



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

**Simulación y caracterización de eventos volcánicos de largo periodo
mediante modelos de fuente hidrostática: Caso volcán Popocatepetl**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

Alan Fernando Rendón Gutiérrez

DIRECTOR DE TESIS:

DR. DENIS LEGRAND

INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM.

Ciudad Universitaria, Ciudad de Mexico. Enero de 2019.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México y el posgrado en ciencias de la tierra por esta oportunidad para desarrollarme en mi campo del conocimiento por permitirme un paso más en la formación académica de mi elección y siempre apoyarme en todo lo necesario.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca de estudios de posgrado que me permitió llevar a cabo estos estudios y el apoyo del gobierno federal para expandir el conocimiento en el país.

Al instituto de Geofísica por el apoyo incondicional para realizar este proyecto.

A mi madre por nunca dejar de creer en mí y ayudarme a ver que los momentos de mayor desesperación abren las puertas a maravillosas oportunidades por nunca rendirse y estar siempre a mi lado por darme siempre todo el amor de su corazón su paz y razonamiento por ser el mejor ejemplo de perseverancia y trabajo en mi vida.

A Katya mi compañera mi musa mi mejor amiga mi todo, la mujer que espero algún día ser el hombre que ella ve en mí, por todo el apoyo ayer hoy y siempre por siempre estar ahí, por ser fuerte y tierna y siempre “Nosotros”.

A mi Hermano por siempre estar ahí cuando más lo necesite por siempre confiar en mí y demostrarme que siempre puedo alcanzar ese horizonte.

A mis tíos, mis padres, mi inspiración mis roles a seguir que cada uno de ustedes me han hecho un mejor hombre, a mis tías por ser madres cómplices y amigas cuando es necesario por nunca dejarnos sin una bendición o un consejo o una palabra para alegrar el día. A mis primos por siempre estar ahí ser hermanos y siempre vernos con la alegría de siempre.

Al Dr. Denis Legrand por esta oportunidad de continuar este camino que comenzó en 2011 y por fin damos un paso más por su paciencia, por sus lecciones y sus comentarios que siempre estuvieron encaminados a desarrollarme como una mejor persona.

Al Dr. Raul Valenzuela Wong, Dr. Carlos Valdes y el M. en C. David Escobedo Zenil por entrar al segundo round conmigo por su apoyo constante y siempre ofrecerme su valioso tiempo.

Al Dr. Miguel Alatorre Ibarquengoitia por sus comentarios sus palabras de aliento y apoyar a construir este proyecto.

A la Dra Vala Hjörleifsdóttir por sus comentarios y apoyo a desarrollar este proyecto en la mejor versión posible de el mismo y por siempre animarme a hacer mi mejor esfuerzo.

A mis hermanos de armas espadachines y arqueros siempre necesarios para enfrentar las batallas que la vida te pone enfrente sus palabras de aliento su presencia en los momentos más difíciles el batallón de arqueros a pesar del tiempo mostrando que siguen presentes todos, y ARMA Sur por recibirme con los brazos abiertos.

Al equipo Poltergeist Mala Mariel Geovanni Nadia Gaby Aurora gracias por su apoyo y hacer del posgrado una gran aventura. A todos aquellos que no creyeron también pues sus dudas alimentaron mi determinación.

Índice

Capítulo I: Introducción	1
Justificación:.....	1
Objetivos	2
Objetivos particulares	2
Capítulo II Introducción y Marco Teórico:	3
2.1 Herramientas de monitoreo volcánico	3
2.1.1 Sistema de posicionamiento Global (GPS).....	6
2.1.2 Radar de apertura sintética interferométrica (InSAR).....	7
2.1.3 Fotogrametría	8
2.1.4 Monitoreo de señales sísmicas	9
2.1.5 Procesamiento de señales VLP para determinar desplazamiento superficial.....	12
2.2 Análisis de modelos de desplazamiento superficial	16
2.2.1 Modelo esférico (Mogi, 1958).....	16
2.2.2 Modelo elipsoidal (Bonaccorso & Davis 1999)	17
2.2.3 Modelo de Sill (Davis 1983)	18
2.3 Aplicación y consideraciones	18
Capítulo III: Caso de Estudio	19
3.1.1 Marco tectónico.....	19
3.1.2 Marco Geológico.....	20
3.1.3 Marco volcánico.....	21
3.2 Metodología.....	22
Capítulo IV: Método directo modelo de desplazamiento causado por una fuente de presión hidrostática esférica (Mogi) y modelos complejos	26
4.1 Análisis de modelo de desplazamiento simple en el espacio plano	26
4.2 Modelo de desplazamiento esférico simple con topografía.....	28
4.3 Modelo de desplazamiento de una fuente elipsoidal	31
4.4 Comparación entre fuentes simples y complejas en espacio plano y con topografía.....	32
Capítulo V Método inverso	36
5.1 Métodos inversos.....	36
5.2 Localización de la fuente mediante el método de Monte Carlo.....	37
5.3 Pruebas de localización con distintos tipos de redes	39
5.4 Análisis de redes espacio plano y modelo DEM.....	49

5.5 Análisis de localización con inversión de Monte Carlo usando estaciones reales.....	53
5.5.1 Arreglo de red propuesto: Cobertura acimutal	60
5.5.2 Arreglo de red propuesto: Cobertura radial	65
5.5.3 Arreglo de red propuesto: Cobertura acimutal expandida.....	70
5.6 Análisis de caracterización de parámetros completa	75
5.6.1 Caracterización de fuente con presión constante	81
5.6.2 Errores de cada parámetro de la fuente suponiendo radio constante de 1 km.....	84
5.7 Discusión de los resultados inversión de parámetros para diferentes geometrías de distribución de estaciones	98
5.8 Inversión con dos fuentes combinadas.	100
5.9 Inversión de datos de fuente combinada considerando esfera de Mogi.	103
Capítulo VI Discusión y conclusiones:	107
Bibliografía y Referencias.....	111

Resumen:

El propósito de este trabajo fue determinar las características de un reservorio magmático mediante el análisis de deformación superficial para determinar su localización y mecanismo focal, el cual fue obtenido a partir de señales sintéticas de desplazamiento.

Se elaboró una herramienta para determinar los parámetros de una fuente volcánica, a partir del análisis de desplazamientos del suelo. Se usó un método simple para poder hacer un cálculo rápido del desplazamiento utilizando una fuente hidrostática de diferencial de presión constante. Las fuentes modeladas son: una esfera (modelo de Mogi) un dique y una combinación de los dos. Se aplicó este método al volcán Popocatepetl.

Mediante el uso de la plataforma MATLAB, se simuló una serie de escenarios de desplazamiento superficial sobre el volcán. Se tomó en cuenta la topografía del volcán usando un modelo digital de elevación. Se consideraron varias fuentes posibles, con formas y localizaciones diferentes, también distribuciones diferentes de estaciones, desde arreglos teóricos ideales, hasta arreglos realistas incluyendo la distribución real actual del volcán, así como escenarios de optimización de la red actual con un número reducido de estaciones. Se analizó el efecto de estos parámetros sobre la inversión de desplazamientos sintéticos y reales. El método de inversión que se usó fue el método de Monte Carlo.

Con los resultados y análisis obtenidos de los arreglos de estaciones ideales, así como de las limitantes del arreglo actual, se propuso como mejorar la red actual mediante la instalación de unas pocas estaciones más, posicionadas adecuadamente para optimizar los métodos inversos.

Capítulo I: Introducción

El monitoreo de volcanes activos es una de las tareas de mayor relevancia inmediata que la vulcanología hace para el beneficio de la sociedad. Un monitoreo minucioso puede llevar a un alertamiento temprano de actividad volcánica que podría poner en riesgo a las comunidades que viven cerca de volcanes, como el Popocatepetl o el Volcán de Colima en México, para las cuales una evacuación puede ser una necesidad. Los daños ocasionados por la actividad pueden ser también a escala nacional como en el caso de los aeropuertos cerrados a causa de la emisión de cenizas.

Justificación:

El Popocatepetl es uno de los volcanes activos más estudiados de nuestro país, así como el volcán de Colima. Su actividad reciente es un recordatorio que el volcán sigue siendo un factor determinante para la vida en nuestro país y su historia eruptiva nos ha demostrado la capacidad que tiene de cambiar el panorama de la región. Por eso, el reto más importante que se tiene cuando se estudian volcanes activos, es la pregunta más inmediata que se recibe por parte de la población; ¿Cuándo va a hacer erupción? ¿Con que tamaño? A diferencia de los sismos que son imposibles de predecir, algunas erupciones volcánicas han sido predichas con intervalos de confianza aceptables, como fue el caso en Indonesia, Japón, y Ecuador, lo cual ha resultado en evitar pérdidas humanas o reducir su número. Sin embargo, para hacer estos pronósticos mediante análisis de señales, se requiere un entendimiento del reservorio del volcán y de su actividad dinámica, como cambios en su volumen, actividad sísmica, emisión de gases, por mencionar algunos.

Uno de los métodos para conocer la estructura interna de un volcán es realizar una tomografía sísmica a partir de sismos o ruido sísmico. Otro método es determinar el mecanismo focal de las explosiones, deducido a partir del análisis de su desplazamiento superficial. La información obtenida sobre la localización y la forma del reservorio magmático a partir de los mecanismos focales debería ser compatible con los resultados de tomografía sísmica. La determinación de la fuente sísmica se ha usado en diferentes ambientes en el mundo, tanto tectónicos como volcánicos. Se considera generalmente una fuente puntual como primera aproximación (en campo lejano) la cual puede representar tanto una fuente de tipo tectónico (doble par de fuerzas) como de tipo volcánico (una fuente explosiva o un dike). Al analizar los vectores de desplazamiento superficial registrados en estaciones de monitoreo continuo se puede obtener una solución (única o no) mediante métodos inversos, siempre que se tenga un arreglo de cobertura óptimo con las estaciones disponibles y se determine adecuadamente el tipo de registros que se van a estudiar.

Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es determinar la fuente volcánica (localización y forma) a partir del desplazamiento superficial de un volcán. Se hará el método directo que consiste en calcular el desplazamiento del suelo conociendo la localización y forma de la fuente, y posteriormente el método inverso para determinar el mecanismo focal a partir de eventos registrados mediante señales sísmicas sobre el volcán Popocatepetl. La fuente que se usará será de tipo volcánico, explosión pura, un *dike* puro o una combinación de ambos.

Objetivos particulares

Analizar los efectos de la topografía real del Popocatepetl sobre el desplazamiento de suelo.

Analizar la influencia de la cobertura radial y acimutal de un arreglo de estaciones (GPS y/o sísmicas) para determinar la localización de las fuentes y sus mecanismos focales.

Determinar una configuración óptima de distribución de estaciones, y como mejorar la red de estaciones actual añadiendo pocas estaciones más.

Capítulo II Introducción y Marco Teórico:

2.1 Herramientas de monitoreo volcánico

El monitoreo sísmico de un volcán es una de las herramientas más eficaces para caracterizar las propiedades dinámicas internas de un volcán activo y evaluar el peligro que representa para aquellos que viven a su alrededor.

Los volcanes siempre han atraído a los asentamientos humanos por diversas razones, una de las más importantes es económica. Esto es debido a la fertilidad de los suelos que consisten en ceniza y sedimentos volcánicos que permiten cosechas constantes, lo que ha hecho por mucho tiempo que los asentamientos humanos y los volcanes estén ligados desde el principio de la agricultura en la humanidad. Como cabe esperar los desastres naturales también forman parte importante de la relación entre la humanidad y los volcanes activos, tal es el caso de Pompeya (Fig. 2.01), ciudad Romana, y el volcán Vesubio, el cual hizo erupción en el año 79 D.C. El flujo piroclástico subsecuente enterró en cenizas y material incandescente a la población; las consecuencias sociales en la bahía de Nápoles y en la región general fueron importantes. Esta erupción volcánica fue un desastre de origen natural y generó un estado de emergencia nacional. Fue también el caso del volcán Nevado del Ruiz en Colombia, que destruyó el pueblo de Armero en 1985. El factor determinante del desastre fue la falta de preparación.



Fig. 2.01 Representación de la erupción del volcán Vesubio sobre la ciudad de Pompeya, 79 D.C.

El monitoreo de la actividad de un volcán es esencial para evitar pérdidas de vidas humanas. Existen cuatro tipos de monitoreo volcánico: sísmico geoquímico geodésico y visual

De manera complementaria al monitoreo usualmente se elaboran mapas de peligro, planes operativos entre otras herramientas para la prevención de desastres, basadas en la información obtenida del monitoreo volcánico (Sigurdsson, 1999).

Existen muchas técnicas de gran eficacia para monitorear la actividad de un volcán. Debido a que cada volcán tiene un comportamiento particular antes, durante y después de una erupción, es necesario tener un conocimiento minucioso de su marco geológico y de su historia eruptiva (Kawakatsu, 2000).

Se pueden determinar los parámetros de monitoreo que serán de mayor eficacia para el caso de estudio. Puede ser por medio del estudio de los gases, como SO_2 , en las plumas emitidas por el volcán (Campion, 2015), mediante propiedades geoquímicas variables en volátiles magmáticos (Delgado, 1998) o desplazamiento superficial, debido a movimientos de fluidos dentro de la estructura volcánica (Battaglia

2006), por nombrar algunas. El trabajo aquí presente se enfoca en la última de las técnicas de monitoreo mencionadas basándonos en los principios teóricos usados por Battaglia y los trabajos previos (Cayol, 1999; Bonnaccorso, 1996; Mogi, 1958), en la figura 2.02 se muestran los equipos de monitoreo instalados hasta 2010 en la red de monitoreo del volcán Popocatepetl. Actualmente la red se ha expandido con 5 estaciones más de monitoreo, así como una serie de GPS en las estaciones Juncos, Canario, Chipiquixtle y Colibrí, instaladas por el Instituto de Geofísica en septiembre de 2018 al final de esta investigación, por lo que no fueron consideradas en las simulaciones.

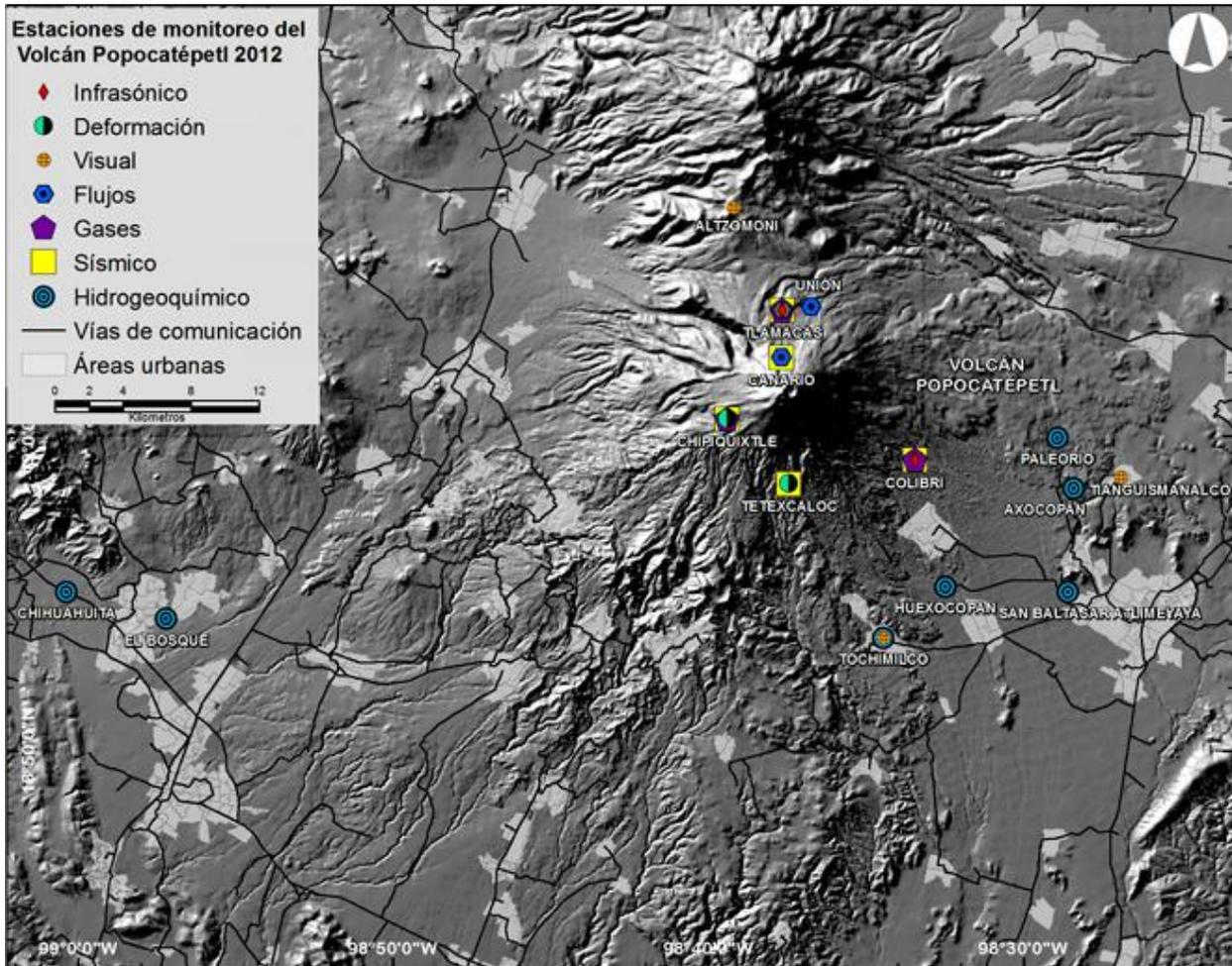


Fig. 2.02 Red actual de monitoreo del volcán Popocatepetl con todos los tipos de instrumentos (Cenapred).

El monitoreo de desplazamiento superficial de un volcán se puede realizar a partir de varios instrumentos, por ejemplo, con sismómetros o inclinómetros. Se pueden también usar otras técnicas de alta sensibilidad, tales como levantamientos geomáticos, sistemas de posicionamiento global (GPS), radar de apertura sintética interferométrica (InSAR), fotogrametría. La red de monitoreo actual del volcán Popocatepetl mostrada en la imagen actualizada hasta 2010 (fuente: www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/RedMonitoreo/ actualmente fuera de línea)

Nombre	Ubicación aproximada	Instrumentación	Institución
Altzomoni	Cerro Altzomoni 4000 msnm	Repetidor de comunicación Repetidor sísmico (Calo-Colibrí-Tetexcaloc) Enlace de datos 1 (serie) y 2 (Ethernet) Cámara de observación visual control de movimiento Cámara infrarroja Repetidor de comunicación DOAS	CENAPRED
Calo	Cerro Calo Chalchihuapan, Puebla 2386 msnm	Sensor sísmico de banda ancha Repetidor señales de periodo corto Colibrí-Tetexcaloc	CENAPRED IDEI UNAM
Canario	Refugio el Canario 4313 msnm	Sismómetro triaxial de 1 Hz Sismómetro de banda ancha triaxial de 60 s Deformación Detector acústico	CENAPRED
Chipiquixtle	Arenales Ladera SW 3990 msnm	Sismómetro triaxial de 1 Hz Sismómetro de banda ancha triaxial de 30 s Deformación Monitoreo de gases DOAS Cámara de video	CENAPRED
Colibrí	San Pedro Benito Juarez, Puebla	Sismómetro triaxial 1 Hz Sismómetro de banda ancha triaxial de 60 s Sensor de infrasonido Estación de monitoreo de gases DOAS	CENAPRED
Cuervos	Parte alta ladera sur del volcán 4200 msnm	Sismómetro uniaxial de 1 Hz Deformación	CENAPRED
Encinos	Volcán Popocatepetl 3655 msnm	Sismómetro de banda ancha triaxial de 30 s deformación	CENAPRED
Juncos	Ladera NW 4452 msnm	Sismómetro triaxial de 1 Hz	CENAPRED
Nexpayantla	Cerro Tlamacas 4100 msnm	Deformación	CENAPRED
Santiago Xalitzintla	Santiago Xalitzintla, Puebla 2500 msnm	Repetidor estación encinos	CENAPRED
Tetexcaloc	Ladera sur del volcán 3138 msnm	Sismómetro triaxial de 1 Hz	CENAPRED

Tianguismanalco	Tianguismanalco 2163 msnm,	Cámara de observación visual con control de movimiento Repetidor DOAS	CENAPRED-UNAM
Tlamanca	Cerro Tlamanca 4009 msnm	Repetidor Pico de Orizaba Repetidor de flujos Sensor infrasónico Cámara de observación visual con control de movimiento	IGF-UNAM-CENAPRED
Tochimilco	Volcán Popocatepetl	Cámara de observación visual	CENAPRED
Unión	Unión 3621 msnm	Detector acústico de flujo	CENAPRED
Zorzal	Barranca 3985 msnm	Detector acústico de flujo	CENAPRED

Tabla 2.01 Estaciones de monitoreo CENAPRED hasta 2010 (fuente www.cenapred.unam.mx/es/Instrumentacion/InstVolcanica/MVolcan/RedMonitoreo/ actualmente no disponible)

Aquí presentaremos algunos de estos métodos de monitoreo más comunes sobre volcanes activos:

2.1.1 Sistema de posicionamiento Global (GPS).

Los sistemas de posicionamiento global (GPS) son útiles para:

- La navegación terrestre, marítima y aérea
- La prospección en tierra, mapeo catastral y soporte de sistemas de información geográfica
- Investigación geodinámica para movimiento de placas tectónicas y vulcanismo

A pesar de ser una de las técnicas de desarrollo más reciente, ha creado un gran impacto gracias a su principio de determinar la posición tridimensional de cada punto en un marco de referencia absoluto, capaz de monitorear desplazamientos superficiales de manera remota y continua en tiempo real (Dzurisin, 2007).

El GPS es capaz de calcular la posición (latitud, longitud y altitud) en un sistema de referencia, como lo es el Geoide WGS84, con una precisión milimétrica. La técnica está basada en el uso de comunicación satelital y triangulación de señales satelitales midiendo el ángulo de dirección y buzamiento, así como el número y fase de ondas.

El nombre adecuado de los sistemas de geolocalización es GNSS por sus siglas en inglés para Sistema Satelital de Navegación Global, el cual hace referencia a todos los sistemas satelitales usados para navegación (GLONASS, Galileo, Beidou entre otros) todos funcionan bajo el mismo principio que GPS con la diferencia que cada uno está manejado por un arreglo de satélites distintos y referenciados a Datums diferentes para acoplarlos con más precisión a ciertas regiones del planeta

Una de las grandes debilidades de este sistema de monitoreo es, como muchas técnicas de prospección geofísica, el hecho de que cada medición es una medición puntual, y el número de mediciones necesarios

para evitar un sub-muestreo, para un análisis óptimo, es muy grande, por lo cual se requeriría una gran cantidad de equipos de alta precisión para hacer un estudio adecuado de resolución óptima (Fig. 2.03).

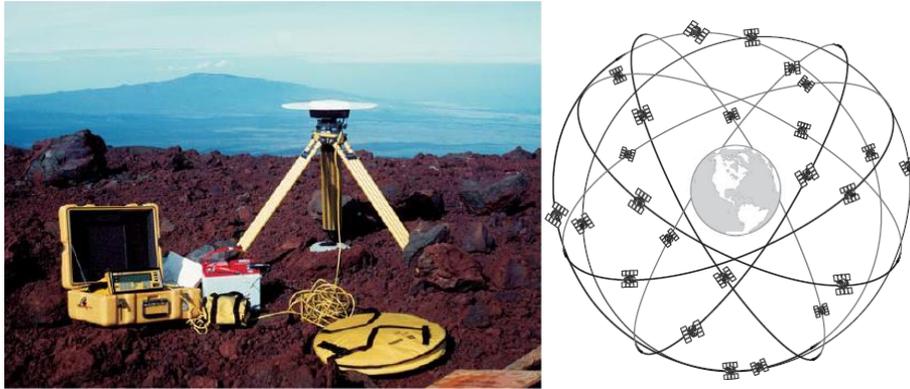


Fig. 2.03 Instalación de estación GPS portátil (izquierda). Diagrama de red de satélites NAVSTAR para la detección de posicionamiento global (derecha).

2.1.2 Radar de apertura sintética interferométrica (InSAR).

Mediante la adquisición de datos por percepción remota los radares de apertura sintética interferométrica (InSAR) son capaces de adquirir datos de todo el campo de deformación, de manera rápida y efectiva, desarrollada para el análisis geomático a principios de los 90's. Es posible, por ejemplo, obtener el campo de desplazamiento completo de un volcán sin necesidad de una campaña de adquisición de datos puntuales (Salzer, 2017) que podrá llevar meses para obtener solo una fracción de los datos que InSAR es capaz entregar al usuario. Esta técnica usa ondas electromagnéticas de alta frecuencia (1-1000 GHz) (Dzurisin, 2007) que no pueden atravesar vegetación o nubes con una longitud mayor a la longitud de onda que se está midiendo (Salzer, 2014, Pinel 2011). Por esta razón los radares de apertura sintética usan distintos tipos de bandas de frecuencias para encontrar la mejor relación entre resolución y penetración de la señal (Fig. 2.04).

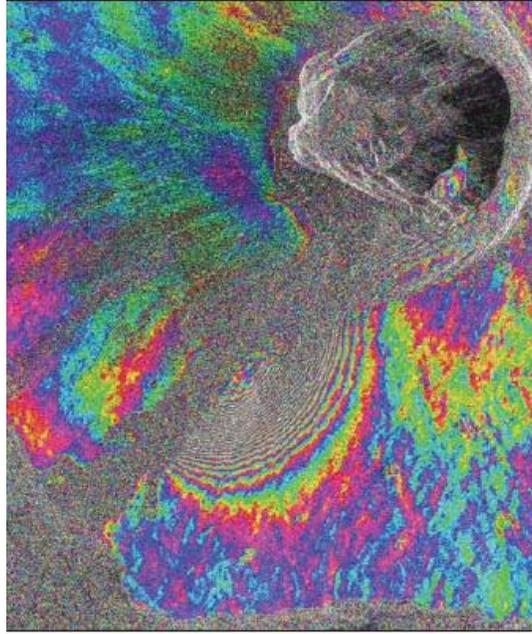


Fig. 2.04 Interferograma que muestra del volcán Fernandina en las islas Galápagos tras una erupción (Dzurisin 2007).

2.1.3 Fotogrametría

La fotogrametría es una herramienta que permite realizar mapas en 3 dimensiones en alta resolución a partir de fotografías. En las décadas más recientes, se ha convertido, gracias a los avances tecnológicos de los GPS, en una herramienta integral de monitoreo tridimensional en tiempo real sobre grandes áreas. El principio fundamental, sin embargo, a pesar de todos los avances tecnológicos presentes hoy en día, sigue siendo el mismo, es decir basado en el cambio de posición aparente relacionado al ángulo de separación entre el punto de perspectiva y la distancia real en cuestión (Dzurisin, 2007).

Las aplicaciones de la fotogrametría en estudios geológicos se dividen en aéreas (Fig. 2.05) y terrestres, dependiendo de la posición de las cámaras usadas para adquirir los datos, usualmente estas herramientas se han usado para reconstruir un modelo del terreno estereoscópico libre de distorsiones.

La mayoría de las imágenes recolectadas para estudios de fotogrametría se basan en energía electromagnética de longitudes de onda dentro del espectro visible (0.4-0.7 mm), ultravioletas (0.3-0.4 mm) y el infrarrojo cercano (0.7-1.2 mm). Mediante el análisis de este espectro combinado es posible estudiar mejor las variaciones que un área determinada tiene. Esta relación de variación del espectro se puede analizar mediante la comparación de dos imágenes tomadas en el mismo tiempo con distintos ángulos de perspectiva, así como con el uso del efecto Doppler y determinar desplazamientos positivos o negativos respecto al punto de referencia, en este caso la cámara, lo que permitiría determinar el desplazamiento del campo de observación, sin embargo cabe recalcar que este método requiere una fuente de luz natural, por lo cual es sensible a condiciones climáticas y de tiempo, al tomar las fotos en el día y buscar la misma intensidad luminosa en todo momento.

