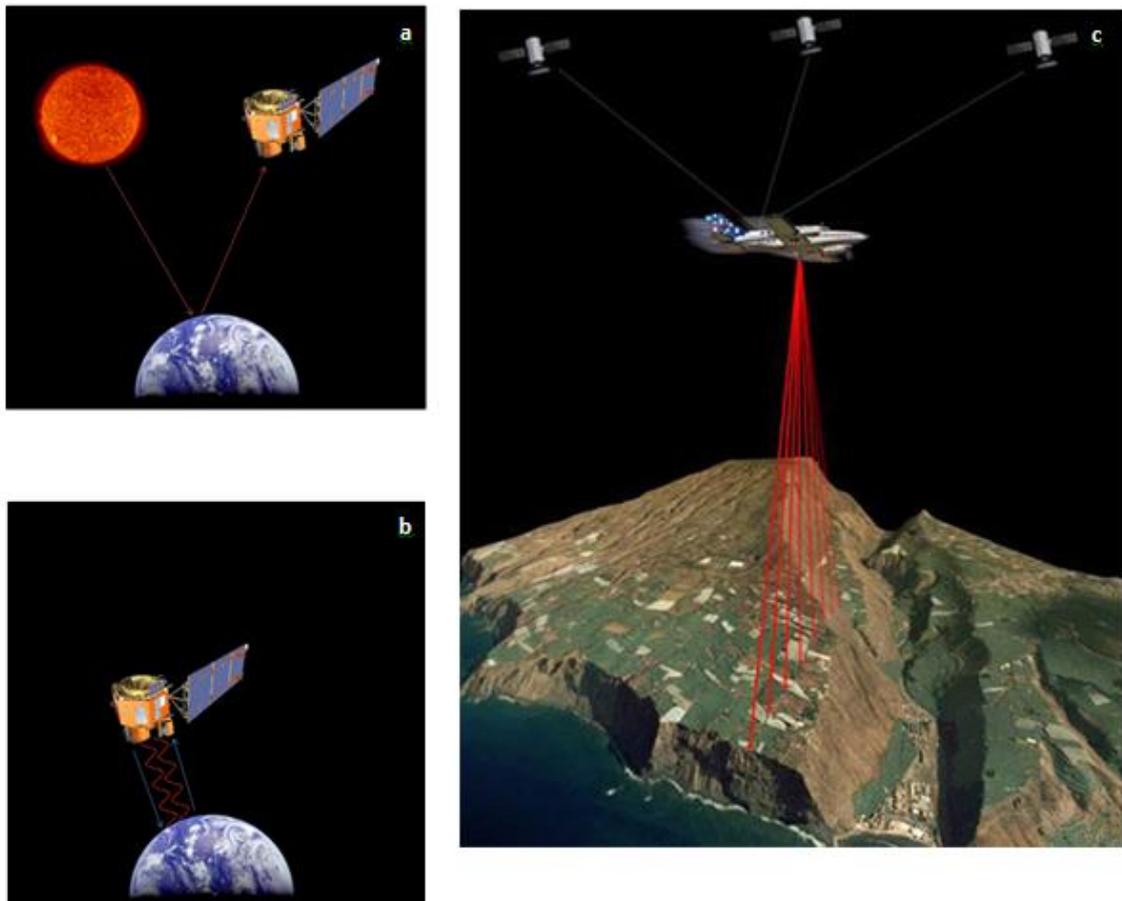


Fig. 1.3 Representaciones de sistemas de sensores pasivos y activos usados en Percepción Remota. El recuadro a) representa un sensor pasivo, ya que su fuente de energía es emitida de forma natural y la reflectividad de dicha energía es captada por el sensor, mientras que en b) el propio sensor envía un pulso de energía (onda electromagnética) y éste pulso impacta sobre el terreno ocasionando que la señal viaje de vuelta al sensor, como lo es en un sistema radar, en c) el sensor emite un haz de luz el cual impacta a la cobertura terrestre y éste haz regresa al sensor, por lo que sigue perteneciendo a un sistema activo (imágenes tomadas y modificadas de la página web de la NASA y la NOAA, 2014).

1.5 Imagen Satelital

Una imagen de satélite se entiende que es una representación de la radiación de la energía capturada por el sensor; por lo que, estos datos contienen, entre otros, la intensidad de energía reflejada o emitida por la cobertura terrestre o, en el caso de un sistema activo, la energía de retorno emitida por el sensor.

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 un sistema radar satelital; cada elemento de la matriz representará un pixel que contenga el valor de la radiación de la energía reflejada para un área determinada (resolución espacial). A éste tipo de formato, se le conoce como ráster.

1.6 Tipos de Resolución

En la adquisición de la imagen mediante sensores remotos, es importante la resolución, por lo que es fundamental entender y conocer los diferentes tipos de resoluciones con las que fueron creadas dichas imágenes.

- 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.

- Resolución espectral: se refiere al número y ancho de bandas espectrales que puede registrar un sensor, por lo que es la sensibilidad que posee un sensor para registrar diferentes longitudes de ondas en el espectro electromagnético. En el caso de un sensor radar, solo tendrá una banda que pertenece a una porción del espectro de las microondas y por lo tanto para éste tipo de sensor será el de menor resolución espectral. Para el caso de sensores ópticos o pasivos, existen dos factores que se consideran en la resolución espectral: a) el número de bandas o canales y b) el ancho de banda; cuanto más estrechas sean estas bandas mayor será la resolución espectral, i.e., que entre más pequeño sea el delta de muestro de la porción del espectro electromagnético. Si el sensor tiene la capacidad de registrar radiación electromagnética en varias longitudes de onda, se conoce como una imagen multiespectral para el caso de un sensor óptico. Si es capaz de registrar información en cientos de bandas se le conoce como imagen hiperspectral. Usualmente las imágenes hiperspectrales son usadas en

estudios de detalle, por lo que la cobertura espacial de éstas imágenes es menor comparada con la de las multiespectrales (Chandra & Ghosh, 2006).

- Resolución radiométrica: es la capacidad del sensor para detectar la diferencia más pequeña de radiación de energía. Se encuentra definida por su valor digital o nivel digital (VD o ND). Por lo tanto, se describe el rango y el número discernible de valores discretos de brillo. 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. Para datos con 8 bits, su resolución radiométrica será de 256 valores (0 a 255 niveles de brillo); mientras que para datos con 12 bits su resolución radiométrica será 4096 niveles de brillo (Richards, 2009).

- Resolución temporal: se refiere al periodo en el que el satélite vuelve a visitar la misma escena. Se trata de la frecuencia de paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre, y suele expresarse en días, meses, en temporadas o incluso en años (Chandra & Ghosh, 2006).

Capítulo 2

Imágenes de radar satelital

Los sistemas radar, fueron desarrollados a principios de la primera mitad del siglo veinte, con finalidades militares. El objetivo primordial de éste sistema, es la capacidad de estimar la distancia de un blanco. Los primeros experimentos se realizaron con sistemas de radar aerotransportados en los años 60's y 70's. El primer sistema de Radar de Apertura Sintética fue montado en el SEASAT de la NASA, lanzado en el año de 1978 y su objetivo era el estudio y monitoreo del océano (Fu & Holt, 1982).

El análisis de imágenes de radar satelital puede tener un grado de dificultad mayor que las imágenes convencionales obtenidas por sensores ópticos, ya que la misma tecnología que involucra a un radar es complicada y la adquisición de los datos es más variada, además el procesamiento de los datos tiene que ser más robusto y la interpretación de los resultados más compleja. Dentro de las ventajas que poseen, es que tienen mayor resolución espacial y su respuesta a variaciones atmosféricas es mucho mejor (Richards, 2009).

2.1 Radar

Radar, acrónimo en inglés: RAdio Detection And Ranging, hace referencia a una técnica y también a un instrumento. La técnica se basa en la comparación entre señales radioeléctricas reflejadas o retransmitidas desde cierta posición a estimar. El instrumento de radar se basa en la propagación de ondas electromagnéticas. Un tren de ondas o pulsos electromagnéticos (en la región de microondas, 1 mm a 1 m, Fig. 2.1a y Tabla 2.1) es emitida por una fuente (radar), dicho tren impacta sobre el objetivo y es reflejado, enviando de vuelta la señal a un receptor. La señal recibida o de retorno, una vez analizada, hace posible la localización del objetivo, asumiendo que la velocidad de propagación de la onda se mantiene constante. Por lo tanto, el radar mide el tiempo que tarda el tren de pulsos en impactar al objetivo y su regreso al receptor, por otro lado, también cuantifica la energía de retrodispersión debido a la interacción de la señal electromagnética con la escena, con ello, es posible inferir cantidades físicas tal como el tamaño o rugosidad de la superficie. Cabe mencionar que se nombra a un radar monoestático cuando usa una sola antena, siendo la antena el transmisor y receptor; mientras que un radar con dos antenas, una transmisora y una receptora, es llamado biestático (Maître, 2008; Hanssen, 2001 & Skolnik, 1962).

Los sistemas de radar operan en la porción del espectro electromagnético que corresponde a las microondas, su longitud de onda (λ) va de 1 metro (m) a 1 milímetro (mm), Fig. 2.1a, este rango también puede ser expresado en frecuencia (f) y va de 300 megaHertz (MHz) a 300 gigaHertz (GHz), respectivamente. Dentro del estudio del monitoreo de la deformación terrestre, las principales bandas de interés son: X ($f=8-12$ GHz, $\lambda=2.5-3.75$ cm), C ($f=4-8$ GHz, $\lambda=3.75-7.5$ cm) y L ($f=1-2$ GHz, $\lambda=15-30$ cm), Fig. 2.1b.

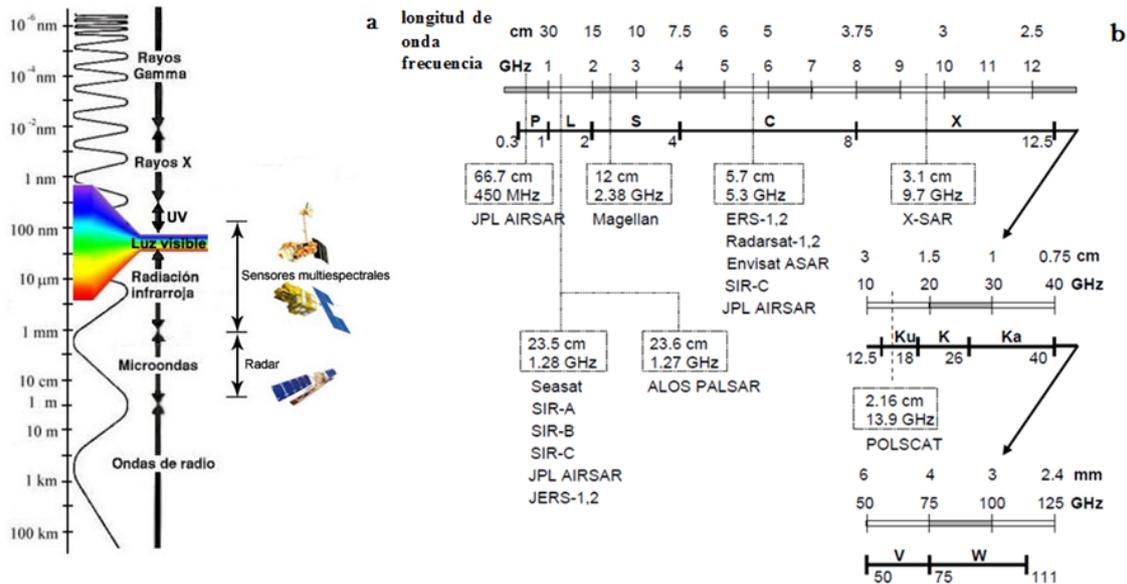


Fig. 2.1 Anchos de banda del espectro electromagnético, en a) se muestran los valores de longitud de onda para los sensores multispectrales y radar, y en b) se muestra parte del espectro de microondas las bandas usadas comúnmente en sensores y misiones de radar, para la banda V existe incertidumbre acerca de la especificación de la misma (tomado y modificado de Richards, 2009).

Bandas	P	L	S	C	X	K _u	W
Frecuencia Central (GHz)	0.35	1.3	3.1	5.3	10	35	95
Longitud de onda (cm)	85	23	9.6	5.66	3	0.86	0.32

Tabla 2.1 Se muestran los valores de frecuencia y longitud de onda para cada banda en el espectro de microondas en sensores SAR (Radar de Apertura Sintética) (tomado y modificado de Soergel, 2010).

2.2 Sistema Radar de Apertura Real (RAR)

Los sistemas de Radar de Apertura Real o Real Aperture Radar (RAR), también son conocidos como SLR o SLAR, es decir, Side-Looking Radar o Side-

Looking Aperture Radar. La geometría del side-looking radar montado en una aeronave o en un vehículo espacial como un satélite, provee una sensibilidad o resolución en el rango; esto se refiere a que la señal que está de vuelta, es ordenada de acuerdo al tiempo de viaje de ida y vuelta, evitando la ambigüedad en la reflexión de la señal. En éste sistema la señal es incoherente, ya que la información de la fase emitida y recibida no fue retenida, esto quiere decir que sólo es registrada la amplitud. Para obtener una mayor resolución en dirección del vuelo o la trayectoria del satélite, se requiere una antena de mayor longitud. Las restricciones prácticas en la longitud de la antena, afecta de manera directa la resolución en la dirección del vuelo (azimut) (Hanssen, 2001).

2.3 Sistema Radar de Apertura Sintética (SAR)

Radar de Apertura Sintética (SAR), es un sistema de radar avanzado que utiliza técnicas de procesamiento de imágenes para sintetizar o simular una antena virtualmente más grande, esto se obtiene mediante la simulación de una tomografía (desplazamiento de la fuente y el receptor, en este caso la antena del radar). Dicho procesamiento también se conoce como “enfocamiento”; con esto se provee una mayor resolución espacial comparado a un sistema de Radar de Apertura Real convencional (Hanssen, 2001).

El sistema SAR opera mediante un señal coherente (en fase), 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 grande de mayor longitud puede ser creada sintéticamente usando un movimiento de la antena, combinando la información del tren de pulsos recibidos de retorno dentro de la longitud de la antena sintética. Por lo anterior, la resolución en azimut aumenta de forma dramática en el orden de tres veces la magnitud de un sistema RAR (Hassen, 2001). En la Tabla 2.2, se muestran las misiones que tienen sensores operando en el espectro de las microondas y trabajan en modo de adquisición SAR.

Nombre	Propietario	Longitud de onda	Fecha de operación
US Seasat	National Aeronautics and Space Administration (NASA)	L-band $\lambda = 23.5 \text{ cm}$	June–October 1978
European Remote-sensing Satellite 1 (ERS-1)	European Space Agency (ESA)	C-band $\lambda = 5.66 \text{ cm}$	1991–2000
Japanese Earth Resources Satellite 1 (JERS-1)	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	L-band $\lambda = 23.5 \text{ cm}$	1992–1998
European Remote-sensing Satellite 2 (ERS-2)	European Space Agency (ESA)	C-band $\lambda = 5.66 \text{ cm}$	1995–2011
Canadian Radar Satellite 1 (Radarsat-1)	Canadian Space Agency (CSA)	C-band $\lambda = 5.66 \text{ cm}$	1995–2013
European Environmental Satellite (Envisat)	European Space Agency (ESA)	C-band $\lambda = 5.63 \text{ cm}$	2002–2012
Japanese Advanced Land Observing Satellite (ALOS)	Japanese Aerospace Exploration Agency (JAXA)	L-band $\lambda = 23.6 \text{ cm}$	2006–2012
Canadian Radar Satellite 2 (Radarsat-2)	Canadian Space Agency (CSA)	C-band $\lambda = 5.55 \text{ cm}$	2007–present
TerraSAR-X	German Aerospace Center (DLR)	X-band $\lambda = 3.1 \text{ cm}$	2007–present
COSMO-SkyMed constellation	Italian Space Agency (ASI)	X-band $\lambda = 3.1 \text{ cm}$	2007–present
TerraSAR Add-on for Digital Elevation Measurements (TanDEM-X)	German Aerospace Center (DLR)	X-band $\lambda = 3.1 \text{ cm}$	2010–present
Sentinel-1A	European Space Agency (ESA)	C-band $\lambda = 5.63 \text{ cm}$	2014–present

Tabla 2.2. Especificaciones de satélites de Radar de Apertura Sintética (SAR) (tomado y modificado de Lu & Dzurisin, 2014).

2.3.1 Generalidades de un sistema SAR

La geometría de una imagen de un sistema SAR, es totalmente diferente a la de un sistema de una imagen óptica, e.g., Landsat, SPOT, ASTER, entre otras. Para la mayoría de las imágenes ópticas, la configuración de la adquisición de dicha imagen es con un ángulo de visión tipo nadir, es decir, nadir-looking; mientras que una imagen de radar tendrá un ángulo de visión tipo side, es decir, side-looking. Debido al tipo de ángulo de visión de la adquisición de una imagen de radar, ésta presenta claras distorsiones geométricas, más adelante se hablará sobre esto (Ferretti, Massonet, Monti, Prati & Rocca, 2007).

Consideremos una plataforma satelital, cuya altura está definida, además de tener una órbita o dirección de viaje definida y con una velocidad constante. Con lo anterior podemos obtener la configuración de un sistema SAR. El satélite tiene montado un sensor SAR capaz de enviar pulsos electromagnéticos que impactarán al terreno y retornarán al mismo sensor. La línea en que se mide la distancia, entre la antena del radar y el objetivo, es conocida como “Línea de Visión” o LOS (Line Of Sight o Slant Range). Mientras que el ángulo que se forma con la vertical al LOS, es conocido como ángulo de incidencia o de visión. La dirección en rango es perpendicular a la dirección del vuelo o de la órbita del

satélite, aunque también es conocida como across-track. La dirección azimut es paralela a la dirección del vuelo o de la órbita, y es conocida también como along-track.

Finalmente, al terminar el barrido, el sensor, conforma una imagen o arreglo de valores de números complejos. El tamaño total de la imagen o el área de cobertura, dependerá del ancho de barrido (swath) de cada misión y el ángulo de incidencia del sensor. Recordemos que la energía reflejada sobre la superficie y captada por el sensor, está estrechamente ligada con la longitud de onda en que opera el radar, el ángulo de visión o incidencia del radar, la polarización de la onda electromagnética y las propiedades dieléctricas de la superficie terrestre. En la Fig. 2.2 se muestra la configuración del sistema SAR con todo los aspectos, antes ya citados (Agudo, Biescas, Monserrat, Martínez, Crosetto, & Herrera, 2003).

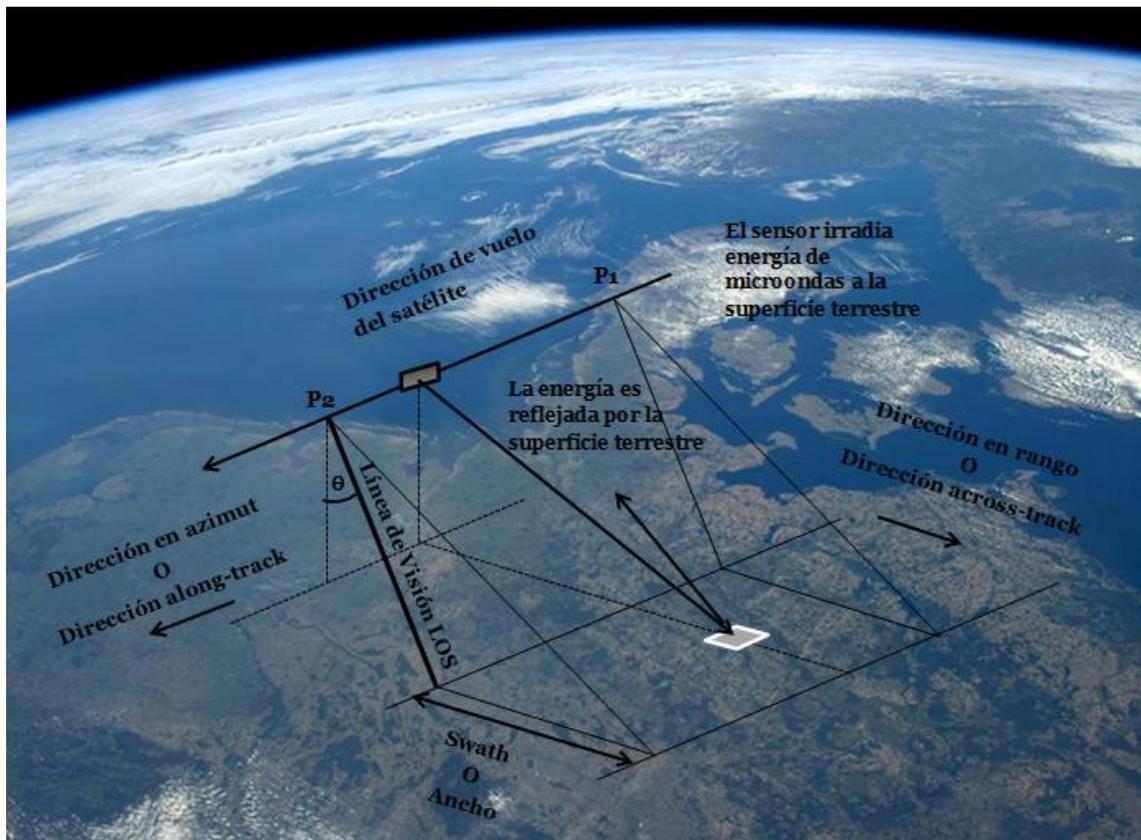


Fig. 2.2 Esquema de la configuración de un sistema de Radar de Apertura Sintética (SAR) y geometría de adquisición de una imagen SAR. La dirección en azimut corresponde a la dirección del vuelo del satélite, mientras que el rango es perpendicular al azimut. “La Línea de Visión o LOS (Line Of Sight)”, corresponde a la dirección en la que son enviados los pulsos de microondas que después regresarán al sensor. El ángulo que se forma con la vertical y el LOS, es conocido como el ángulo de incidencia o de visión θ . La posición P1, es donde comienza el barrido de la imagen SAR y la posición P2, corresponde al final del barrido de la imagen (tomado y modificado de Richards, 2009).

2.4 Información en una imagen SAR

Con la señal transmitida del radar, es posible conocer diferentes características de la escena a estudiar o monitoreada. Podemos obtener la cantidad de energía de la retrodispersión, a través de una imagen de amplitud; con la dirección en que viaja la onda electromagnética podemos describir más propiedades del objetivo o la escena; tener una referencia en tiempo y fase del objetivo; obtener la frecuencia o valores de fase de la señal enviada, esto es, el número de longitudes de onda que le tomó a la señal impactar al objetivo y retornar al radar.

La conformación de una imagen SAR, dependerá en gran medida de la longitud de onda con la que opera el sensor (cuanto mayor sea éste valor, los impulsos emitidos por el sensor serán capaces de penetrar mayormente el suelo y la vegetación), la polarización en la que es emitida y recibida la señal (dirección de la onda, ya sea HH, HV, VV, VH, Fig. 2.3) y el ángulo de incidencia o visión del radar.

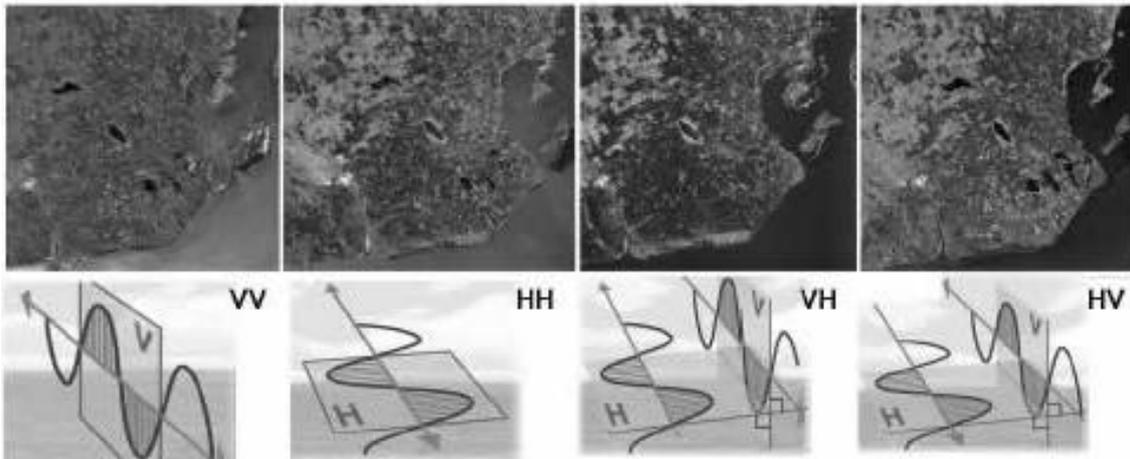


Fig. 2.3 Imágenes SAR de la misión RADARSAT-2, que corresponden a la escena de la provincia sur de Buenos Aires, Argentina. Se muestran las diferentes polarizaciones de una imagen SAR y cómo cambia la intensidad de la energía de la señal para cada tipo de polarización (tomado de Marchionni & Cavayas, 2014).

2.4.1 Imagen compleja SAR

Una imagen SAR puede ser vista como un mosaico de elementos pequeños llamados pixel, o bien, como un arreglo bidimensional formado por columnas y renglones. Cada pixel está asociado o representa un área de la superficie terrestre. Por lo que cada pixel proporciona un número complejo con el cual se obtiene información de la amplitud y la fase de la energía de las microondas emitidas por el sensor y reflejada por la superficie.

2.4.2 Propiedades de una imagen SAR: amplitud y fase

2.4.2.1 Amplitud

La imagen de amplitud se forma a partir de los datos de la intensidad de energía retrodispersada por la señal al impactar sobre la superficie terrestre. Estos valores de dependerán mucho de la rugosidad del terreno y sus propiedades dieléctricas. La constante dieléctrica es una propiedad del material que influye en la fuerza con la que regresará la señal al radar (Lu & Dzurisin, 2014).

Típicamente, rocas expuestas y zonas urbanas muestran amplitudes mayores, puesto que la rugosidad y, por consiguiente, la retrodispersión es mayor. En los lugares donde las áreas son superficies planas y suaves (e.g., cuerpos de agua) se encuentran amplitudes o intensidades bajas, puesto que la retrodispersión es menor. Otro material que tiene un comportamiento muy especial con la señal de radar, es el petróleo derramado por ejemplo en el mar, donde la señal será totalmente absorbida por este material fósil.

La amplitud suele visualizarse con una paleta de grises, Fig. 2.4. Estas imágenes SAR de intensidad de energía de retrodispersión pueden ser usadas para generar mapas de riesgos relacionados con cambios en el terreno, debidos a eventos naturales u ocasionados por actividades humanas, e.g., análisis multitemporal para monitorear el progreso de los cambios sobre el terreno ocasionados por inundaciones, incendios, erupciones volcánicas, efectos de un terremoto o deslizamientos del terreno y asentamientos urbanos (Ferretti *et al.*, 2007).

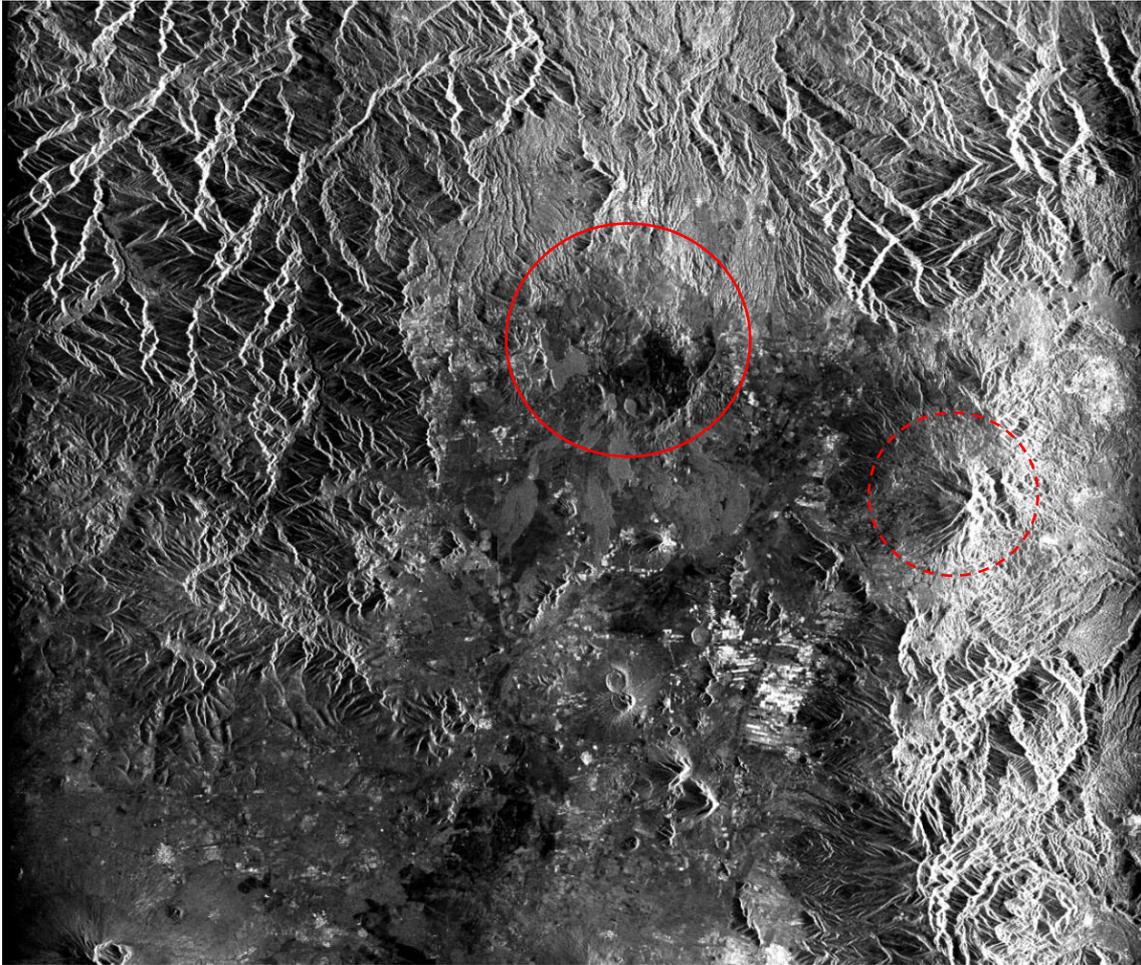


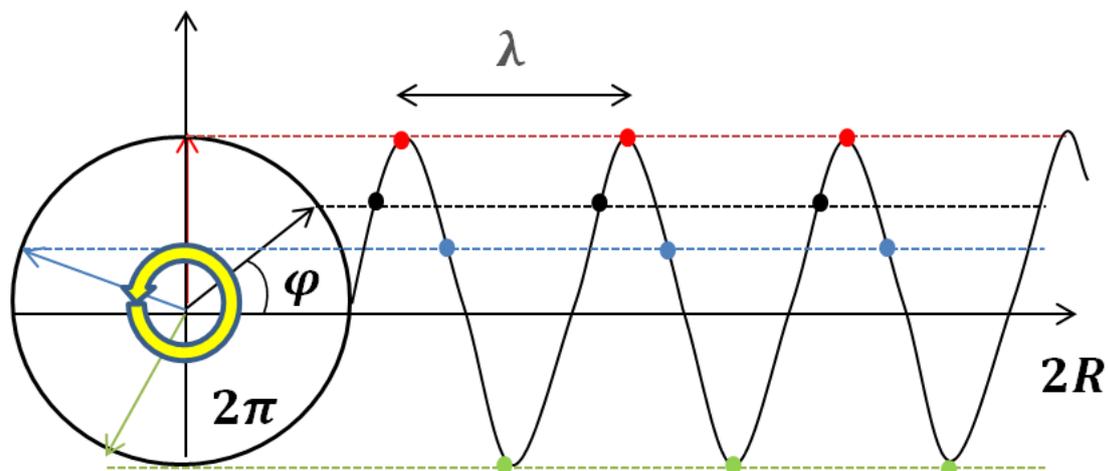
Fig. 2.4 Imagen SAR descendente (misión ENVISAT) de amplitud que cubre la caldera de Los Humeros (circunferencia en rojo) y el cofre de Perote (circunferencia con línea discontinua en rojo), en Puebla-Veracruz México. Se observa que las cumbres de las zonas montañosas tienen una mayor luminosidad, corresponden a los tonos blancos; mientras que las zonas casi planas y rugosas presentan baja luminosidad, y corresponden a los tonos de grises.

2.4.2.2 Fase

Como bien se ha mencionado, el radar transmite una radiación de energía electromagnética, la cual alcanzará su objetivo (dispersores/reflectores) sobre la superficie terrestre y ésta regresará a la antena receptora del radar para formar una matriz o arreglo de números complejos (imagen SAR).

El sistema SAR es capaz de medir el viaje de ida y vuelta de la señal electromagnética. Para los dispersores/reflectores a diferentes distancias del radar, presentará diferentes retrasos entre la transmisión (ida) y la recepción (vuelta) de la energía. La fase es proporcional a la distancia recorrida por la señal de ida y vuelta ($2R$) de la señal, por lo que suele dividirse en dos, Fig. 2.5.

La imagen de fase, como tal, no es útil, ya que su contenido es aleatorio. Para volverla útil, se debe hacer uso de alguna de las técnicas de InSAR (Interferometría de Radar Satelital) (Ferretti *et al.*, 2007).



$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R = \frac{4\pi}{\lambda} R$$

Fig. 2.5 Es quema en el que se representa una función φ sinusoidal que es periódica en $2\pi\pi$ radianes, donde depende de la longitud de onda y la distancia de viaje de la señal de ida y vuelta $2R$ (tomado y modificado de Ferretti *et al.*, 2007).

2.4.3 Efecto speckle, “sal y pimienta”

La presencia de muchos reflectores o dispersores sobre el terreno, genera un efecto llamado “speckle”. Éste efecto está presente sólo en las imágenes SAR, no en las imágenes ópticas (Ferretti *et al.*, 2007). Una de las diferencias más notorias entre las imágenes de radar y las ópticas, es la pobre calidad radiométrica, ocasionada por el traslape del efecto “speckle” en los datos de radar. La Fig. 2.6, muestra una porción de una imagen SAR de una región homogénea, en la cual es notorio el efecto de “sal y pimienta”, que ocasiona una dificultad para interpretar los datos (Richards, 2009).

El efecto “speckle” o “sal y pimienta”, es una consecuencia directa de la superposición de las señales reflejadas por muchos pequeños elementos de reflectores/dispersores compuestos en la escena, representados en cada pixel. Estas señales, tienen una fase aleatoria debido a las múltiples reflexiones entre cada reflector/dispersor. Por lo tanto, dicho efecto es el resultado directo del hecho que la energía incidente es coherente, es decir, puede ser asumido que tiene una única frecuencia y la llegada del frente de onda representado en cada pixel tiene

una única fase. Si hubiese un único gran reflector/dispersor dominante en el pixel, tal como una esquina reflector/dispersor o un edificio, entonces la señal de retorno estará determinada mayoritariamente por la respuesta de este elemento dominante, y la contribución de cualquier otro reflector/dispersor proveniente de fondo será insignificante comparada con la de la esquina reflectora o edificio. Frecuentemente, el pixel será una muestra de un gran número de incrementos de reflectores/dispersores; sus retornos son combinados para dar como resultado la señal recibida para ese pixel (Richards, 2009).

Entonces, el efecto “speckle” tiene un impacto en la calidad y la utilidad de las imágenes SAR. Típicamente, una segmentación de imagen sufre severamente este efecto. Sin embargo, al promediar varias imágenes de la misma área o escena en diferentes tiempos o con ángulos ligeramente diferentes de adquisición, dicho efecto puede ser mayoritariamente disminuido: el promedio de varias imágenes tiende a cancelar la aleatoriedad de la variabilidad de la amplitud, dejando sin cambios el nivel de amplitud de forma uniforme (Ferretti *et al.*, 2007).

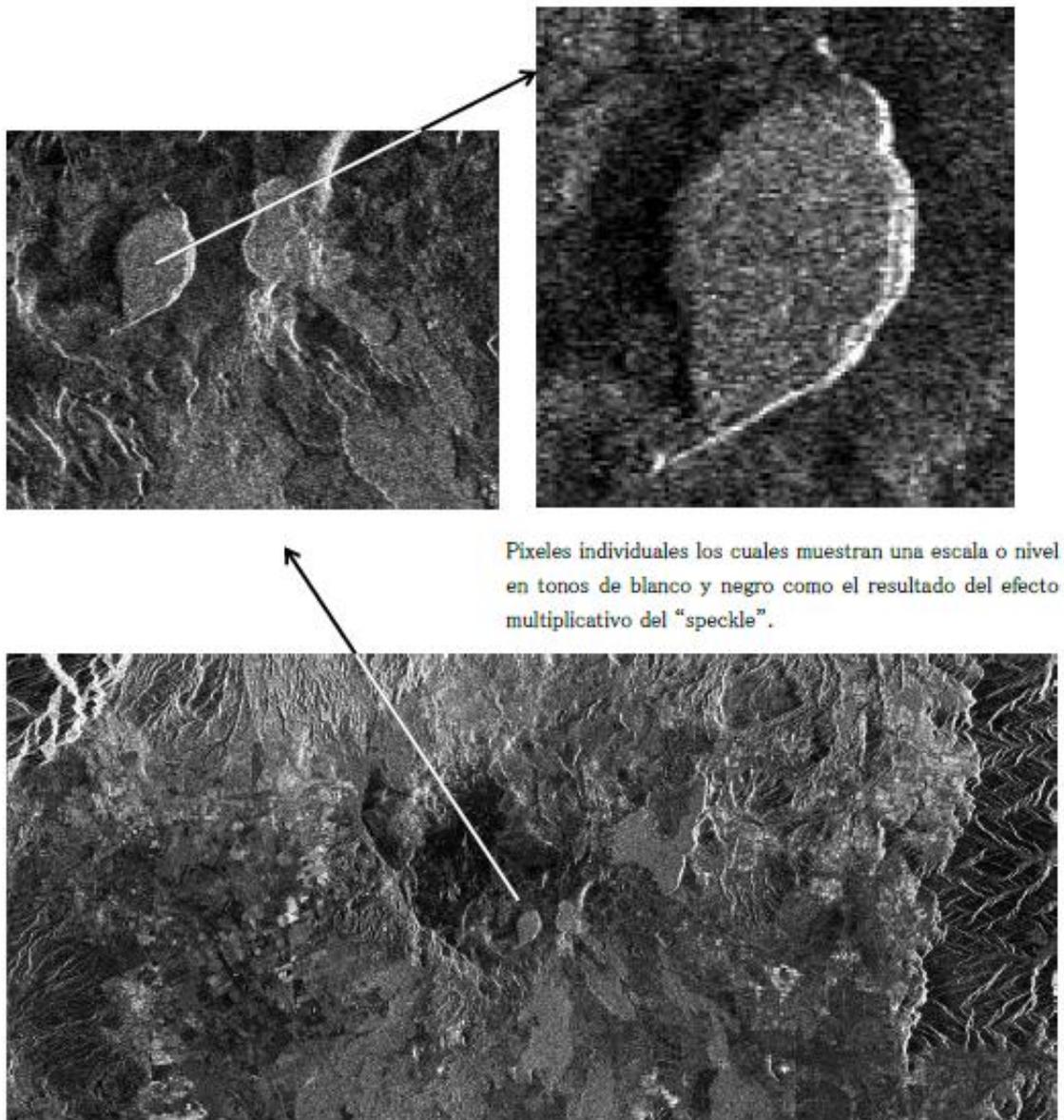


Fig. 2.6 Imagen SAR de la Caldera de Los Humeros en Puebla-México, que muestra el efecto "speckle" causado por la interacción coherente de la radiación incidente sobre muchos reflectores/dispersores dentro de cada pixel.

2.4.4 Geometría de una imagen SAR y sus distorsiones

La representación de la superficie terrestre en una imagen SAR, 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 ésta. Mientras que, en la dirección del rango, se ve afectada claramente por distorsiones como: la inversión

del relieve (layover), escorzo o acortamiento (foreshortenig) y sombreado (shadowing), Fig. 2.7 y 2.8.

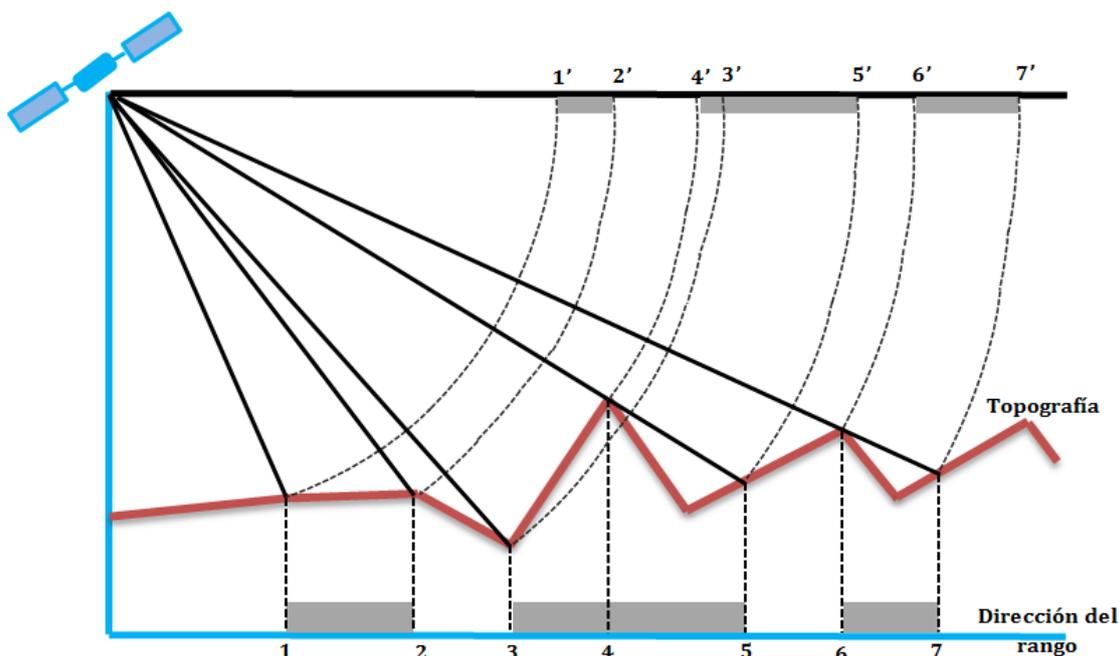


Fig. 2.7 Esquema en el que se presentan las distorsiones geométricas en una imagen de radar satelital en función a la topografía. El segmento 1'-2' presenta el efecto de acortamiento, el segmento 4'-3' presenta el efecto de inversión del relieve, mientras que en los segmentos 3'-5' y 6'-7' presentan el efecto de sombreado (tomado y modificado de Lillesand & Kiefer, 1987).

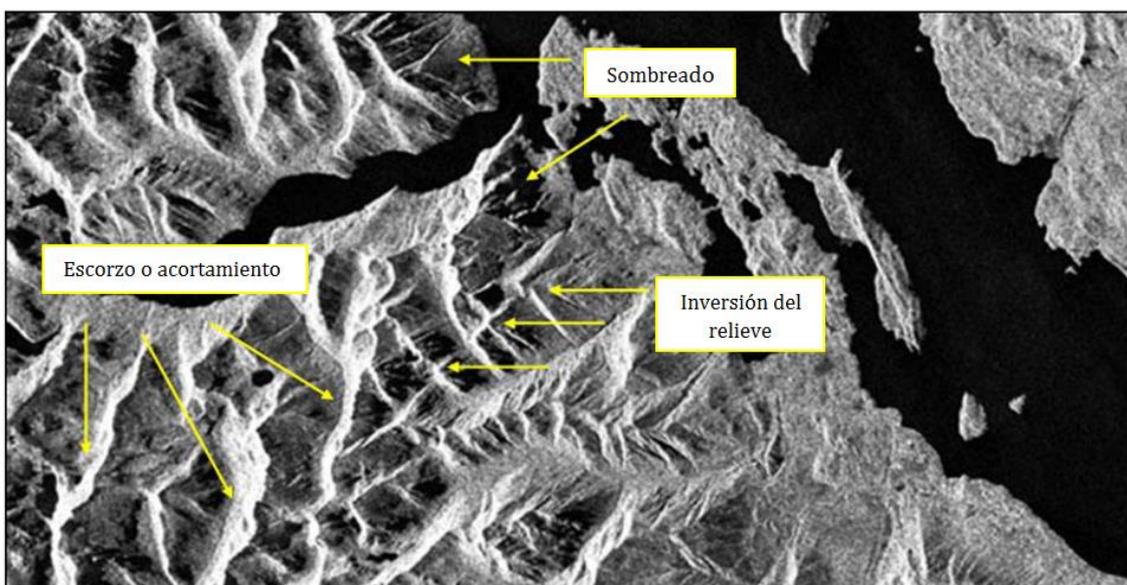


Fig. 2.8 Imagen SAR ascendente de la misión RADARSAT-1, donde claramente se ve afectado por las distorsiones geométricas, debido a la forma de adquisición y visión del sensor. Esta imagen corresponde al Lago Nahuel Huapí en Argentina (tomado y modificado de Marchionni & Cavayas, 2014).

2.4.4.1 Inversión o superposición del relieve (Layover)

Consideremos que la escena presenta un cuerpo de gran altura, como lo sería una montaña. Al enviar el tren de pulsos electromagnéticos el sensor radar, estos pulsos impactan sobre éste cuerpo de gran tamaño con pendientes, la señal de retorno que primero llegará al sensor será la cima de este cuerpo; mientras que la señal de retorno para la base de dicho cuerpo regresará después. Lo anterior, ocasiona una inversión en el relieve o un traslape entre la cima y base, Fig. 2.9 (Richards, 2009).

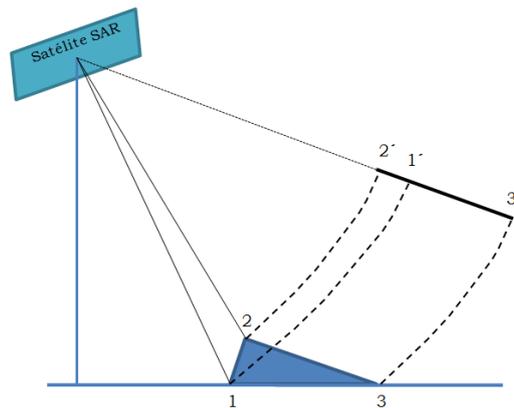


Fig. 2.9 Esquema en el que se representa la inversión del relieve debido a la forma de adquisición de una imagen SAR, el segmento 1-2 de la topografía aparecerá invertido en la imagen de radar en la dirección del rango como 2'-1', esto ocurre en pendientes muy pronunciadas y mayores al ángulo de visión del radar (tomado y modificado de SARMAP ESA, 2009).

2.4.4.2 Escorzo o acortamiento (Foreshortening)

En el caso de una escena, que tiene una topografía con pendientes positivas., cuando el radar envíe sus pulsos electromagnéticos frente a estas pendientes, la distorsión consistirá en que ésta pendiente se verá acortada en el pixel. Pero una superficie plana no sufrirá dicho acortamiento, Fig. 2.10 (Maître, 2008).