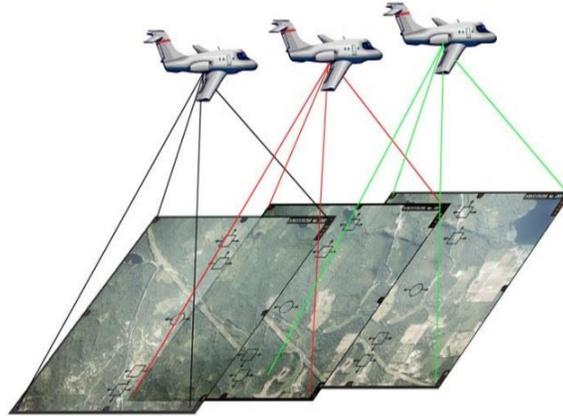


Fig. 2.05 modelo de adquisición de datos para estudios de fotogrametría

2.1.4 Monitoreo de señales sísmicas

El análisis de registros sísmicos es una herramienta ampliamente utilizada en la investigación de volcanes, desde el análisis de ruido sísmico, así como los diferentes eventos sísmicos provocados por la actividad volcánica, ya sean de largo periodo, tremores o volcanotectónicos se pueden utilizar para determinar distintas características del volcán como la profundidad de una zona magmática, hasta la presencia de fluidos, mediante técnicas de detección de hipocentros sismológicas algunos de estos eventos pueden dar información importante sobre la fuente, sin embargo otros resultan más difíciles de aplicar dada su propia naturaleza (Kawakatsu, 2007).

Los registros sísmicos de origen volcánico son de varios tipos y caracterizan la dinámica de la fuente volcánica. Estos eventos pueden ser diferentes de un volcán a otro, sin embargo, los más comunes (Chouet, 1999) son:

Eventos de largo periodo: son eventos de bajas frecuencias, generalmente menores a 5 Hz. En este tipo de eventos los arribos de las ondas P y S no son fácilmente apreciables (Fig. 2.06).

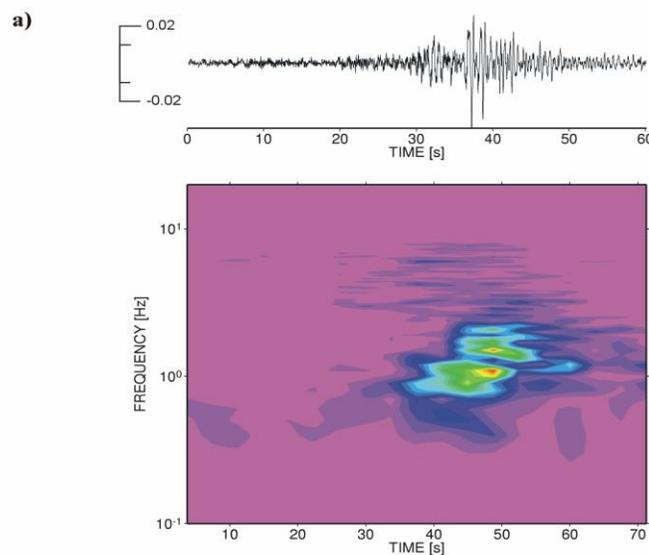


Fig. 2.06 Señal en tiempo y espectrograma de un evento de largo periodo.

Tremores: Señal (armónica o no) de larga duración con amplitud sostenida sin arribos claros de onda (Fig. 2.07).

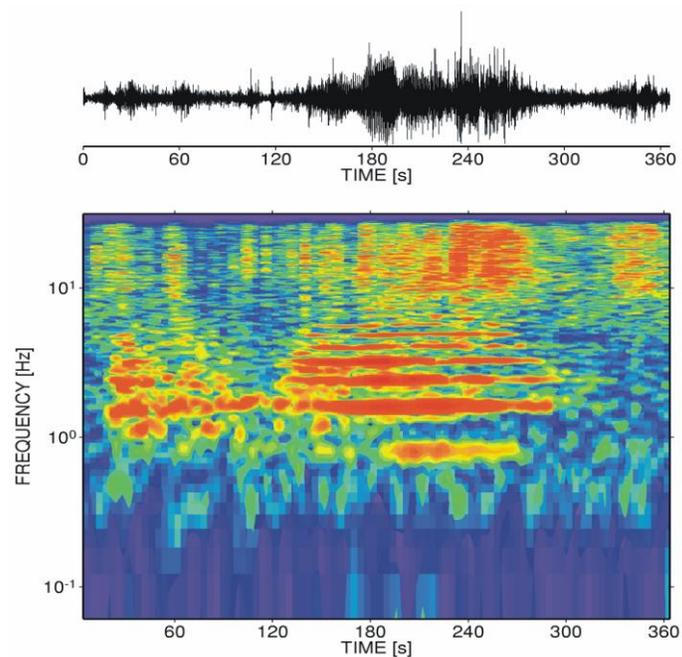


Fig. 2.07 Señal en tiempo y espectrograma de un tremor.

Estos dos tipos de eventos poseen una duración generalmente muy diferente pero un contenido frecuencial similar, lo cual sugiere un proceso de fuente similar. Se asume que su generación se debe al movimiento de fluidos hidromagmáticos a través de conductos abiertos dentro del edificio volcánico, generando modos volumétricos de desplazamiento (cambios de volumen).

Eventos volcano tectónicos (VT): Son eventos con ondas P y S claras, como los sismos de origen tectónicos, su única diferencia es su lugar de origen. Eventos originados sobre la roca sólida debido a esfuerzos que provocan fracturamiento de cizalla en regiones del edificio volcánico (Fig. 2.08).

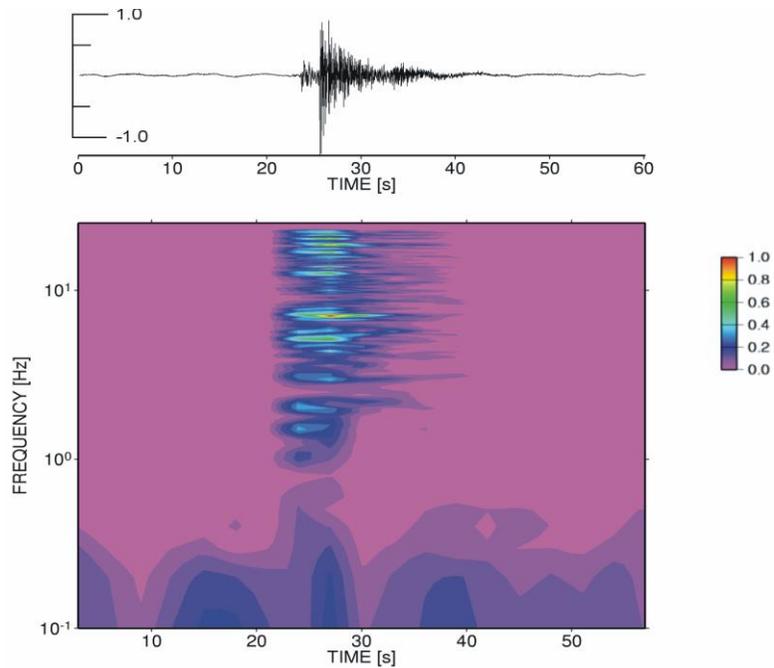


Fig. 2.08 Señal y espectrograma de evento volcánico tectónico.

Eventos híbridos: Son eventos que tienen dos contenidos frecuenciales claramente definidos (Fig. 2.09). La señal puede empezar con altas frecuencias seguida de bajas frecuencias o al revés. Estos eventos son interpretados como rompimiento de la roca sólida, causado por el movimiento de fluidos.

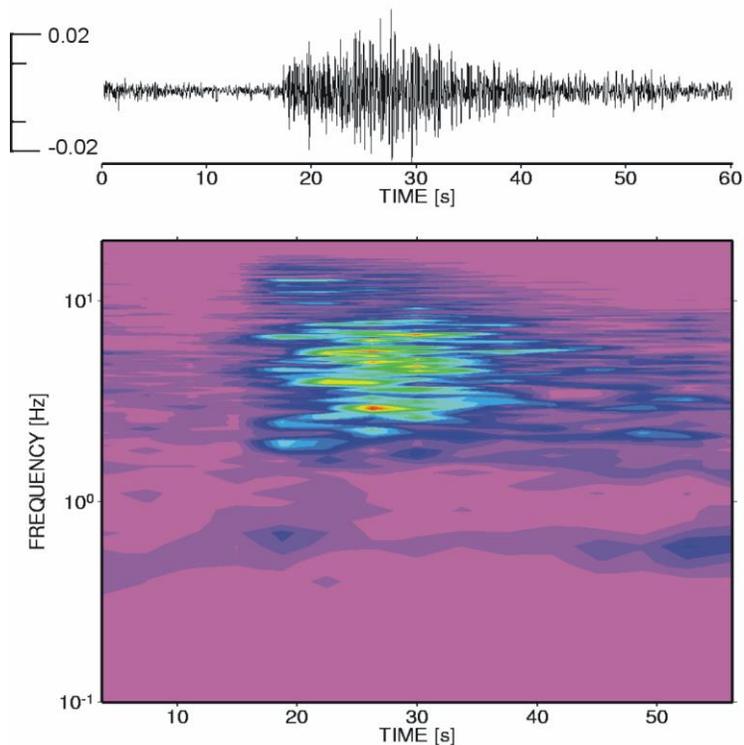


Fig. 2.09 Señal en tiempo y espectrograma de un evento volcánico híbrido.

2.1.5 Procesamiento de señales VLP para determinar desplazamiento superficial

Los registros sísmicos de la estación de banda ancha de Tlamacas (PPIG) se registran en velocidad. Queremos transformar esa señal en desplazamiento. Como estamos en la parte plana de a curva de respuesta, vamos a corregir mediante la respuesta instrumental (usando el archivo de polos y ceros) y aplicar una integración simple y filtrar las muy bajas frecuencias que se sobre estiman al aplicar la integración. Para ejemplificar el procesamiento de datos hemos tomado la explosión de 28/09/2018 13H29M TU (Figura 2.10) el cual representa el desplazamiento máximo en sobre presión de la cámara y la perdida inicial máxima

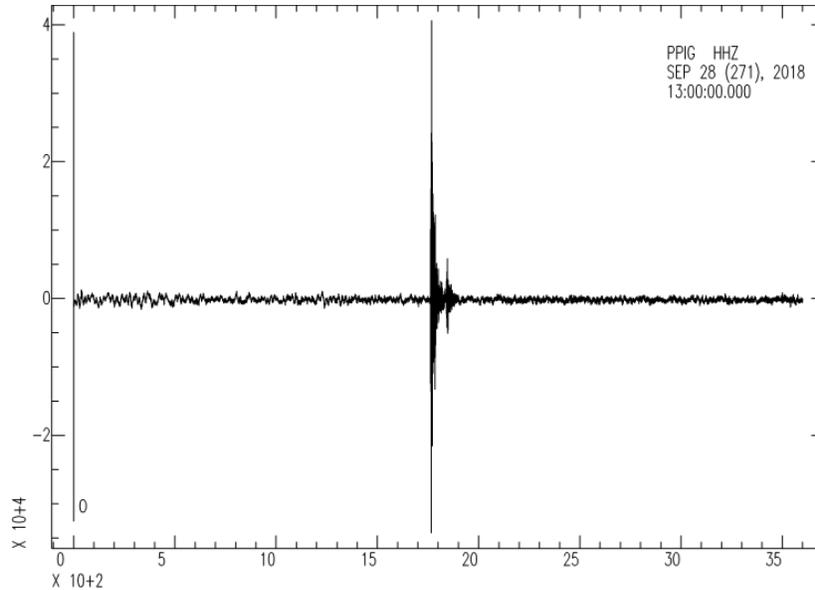


Fig. 2.10 registro de un evento explosivo registrado el 28 de septiembre de 2018. Las unidades verticales solo son conteo de registro en este momento despreciables

Después, hemos integrado esa señal y filtrado en la banda de frecuencia donde la señal tiene energía (entre 1 y 5 segundos). La figura 2.11 muestra la señal original en velocidad (arriba) y en desplazamiento filtrado entre 1 y 5 s (abajo).

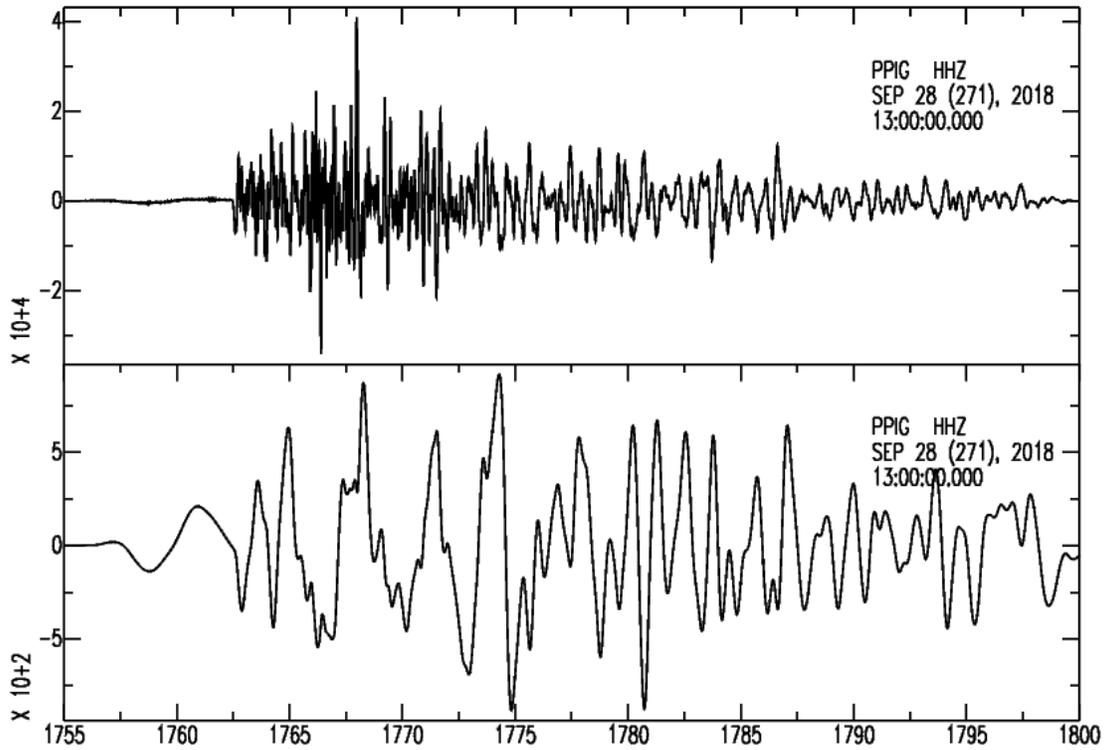


Fig. 2.11 Registro del evento explosivo cortado y filtrado a un periodo entre 1 y 5 segundos en unidades de velocidad (arriba) y desplazamiento (abajo) sin corrección instrumental unidades despreciables.

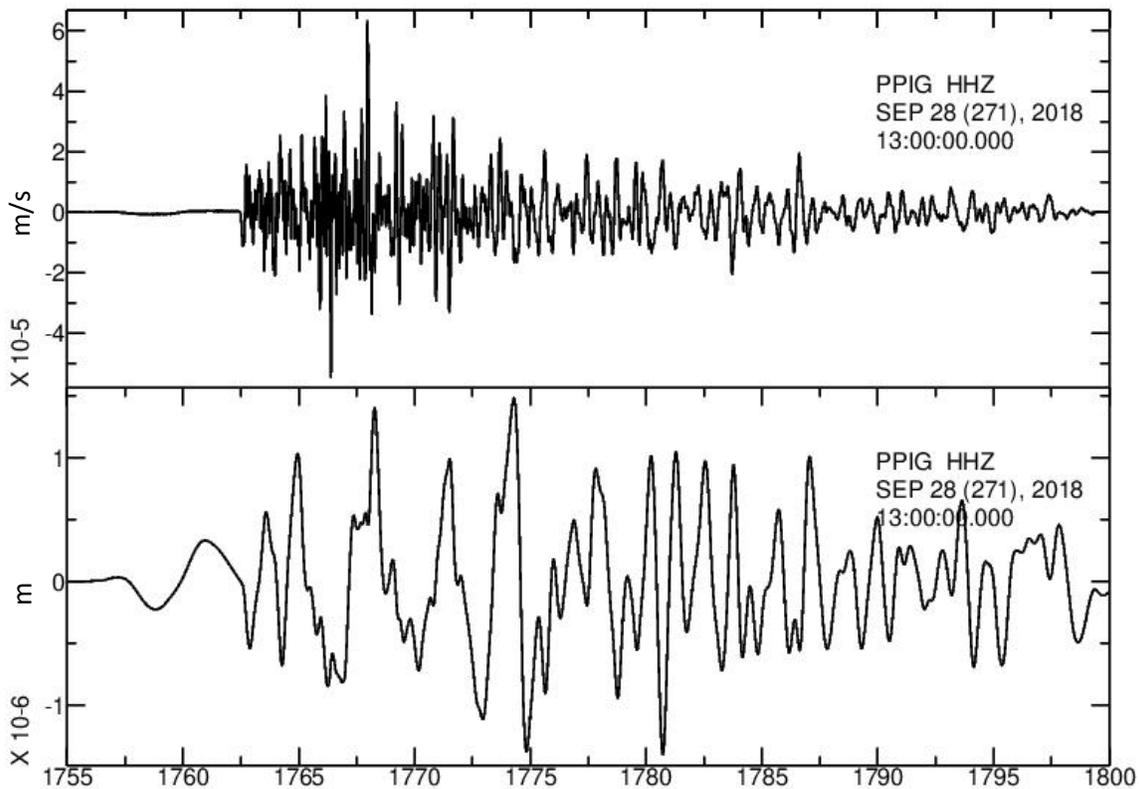


Fig. 2.12 Registro de evento explosivo cortado y filtrado entre periodos de 1 y 5 segundos en unidades de velocidad (arriba) y desplazamiento (abajo) con corrección instrumental unidades m/s y m respectivamente

En este registro se determina la componente vertical del vector del desplazamiento midiendo la amplitud máxima de desplazamiento, en este caso la amplitud máxima de desplazamiento es 1.48×10^{-6} m. Se aplica el mismo método al resto de las componentes y se obtiene el vector de desplazamiento de la estación Tlamacas, a lo cual se repite el procedimiento a las estaciones disponibles que hayan registrado el evento.

Para determinar el desplazamiento generado por una fuente magmática se puede utilizar señales de eventos de muy largo periodo comúnmente asociados con actividad magmática e hidrotermal (Kumagai, 2010). Se hace generalmente una inversión de forma de onda o de amplitud LP y VLP para determinar el mecanismo focal y la localización en particular, su profundidad (Kumagai, 2011), también por método de localización de amplitud de fuente (Kumagai, 2011; 2013) gracias a su comportamiento de desplazamiento en escalón que pueden presentar (Thun, 2015).

Para esto, a la señal sísmica registrada, se le debe remover la firma instrumental de tal forma que las unidades de registro sean de velocidad (m/s) a lo cual el registro debe ser integrado con lo cual las unidades en el registro pasarán a ser metros.

A partir de este registro se tiene el desplazamiento superficial del evento el cual se usará en los modelos de deformación hidrostática que se presentan en los siguientes capítulos.

Señales de desplazamiento obtenidas por estaciones de GPS de alta resolución pueden ser utilizadas de la misma forma, sin el problema de sobre estimación del espectro de bajas frecuencias que sucede al integrar señales sísmicas, sin embargo, el uso de estaciones GPS conllevan 2 problemas:

- La poca instrumentación en estaciones de monitoreo volcánica en comparación con sismómetros y acelerómetros debido a que es una técnica de implementación reciente y a la diferencia en resolución.
- La presencia de ruido de posición en la banda de 20 a 1000 segundos (Larson, 2007) que requiere más trabajo de procesamiento para eliminar antes de poder utilizar esta señal, en esta banda se encuentran los eventos LP y VLP que se usaran para determinar la fuente magmática

Considerando las ventajas y desventajas de cada tipo de monitoreo la literatura de monitoreo volcánico, concuerda en que es recomendable complementar los datos de desplazamiento obtenido por ambos tipos de equipos cuando se es posible para permitir obtener la mayor cantidad de datos en el campo.

Los eventos de largo periodo pueden aparecer en varias fases de la actividad volcánica, pueden estar asociados a la fase pre-eruptiva (acumulación de magma con diferencial de presión positivo) o la fase post-eruptiva (liberación súbita de material y con diferencial de presión negativo), sin embargo, la profundidad de la fuente es constante pues están asociados a movimientos no destructivos del incremento y decremento de volumen el cual regresa a su estado original (Legrand, 2005).

También se pueden usar, junto con los datos de sismómetros, otros tipos de herramientas tales como inclinómetros y medidores de desplazamiento (strainmeter), pues estos tres equipos usados en conjunto son capaces de obtener señales de alta resolución muy superiores a la resolución de las técnicas anteriormente descritas, tales como GPS, InSAR y fotogrametría, por nombrar algunas.

Sin embargo, estas herramientas tienen la desventaja de ser mediciones puntuales lo cual limita su capacidad de resolver el problema de fuente a partir de las observaciones superficiales, con base en la cantidad de mediciones que se puedan realizar en el campo.

El estudio de eventos de periodos largos asociados con el movimiento de fluidos permite determinar las características principales de la fuente (localización presión y forma) sin necesidad de considerar las heterogeneidades del medio. Efectivamente si las heterogeneidades del subsuelo tienen dimensiones muy inferiores a la longitud de onda, el cual generalmente es el caso debajo de los volcanes, se pueden despreciar (Aki & Richards 2002).

Los eventos LP asociados a eventos de desgasificación en el volcán Popocatepetl están registrados con periodos entre 15-70 segundos (Chouet, 2005) mientras que se tiene registrado eventos VLP con periodos de 30 segundos que suceden después de grandes eventos de largo periodo (Arciniega, 2012)

Se conoce que las heterogeneidades de un volcán llegan a tener dimensiones capaces de generar ruido en eventos LP capaces de crear problemas entre la solución real y la de mejor ajuste (Aster, 2008) para volcanes como el monte Etna, sin embargo, no hay evidencia aun que los eventos LP registrados en el Popocatepetl sufran de este tipo de distorsiones.

Este trabajo utiliza datos sintéticos que simulan datos de desplazamiento obtenidos en campo mediante el procesamiento de señales de eventos VLP o de GPS, a partir de los cuales se determinara la ubicación de la fuente y los parámetros del mecanismo focal de la misma.

En este caso se puede usar un medio de propagación simple, como un semi-espacio, lo que haremos en este trabajo.

2.2 Análisis de modelos de desplazamiento superficial

A partir del estudio previo de los patrones de desplazamiento del suelo en volcanes se han generado modelos generales de fuentes hidráulicas (Fujita, 1995), las cuales se representan como regiones de roca sólida con cierto porcentaje de su material reemplazado o transformado en material magmático, a partir de ahora lo llamaremos reservorio magmático, para caracterizar los desplazamientos del suelo a partir de este tipo de fuentes en particular en estas zonas de intrusión e interacción de magma se han observado procesos de inflación en la superficie asociados al aumento de relación entre material fundido sobre el sólido (Chaussard, 2012).

Los modelos de desplazamiento pueden ser simples, a partir de formas geométricas determinadas tales como las que se describen enseguida.

2.2.1 Modelo esférico (Mogi, 1958)

Es un modelo que simula una fuente esférica hidrostática con presión isostática, que se expande en todas direcciones a la misma velocidad. En la Fig. 2.10 se presenta el modelo propuesto por Dzurisin, 2007

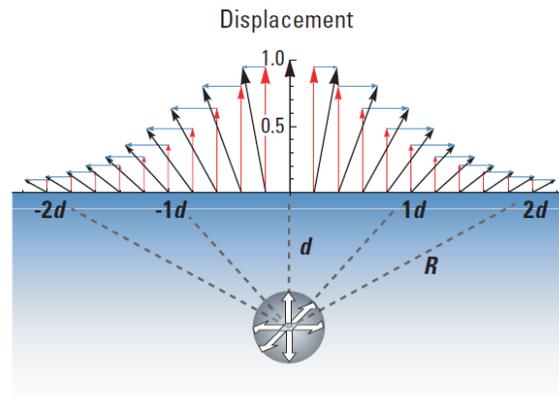


Fig. 2.14 Ilustración de modelo de desplazamiento debido a una fuente esférica (Imagen Dzurisin 2007).

El desplazamiento total superficial \mathbf{U}_R (norma de los vectores negros en la figura 2.10) causada por una fuente hidrostática en un semi espacio plano, considerando que el radio α es mucho más pequeño que su profundidad f , está dada por la ecuación:

$$u_i = \frac{3\alpha^3 P}{4\mu} \frac{d}{(f^2 + d^2)^{3/2}} \quad i = 1,2$$

$$u_3 = \frac{3\alpha^3 P}{4\mu} \frac{f}{(f^2 + d^2)^{3/2}}$$

Ecuación 2.01: Modelo de desplazamiento superficial para una fuente puntual esférica hidrostática

donde u_i representa el desplazamiento en dirección del eje R sobre la superficie y u_3 el desplazamiento vertical sobre la superficie respectivamente, α es el radio de la esfera, P se refiere al cambio de la presión, μ es el módulo de rigidez, d es la distancia radial del centro de la esfera al punto de medición y f es la profundidad del centro de la esfera respecto a la superficie.

2.2.2 Modelo elipsoidal (Bonaccorso & Davis 1999)

Es un modelo basado en la esfera de Mogi, convertido en un elipsoide con un semieje vertical mucho más grande que los otros dos horizontales que tienden a ser iguales, haciendo que el elipsoide tienda a la forma de un cilindro mostrado en la figura 2.11, modelado por la ecuación 2.02.

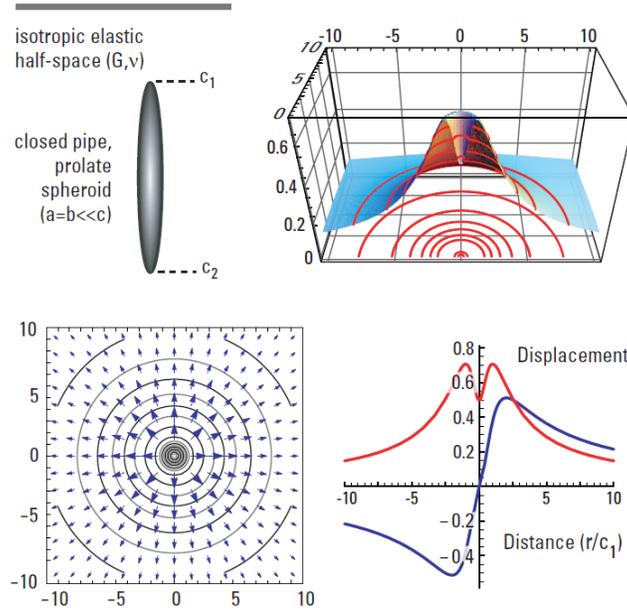


Fig. 2.15 Desplazamiento radial y vertical de la superficie de un semi-espacio debido a una fuente puntual y elipsoidal (imagen de Dzurisin 2007).

$$U_i = mx_i \left\{ \left[2(1 - 2\nu) \frac{\xi_3}{a^2 R} \right]_{c_1}^{c_2} - n \left[\frac{\xi_3^3}{a^2 R^3} - 2\nu \frac{\xi_3}{a^2 R} \right]_{c_1}^{c_2} \right\} \quad i = 1, 2$$

$$U_3 = m \left\{ \left[2(1 - 2\nu) \frac{1}{R} \right]_{c_1}^{c_2} - n \left[\frac{3 - 2\nu}{R} - \frac{a^2}{R^3} \right]_{c_1}^{c_2} \right\}$$

Eq. 2.02 Modelo matemático de desplazamiento superficial para una fuente elipsoidal que genera una presión hidrostática en un semi-espacio.

Donde U_i representa las dos direcciones de desplazamiento horizontal, U_3 la componente de desplazamiento vertical, a^2 la distancia horizontal del punto de medición a la fuente, x_i la dirección vectorial horizontal, ν es la relación de Poisson, $n=1/3$, ξ_3 es la profundidad al centro de la fuente, $R = (x_1^2 + x_2^2 + \xi_3^2)^{\frac{1}{2}}$, $m = \frac{3P}{4\mu} d^2$ donde P es el diferencial de presión entre la chimenea y el medio, μ es el módulo de rigidez, d es el radio del elipsoide en sus semiejes menores c_1 y c_2 representan la profundidad mayor y menor respectivamente del elipsoide en su eje vertical, $n=1/3$.

2.2.3 Modelo de Sill (Davis 1983)

Es un modelo basado en la esfera de Mogi donde el semieje vertical es mucho menor a los semiejes horizontales, simulando un *sill*. Los vectores de la imagen 2.12 representan las direcciones preferenciales de desplazamiento generados por la fuente.

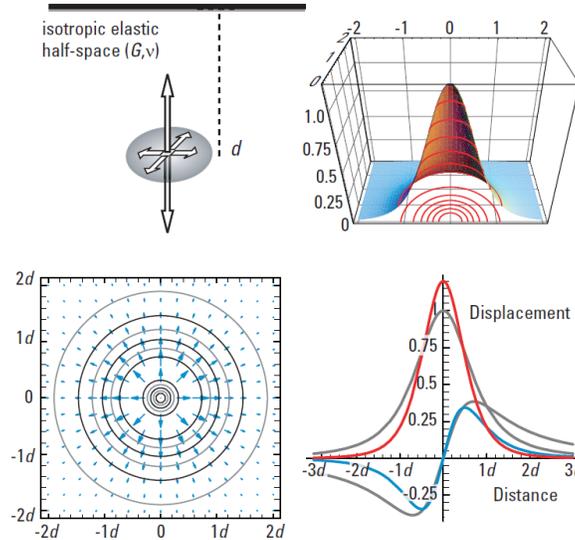


Fig. 2.16 Desplazamiento radial y vertical de la superficie de un semi-espacio debido a una fuente puntual en forma de sill (cuerpo horizontal con presión ascendente uniforme). (Imagen de Dzurisin, 2007)

$$u_i = \frac{3M_0 x_i f^2}{2\mu\pi R^5}$$

$$u_3 = \frac{3M_0 f^3}{2\mu\pi R^5}$$

Eq. 2.03 Modelo matemático de desplazamiento superficial para una fuente de sill que genera una presión hidrostática en un semi-espacio.

donde M_0 es el momento equivalente a la apertura de la falla multiplicado por el área; R es la distancia radial del centro del sill al punto de medición; f es la profundidad; u_i , son los vectores de desplazamiento horizontales y u_3 es el vector de desplazamiento vertical.

2.3 Aplicación y consideraciones

En este trabajo se caracterizó el reservorio magmático. Para este fin se implementaron subrutinas que simulan el análisis de eventos de periodo muy largo (VLP) comúnmente asociados al movimiento de fluidos (magma, agua y/o gas) dentro de un volcán (Cannavo, 2012). Se generaron señales de desplazamiento sintéticas con características conocidas, y mediante métodos inversos se intentó encontrar de nuevo las características de la fuente.

Es importante recordar que los mecanismos focales que observamos en un volcán serán por lo general de naturaleza más compleja que los mecanismos observados en sismos (Del Pezzo 1987). En los sismos se observa un doble par de fuerzas, mientras para un sismo volcánico, no necesariamente es un doble par de fuerzas (Aster 2008).

Capítulo III: Caso de Estudio

3.1.1 Marco tectónico

El caso de estudio de esta investigación es el volcán Popocatépetl, localizado en el centro de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (FVTM), siendo ésta uno de los rasgos geológicos más característicos del país, originada por la zona de subducción de la placa de Cocos bajo la placa Norteamericana. Con una extensión de más de 1000 km E-W y una cobertura irregular que abarca desde los 8- 230 km NS en una dirección preferencial WNW-ESE.

La FVTM consiste en una serie de campos monogenéticos a todo lo largo de la región, contando con más de 3000 estructuras volcánicas, y también los grandes volcanes poligenéticos. Este rasgo geológico se extiende desde el océano Pacífico al oeste, San Blas y Bahía de Banderas, hasta el Atlántico en el oeste, Palma Sola, Veracruz (Demant, 1978). El ángulo entre el contacto de la zona de subducción (NNW-SSE) y la dirección del campo de volcanes de la FVTM (E-W) es aproximadamente de 15° y se debe a la complejidad de la geometría de las placas involucradas, lo que hace que la FVTM y la zona de subducción no sean paralelas (Fig. 3.01).

Entre los volcanes poligenéticos activos más característicos de la región se encuentran: Pico de Orizaba, Ceboruco, Volcán de Colima y Popocatépetl por nombrar algunos.

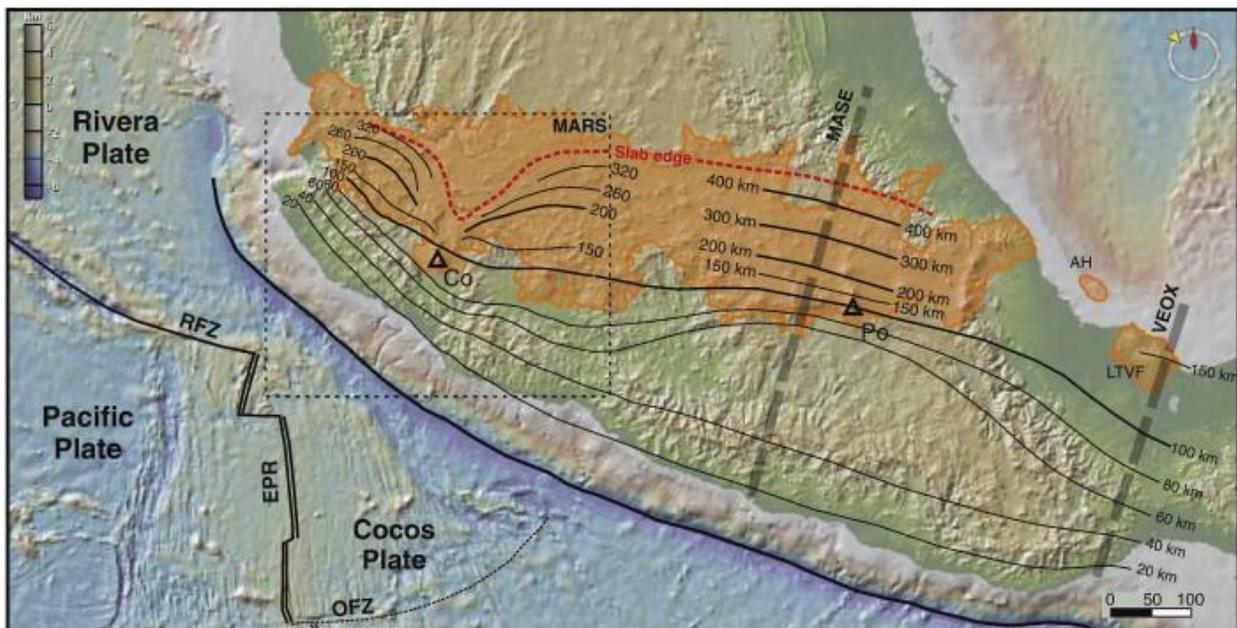


Fig. 3.01 Representación de la Faja Volcánica Trans-Mexicana y la anisotropía de subducción representada en líneas isométricas de profundidad de la placa (Figura Ferrari 2012).

3.1.2 Marco Geológico

Podemos dividir la FVTM de acuerdo a sus cuatro episodios de formación:

La primera en el Mioceno temprano al tardío caracterizada por registros de actividad predominantes en el centro de la franja volcánica con alta concentración de silicatos.

Seguido por un pulso máfico del Mioceno tardío al Plioceno temprano extendido a todo lo largo de la forma actual del país del Golfo al pacífico.

Un episodio de volcanismo silícico compuesto principalmente por la formación de domos, calderas e ignimbritas, enfocado en un área de menor cobertura sobre la franja enfocada en el centro y oeste del país en 2 zonas principales

El cuarto episodio está comprendido entre el Plioceno tardío y el Cuaternario con una amplia variedad de concentraciones de alcalinos y silicatos. La figura 3.02 muestra las ubicaciones de los afloramientos de cada episodio volcánico y las concentraciones de alcalinos y silicatos a partir de un número de muestras obtenidos de cada afloramiento a lo largo de toda la región (Ferrari, 2012).

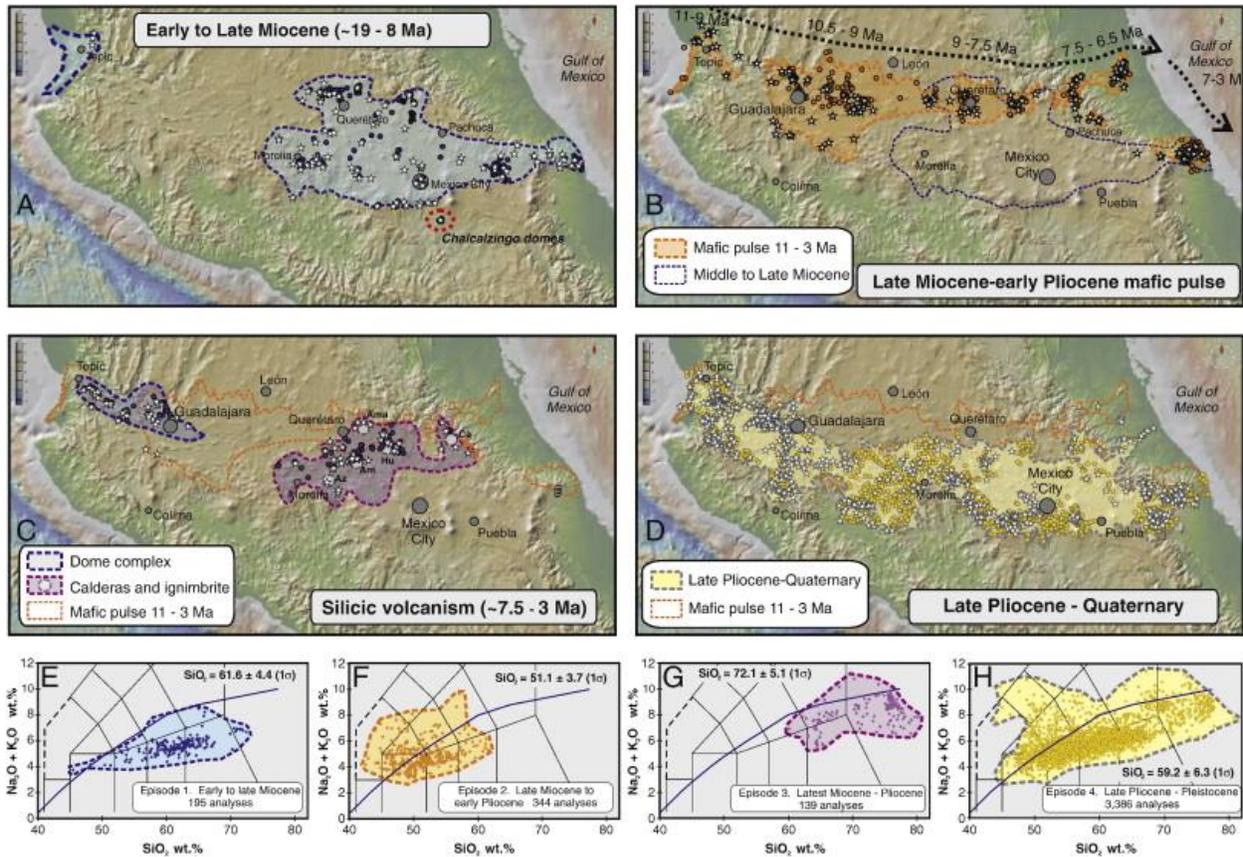


Fig. 3.02 Gráfico de localización y extensión de los distintos episodios volcánicos (A, B, C, D) y gráficos de concentración de alcalinos/silicatos en cada uno de los episodios (E, F, G, H) (Figura Ferrari 2012).

3.1.3 Marco volcánico

Con una elevación de 5450 msnm (metros sobre el nivel medio del mar) el Popocatepetl es el segundo volcán más alto en el territorio mexicano, considerado como uno de los volcanes de mayor riesgo para nuestro país. Perteneciente al magmatismo Plio-Cuaternario, el cual formó lo que hoy se conoce como Sierra Nevada, con un área de 500 km² aproximadamente al ser un estrato volcán su edificio volcánico ha estado en constante cambio como resultado de crecimientos y colapsos de los edificios volcánicos antiguos sobre los cuales yace el actual edificio volcánico.



Fig. 3.03 Capturas del volcán Popocatepetl y depósitos piroclásticos de la actividad de 1997.

El edificio volcánico primigenio, denominado Nexpayantla originado por una combinación de flujos andesíticos-dacíticos y grandes domos dacíticos, fue destruido por una erupción pliniana hace aproximadamente 200,000 años. Otros dos edificios volcánicos, el Ventorrillo y el Fraile, de tipos andesíticos se construyeron sobre el Nexpayantla y fueron destruidos subsecuentemente por erupciones plinianas, hace aproximadamente 23,000 y 14,000 años respectivamente (CENAPRED, 2014).

El Popocatepetl es un estrato volcán de 730,000 años resultado de una serie de erupciones repetitivas y violentas con grandes periodos de duración (entre 1000 a 2000 años) para las erupciones comprendidas en los periodos 10,000-8,000 B.P. 5000-3800 B.P. En nuestra época (los últimos 3000 años), el volcán ha tenido una serie importante de pequeñas explosiones acompañadas de una sismicidad local y emisión de ceniza.

El edificio actual fue construido por varias etapas de actividad efusiva y explosiva (Fig. 3.03). Una vez creado el edificio volcánico, la actividad se caracterizó por erupciones freato-magmáticas, algunas siendo columnas plinianas de hasta 25 km de altura.

La última erupción importante, previa a la actividad de 1994, fue en el 1354 A.D. con varios asentamientos prehispánicos afectados por lahares. Después de esta actividad se conoce que el volcán ha tenido 13 erupciones pequeñas y 3 moderadas en los últimos 500 años (Espinasa, 2012).

Con aproximadamente 25 millones de personas viviendo en a menos de 100 km del edificio volcánico (CENAPRED 2012), un evento eruptivo del volcán podría causar afectaciones considerables a los habitantes de esta región, en particular la Ciudad de México y la ciudad de Puebla (Fig 3.04). Es por esta razón que CENAPRED y el Instituto de Geofísica han mantenido un monitoreo constante del volcán.



Fig. 3.04 Vista del volcán Popocatepetl desde la ciudad de México (izquierda) y la ciudad de Puebla (derecha)

El volcán es alimentado de magma proveniente del manto a través de fracturas y fallas locales que funcionan como ductos magmáticos por donde el material asciende interactuando con la roca local formando el reservorio interno el cual se acumula e interactúa con la roca a su alrededor, así como con los niveles freáticos, hasta alcanzar un punto crítico donde sucede un evento eruptivo, exhalación de gases, derrumbes, fumarolas expulsión de material incandescente entre otros.

Determinar el origen ubicación y estado de reservorio es de suma importancia para la elaboración de un atlas de riesgo y el monitoreo en tiempo real de la actividad volcánica, para esto ha habido gran cantidad de trabajos dedicados a este objetivo, tomando diferentes formas para determinarla, tales como:

Flujos de recarga de CO₂ y SO₂ como consecuencia de recarga de material máfico en el reservorio (Delgado-Granados, Wallace et.al. 2009)

Análisis de señales sísmicas de eventos de largo periodo como consecuencia del flujo interno de fluidos (Arciniega & Chouet, 2003)

Caracterización de campos de desplazamiento InSAR para determinar desplazamientos superficiales (De la Cruz et al 2011)

3.2 Metodología

Este trabajo de tesis pretende construir una herramienta para complementar el monitoreo del volcán Popocatepetl con la finalidad de caracterizar (localización y mecanismo focal) la fuente de explosiones volcánicas a partir de desplazamientos en el suelo registrados con sismómetros asumiendo un modelo de medio elástico alrededor del reservorio con una fuente de sobrepresión constante (Lenline, 2008).

Este trabajo es la continuación del trabajo de tesis previo de licenciatura realizado en un semi-espacio geométrico ideal el cual asemejaba al caso del volcán de Colima (Rendon, 2012). Añadiendo ahora un modelo de topografía real para implementar en un método inverso para determinar la localización y el mecanismo focal de la fuente.

Hay muchas formas de resolver el problema de la influencia de la topografía para la inversión de los parámetros de la fuente (localización y mecanismo focal). Desde los modelos iniciales los cuales consideran un semiespacio plano (Mogi, 1958; Davis, 1983; Okada, 1985; McTigue, 1988) donde se admite que hay diferencias en la estimación de parámetros de mejor ajuste y los datos reales.

Esto ha traído una serie de investigaciones que han demostrado que estos modelos en el semiespacio plano tienden a estimar con grandes errores los parámetros de la fuente tanto en su localización como en

sus parámetros de mecanismo focal (e.g. Cayol y Cornet, 1998; Almendros, 2003; Trasatti et al. 2003; Lungarini et al. 2005).

Para resolver este problema, se han propuesto varias metodologías a través de los años, cada método con sus ventajas y desventajas, las herramientas más usadas para solucionar el problema de la topografía y heterogeneidad del espacio son el método de condiciones de frontera y métodos numéricos de elemento finito. Estos métodos han ganado popularidad pues son tan robustos que son capaces de considerar multiplicidad de reservorios, topografía y distribución irregular de las propiedades mecánicas de la roca huésped (Cayol et.al. 1998; Gaffney et.al. 2006; Geysler et. al. 2015; Walter et. al. 2017).

Recientemente se han elaborado herramientas en la plataforma Matlab para determinar mediante inversiones no lineales los parámetros de fuente (Battaglia 2013) para fuentes de forma esférica de sill y de dique en el semi-espacio plano, así como para fuente esférica en un espacio con topografía. Este trabajo utilizará una inversión de Monte Carlo sobre una malla de puntos, como se explicará más adelante, para fuentes de modelo esférico, de dique y un modelo combinado, tomando en cuenta la topografía.

Uno de los grandes problemas de este tipo de métodos numéricos es el tiempo de procesamiento que se requiere para obtener soluciones con niveles de estimación aceptables, es un problema ligado a la capacidad de cómputo. En esta investigación se espera generar una herramienta para caracterizar el reservorio magmático activo previo a una erupción y que sea usada para tomar decisiones preventivas, por lo que se ha enfocado en métodos de cálculo rápido.

Para que la herramienta tuviese una velocidad de procesamiento óptima se decidió considerar el procesamiento de señales registradas de eventos VLP donde la longitud de onda es mayor a las heterogeneidades del suelo, lo que permite considerar un espacio homogéneo entre la fuente y el sensor. Se conoce que las heterogeneidades del Popocatepetl afectan el análisis de señales sísmicas con periodos menores a 1 s (Arciniega et.al. 2012) mientras que los eventos LP originados por la desgasificación tiene periodos que oscilan entre 15 y 70 s (Chouet et. al. 2005), los eventos VLP asociados al flujo de magma tienen un rango de periodo más alto. También se utiliza un método de Monte Carlo para la inversión, esto permite analizar diferentes posibles posiciones de fuente con un conjunto de valores aleatorios de parámetros de mecanismo focal para determinar los mejores resultados.

Se hizo un programa en la plataforma MATLAB, que lee el modelo topográfico real del volcán Popocatepetl. En cada punto de la topografía se calculó el desplazamiento del suelo, a partir de un modelo de presión hidrostática (modelo de Mogi). Esta parte corresponde al análisis del problema directo (i.e. calcular desplazamientos conociendo la localización y el mecanismo de las fuentes) la cual en la práctica será sustituido por datos obtenidos en campo.

Con este modelo de desplazamiento directo se cuantificó la diferencia entre los desplazamientos de suelo entre el semiespacio plano y el modelo topográfico real del Popocatepetl.

El problema a resolver en esta investigación es un problema inverso, es decir, determinar la localización y mecanismo focal de una fuente explosiva (vectores de matriz de esfuerzos normales positivos en todas direcciones) hidráulica que genera los eventos VLP conociendo los desplazamientos del suelo registrados en varias estaciones de monitoreo del Popocatepetl, en nuestro caso cinco estaciones sísmicas.

El método que usamos para este objetivo es el de Monte Carlo, con tiempos rápidos de cálculo (Kochanski, 2005). Se buscan los parámetros de la fuente (radio y presión) de manera aleatoria en una malla regular

de posibles ubicaciones de la fuente. En una primera etapa se calculó el desplazamiento sintético correspondiente a una fuente conocida, en una malla regular del modelo de elevación digital para simular un número considerable de estaciones sísmicas y regularmente distribuidas en el espacio. El método inverso fue capaz de encontrar correctamente tanto la localización como el mecanismo focal de la fuente. En una segunda etapa se procedió a probar una serie de diseños de redes de monitoreo que simularan distintos posibles escenarios ideales de monitoreo para determinar su efectividad.

En una tercera etapa se usó la configuración actual de las cinco estaciones sísmicas de banda ancha que funcionan adecuadamente del volcán Popocatepetl las cuales se enlistan en la tabla 3.01. Se utilizaron como referencia para simular datos de desplazamiento sintéticos y proceder con las pruebas de localización y parametrización de la fuente. Los cuales en pruebas reales se obtendrán mediante el análisis de las señales sísmicas obtenidas en cada estación de banda ancha, una vez tratadas con corrección instrumental se tendrá el registro de velocidades el cual al integrarse se obtendrá una medición de desplazamiento de largo periodo

Se buscó después cómo mejorar los resultados añadiendo algunas estaciones sísmicas más. Para lo cual se realizó una prueba donde se incrementan ligeramente el número de estaciones con las consideraciones obtenidas mediante los modelos de monitoreo ideales.

Estación	Institución	Código	Tipo de equipo
Popocatepetl	SSN	PPIG	Banda Ancha
Canario	CENAPRED	PPP	Banda Ancha
Chipiquixtle	CENAPRED	PPX	Banda Ancha
Colibrí	CENAPRED	PPC	Banda Ancha
Encinos	CENAPRED	PPM	Banda Ancha

Tabla 3.01 Estaciones sísmicas de banda ancha instaladas sobre el volcán Popocatepetl, con nombre oficial, institución a cargo de manejarla y código de operación

Una vez que se probaron los distintos arreglos de redes se estudió el efecto de añadir ruido sobre los desplazamientos sintéticos usados para obtener los resultados de la inversión.

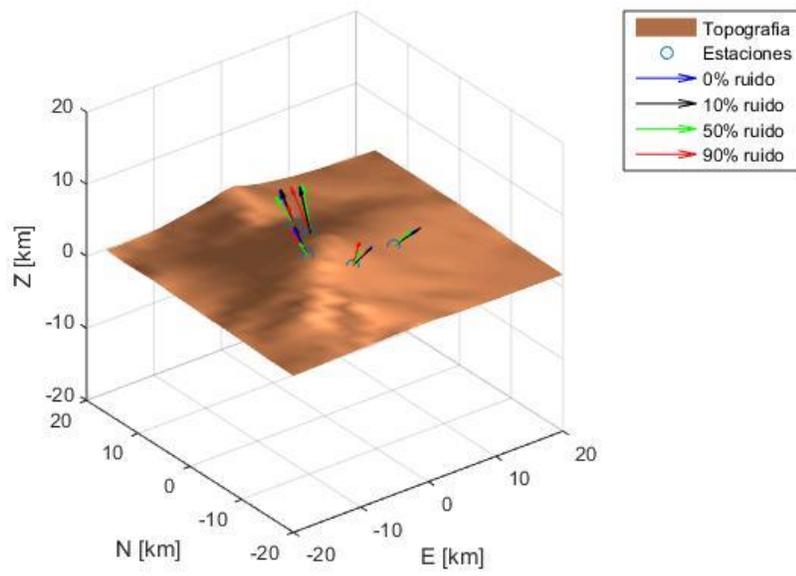


Fig. 3.05 Representación de topografía del volcán Popocatépetl, con las cinco estaciones de monitoreo de banda ancha instaladas y vectores de desplazamiento con diferentes niveles de ruido.

Capítulo IV: Método directo modelo de desplazamiento causado por una fuente de presión hidrostática esférica (Mogi) y modelos complejos

4.1 Análisis de modelo de desplazamiento simple en el espacio plano

Con el uso de la Eq. 2.01 se corrieron simulaciones de desplazamiento para determinar la efectividad que posee el cálculo de los desplazamientos mediante esta herramienta, así como la comparación entre el modelo plano y el modelo con topografía real. Considerando que los registros de volcanes activos previos a una actividad eruptiva han registrado diferenciales de presión entre 50 MPa a 200 para estratovolcanes en Islandia Etiopía Hawái y Norte América (Tait, 1988, Magee et al, 2018) sin embargo estudios sobre el ascenso de diques en estratovolcanes en Islandia ha mostrado que desde presiones negativas en relación a la presión litostática, se pueden apreciar incrementos en la actividad que conllevan a erupciones y exhalaciones de gases (Buck et. al.2006).

Se utiliza una fuente ideal esférica de 1 km de radio a 3 km de profundidad bajo el nivel medio del mar con un diferencial de presión de 1 Mpa, con un volumen total de $\frac{4}{3}\pi [km^3]$.

Se consideran volúmenes de reservorio menores a las fuentes determinadas por Mogi en su estudio inicial (Mogi, 1958) como un estimado conservador del volumen de reservorio, y también es importante considerar los límites elásticos del volcán como se ha determinado en estudios previos para considerar que los desplazamientos simulados no excedan escenarios físicamente posibles (Ramirez Olvera, 2003).

Estos datos se consideraron a partir del análisis de las características de fuentes obtenidas en trabajos previos (Mogi, 1958, Buck et. al. 2006, Fudali 2013,) los cuales han determinado fuentes a profundidades oscilando entre 1 km a 10 km con radios entre 1 a 7 km para fuentes esféricas, con presiones calculadas entre 1 hasta 470 MPa, este último valor calculado como la presión final previo a la erupción del volcán Arenal en 1968 (Fudali, 2013), para las fuentes aquí utilizadas usaremos los siguientes parámetros.

Radio de fuente de Mogi: 1km

Presión de la fuente: 1 Mpa

Profundidad de la fuente esférica: 3km

Estos parámetros se usan como un estimado conservador para una fuente pequeña (Tait, 1988) considerando que los resultados obtenidos con una fuente, de dimensiones pequeñas, serán similares para una fuente con mayores parámetros de fuente, con solo diferencias en amplitud lo que permitirá determinar con mayor facilidad las señales de fuentes más grandes.

Para la simulación de una fuente que representa la intrusión de un dique de volumen mediano (Sigurdsson, 1999) se utilizarán los siguientes parámetros:

Profundidad del centro del dique: 3 km bajo el nivel del mar

Longitud del dique: 6 km (límite superior en el nivel del mar, límite inferior 6 km bajo el nivel del mar)

radio menor del dique: 125 m (radio actual del cráter)

A continuación (Figs. 4.01-4.03), se muestran los ejemplos de desplazamiento del suelo para el caso de un semi-espacio plano.