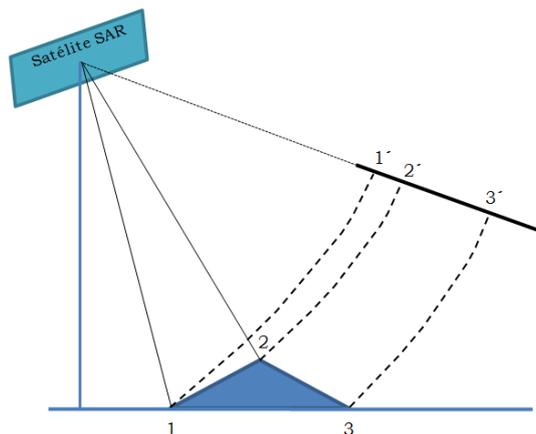


Fig. 2.10 Esquema en el que se representa el efecto de acortamiento de una superficie con pendiente positiva, en la adquisición de una imagen SAR. Para el segmento de la topografía 1-2, en la representación de la imagen en dirección de depresión en rango, vemos que este segmento aparecerá acortado en el segmento 1'-2', mientras que el segmento 2'-3' se verá elongado (tomado y modificado de SARMAP ESA 2009).

2.4.4.3 Sombreado (Shadowing)

Cuando el radar envía sus pulsos electromagnéticos sobre un objetivo, ilumina el frente de dicho objetivo, pero del lado opuesto del objetivo con pendiente negativa, el haz del radar no es capaz de iluminarlo por lo que no habrá información que retorne al sensor. Entonces con éste efecto no habrá información registrada, o de otra forma, podemos decir que del lado opuesto a la iluminación de un cuerpo con pendiente positiva, el radar será “ciego”. Por lo que en la imagen de radar veremos una sombra donde no habrá información, Fig.2.11 (Maître, 2008).

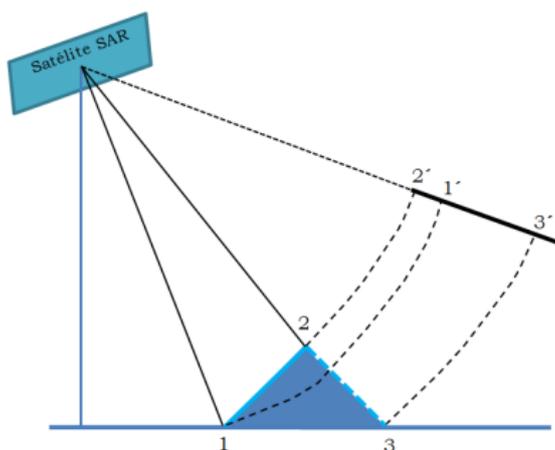


Fig. 2.11 Esquema en el que representa el efecto de distorsión geométrica llamado sombreado. En el segmento de la topografía 2-3, al ser representado en la dirección de depresión en rango, vemos que 1'-3' no aparecerá información registrada por el sensor, ya que el radar no fue capaz de iluminar dicha parte de la escena; por lo que tendremos una sombra. Para el segmento 2'-1' vemos una inversión del relieve (tomado y modificado de SARMAP ESA 2009).

2.5 Acerca de la misión ENVISAT

En julio de 1991, la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), lanza su primera misión con el objetivo de observar a la Tierra, la cual fue llamada ERS-1 (European Remote Sensing). Dentro de los sensores que fueron montados en dicha misión, incluía un sensor de Radar de Apertura Sintética (SAR). En septiembre de 1991, comenzaron a generarse productos que pudieran ser procesados por Interferometría de Radar Satelital o Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). Finalmente, para dar continuidad a ésta misión, fue lanzada por la misma agencia espacial en abril de 1995, la misión ERS-2, la cual era muy parecida a su antecesor pero con un instrumento extra montado en el satélite (el cual era capaz de monitorear los niveles de ozono en la atmósfera). En marzo de 2000, acabó la vida de la misión ERS-1, mientras que la misión ERS-2 dejó de operar en julio de 2011 aunque desde enero del 2001 ERS-2 presentó un fallo; por lo que los datos proporcionados a partir de dicha fecha son menos precisos. Para ambas misiones su periodo de muestreo de la misma escena era de 35 días (Ferretti *et al.*, 2007).

El 28 de febrero del año 2002, la ESA lanza la misión ENVISAT (ENVIRONMENTAL SATellite) como sucesor de las misiones ERS-1/2, Fig. 2.12 (Dubock *et al.*, 2001). Éste satélite seguía una órbita polar solar-sincrónica sobre una altura cerca de los 800 km y con un periodo de muestreo de 35 días. Ésta misión, tenía montados diez instrumentos, entre ellos sensores ópticos sofisticados y sensores de radar, para proveer una observación continua de la superficie terrestre, la atmósfera, el océano y las capas de hielo. En la Tabla 2.3 se muestra los instrumentos montados en ENVISAT (Dragani *et al.*, 2014 & Ferretti *et al.*, 2007).

ENVISAT contaba con un sensor de radar ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar), el cual operaba bajo la frecuencia de la banda C ($f=5.3$ GHz, $\lambda=5.6$ cm), con ángulo promedio de incidencia o de visión de 23° . El sensor era capaz de operar en diferentes modos de adquisición relacionados con el tamaño del ancho de la imagen (desde 100 km o 400 km), por lo que las imágenes SAR obtenidas en el preprocesamiento tenían una resolución espacial de 20×5 m y el área de la escena cubierta era de 100×100 km (Ferretti *et al.*, 2007). El 8 de abril de 2012, dejó de operar la misión ENVISAT (Dragani *et al.*, 2014).

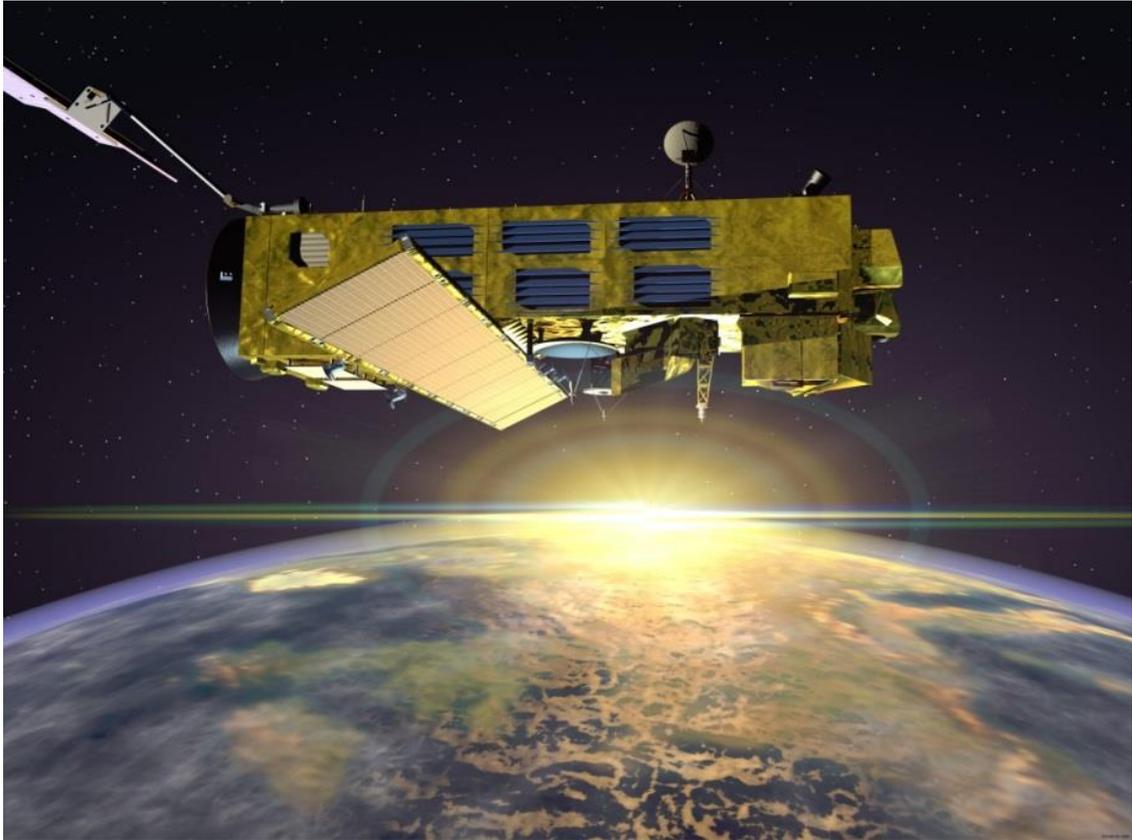


Fig. 2.12 Imagen artística del satélite ENVISAT (ESA, 2001).

Instrumentación ENVISAT	
Acrónimo	Instrumento
ASAR	Advanced Synthetic Aperture Radar
GOMOS	Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars
MERIS	Medium Resolution Imaging Spectrometer
MIPAS	Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding
MWR	MicroWave Radiometer
RA-2	Radar Altimeter 2
SCIAMACHY	Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography
AATSR	Advanced Along Track Scanning Radiometer
DORIS	Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite
LRR	Laser Retro-Reflector

Tabla 2.3. Se muestran los acrónimos de cada instrumento, montado en la misión ENVISAT (tomado y modificado de Dragani *et al.*, 2014).

Capítulo 3

Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR)

El deslizamiento silencioso de las placas tectónicas de una sobre otra, el flujo de los glaciares, el levantamiento y hundimiento del terreno. Las fuerzas geológicas que dan forma a la Tierra, generalmente actúan con tal sigilo que la mayoría de las personas no lo perciben hasta que, la ruptura repentina de una falla geológica o la ocurrencia de una erupción volcánica cerca de una zona poblada, hace que los seres humanos perciban que la Tierra está en constante movimiento y deformación (Massonnet, 1997).

Los desplazamientos que ocurren sobre la superficie terrestre o en el terreno, tienen una dirección vertical y/o horizontal, pueden ser debido por procesos naturales o causas antropogénicas, e.g., extracción de fluidos (agua, gas, petróleo, vapor), extracción de minerales, obras subterráneas, etc. (Agudo *et al.*, 2003).

Existen técnicas capaces de detectar la deformación superficial terrestre con ayuda de instrumentación topográfica y geodésica convencional, como la nivelación de precisión, y de instrumentación geodésica más sofisticada, tal como los GPS's (Global Positioning System) y GNSS (Global Navigation Satellite System). Una de las ventajas de éstas técnicas es que por ser manuales pueden ser muy precisas; aunque una gran desventaja es su cobertura espacial limitada y el costo de instalación elevado cuando se trata de cubrir grandes áreas.

Ante las desventajas antes mencionadas, se puede hacer uso de técnicas modernas de geodesia y percepción remota, como el procesamiento de imágenes de radar satelital, en particular, la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR o IFSAR, por sus siglas en inglés).

Las imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR), nacieron como resultado de las investigaciones y avances de la física, electrónica, procesamiento digital de señales y finalmente el procesamiento de imágenes. La forma más común de explotar estas imágenes, es a través de la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). El principio fue descrito por Graham en 1974 y validado mediante el procesamiento de datos provenientes de la misión SIR-B. Recordemos que la primera misión espacial con un sensor SAR montado en ella, fue el SEASAT de la NASA (Maître, 2008), sin embargo, no fue hasta el

lanzamiento de la misión ERS-1, de la Agencia Espacial Europea (ESA), en 1991, que ésta técnica comenzó a desarrollarse rápidamente, Fig. 3.1.

Recordemos que en un sistema de radar convencional, sólo seremos capaces de obtener información de la amplitud, ya que el radar sólo almacenaba dicha información. Pero en la técnica de interferometría, la fase es de vital importancia, ya que es lo que se explota de la imagen SAR. La interferometría usa la información de la fase contenida en una imagen SAR, con una sensibilidad de la medición de la distancia, o más exactamente de la variación de las distancias. Por lo que con el procesamiento de la fase de dos o más imágenes SAR de la misma región o escena, son combinadas dichas imágenes (interferir la señal de cada imagen), con ello es posible reconstruir los desplazamientos relativos del terreno; con una precisión centimétrica e incluso milimétrica, a lo largo del tiempo ya sea desde días, meses o años. Las aplicaciones de ésta técnica son numerosas, como lo es en el campo de la geofísica, topografía, geología, hidrogeología, glaciología, vulcanología, ciencias forestales, en la explotación de gas y petróleo, o en la gestión de recursos minerales en general (Maître, 2008; Richards, 2009; Lu & Dzurisin, 2014).

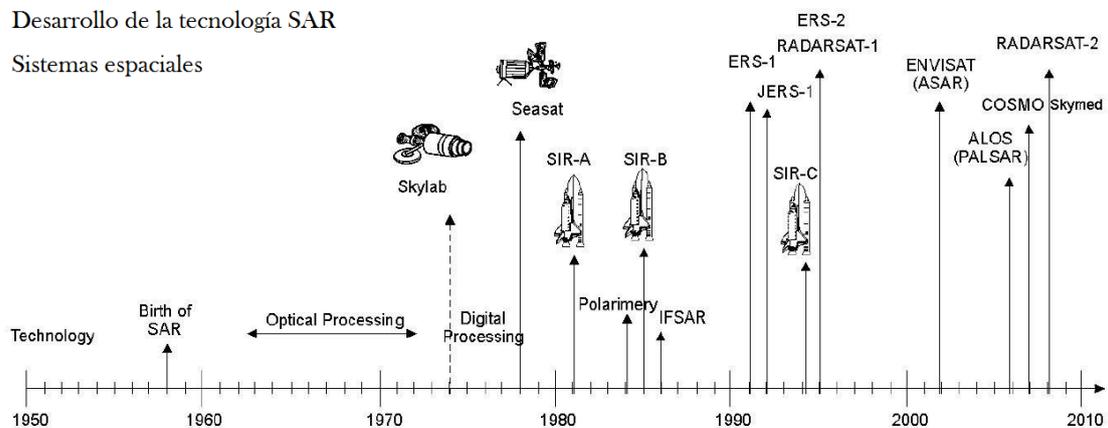


Fig. 3.1 Línea del tiempo en el que se muestra la evolución del radar, imágenes de radar, los instrumentos SAR, imágenes SAR, el desarrollo de la InSAR y de las misiones que han existido. Algunas misiones siguen en operación, en la línea no se muestra TerraSAR-X (2007), TanDEM-X (2010), ALOS PALSAR-2 (2014) y Sentinel-1A (2014) (tomado y modificado de Marchionni & Cavayas, 2014).

3.1 El principio de InSAR

El principio de la InSAR se basa en la comparación de dos o más imágenes SAR, a través de la cual se explota la información contenida en la fase, relacionada con los desplazamientos del terreno y el tiempo de viaje completo de la señal (ida y vuelta). Recordemos que la amplitud sólo contiene información de la cantidad de energía retrodispersada y que ello depende de las propiedades del terreno como la rugosidad y la constante dieléctrica.

Consideremos entonces una plataforma, como un satélite, el cual tiene montado un sensor SAR. Dicho sensor es capaz de enviar energía electromagnética, operando en la banda de microondas e iluminar a la superficie terrestre. La energía reflejada será registrada por el sensor para conformar un arreglo bidimensional de números complejos, para así formar los datos de una imagen SAR (López-Quiroz, 2008). La plataforma tendrá un periodo de muestreo definido para la adquisición periódica de la misma escena. La primera adquisición de la imagen SAR será nombrada como imagen “master” y será la imagen de referencia, mientras que la segunda adquisición o imagen será nombrada como “slave”; el valor del periodo de muestro entre la primera y la segunda imagen es conocida como línea de base temporal (Bt), por lo general se expresa en días.

Es importante mencionar que al adquirir una imagen SAR, no siempre la plataforma mantendrá la misma posición de su órbita, por lo tanto la geometría en cada adquisición será distinta. La separación de la posición del satélite, entre la primera y la segunda adquisición, es conocida como línea de base (baseline B) y la proyección, perpendicular a la dirección de la línea de visión del sensor (Line Of Sight o LOS) es conocida como línea de base perpendicular (B_{\perp}) y éste parámetro se expresa en metros (Hernández-Jaramillo, 2012), Fig. 3.2.

La InSAR consiste, grosso modo, en hacer interferir dos señales de dos imágenes SAR tomadas en diferentes fechas pero que corresponden a la misma escena y con la misma geometría de la órbita (ascendente o descendente). Hacerlas interferir, significa realizar la diferencia entre los valores de fase de cada imagen. El resultado o la diferencia de fase es conocida como fase interferométrica y su representación gráfica es conocida como interferograma. Más adelante entraremos a detalle sobre el contenido de ésta fase y el cálculo de un interferograma.

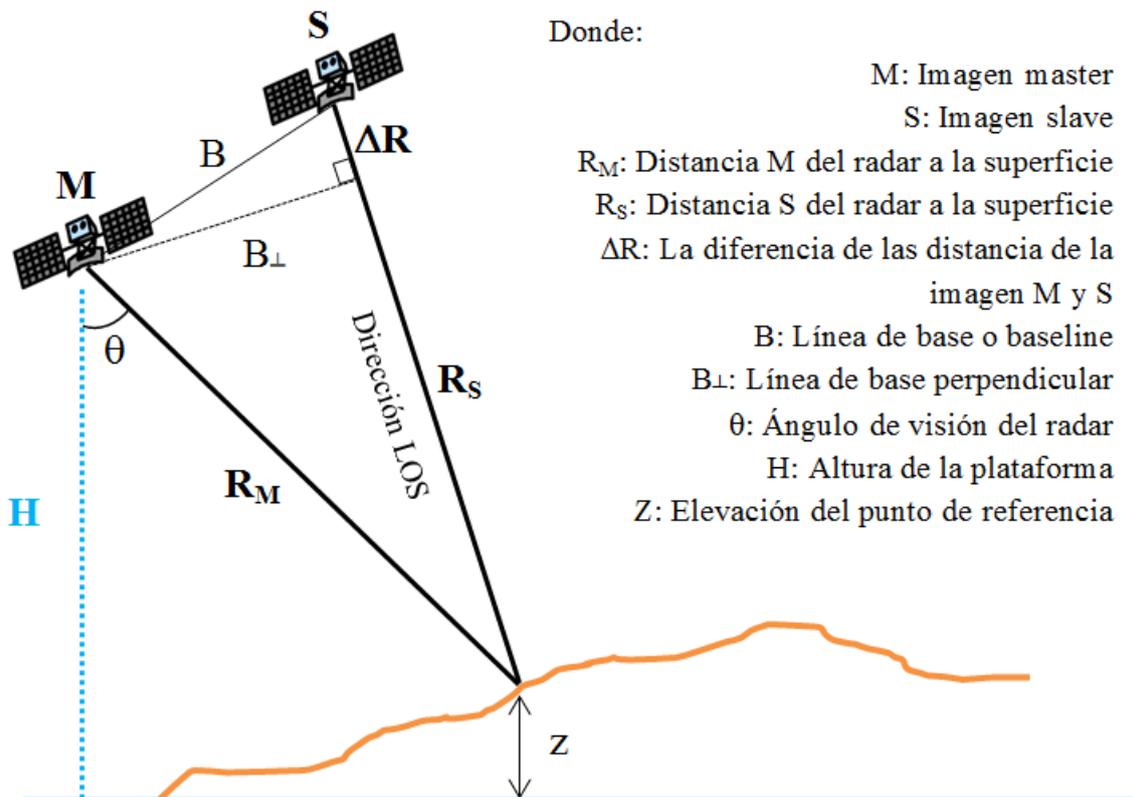


Fig. 3.2 Representación de la geometría de imágenes SAR en la técnica InSAR.

3.2 Las imágenes SAR en crudo, la Single-Look Complex (SLC) y el Multi-Look

Los datos en crudo, generados por un sistema SAR, contienen información de la señal reflejada por la superficie o blanco y capturada o registrada por el sensor (Maître, 2008). Dicha información, contiene la huella del sensor y a su vez contiene la información de cientos de señales que están dentro de cierto valor de una muestra, ésta información es representada por números complejos. Para invertir éste problema, se reconstruye cada muestra mediante la técnica de “proceso de apertura sintética” o “enfocamiento” (López-Quiroz, 2008; Ávila-Olivera, 2010), que se asemeja a realizar una tomografía. Una vez que los datos son procesados en términos del rango (compresión de los pulsos) y el azimut (síntesis SAR) (Maître, 2008), obtendremos un arreglo bidimensional de números complejos nuevamente, el cual es llamado imagen Single-Look Complex (SLC), Fig. 3.3 (Hanssen, 2001).

La SLC, es una imagen que parece estirada ya que su resolución es rectangular, como el caso de ENVISAT es de 20x5 m; por lo que para efectos de distinguir mejor los objetos en ella, se realiza un procesamiento llamado Multi-

Look, Fig. 3.4. Éste proceso consiste en promediar varios pixeles en azimut y con ello se logra reducir el efecto “speckle”. Finalmente de haber realizado éste proceso se crea un pixel cuadrado, e.g., 20x20 m en el caso de ENVISAT (Maître, 2008).

El contenido de información de un pixel después de haber realizado el proceso de Multi-Look, es un número complejo z , el cual puede ser presentado como la suma de su parte real e imaginaria, $z=Re+jIm$. También puede ser expresada en su forma polar o de Euler, $z=Ae^{j\phi}$ (López-Quiroz, 2008). Donde la A , representa la amplitud general de cada pixel que representa la cantidad de energía retrodispersada por el suelo hacia el sensor; mientras que ϕ , es la fase contenida en cada pixel, pero ésta fase está compuesta por dos contribuciones. La ecuación que representa la fase es la siguiente:

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda}R + \phi_{scat} \quad (3.1)$$

El primer término de la Ec. 3.1, corresponde a la distancia (R) entre la antena del radar y la superficie, donde λ es la longitud de onda en que opera el radar. El segundo término contiene información acerca del patrón de distribución de los dispersores en la escena, por lo que ésta contribución es aleatoria ya que en cada pixel los patrones de distribución serán totalmente distintos (López-Quiroz, Doin, Tupin Briole & Nicolas, 2009; Richards, 2009).

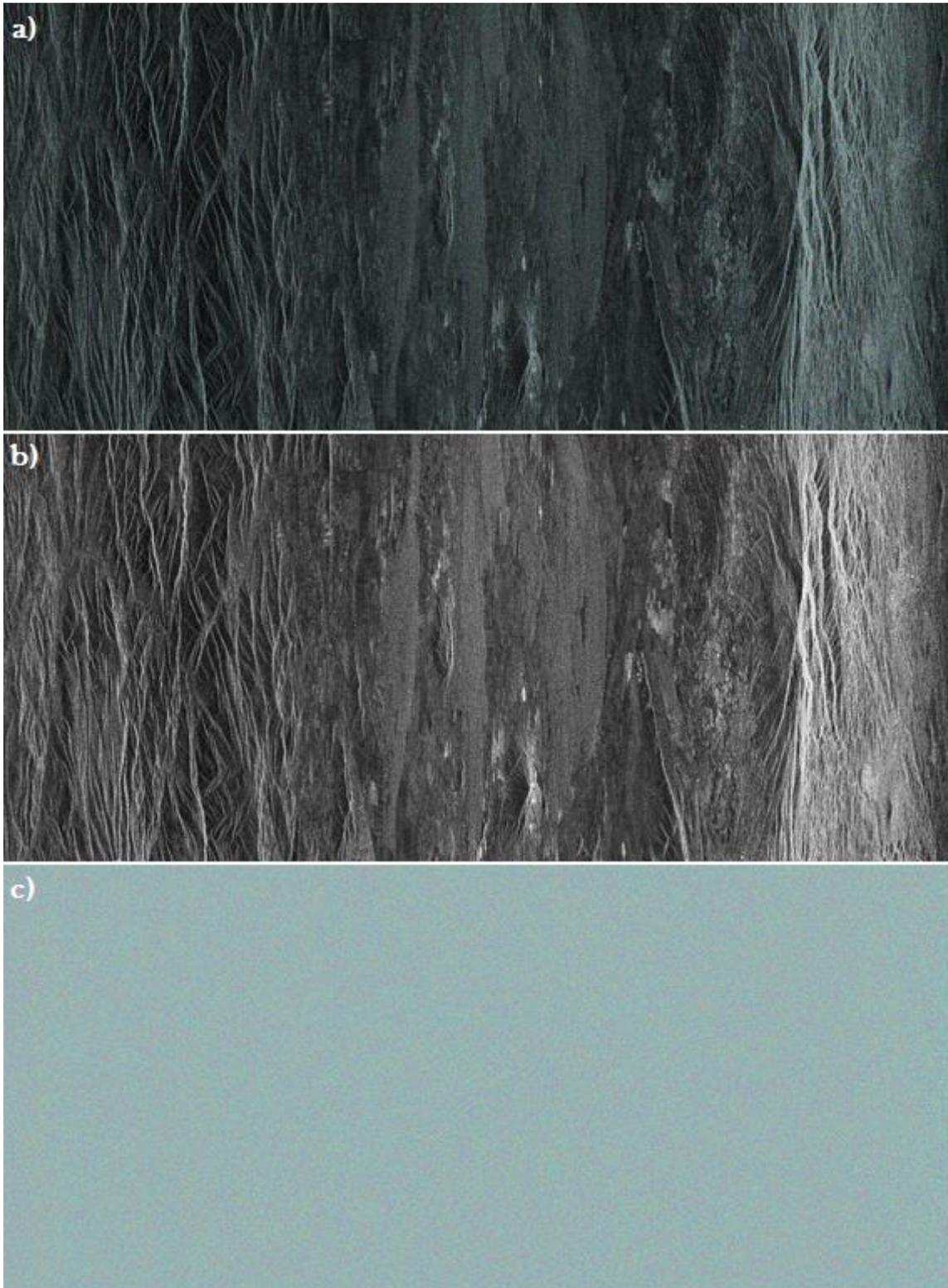


Fig. 3.3 En a) se muestra una porción de la SLC, donde están sobre puestas la imagen de amplitud y la imagen de fase. Ésta SLC corresponde a una parte de la escena sobre la caldera de Los Humeros, en b) se muestra la imagen de amplitud de la SLC, en la cual se nota claramente la elongación o estiramiento de la imagen y en c) se muestra la imagen de fase de la SLC, dominada por la contribución aleatoria.

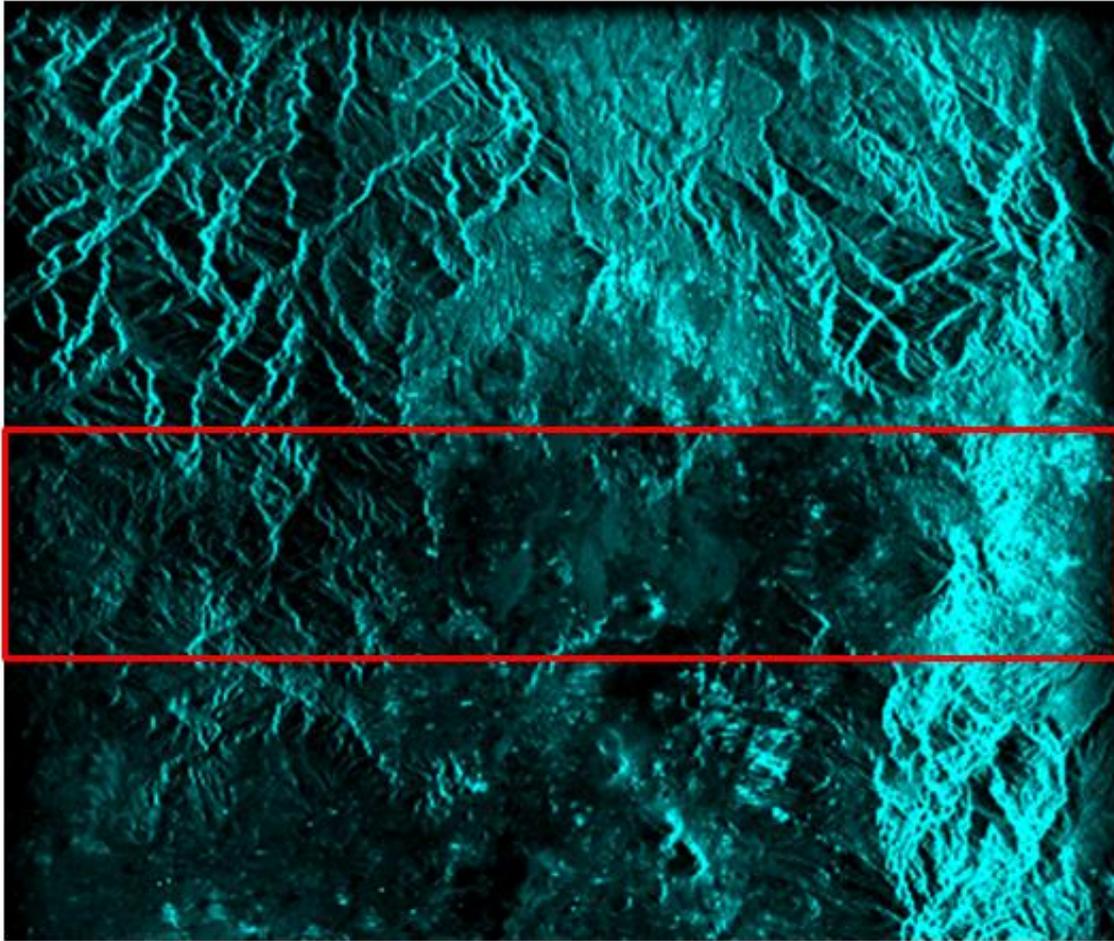


Fig. 3.4 Imagen SLC después de haber sido aplicado el proceso de Multi-Look. Ésta escena fue procesada a 16 looks, nótese como visualmente es más sencillo de distinguir patrones morfológicos, comparado a la imagen full resolution de una SLC. El rectángulo rojo representa el área de la imagen SLC en la figura anterior.

3.3 El cálculo de interferogramas

Consideremos la imagen SAR de referencia llamada “master”, y la segunda imagen SAR llamada “slave”. Si cada imagen es tomada en diferentes tiempos, tienen una desviación de órbita pequeña (una línea de base perpendicular pequeña), y corresponden a una misma escena, es posible obtener el valor de desplazamiento vertical e incluso horizontal sobre dicha escena; mediante la interferencia de ambas imágenes. El resultado de interferir ambas imágenes, es un interferograma, el cual contiene en cada pixel los valores de la fase interferométrica o diferencia de fase. En dicho interferograma podemos observar patrones de franjas, las cuales representan isocurvas de deformación o desplazamiento.

3.3.1 Obtención de la fase interferométrica

Retomemos las imágenes “master” y “slave”, ya antes mencionadas; cada una será expresada respectivamente como:

$$z_M(x) = A_M(x)e^{j\phi_1} \quad (3.2)$$

$$z_S(x) = A_S(x)e^{j\phi_2} \quad (3.3)$$

Y el contenido de cada fase, será expresada como:

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}R_1 + \phi_{scat} \quad (3.4)$$

$$\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}R_2 + \phi_{scat} \quad (3.5)$$

Por lo que, para obtener la fase interferométrica ϕ_{int} o diferencia de fase, debemos multiplicar la imagen SAR “master” por el complejo conjugado de la imagen SAR “slave” (Hanssen, 2001; Rosen *et al.*, 2000). La obtención de la fase interferométrica está expresada en la Ec. 3.6.

$$z_M z_S^* = |A_M|e^{j\phi_1}|A_S|e^{-j\phi_2} = |A_M||A_S|e^{j(\phi_1-\phi_2)} = |A_M||A_S|e^{j(\phi_{int})} \quad (3.6)$$

Recordemos que al hacer la diferencia entre las ecuaciones 3.4 y 3.5, la componente que hace referencia a la distribución de los patrones de los dispersores, ϕ_{scat} , se hará nulo si se mantienen las mismas propiedades de distribución de los objetos en la escena.

El resultado de dicha diferencia es el interferograma, compuesta por la imagen de amplitud y la imagen de fase interferométrica. En este punto la imagen de fase interferométrica está compuesta por varias contribuciones de fase, Fig. 3.7.



Fig. 3.7 Fase interferométrica que corresponde a la caldera de Los Humeros en Puebla-México.

3.4 Contenido de la fase interferométrica

La fase de un interferograma, conocido como fase interferométrica, está compuesta por diferentes contribuciones que corresponden: a la geometría de cada adquisición, la morfología de la topografía, los valores de desplazamiento de la superficie referidos a la línea de visión del sensor (Line Of Sight o LOS), los retrasos de la señal al atravesar la atmósfera (cambios atmosféricos en cada adquisición) y debidos al ruido inherente en la señal (Hanssen, 2001; Hooper, Segall & Zebker, 2007).

A continuación se presenta el contenido de la fase interferométrica:

$$\varphi_{int} = \varphi_{orb} + \varphi_{top} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \quad (3.7)$$

Donde la primera componente es la fase orbital, la segunda componente es la fase topográfica, la tercera componente es la fase de deformación, la cuarta componente es la fase atmosférica y finalmente el ruido de fase o decorrelación.

Cuando el interés se concentra en conocer la componente relacionada con la deformación, es necesario deshacerse del resto de las contribuciones.

3.4.1 Contribución de fase orbital

Ésta contribución en la fase interferométrica, 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 ésta contribución en el interferograma, se realiza el proceso de aplanado del interferograma (Lu & Dzurisin, 2014). La variación de fase debido a ésta contribución puede ser expresada como (ecuación tomada y modificada de López-Quiroz, 2008):

$$\varphi_{orb} = \frac{4\pi B_{\perp} \Delta R}{\lambda R \tan \theta} \quad (3.8)$$

Donde B_{\perp} es la línea de base perpendicular, calculada a partir de un vector de posición estimado por el sensor DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) montado en el satélite ENVISAT, y los datos de órbitas precisas proporcionadas por el Department of Earth Observation and Space Systems (DEOS) de la Universidad Tecnológica de Delft (TU Delft) (Scharro & Visser, 1998, citado por López-Quiroz, 2008). La ΔR representa la variación de la distancia en dirección de la línea de visión (LOS), λ es la longitud de onda en la que opera el sensor SAR, mientras que R es la distancia del radar a un punto sobre la superficie de la escena, y finalmente θ es el ángulo de incidencia del sensor.

En ocasiones, a pesar de estimar ésta contribución y removerla del interferograma, aún queda una parte residual o remanente, la cual puede ser removida mediante un plano que simula una rampa orbital (Cavalié *et al.*, 2007; López-Quiroz *et al.*, 2009).

3.4.2 Contribución de fase topográfica

Una vez eliminada la contribución de la fase orbital, existe otra variación en la fase interferométrica que está relacionada con el efecto de la topografía, es decir, existe un efecto estereoscópico (Massonnet & Feigl *et al.*, 1998), debido a

los diferentes ángulos de incidencia del sensor en cada pasada del satélite (D'Iorio *et al.*, 1997; Toutin, 1999, citados en Marchionni & Cavayas, 2014). Por lo que ésta contribución produce en el interferograma franjas que parecen ser curvas de nivel, las cuales serán llamadas franjas topográficas.

Aunque la sensibilidad para detectar el relieve topográfico mediante InSAR puede ser usada en el cálculo de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM), en el estudio de la deformación terrestre, éste efecto será considerado como un artefacto. Para eliminar o reducir lo más posible esta contribución, se utiliza un DEM, que se sustrae a la fase interferométrica. Dicho DEM puede provenir de datos externos o bien, del análisis de otro par interferométrico donde se considere que la deformación es cero. La fase topográfica es representada como (ecuación tomada de López-Quiroz, 2008):

$$\varphi_{top} = \frac{4\pi B_{\perp} \Delta h}{\lambda R \sin\theta} \quad (3.9)$$

La línea de base perpendicular B_{\perp} y la diferencia de elevaciones Δh en la escena, es proporcional a la contribución topográfica. Por lo que a mayor valor de línea de base perpendicular, mayor será el efecto topográfico presente en el interferograma. El residual de ésta contribución será conocido como un artefacto topográfico o error de DEM.

3.4.3 Contribución de fase de deformación (desplazamientos en la superficie o terreno)

Si el terreno presenta desplazamientos entre dos imágenes SAR, podemos medir la deformación a través de la diferencia de fase entre ellas. Para tomar la primera imagen, la señal electromagnética viajó un número determinado de ciclos o longitudes de onda para impactar el terreno. Lo mismo ocurre con la adquisición de la segunda imagen. Sin embargo si al tomar la segunda imagen la señal electromagnética viajó más ciclos, esto puede deberse a un alejamiento del terreno respecto al radar. De igual manera, si la señal tuvo que viajar menos ciclos, esto puede deberse a un acercamiento de la superficie respecto al radar. Por lo anterior, al calcular la diferencia de longitudes de onda o de fase entre ambas escenas sabremos que el terreno sufrió un desplazamiento, Fig. 3.8 & 3.9. El desplazamiento estará medido en la dirección de línea de vista del sensor (LOS). Sin embargo, éste vector también puede proyectarse sobre la vertical (o la horizontal) y convertirse a centímetros o milímetros. A continuación se muestra la expresión para proyectar el vector de desplazamiento en la vertical (Agudo *et al.*, 2003):

$$Def = \frac{\lambda \varphi_{def}}{4\pi \cos\theta} [cm] \quad (3.10)$$

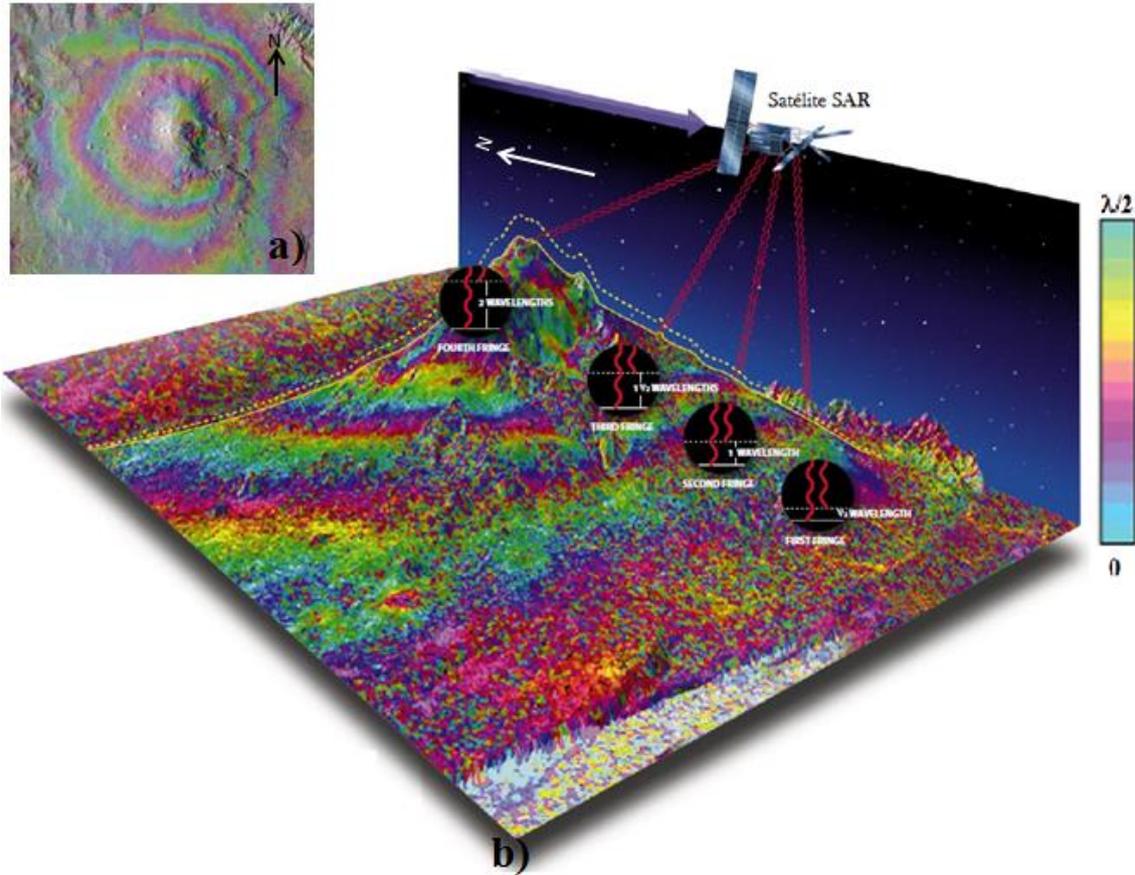


Fig. 3.8 En la figura a) se muestra un interferograma del Monte Etna en Italia, dicho interferograma fue generado a partir de la misión ERS, éste interferograma muestra los patrones de deformación o franjas que representan isocurvas de deformación; si se observa la figura b) vemos que existen cuatro franjas de deformación, de acuerdo a la escala mostrada de lado derecho, vemos que la franja equivale de 0 a $\lambda/2$ de longitud de onda del sensor, por lo que esos valores representan un alejamiento de la señal respecto al satélite, por lo que el Monte Etna experimentó un hundimiento. La línea amarilla discontinua representa la posición de la estructura antes de la deformación, además nótese que cada franja es la suma de media longitud de onda (tomado y modificado de Massonet, 2001).

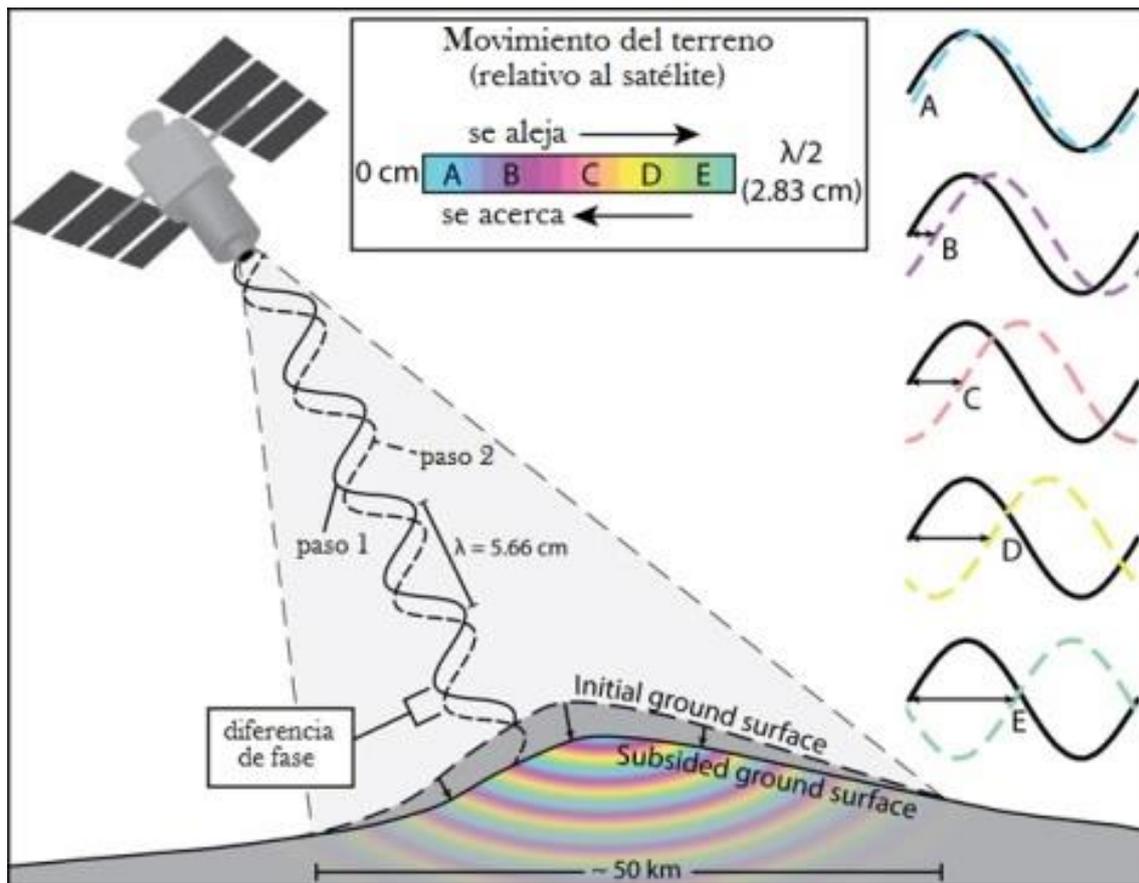


Fig. 3.9 Esquema en el que se presenta la deformación medida a partir de la diferencia de fase de dos imágenes SAR. Una franja corresponde a media longitud de onda, en este caso se considera el valor de longitud de onda de la banca C, $\lambda=5.66$ cm, en la diferencia de fase para A, prácticamente no hay deformación mientras que en B, C, D y E existe una diferencia de fase distinta a cero (tomado y modificado de Global Volcanism Program, 2012).

3.4.4 Contribución de fase atmosférica

Durante la adquisición de una imagen SAR, la señal debe atravesar la atmósfera. Dicha señal es capaz de penetrar la nubes, por tener un longitud de onda mayor; sin embargo, si en la adquisición de cada imagen existen variaciones en las propiedades de la atmósfera (presión, temperatura y contenido de vapor de agua), esto afectará a la señal haciendo que exista un retraso en ella y por lo tanto creará una variación en la fase interferométrica.

Ésta contribución es una de las principales limitaciones en la Interferometría de Radar Satelital (InSAR), cuando se busca medir desplazamientos centimétricos del terreno (Zebker, Rosen & Hensley, 1997; Hanssen, 2001). En general, los retrasos de la señal debido a la atmósfera, pueden afectar cada pixel de la escena del radar y enmascara por completo la señal de deformación, aunque potencialmente puede ser modelado y corregido (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 atmosférica o troposférica total, es frecuentemente debida en dos componentes: verticalmente estratificada y turbulenta (Hanssen, 2001; Doin *et al.*, 2009).

3.4.4.1 Atmósfera verticalmente estratificada

En ésta componente, la atmósfera sólo tiene variaciones verticales y se mantiene homogénea en la dirección horizontal. Una de las formas de disminuir ésta contribución es mediante el análisis de los propios datos del interferograma, es decir, mediante el análisis de la relación fase y elevación de la escena. Por lo general, es posible realizar un gráfico de la relación fase-elevación. Ahora bien, si dicha relación puede ser fácilmente modelada (relación lineal con pendiente positiva o negativa), es posible sustraerla del interferograma (Remy *et al.*, 2003; Taylor & Peltzer, 2006; Cavalié *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 extrapola en las elevaciones más grandes (Delacourt, Briole, & Achache, 1998); el uso de datos MODIS (MOderate Resolution Imaging Spectrometer, Li *et al.*, 2005) o MERIS (Medium Resolution Imaging Spectrometer montado en ENVISAT, Li *et al.*, 2006a,c) o el uso de una gran red de datos GPS (Webley *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2006b). Aunque la principal limitante de usar datos externos es la distribución espacial para el caso del GPS, y el hecho de que los datos de adquisición SAR no siempre coinciden con los datos de MODIS-MERIS, además de que necesitan ser calibrados (Doin *et al.*, 2009).

3.4.4.2 Atmósfera turbulenta

En ésta componente, la atmósfera presenta variaciones heterogéneas de forma horizontal además de la suma de variaciones estratificadas, por lo que en el interferograma aparecerán patrones totalmente aleatorios, dificultando la interpretación de los datos y ocasionando que su modelado sea imposible.