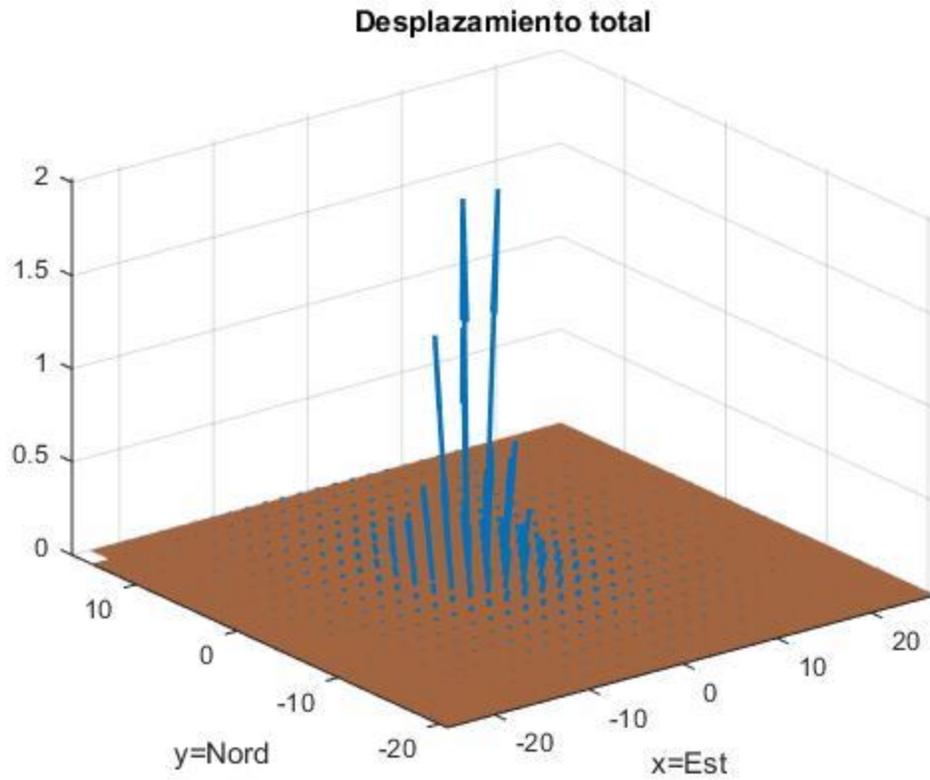


Fig.4.01 Vectores de desplazamiento (mm) sobre el semi-espacio plano para una fuente de 1 MPa de presión 1 km de radio, a 3 km de profundidad debajo de la cumbre (punto horizontal 0,0 [km]).

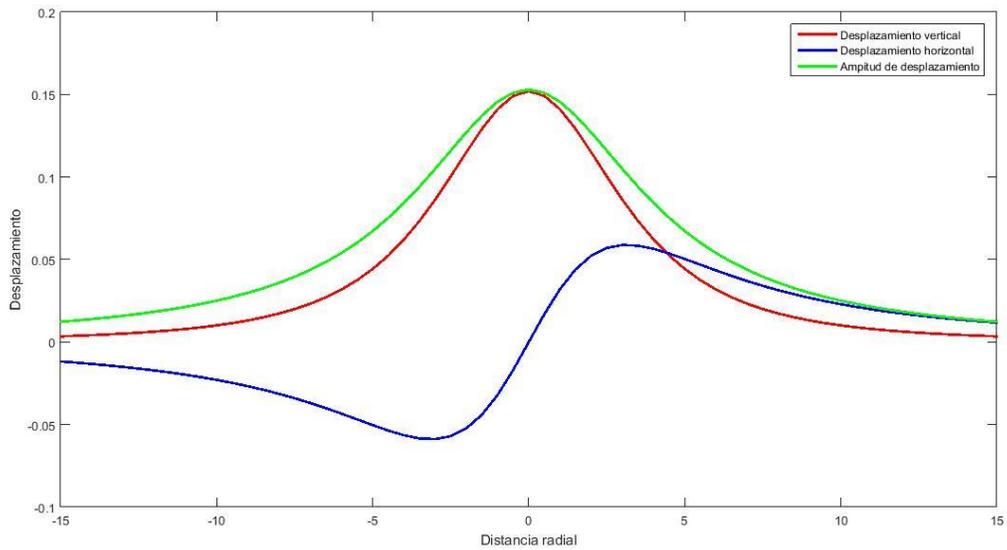


Fig. 4.02 Desplazamiento a lo largo de una dirección radial [km]. Desplazamiento en milímetros

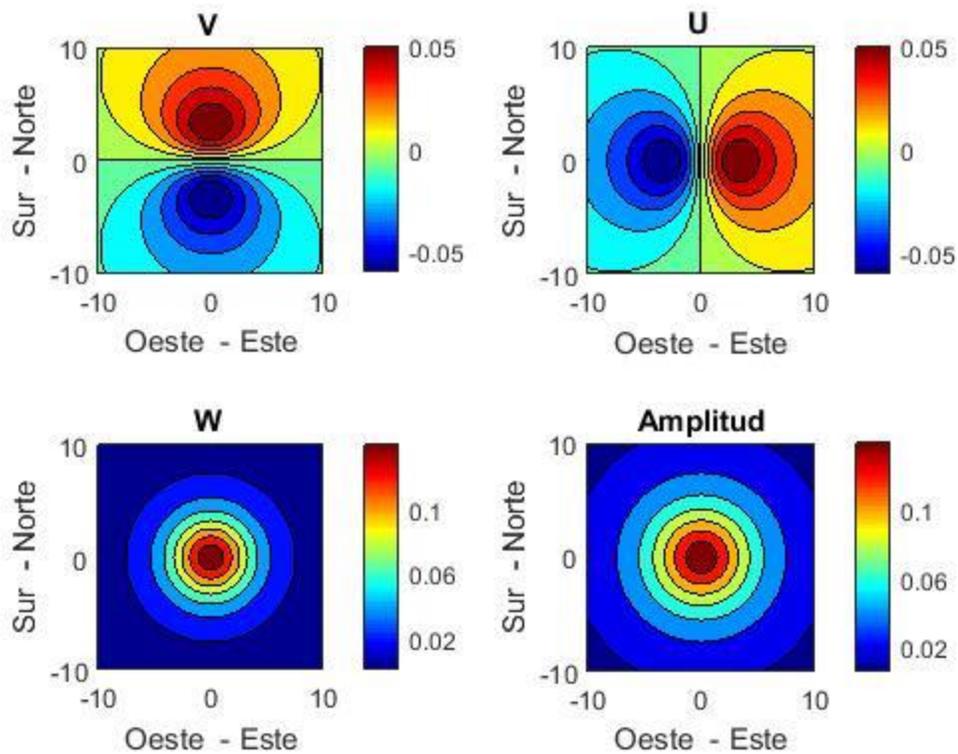


Fig. 4.03 Contornos de desplazamiento por componentes u componente de desplazamiento sobre el eje x , v componente de desplazamiento a lo largo del eje y , w componente de desplazamiento vertical [km]. Desplazamiento en milímetros

4.2 Modelo de desplazamiento esférico simple con topografía

Para esta parte se utilizó un modelo DEM (modelo de elevación digital por sus siglas en inglés) el cual fue obtenido mediante el uso de la herramienta ETOPO1 (Amante, 2009) del Centro Nacional de Datos Geofísicos (NGDC), departamento de la Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA) el cual es un modelo de relieve global con una resolución de 1 minuto-arco cartográfico creado a partir de varios conjuntos de datos los cuales fueron desplazados a un datum vertical y horizontal en común, mediante el conjunto de bases de datos de todo el mundo se creó un modelo global referenciado al datum WGS84.

Con el archivo XYZ de ETOPO1 se utilizó como el modelo inicial para el mallado interpolado de la plataforma MATLAB (Fig. 4.04) el cual se utiliza como la base para generar el modelo de deformación, primero se generó la superficie interpolada mediante un método de interpolación punto a punto, considerando la resolución presente como suficiente para esta prueba.

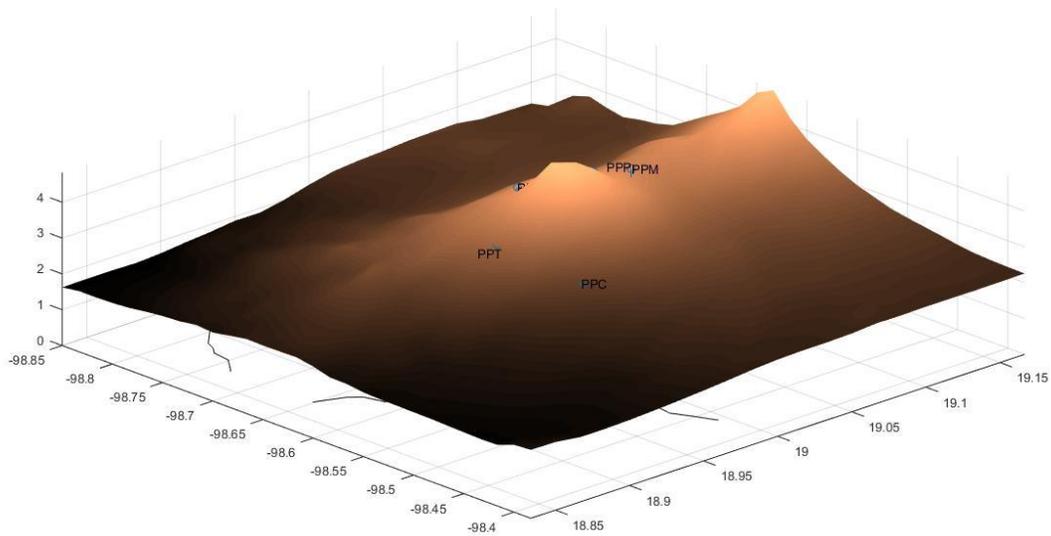


Fig. 4.04 Modelo topográfico del Popocatépetl visto desde el flanco SE construido con MATLAB, los círculos azules representan las cinco estaciones de banda ancha utilizadas.

A partir de este modelo se creó la primera simulación de datos sintéticos de desplazamiento superficial en la cual se considera cada punto de la topografía (609 puntos) como un punto de medición del desplazamiento, se simuló una fuente de presión hidrostática de 1 Mega pascal, con un radio de 1 km a 3 km de profundidad respecto al nivel medio del mar, justo bajo la cumbre del volcán. Estos parámetros con la finalidad de simular un caso clásico de una fuente cercana a la superficie debajo del edificio volcánico.

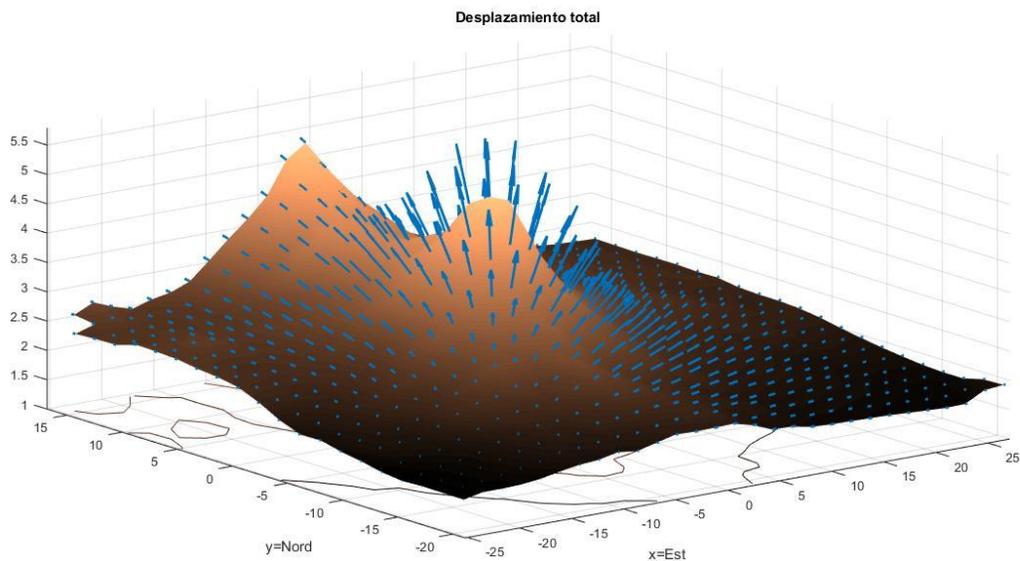


Fig. 4.05 Vectores de desplazamiento en cada punto de la topografía.

En la figura 4.05 se puede observar una tendencia donde el mayor desplazamiento se encuentra concentrada alrededor de la cumbre y gradualmente se atenúa como se comprobó en la investigación

anterior (Rendon, 2012), concluyendo nuevamente que la señal se atenúa en dirección radial desde el epicentro de la fuente, en este caso la cumbre.

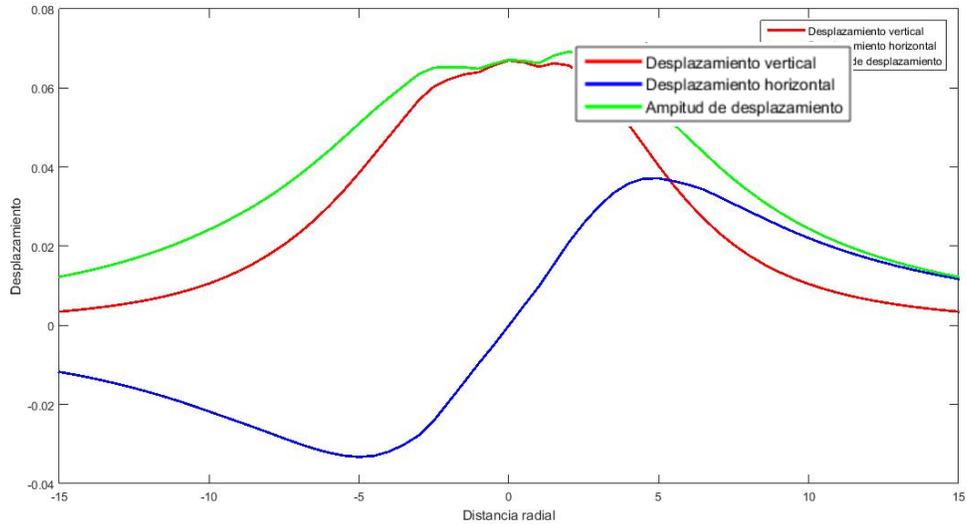


Fig 4.06 Modelo de desplazamiento del suelo. Componente vertical w (rojo), horizontal v y u (azul) amplitud del vector (verde). Desplazamiento en milímetros

Se puede apreciar claramente en la figura 4.06 tal como en los modelos de topografía simulada de la investigación anterior, un mínimo local de desplazamiento en la cumbre al ser el punto más alejado de la fuente y los puntos a su alrededor, a causa de la pendiente, con una distancia radial menor tienen un mayor efecto en el desplazamiento generado por la fuente, sin embargo en esta ocasión se observa una asimetría entre los máximos de desplazamiento locales, esto a causa de que el modelo topográfico no es una figura geométrica ideal sino la topografía real del edificio volcánico.

En la figura 4.07, se comparan ahora los patrones de desplazamiento de cada componente del vector creado por el modelo de Mogi para observar su comportamiento con la topografía.

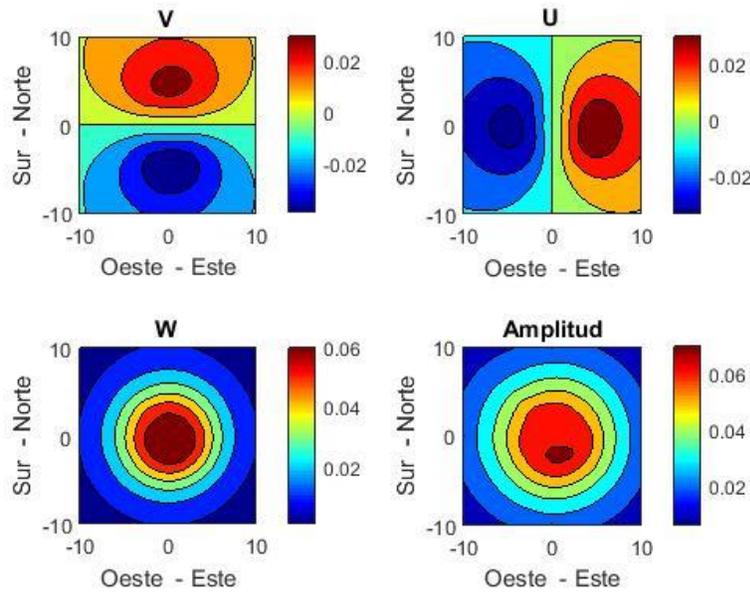


Fig. 4.07 Contornos de desplazamiento para componente v (arriba izquierda) u (arriba izquierda) w (abajo izquierda) amplitud del vector (abajo derecha). Desplazamiento en milímetros

4.3 Modelo de desplazamiento de una fuente elipsoidal

Utilizando el modelo de espacio plano y de topografía se aplicó un modelo de fuente de desplazamiento distinto, el cual considera una fuente elipsoidal, el cual asemeja el conducto del reservorio hacia el cráter conocido coloquialmente como la chimenea volcánica o pipe (Bonnaccorso, 1999) cuyo modelo matemático, derivado del modelo original de Mogi, fue definido previamente (Ec. 2.02).

Se diseñó una fuente de 250 metros de radio horizontal, 6 km de semieje mayor cuyo centro se encuentra a 3 km por debajo del nivel medio del mar debajo del cráter del volcán; resultando en un volumen de $0.5\pi [km^3]$.

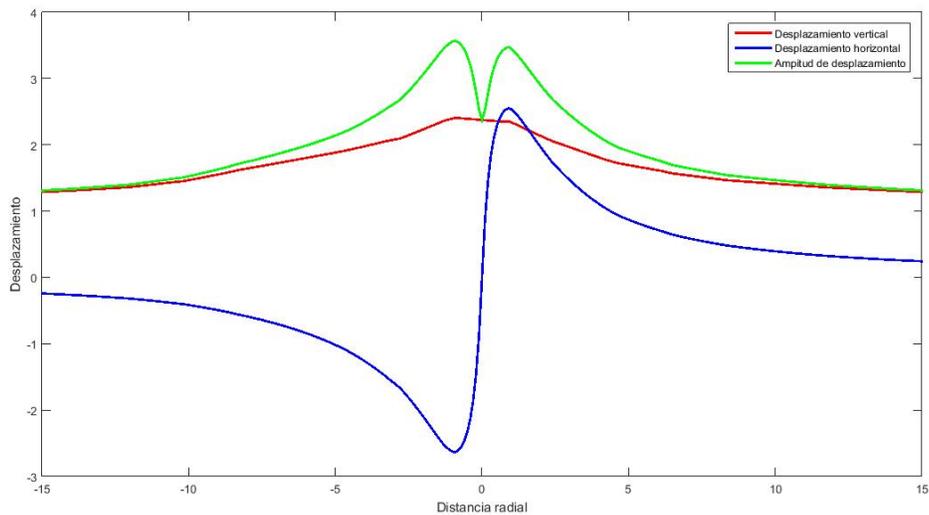


Fig. 4.09 Patrón de desplazamiento en dirección radial para el modelo de pipe. Desplazamiento en milímetros

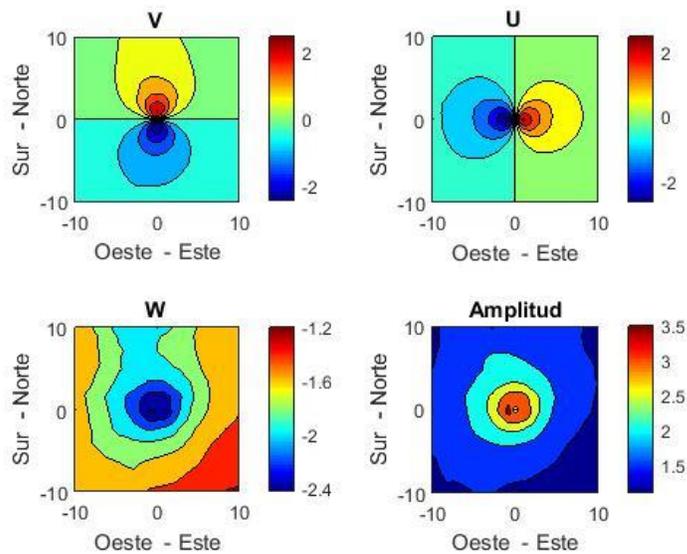


Fig. 4.10 Contornos de desplazamiento para cada componente de desplazamiento y el módulo vectorial, gráfico este componente de desplazamiento v , gráfico norte componente de desplazamiento u , gráfico U componente de desplazamiento w , gráfico amplitud, amplitud total del vector de desplazamientos. Desplazamiento en milímetros

Con este modelo se analizaron las curvas de desplazamiento en una dirección radial y en el plano X-Y que se muestran en las figuras 4.09 y 4.10.

4.4 Comparación entre fuentes simples y complejas en espacio plano y con topografía

Una vez que fueron desarrollados los modelos directos, se crearon figuras 4.11-4.13 para comparar los modelos en el espacio plano, así como su comportamiento al ser aplicado el modelo con topografía. También con estos dos modelos de desplazamiento se creó un modelo complejo de una esfera y una chimenea que asemejaría una fuente compleja, para fines de comparaciones se hizo que este modelo con el mismo volumen que el modelo esférico de Mogi, estos tres modelos son comparados inicialmente entre sí con el espacio plano y la topografía considerada.

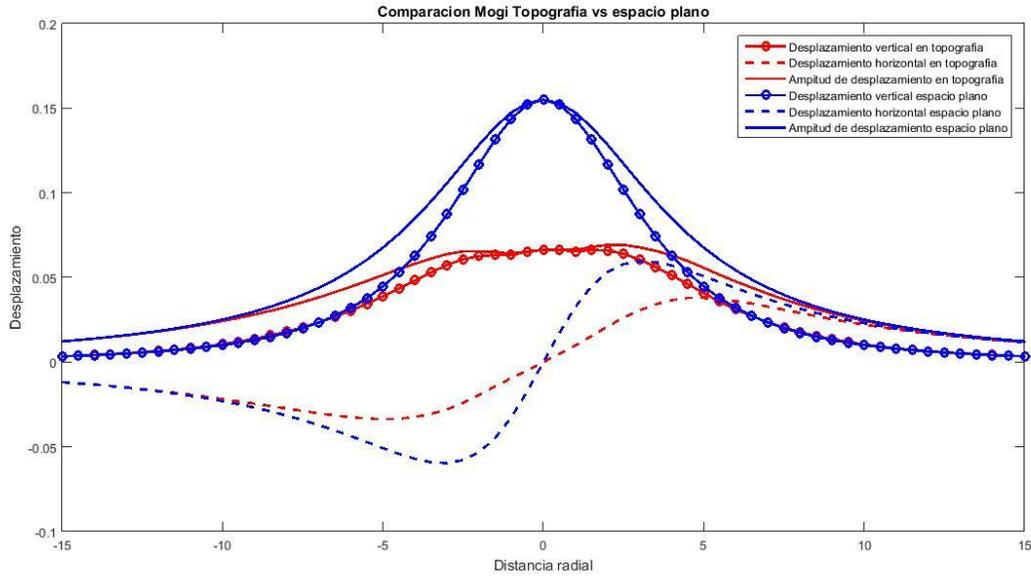


Fig. 4.11 Comparación de componentes radiales para modelo esférico de Mogi para modelo con topografía (rojo) y modelo en el espacio plano (azul). Desplazamiento en milímetros.

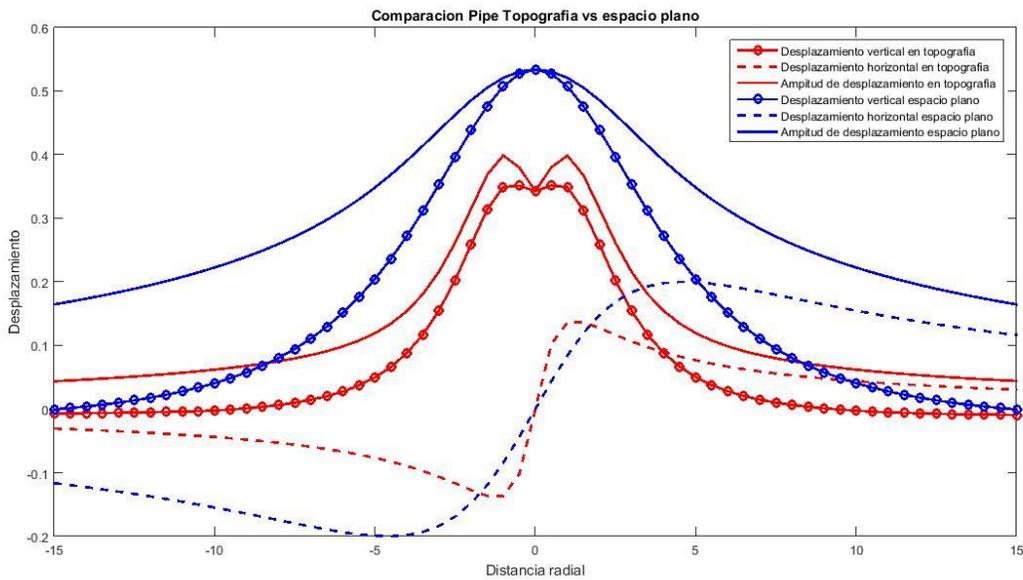


Fig. 4.12 Comparación de componentes radiales para modelo de pipe para modelo con topografía (rojo) y modelo en el espacio plano (azul). Desplazamiento en milímetros.

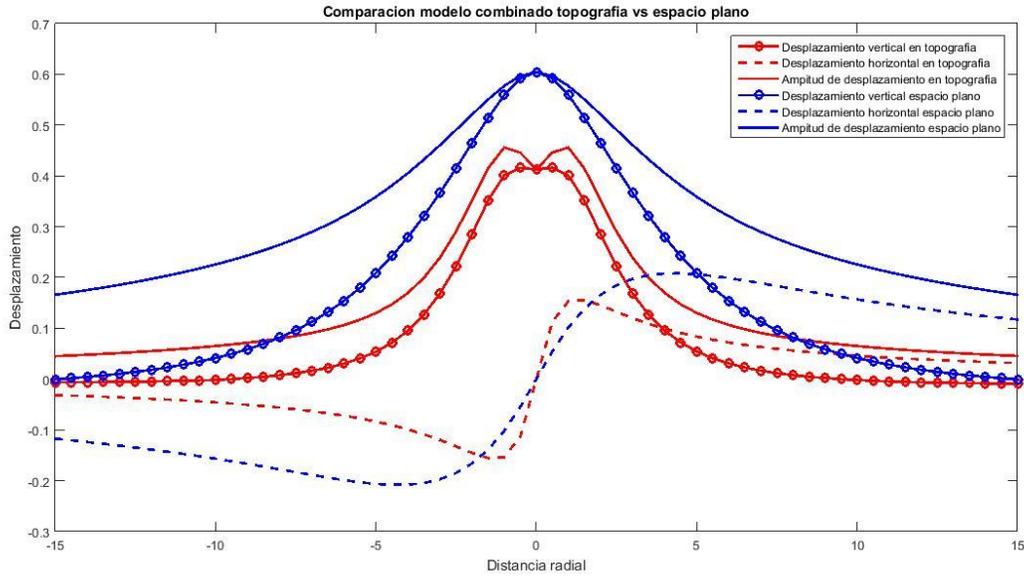


Fig. 4.13 Comparación de componentes radiales para modelo combinado para modelo con topografía (rojo) y modelo en el espacio plano (azul). Desplazamiento en milímetros.

En las figuras 4.14 y 4.15 se presentan los resultados obtenidos comparando la fuente esférica y la fuente compleja, de una esfera y un pipe, en un ambiente de espacio plano, así como en un ambiente con topografía.