3.4.5 Contribución del ruido de decorrelación

Ésta última contribución contenida en la fase interferométrica, está ligada a varias fuentes; las que tienen mayor impacto son: la debida al cambio en la geometría de adquisición entre las imágenes, la debida a los cambios texturales del terreno, la debida a los cambios en la distribución de los elementos dispersores de la escena y a la vegetación presente.

3.4.5.1 Decorrelación geométrica

Éste ruido en la señal interferométrica, 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 B_{\perp} . Recordemos que ésta línea mide el valor de separación entre las trayectorias del satélite, al tomar las dos imágenes, por lo que entre mayor sea éste valor, más diferente serán las condiciones de adquisición de dichas imágenes, ocasionando una pérdida de la coherencia de la señal.

3.4.5.2 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 par interferométrico (creación de un interferograma), la escena “master” puede tener ciertas características de distribución de elementos y propiedades de la superficie, pero puede haber ocurrido un cambio de éstas características en la escena “slave” en un cierto periodo de tiempo. Lo anterior afectará a la señal interferométrica, haciendo que pierda la correlación o coherencia, entonces también está relacionada la línea de base temporal con esta contribución, ya que entre mayor sea ésta línea de base, será mayor la pérdida de la señal interferométrica. 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.

3.5 Metodologías InSAR

En la técnica Interferometría de SAR, existen diferentes metodologías con las cuales se pueden explotar-procesar los datos contenidos en una imagen de Radar de Apertura Sintética. Esto puede consistir en sólo explotar al máximo la fase o sólo analizar la amplitud para generar mapas de clasificación textural. En éste trabajo sólo se hablará de los que están relacionados con el procesamiento de la fase, ya que ésta es la que contiene información de los desplazamientos sobre el terreno.

3.5.1 Análisis de un solo interferograma o interferogramas

En ésta metodología, se calcula un sólo interferograma o interferogramas. A éste se le aplican distintas correcciones para recuperar la fase de deformación. Ésta metodología será útil, en la medida en que seamos capaces de eliminar o reducir, lo más posible, el resto de las contribuciones que no son de interés en la fase interferométrica.

3.5.2 Una pila o stack de interferogramas

Después de haber calculado, corregido y analizado los interferogramas, es posible determinar si la deformación en ellos es lineal y si tiene un patrón espacial constante. De ser el caso, es posible realizar una pila o stack de dichos interferogramas, calculando un promedio de la deformación. Con dicho promedio, aumentamos la relación señal a ruido puesto que es posible reducir la contribución atmosférica estratificada. Sin embargo, es importante considerar que esto dependerá de la calidad de las correcciones efectuadas puesto que si los errores residuales (orbitales, topográficos, atmosféricos) tienen una magnitud mayor que la deformación, ésta seguirá viéndose empañada (Strozzi *et al.*, 2001).

3.5.3 Series de tiempo: SBAS (Small Baseline Subset) y PSI (Persistent Scatterer Interferometry)

Como sabemos una de las dificultades en InSAR, son los errores residuales (orbitales, topográficos, atmosféricos) después de la corrección de la fase interferométrica. Para solucionar éste tipo de problemas, se realiza un procesamiento para obtener las series de tiempo. Algunos de los más famosos son: Pequeñas Líneas de Base (SBAS, Small Baseline Subset) e Interferometría con Reflectores Permanentes (PSI, Persistent Scatterer Interferometry) (Hooper *et al.*, 2012).

3.5.3.1 SBAS (Small Baseline Subset)

Con la técnica SBAS, se calculan interferogramas con líneas de base perpendicular y temporal limitadas, es decir, procurando que ambas líneas de base sean lo más pequeñas posibles, para disminuir el efecto de la decorrelación espacial y temporal. Lo más importante es entonces, conservar interferogramas con alta coherencia. En ésta técnica las fases interferométricas son relacionadas a través de un conjunto de ecuaciones donde las incógnitas son los desplazamientos entre imágenes sucesivas. La inversión del sistema así creado permite obtener la evolución de la deformación en espacio y tiempo, la precisión de ésta técnica puede ser del orden de 1 mm/año y dependerá de la calidad de las correcciones aplicadas a los interferogramas (López-Quiroz *et al.*, 2009).

3.5.3.2 PSI (Persistent Scatterer Interferometry)

La decorrelación en un interferograma es causada por el cambio en la geometría de adquisición de las imágenes implicadas, o bien, por el cambio en las características de la escena (cambios estacionales). Sin embargo, si un reflector retornó significativamente con más energía que el resto de los reflectores dentro de una celda, la decorrelación en la fase es reducida en mayor medida. Éste es el principio detrás de un “reflector persistente o persistent scatterer (PS)” contenido en un pixel. En ambientes o zonas urbanas, los reflectores dominantes cuentan con la presencia de infraestructura en la cual la señal sólo es reflejada una vez en el terreno y una vez de forma perpendicular a los edificios (Hooper *et al.*, 2012; Perssin & Ferreti, 2007). Por lo que el corazón de ésta técnica, es elegir los reflectores persistentes sobre los que se medirá la deformación (Ferreti, Patri & Rocca, 2001). Ésta técnica funciona muy bien en zonas urbanas y sus resultados pueden tener precisiones milimétricas dependiendo de la calidad de sus algoritmos de corrección.

Capítulo 4

La zona de estudio: la caldera de Los Humeros

En México existen muchas áreas en las cuales existen fenómenos geológicos importantes a monitorear, desde el desplazamiento de fallas hasta la actividad volcánica. Hablando un poco de las actividades volcánicas o flujos de calor en el interior de la Tierra, tenemos a las zonas con manifestaciones geotermales; su importancia radica en que estas manifestaciones son un indicativo que la zona puede ser explotada geotérmicamente, por lo que es importante monitorear las estructuras geológicas que lo conforman. En el caso de una caldera volcánica o un volcán, será relevante conocer si existe un levantamiento o hundimiento de la estructura debido los procesos que ocurren en la cámara magmática (Berrino *et al.*, 1992; Geyer & Martí, 2009).

4.1 Ubicación geográfica

La estructura volcánica de la caldera de Los Humeros se localiza en la parte oriental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), justo al NE del estado de Puebla, Fig. 4.1. El borde Este de la caldera hace frontera con el límite político del estado de Veracruz, por lo que el cuerpo volcánico del Cofre de Perote es muy próximo a ella, Fig. 4.2.

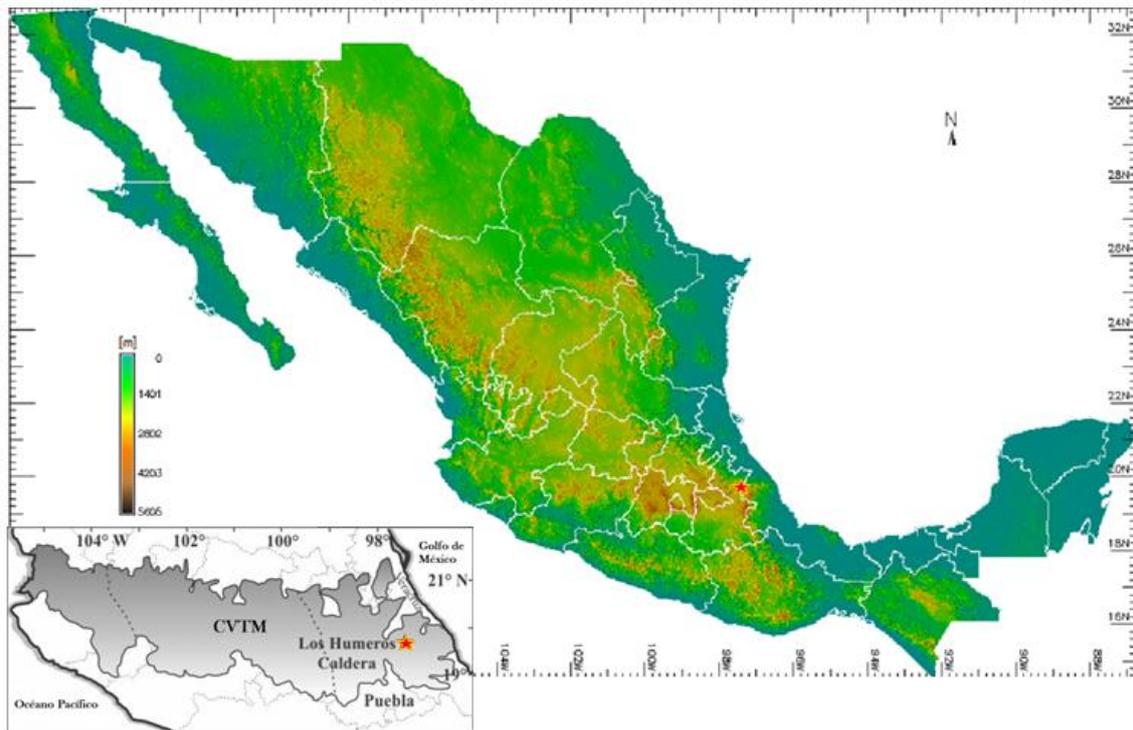


Fig. 4.1 Modelo digital de elevaciones (DEM, información ráster procesada a partir de datos de INEGI) de la República Mexicana, en el que se muestra la ubicación de la caldera de Los Humeros (La estrella en rojo representa la ubicación de la caldera) y se muestra la zona del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (tomado y modificado de Dávila-Harris & Carrasco-Núñez, 2014).

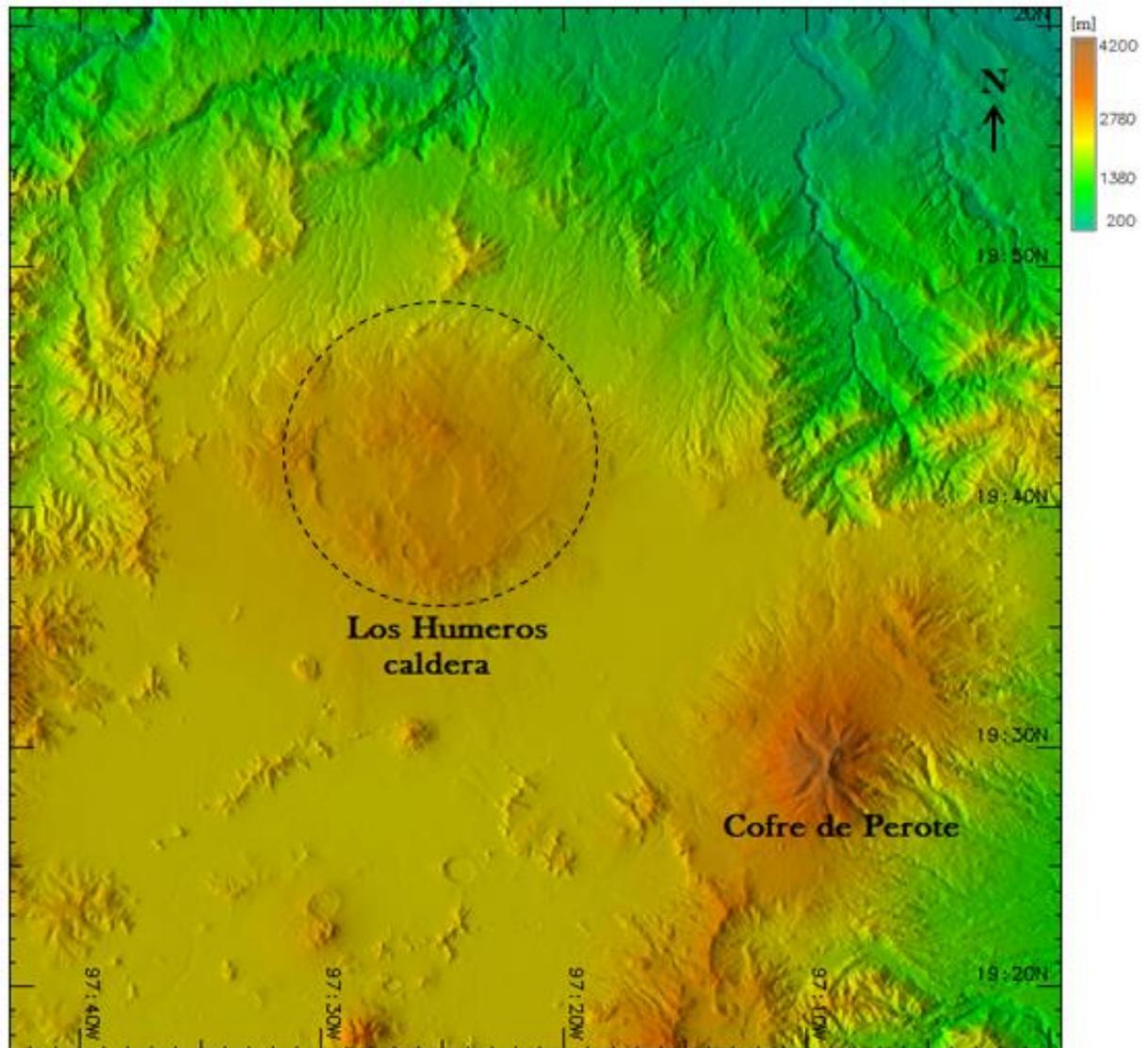


Fig. 4.2 Mapa de relieve sombreado construido a partir del modelo digital de elevaciones de la caldera de Los Humeros, la circunferencia con línea punteada muestra la estructura de la caldera (los datos procesados del DEM, fueron obtenidos a partir de la misión SRTM de la NASA).

4.1.1 Clima

El estado de Puebla tiene una variedad climática que se debe a factores tales como la altitud, latitud, relieve, distribución de tierras y agua, que al interactuar entre ellos, imprimen condiciones particulares a los elementos del clima, entre ellos: la precipitación, los vientos y la temperatura. El clima predominante es templado, en orden de abundancia le siguen los climas cálidos, semicálidos, semisecos, secos y los fríos (INEGI 2000; Calderón-Velázquez & Fuentes-Peralta, de Recursos Minerales, 1999).

El 35% de la superficie del estado de Puebla presenta clima templado subhúmedo presente en la región central y sureste, el 25% presenta clima cálido

subhúmedo en la parte norte y sureste, el 19% presenta clima seco y semiseco hacia el sur y centro oeste, el 14% presenta clima cálido húmedo localizado en el norte y sureste, el 7% presenta clima templado húmedo en la región norte y una pequeña área hacia el sureste, también encontramos un pequeño porcentaje (0.2) de clima frío en la cumbre de los volcanes. Por lo que la caldera de Los Humeros se encuentra en un clima templado subhúmedo, Fig. 4.3.

La temperatura media anual del estado es de 17.5°C, la temperatura máxima promedio es de 28.5°C y se presenta en los meses de abril y mayo, la temperatura mínima promedio es de 6.5°C durante el mes de enero. La precipitación media estatal es de 1270mm anuales, las lluvias se presentan en verano en los meses de junio a octubre. Cabe recalcar que la caldera está relativamente cerca a la costa, aproximadamente 80 km, por lo que es muy susceptible a los fenómenos atmosféricos del Golfo de México.



Fig. 4.3 Mapa del clima del estado de Puebla, donde se puede observar que la caldera Los Humeros pertenece al tipo de clima templado subhúmedo (marcado con un punto rojo) (tomado y modificado de INEGI 2014).

4.1.1.1 El clima templado

Estos climas cubren la mayor extensión en el Estado de Puebla (40.24% aproximadamente). Se caracterizan por presentar temperaturas medias anuales que van de 12° a 18° C y la temperatura media del mes más frío varía entre -3° y 18° C (García, 1981). Al Norte de la región de la caldera de Los Humeros, que corresponde al municipio de Tezuitlan, encontramos un clima templado con lluvias todo el año, con una precipitación media anual de 1593 mm, siendo el mes más seco enero y el mes más húmedo septiembre (Flores-Lorenzo & Alcántara-Ayala, 2002). Mientras que en la caldera, que corresponde al municipio de Xiutetelco, presenta un clima templado subhúmedo con abundantes lluvias en verano y de menor humedad (Calderón-Velázquez & Fuentes-Peralta, de Recursos Minerales, 1999).

4.1.2 Topografía y relieve

Como se puede observar en el DEM de la Fig. 4.2, para la estructura de la caldera de Los Humeros y alrededores, se encuentran elevaciones que van desde los 1800 msnm hasta 3156 msnm, se observa que en la dirección de la parte Norte de la caldera y hacia la costa, los valores de elevación comienzan a disminuir casi abruptamente (es decir una rampa en descenso constante). Dentro de la caldera, también existe una topografía abrupta debido a los procesos geológicos que la conformaron (más adelante se hablará sobre los procesos geológicos que le dieron origen). Nótese que en los alrededores de la caldera, el Cofre de Perote es la estructura con las mayores elevaciones, teniendo un máximo de aproximadamente 4200 msnm.

4.1.3 Vegetación

El estado de Puebla está influenciado por varios factores geográficos, como son la orografía, la hidrografía y clima, que han condicionado el establecimiento de cada uno de los tipos de vegetación presentes. La complicada topografía; es decir, la distribución y alineación de las sierras y sus diferencias en altitud, dan como resultado un mosaico climático que junto con la temperatura y la precipitación propicia condiciones especiales en el medio ambiente. Las precipitaciones se presentan de manera constante debido a numerosos “nortes”, masas de aire frío que invaden casi por completo a la entidad en los meses menos cálidos del año, éstas suelen ser en forma de lluvias constantes o neblinas periódicas, que aumentan la humedad atmosférica y favorecen el establecimiento y desarrollo de una gran capacidad de vegetación. En la vertiente del Golfo y la Sierra Madre Oriental, encontramos a la caldera de Los Humeros, donde la parte

norte y al alrededores de ella, están presentes los tipos de vegetación como: bosques de pino-encino; mientras que en la parte central de la caldera es predominante las coníferas y sembradíos, Fig. 4.4 (Calderón-Velázquez & Fuentes-Peralta de Recursos Minerales, 1999).

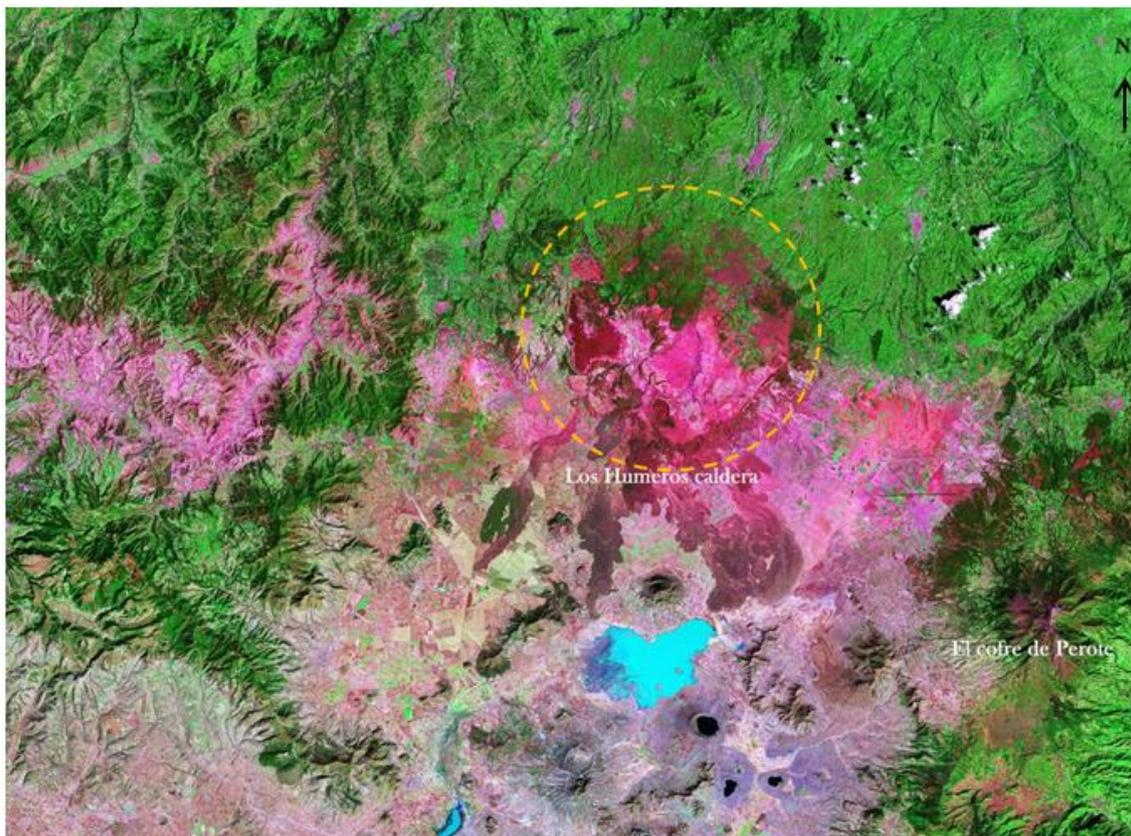


Fig. 4.4 Imagen Landsat 7, composición falso color con las bandas 742, en donde se hace notar la vegetación en tonos verdes oscuros y cultivos en verdes claros. Como bien se observa en la parte Norte y alrededores de la caldera de Los Humeros, existe mucha vegetación. La estructura de la caldera se muestra en la circunferencia naranja punteada.

4.2 Geología de la caldera

La caldera de Los Humeros (Fig. 4.5) está compuesta por un basamento antiguo de rocas metamórficas e intrusivas del Paleozoico, que a su vez están cubiertas por una sucesión de lutitas, calizas y areniscas del Jurásico. En las cercanías de la caldera de Los Humeros, el basamento Cretácico está mejor expuesto como remanente plegado de calizas y lutitas. Éste basamento fue extensamente afectado por la orogenia Laramide, con compresión NE-SW, fallamiento y plegamiento de la sucesión, seguido por una intrusión de una granodiorita y sienita del Terciario. Las rocas volcánicas más jóvenes previas a la formación de la caldera, están representadas por edades de 3.5 Ma y 1.55 Ma, para lavas andesíticas y ferrobasálticas, respectivamente, Fig. 4.6 y 4.7 (Yáñez &

García, 1982; Ferriz & Mahood, 1984; citado por Dávila-Harris & Carrasco-Núñez, 2014).

La evolución de la caldera de Los Humeros ha sido dividida en tres escenarios marcados por productos de grandes erupciones explosivas y ampliamente distribuidos:

El primer escenario, presentó una erupción de lavas andesíticas y ferrobasálticas de la Formación Tezuitlán (3.6 y 1.6 Ma). Después hubo una manifestación volcánica de tipo silíceo, constituida de lavas riolíticas con alto contenido de sílice en la periferia del centro volcánico hace aproximadamente 470 ka. Aproximadamente hace 460 ka, tuvo lugar una erupción tipo pliniana, con la extrusión de las lavas de riolita, seguido por, probablemente, la explosión eruptiva más grande en México del Cuaternario, con el emplazamiento de la ignimbrita Xaltipan (Fig. 4.5) y la subsidencia del material que generó a la caldera de Los Humeros, la cual fue estimada en dimensiones en 21x15 km. Después de la formación de la caldera, domos riolíticos hicieron erupción a lo largo o en la cercanía de la zona de colapso de la caldera, Fig. 4.8a (Ferriz & Mahood, 1986, Dávila-Harris & Carrasco-Núñez, 2014).

El segundo escenario, ocurrió aproximadamente entre los 360 a los 240 ka, está marcado por una pila de sucesión principalmente de riolitas y depósitos de caída de pómez separados por paleosuelos, esta sucesión fue definida por Ferriz & Mahood (1984) como la Toba Faby, después fue estudiada con mayor detalle por Willcox (2011) y la define como una formación. Este evento fue acompañado por el emplazamiento de un pequeño número de domos, aunque existe una ignimbrita no identificada que está relacionada con esta sucesión eruptiva (Dávila-Harris & Carrasco-Núñez, 2014).

Finalmente el tercer escenario, ocurrió aproximadamente 60-140 ka. Está representado por la erupción de la ignimbrita Zaragoza, de composición riodacítica a andesítica, la cual formó la caldera de Los Potreros; esta estructura se encuentra anidada en la parte central de la caldera de Los Humeros, Fig. 4.8b (Dávila-Harris & Carrasco-Núñez, 2014).

Una gran cantidad de material de depósitos de caída de pómez y escoria cubren la ignimbrita Zaragoza. Durante el último escenario, ocurrieron varios eventos, relativamente rápido (Ferriz & Mahood, 1985, Ferriz & Mahood, 1986). Los materiales resultantes de estos eventos, fueron nombrados miembro Cuicuiltic, y después de dicho evento es generado el cráter del Xalapasco Fig. 4.8b. Por lo que el evento del miembro Cuicuiltic y la formación del cráter antes

citado, no están correlacionados ambos eventos ya que trabajos más recientes indican fechas datadas para el cráter del Xalapasco de una edad de 6.4 ka, esto indica que la caldera volcánica de Los Humeros está geológicamente activa, además de su manifestación geotermal (Dávila-Harris & Carrasco-Núñez, 2014).

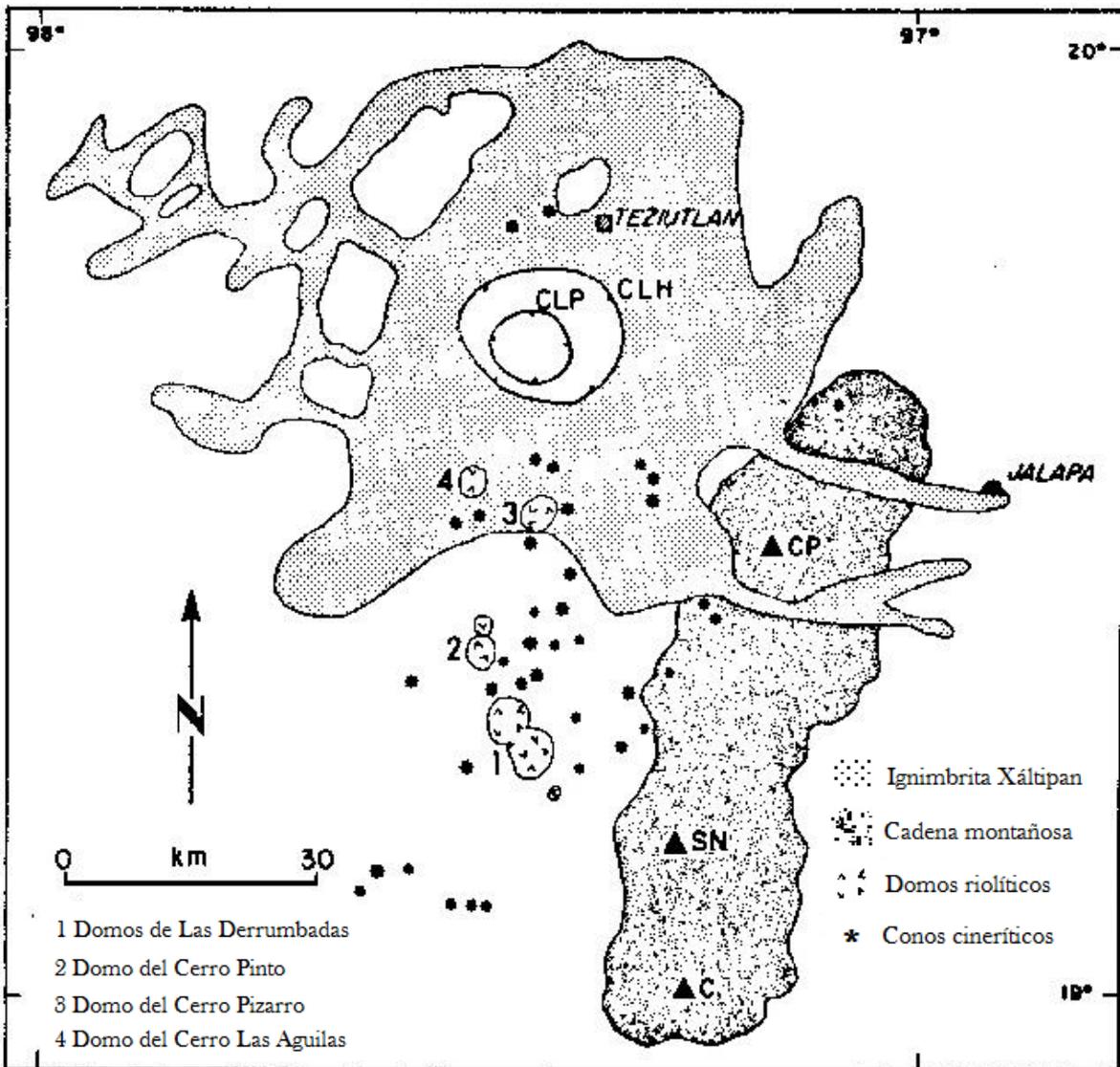


Fig. 4.5 Mapa de ubicación del área de la caldera de Los Hornos (CLH: caldera de Los Hornos, CLP: caldera de Los Potreros) y alrededores. Se muestran la distribución de la Ignimbrita Xáltipan, los domos riolíticos y de los conos cineríticos, y la cadena montañosa formada por los volcanes andesíticos Cofre de Perote (CP) - Sierra Negra (SN) - Citlaltépetl (C) (tomado y modificado de Ferriz & Mahood, 1986).

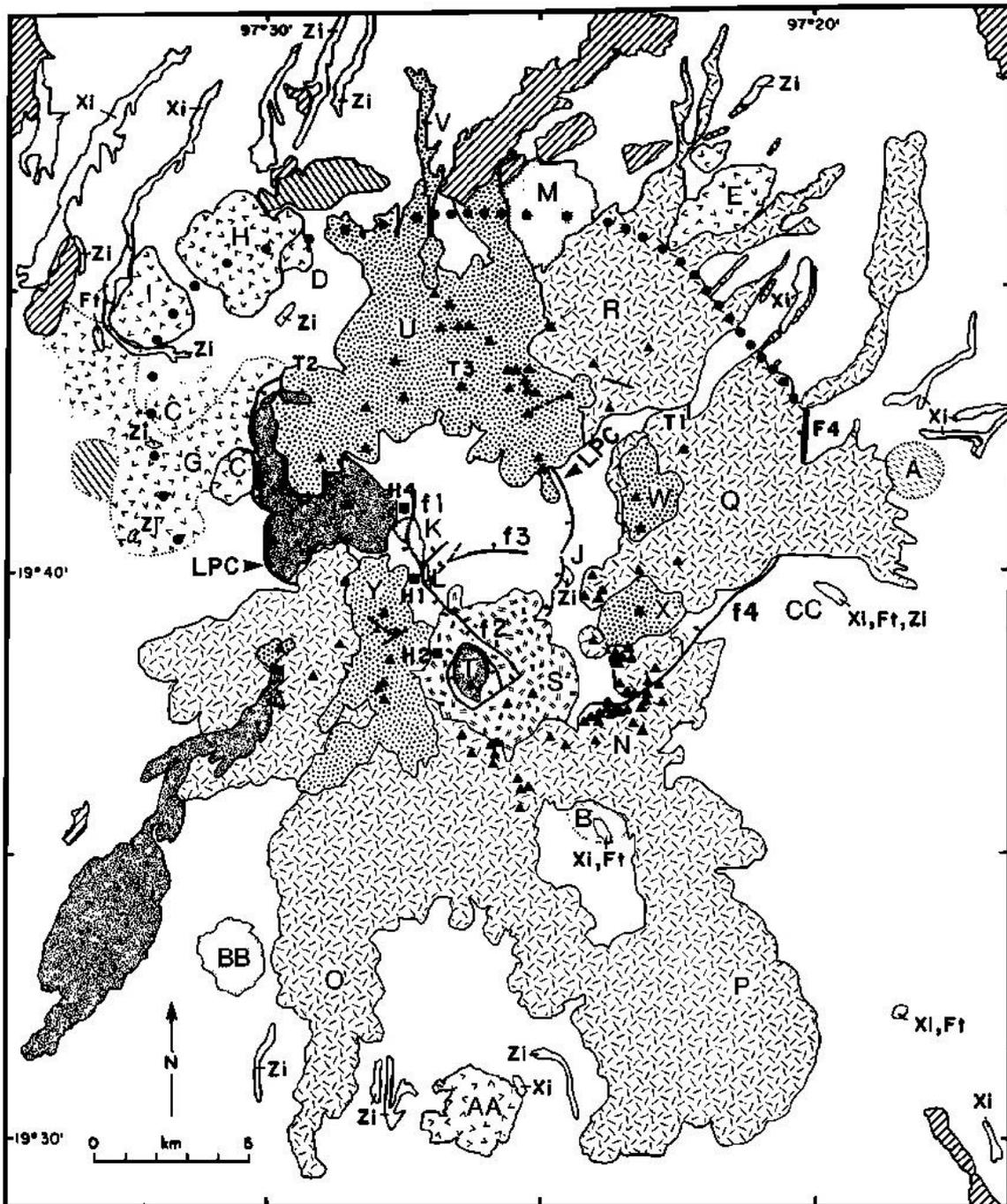


Fig. 4.6 Mapa geológico de la zona de la caldera de Los Hornos. Donde se muestran claramente los flujos de lava, domos y el basamento expuesto (tomado y modificado de Ferriz & Mahood, 1984; Ferriz & Mahood, 1986).

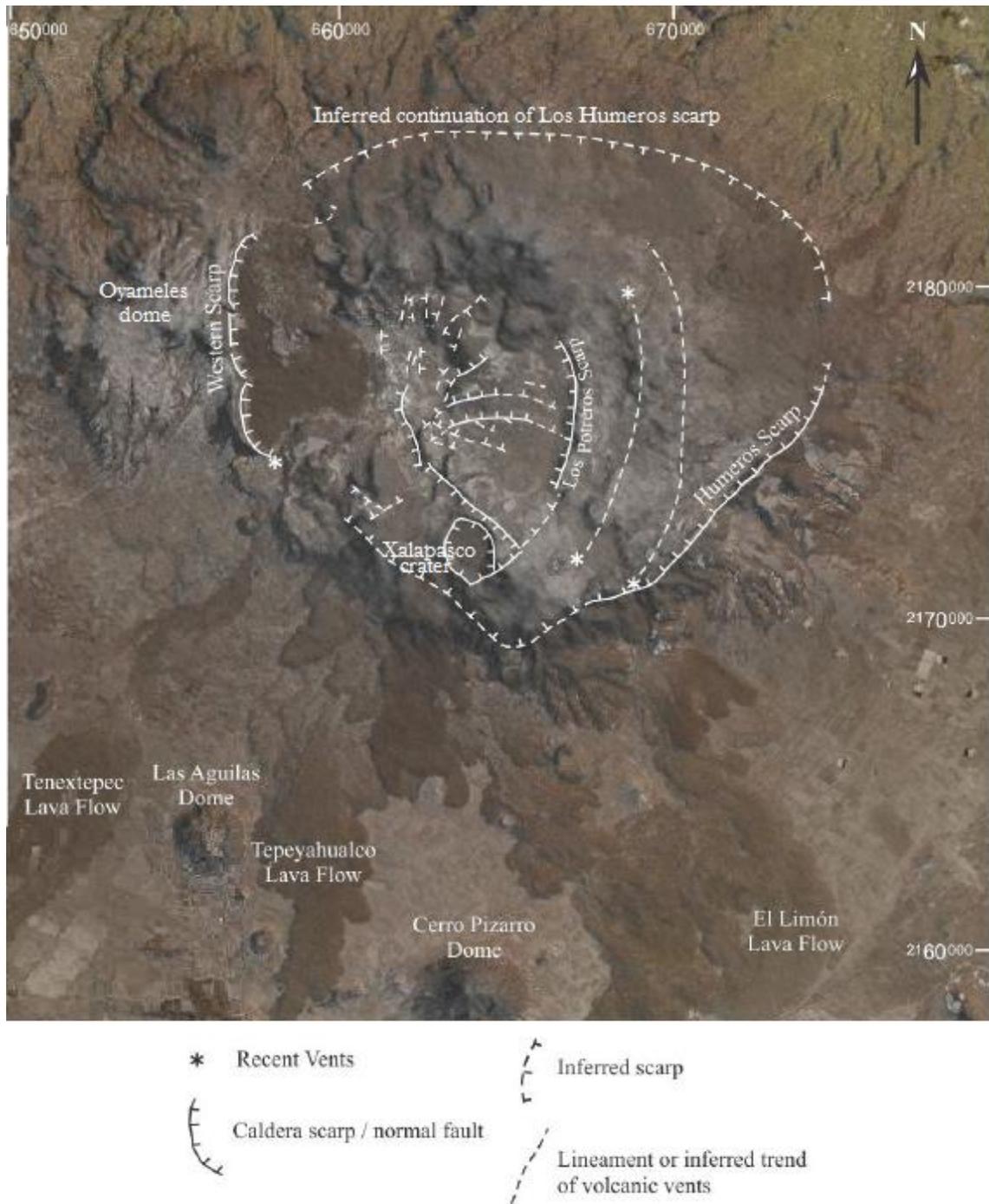
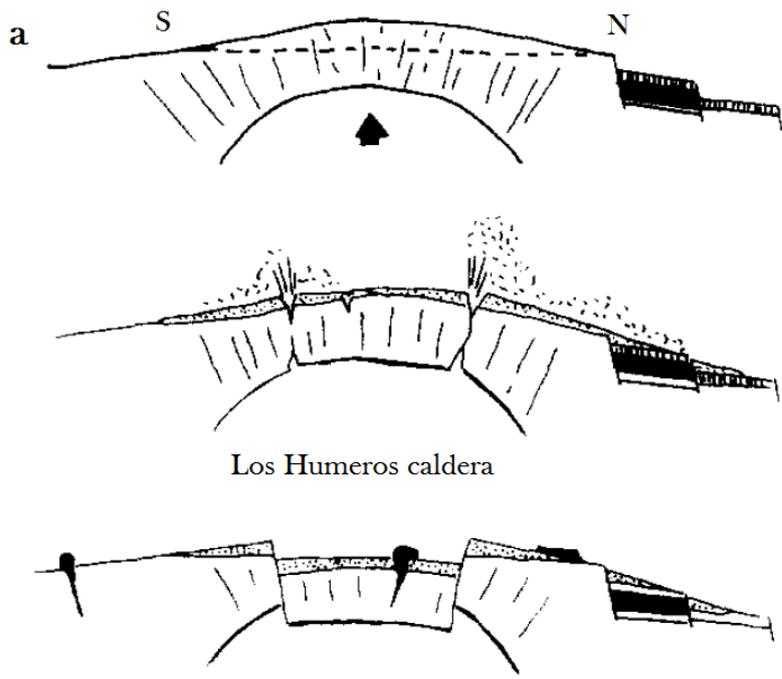
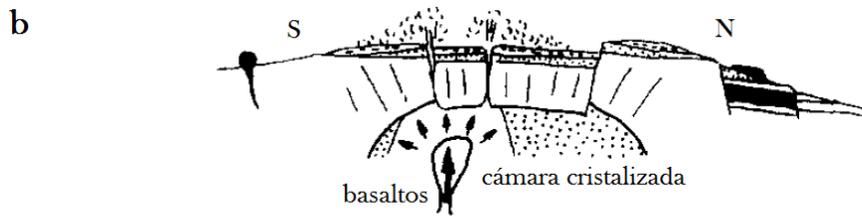
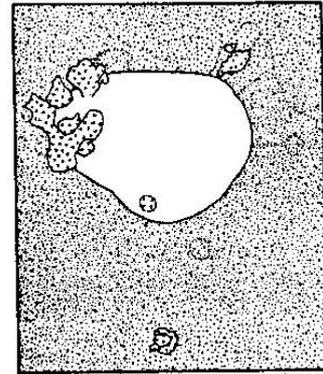
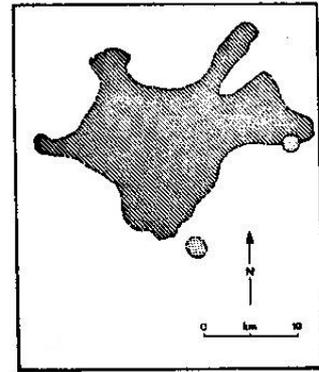


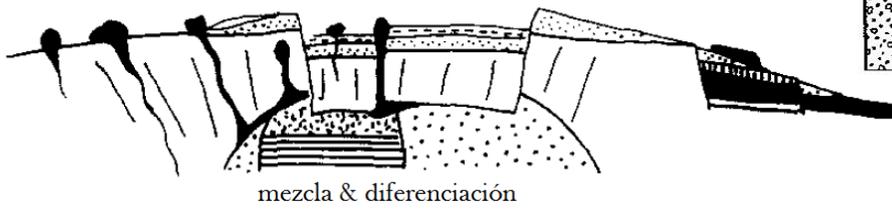
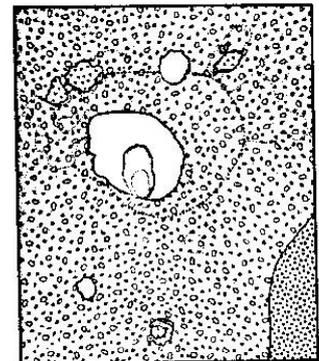
Fig. 4.7 Imagen Landsat 7 sobrepuesta sobre un DEM en relieve sombreado, en ésta imagen se muestran las estructuras principales de la caldera Los Humeros, desde el colapso principal hasta las dos estructuras internas conocidas como Los Potreros y El Xalapasco (tomado y modificado de Dávila-Harris & Carrasco-Núñez, 2014).



Los Humeros caldera



Los Poteros caldera



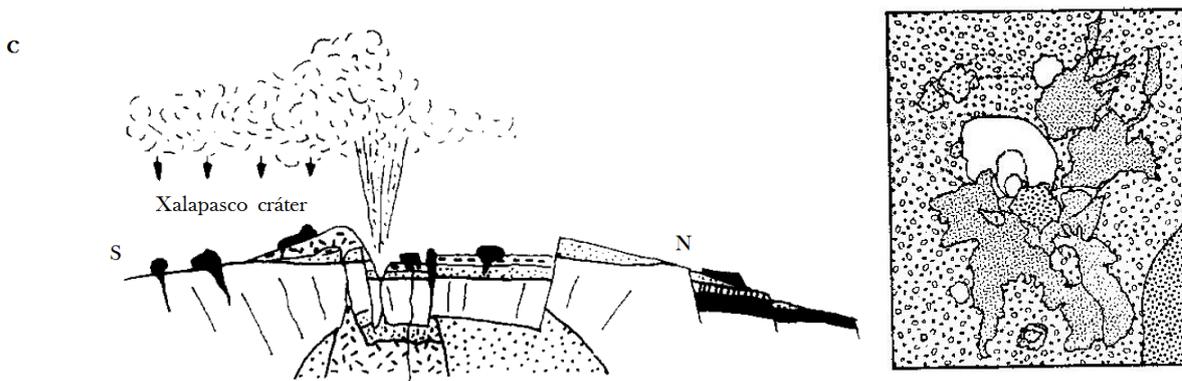


Fig. 4.8 Diagrama que muestra cada etapa de la historia evolutiva del complejo de la caldera de Los Humeros, de lado izquierdo se muestra un perfil del evento, mientras que del lado derecho se muestra una vista resumida en planta del evento, a) escenario eruptivo que formó a la caldera de Los Humeros, b) escenario y procesos que dieron origen a la formación de la caldera de Los Potreros, y c) parte del escenario final, y evento consecutivo en el que se formó el cráter del Xalapasco (tomado y modificado de Campos-Enriquez & Arredondo-Fragoso, 1992; Ferriz & Mahood, 1984).

4.3 El campo geotérmico de Los Humeros

En México existen tres principales campos geotérmicos en explotación; el primero tiene una gran capacidad de generar energía eléctrica, se localiza en Baja California, y se conoce como Cerro Prieto; el segundo se localiza en Michoacán, y se conoce como Los Azufres; y finalmente, el Campo Geotérmico de Los Humeros (CGLH) en Puebla, el cual se encuentra dentro de la estructura de una caldera volcánica nombrada de igual manera, Fig. 4.9. Por lo que se tiene reportado, desde 1982 hasta el 2008, se han perforado unos 40 pozos entre exploratorios, productores e inyectores, sumando un total 87,352 metros perforados, Fig. 4.10 (Gutiérrez-Negrín & Quijano-León, 2005; Antayhua-Vera, 2007; Lermo, Antayhua, Quintanar & Lorenzo, 2008).

Alrededor del mundo, donde existen manifestaciones geotermales o de actividad volcánica activa, se han realizado estudios con el propósito de monitorear los fenómenos existentes. Dichos fenómenos incluyen el estudio del campo de esfuerzos relacionados con la tectónica local, el comportamiento de la cámara magmática de la sub caldera, el sistema de aguas subterráneas, etc. El estudio conjunto de estos fenómenos y sus interacciones, permite conocer el régimen de esfuerzos local y estimar el comportamiento de la cámara magmática a profundidad, entre otros (Newhall & Dzurisin, 1988).

Por lo anterior, es importante conocer si existen movimientos de las estructuras geológicas (caldera volcánica) que componen al campo geotérmico de Los Humeros, y de ser así, cuantificarlos.

En general, para el monitoreo de un campo geotérmico, se pueden realizar diversos estudios, como: instalar estaciones sísmicas (para estimar los estados de esfuerzos afectados por la inyección y extracción de fluidos), realizar estudios gravimétricos para estimar deformaciones sutiles, realizar estudios electromagnéticos para caracterizar materiales susceptibles a deformarse, y desde hace algunos años, utilizar Interferometría de Radar de Apertura Sintética para cuantificar los desplazamientos en la superficie (Brunori *et al.*, 2013).

En el campo geotérmico de Los Humeros, se han realizado una serie de estudios, a saber: la exploración sísmica, para determinar riesgos a la planta, ya sea generados de forma antropogénica o de forma natural (determinar el estado de esfuerzos) (Lermo *et al.*, 2008), el estudio gravimétrico para inferir a profundidad la estructura de la caldera y su composición geológica (Campos-Enríquez & Arredondo-Fragoso, 1992), y el análisis del procesamiento de imágenes satelitales ópticas para estimar fallas y fracturas relacionadas con la permeabilidad secundaria de las rocas del yacimiento (Pro-Ledesma *et al.*, 1993), entre otros. Hasta donde sabemos, hasta el momento no se han realizado estudios sobre la caldera con InSAR. Sin embargo, su aplicación resultaría útil para estimar la deformación en la zona del campo geotérmico, sobre la caldera y las poblaciones aledañas.