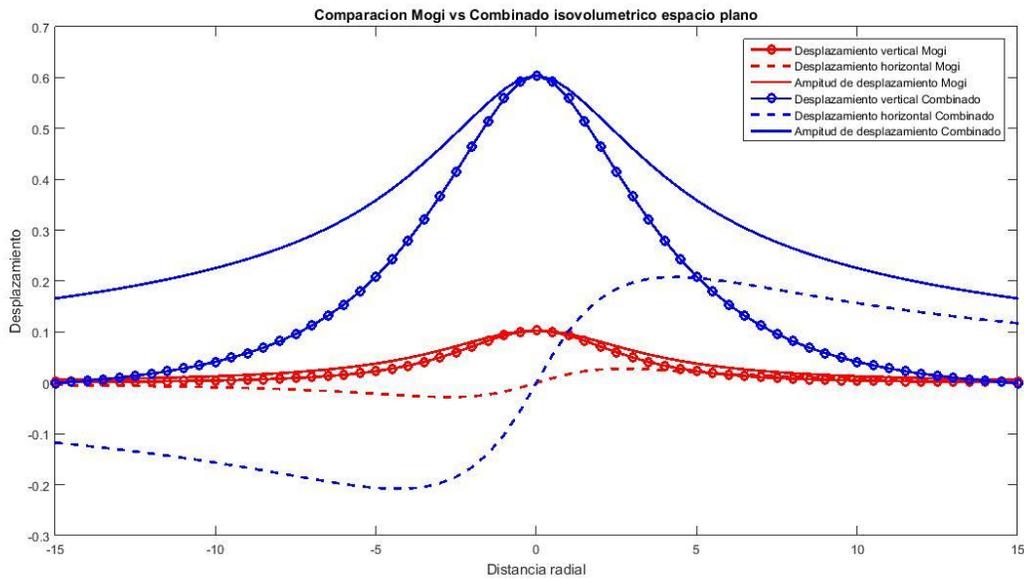


Fig. 4.14 Comparación entre fuentes esférica (rojo) y combinada (azul) en un espacio plano. Desplazamiento en milímetros.

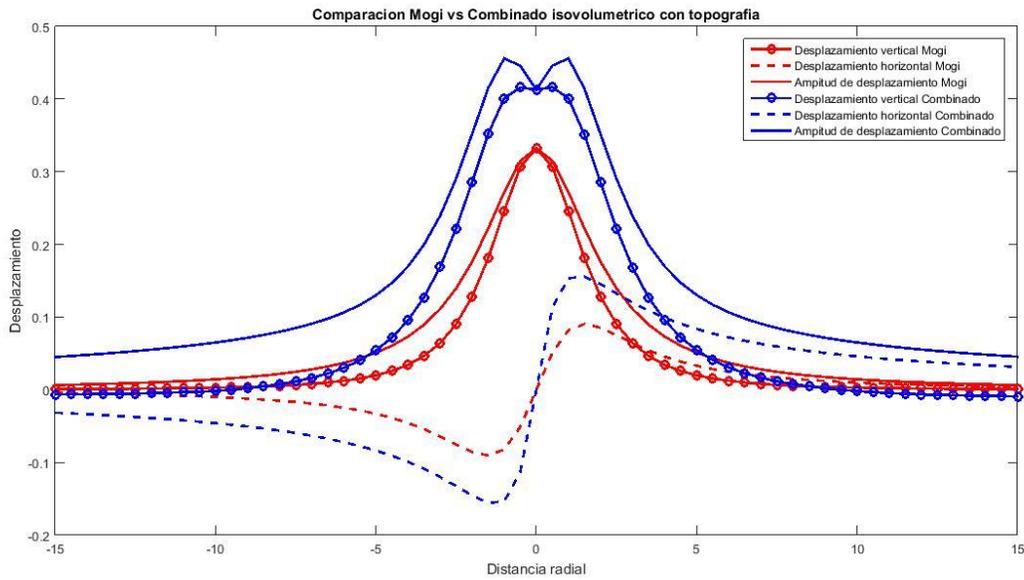


Fig 4.15 Comparación entre desplazamientos causados por una fuente Mogi con topografía (rojo) y un modelo combinado de pipe y Mogi (azul) con volumen igual al modelo de esfera de Mogi. Desplazamiento en milímetros.

Los gráficos de desplazamiento en contornos (figuras 4.02 y 4.06) nos permiten apreciar claramente cómo los patrones de desplazamiento en una componente radial, en el campo lejano, se asemejan. Sin embargo, la magnitud del desplazamiento se ve afectada por la topografía, al estar los puntos más alejados.

A pesar de la tendencia a asemejarse los datos de desplazamiento en el espacio plano y con topografía, la magnitud de desplazamiento es menor y será posible que sea más difícil de ser diferenciada en las estaciones de registro con el ruido local,

Por otro lado, la señal del campo cercano muestra claras diferencias con la amplitud, variando a intervalos más cortos de distancia en el modelo de topografía real, debido a que la distancia radial entre la fuente y la superficie variaba más rápidamente, variando de esta forma el desplazamiento total medido a causa de la atenuación de la energía denotada en el modelo por el factor $1/R^2$ en la ecuación 2.01.

Capítulo V Método inverso

5.1 Métodos inversos

Los métodos inversos consisten en utilizar las respuestas en superficie para determinar los parámetros físicos del subsuelo.



Fig. 5.01 Representación gráfica entre el método directo (flecha negra), que llega a la respuesta a los sensores usando los parámetros físicos y modelos matemáticos adecuados, y el método inverso (flecha azul) el cual a partir de la respuesta de sensores obtiene los parámetros físicos del fenómeno a estudiar.

En el caso que aquí se menciona se hace una operación inversa, sin embargo, esto representa un nuevo problema en sí mismo, pues existen un gran número de posibles parámetros físicos, algunos de ellos podrían generar una respuesta similar (Snieder, 1999) a la que los datos muestran con un porcentaje de error determinado. Para determinar la mejor solución existen múltiples métodos, entre ellos los métodos inversos más comunes para resolver este problema son:

- Programación Evolutiva
- Algoritmos Genéticos
- Recristalización Simulada
- Método de Monte Carlo

El método de Monte Carlo es una técnica de análisis numérico basada en el uso de secuencias de números aleatorios para muestrear los valores de las variables de probabilidad de un problema determinado. En efecto, con mucha frecuencia el número de estados posibles del sistema es tan elevado que hace imposible calcular valores promedio sumando sobre todos los estados, por lo que se opta por tomar una muestra y estimar los valores promedio a partir de ella. Los valores muestreados se obtienen a partir de las distribuciones de probabilidad de cada variable (Mosegaard 2002). La solución al problema planteado se estima analizando los valores de la muestra a través de métodos estadísticos.

Si bien el nombre de "Método Monte Carlo" es relativamente reciente y fue acuñado por John Von Neumann y Stanislaw Ulam cuando trabajaban en el proyecto Manhattan (Curtiss, 1954) durante la segunda guerra mundial, la idea del cálculo Monte Carlo es mucho más antigua que la aparición de las computadoras modernas y era conocido anteriormente por el nombre de "muestreo estadístico" (Niño Alfonso, 2011), cuando los cálculos aún se realizaban con papel y lápiz. Inicialmente Monte Carlo no fue un método para resolver problemas en física, sino para evaluar integrales que no podían ser evaluadas de otra manera: el cálculo de integrales de funciones pobremente muestreadas y las integrales en espacios multidimensionales fueron dos áreas en las que el método Monte Carlo probó ser muy provechoso (Rubinstein, 1981).

El método de Monte Carlo es uno de los métodos inversos más simples y es en esa simpleza donde su fortaleza radica, las simulaciones de Monte Carlo se basan en crear un espacio en el marco probabilístico

de posibles soluciones, donde todas estas soluciones consideradas, basadas en la densidad probabilística, pueden ser la solución del problema, definiendo claramente los límites de la simulación. Para nuestro caso de estudio, que es el volcán Popocatepetl, los parámetros físicos a determinar son:

- Las tres dimensiones espaciales de la localización de la fuente (Latitud, longitud y profundidad)
- Dimensiones de la fuente
- Diferencial de presión

5.2 Localización de la fuente mediante el método de Monte Carlo

Para determinar estos parámetros se creó un programa en la plataforma MATLAB el cual genera una matriz de tres dimensiones para encontrar la ubicación con menor desajuste; para alcanzar tal objetivo se usan una serie de combinaciones de valores aleatorios de radio y presión con las cuales determinamos el error mínimo en cada punto del espacio.

Para determinar el mejor ajuste de localización se hacen simulaciones de localización en la malla de una fuente esférica de Mogi con un radio de 1 km y un diferencial de presión de 1 Mpa, para esta primera inversión se asume que se conocen estos parámetros para que el programa solo arroje la mejor ubicación.

A través de estos errores mínimos se puede observar la distribución del error de cada fuente propuesta en el espacio y determinar la fuente que mejor ajusta a los vectores de desplazamiento superficial.

Con este código de localización se procede a determinar el comportamiento de la localización con diferentes arreglos de estaciones en ambientes de redes de monitoreo determinados, esto con el objetivo de determinar el arreglo más eficiente para optimizar la red de monitoreo actual. Una vez determinado el comportamiento de las redes para la localización se procederá, con otro algoritmo similar, a encontrar los parámetros más certeros referentes al volumen de la fuente y el diferencial de presión; estos parámetros serán evaluados mediante combinaciones de valores aleatorios para cada punto de la malla de localización.

Para este código se considera el arreglo de estación actual en el Popocatepetl, así como los arreglos de redes que permitan la determinación más certera y óptima de los parámetros.

Para probar el código de inversión inicialmente se creó un código que calculaba de manera directa los desplazamientos en un arreglo determinado de estaciones, con una fuente determinada en espacio, y sus parámetros de presión y volumen específicos y constantes, estos datos eran utilizados como los datos de entrada a ser analizados (Figs. 5.02 y 5.03).

Después estos datos fueron comparados con un universo determinado de posibles ubicaciones, con la intención de que el código pudiese hallar adecuadamente la ubicación, considerando constantes los parámetros de presión y radio.

Una vez que el código logró ubicar la fuente se utilizó este código para probar la localización de la fuente utilizando diferentes arreglos de estaciones de medición, para probar la resolución de los distintos tipos de posibles redes.

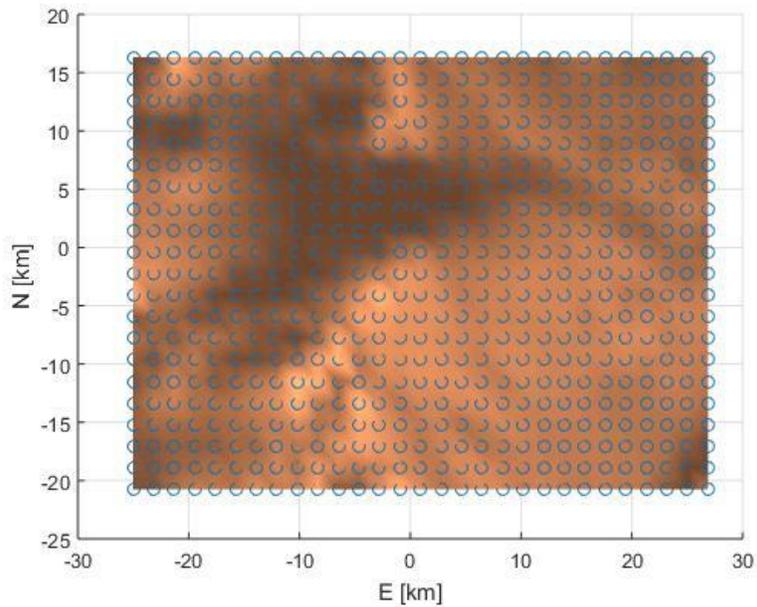


Fig. 5.02 Malla del modelo de topografía con estaciones en cada punto de la topografía un total de 609 estaciones de medición.

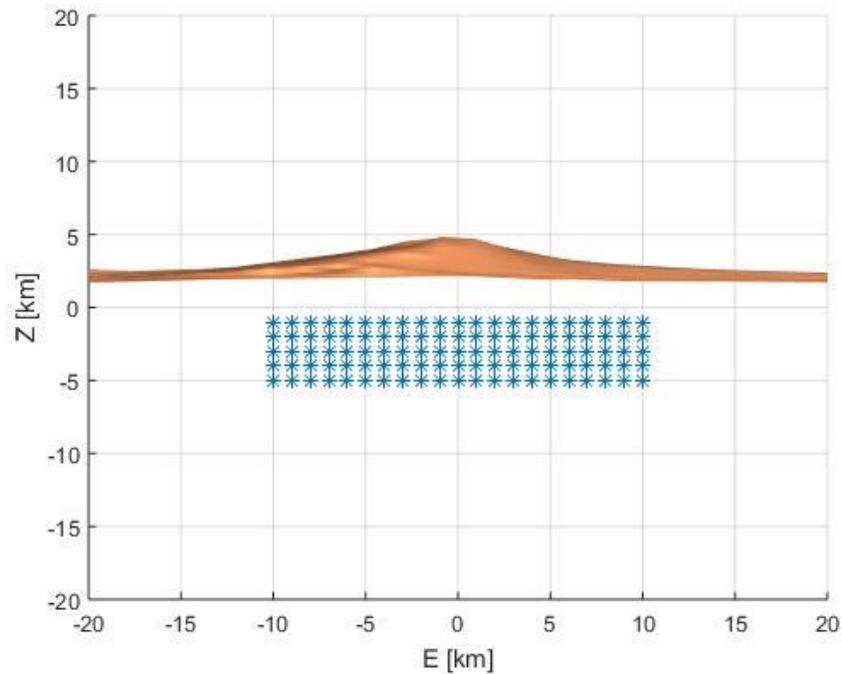


Fig. 5.03 Representación bidimensional de la malla de posibles soluciones espaciales malla de 20x20x5 con un espaciado de 1km en cada dirección 2205 posibles soluciones calculadas para cada estación.

Una vez que se comprobó la precisión del modelo ideal, se procedió a usar el mismo algoritmo con las mismas posibles fuentes en diferentes arreglos de estaciones en superficie y comprobar su comportamiento para localizar una fuente debajo de la cima y otra con un desplazamiento de 5 km al Norte y 5 km al Este.

5.3 Pruebas de localización con distintos tipos de redes

Los arreglos de estaciones de medición probados para la inversión directa fueron los siguientes:

- Malla completa 609 estaciones posicionadas en cada punto
- Arreglo circular 21 estaciones Radio de 5 km alrededor de la cima
- Arreglo Lineal línea E-W 29 puntos
- Arreglo Lineal línea N-S 21 puntos
- Arreglo líneas cruzadas N-S y E-W 50 puntos las dos líneas anteriores usadas simultáneamente
- Arreglo de mallas aleatorias 21 puntos puestos aleatoriamente alrededor del volcán
- Combinación de redes línea recta E-W y circunferencia 50 puntos
- Combinación de redes 2 líneas y circunferencia 71 puntos

Para todos los análisis de inversión a partir de este punto donde se calcula el error que será graficado de distintas formas de la siguiente manera

$$error_i = \sqrt{(u_o - u_i)^2 + (v_o - v_i)^2 + (w_o - w_i)^2}$$

Donde u_o, v_o, w_o son los vectores de deformación en cada dirección del espacio x, y, z sintéticos considerados la fuente ideal de prueba inicial, y u_i, v_i, w_i son los vectores de deformación generados con los parámetros determinados en la prueba de Montecarlo para comparar con los datos originales.

Las barras de color de los gráficos de contornos que se muestran a continuación grafican el nivel de error en ajuste entre los modelos de fuente en unidades de milímetros.

Resultados:

Malla completa 609 estaciones fuente centrada y fuente desplazada, figuras 5.04-5.05

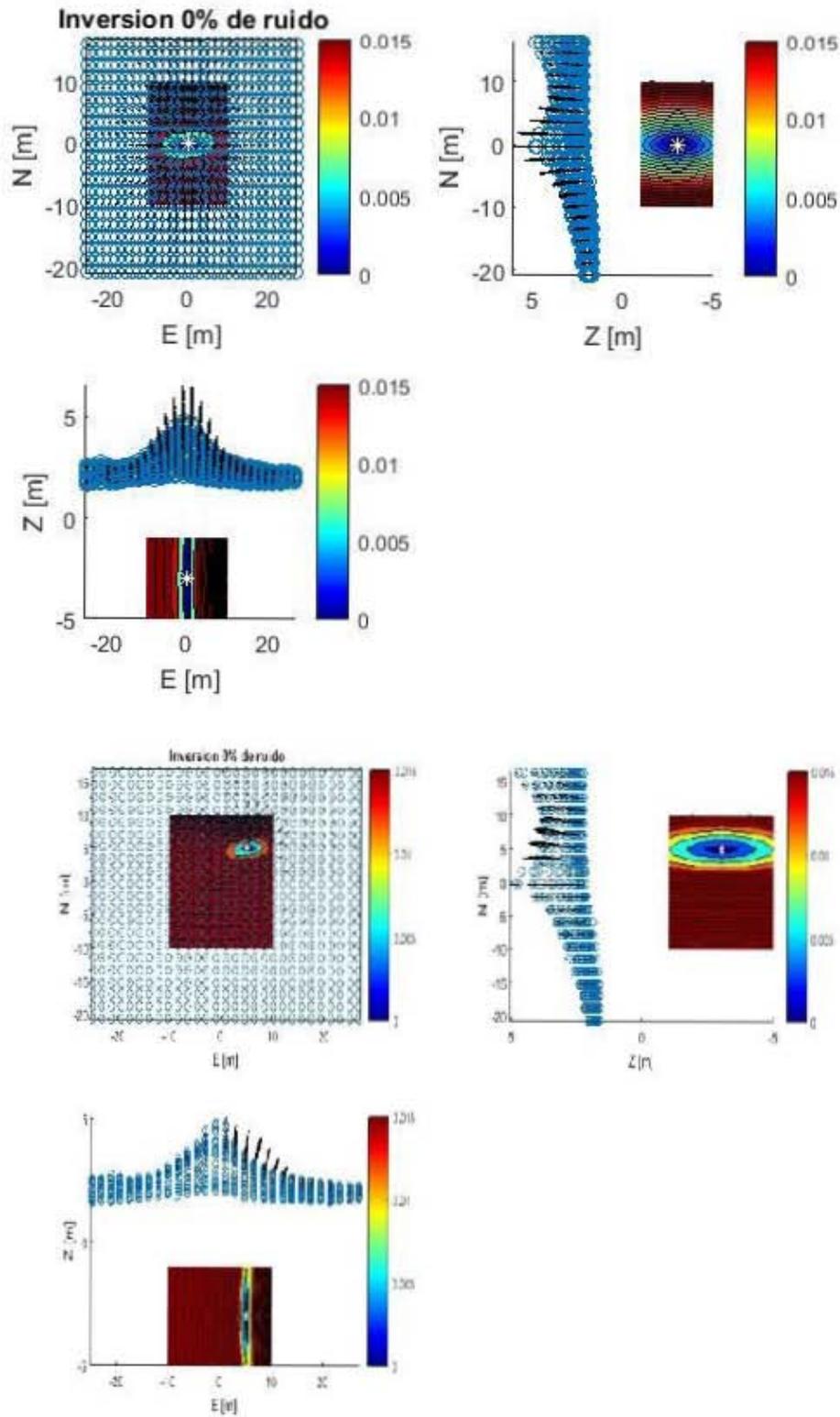


Fig. 5.04 Gráfico de localización de fuente mediante métodos inversos para una red de malla completa con fuente centrada (arriba) y fuente desplazada (abajo).

Arreglo Circular, 21 estaciones a un radio de 5 km de la cima del volcán

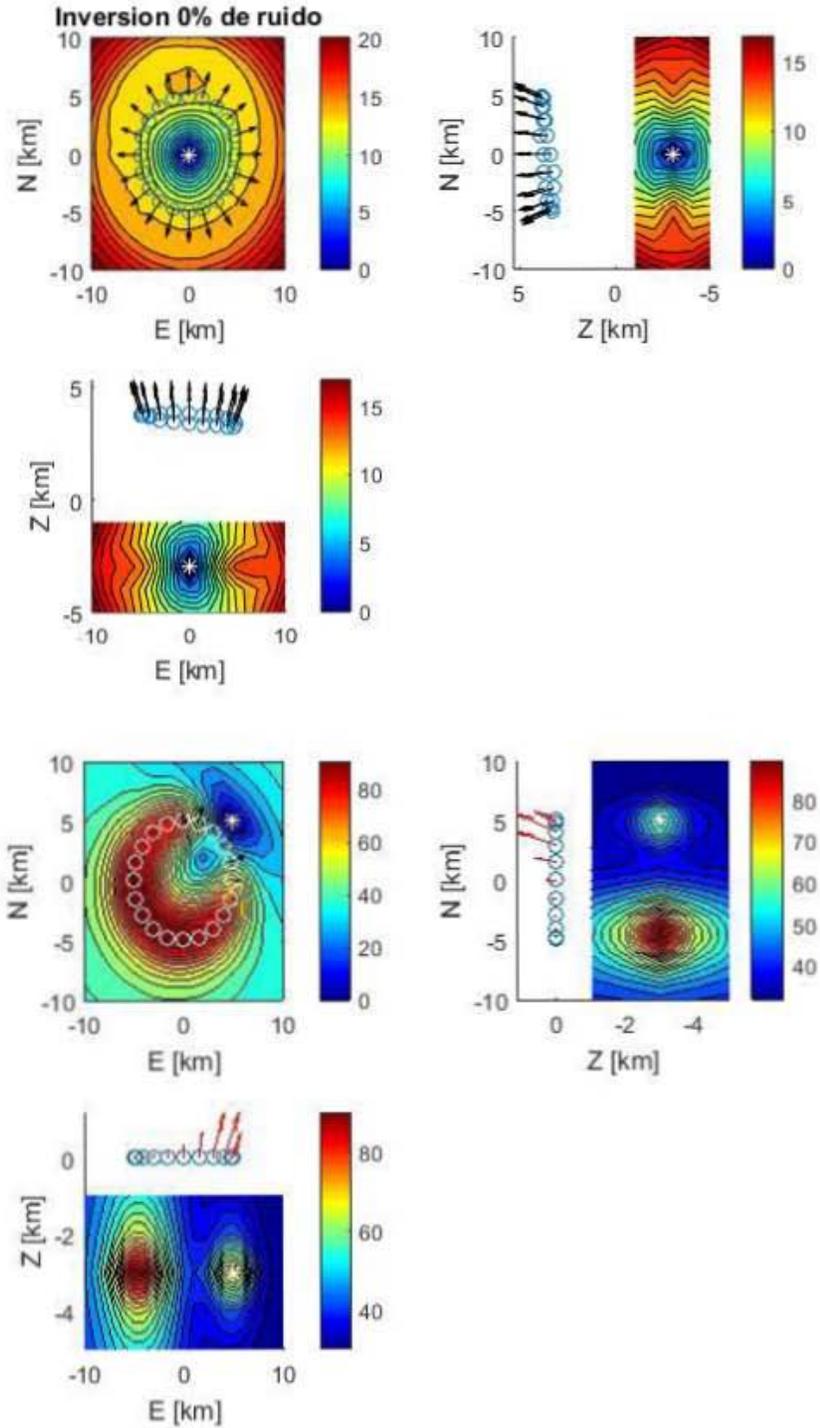


Fig. 5.05 Grafico de localización de fuente mediante métodos inversos para una red circular con fuente centrada (arriba) y fuente desplazada (abajo).

Arreglo lineal simple dirección E-W, 21 estaciones

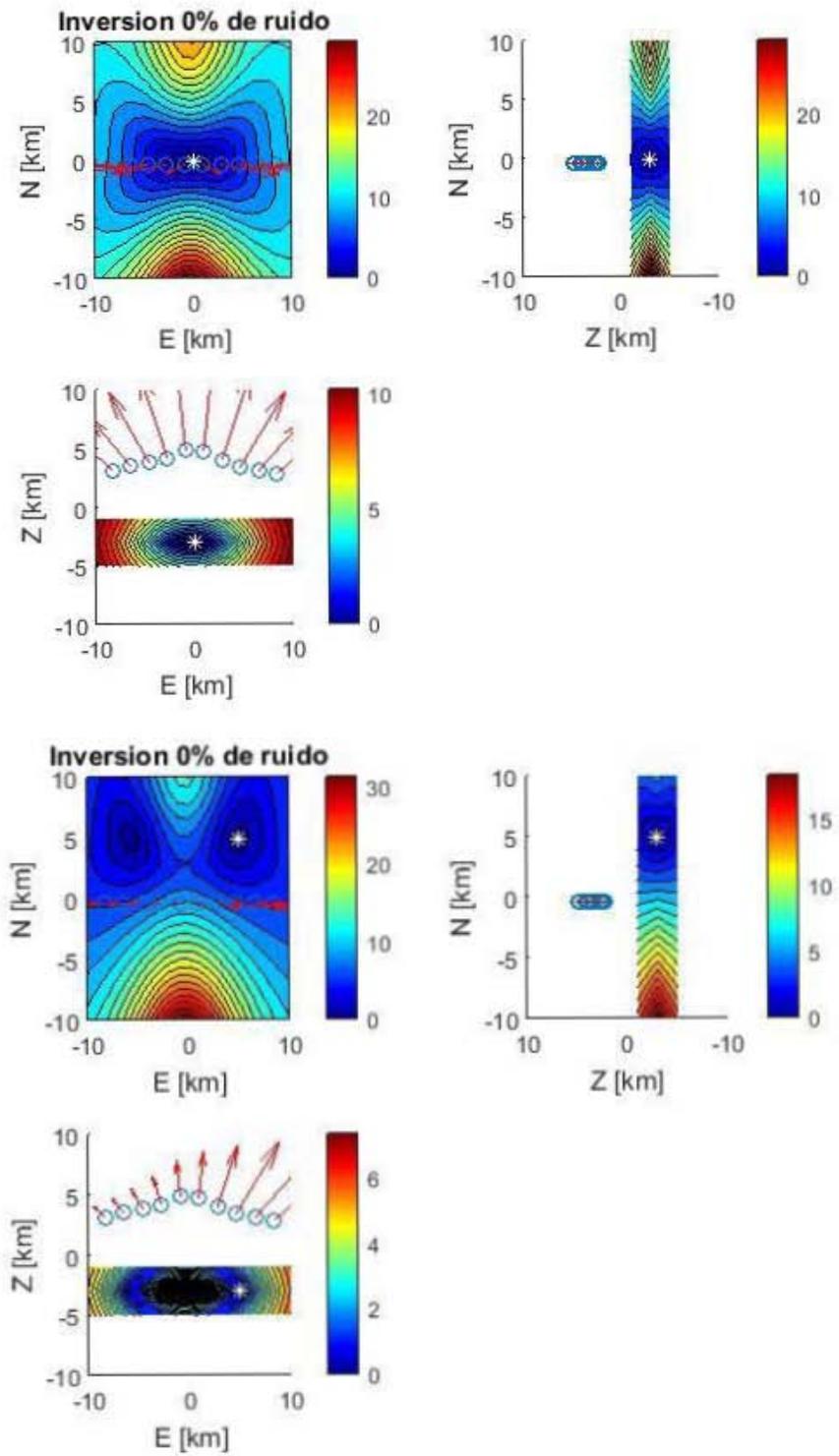


Fig. 5.06 Gráfico de localización de fuente mediante métodos inversos para una red lineal orientada E-W con fuente centrada (arriba) y fuente desplazada (abajo).