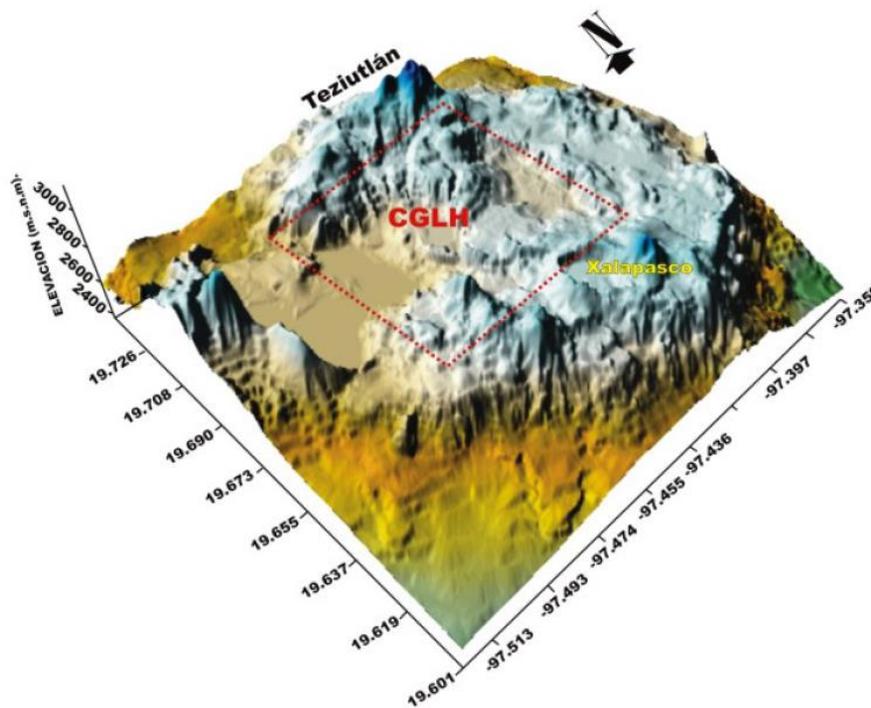


Fig. 4.9 Esquema en el que se muestra el área que cubre el Campo Geotérmico de Los Humeros dentro de la estructura de la caldera volcánica con el mismo nombre (recuadro rojo punteado) (tomado y modificado de Lermo *et al.*, 2008).

Capítulo 5

InSAR en la caldera de Los Humeros

5.1 Metodología en el cálculo de interferogramas

5.1.1 Disponibilidad de imágenes SAR

En principio se debe realizar una búsqueda de imágenes disponibles sobre la zona a estudiar. En el caso de la Agencia Espacial Europea (ESA), tiene a disposición un catálogo para revisar la disponibilidad de imágenes SAR de sus diferentes misiones (como las que se mencionaron en el capítulo 3). Con EOLiSA (Earth Observation Link Stand Alone), es posible realizar una búsqueda de imágenes radar satelital de la misión ERS y ENVISAT. Para éste trabajo se realizó una selección de imágenes SAR de la misión ENVISAT utilizando EOLiSA, Fig. 5.1.

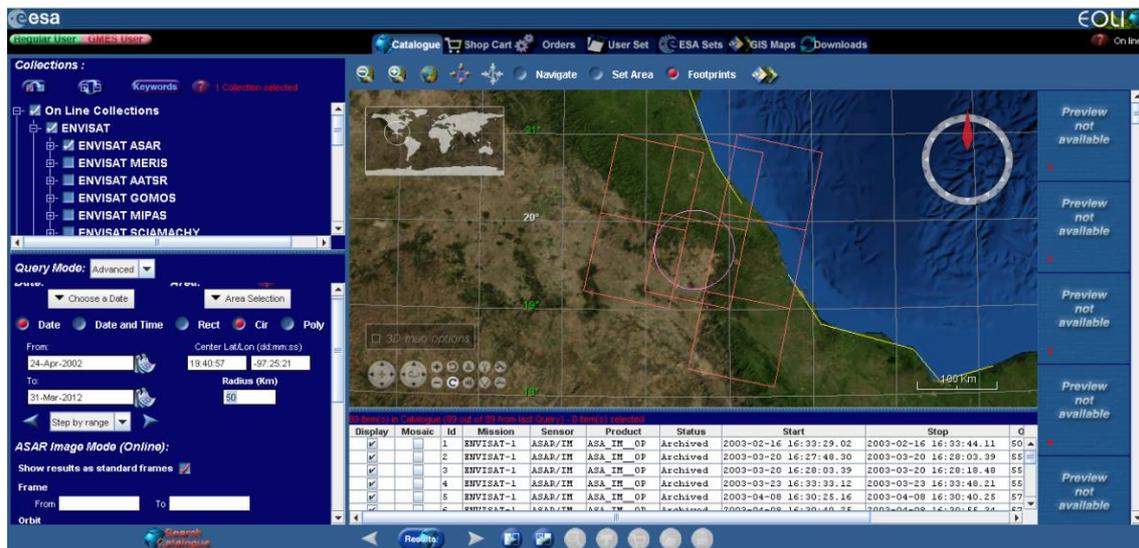


Fig. 5.1 Se muestra el display del programa EOLiSA de la ESA, en el que se hizo una búsqueda de imágenes SAR de la misión ENVISAT. Se muestra la zona de interés marcado en una circunferencia rosa, mientras que los recuadros rojos muestran los frames disponibles para las fechas de búsqueda seleccionada para la misión.

5.1.2 Software para realizar InSAR

Una vez obtenidas las imágenes SAR por medio de la agencia espacial, es posible aplicar una o algunas de las metodologías de InSAR (capítulo 3.5). Para el cálculo de un interferograma, existen diferentes herramientas; que incluyen el software libre y el software comercial. A continuación se mencionan algunos de éstos y sus especificaciones:

- Software libre:
- DORIS (Delft Object-oriented Radar Interferometric Software), desarrollado por la Universidad Tecnológica de Delft y está basado en C++ (<http://doris.tudelft.nl/>).
- Existen paquetes de herramientas desarrollados por la Agencia Espacial Europea (ESA) llamados NEST (Next ESA SAR Toolbox) (<http://nest.array.ca/web/nest>) y BEST (Basic ENVISAT SAR Toolbox) (<https://earth.esa.int/web/guest/software-tools/-/article/basic-envisat-sar-toolbox-1649>). Aunque recientemente NEST fue sustituido por Sentinel-1 Toolbox. La ventaja de éste nuevo paquete es que es capaz de procesar datos de cualquier misión SAR de la ESA, además de RADARSAT-2, TerraSAR-X/TanDEM-X, ALOS PALSAR y COSMO-SkyMed.
- GMTSAR está basado en Generic Mapping Tools (GMT) (Sandwell *et al.*, 2011).
- ISCE (InSAR Scientific Computing Environment) es un software diseñado por Santford/Caltech/JPL, basado en lenguaje FORTRAN y C. Además usa scripts en Python (Gurrola *et al.*, 2010; Rosen *et al.*, 2009; Zebker *et al.*, 2010).
- Para las metodologías de series de tiempo existen:

GIANT (Generic InSAR Analysis Toolbox), el cual está basado en librerías y scripts en Python, los cuales están basados en los algoritmos: SBAS (Small Baseline Subset) (Berardino *et al.*, 2002), N-SBAS (New-SBAS) (López-Quiroz *et al.*, 2009; Doin *et al.*, 2011) y MInTS (Multiscale Interferometric Time-Series) (Hetland *et al.*, 2012) (citados en Agram *et al.*, 2013).

StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) fue creado originalmente por Hooper en la Universidad de Stanford (Hooper *et al.*, 2010), el cual usa algoritmos de PSI (Persistent Scatterer Interferometry) y SBAS.

- Software comercial:
 - GAMMA (<http://www.gamma-rs.ch/>)
 - DIAPASON (<http://www.altamira-information.com/html/1-18215-InSAR-Software-Training.php>).
 - Para las series de tiempo:

IPTA de GAMMA (<http://www.gamma-rs.ch/software/ipta-interferometric-point-target-analysis>)

SqueeSAR (<http://treuropa.com/technique/squeesar>) co-creado por Ferretti (2001) y el grupo de investigación de la Universidad Politécnica de Milano.

Para el cálculo de interferogramas en el presente trabajo, se utilizó ROI_PAC (Repeat Orbit Interferometry PACkage) (Rosen *et al.*, 2004). Éste software fue desarrollado en el JPL (Jet Propulsion Laboratory) y en colaboración de Caltech. ROI_PAC está basado en programas en lenguaje FORTRAN y C, además de usar scripts en Perl. En la Fig. 5.2, se muestra un diagrama de flujo para la formación de un par interferométrico (interferograma) mediante éste software.

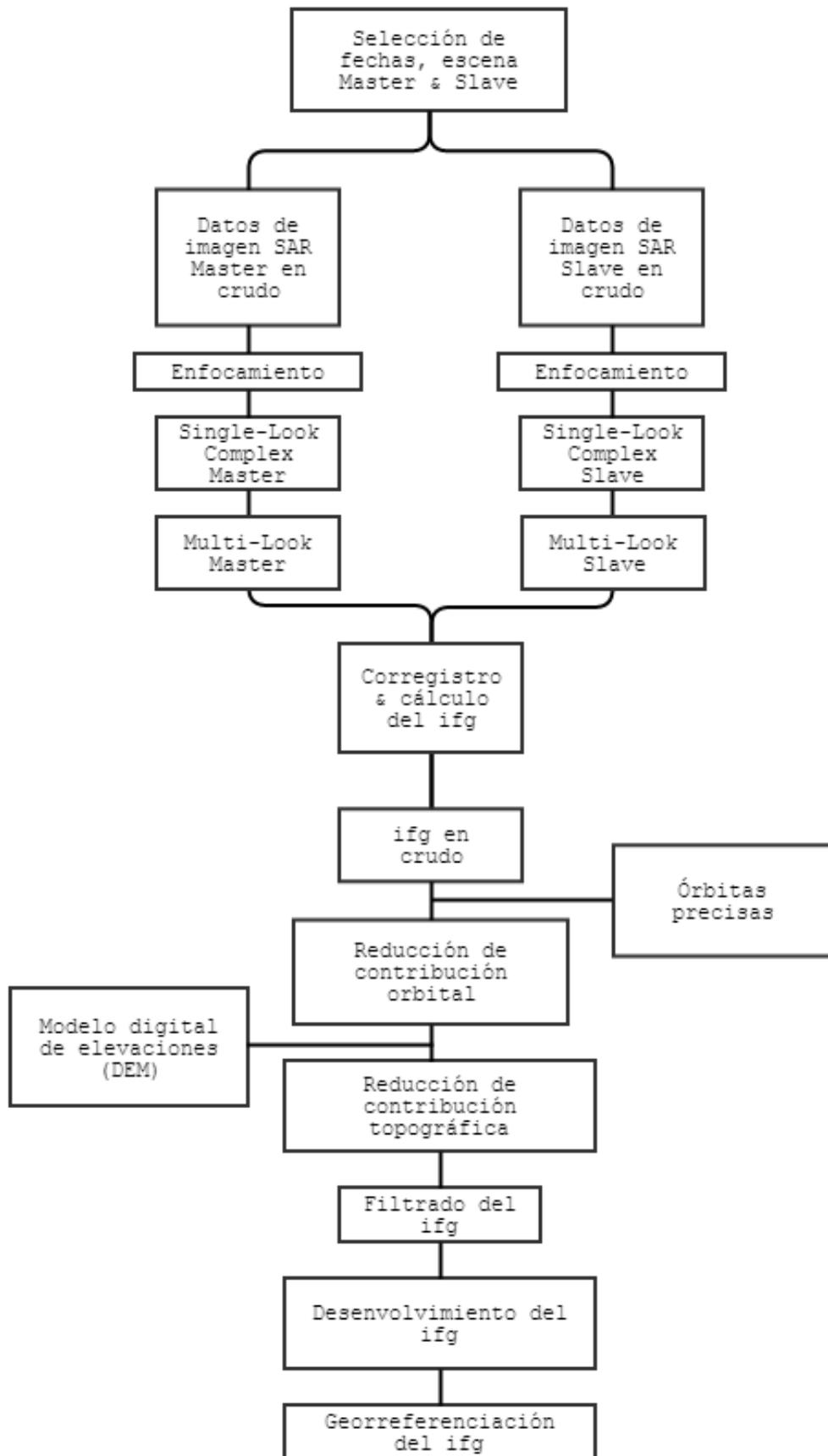


Fig. 5.2 Diagrama de flujo en el que se muestran los procesos realizados durante la generación de un par interferométrico (interferograma/ifg) mediante ROI_PAC.

5.2 Procesamiento InSAR

La Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR), es una técnica útil en la estimación de la deformación de la superficie terrestre. Ésta técnica ha sido aplicada en variedades de estudios, permitiendo analizar: subsidencia, deslizamientos, rupturas de fallas durante un terremoto y deformación relacionada a volcanes. Dentro de las ventajas que posee, es que es capaz de superar las limitaciones de las técnicas de geodesia tradicional, tal como la nivelación o GPS, hablando en términos de cobertura espacial. Tal como Brunori *et al.*, (2013) describe; que la InSAR es una de las mejores técnicas para analizar actividad volcánica y estudiar la evolución de las estructuras volcánicas, contribuyendo a entender la génesis de una caldera volcánica y sus sistemas profundos antiguos (Hooper *et al.*, 2004; Pritchard & Simons, 2004; Hooper, 2008; Neri *et al.*, 2009; Sarychikhina *et al.*, 2011).

5.2.1 El conjunto de datos SAR en la zona de estudio

Para éste estudio, se seleccionaron 21 imágenes SAR que cubren el periodo entre abril de 2003 y marzo de 2007. Las imágenes fueron adquiridas por la misión ENVISAT de la Agencia Espacial Europea (ESA) con una órbita descendente, Fig. 5.3 y Tabla 5.1. Ésta misión tenía diversos sensores, entre ellos un sensor ASAR (Advanced Synthetic Aperture Radar) el cual operaba en la frecuencia de la banda C ($f=5.3$ GHz, $\lambda=5.6$ cm). La resolución espacial de estas imágenes SAR es de 20x5 m, mientras que su cobertura espacial es de 100x100 km y su periodo de visita (remuestreo) a la misma escena era de 35 días.

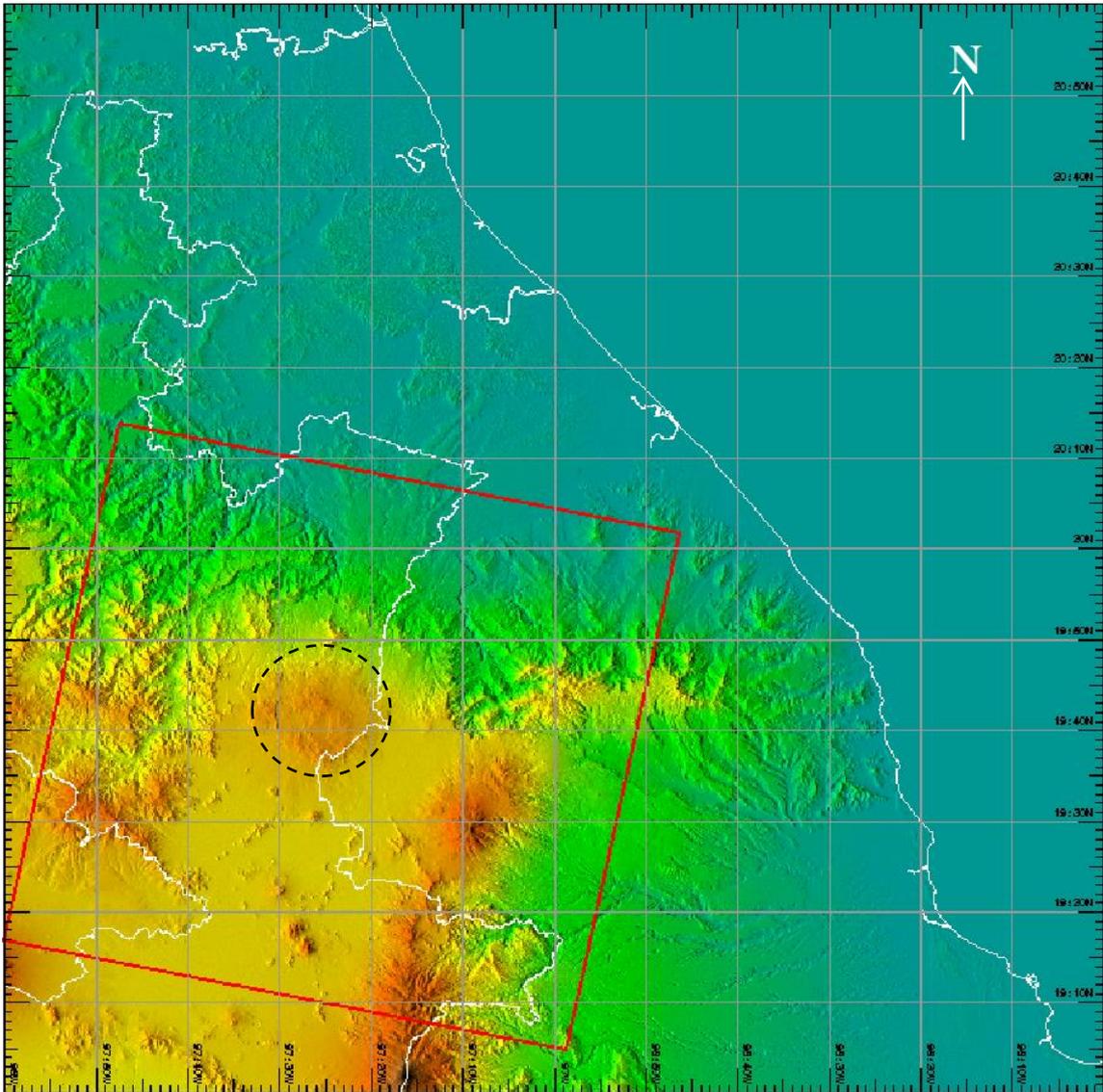


Fig. 5.3 Mapa de la zona estudio en el que se muestra el frame seleccionado para las imágenes SAR en órbita descendente (recuadro en rojo). La caldera de Los Humeros está enmarcada por una circunferencia negra punteada.

Fecha	Track	Órbita	Frame	Paso
20030408	212	5777	3213	D
20030617	212	6779	3213	D
20030826	212	7781	3213	D
20031104	212	8783	3213	D
20040113	212	9785	3213	D
20040323	212	10787	3213	D
20040601	212	11789	3213	D
20040706	212	12290	3213	D
20040810	212	12791	3213	D
20041019	212	13793	3213	D
20041228	212	14795	3213	D
20050308	212	15797	3213	D
20050621	212	17300	3213	D
20050830	212	18302	3213	D
20051108	212	19304	3213	D
20060117	212	20306	3213	D
20060221	212	20807	3213	D
20060328	212	21308	3213	D
20070102	212	25316	3213	D
20070206	212	25817	3213	D
20070313	212	26318	3213	D

Tabla 5.1. Datos de las imágenes SAR para la caldera de Los Humeros, la fecha muestra el año mes y día de adquisición de la imagen, D significa que es una órbita descendente del satélite.

5.2.2 Selección de escenas para el cálculo de interferogramas

En ésta primera etapa se realizó una selección de pares de escenas o fechas, mediante la delimitación o constricción de las líneas de base perpendicular (B_{\perp}) y temporal (B_t), con el fin de disminuir en gran medida la decorrelación. Para ello, se utilizó un código en lenguaje FORTRAN, el cual genera las combinaciones de posibles pares interferométricos y elige aquellos por debajo de un umbral de líneas de base. En este trabajo constreñimos las líneas de base de la siguiente manera: $B_{\perp} \leq 500$ m y $B_t \leq 365$ días, dando como resultado una combinación de 34 posibles interferogramas que se muestran en la Tabla 5.2. La línea de base temporal se delimitó con un máximo de un año, con el objetivo de tener mucha mayor información y no descartar posibles interferogramas con una buena señal interferométrica, incluso si el riesgo de decorrelación era mayor.

Imagen Master	Imagen Slave	B_{\perp} [m]	B_t [días]
20030408	20030617	156	70
20030408	20030826	155	140
20030408	20040113	168	280
20030617	20030826	-1	70
20030617	20040113	12	210
20030826	20040113	13	140
20030826	20040810	-486	350
20031104	20040706	318	245
20031104	20040810	412	280
20040113	20040810	-499	210
20040113	20041228	-235	350
20040323	20040601	-382	70
20040323	20041019	-99	210
20040601	20041019	283	140
20040706	20040810	94	35
20040706	20041228	358	175
20040706	20050308	458	245
20040810	20041228	264	140
20040810	20050308	364	210
20041019	20050830	-490	315
20041228	20050308	100	70
20050308	20050621	451	105
20050308	20050830	483	175
20050308	20060221	-395	350
20050621	20050830	32	70
20050621	20051108	245	140
20050830	20051108	213	70
20060117	20060221	486	35
20060117	20060328	222	70
20060221	20060328	-264	35
20060221	20070206	341	350
20070102	20070206	-255	35
20070102	20070313	27	70
20070206	20070313	282	35

Tabla 5.2 Se muestran las combinaciones de pares interferométricos a partir de limitar las líneas de base perpendicular y temporal.

5.2.3 El cálculo de interferogramas

Las imágenes que provee la ESA vienen en un formato estándar que ROI_PAC requiere decodificar. Para ello cuenta con un módulo para acondicionar los datos y ponerlos en formato explotable (raw).

Después de haber obtenido los datos en crudo o raw, para cada escena (“master y slave”), se realiza un proceso llamado “enfocamiento o focusing”, el cual consiste en convertir el formato raw de la escena a un formato Single-Look Complex. Recordemos que la SLC es un arreglo matricial (un arreglo de pixeles) y por lo tanto cada elemento de la matriz contendrá un número complejo.

Una vez calculada la SLC de cada escena, se tiene que realizar un proceso llamado “corregistro”. Dicho proceso consiste en ajustar “geométricamente” la imagen slave a la imagen master, o bien, poner la primera en la geometría de la segunda, para ello se realiza una correlación cruzada entre las imágenes con el objeto de encontrar los picos de correlación y, con ello, los puntos de control que servirán para realizar la transformación geométrica requerida. Posteriormente la imagen slave es remuestreada para que tenga el mismo número de pixeles que la imagen master. Para mejorar la relación señal a ruido en las imágenes, se les aplicó un proceso de Multi-Look, de tal forma que se obtuvieron imágenes con pixeles cuadrados de 20x20 m de resolución espacial.

Una vez que ambas imágenes tienen la misma geometría, se realiza la multiplicación elemento a elemento, o bien, pixel a pixel, de la imagen master por el complejo conjugado de la imagen slave. A través de esta operación matemática se calcula la diferencia de fase entre las dos imágenes. El resultado será la obtención de un interferograma (ifg), que consta de la imagen de amplitud, como resultado de haber multiplicado ambas amplitudes de cada escena, y la fase interferométrica, como resultado de la diferencia de fases entre cada imagen, Ec. 5.1 y 5.2.

$$ifg = |A_M||A_S|e^{j(\theta_1-\theta_2)} = |A_M||A_S|e^{j(\varphi_{int})} \quad (5.1)$$

Donde:

$$\varphi_{int} = \varphi_{orb} + \varphi_{top} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise} \quad (5.2)$$

Hasta aquí, la fase interferométrica está compuesta por las contribuciones orbital, topográfica, de deformación, atmosférica y de ruido. A dicha fase le llamamos bruta o cruda del interferograma, Fig. 5.4.

Para efectos de este trabajo, únicamente interesó estimar la componente relacionada con la deformación, por lo que fue necesario eliminar el resto de las contribuciones de la fase interferométrica.

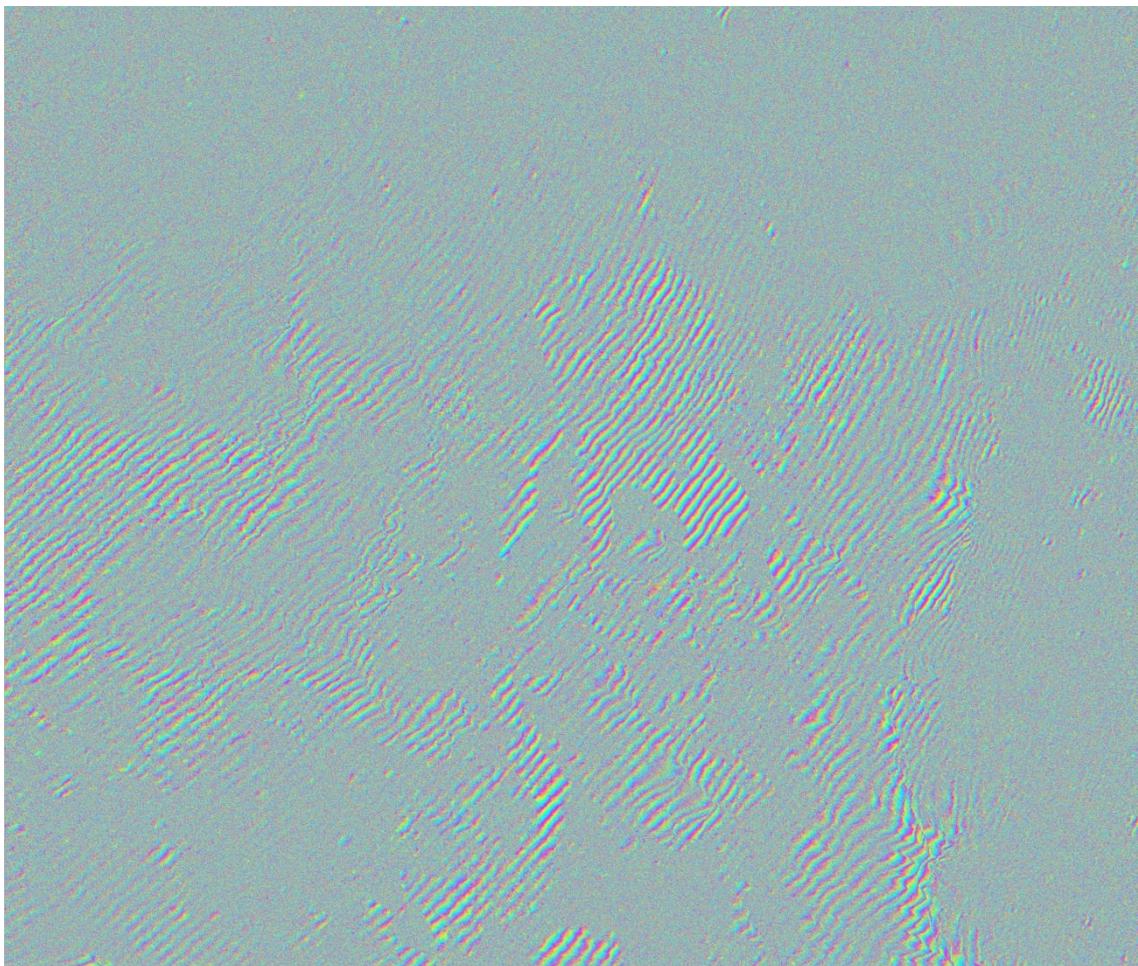


Fig. 5.4 Interferograma de la escena de la caldera de Los Hornos, donde se muestra la fase interferométrica bruta o cruda.

5.2.3.1 Reducción de la contribución orbital

En esta etapa del procesamiento, para remover las franjas orbitales que están estrechamente ligadas con el valor de la línea de base perpendicular, se simulan dichas franjas a partir de valores de órbitas precisas (vectores de posición), Fig. 5.5 y 5.6. Las órbitas precisas fueron obtenidas del Department of Earth Observation and Space Systems (DEOS) de la Universidad Tecnológica de Delft (TDU) (Scharroo *et al.*, 1998).

Es importante recordar que esta simulación es sólo una estimación que trata de ser lo más precisa posible, pero puede contener errores por lo que no

garantiza la eliminación completa de la contribución debida a las órbitas en la fase interferométrica.

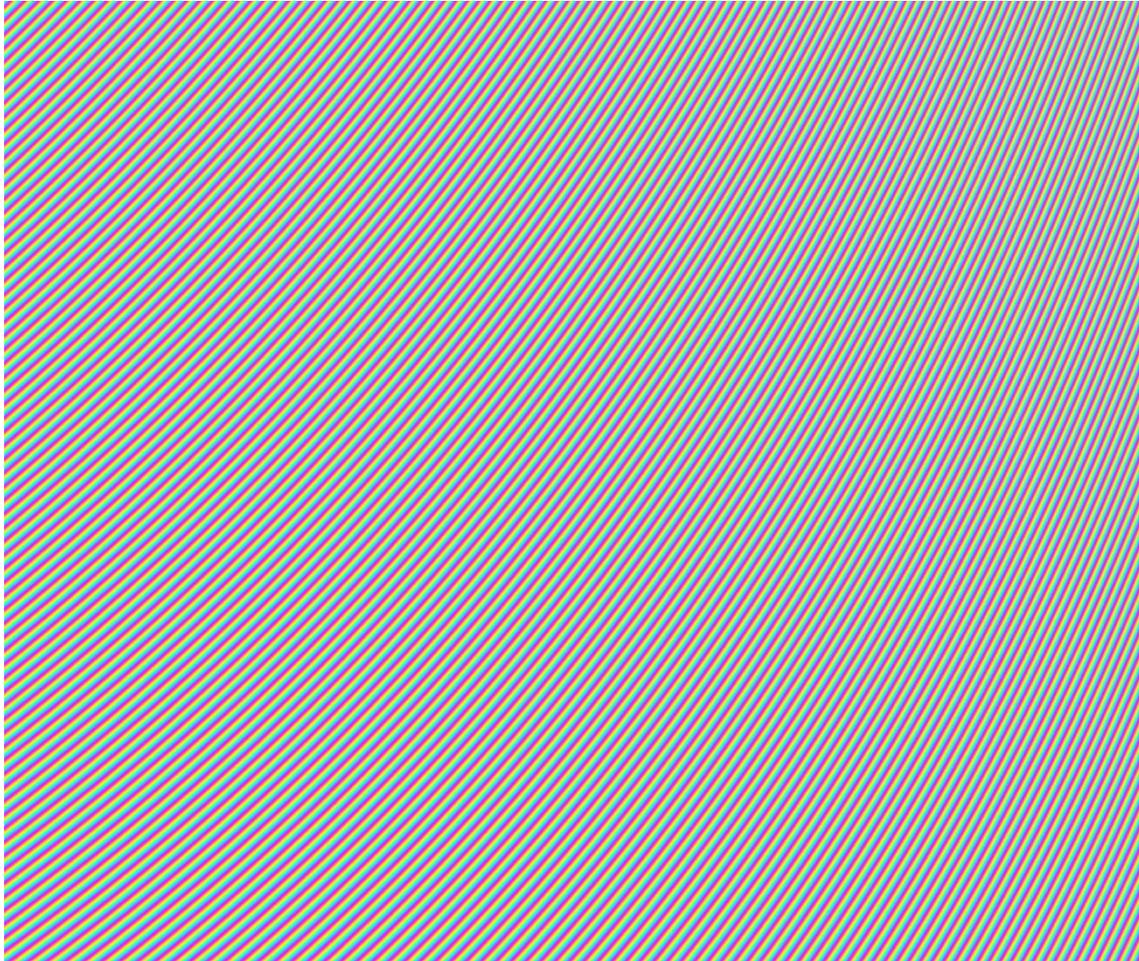


Fig. 5.5 Imagen de una rampa de franjas orbitales simuladas a partir de la información de órbitas precisas y de las líneas de base estimadas, esta rampa es la que se le resta a la fase interferométrica bruta.

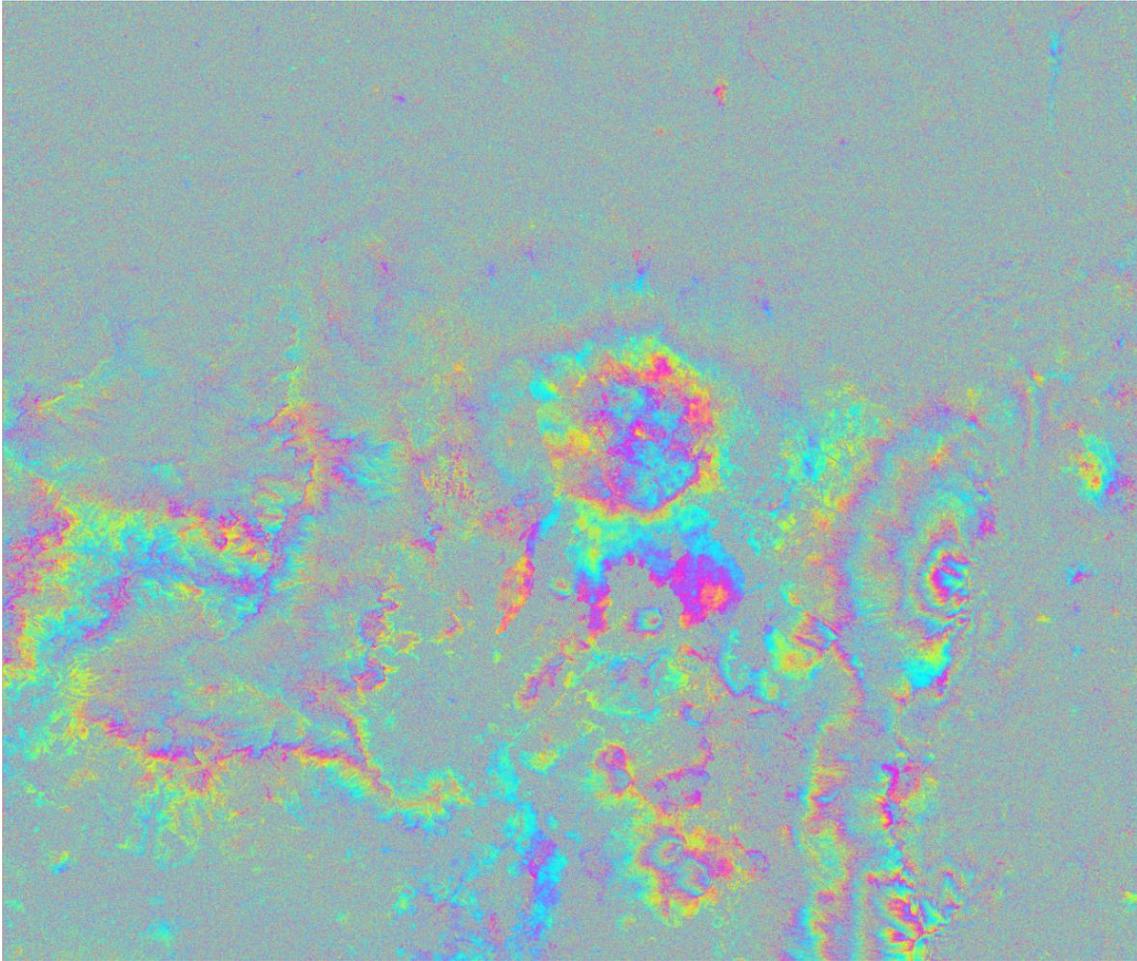


Fig. 5.6 Fase interferométrica después haber restado las franjas orbitales, por lo que en este interferograma aún están presentes el resto de las contribuciones (fase topográfica, fase de deformación, fase atmosférica y fase de ruido de decorrelación).

5.2.3.2 Reducción de la contribución topográfica

En ésta etapa del procesamiento, se eliminan o reducen los efectos topográficos en el interferograma, para ello se utiliza un modelo digital de elevaciones (DEM). En este trabajo, la fase debida a la topografía fue reducida mediante un DEM con una resolución de 3 arcos de segundo (aproximadamente 90 m y con una precisión en la vertical de 10 m) proveniente de la misión SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de la NASA (Farr & Kobrick, 2000). Durante este proceso, se realiza una transformación geométrica al DEM, de tal forma que se convierte a la geometría del radar, y sus valores de elevación a valores de fase, de esta manera, las franjas topográficas simuladas se restan a la fase interferométrica con corrección orbital, Fig. 5.7 y 5.8.

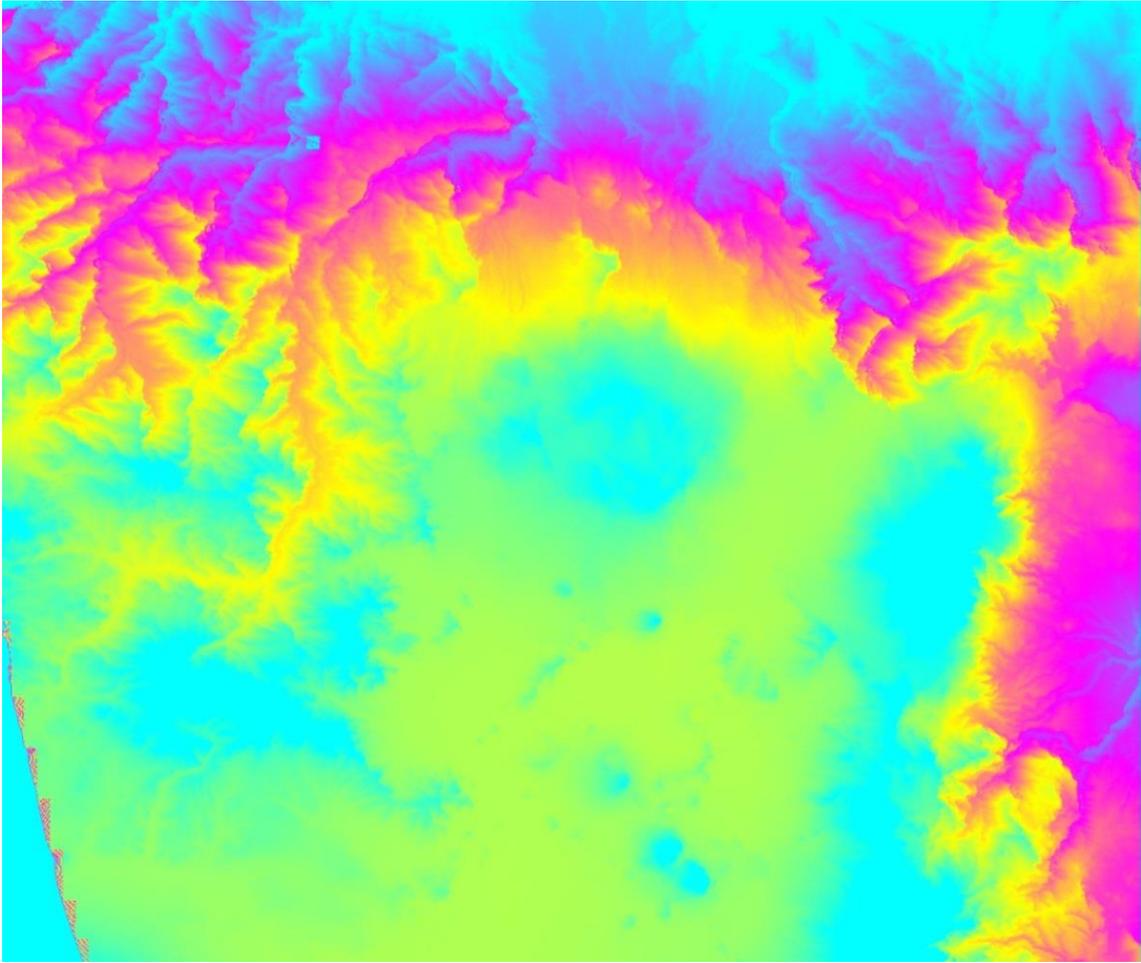


Fig. 5.7 Imagen en la que se simularon franjas topográficas a partir de un DEM.

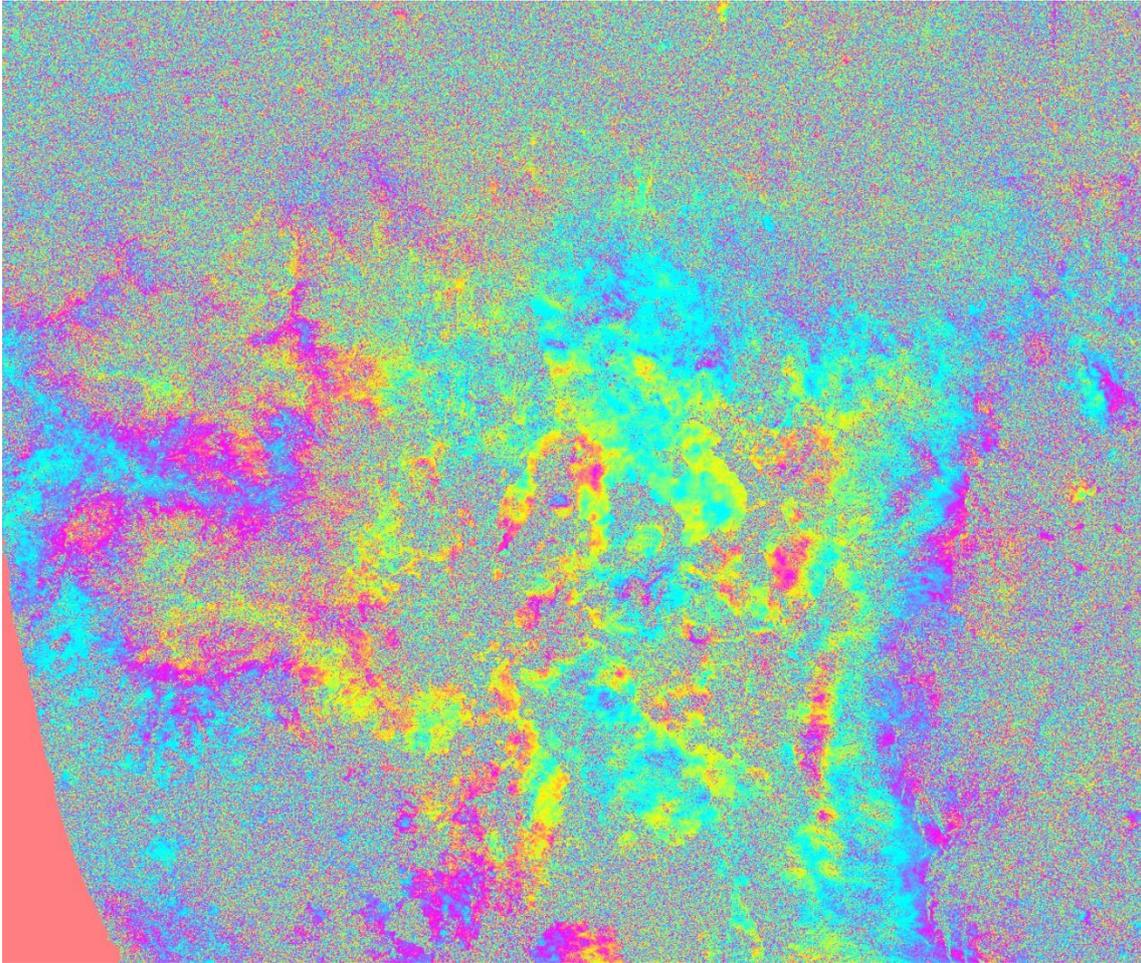


Fig. 5.8 Fase interferométrica después haber restado las franjas topográficas, por lo que en este interferograma están presentes las contribuciones de fase de deformación, fase atmosférica y residuales de fase orbital, fase topográfica y ruido de decorrelación.

5.2.3.3 Filtrado de la fase interferométrica y desenvolvimiento de la fase

En esta etapa, después de haber removido las contribuciones anteriores (fase orbital y topográfica), se realiza un filtrado a la fase interferométrica, Fig. 5.9. El filtro usado en éste trabajo fue uno de tipo adaptativo (Goldstein & Werner, 1998), con el cual se incrementa la relación señal/ruido. Éste filtrado es realmente útil, ya que reduce los niveles de ruido debidos a la falta de correlación espacial y temporal, permitiendo definir mejor las franjas del interferograma y facilitando el proceso de desenvolvimiento de la fase (Hernández-Jaramillo, 2012).

Respecto al desenvolvimiento de la fase o “unwrapping”, se refiere al proceso de extraer los valores absolutos de fases a partir de los valores disponibles, “envueltos” en la fase interferométrica (Ferretti *et al.*, 2007), es decir, se elimina la ambigüedad del módulo 2π ($-\pi$ a π) de la fase. Para ello, se sustraen o agregan múltiplos de valores enteros de 2π para estimar el valor absoluto de la fase en cada pixel (Hernández-Jaramillo, 2012). Para este estudio, se trabajó con

el método de unwrapping de Goldstein *et al.*, (1988), que forma parte del software ROI_PAC.

Cuando hay pérdida de coherencia o decorrelación, es muy difícil desenvolver la fase, pues existe pérdida de la señal interferométrica. La zona de estudio del presente trabajo, presenta este problema sobretodo en la parte Norte, donde existe mucha vegetación y las propiedades de la retrodispersión de la señal electromagnética son muy variables.

Finalmente después de haber realizado el filtrado y desenvolvimiento de la fase interferométrica, se obtiene una fase que contendrá principalmente las fases de deformación y atmósfera, además de las fases residuales orbital y topográfica, producto de errores en su estimación y del ruido de decorrelación remanente. En la Fig. 5.10 se muestra un interferograma ya filtrado y con unwrapping, pero sin geocodificar, es decir, en geometría del radar (los 34 interferogramas calculados en este trabajo, se muestran ya geocodificados en el anexo A).

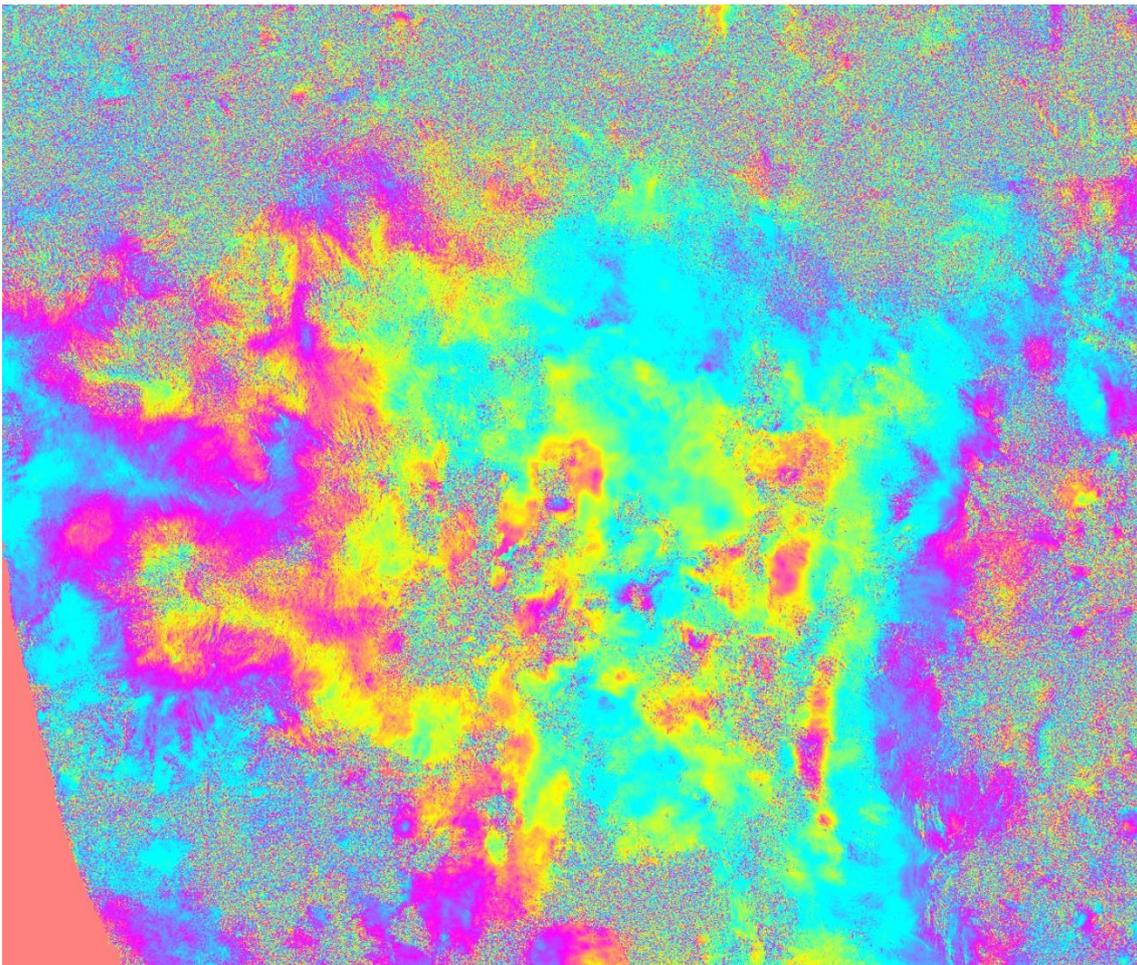


Fig. 5.9 Fase interferométrica después de haberse aplicado un filtro adaptativo.

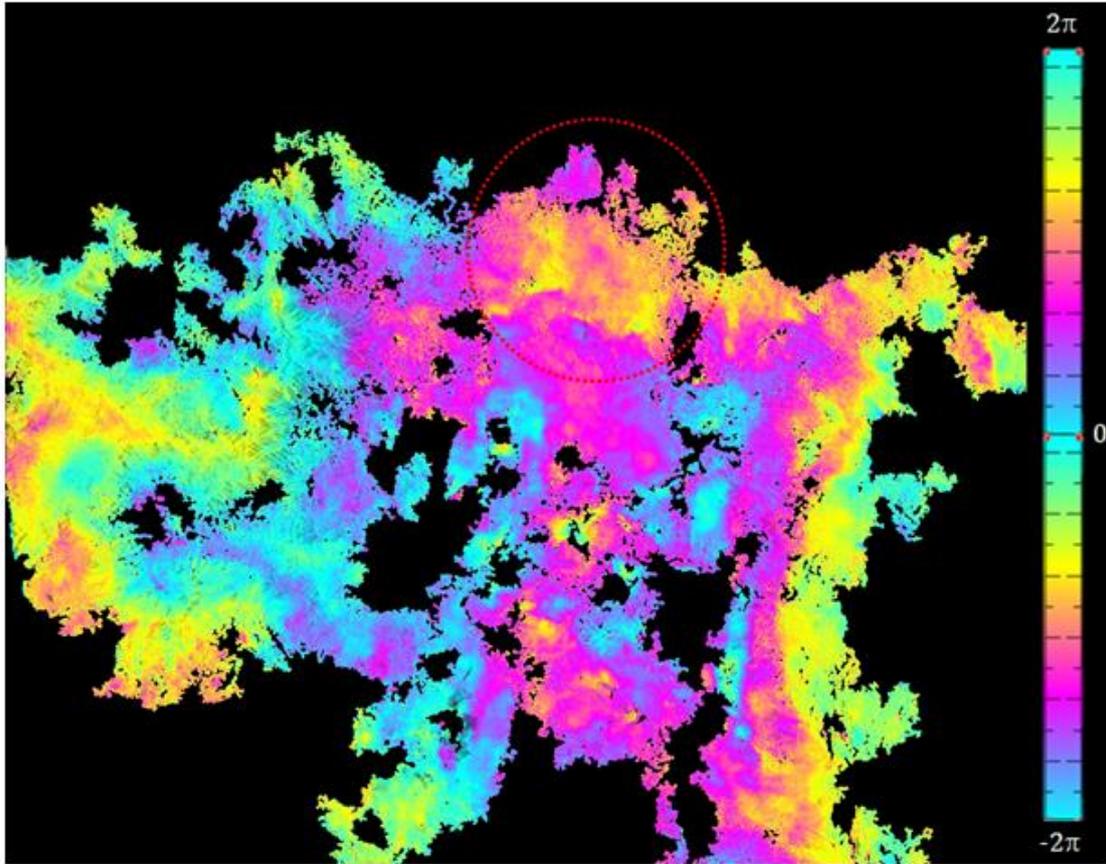


Fig. 5.10 Interferograma en geometría radar, procesado en ROI_PAC a partir de las escenas 20030617-20030826 y con la siguientes líneas de base, $B_{\perp}=-1$ m y $B_t=70$ días. En éste interferograma las zonas en negro corresponden a las zonas con decorrelación o con pérdida de señal, donde la fase no fue desenvuelta (la circunferencia roja punteada, marca el área de la caldera).

5.2.4 Post procesamiento

5.2.4.1 Selección de mejores interferogramas

Después de haber calculado 34 interferogramas con sus líneas de base constreñidas, se seleccionaron sólo 11 interferogramas con mejor señal interferométrica, es decir, aquellos interferogramas donde había menor pérdida de coherencia en la caldera y en los alrededores, Tabla 5.3.

Imagen Master	Imagen Slave	B_{\perp} [m]	B_t [días]
20030617	20030826	-1	70
20030826	20040113	13	140
20040706	20040810	94	35
20041228	20050308	100	70
20050621	20050830	32	70
20050830	20051108	213	70
20060117	20060328	222	70
20060221	20060328	-264	35
20070102	20070206	-255	35
20070102	20070313	27	70
20070206	20070313	282	35

Tabla 5.3 Se muestran los once interferogramas elegidos, para su inspección.

5.2.4.2 Análisis de los interferogramas

Una vez que los interferogramas fueron seleccionados, se procedió a inspeccionar de forma visual cada uno. Inicialmente, se buscó identificar patrones que resaltarán en los interferogramas, con la intención de relacionarlos con la deformación, sobretodo en la zona de la caldera y alrededores. Sin embargo, ello no fue posible por la presencia de señal atmosférica sobre la zona. Desafortunadamente, todos los interferogramas presentan en gran medida una marcada contribución atmosférica que empaña por completo la señal relacionada con la deformación. Además algunos también presentan marcadas contribuciones residuales debidas a errores en las órbitas (orbital) y el DEM (topográfica), Fig. 5.11 y 5.12.

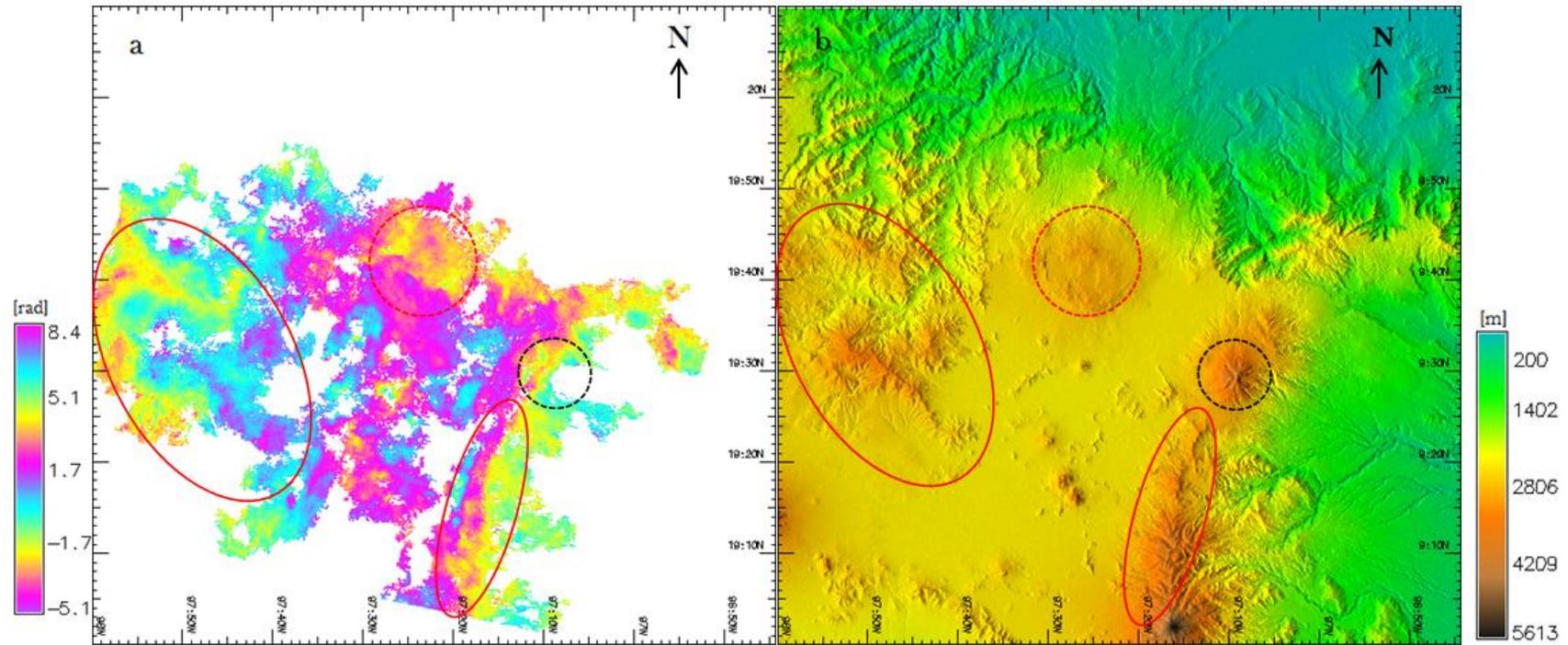


Fig. 5.11 a) Interferograma filtrado y desenvuelto, al que se retiró la contribución orbital y topográfica y muestra atmósfera verticalmente estratificada relacionada con la elevación (elipses rojas) y b) DEM en el que se ubican las zonas con elevaciones importantes, la caldera de Los Humeros (circunferencia roja con línea discontinua) y el Cofre de Perote (circunferencia negra con línea discontinua). La correlación entre elevación y fase puede verificarse sobre las zonas señaladas (elipses y circunferencias).

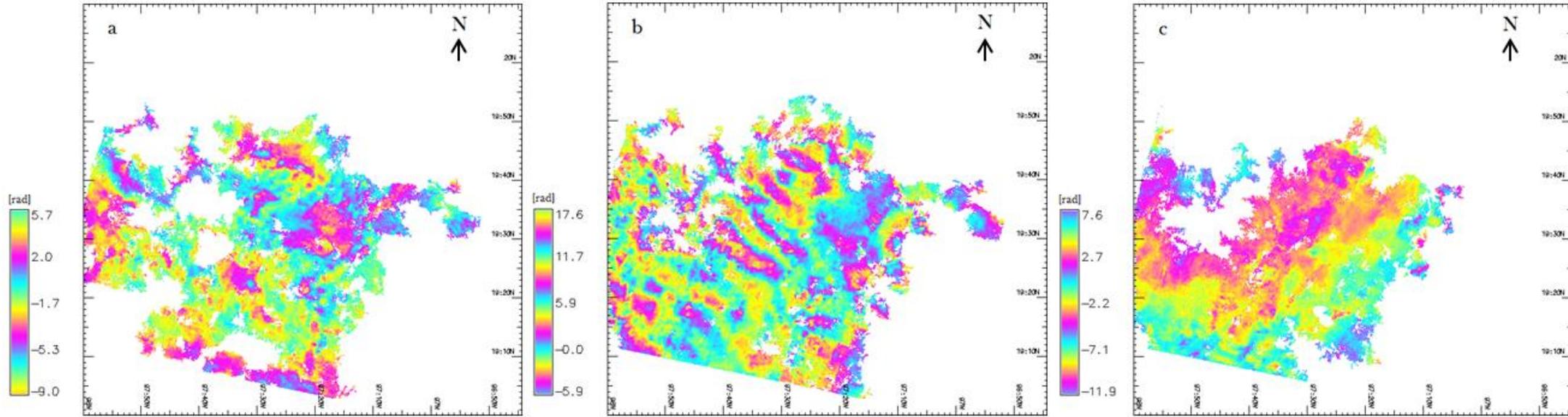


Fig. 5.12 Mosaico de interferogramas a los que se retiró la contribución orbital y topográfica, a) el interferograma presenta atmósfera turbulenta (no hay un patrón relacionado a la topografía); b) el interferograma muestra una marcada contribución atmosférica aleatoria (de tipo frente) y c) se puede observar el remanente de una rampa orbital.

5.2.4.3 Corrección de contribución atmosférica

Recordemos que la señal electromagnética puede sufrir desfases al atravesar la atmósfera, debido a las características presentes en ésta, durante la adquisición de la imagen (e.g., presión, temperatura, contenido de vapor de agua y fuertes corrientes de aire). Como mencionó en el capítulo 3.4.4, la fase atmosférica puede clasificarse en verticalmente estratificada y turbulenta.

En este trabajo, se buscó corregir la componente atmosférica utilizando únicamente la información con que se contaba (i.e., imágenes SAR, interferogramas, DEM). Por lo anterior, sólo se corrigió la componente verticalmente estratificada, esperando que la magnitud de la contribución turbulenta fuese mínima.

La corrección aplicada, se basa en la hipótesis de que existe una correlación entre la fase atmosférica verticalmente estratificada y la elevación. Si dicha correlación es fácilmente modelable, la contribución de la fase atmosférica verticalmente estratificada puede retirarse del interferograma.

Para realizar la corrección de la componente verticalmente estratificada a los interferogramas analizados en este trabajo, se utilizó un script que ajusta con un modelo lineal, los datos de fase contra los de elevación. Dicho script también corrige los errores orbitales remanentes mediante el ajuste de un plano orbital (Cavalié *et al.*, 2007; López-Quiroz *et al.*, 2009). Sin embargo, es importante señalar que en el caso de los interferogramas de la caldera de los Humeros, la deformación también está correlacionada con la elevación, por lo que, mediante el script señalado, también serían retirados los valores de deformación relacionados a través de un modelo lineal con la elevación.

El script requiere ciertos parámetros de entrada como:

- 1) La definición de una zona “estable”, a la cual puedan referirse los desplazamientos.

- 2) La definición de la zona donde se espera la deformación.

La zona estable corresponde al área del volcán del Cofre de Perote, el cual es clasificado como un volcán compuesto tipo escudo (Carrasco-Núñez *et al.*, 2009, citado en Rodríguez-Vargas, 2010), este volcán está compuesto principalmente por derrames de lava andesíticos y dacíticos, los cuales le dan una forma de volcán escudo con pendientes suaves (Rodríguez-Vargas, 2010). El basamento regional de

la zona volcánica del Cofre de Perote, está formado por un potente paquete de rocas sedimentarias, intensamente deformadas (Carrasco-Núñez, 2000, citado en Rodríguez-Vargas, 2010). Debido a que su última actividad volcánica, ocurrió en el Pleistoceno-Holoceno (Siebert & Carrasco-Núñez, 2002; González-Mercado, 2005; Rodríguez-Vargas *et al.*, 2006, citados en Rodríguez-Vargas, 2010), es considerado como un volcán inactivo; aunque estrictamente hablando, habría que considerar el trabajo de Díaz-Castellón (2009) en el que analiza la posibilidad de colapso del edificio volcánico ante el régimen de esfuerzos en la estructura, los procesos de erosión glacial, la precipitación extrema y la ocurrencia de un sismo. La zona en la que se espera la deformación corresponde a la zona de la caldera, y la zona en la que se esperaría la afectación atmosférica es el área que no incluye la zona de deformación.

Tanto la zona estable como la de deformación, fueron definidas a partir de sus coordenadas extremas i , j , Fig. 5.13.

- La zona estable o de referencia (El Cofre de Perote): $i_1=464,754$
 $j_1=372,675$
- La zona donde se espera deformación (la caldera de Los Humeros):
 $i_2=182,288$ $j_2=668,788$

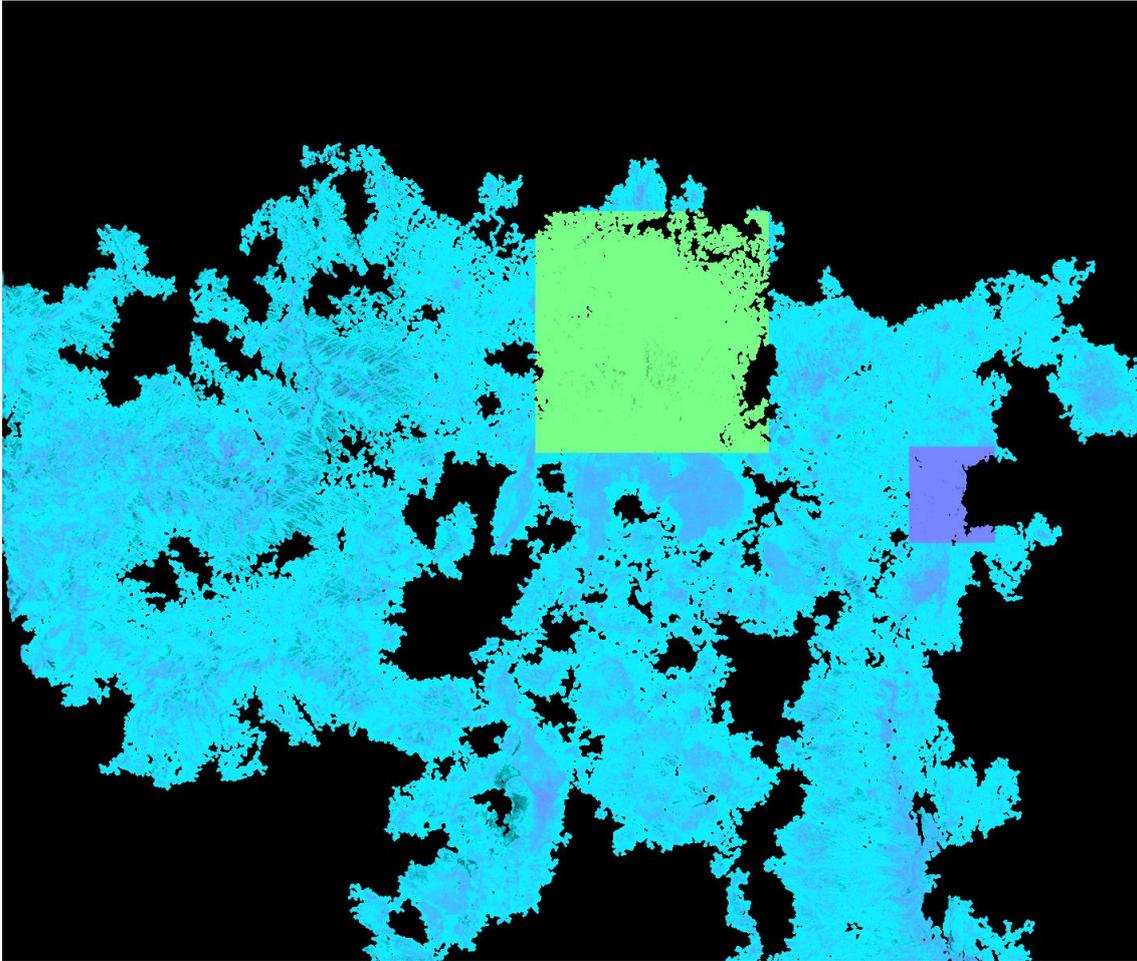


Fig. 5.13 Se muestran las zonas de interés delimitadas a partir de los valores de posición de los píxeles dentro del interferograma. La zona estable (el volcán del Cofre de Perote) está contenida en el recuadro de color azul más intenso, mientras que la zona donde se espera deformación (la caldera de Los Humeros) está contenida en el recuadro de color verde.

5.2.4.3.1 Relación fase-elevación

Una vez delimitadas las zonas, se aplicó el script antes mencionado, el cual realiza un ajuste lineal entre la fase y la elevación de los píxeles que se encuentran fuera la zona donde se espera la deformación. En la Fig. 5.14, se muestran los resultados obtenidos después de haber realizado la corrección para un interferograma, el resto de los interferogramas corregidos con sus respectivos gráficos de fase-elevación se encuentran en el anexo B. En el siguiente capítulo se muestra el análisis detallado de los gráficos fase-elevación y el de los interferogramas resultantes después de haber aplicado la corrección.

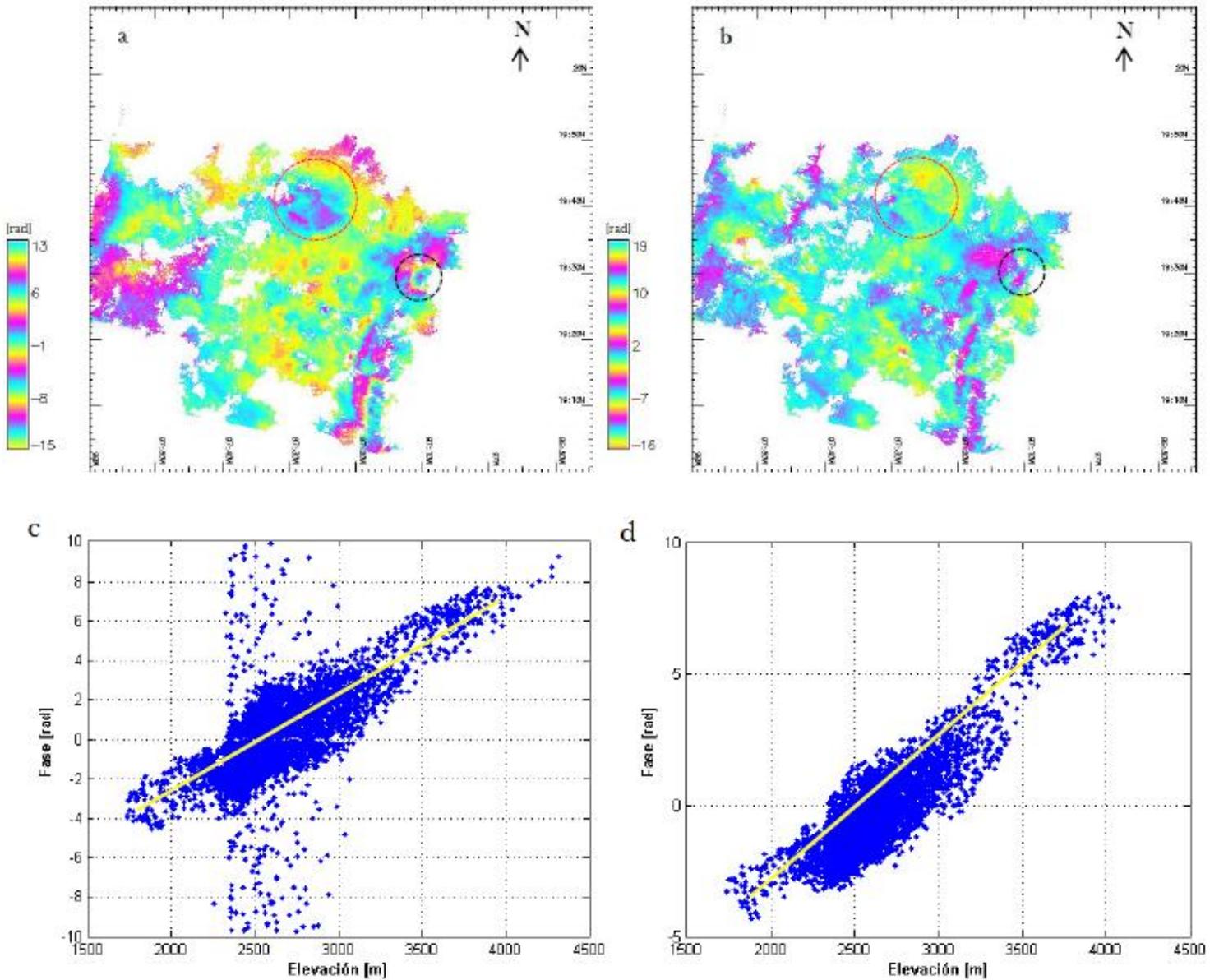


Fig. 5.14 Mosaico de interferogramas y gráficos fase contra elevación para el par interferométrico 20060221-20060328 con $B_{\perp}=-264$ m y $B_t=35$ días. La zona de la caldera de Los Humeros se indica con una circunferencia roja punteada, mientras que el Cofre de Perote con una circunferencia en negro punteada. a) interferograma antes de realizar la corrección, b) interferograma después de haberse aplicado corrección de fase atmosférica verticalmente estratificada, c) gráfico de fase-elevación del interferograma antes de realizarse corrección, la línea amarilla marca una tendencia lineal, y d) gráfico de fase-elevación después de aplicar un script que retira la fase atmosférica verticalmente estratificada, sólo fueron ajustados al modelo lineal (línea amarilla) todos los valores que se encontraban fuera de la caldera.

Capítulo 6

Análisis y discusión de resultados

6.1 Interferogramas procesados con ROI_PAC

En este capítulo, se analizan los resultados de diferentes etapas de procesamiento de los interferogramas. El punto de partida, son los interferogramas calculados por ROI_PAC, cuya fase puede ser representada como:

$$\varphi_{int} = \varphi_{orb_res} + \varphi_{top_res} + \varphi_{def} + \varphi_{atm} + \varphi_{noise_res} \quad (6.1)$$

En ellos, pueden existir contribuciones residuales de la fase orbital y topográfica debido a errores en la estimación de dichas fases. Las fases relacionadas con la deformación y la atmósfera también están presentes. Por último, el ruido de decorrelación es minimizado gracias a los umbrales utilizados sobre las líneas de base.

6.1.1 Interferogramas de acuerdo a sus líneas de base

Después de haber calculado 34 interferogramas con las líneas de base constreñidas ($B_{\perp} \leq 500$ m y $B_t \leq 365$ días) se inspeccionó cada uno de forma visual. Recordemos que la fase de estos interferogramas puede ser representada por la ecuación 6.1. En éste primer análisis, se detectó que los interferogramas con líneas de base temporal $B_t \leq 70$ días presentan una buena coherencia o correlación, a pesar de tener una línea de base perpendicular considerablemente grande. Por otro lado, los interferogramas con una línea de base temporal $B_t > 70$ días y con líneas de base perpendicular mayores, $B_{\perp} \geq 156$ m, presentan mayor decorrelación o baja coherencia, esto dificultó el desenvolvimiento de la fase en áreas importantes de la escena como los alrededores de la caldera de Los Humeros y, en ocasiones, sobre parte de la misma, ocasionando la pérdida de la señal interferométrica. Finalmente se observó en algunos interferogramas, que a pesar de tener una línea de base temporal de $B_t \geq 70$ días, pero con una línea de base perpendicular pequeña $B_{\perp} < 156$ m, aún persistía la señal interferométrica en la caldera y alrededores.

Una manera más clara de observar la calidad de los interferogramas, en función de la variación de las líneas de base perpendicular y temporal, es mediante las imágenes de coherencia. En las imágenes de coherencia, las zonas con presencia de ruido de decorrelación o baja coherencia, están representados con valores cercanos a cero, y las zonas con mayor coherencia o correlación, presentan

valores cercanos a uno. Para la caldera de Los Humeros, las áreas con mayor coherencia corresponden a los flujos de lava y el borde de la caldera, representados con el color turquesa; las zonas con el color rosa o violeta, representan las zonas donde la coherencia es menor, y pueden identificarse sobre las zonas con vegetación principalmente, Fig. 6.1 y 6.2. El anexo C contiene las imágenes de coherencia de los 34 interferogramas.

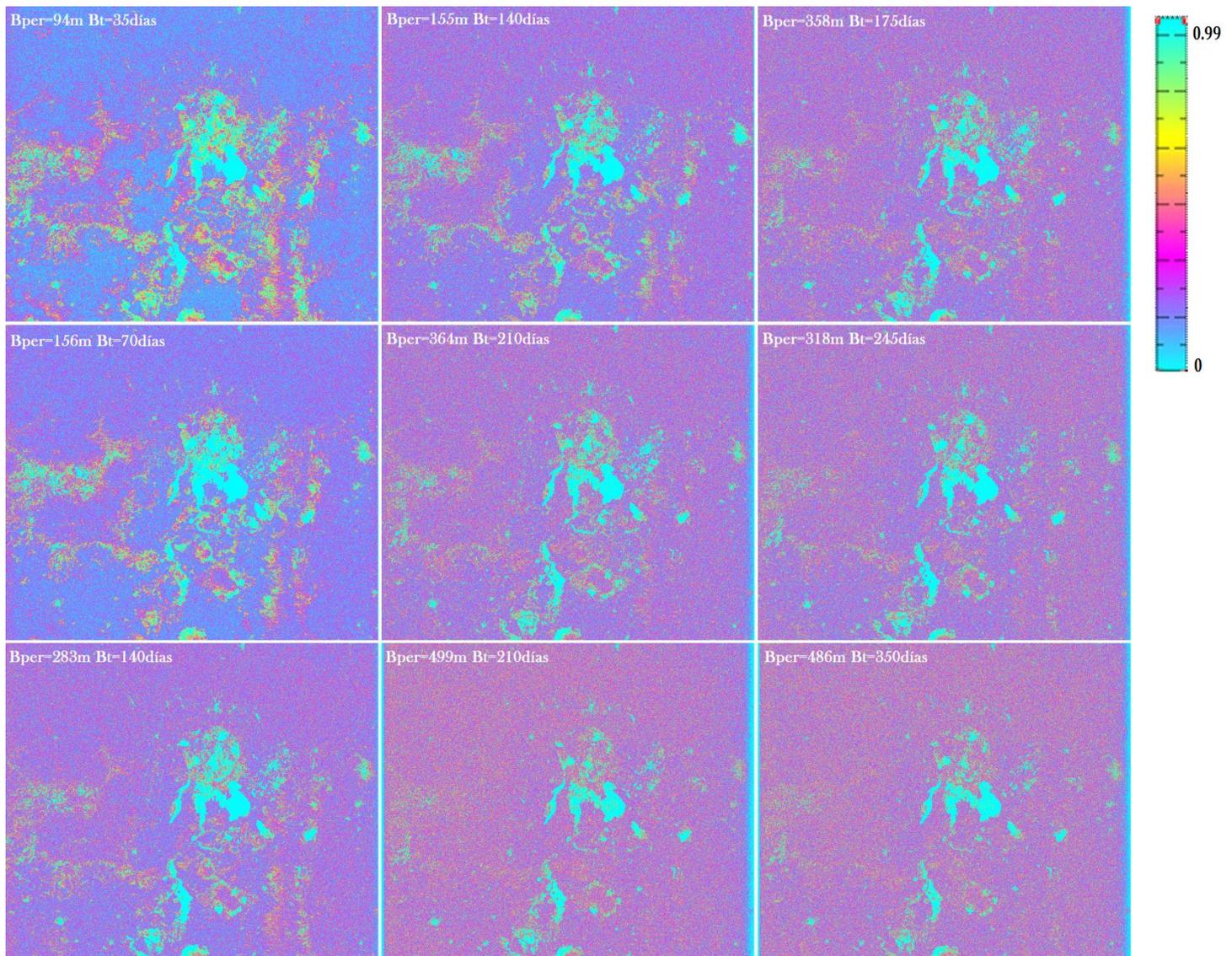


Fig. 6.1 Mosaico de imágenes de coherencia de la escena de la caldera de Los Humeros, donde cada imagen indica sus líneas de base. Es evidente que al aumentar las líneas base el valor de la coherencia disminuye.



Fig. 6.2 Imagen Landsat-8, composición natural (RGB), en el que se muestra la zona de la caldera de Los Humeros (circunferencia roja) y los flujos de lava de la misma (elipse amarilla).

6.1.2 Patrones atmosféricos presentes en los interferogramas

Después de haber analizado los interferogramas, sus líneas de base, y cómo estas influyen en la correlación; se procedió a inspeccionar de forma cualitativa (visual), las franjas y patrones presentes en cada interferograma. Recordemos que el contenido de la fase interferométrica en esta etapa puede ser representado por la ecuación 6.1, en la que pueden existir residuales de fase orbital, atmosférica y ruido, pero principalmente, existen contribuciones asociadas con la deformación y la atmósfera.

Dependiendo de la zona estudio, la magnitud de la contribución atmosférica puede ser mayor o menor respecto a la contribución relacionada con la deformación. Cuando es menor, aún en presencia de atmósfera, es posible indentificar patrones de deformación en los interferogramas. Cuando es mayor, la contribución atmosférica puede cubrir o empañar completamente a la deformación.

En el caso de la caldera de Los Humeros, los interferogramas fueron inspeccionados de manera visual, con la intención de encontrar patrones similares, entre unos y otros, que pudieran ser asociados a la deformación, sin embargo se trata de una zona difícil pues la atmósfera está presente en todos ellos. Como, se ha comentado, la contribución atmosférica puede clasificarse en verticalmente estratificada y turbulenta. En el caso de Los Humeros, la contribución verticalmente estratificada, correlacionada con la topografía o elevación de la zona, está presente sobre la caldera y otras estructuras montañosas. Por otro lado, la contribución de fase turbulenta también suele estar presente en una gran cantidad de interferogramas puesto que la zona de estudio se encuentra “relativamente” muy cerca de la zona costera, Fig. 6.3.

Como se dijo, la contribución turbulenta no puede ser modelada, y por lo tanto, tampoco removida del interferograma, sin ayuda de datos independientes de los interferogramas, con los cuales no contamos para realizar este trabajo. Sin embargo, se supuso que si la magnitud de la contribución turbulenta era pequeña, se podría esperar que, una vez corregida la contribución verticalmente estratificada, fuera posible detectar señal asociada a la deformación en los interferogramas. Para lograrlo, se aplicó un algoritmo para modelar la contribución verticalmente estratificada, la cual está correlacionada con la elevación. Este algoritmo sólo funciona para correlaciones que puedan ser representadas por un modelo lineal. Es importante mencionar que, para el caso de los interferogramas sobre la caldera de Los Humeros, la deformación también está correlacionada con la elevación, por lo que el algoritmo también retirará la deformación que se relacione linealmente con la elevación.

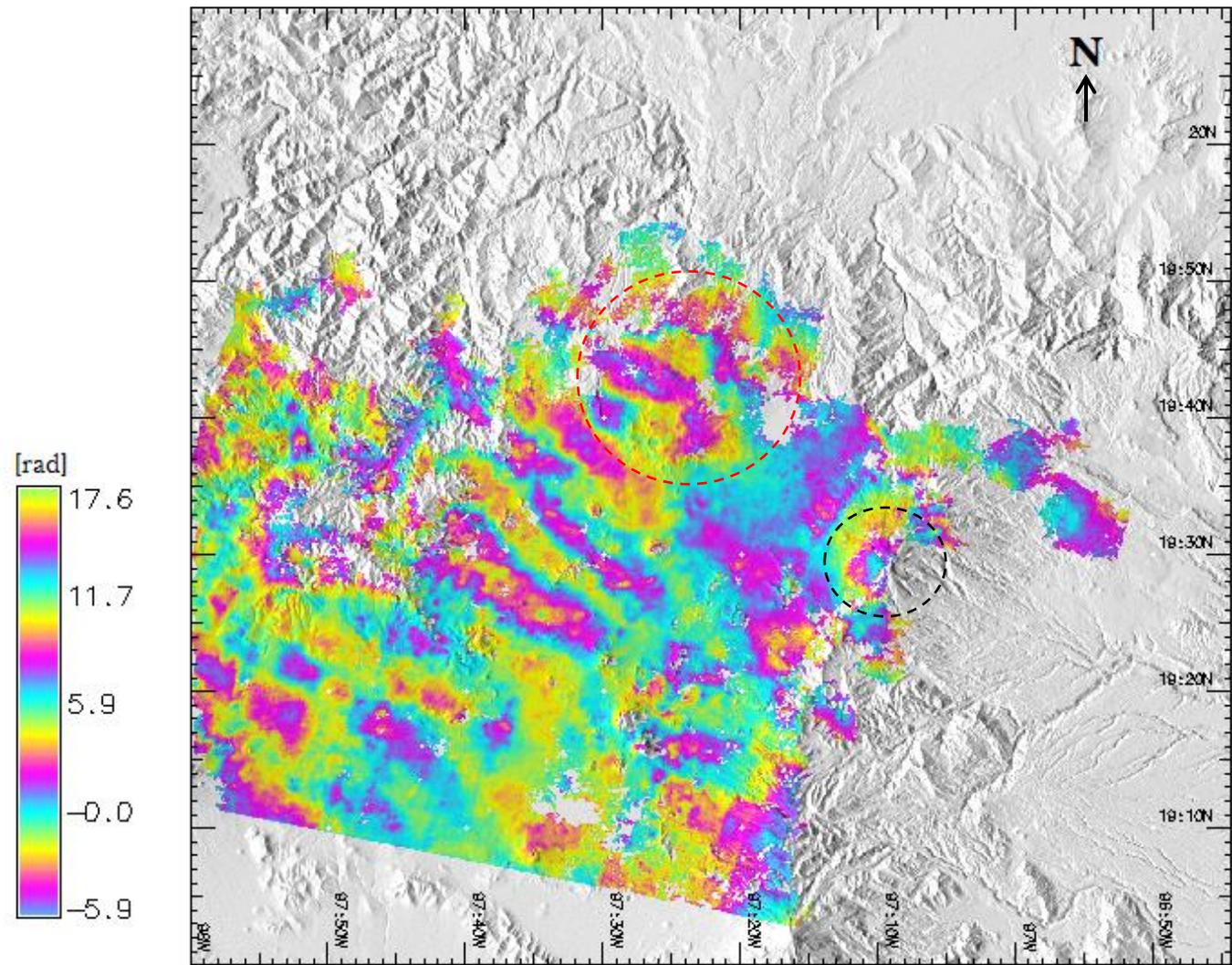


Fig. 6.3 Interferograma que corresponde a las fechas 20041228-20050308, en el cual están presentes patrones o franjas debido a efectos atmosféricos turbulentos (sin correlación con la elevación). En éste interferograma se observan patrones con una orientación NW-SE y parte de estas franjas caen sobre la caldera de Los Hornos (circunferencia en línea roja discontinua). La circunferencia en línea negra discontinua, indica el patrón presente sobre el Cofre de Perote, éste puede deberse a residuales de topografía o atmósfera verticalmente estratificada.

6.2 Postprocesamiento de interferogramas

6.2.1 Análisis de interferogramas corregidos por contribución de atmósfera verticalmente estratificada.

Para aplicar el algoritmo que corrige la contribución de fase atmosférica verticalmente estratificada, se seleccionaron 11 de los 34 interferogramas iniciales; aquellos que presentaban menor decorrelación, es decir, mayor cobertura sobre la zona de estudio.

6.2.1.1 Análisis de gráficos fase contra elevación

La distribución de las elevaciones en la zona de estudio es la siguiente: 2400-3156 m, es el rango de valores de elevación de la caldera, su límite más bajo corresponde a los flujos de lava y el más alto al borde de la caldera. Mientras que la estructura del Cofre de Perote está en el rango de los 3100-4200m. Recordemos que el Cofre de Perote es nuestra zona de referencia, donde se considera que la deformación es nula, mientras que la caldera de Los Humeros es la zona donde se espera deformación.

El algoritmo que corrige la atmósfera verticalmente estratificada, comienza elaborando un gráfico de la fase contra la elevación en el interferograma en cuestión. Después ajusta los datos del gráfico con un modelo lineal. El análisis de los gráficos de fase contra elevación antes y después del ajuste se presenta a continuación.

El gráfico de fase contra elevación, previo a la corrección, correspondiente al par 20030617-20030826, no presenta una tendencial lineal clara y se observa una dispersión de puntos amplia en casi todo el gráfico. Claramente, estos datos no corresponden a la suposición de que pueden ajustarse a través de un modelo lineal. Por lo anterior, incluso si el algoritmo intenta ajustar los datos de entrada, el gráfico de salida no presenta un correcto ajuste lineal, de tal forma que no podemos confiar en el resultado de la corrección. Probablemente los valores aleatorios son debidos a la contribución turbulenta de la atmósfera, Fig. 6.4a. Los gráficos para los pares 20040706-20040810, 20050621-20050830, 20050830-20051108, 20060117-20060328, 20060221-20060328, 20070102-20070313 y 20070206-20070313, tampoco presentan una clara tendencia lineal por lo que no es posible confiar en el resultado de la corrección que efectúa el algoritmo, Fig. 6.4b, 6.4c, 6.4d, 6.4e, 6.4f, 6.4g y 6.4h.

El gráfico previo a la corrección del par 20041228-20050308, muestra aparentemente una tendencia lineal. Sin embargo, la dispersión de sus valores es muy grande por lo que el resultado del ajuste no es muy confiable Fig. 6.5.

Finalmente, los gráficos previos a la corrección de los pares 20030826-20040113 y 20070102-20070206 presentan una distribución lineal, por lo que es posible confiar en los resultados de la corrección efectuada por el algoritmo, Fig. 6.6 y 6.7.

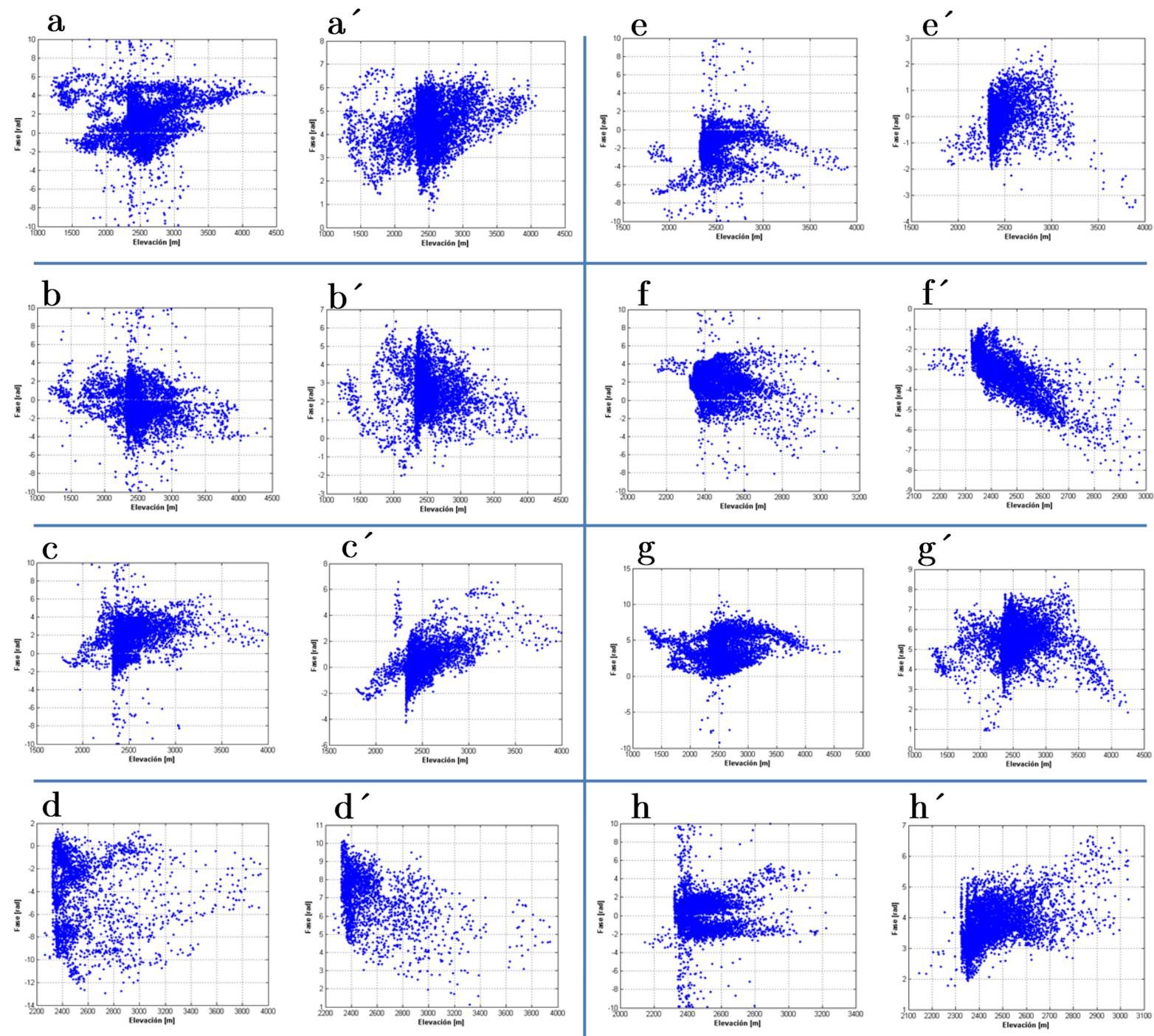


Fig. 6.4 Mosaico de gráficos de fase contra elevación para diferentes pares de fechas. Las letras sin apostrofe corresponden a los gráficos de los interferogramas sin corregir, mientras que las letras con apostrofe corresponde a los gráficos de los interferogramas después de haber aplicado el algoritmo de corrección. En los gráficos de fase contra elevación con corrección, los resultados no son posibles confiar, puesto que los datos no pueden ajustarse mediante un modelo lineal debido a la gran dispersión de la fase.

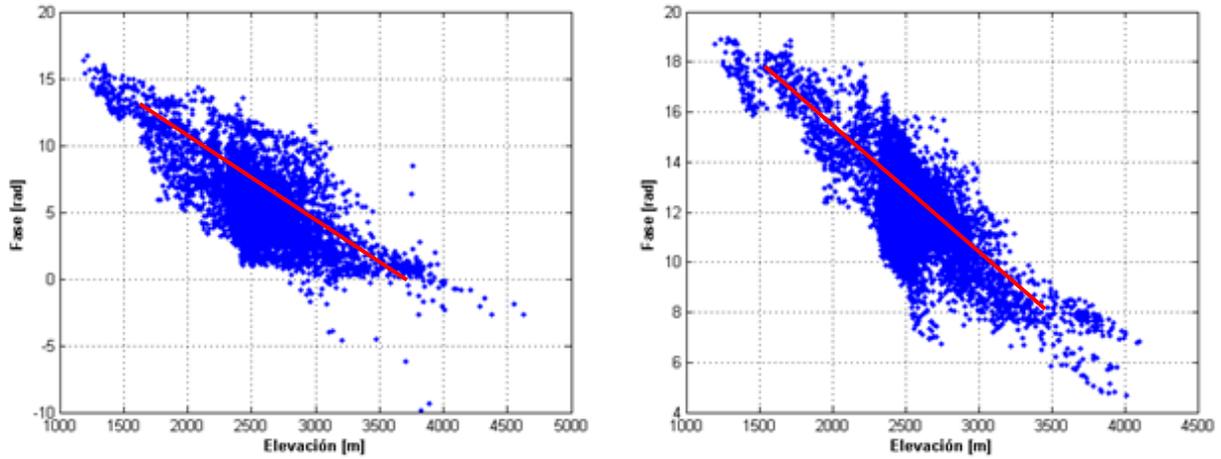


Fig. 6.5 Gráfico de fase contra elevación para el par 20041228-20050308, el gráfico izquierdo corresponde al interferograma sin corregir, el gráfico derecho corresponde al interferograma después de haber aplicado el algoritmo de corrección. Es evidente que la fase y la elevación presentan una tendencia lineal, por lo tanto al aplicar la corrección, los datos son ajustados a un modelo lineal.