Arreglo lineal simple dirección N-S, 29 estaciones

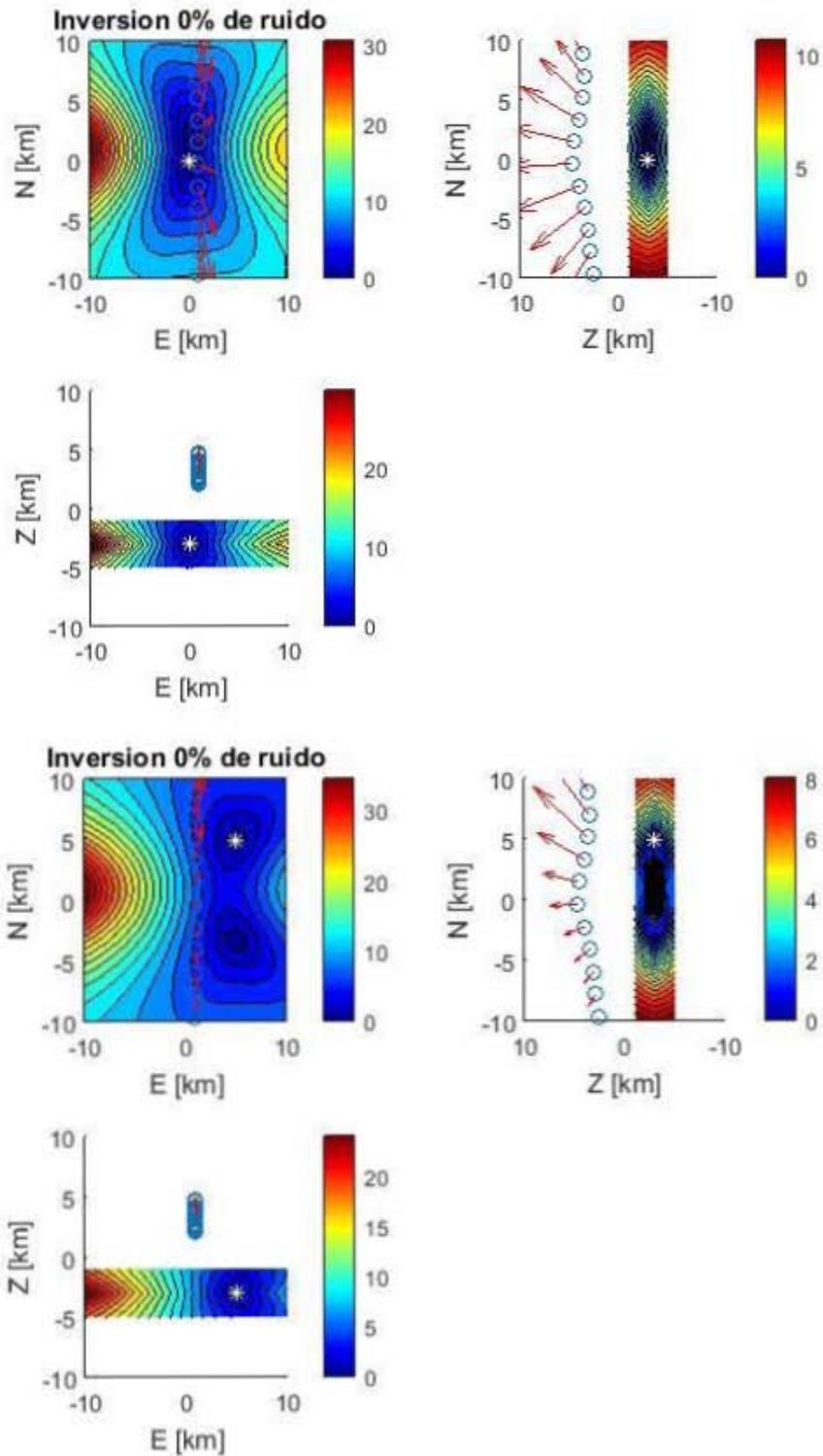


Fig. 5.07 Gráfico de localización de fuente mediante métodos inversos para una red lineal orientada N-S con fuente centrada (arriba) y fuente desplazada (abajo).

Arreglo Lineal combinado de dos líneas perpendiculares (E-W y N-S)

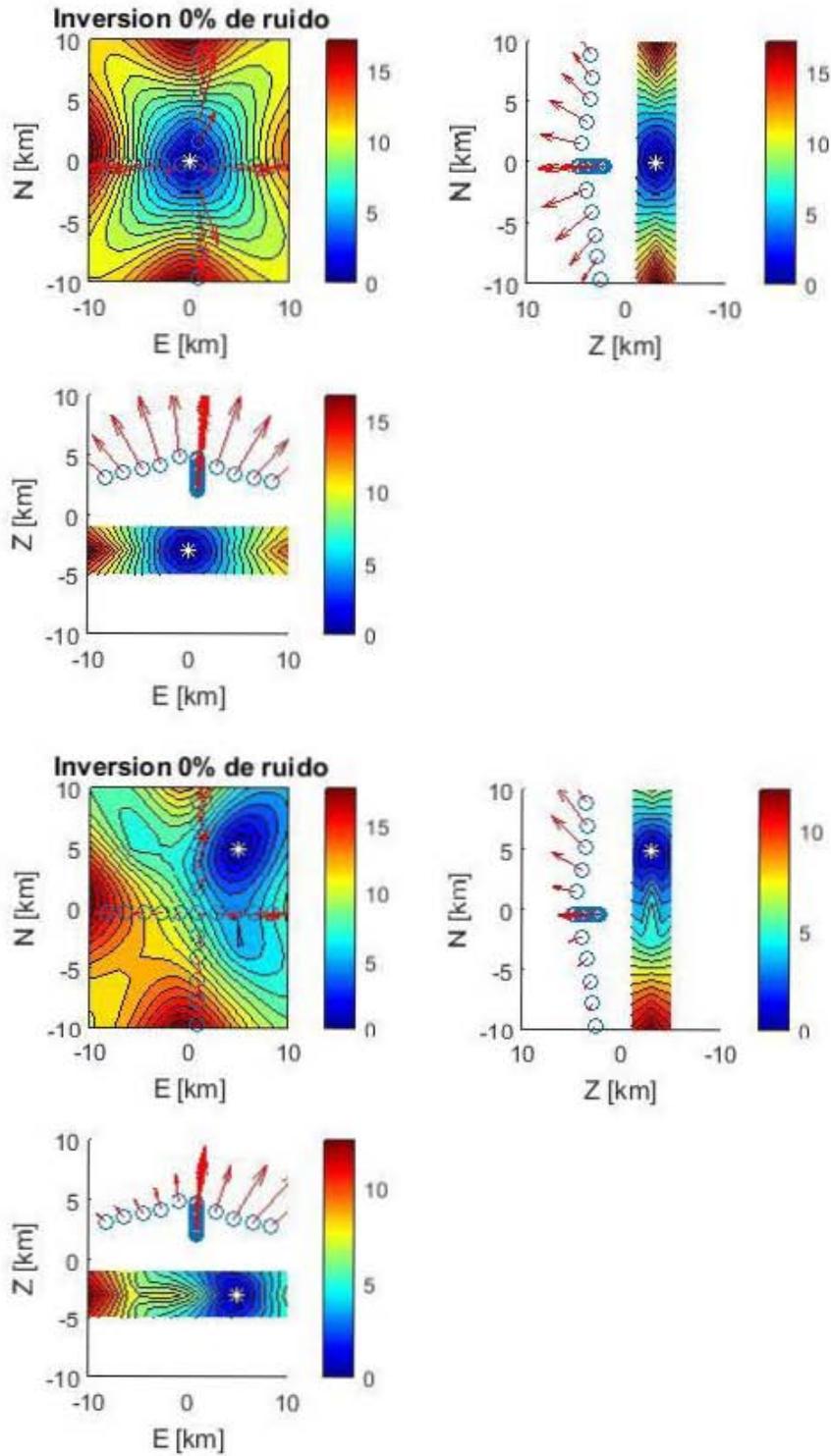


Fig. 5.08 Gráfico de localización de fuente mediante métodos inversos para una red de dos líneas perpendiculares de orientación N-S y E-W con fuente centrada (izquierda) y fuente desplazada (derecha).

Arreglo de mallas aleatorias 21 puntos distribuidos de manera aleatoria en el espacio de topografía

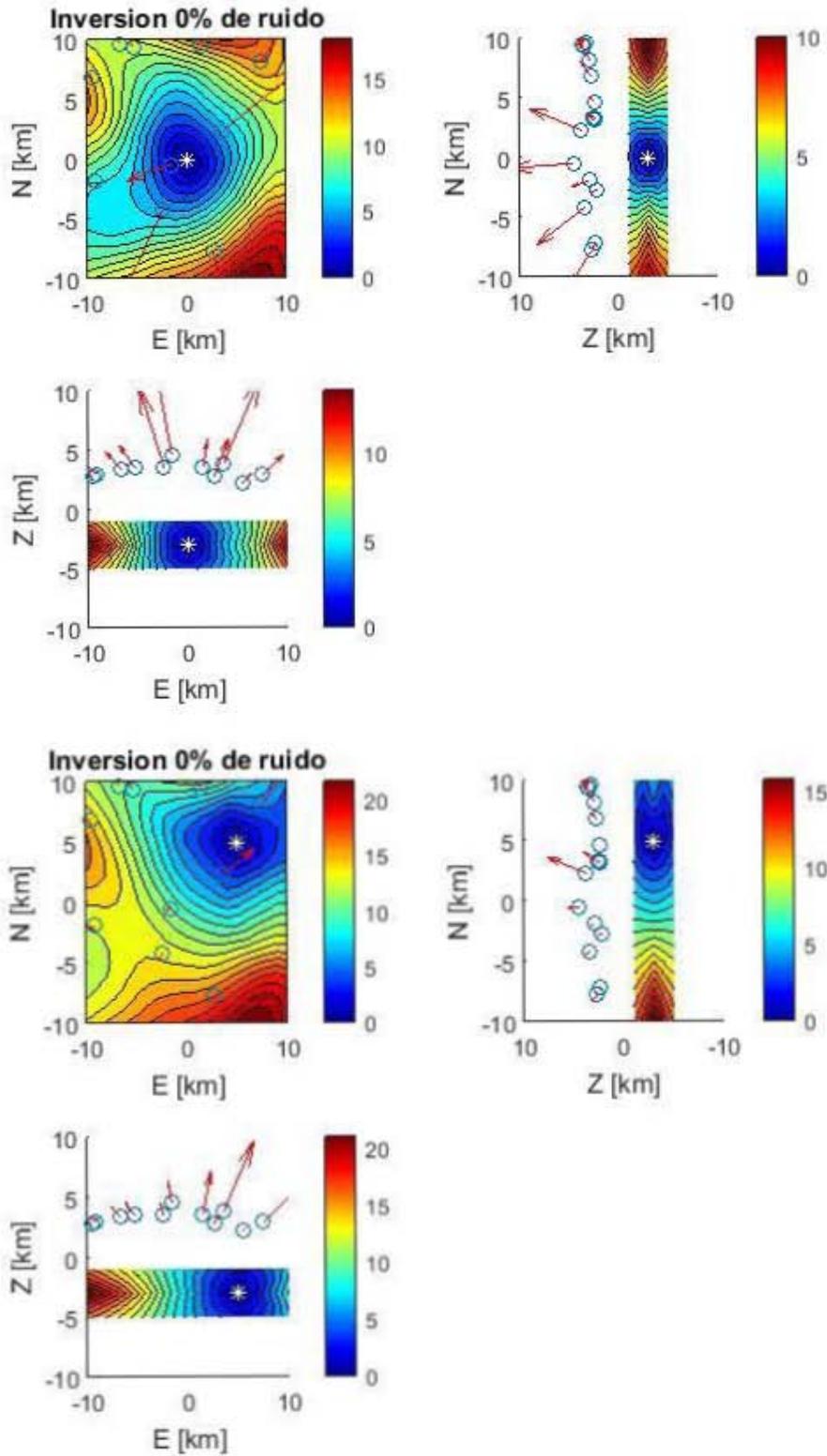


Fig. 5.09 Gráfico de localización de fuente mediante métodos inversos para una red de estaciones de ubicación aleatoria con fuente centrada (arriba) y fuente desplazada (abajo).

Arreglo combinado línea simple E-W y arreglo circular

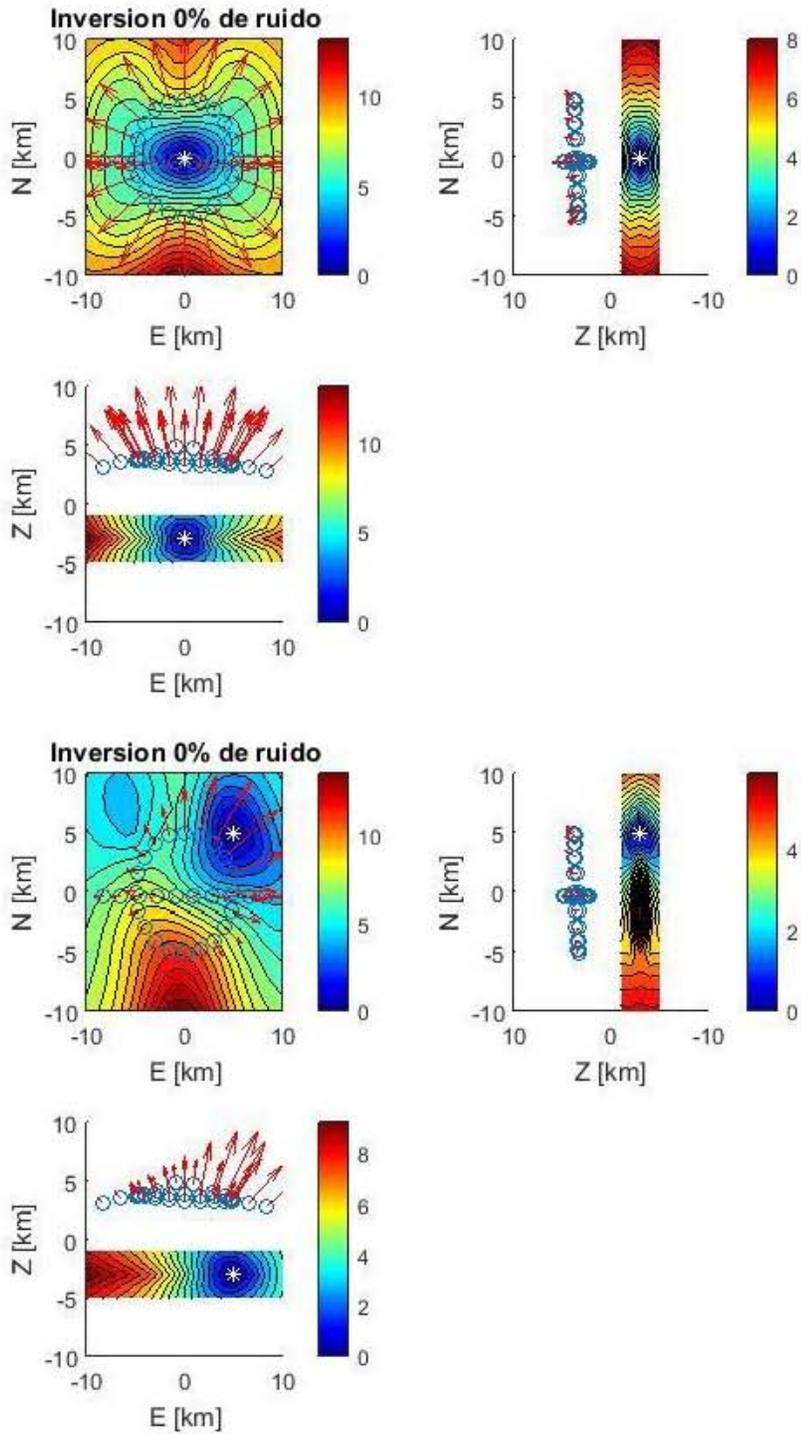


Fig. 5.10 Gráfico de localización de fuente mediante métodos inversos para una red combinada de línea de orientación E-W y una red circular con fuente centrada (arriba) y fuente desplazada (abajo).

Arreglo combinado dos líneas perpendiculares (E-W y N-S) y arreglo circular

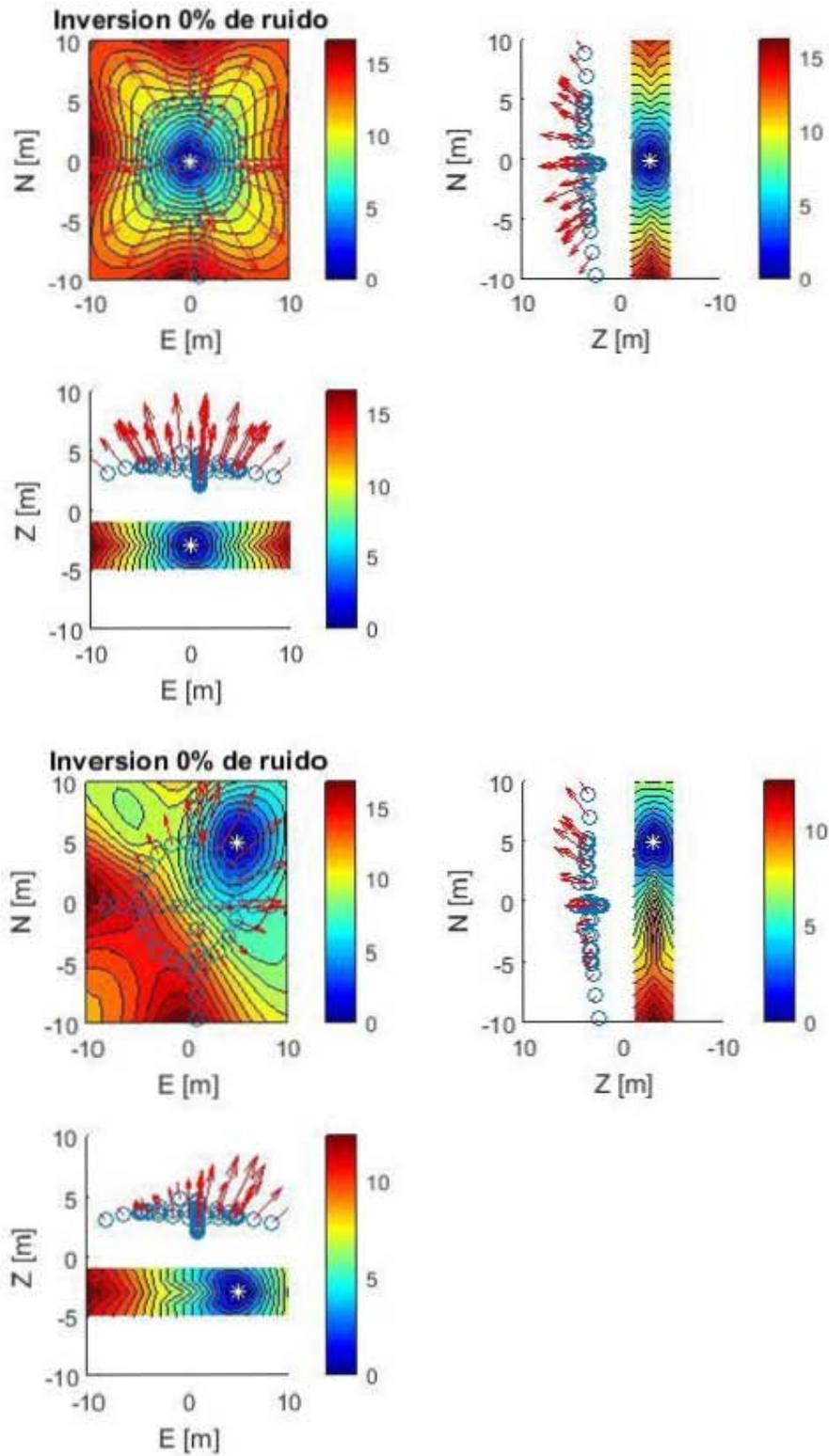


Fig. 5.11 Gráfico de localización de fuente mediante métodos inversos para una red combinada de dos líneas perpendiculares orientadas N-S y E-W con una red circular con fuente centrada (arriba) y fuente desplazada (abajo).

En las figuras anteriores (5.04-5.11) se aprecia que tanto el arreglo circular como el aleatorio tienen la mejor tendencia a localizar el epicentro con mayor precisión, mientras que los arreglos lineales muestran el mayor contraste en el desajuste. El mayor problema en todos los arreglos es la mala determinación de la profundidad. La mejor configuración para su determinación es una distribución aleatoria de estaciones

Entre los retos que cada arreglo presentó, se observa rápidamente que las líneas simples presentan soluciones no únicas, para un mismo conjunto de datos, esto se debe a que el arreglo de línea recta tiene carencias de resolución vertical y horizontal considerables, dado que existen un número infinito de posibles fuentes localizadas en la misma ubicación horizontal que con diferentes parámetros (presión y radio) a distintas profundidades pueden generar la misma respuesta en superficie. También existen un par de fuentes desplazadas en posiciones opuestas que pueden generar soluciones similares.

Mientras que el arreglo circular, al contar con variaciones de dirección acimutales, manteniendo la distancia radial permite diferenciar con cierto nivel de precisión la localización, sin embargo, el arreglo tiende a perder gran resolución al desplazar la fuente de la cima, la cual funge al mismo tiempo como centro radial del arreglo de estaciones. Mientras los arreglos lineales tienen el problema de no unicidad mantienen soluciones coherentes en cualquier ubicación de la fuente casi simétricas, mientras que el arreglo de estaciones con completa cobertura acimutal da soluciones únicas, pierde rápidamente resolución cuando la fuente se mueve del centro del arreglo.

5.4 Análisis de redes espacio plano y modelo DEM

Uno de los análisis particulares que más beneficio dan a esta investigación, es el análisis de la inversión de localización usando un modelo plano, así como un modelo con topografía, y la importancia que ésta conlleva para la correcta aplicación del método inverso aquí propuesto.

Para demostrar esto se utilizará el arreglo de estaciones circular con un radio de 5 km a lo largo de la cumbre, este arreglo de estaciones, bajo un modelo de superficie plano, resultaría en la instalación más ineficiente de las estaciones pues, respecto a este modelo plano las 21 estaciones, se reducen a 1 punto en el desplazamiento radial. Lo cual convierte a nuestro arreglo de 21 sensores en un análisis de un punto de desplazamiento en el espacio radial (Fig. 5.12).

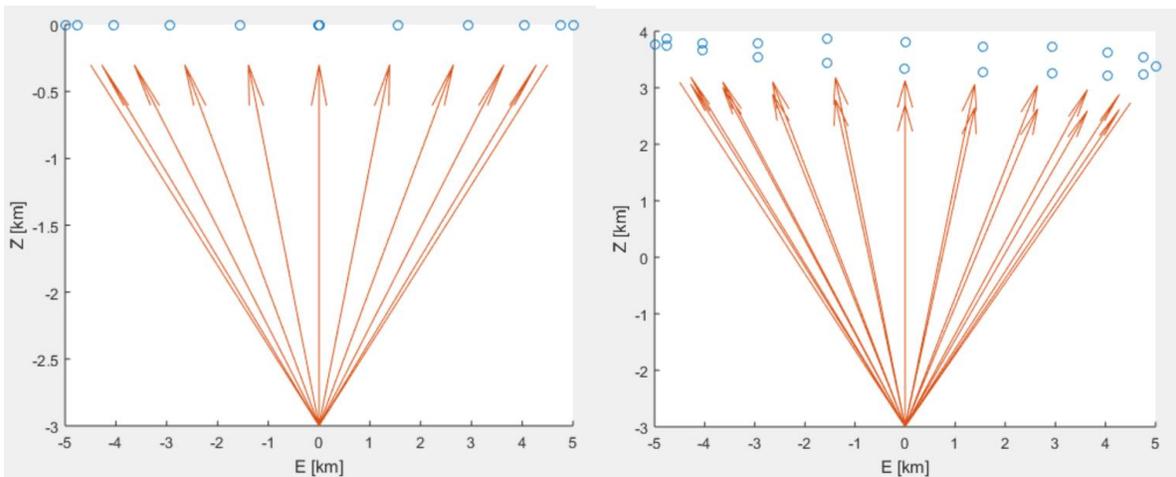


Fig. 5.12 Comparación de vectores de distancia radial entre arreglos circulares con espacio plano (izquierda) y espacio con topografía (derecha).

Sin embargo, cuando consideramos la topografía como el límite del semiespacio, la distancia radial entre la fuente y los sensores es variante para cada estación; esto permite tener una serie más completa donde podemos obtener más información sobre el patrón de desplazamiento radial, mostrado en la figura 5.13.

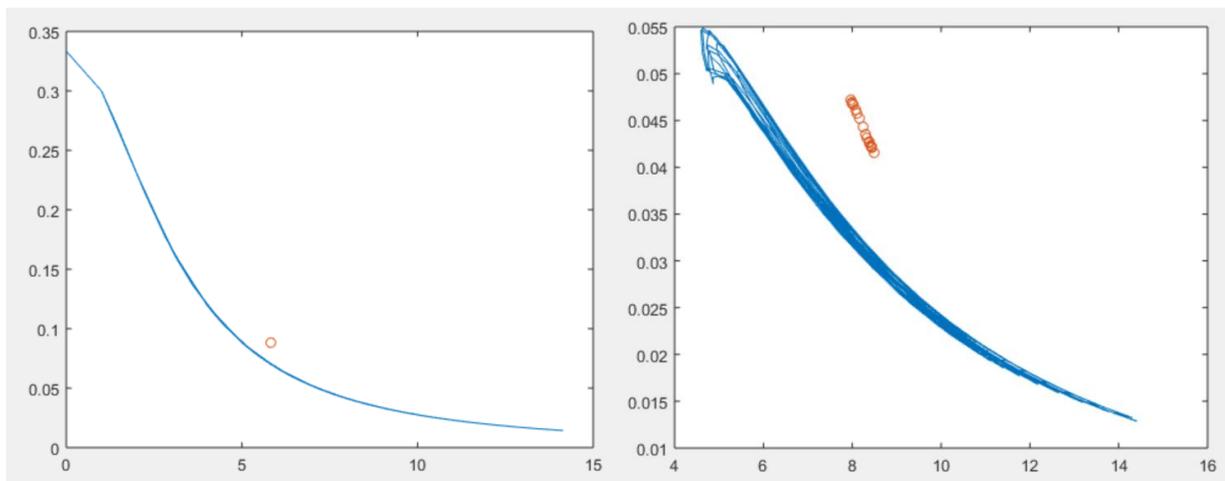


Fig. 5.13 Gráfico donde se muestra la ubicación radial del arreglo de 21 estaciones para un arreglo circular con espacio plano (izquierda) y un modelo con topografía (derecha).

Gracias a esta diferencia de distancias radiales y una cobertura acimutal completa, el arreglo circular resulta ser una técnica que provee de resultados óptimos, debido a que las distancias radiales no difieren mucho se puede obtener fácilmente la forma de deformación, la cual como se probó en la investigación previa, (Rendon, 2012) es de gran importancia para determinar el problema de no unicidad en la ubicación espacial.

Se utilizaron ambos arreglos en el espacio plano y con topografía para el método inverso y los resultados se muestran a continuación (Fig. 5.14).

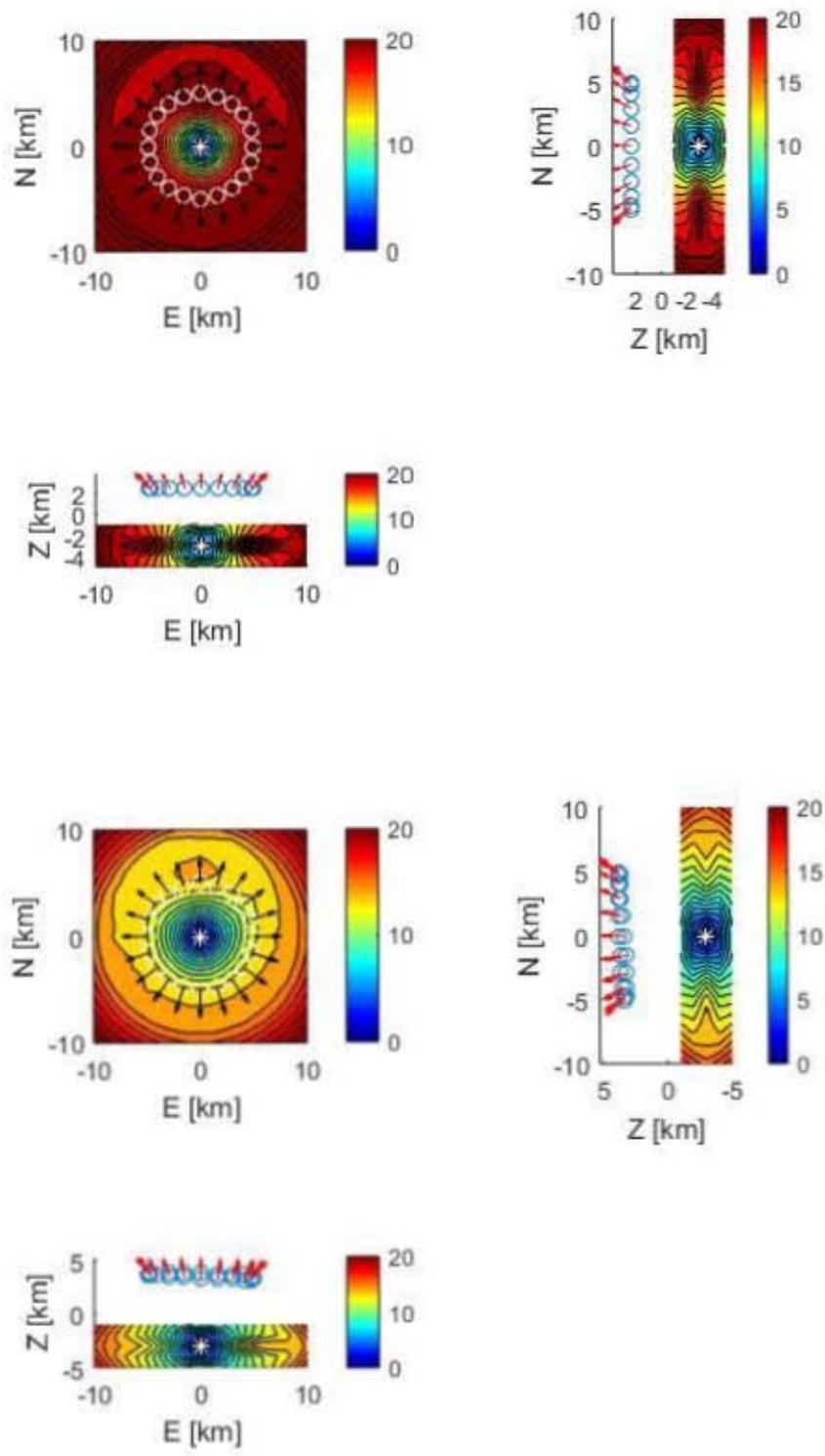


Fig.5.14 Localización de una fuente centrada bajo la cumbre usando un espacio plano (arriba) y un modelo DEM (abajo).