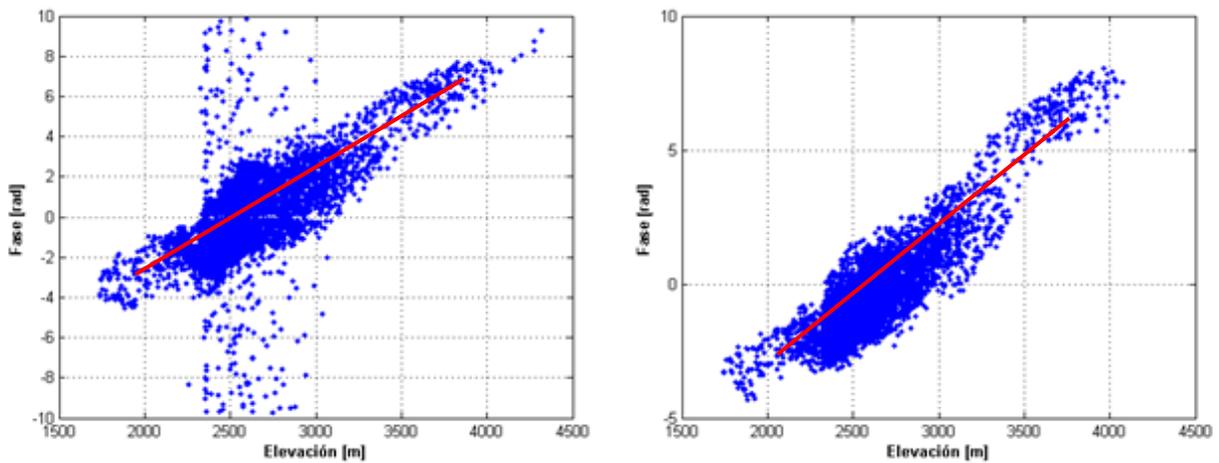


Fig. 6.6 Gráfico de fase contra elevación para el par 20030826-20040113, el gráfico izquierdo corresponde al interferograma sin corregir, el gráfico derecho corresponde al interferograma después de haber aplicado el algoritmo de corrección. Es evidente que la fase y la elevación presentan una tendencia lineal, por lo tanto al aplicar la corrección, los datos son ajustados a un modelo lineal, entonces es posible confiar en los resultados obtenidos.

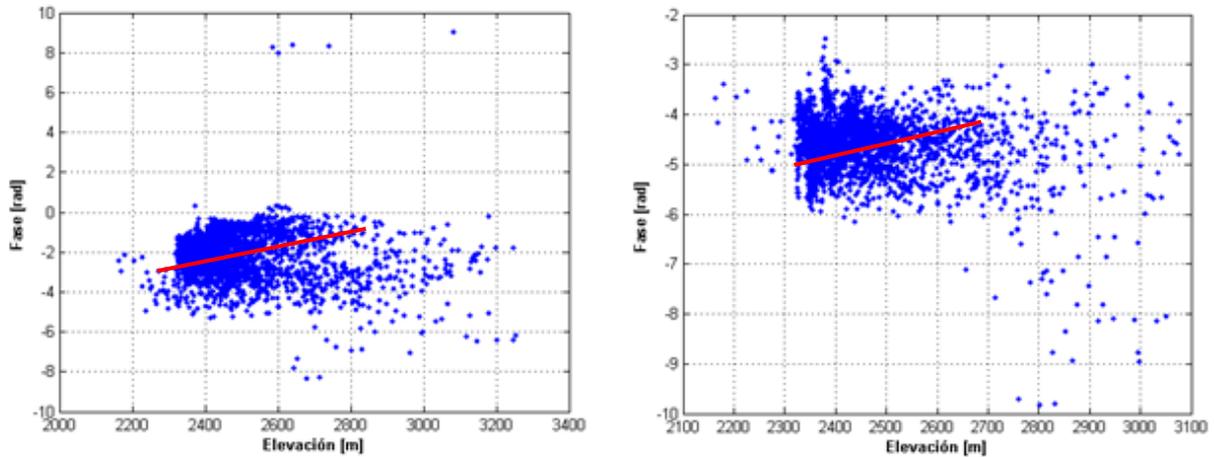


Fig. 6.7 Gráfico de fase contra elevación para el par 20070102-20070206, el gráfico izquierdo corresponde al interferograma sin corregir, el gráfico derecho corresponde al interferograma después de haber aplicado el algoritmo de corrección. Es evidente que la fase y la elevación presentan una tendencia lineal, por lo tanto al aplicar la corrección, los datos son ajustados a un modelo lineal, entonces es posible confiar en los resultados obtenidos.

6.2.1.2 Patrones presentes en interferogramas corregidos

Sólo tres de los once interferogramas presentaban una tendencia lineal en sus gráficos fase contra elevación antes de aplicarles el algoritmo corrector. Sin embargo, el gráfico del par 20041228-20050308, presenta una gran dispersión por lo que el ajuste lineal no es confiable. Además, el interferograma asociado, contiene atmósfera de tipo aleatoria que empaña cualquier otra señal Fig. 6.8. Por lo anterior, sólo es posible confiar en las correcciones de los pares 20030826-20040113 y 20070102-20070206; sin embargo los patrones que presentan sobre la caldera no tienen similitud, Fig. 6.9 y 6.10. Lo anterior puede ser normal puesto que, de un periodo a otro (2004-2007), han transcurrido casi tres años. De cualquier forma, es difícil concluir sobre estos resultados, puesto que son muy pocos y no tenemos forma de validarlos, ni siquiera con otros interferogramas. Recordemos que, en el mejor de los casos, estos interferogramas, contienen únicamente atmósfera turbulenta y deformación, por lo que, incluso en este escenario, no podemos descartar que la señal presente en la caldera se deba mayoritariamente a la contribución turbulenta.

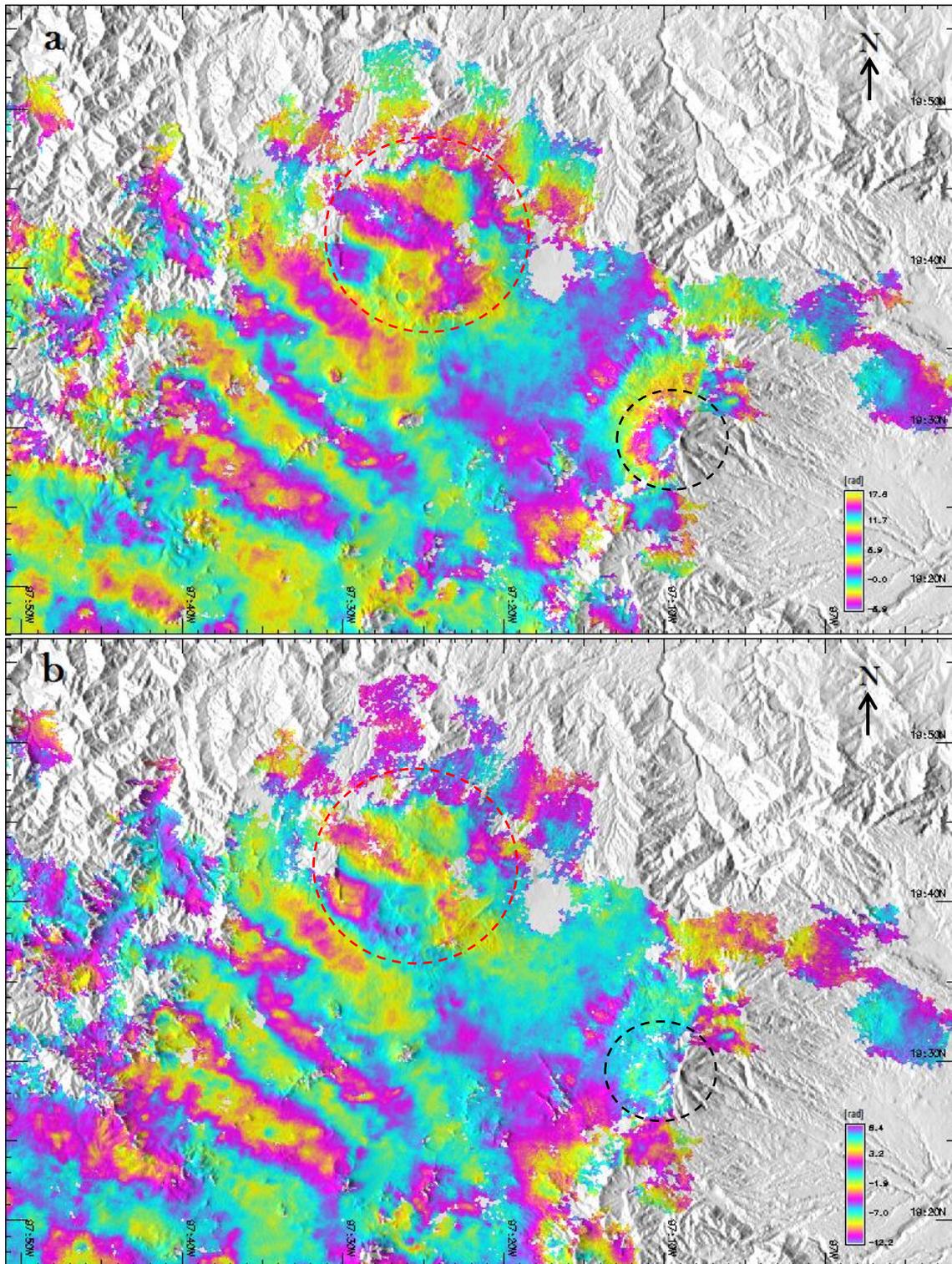


Fig. 6.8 Interferogramas que corresponden a las fechas 20041228-20050308, a) interferograma sin corrección atmosférica verticalmente estratificada, donde es evidente la componente de atmósfera turbulenta; b) interferograma después de haber aplicado el algoritmo de corrección, en éste aún persiste la componente turbulenta empañando por completo cualquier otra señal. La caldera es indicada con una circunferencia en línea roja discontinua y el Cofre de Perote con una circunferencia en línea discontinua negra. Debido a la dispersión de su gráfico de fase contra elevación no es posible confiar en esta corrección.

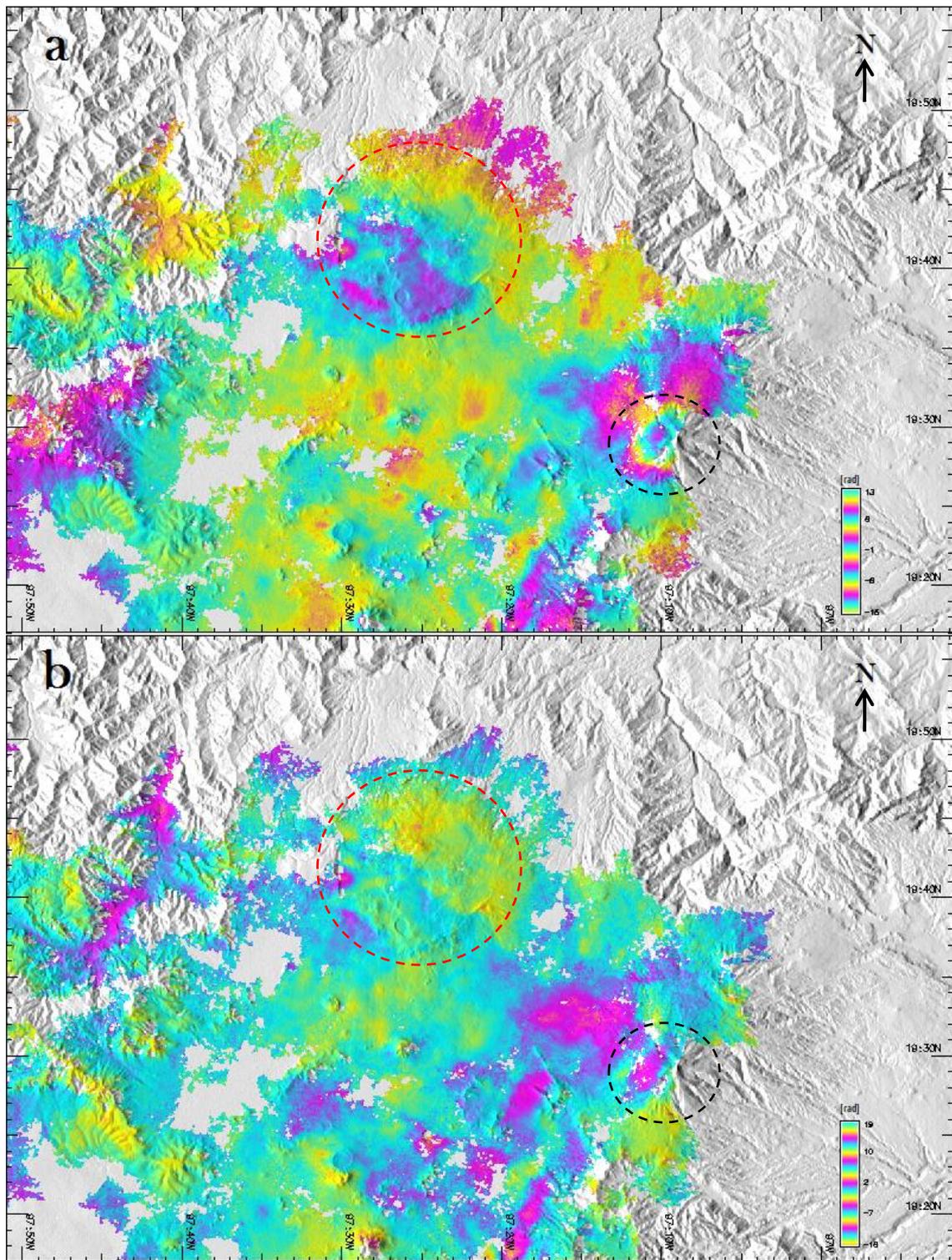


Fig. 6.9 Interferogramas que corresponden a las fechas 20030826-20040113, a) interferograma sin corrección atmosférica verticalmente estratificada; b) interferograma después de haber aplicado el algoritmo de corrección. La caldera es indicada con una circunferencia en línea roja discontinua y el Cofre de Perote con una circunferencia en línea discontinua negra.

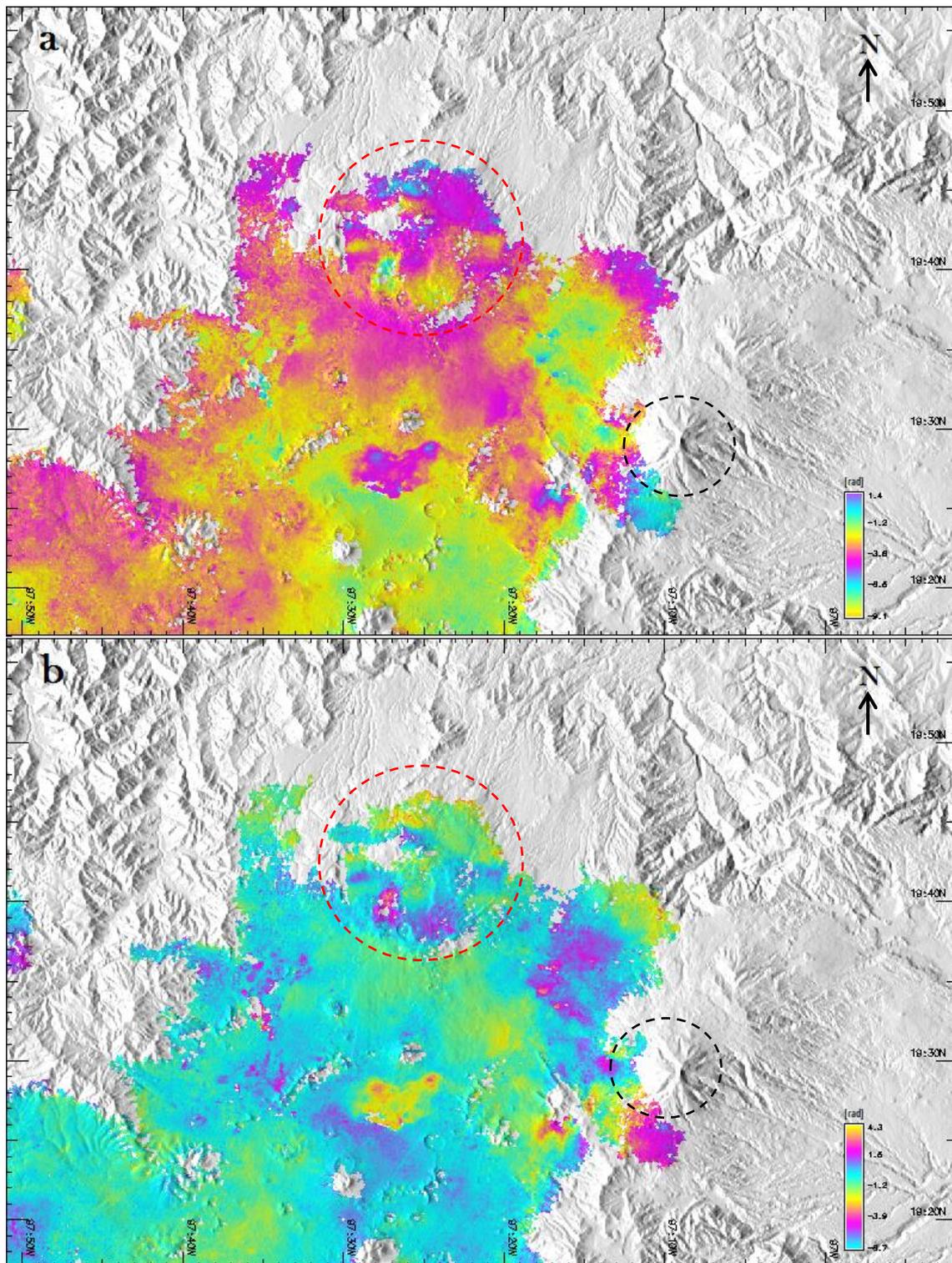


Fig. 6.10 Interferogramas que corresponden a las fechas 20070102-20070206, a) interferograma sin corrección atmosférica verticalmente estratificada; b) interferograma después de haber aplicado el algoritmo de corrección. La caldera es indicada con una circunferencia en línea roja discontinua y el Cofre de Perote con una circunferencia en línea discontinua negra.

Capítulo 7

Conclusiones, perspectivas y recomendaciones

7.1 Conclusiones

Después de haber aplicado Interferometría de SAR (InSAR) y explorado los datos disponibles sobre la caldera de Los Humeros, pudimos darnos cuenta que a pesar de ser una técnica que resulta útil en el monitoreo de vastas áreas de la superficie terrestre, debido a su alta resolución espacial y temporal, el éxito de aplicar InSAR sobre alguna zona de estudio está en función de varios factores como: los insumos, la metodología seleccionada, el procesamiento y post procesamiento y, en gran medida, de las condiciones de la zona monitoreada (e.g., las condiciones atmosféricas, la vegetación y la topografía).

Entonces:

Los pares interferométricos de la caldera de Los Humeros se ven afectados por la pérdida de correlación debida, principalmente, a la vegetación presente en la zona y la distancia entre órbitas al momento de la adquisición de las imágenes, claramente se veían afectados los interferogramas con una línea base temporal mayor a los 70 días. Por otro lado, la cercanía de la caldera a la costa del Golfo de México, es la responsable de la presencia continua de contribución atmosférica de tipo turbulento. Finalmente, la topografía de la zona, es responsable de la contribución atmosférica, correlacionada con la elevación; además que la caldera presenta una distribución topográfica abrupta, la cual afecta a los datos SAR.

Definitivamente el gran reto de procesar los interferogramas de la caldera de Los Humeros fue la contribución atmosférica. Sólo 2 de 34 interferogramas pudieron ser rescatados, después de seleccionar aquellos con mejor correlación y corregidos por atmósfera verticalmente estratificada. Sin embargo, no pudieron compararse a nivel de patrones de deformación similares, por representar periodos de tiempo muy distintos. Además, no fue posible concluir a partir de sus señales pues, la posibilidad de que presentaran residuos atmosféricos, y de otro tipo, estaba presente.

7.2 Perspectivas y recomendaciones

Con respecto a la contribución atmosférica, sería recomendable aplicar una metodología que utilice datos ajenos a los interferogramas y permita estimar de mejor manera dicha contribución. Lo anterior puede lograrse a partir de datos de satélites como MODIS y MERIS, modelando con mayor precisión las variaciones laterales y verticales de la atmósfera, siempre y cuando los datos coincidan con las fechas de los interferogramas (Doin *et al.*, 2009).

Por otro lado, respecto de la metodología de procesamiento, sería interesante probar los algoritmos que existen para generar series de tiempo, que mejoran el procesamiento en el cálculo de interferogramas (aumentan la calidad de las correcciones), tal como es el caso de N-SBAS (New-SBAS) (López-Quiroz *et al.*, 2009; Doin *et al.*, 2011). Por lo que, la totalidad de los datos y su redundancia, podrán ser explotadas para obtener medidas de la deformación confiables (López-Quiroz *et al.*, 2009; Hooper *et al.*, 2010 & Ferretti *et al.*, 2001).

Con respecto a los insumos requeridos para el procesamiento, para el caso de la corrección topográfica, estudiar la factibilidad de usar algún otro DEM con mayor resolución espacial y precisión vertical, como lo es un producto de la misión SRTM con resolución de 1arc-sec (30m aproximadamente) o uno proveniente de ASTER. Lo anterior, disminuirá los residuales topográficos y mejorará la resolución espacial final de los resultados.

Estudiar la factibilidad de utilizar imágenes SAR provenientes de otras misiones como TerraSAR-X, ALOS-PALSAR, CosmoSkyMed y Sentinel-1A. Algunas de ellas tienen mayor resolución espacial y otras penetran mejor la vegetación, por ejemplo; sin embargo, esto último se debe a una longitud de onda más grande, lo cual también puede constituir un problema si la magnitud de nuestra deformación es pequeña.

Referencias

Agram, P. S., Jolivet, R., Riel, B., Lin, Y. N., Simons, M., Hetland, E. & Lasserre, C. (2013). New radar interferometric time series analysis toolbox released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 94(7), 69-70.

Agudo, M., Biescas, E., Monserrat, O., Martínez, J., Crosetto, M., & Herrera, G. (2003). ¿Cómo medir deformaciones del terreno con teledetección radar?. 6^a Semana de Geomática, Barcelona-España.

Antayhua-Vera Y. T. (2007). Sismicidad en el campo geotérmico de Los Humeros-Puebla (1997-2004), su relación con los pozos y la tectónica local. (Tesis de Maestría en Ciencias, Cd. de México, Instituto de Geofísica UNAM).

Ávila-Olivera J. A. (2010). Evolución de los procesos de subsidencia-creep-falla, casos: Morelia, Michoacán y Celaya, Gto. (Tesis Doctoral en Ciencias, Cd. de México, Instituto de Geofísica UNAM).

Berardino , P. , G. Fornaro , R. Lanari , and E. Sansosti. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 40 (11), 2375 – 2383.

Berrino, G., Rymer, H., Brown, G.C., Corado, C. (1992). Gravity-height correlations for unrest at calderas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 53, 11–26.

BEST ESA (European Space Agency):

<https://earth.esa.int/web/guest/software-tools/-/article/basic-envisat-sar-toolbox-1649>

Brunori, C.A., Bignami, C., Stramondo, S., Bustos, E. (2013). 20 years of active deformation on volcano caldera: joint analysis of InSAR and AInSAR techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 23, 279–287.

Calderón-Velázquez M. C. & Fuentes-Peralta T. de Recursos Minerales, C. (1999). Monografía Geológica-Minera del Estado de Puebla. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.

Campos-Enriquez, J. O., & Arredondo-Fragoso, J. J. (1992). Gravity study of Los Humeros caldera complex, Mexico: Structure and associated geothermal system. *Journal of volcanology and geothermal research*, 49(1), 69-90.

Carrasco-Núñez G. (2000). Structure and proximal stratigraphy of Citlaltépetl volcano (Pico de Orizaba) Mexico. *Geological Society of America Special Paper* 334.

Carrasco-Núñez G., Siebert L., Díaz-Castellón R., Vázquez-Selem L., Capra L. (2009). Evolution and hazards of a long- quiescent compound shield-like volcano: Cofre de Perote, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*

Carrasco-Núñez G., Arzate J., Bernal J. P., Carrera J., Cedillo F., Dávila-Harris P., Hernández J., Hurwitz S., Lermo J., Levresse J., López-Quiroz P., Manea V., Norini G., Santoyo E. & Willcox C. (2015). A new geothermal exploration program at Los Humeros volcanic and geothermal field (Eastern Mexican Volcanic Belt). *Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.*

Cavalié, O., Doin, M.P., Lasserre, C., Briole, P., (2007). Ground motion measurement in the Lake Mead area, Nevada, by differential synthetic aperture radar interferometry time series analysis: Probing the lithosphere rheological structure. *Journal of Geophysical Research* 112, B03403. doi:10.1029/2006JB004344.

Chandra, A. M., & Ghosh, S. K. (2006). Remote sensing and geographical information system. *Alpha Science Int'l Ltd.* P.25

D'Iorio, M., Budkewitch A, P., Mahmood, N.N., (1997). Practical considerations for geological investigations using RADARSAT-1 stereo image pairs in tropical environments. *GER'97.* 8 p.

Dávila-Harris, P., & Carrasco-Núñez, G. (2014). An unusual syn-eruptive bimodal eruption: The Holocene Cuicuiltic Member at Los Humeros caldera, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 271, 24-42.

Dávila-Hernández, N. A. (2011). Modelo de segmentación de depósitos volcánicos superficiales en el Volcán de Colima, México utilizando imágenes ópticas (Terra/Aster y Spot 5) y de radar de alta resolución (TerraSAR-X). (Tesis Doctoral en Ciencias de la Tierra, Cd. de México, Instituto de Geofísica UNAM).

DIAPASON:

<http://www.altamira-information.com/html/1-18215-InSAR-Software-Training.php>

Delacourt, C., Briole, P., Achache, A. (1998). Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography. Application to Etna. *Geophys. Res. Lett.* 25, 2849–2852.

Díaz-Castellón R. (2009). Análisis de las condiciones estructurales de estabilidad en el volcán Cofre de Perote. (Tesis Doctoral, Cd. de México, Instituto de Geología UNAM).

Doin, M. P., Guillaso, S., Jolivet, R., Lasserre, C., Lodge, F., Ducret, G., & Grandin, R. (2011). Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: the Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data. In *Proceedings of the European Space Agency Symposium “Fringe”*. Frascati, Italy.

Doin, M. P., Lasserre, C., Peltzer, G., Cavalié, O., & Doubre, C. (2009). Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 35-50.

DORIS:

<http://doris.tudelft.nl/>

Dragani, R., Abdalla, S., Engelen, R. J., Inness, A., & Thépaut, J. N. (2014). Ten years of ENVISAT observations at ECMWF: A review of activities and lessons learnt. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*.

Dubbock PA, Spoto F, Simpson J, Spencer D, Schutte E, Sontag H. 2001. The ENVISAT satellite and its integration. *ESA Bull.* 106: 26–45.

Elliott, J.R., Biggs, J., Parsons, B., Wright, T.J. (2008). InSAR slip rate determination on the Altyn Tagh Fault, northern Tibet, in the presence of topographically correlated atmospheric delays. *Geophys. Res. Lett.* 35 (L12309). doi:10.1029/2008GL033659.

European Space Agency (ESA). (2001): http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Envisat/Europe_s_Environment_Satellite

European Space Agency (ESA). 2014:

http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEMXM3E3GXF_0.html

Farr, T.G., Kobrick, M. (2000). Shuttle Radar Topography Mission produces a wealth of data. *American Geophysical Union EOS* 81, 583–585.

Ferretti A., Massonet D., Monti Guarnieri A., Prati C., Rocca F. (2007). *InSAR Principles - Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. ESA TM-19.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39 (1), 8–20.

Ferriz, H., Mahood, G. (1984). Eruption rates and compositional trends at Los Hornos volcanic center, Puebla, Mexico. *J. Geophys. Res.—Earth* 89, 8511–8524.

Ferriz, H., & Mahood, G. A. (1986). Volcanismo riolitico en el eje neo volcanico mexicano. *Geofísica Internacional*, 25(1).

Fu, L. L., & Holt, B. (1982). Seasat views oceans and sea ice with synthetic aperture radar.

Flores-Lorenzo, P., & Alcántara-Ayala, I. (2002). Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla. *Investigaciones geográficas*, (49), 7-26.

GAMMA:

<http://www.gamma-rs.ch/>

Geyer, A., Martí, J. (2009). Stress fields controlling the formation of nested and overlapping calderas: implications for the understanding of caldera unrest. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 181, 185–195.

Global Volcanism Program, 2012. Report on Mauna Loa (United States). In: Wunderman, R (ed.), *Bulletin of the Global Volcanism Network*, 37:5. Smithsonian Institution. <http://dx.doi.org/10.5479/si.GVP.BGVN201205-332020>.

Goldstein, R. M., Werner, C. L. (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25, 21, 4035–4038.

Goldstein, R. M., Zebker, H. A. & Werner, C. L. (1988). Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23, 4, 713-720.

González-Méndez P. J. (2010). Medida y caracterización de deformaciones usando técnicas geodésicas y de teledetección. Aplicación en volcanología y sismotectónica. (Tesis Doctoral en Ciencias, Madrid-España, Facultad de Ciencias Matemáticas: Departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica, Universidad Complutense de Madrid).

González-Mercado, G. E. (2005). El vulcanismo monogenético de la región de Xapala, Veracruz. Geomorfología, petrología y génesis. (Tesis de Maestría en Ciencias, Cd. de México, Instituto de Geología UNAM).

Gurrola, E., P. Rosen, G. Sacco, W. Szeliga, H. Zebker, M. Simons, D. Sandwell, P. Shanker, C. Wortham, and A. Chen (2010). "InSAR Scientific Computing Environment". 2010 American Geophysical Union Meeting.

Gutiérrez-Negrín, L.C.A. & Quijano-León, J. L. (2005). Update of geothermics in Mexico. Proceedings of the World Geothermal Congress 2005, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.

Hanssen, R. F. (2001). Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2). Springer. P. 9,10,11.

Hernández-Jaramillo, S. I. (2012). Análisis de series temporales de la subsidencia en cuencas en el centro de México obtenidas a partir de interferometría de radar de apertura sintética (InSAR): caso Morelia. (Tesis de Maestría en Ciencias, Cd. de México, Instituto de Geofísica UNAM).

Hetland , E. A. , P. Muse , M. Simons , Y. N. Lin , P. S. Agram , and C. J. DiCaprio. (2012). Multiscale InSAR Time Series (MInTS) analysis of surface deformation. *J. Geophys. Res.*, 117, B02404, doi: 10.1029/2011JB008731.

Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B. (2004). A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical research letters*, 31(23).

Hooper, A., Segall, P., Zebker, H. (2007). Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research* 112, B07407.

Hooper, A. (2008). A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches. *Geophysical Research Letter*, 35(16).

Hooper, A., Spaans, K., Bekaert, D., Cuenca, M. C., Arkan, M., & Oyen, A. (2010). *StaMPS/MTI Manual*. Delft University of Technology.

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., & Arkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514, 1-13.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2000). *Síntesis Geográfica del Estado de Puebla*.

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) (2014) página web:

<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/pue/territorio/clima.aspx?tema=me&e=2>

Lee, J. S., & Pottier, E. (2009). *Polarimetric radar imaging: from basics to applications*. CRC press. P. 440.

Lermo, J., Antayhua, Y., Quintanar, L., & Lorenzo, C. (2008). Estudio sísmológico del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, México. Parte I: Sismicidad, mecanismos de fuente y distribución de esfuerzos. *GEOTERMIA*, 25.

Li, Z., Muller, J.P., Cross, P., Fielding, E.J. (2005). Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS and Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration. *J. Geophys. Res.* 110 (D20), 4651. doi:10.1029/2004JB003446.

Li, Z., Cross, P., Cross, P., Albert, P., Fischer, J., Bennartz, R. (2006a). Assessment of the potential of meris near-infrared water vapour products to correct ASAR interferometric measurements. *International Journal of Remote Sensing* 33. doi:10.1029/2005GL025299.

Li, Z., Fielding, E.J., Cross, P., Muller, J.P., (2006b). Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: GPS topography-dependent turbulence model. *J. Geophys. Res.* 111, B02404. doi:10.1029/2005JB003711.

Li, Z., Fielding, E.J., Cross, P., Muller, J.P. (2006c). Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction: medium resolution imaging spectrometer and advanced synthetic aperture radar integration. *Geophys. Res. Lett.* 33. doi:10.1029/2005GL025299.

Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W., (1987). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Wiley, New York.

Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2004). *Remote sensing and image interpretation* (No. Ed. 5). John Wiley & Sons Ltd. P.4

López-Quiroz, P. (2008). *Séries temporelles de la subsidence de la ville de Mexico obtenues par interférométrie radar* (Doctoral dissertation, Paris, ENST).

López-Quiroz, P., Doin, M. P., Tupin, F., Briole, P., & Nicolas, J. M. (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69(1), 1-15.

Lu, Z., & Dzurisin, D. (2014). InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes. In *InSAR Imaging of Aleutian Volcanoes* (pp. 87-345). Springer Berlin Heidelberg.

Maître, H. (Ed.). (2008). *Processing of Synthetic Aperture Radar Images* (Vol. 27). John Wiley & Sons.

Massonnet, D. (1997). Satellite radar interferometry. *Scientific American*, 276(2), 46-53.

Massonnet, D., & Feigl, K. L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of geophysics*, 36(4), 441-500.

Marchionni, D. S., & Cavayas, F. (2014). La teledetección por radar como fuente de información litológica y estructural. *Análisis espacial de imágenes SAR de RADARSAT-1*. *Geoacta*, 39(1).

National Aeronautics and Space Administration (NASA). 2014 : http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/text_passive_active.html#.U7xCyZR5O86

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2014: <http://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>

Neri, M., Casu, F., Acocella, V., Solaro, G., Pepe, S., Berardino, P., & Lanari, R. (2009). Deformation and eruptions at Mt. Etna (Italy): A lesson from 15 years of observations. *Geophysical Research Letters*, 36(2).

NEST European Space Agency (ESA):

<http://nest.array.ca/web/nest>

Neteler, M., & Mitasova, H. (2004). *Open source GIS: a GRASS GIS approach* (Vol. 2). New York: Springer. Pp. 287-288.

Newhall, C.G., Dzurisin, D. (1988). Historical unrest at large calderas of the world. *U.S. Geological Survey Bulletin* 97 (5), 1109.

Perissin, D., Ferretti, A. (2007). Urban-target recognition by means of repeated spaceborne SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45 (12). 4043–4058.

Pritchard, M. E., & Simons, M. (2004). An InSAR-based survey of volcanic deformation in the southern Andes. *Geophysical Research Letters*, 31(15).

Pritchard Matthew E. (2014). Open-source software for geodetic imaging: ROI_PAC for InSAR and pixel tracking. http://www.geo.cornell.edu/eas/PeoplePlaces/Faculty/matt/pub/winsar/InSAR_textbook_for_web_2014.pdf

Proh-Ledesma, R. M., Alcántara, A., & Chávez, M. (1993). Exploración geotérmica utilizando imágenes de satélite en Los Humeros, Puebla, México. *Geofísica Internacional*, 32, 99-109.

Purkis, S. J., & Klemas, V. V. (2011). *Remote sensing and global environmental change*. John Wiley & Sons P. 6.

Remy, D., Bonvalot, S., Briole, P., Murakami, M. (2003). Accurate measurement of tropospheric effects in volcanic areas from SAR interferometry data: application to Sakurajima volcano (Japan). *Earth Planet Sci. Lett.* 213, 299–310.

Richards, J. A. (2009). *Remote sensing with imaging radar* (Vol. 1). Berlin, Heidelberg: Springer.

Rodríguez-Vargas, J. L., Carrasco-Núñez, G., Díaz-Castellón, R. (2006). Depósitos de avalancha recientes del volcán cofre de Perote, Veracruz, México. *GEOS*, v. 26., 215pp.

Rodríguez-Vargas, J. L. (2010). Edad y caracterización sedimentológica de los depósitos recientes de avalancha y flujo de escombros del volcán Cofre de Perote, Veracruz, México. (Tesis de Maestría en Ciencias, Campus Juriquilla, Centro de Geociencias UNAM).

Rosen, P., Hensley, S., Joughin, I., Li, F., Madsen, S., Rodriguez, E., Goldstein, R. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE* 88 (3), 333–382.

Rosen, P. A, Hensley, S., Peltzer, G., & Simons, M. (2004). Update repeat orbit interferometry package released. *EOS. Transactions AGU*. 85, 5, 47.

Rosen, P. et al. (2009). “InSAR Scientific Computing Environment”. 2009 American Geophysical Union Meeting. Also presented a summary of InSAR SCE and progress at the WinSAR meeting at Fall AGU 2009.

Sandwell, D., R. Mellors, X. Tong, M. Wei, and P. Wessel (2011). Open radar interferometry software for mapping surface deformation, *Eos Trans. AGU*, 92(28), doi:10.1029/2011EO280002.

SARMAP, UNESCO BILKO group, European Space Agency (2009). *SAR-Guidebook Synthetic Aperture Radar and SARscape*.

Sarychikhina, O., Glowacka, E., Suárez Vidal, F., Mellors, R., & Ramírez Hernández, J. (2011a). Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 1-13.

Sarychikhina, O., Glowacka, E., Mellors, R., Vidal, F.S. (2011b). Land subsidence in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, from 1994 to 2005. An integrated analysis of DInSAR, leveling and geological data. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 204 (1-4),76–90.

Scharroo R., & Visser. P. N. A. M. (1998). Precise orbit determination and gravity field improvement for the ERS satellites. *J. Geophys. Res.*, 103(C4) :8113–8127.

Siebert L. & Carrasco-Núñez G. (2002). Late- Pleistocene to precolumbian ventid- the –arc mafic volcanism in the Eastern Mexican Volcanic Belt; implications for future hazards. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 115. p. 179-205.

Skolnik, M. I. (1962), *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokyo.

Soergel, U. (2010). *Radar remote sensing of urban areas (Vol. 15)*. Heidelberg: Springer. Pp. 2-3.

SqueeSAR, Tele-Rilevamento Europa (TRE):
<http://treuropa.com/technique/squeesar>

Strozzi, T., Wegmuller, U., Tosi, L., Bitelli, G. and Spreckel, V., 2001. Land Subsidence Monitoring with Differential SAR Interferometry. *Journal of American Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67, 11, 1261-1270

Taylor, M., Peltzer, G. (2006). Current slip rates on conjugate strike-slip faults in central Tibet using synthetic aperture radar interferometry. *J. Geophys. Res.* 1113 (B12). doi:10.1029/2005JB004014.

Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. (2010). Subsistencia del terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17(3), 295-302.

Toutin, Th., (1999). Error Tracking of Radargrammetric DEM from RADARSAT Images. Special Issue on the 1998 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'98). *Remote Sensing and Managing the Environment. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37 (5): 2227-2238.

Webley, P.W., Bingley, R.M., Dodson, A.H., Wadge, G., Waugh, S.J., James, I.N. (2002). Atmospheric water vapour correction to InSAR surface motion measurements on mountains: results from a dense GPS network on Mount Etna. *Phy. Chem. Earth* 27, 363–370.

Willcox, C.P. (2011). *Eruptive, magmatic and structural evolution of a large explosive caldera volcano, Los Humeros, Central Mexico*. Unp. PhD Thesis University of Leicester, UK.

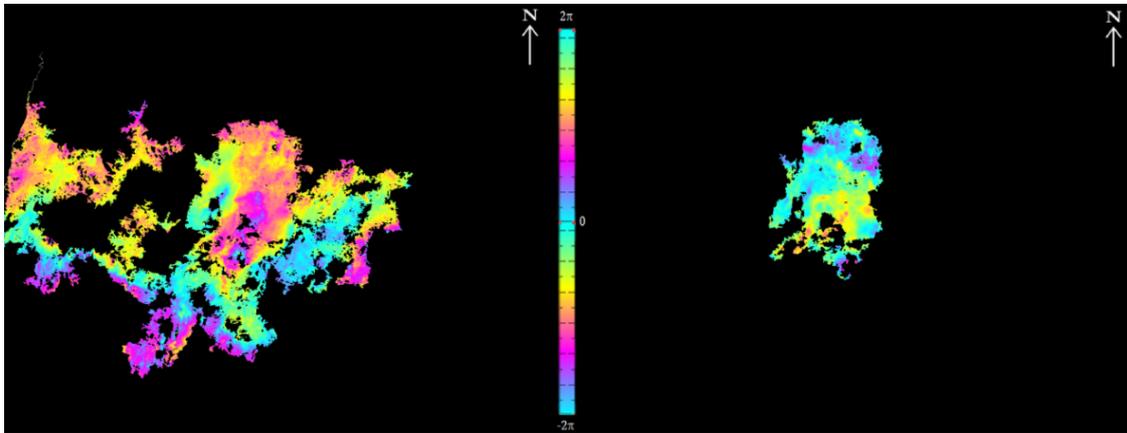
Yáñez, C., García, S. (1982). *Exploración de la región geotérmica Los Humeros–Las Derrumbadas*, 29. Estados de Puebla y Veracruz: CFE, México, p. 98.

Zebker, H. A., Rosen, P. A., & Hensley, S. (1997). Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012), 102(B4), 7547-7563.

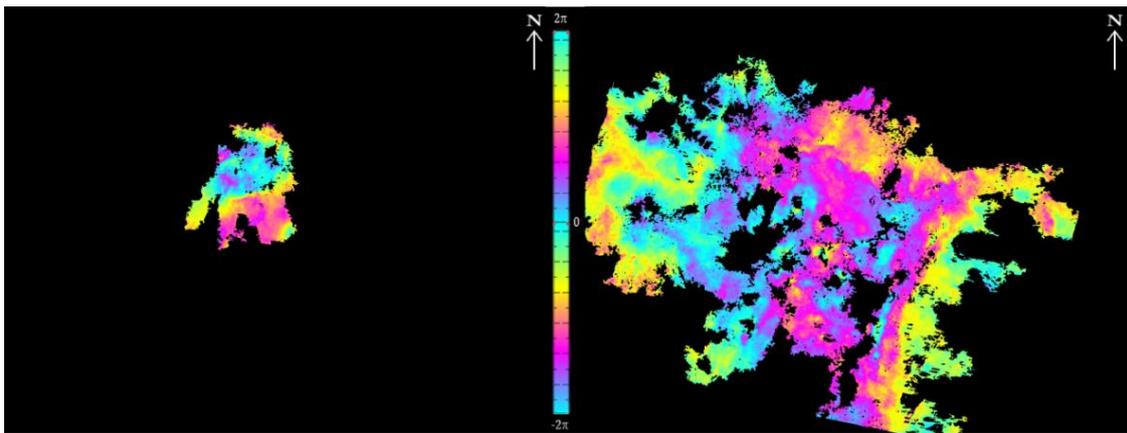
Zebker, H., S. Hensley, P. Shanker, C. Wortham (2010). Geodetically Accurate InSAR Data Processor. *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, 48(12).

Anexo A: Interferogramas

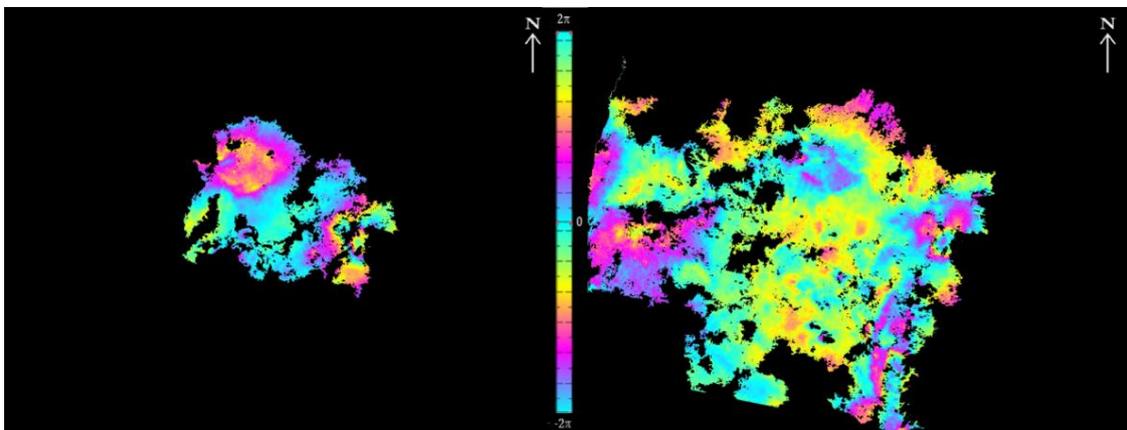
Los pares de fechas o escenas en rojo, fueron considerados para el análisis de fase-elevación, debido a que presentan menor pérdida de la coherencia o señal interferométrica, por lo tanto menor decorrelación.



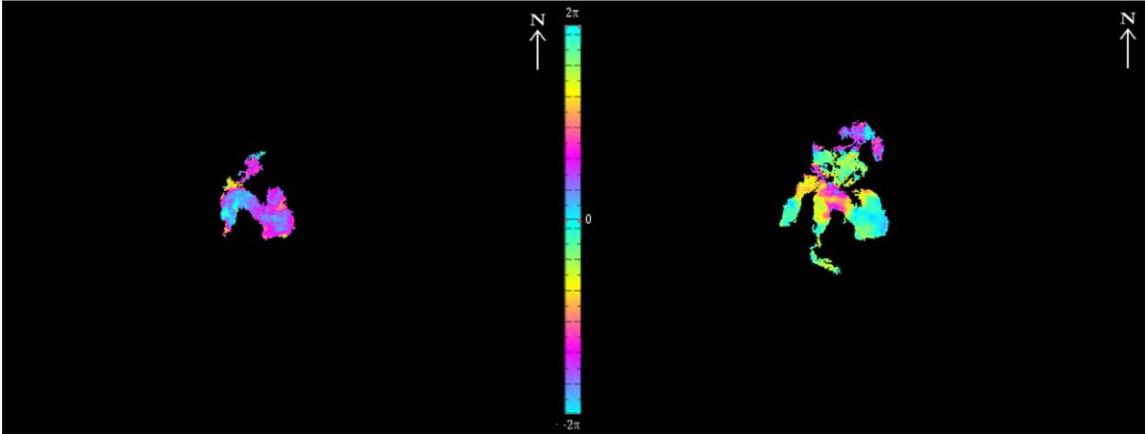
1) 20030408-20030617 $B_{\perp}=156\text{m}$ $B_t=70\text{días}$ 2) 20030408-20030826 $B_{\perp}=155\text{m}$ $B_t=140\text{días}$



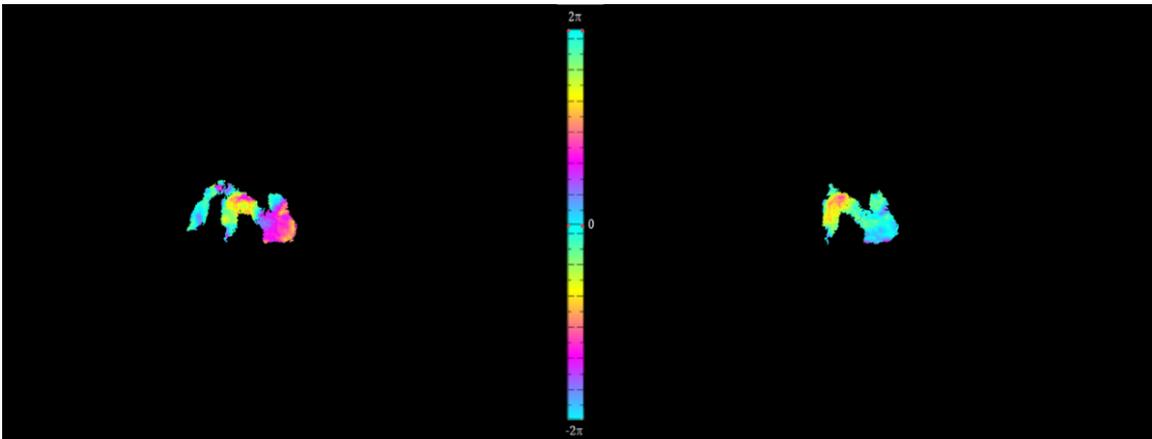
3) 20030408-20040113 $B_{\perp}=168$ $B_t=280\text{días}$ 4) 20030617-20030826 $B_{\perp}=-1\text{m}$ $B_t=70\text{días}$



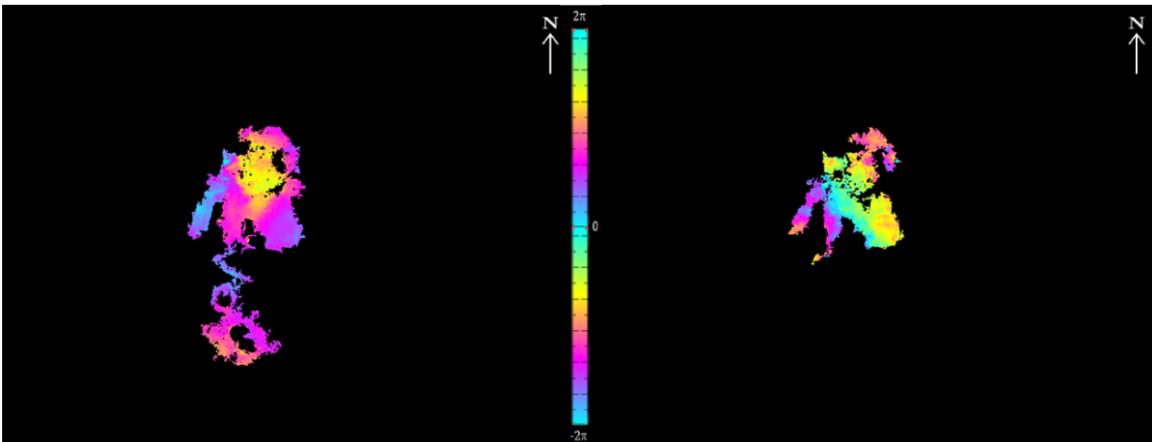
5) 20030617-20040113 $B_{\perp}=12\text{m}$ $B_t=210\text{días}$ 6) 20030826-20040113 $B_{\perp}=13\text{m}$ $B_t=140\text{días}$



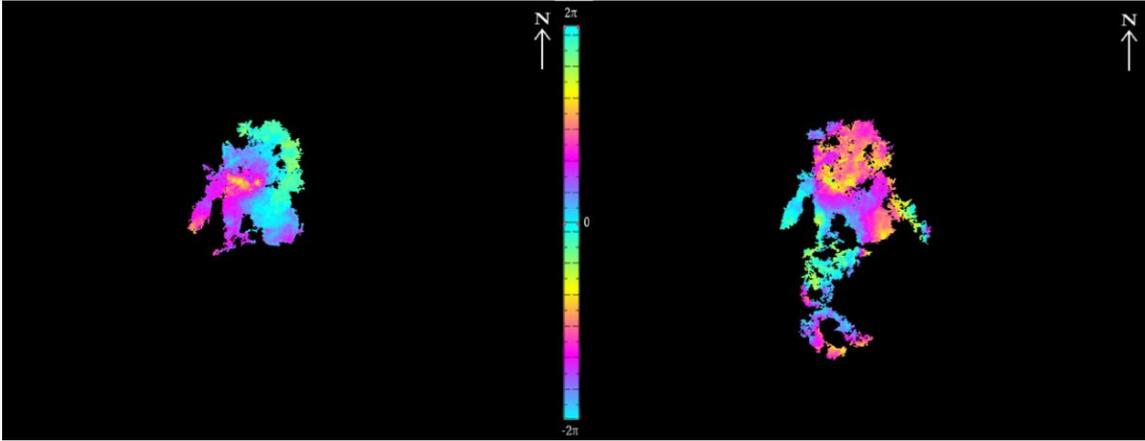
7) 20030826-20040810 $B_{\perp}=-486\text{m}$ $B_t=350\text{días}$ 8) 20031104-20040706 $B_{\perp}=318\text{m}$ $B_t=245\text{días}$



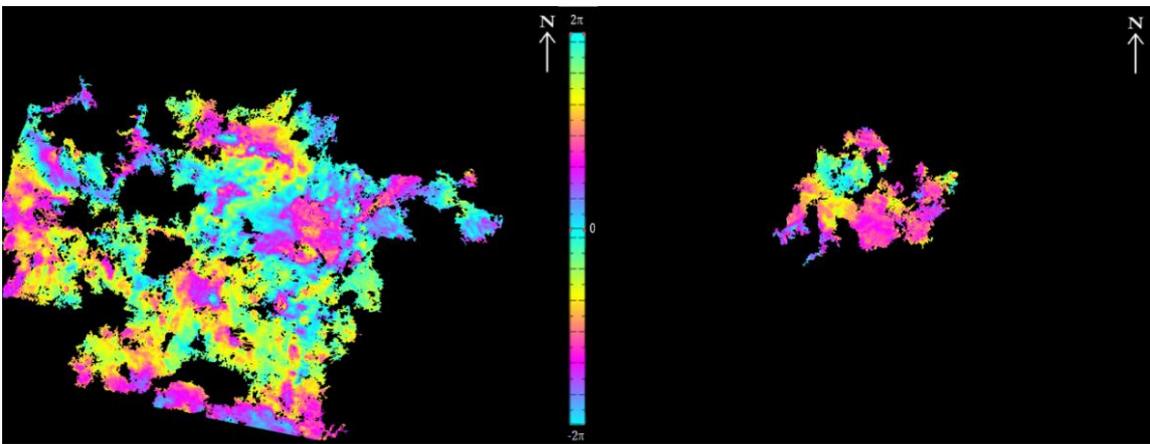
9) 20031104-20040810 $B_{\perp}=412\text{m}$ $B_t=280\text{días}$ 10) 20040113-20040810 $B_{\perp}=-499\text{m}$ $B_t=210\text{días}$



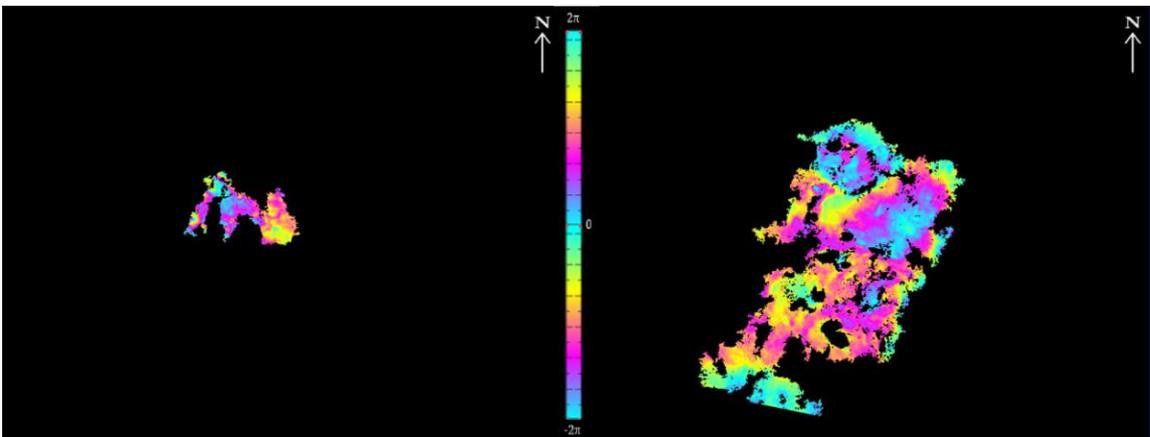
11) 20040113-20041228 $B_{\perp}=-235\text{m}$ $B_t=350\text{días}$ 12) 20040323-20040601 $B_{\perp}=-382\text{m}$ $B_t=70\text{días}$



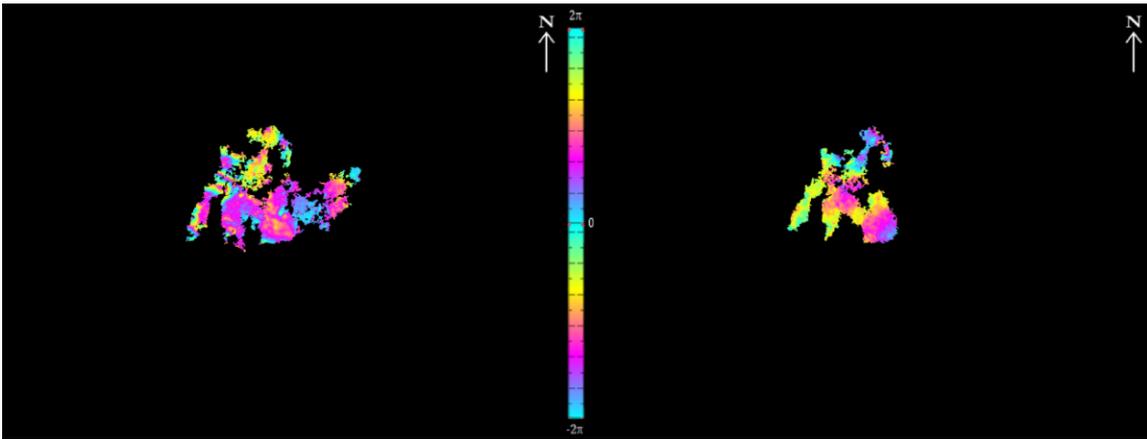
13) 20040323-20041019 $B_{\perp}=-99\text{m}$ $B_t=210\text{días}$ 14) 20040601-20041019 $B_{\perp}=283\text{m}$ $B_t=140\text{días}$



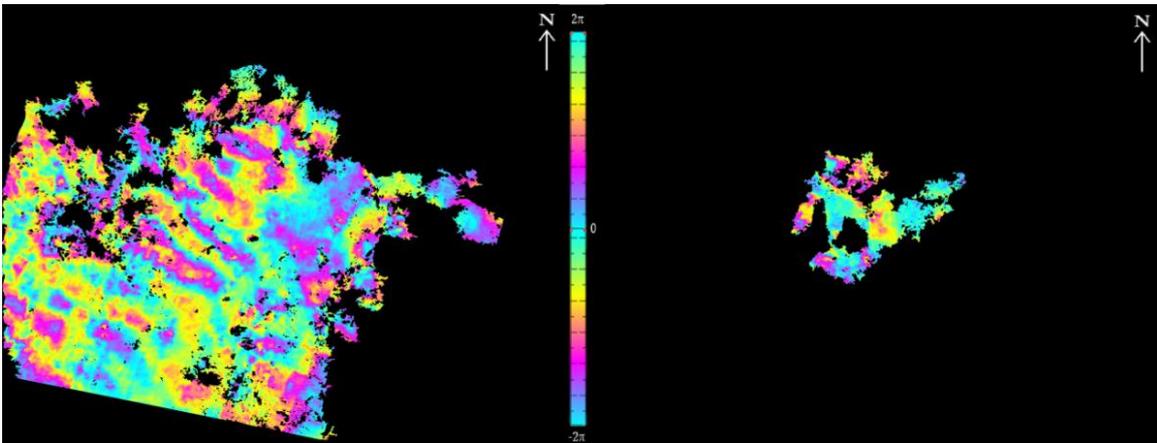
15) 20040706-20040810 $B_{\perp}=94\text{m}$ $B_t=35\text{días}$ 16) 20040706-20041228 $B_{\perp}=358\text{m}$ $B_t=175\text{días}$



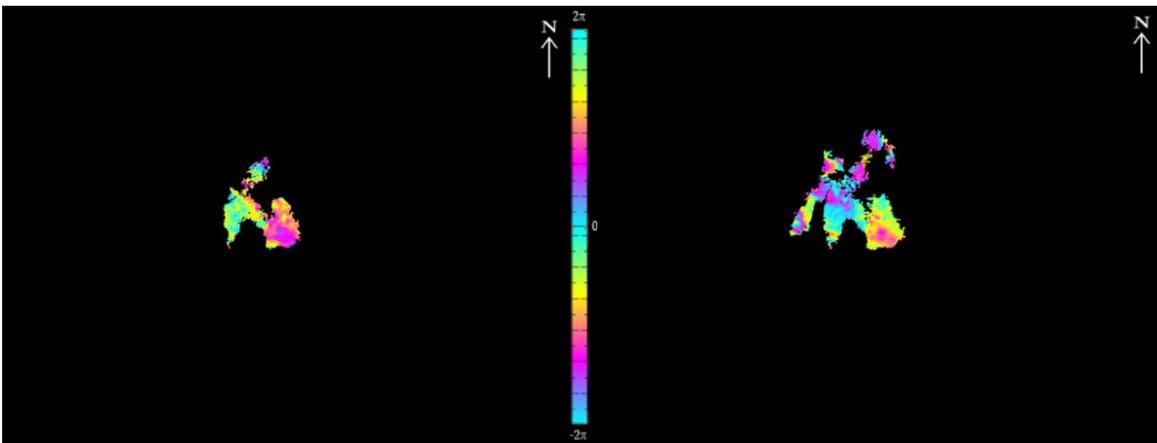
17) 20040706-20050308 $B_{\perp}=458\text{m}$ $B_t=245\text{días}$ 18) 20040810-20041228 $B_{\perp}=264\text{m}$ $B_t=140\text{días}$



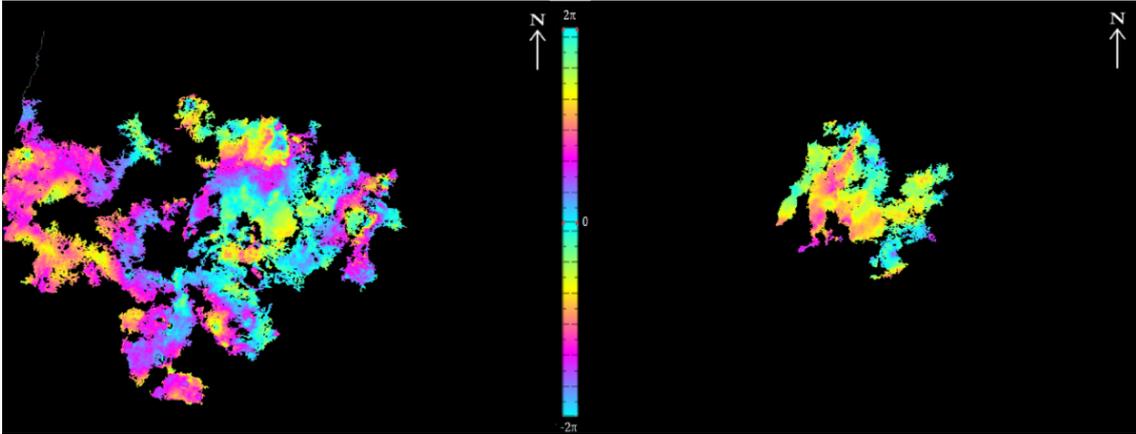
19) 20040810-20050308 $B_{\perp}=364\text{m}$ $B_t=210\text{días}$ 20) 20041019-20050830 $B_{\perp}=-490\text{m}$ $B_t=315\text{días}$



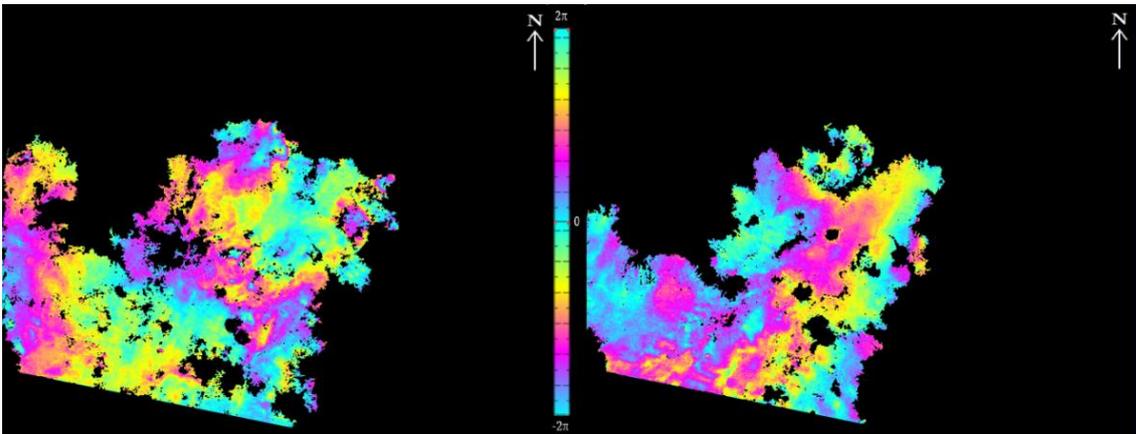
21) 20041228-20050308 $B_{\perp}=100\text{m}$ $B_t=70\text{días}$ 22) 20050308-20050621 $B_{\perp}=451\text{m}$ $B_t=105\text{días}$



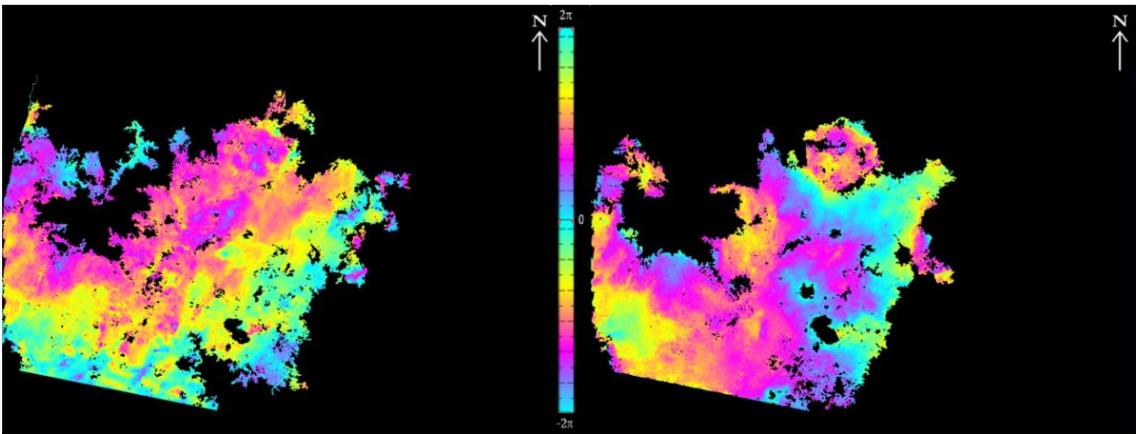
23) 20050308-20050830 $B_{\perp}=483\text{m}$ $B_t=175\text{días}$ 24) 20050308-20060221 $B_{\perp}=-395\text{m}$ $B_t=350\text{días}$



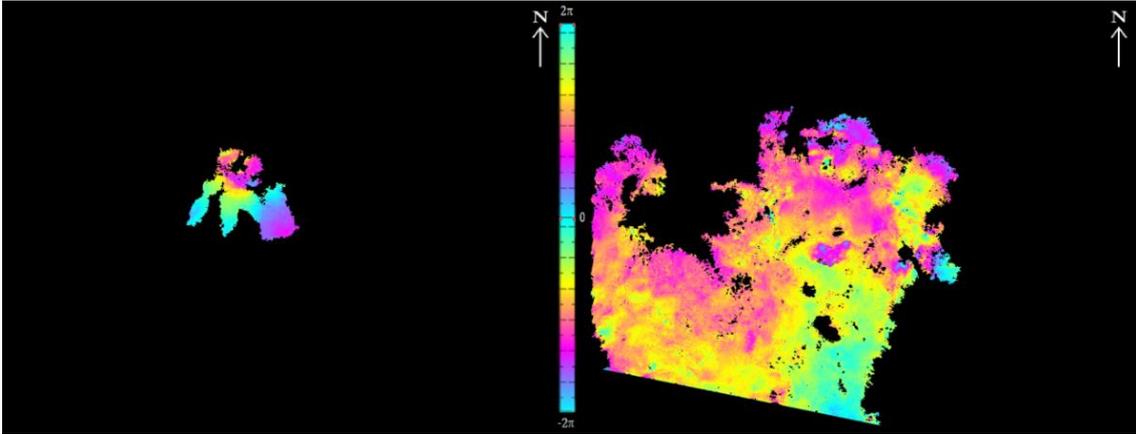
25) 20050621-20050830 $B_{\perp}=32\text{m}$ $B_t=70\text{días}$ 26) 20050621-20051108 $B_{\perp}=245\text{m}$ $B_t=140\text{días}$



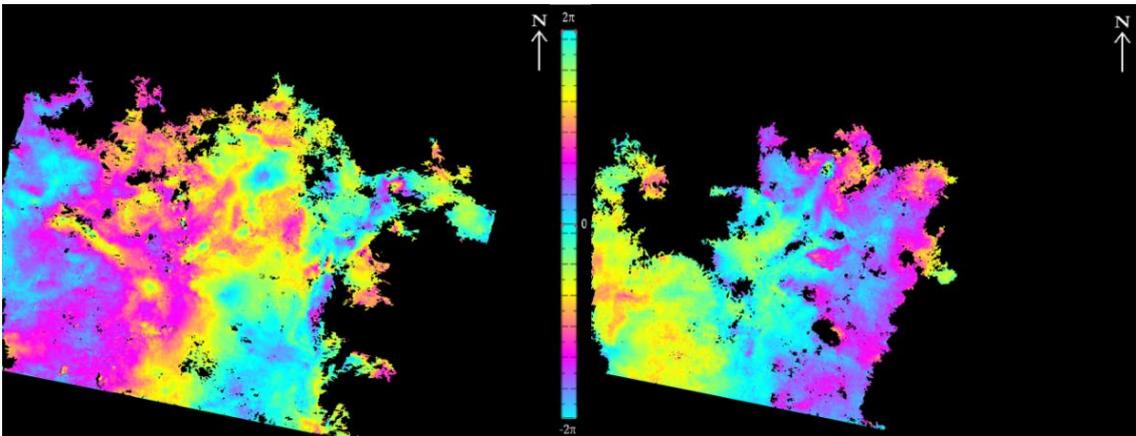
27) 20050830-20051108 $B_{\perp}=213\text{m}$ $B_t=70\text{días}$ 28) 20060117-20060221 $B_{\perp}=486\text{m}$ $B_t=35\text{días}$



29) 20060117-20060328 $B_{\perp}=222\text{m}$ $B_t=70\text{días}$ 30) 20060221-20060328 $B_{\perp}=-264\text{m}$ $B_t=35\text{días}$



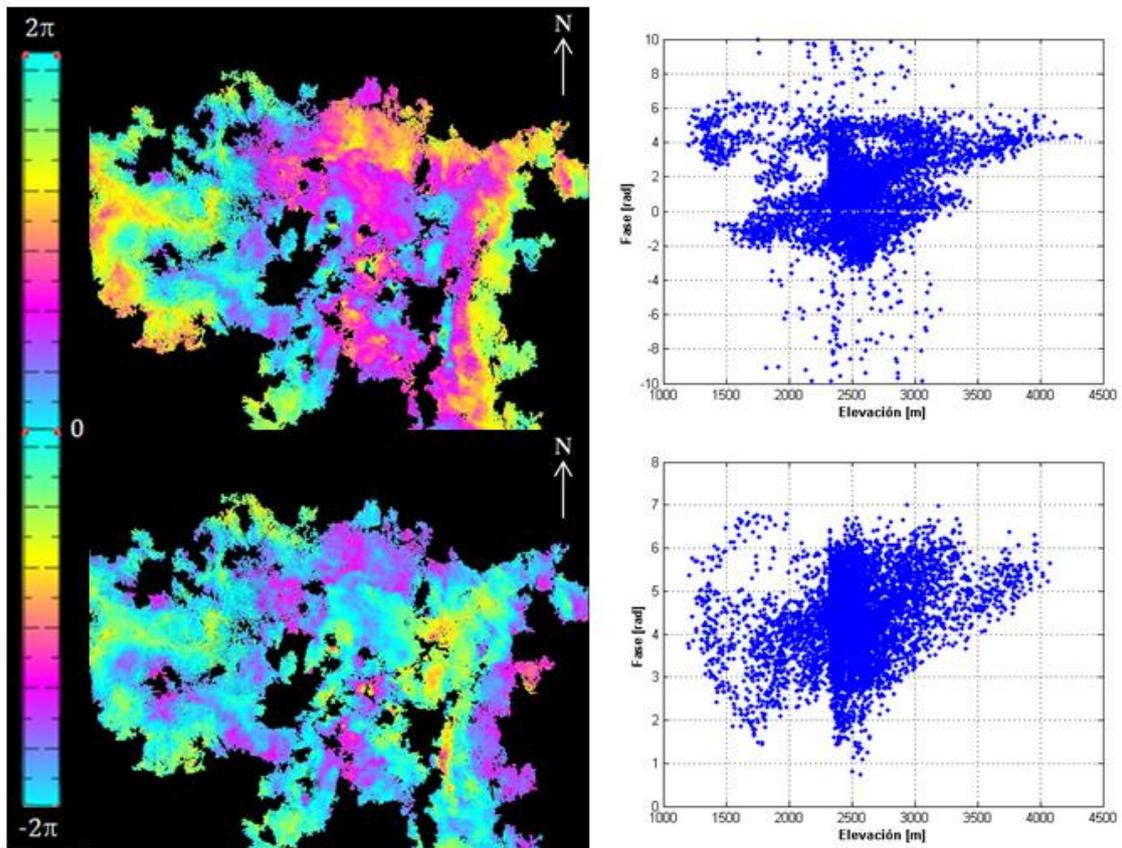
31) 20060221-20070206 $B_{\perp}=341\text{m}$ $B_t=350\text{días}$ 32) 20070102-20070206 $B_{\perp}=-255\text{m}$ $B_t=35\text{días}$



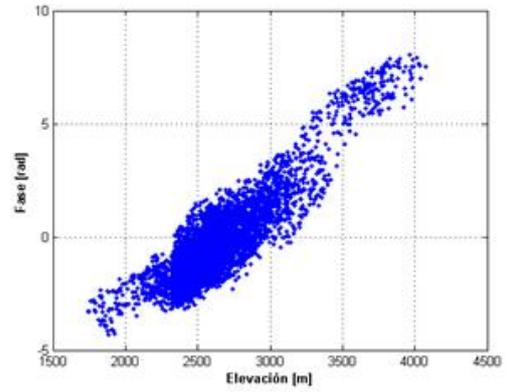
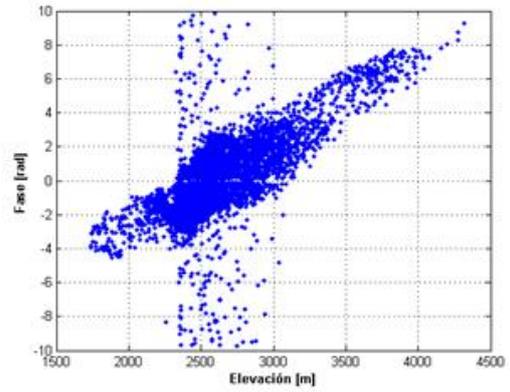
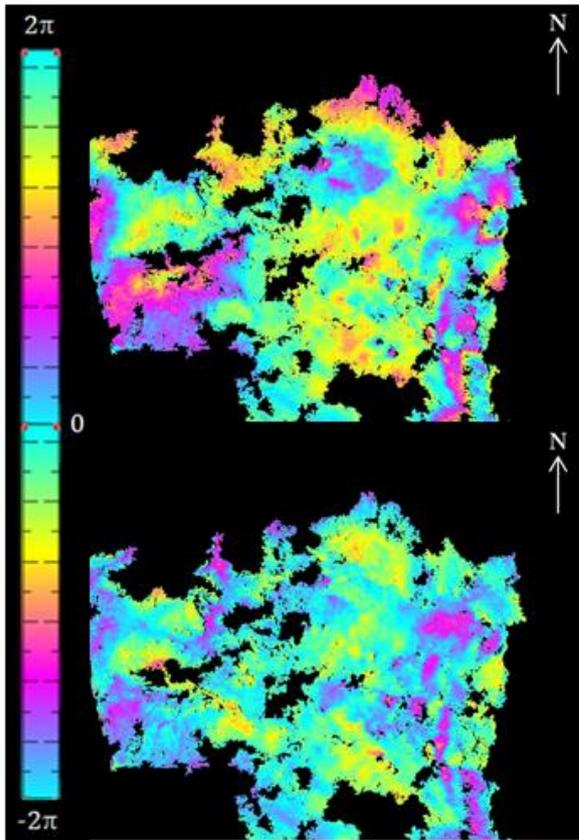
33) 20070102-20070313 $B_{\perp}=27\text{m}$ $B_t=70\text{días}$ 34) 20070206-20070313 $B_{\perp}=282\text{m}$ $B_t=35\text{días}$

Anexo B: Interferogramas con corrección de fase atmosférica y plots de fase-elevación

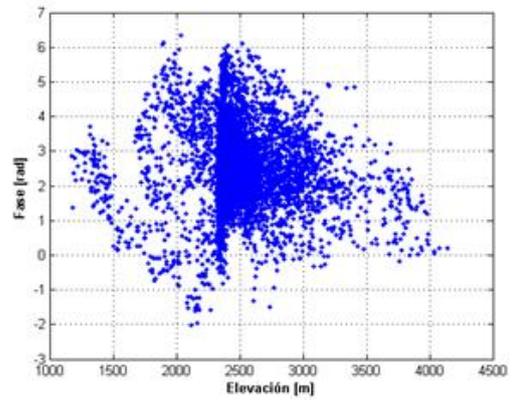
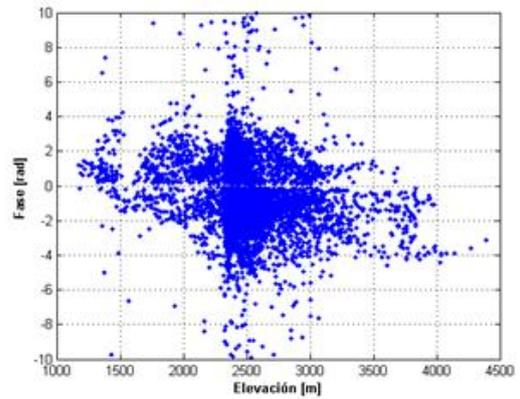
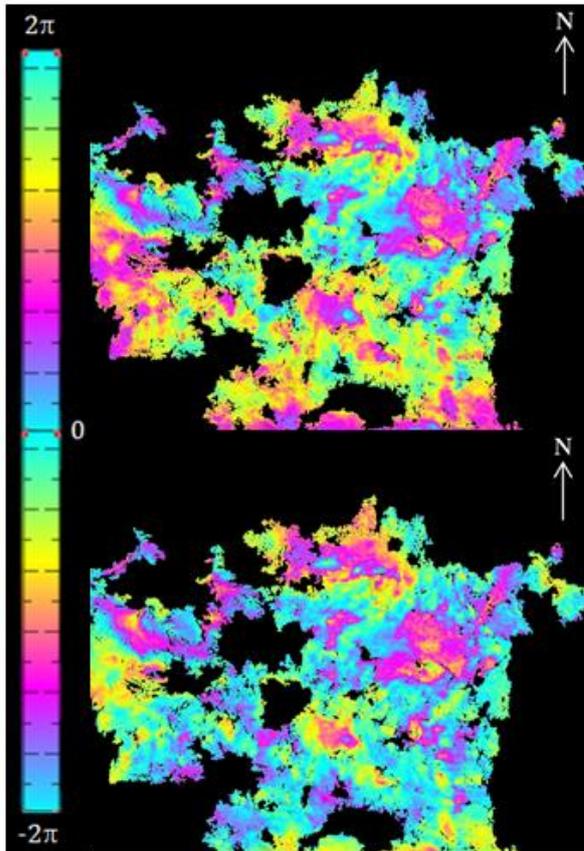
A continuación se presentan los interferogramas que fueron analizados en este trabajo con su corrección de contribución atmosférica y sus respectivos plots de fase-elevación, el interferograma y plot superior corresponden a la información aun con fase atmosférica y el interferograma y plot inferior corresponden a la información después haber realizado la corrección de contribución atmosférica.



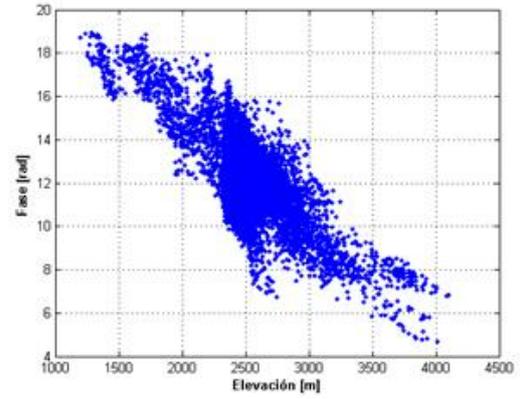
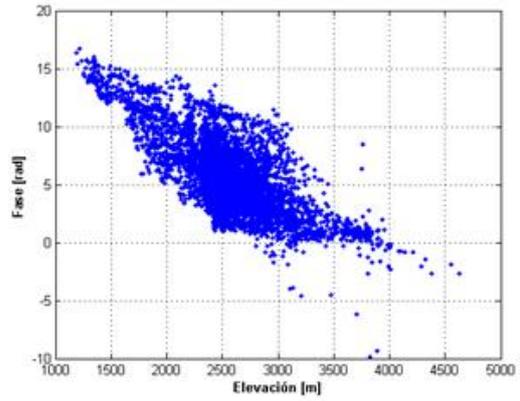
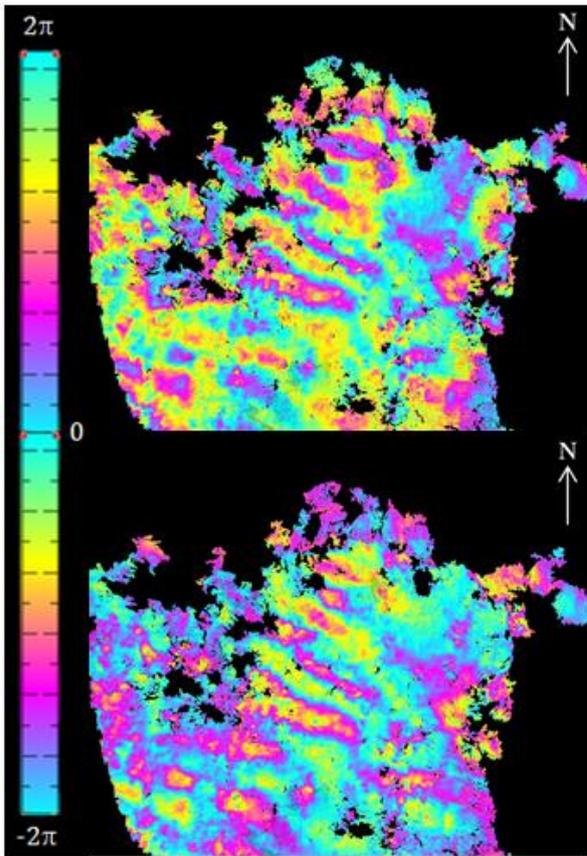
1) 20030617-20030826 $B_{\perp} = -1\text{m}$ $B_t = 70\text{días}$



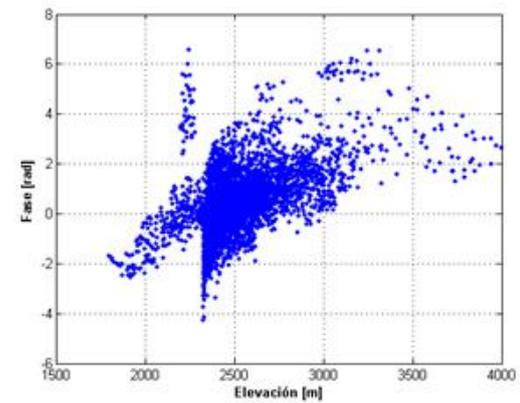
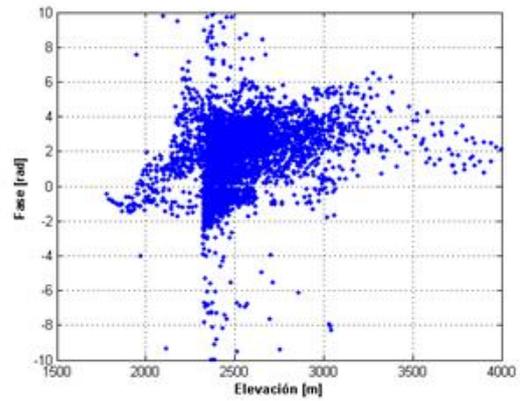
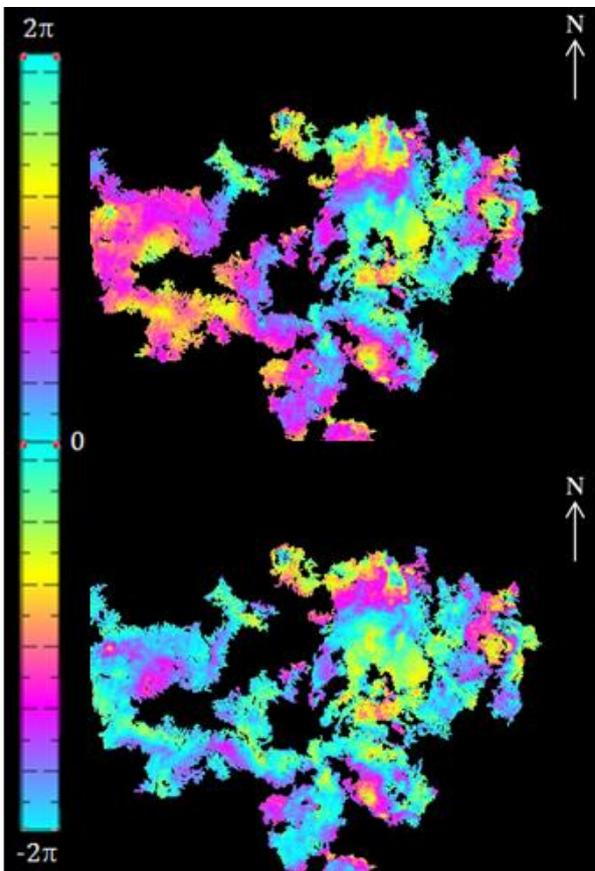
2) 20030826-20040113 $B_{\perp}=13\text{m}$ $B_t=140\text{días}$



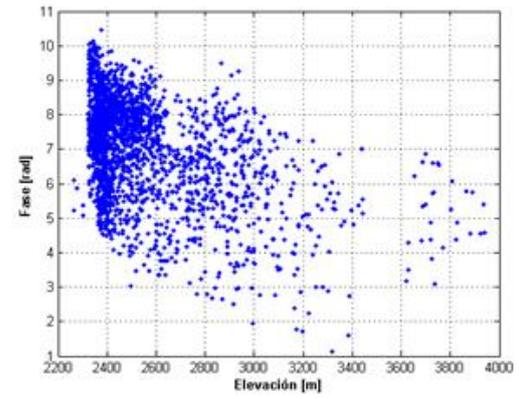
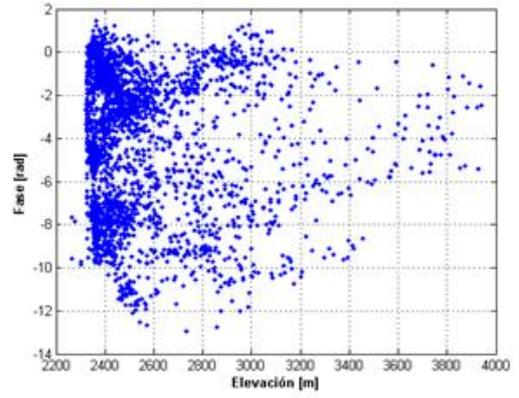
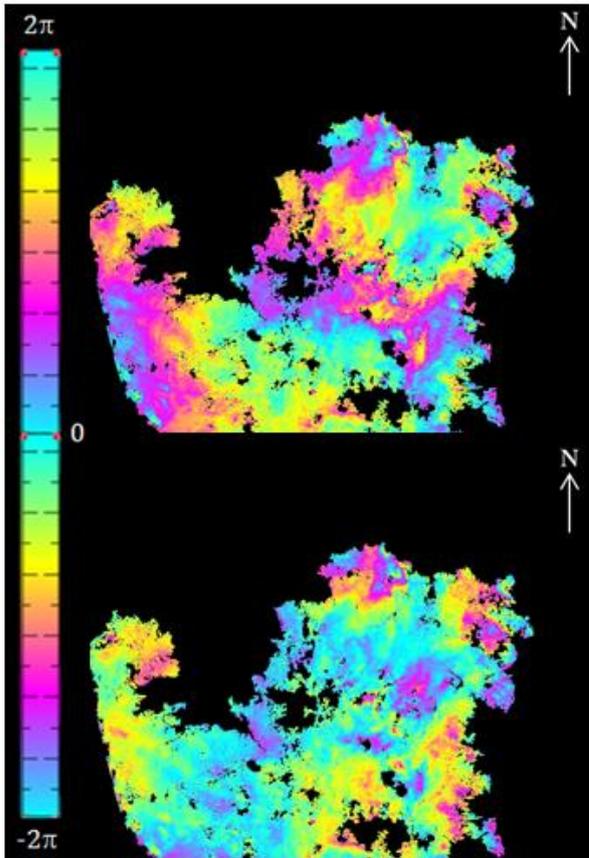
3) 20040706-20040810 $B_{\perp}=94\text{m}$ $B_t=35\text{días}$



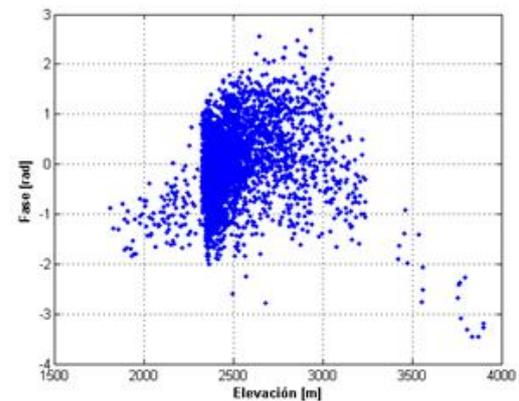
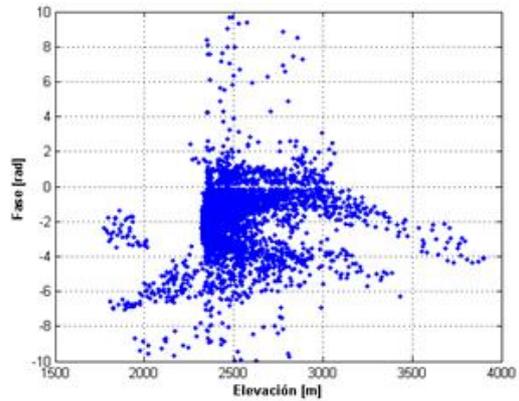
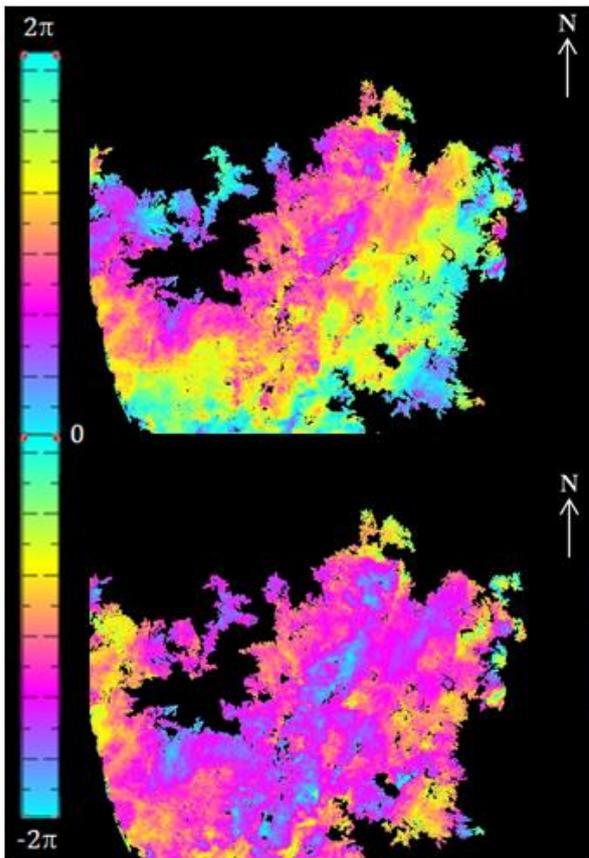
4) 20041228-20050308 $B_{\perp}=100\text{m}$ $B_t=70\text{días}$



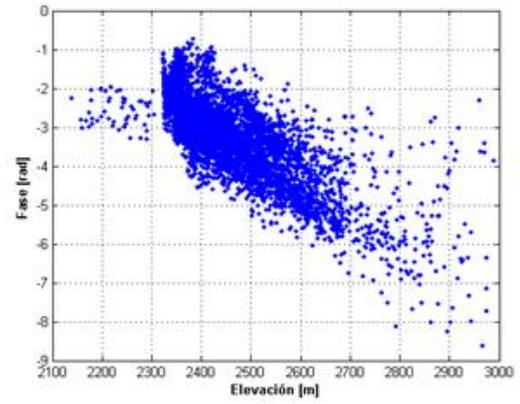
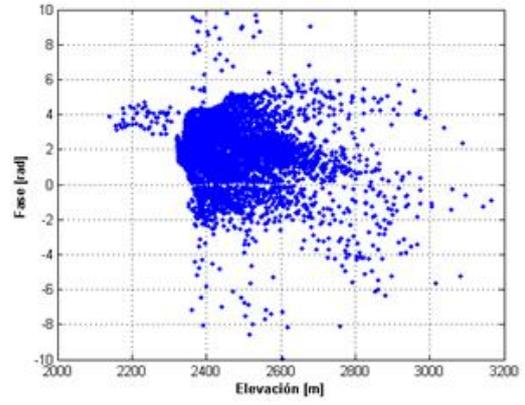
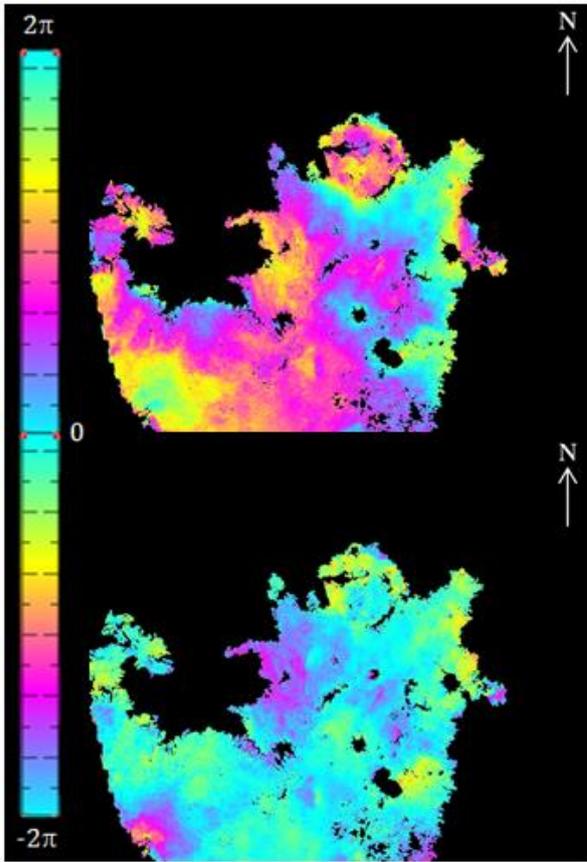
5) 20050621-20050830 $B_{\perp}=32\text{m}$ $B_t=70\text{días}$