Analizando los resultados de ambas inversiones, en la figura 5.14 podemos apreciar una diferencia importante en el desajuste de la inversión en el espacio plano, así como una importante mejora en la resolución de la profundidad, mientras la inversión que considera el espacio plano es incapaz de determinar con exactitud la profundidad de la fuente, el modelo que considera la topografía puede localizar con facilidad la profundidad de los datos sintéticos, aun si se somete a una función de ruido aleatorio.

5.5 Análisis de localización con inversión de Monte Carlo usando estaciones reales

Una vez que estos modelos fueron revisados detenidamente se prosiguió a analizar las estaciones reales instaladas en el volcán con sensores de banda ancha, de los cuales hay actualmente cinco en funcionamiento, figura 5.15; con estas cinco estaciones se corrió la simulación del método inverso usando datos sintéticos con diferentes espectros de ruido aleatorio incluido.

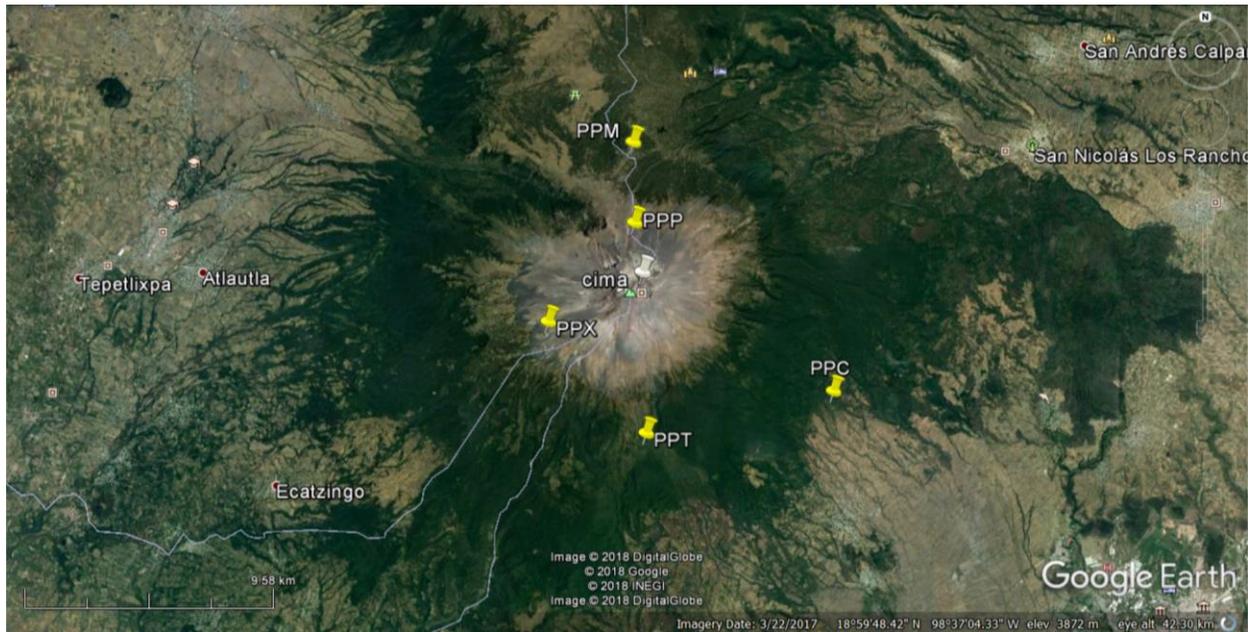


Fig. 5.15 Localización de estaciones reales de banda ancha sobre el volcán Popocatepetl PPP: Estación Canario, PPC: Estación Colibrí PPM: Estación Tlamacas, PPX: Estación Chipiquixtle, PPT: Estación Tetexcaloc.

Pruebas de Ruido:

- Datos puros sin ruido (0%)
- Datos con ruido mínimo (10%)
- Datos con nivel de ruido óptimo (50%)
- Datos con niveles de ruido considerable (90%)

Pruebas de estaciones reales con distintos niveles de ruido (Figs. 5.16-5.19) error en desajuste de modelo en mm (barra de color de contornos)

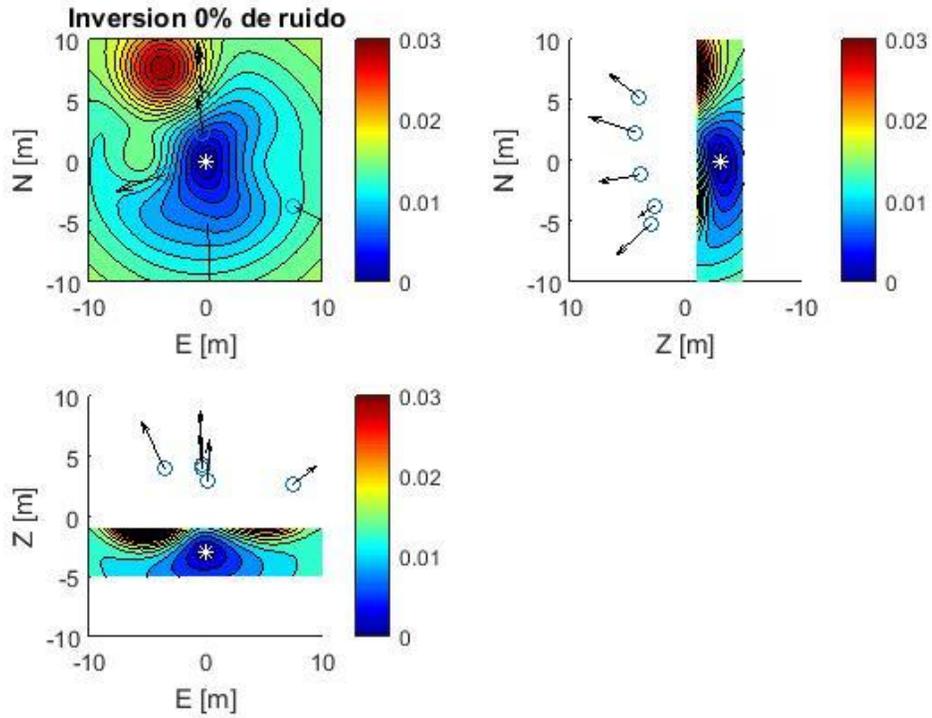


Fig. 5.16 Secciones 2D de la inversión con 0% ruido.

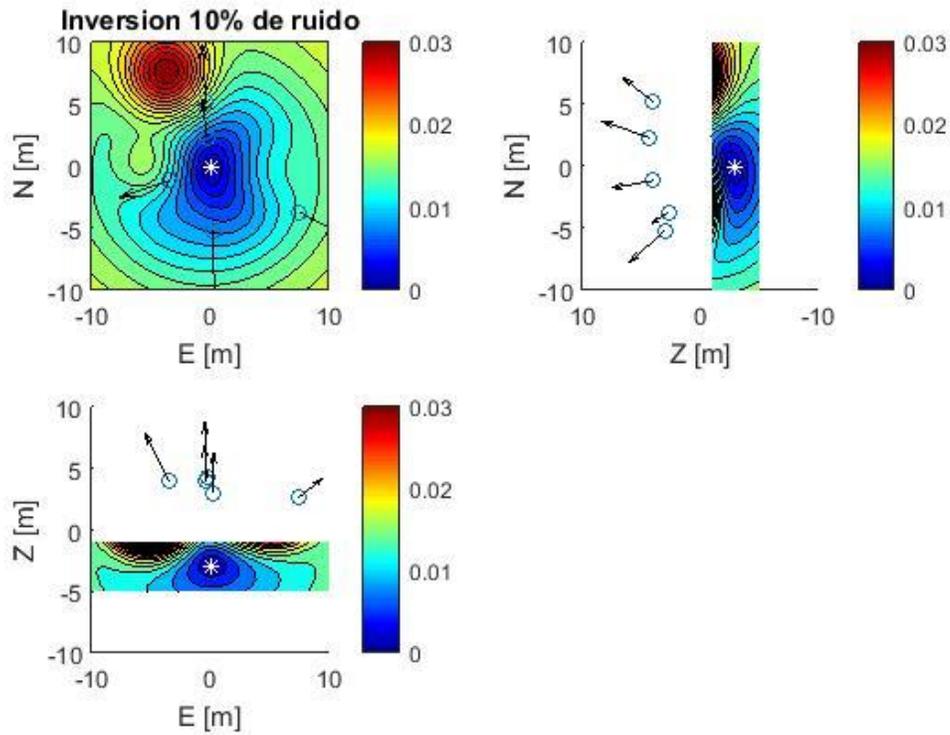


Fig. 5.17 Secciones 2D de la inversión con 10% ruido.

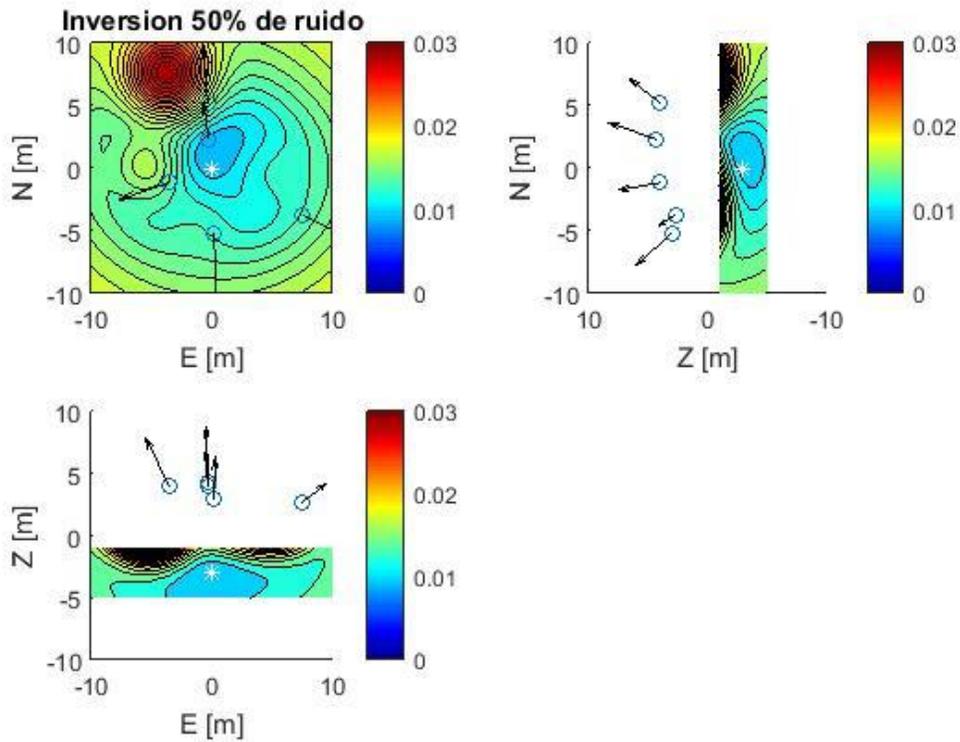


Fig. 5.18 Secciones 2D de la inversión con 50% de ruido.

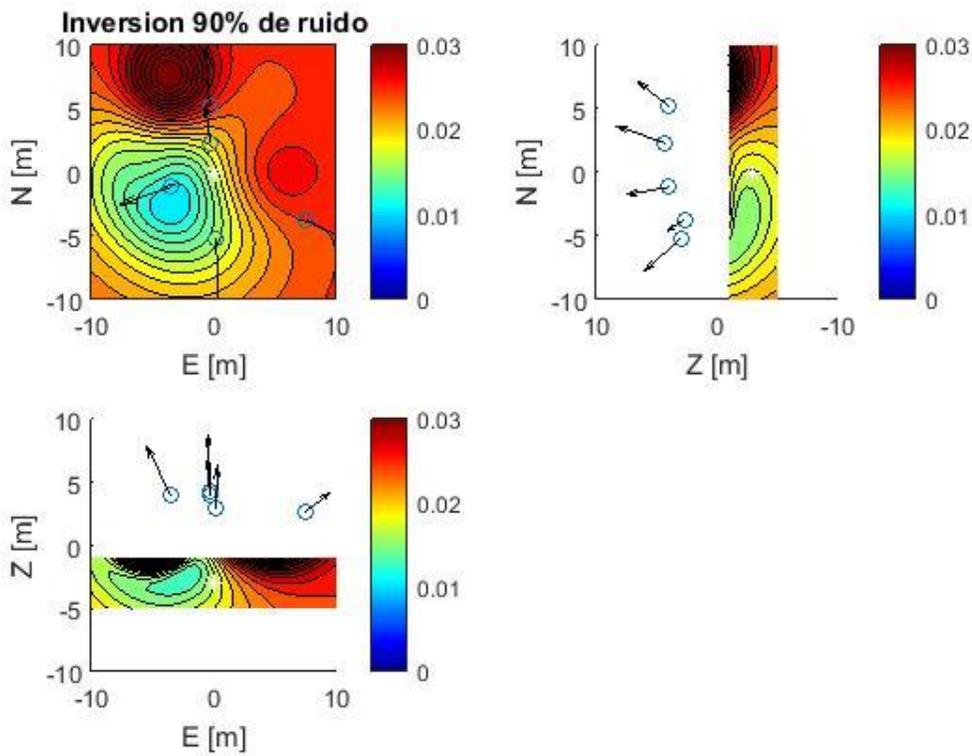


Fig. 5.19 Secciones 2D de la inversión con 90% ruido.

Terminado el proceso de inversión con las cuatro pruebas de ruido correspondiente, se procedió a hacer una serie más de pruebas para este arreglo con la fuente desplazada tal como se hizo con los arreglos ideales con una fuente de las mismas dimensiones desplazada 5 km al norte y 5 km al este.

Pruebas de estaciones reales con fuente desplazada (Figs. 5.20-5.23) error en desajuste de modelo en milímetros (barra de color de contornos).

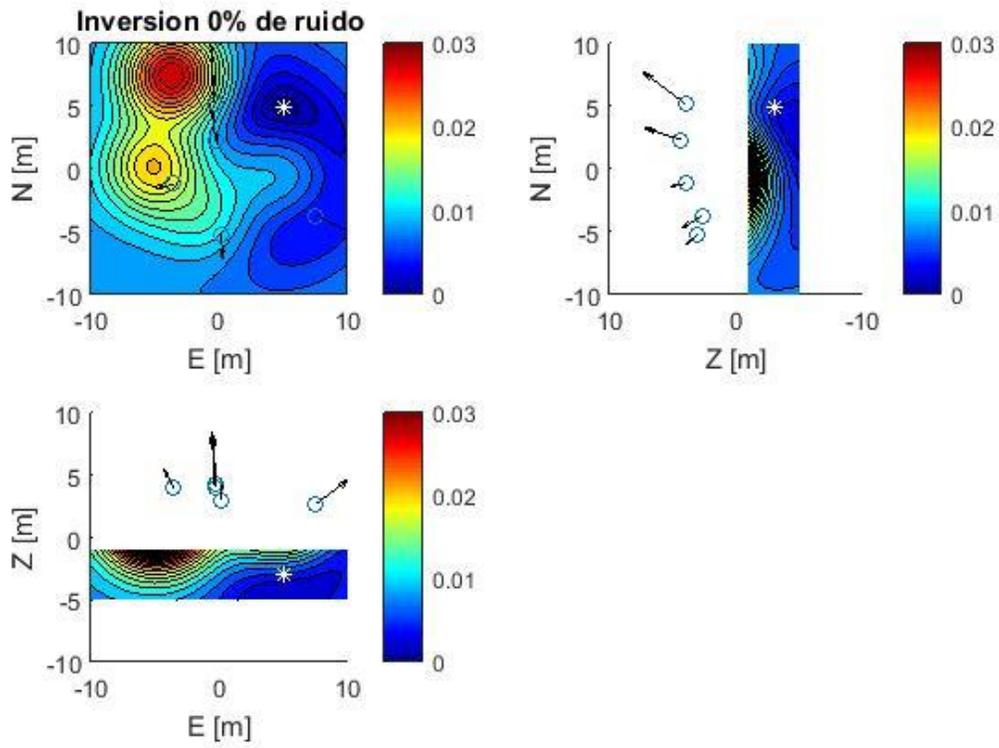


Fig. 5.20 Secciones 2D de la inversión con 0% ruido.

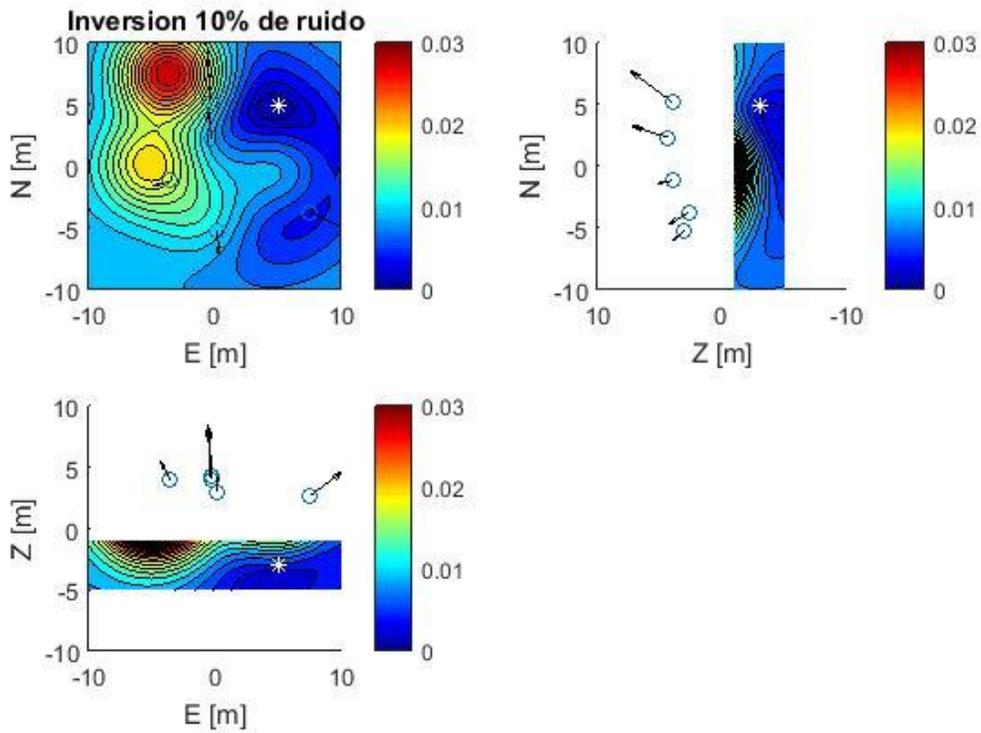


Fig. 5.21 Secciones 2D de la inversión con 1% ruido.

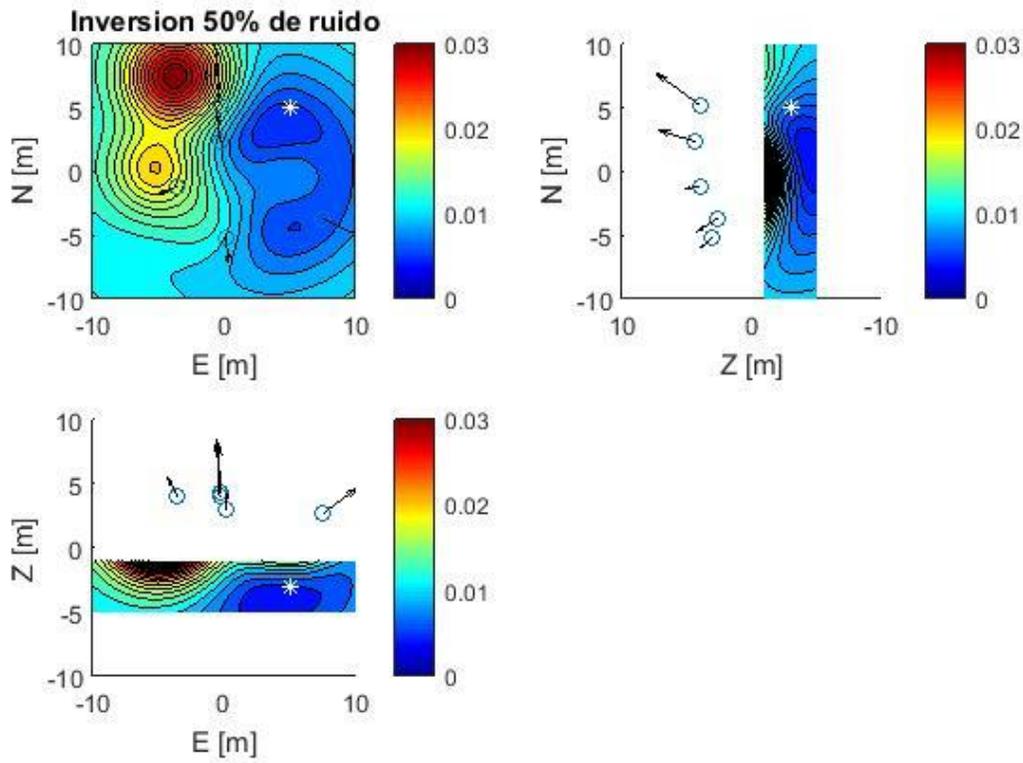


Fig. 5.22 Secciones 2D de la inversión con 50% ruido.

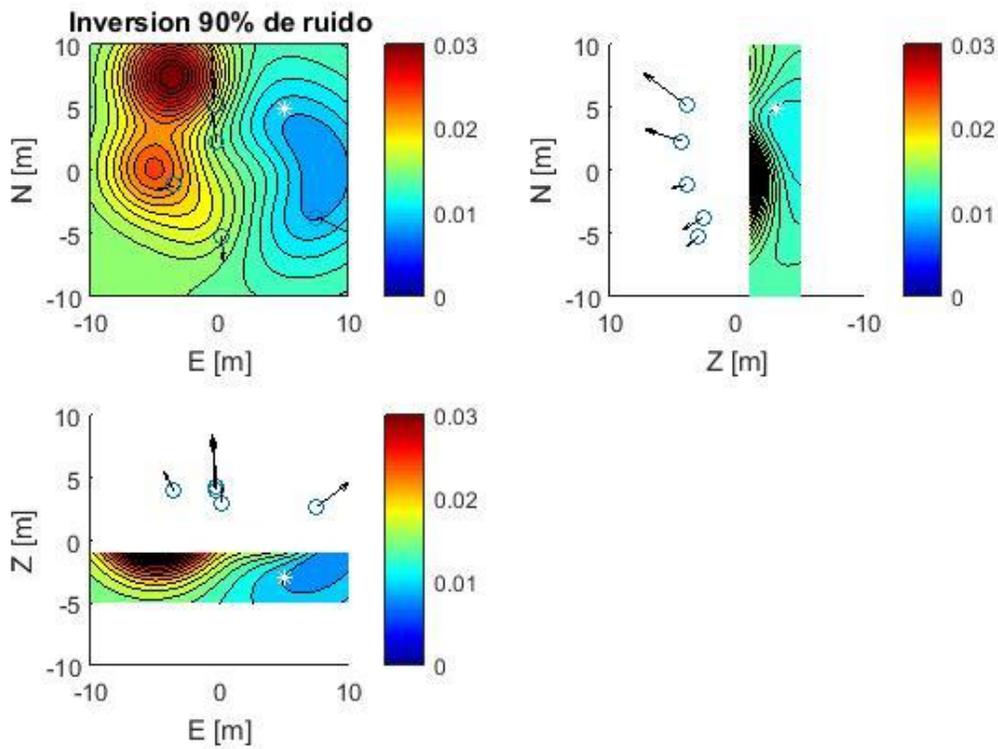


Fig. 5.23 Secciones 2D de la inversión con 90% ruido.

Una vez observados y analizados los resultados de la inversión muestran una localización coherente, sin embargo la localización con altos niveles de ruido comienza a presentar mayores niveles de desajuste, en especial cuando hacemos la prueba de una fuente desplazada, para optimizar la inversión se diseñaron una serie de arreglos de sensores que permiten optimizar la cobertura de los instrumentos actualmente instalados, localizados en zonas que permitan complementar diferentes tipos de cobertura, estos arreglos propuestos se consideran de acuerdo a las convenciones regulares de arreglos considerando un compromiso entre número de estaciones apertura del arreglo, y muestreo espacial (Wasserman, 2012).

Los tipos de cobertura que se diseñaron en las siguientes pruebas de redes fueron:

Cobertura acimutal: 4 estaciones adicionales posicionadas para cubrir diferentes direcciones acimutales a partir de la cima a distancias radiales similares a las estaciones previamente instaladas (Fig. 5.24).

Cobertura radial: 3 estaciones adicionales posicionadas 3 km de distancia de las estaciones reales para crear cuatro arreglos de líneas rectas alrededor de la cima, se usaron sólo tres ya que las estaciones PPM y PPP ya están posicionadas en línea recta (Fig. 5.33).

Cobertura acimutal expandida: se instalaron 4 estaciones nuevamente con el propósito de optimizar la cobertura acimutal de la red de monitoreo actual, con la diferencia de que esta prueba localiza las estaciones propuestas a una distancia considerable de la cima, esto con el propósito de eliminar efectos de borde en la localización y mejorar la resolución de la simulación de cobertura acimutal (Fig. 5.42).