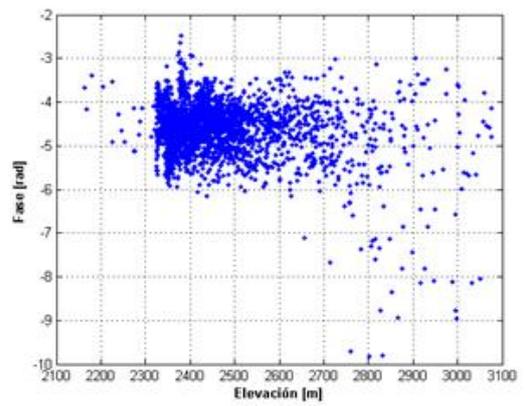
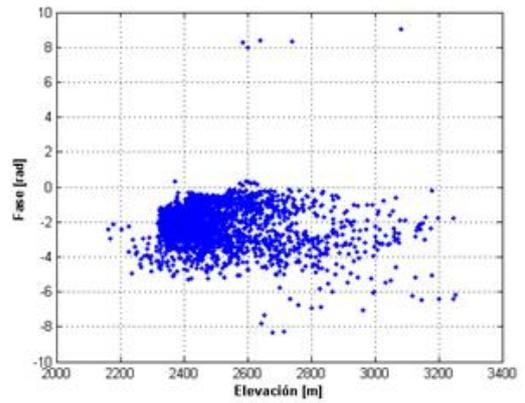
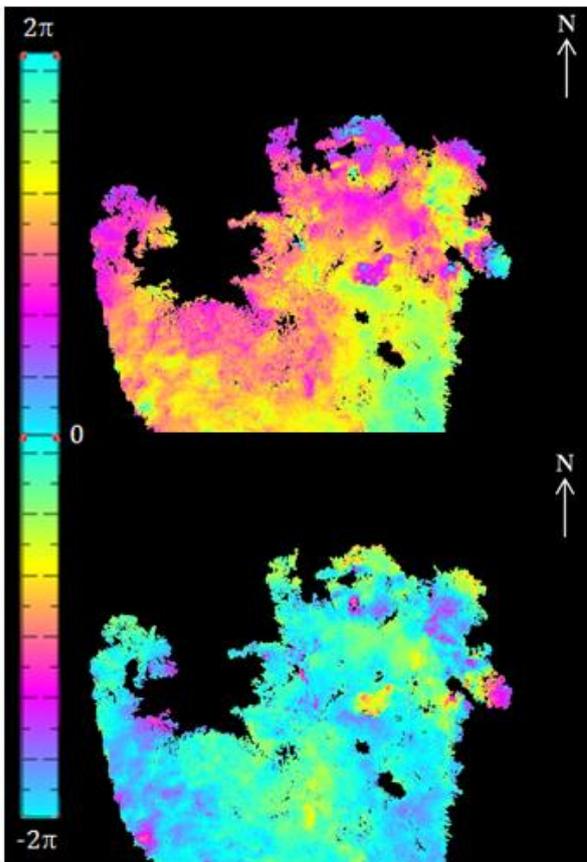
6) 20050830-20051108 $B_{\perp}=213\text{m}$ $B_t=70\text{días}$



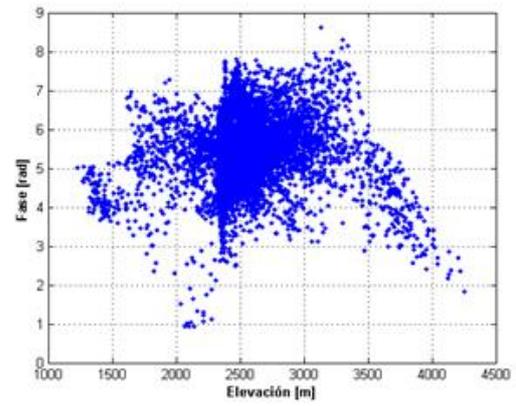
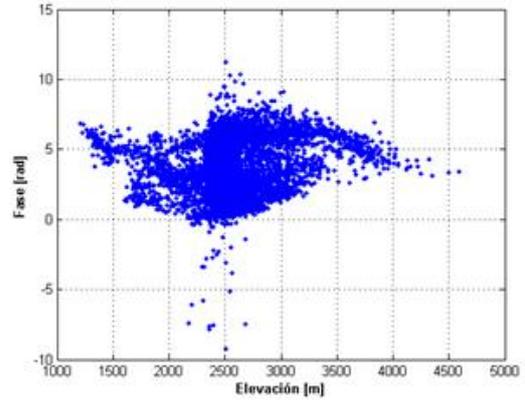
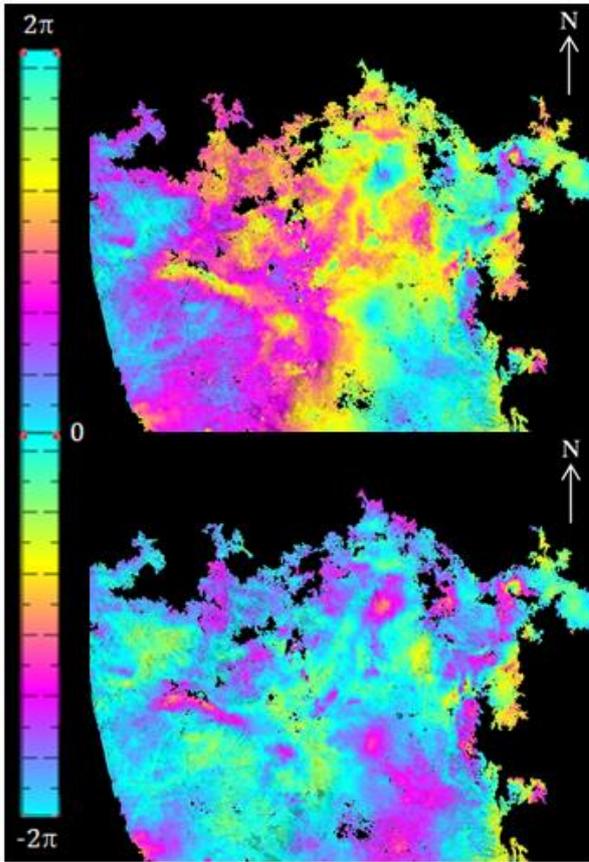
7) 20060117-20060328 $B_{\perp}=222\text{m}$ $B_t=70\text{días}$



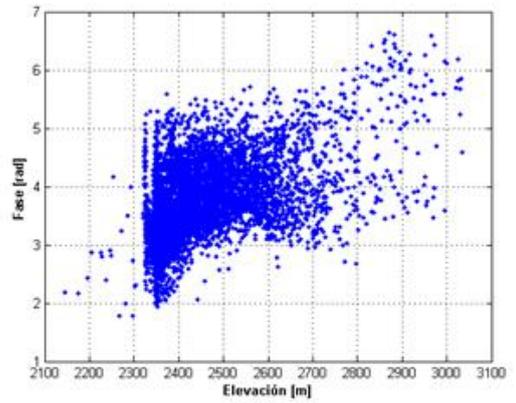
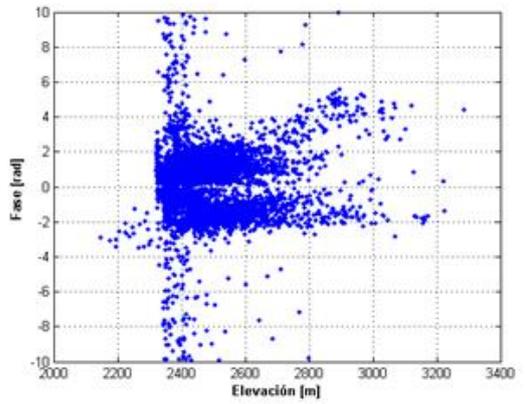
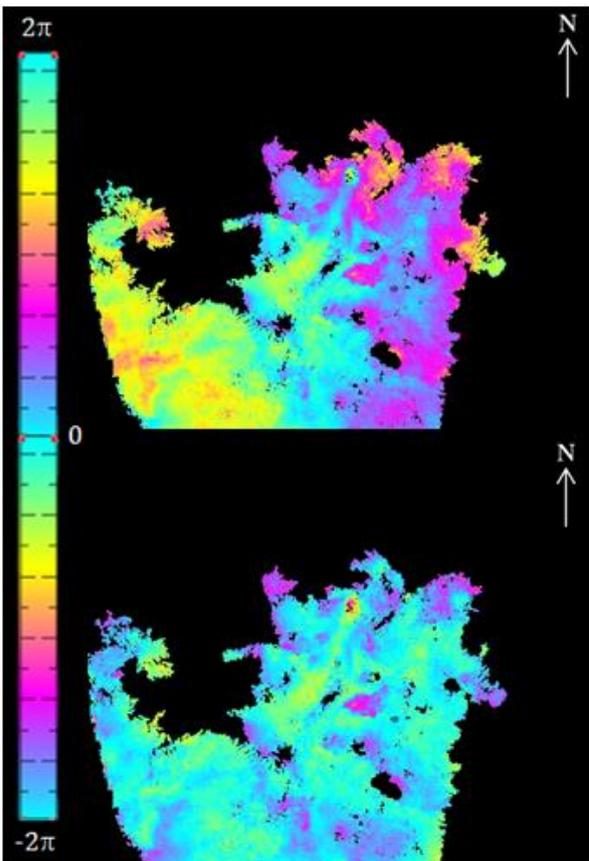
8) 20060221-20060328 $B_{\perp}=-264\text{m}$ $B_t=35\text{días}$



9) 20070102-20070206 $B_{\perp}=-255\text{m}$ $B_t=35\text{días}$

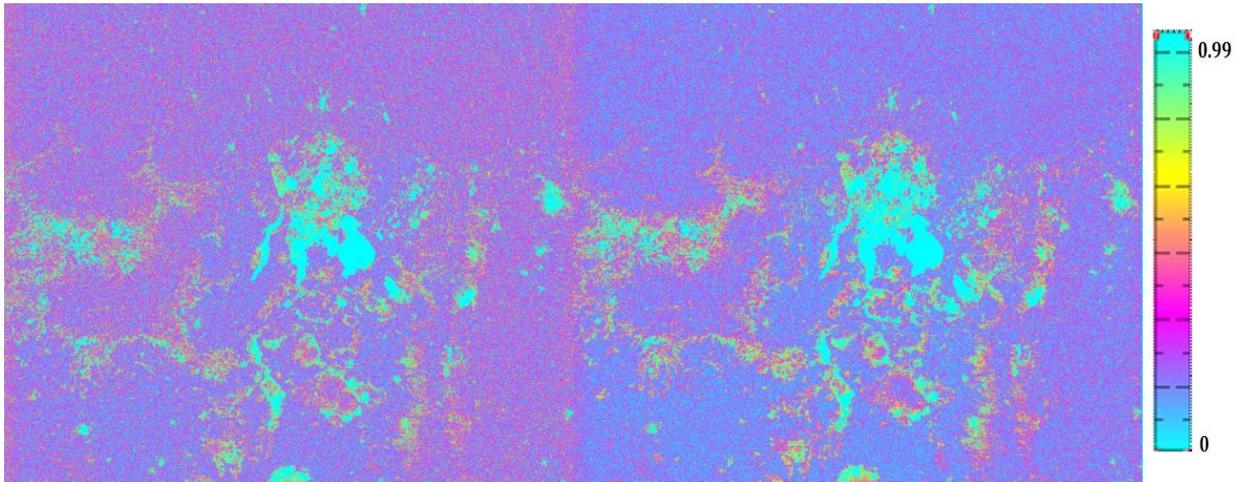


10) 20070102-20070313 $B_{\perp}=27\text{m}$ $B_t=70$ días



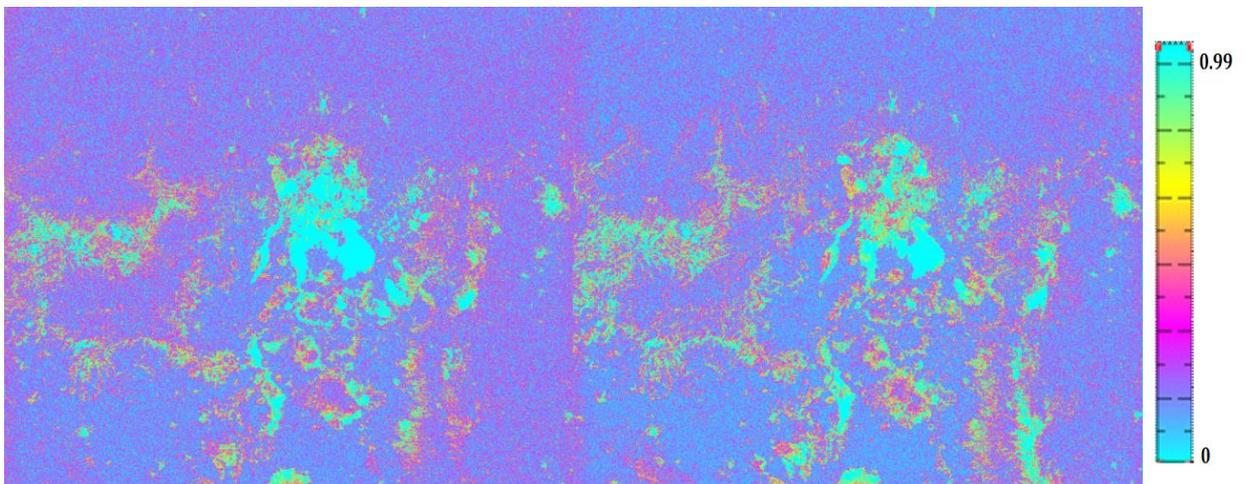
11) 20070206-20070313 $B_{\perp}=282\text{m}$ $B_t=35$ días

Anexo C: Imágenes de coherencia



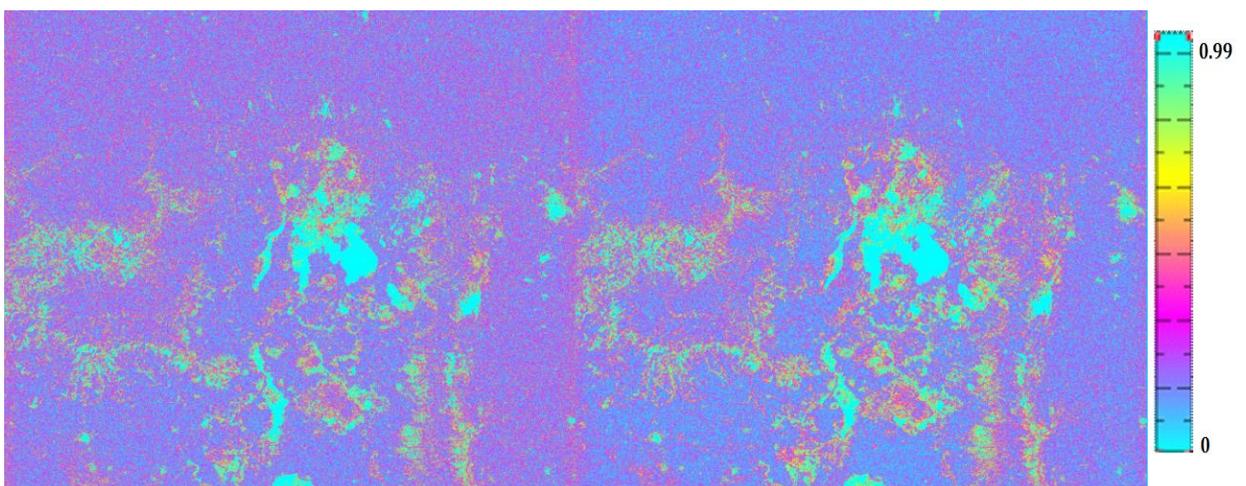
1) 20030408-20030617 $B_{\perp}=156\text{m}$ $B_t=70\text{días}$

2) 20030408-20030826 $B_{\perp}=155\text{m}$ $B_t=140\text{días}$



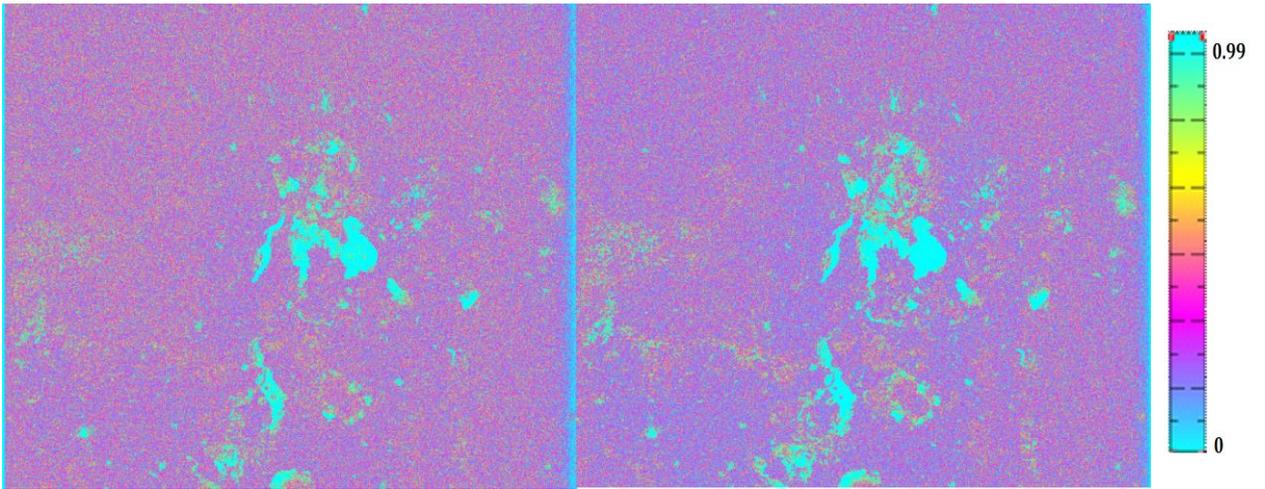
3) 20030408-20040113 $B_{\perp}=168$ $B_t=280\text{días}$

4) 20030617-20030826 $B_{\perp}=-1\text{m}$ $B_t=70\text{días}$

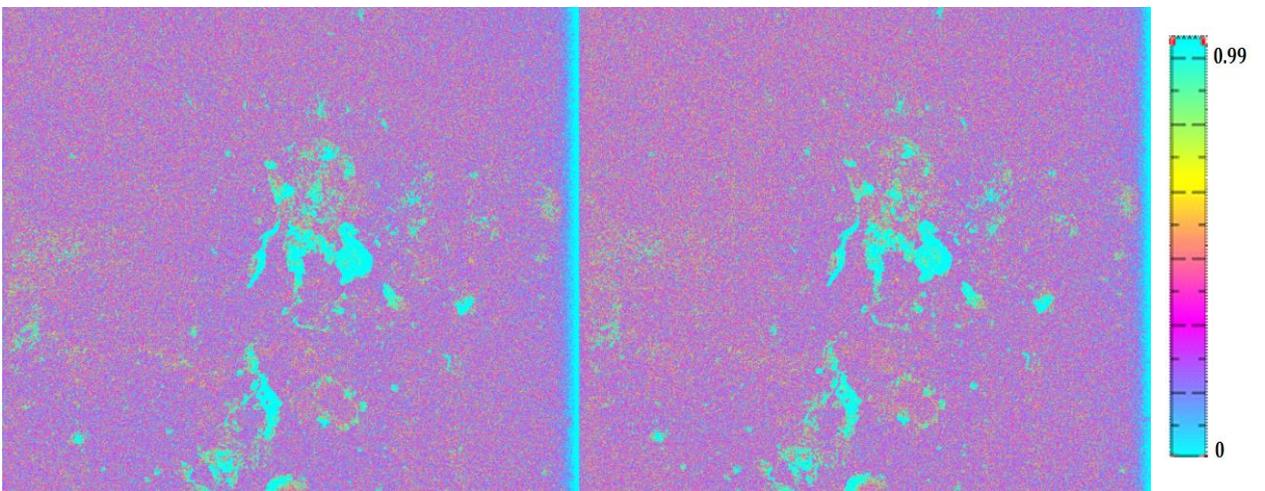


5) 20030617-20040113 $B_{\perp}=12\text{m}$ $B_t=210\text{días}$

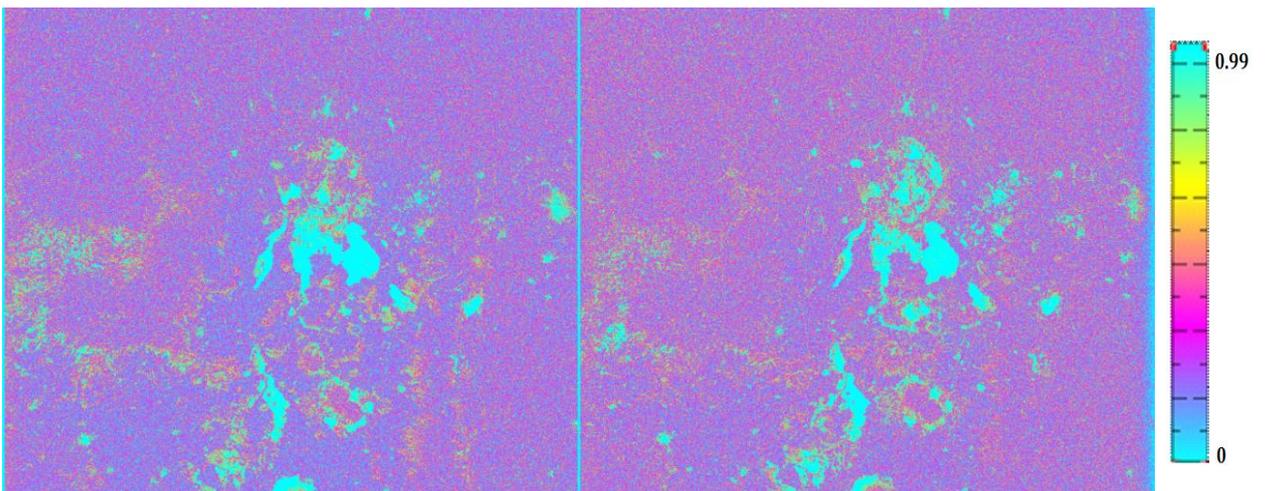
6) 20030826-20040113 $B_{\perp}=13\text{m}$ $B_t=140\text{días}$



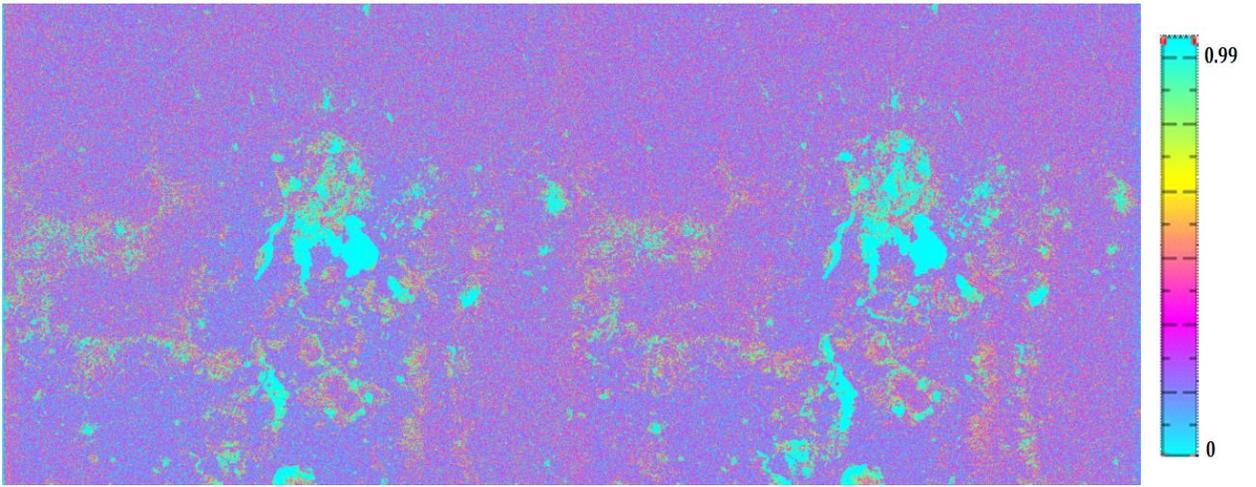
7) 20030826-20040810 $B_{\perp}=-486\text{m}$ $B_t=350\text{días}$ 8) 20031104-20040706 $B_{\perp}=318\text{m}$ $B_t=245\text{días}$



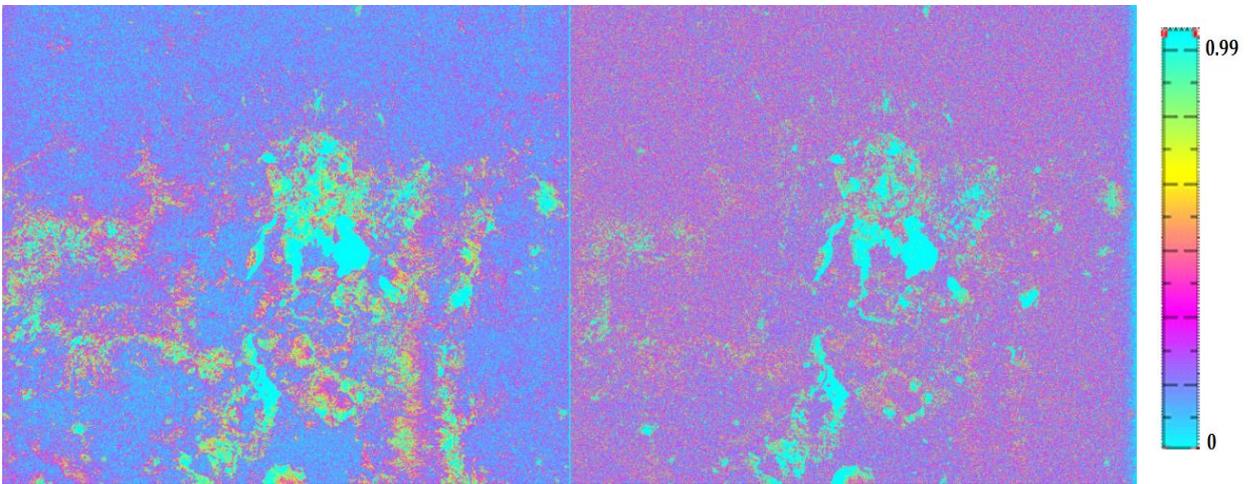
9) 20031104-20040810 $B_{\perp}=412\text{m}$ $B_t=280\text{días}$ 10) 20040113-20040810 $B_{\perp}=-499\text{m}$ $B_t=210\text{días}$



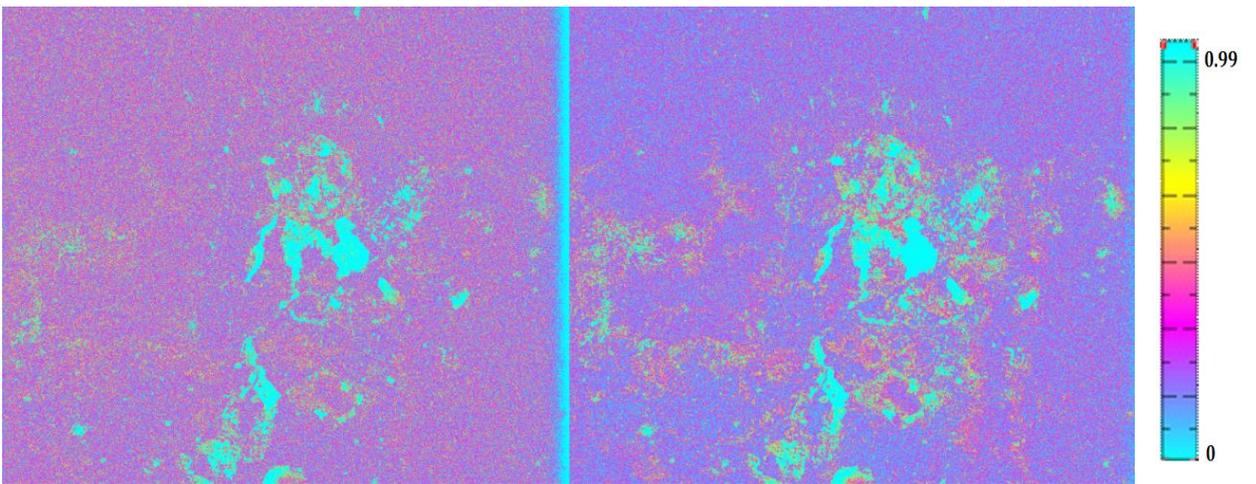
11) 20040113-20041228 $B_{\perp}=-235\text{m}$ $B_t=350\text{días}$ 12) 20040323-20040601 $B_{\perp}=-382\text{m}$ $B_t=70\text{días}$



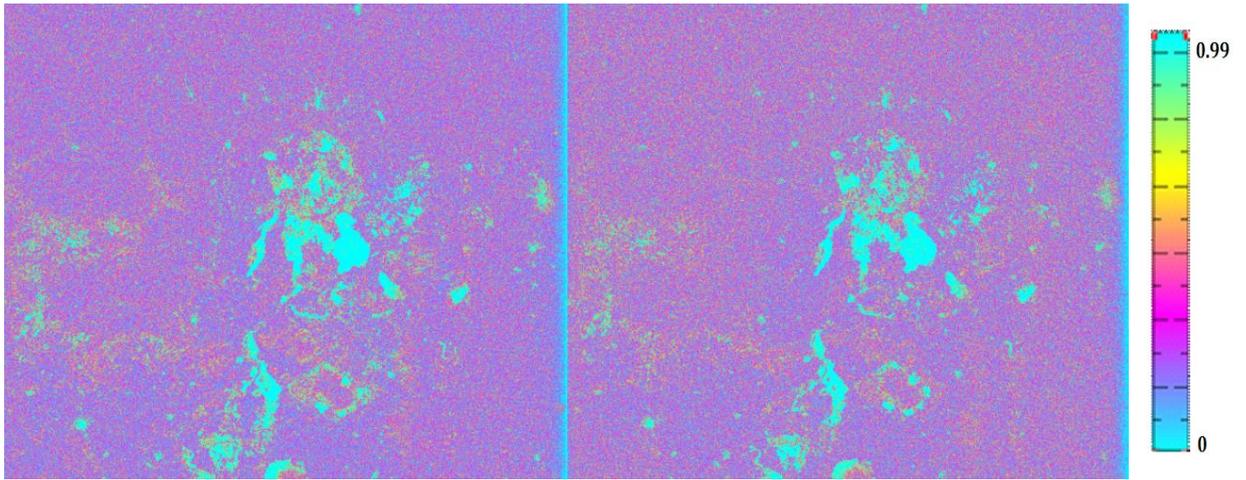
13) 20040323-20041019 $B_{\perp}=-99\text{m}$ $B_t=210\text{días}$ 14) 20040601-20041019 $B_{\perp}=283\text{m}$ $B_t=140\text{días}$



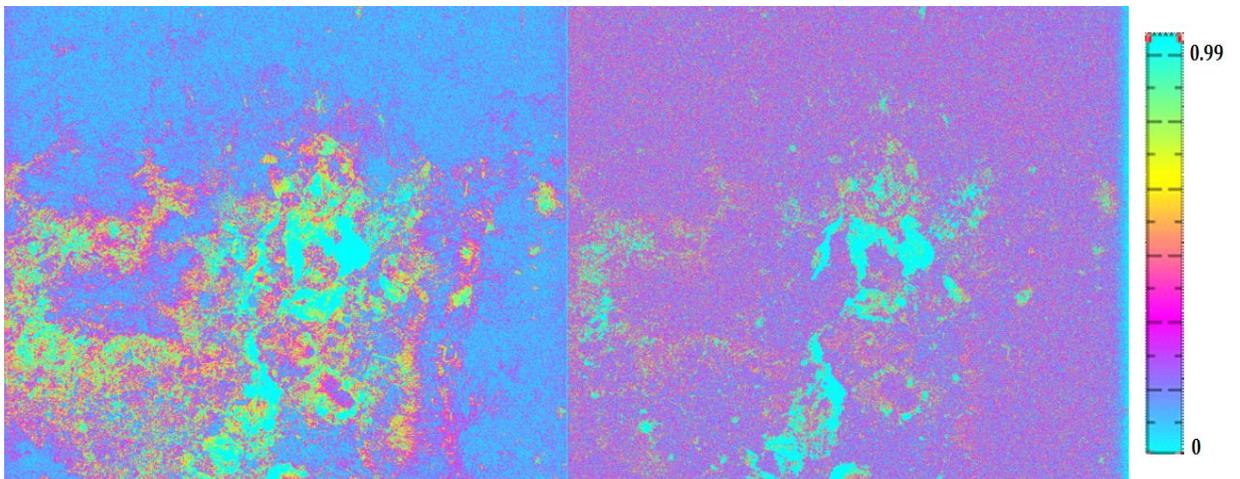
15) 20040706-20040810 $B_{\perp}=94\text{m}$ $B_t=35\text{días}$ 16) 20040706-20041228 $B_{\perp}=358\text{m}$ $B_t=175\text{días}$



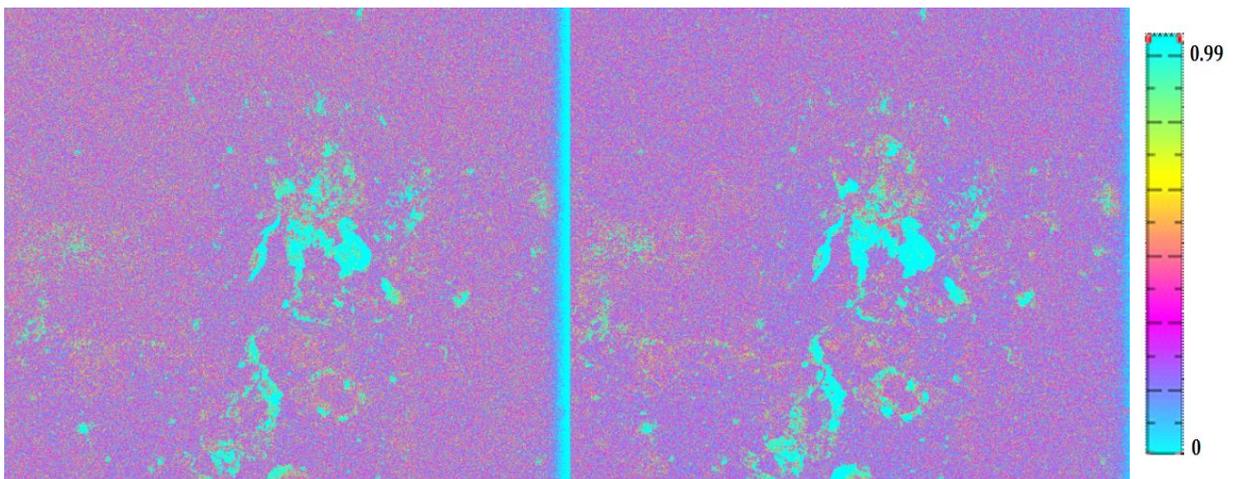
17) 20040706-20050308 $B_{\perp}=458\text{m}$ $B_t=245\text{días}$ 18) 20040810-20041228 $B_{\perp}=264\text{m}$ $B_t=140\text{días}$



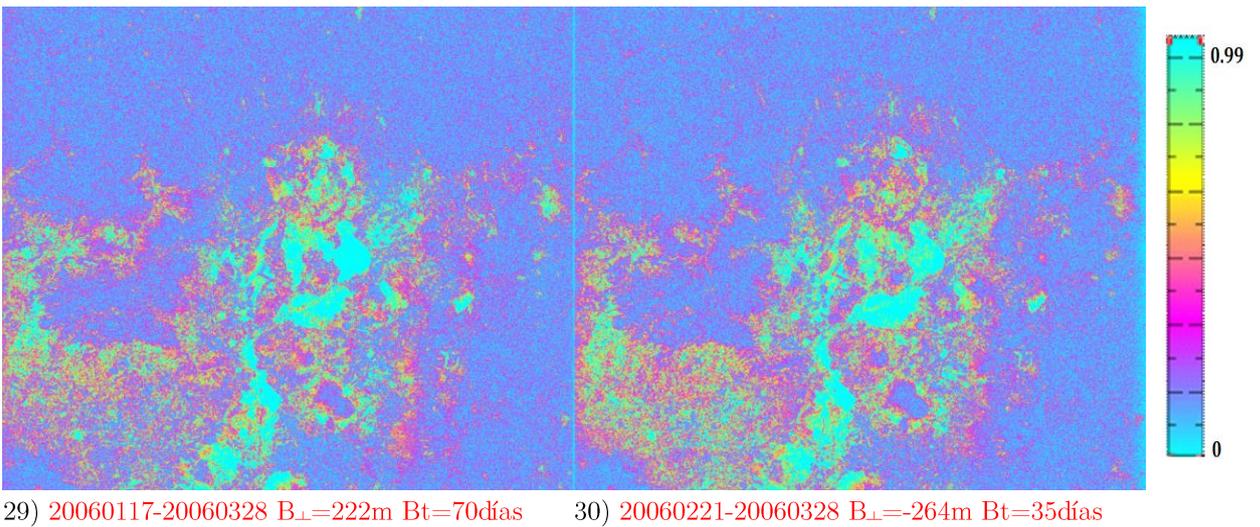
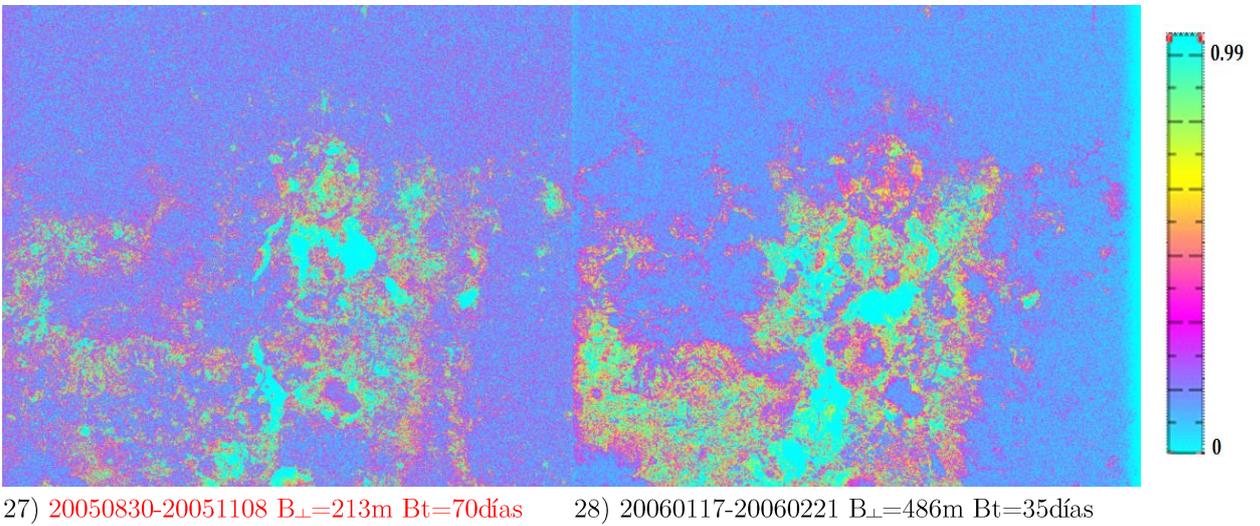
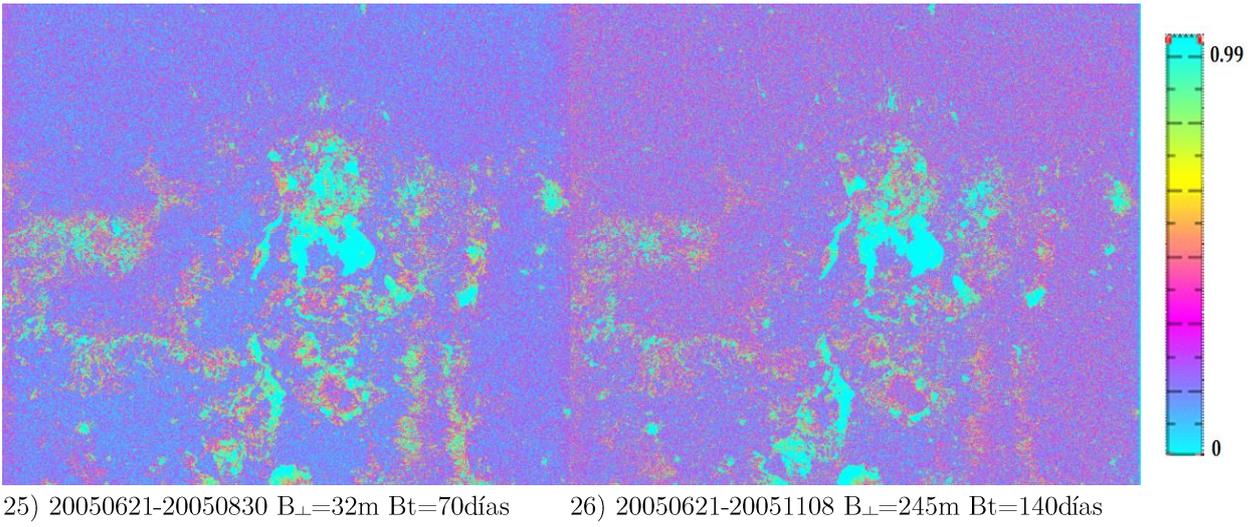
19) 20040810-20050308 $B_{\perp}=364\text{m}$ $B_t=210\text{días}$ 20) 20041019-20050830 $B_{\perp}=-490\text{m}$ $B_t=315\text{días}$

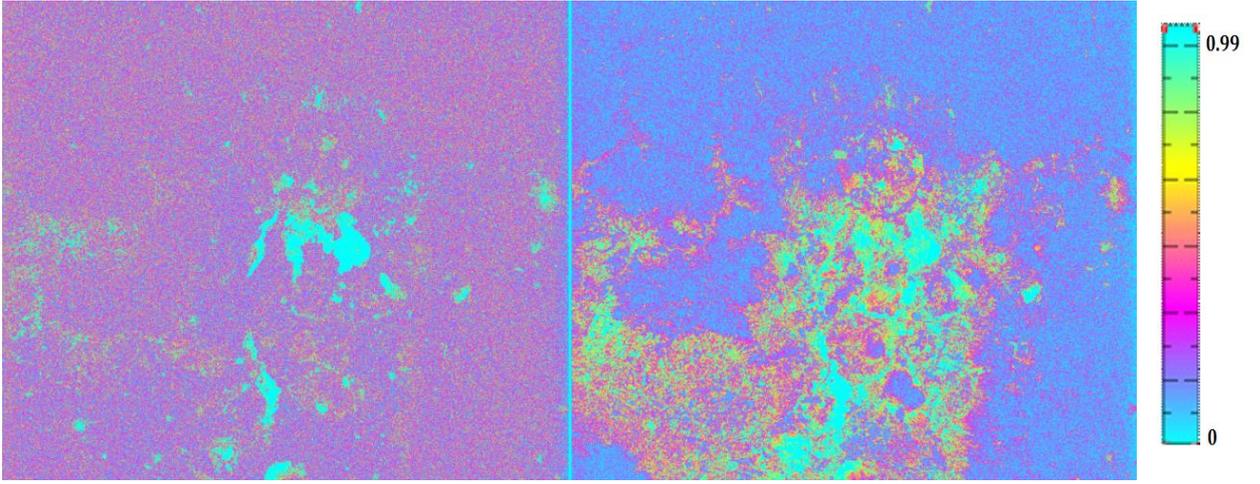


21) 20041228-20050308 $B_{\perp}=100\text{m}$ $B_t=70\text{días}$ 22) 20050308-20050621 $B_{\perp}=451\text{m}$ $B_t=105\text{días}$

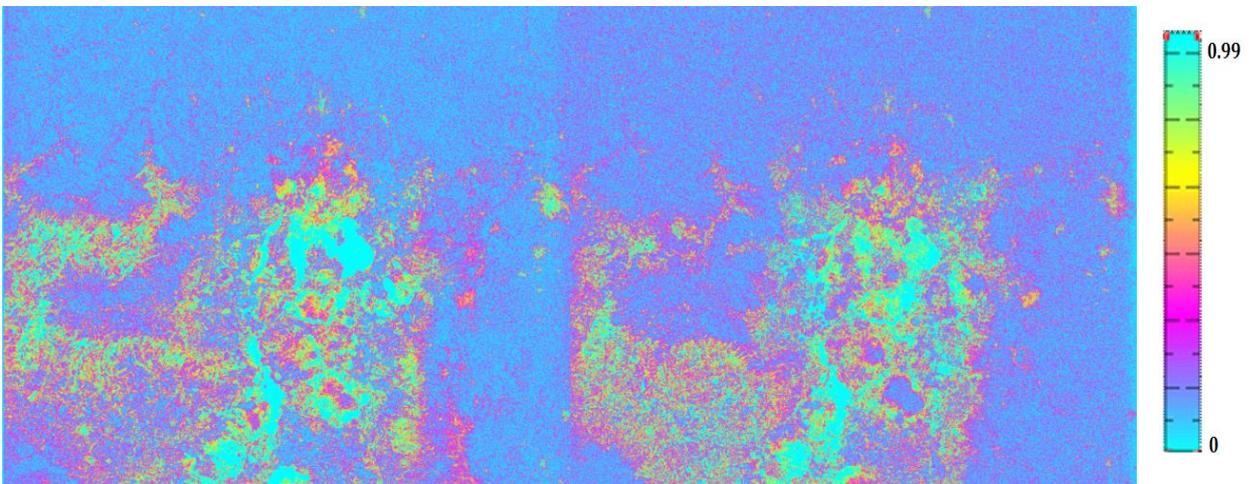


23) 20050308-20050830 $B_{\perp}=483\text{m}$ $B_t=175\text{días}$ 24) 20050308-20060221 $B_{\perp}=-395\text{m}$ $B_t=350\text{días}$





31) 20060221-20070206 $B_{\perp}=341\text{m}$ $B_t=350\text{días}$ 32) 20070102-20070206 $B_{\perp}=-255\text{m}$ $B_t=35\text{días}$



33) 20070102-20070313 $B_{\perp}=27\text{m}$ $B_t=70\text{días}$ 34) 20070206-20070313 $B_{\perp}=282\text{m}$ $B_t=35\text{días}$