5.5.1 Arreglo de red propuesto: Cobertura acimutal

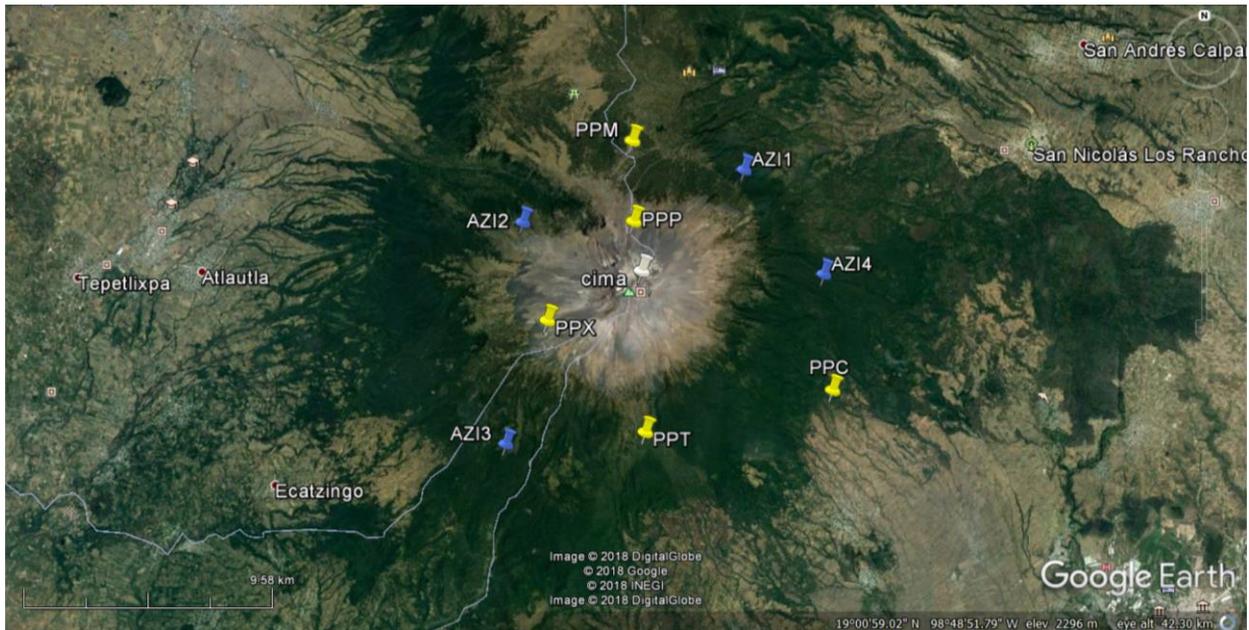


Fig. 5.24 Arreglo de estaciones reales y propuestas para una red de cobertura acimutal simple.

Se observa que el arreglo de estaciones actual (amarillo), está enfocado en las laderas del volcán a poca distancia de la cima, mientras tres de las estaciones están instaladas en los flancos sur, con un posicionamiento entre ellas adecuado para hacer una buena cobertura acimutal, el flanco norte, sin embargo, solo tiene dos estaciones posicionadas ambas en dirección norte, dando una cobertura acimutal muy pobre, es por ello que de las estaciones propuestas (azul), tres de ellas se encuentran al norte del volcán, mientras sólo se utiliza una más para mejorar la cobertura acimutal del flanco sur. Las distancias radiales de las estaciones con relación a la cima se mantienen dentro del rango de distancia de las estaciones actualmente instaladas.

Para la propuesta de este arreglo de red, se considera la dificultad del posicionamiento de estaciones en ciertas zonas del volcán dada su topografía peculiar, para lo cual se propone la instalación de estas estaciones alejadas de las laderas más escarpadas de la estructura volcánica, dado que esta es una simulación teórica inicial no se considera la accesibilidad de las zonas, dejando esta consideración para etapas más avanzadas de la investigación.

A continuación, se presentan los resultados de la inversión obtenida con la red propuesta.

Pruebas de cobertura acimutal con distintos niveles de ruido (Figs. 5.25-5.28) error en desajuste de modelo en milímetros (barra de color de contornos).

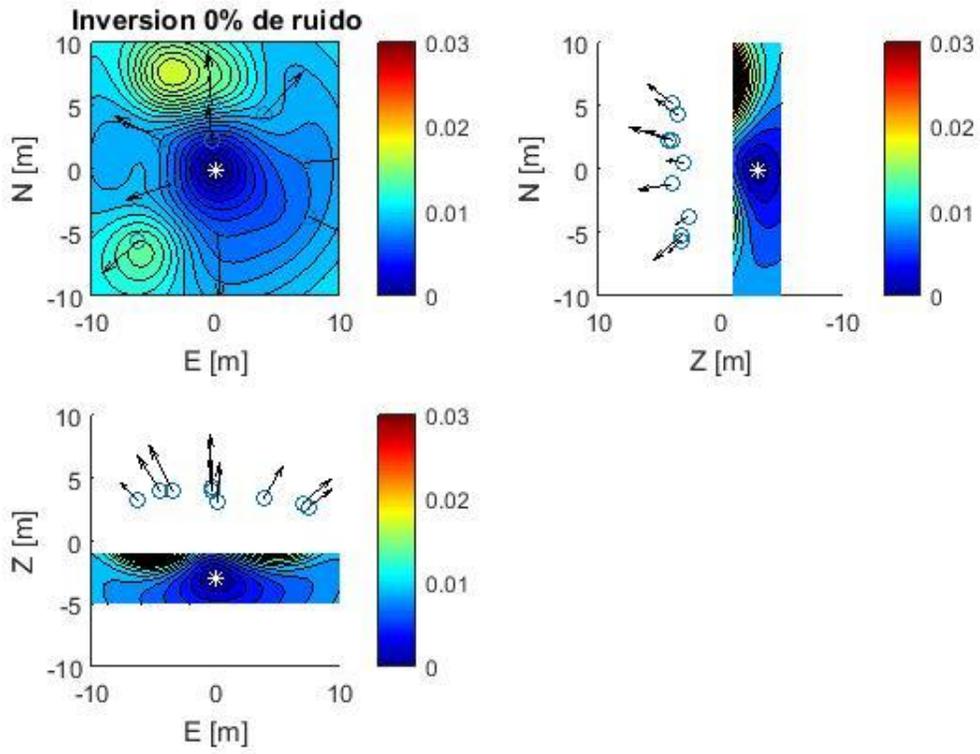


Fig.5.25 Secciones 2D de la inversión con 0% ruido.

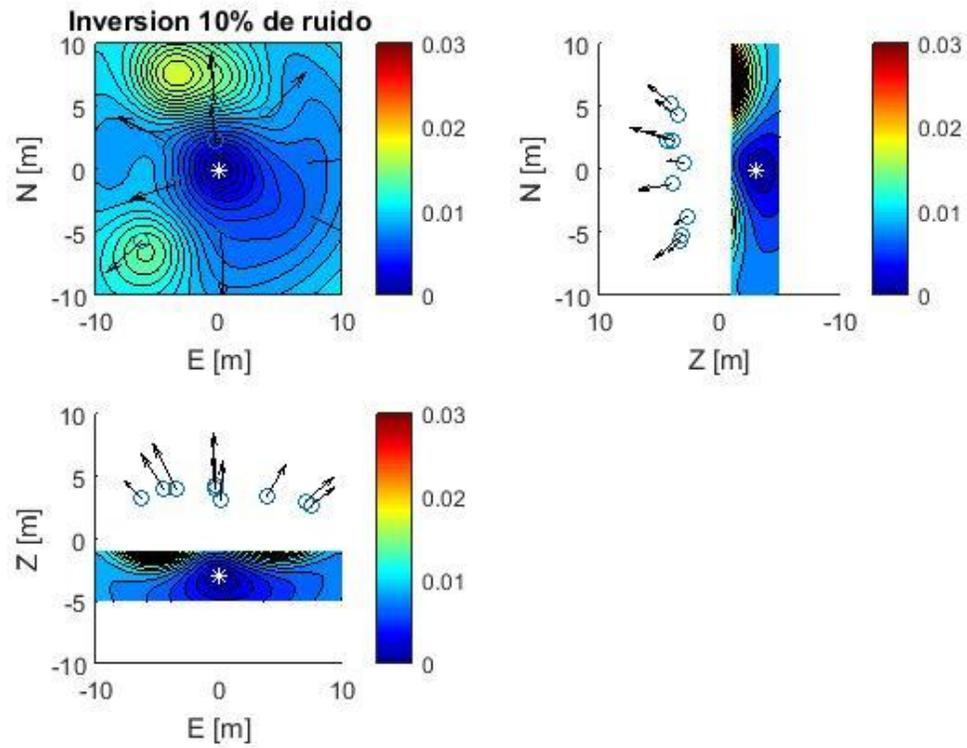


Fig. 5.26 Secciones 2D de la inversión con 10% ruido.

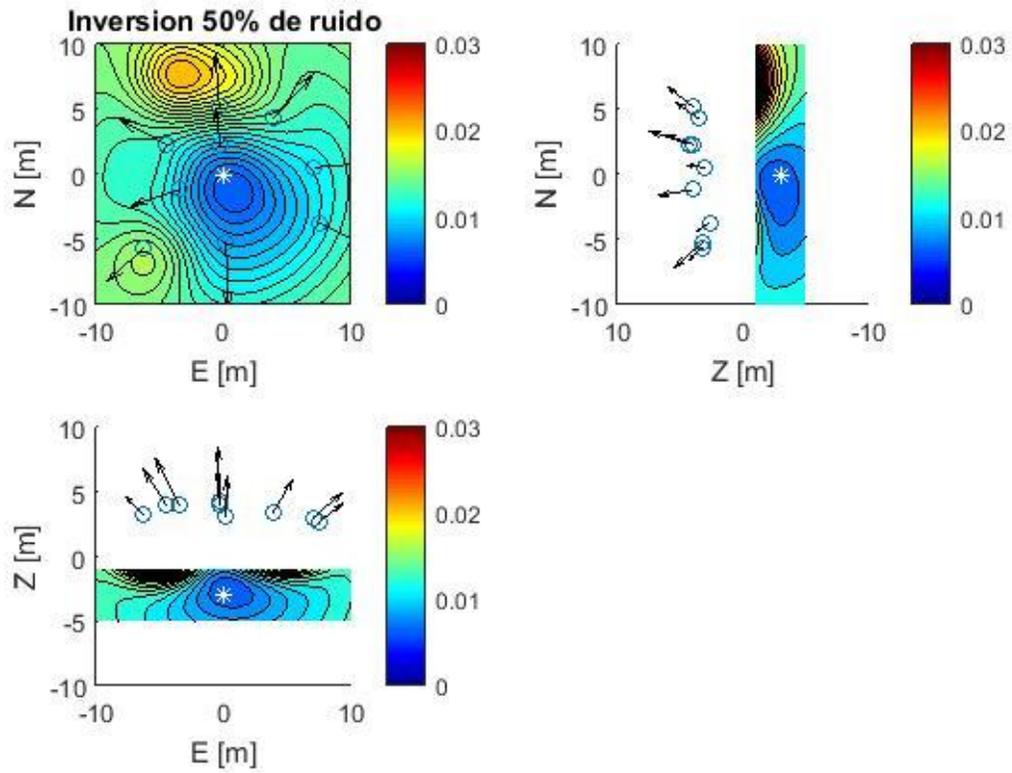


Fig. 5.27 Secciones 2D de la inversión con 50% ruido.

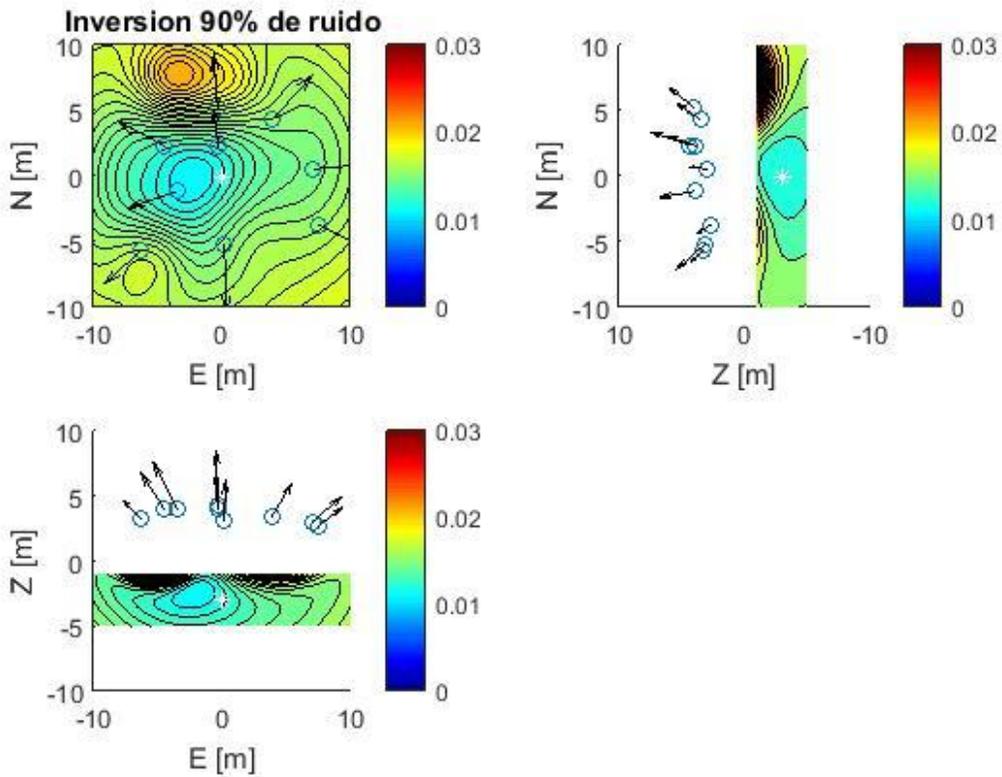


Fig. 5.28 Secciones 2D de la inversión con 90% ruido.

Pruebas de cobertura acimutal con fuente desplazada (Figs. 5.29-5.32) error en desajuste de modelo en milímetros (barra de color de contornos).

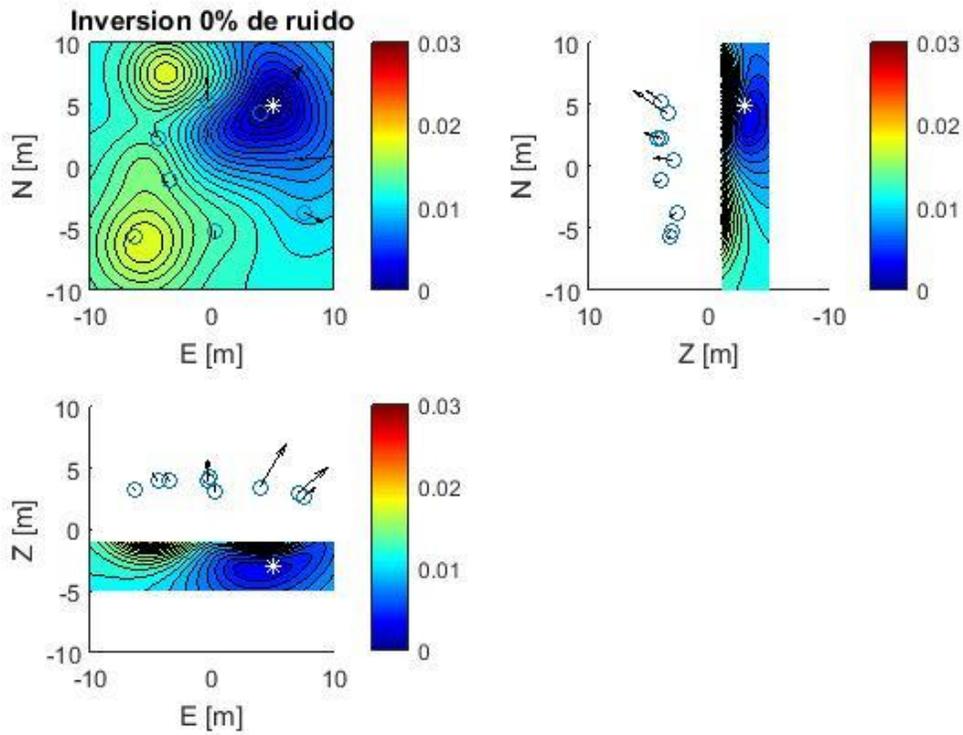


Fig. 5.29 Secciones 2D de la inversión con 0% ruido.

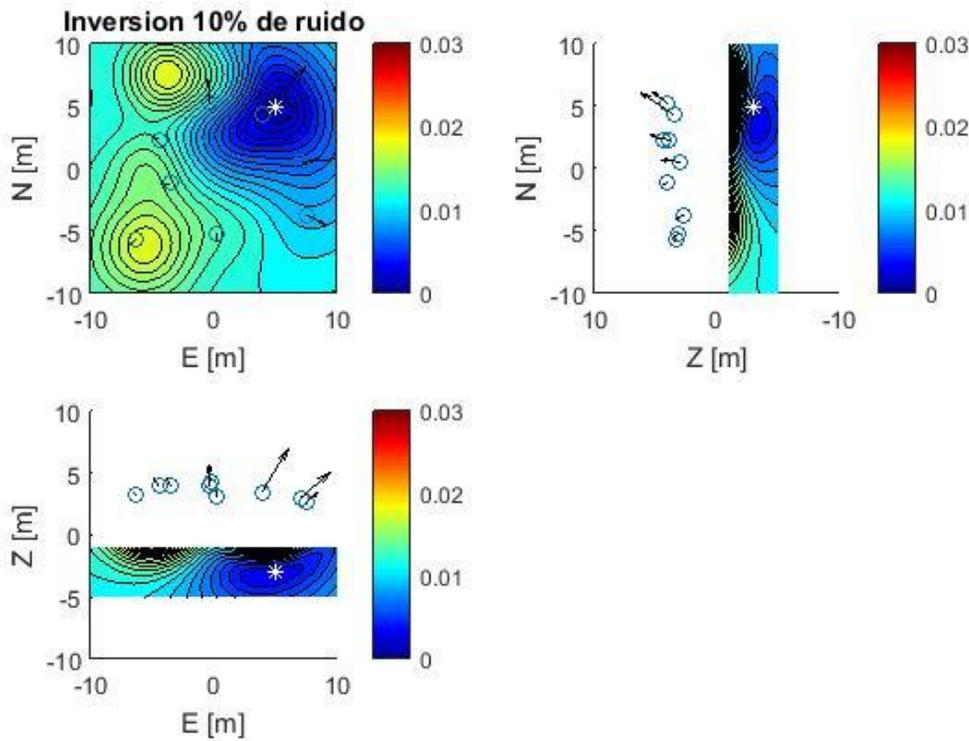


Fig. 5.30 Secciones 2D de la inversión con 10% ruido.

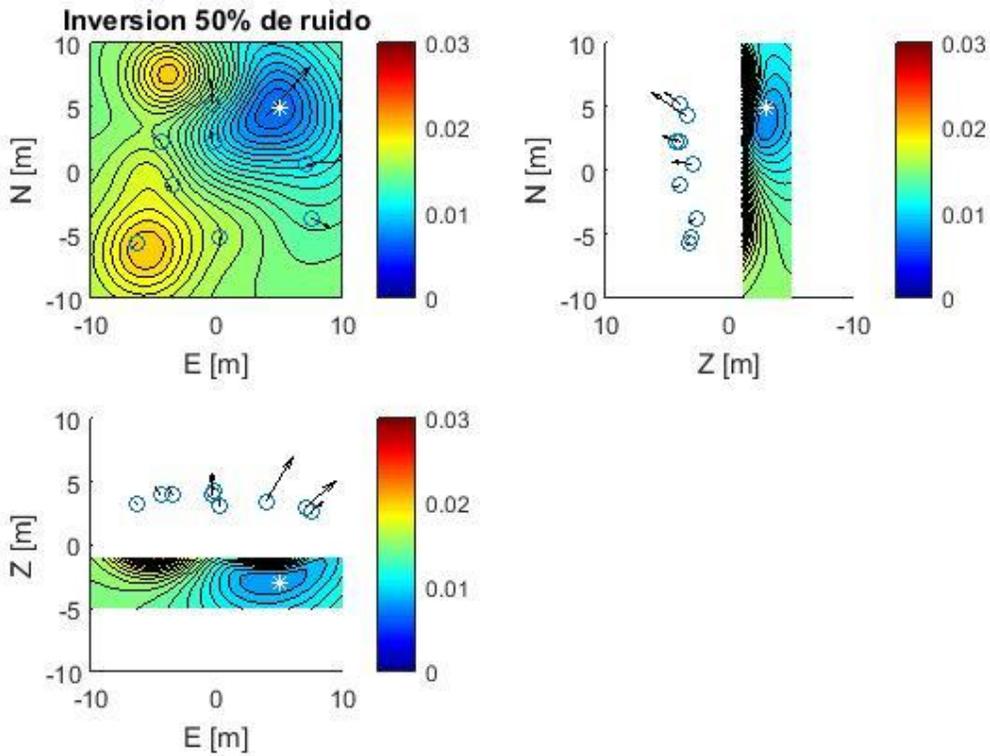


Fig. 5.31 Secciones 2D de la inversión con 50% ruido.

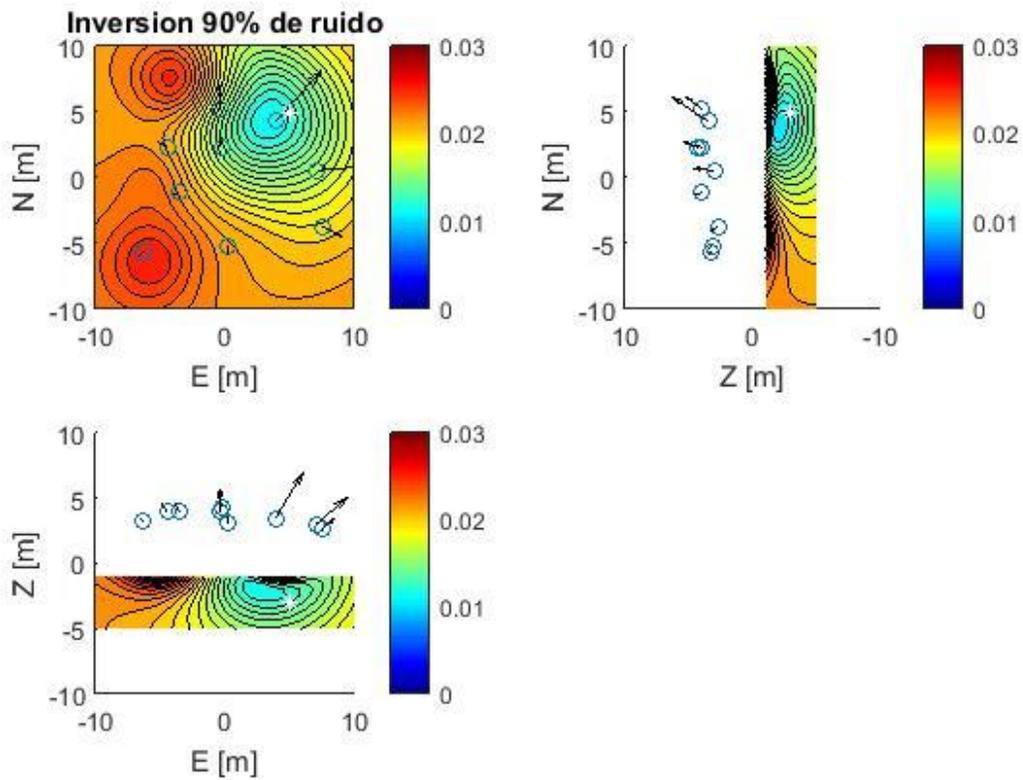


Fig. 5.32 Secciones 2D de la inversión con 90% ruido.

5.5.2 Arreglo de red propuesto: Cobertura radial



Fig. 5.33 Localización de estaciones reales (amarillo) en referencia con la cumbre, y propuesta de instalación de estaciones para una cobertura radial.

En este arreglo de red propuesto se busca complementar las estaciones actuales de tal forma que hagan arreglos de estaciones en línea recta respecto a la cumbre, con una estación a 3 km de distancia de la estación actual respecto a la cumbre como dirección acimutal (Fig. 5.33). De esta manera se aprovecha la cobertura acimutal que actualmente posee el arreglo y se complementa obteniendo más lecturas sobre la distancia radial de la deformación.

Pruebas de cobertura radial con distintos niveles de ruido (Figs. 5.34-5.37) error en desajuste de modelo en milímetros (barra de color de contornos).

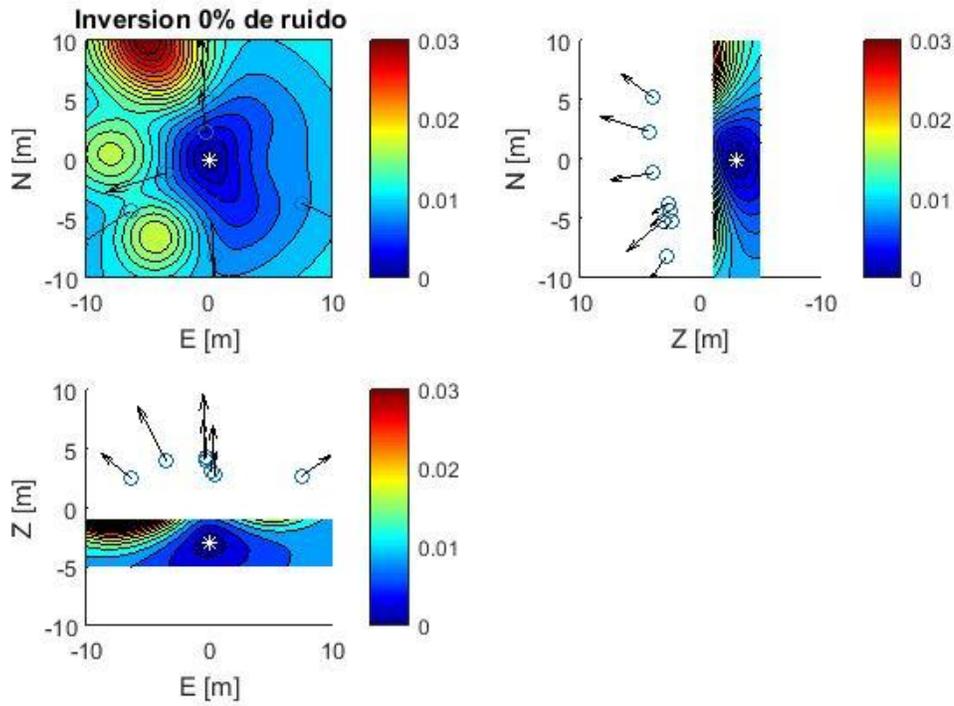


Fig. 5.34 Secciones 2D de la inversión con 0% ruido.

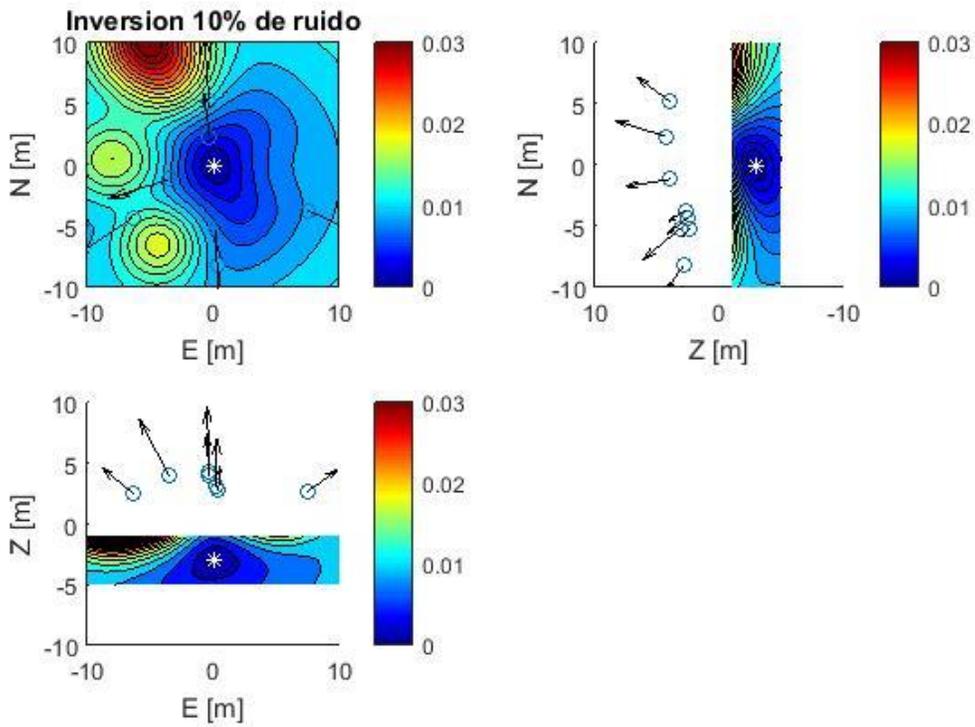


Fig. 5.35 Secciones 2D de la inversión con 10% ruido.

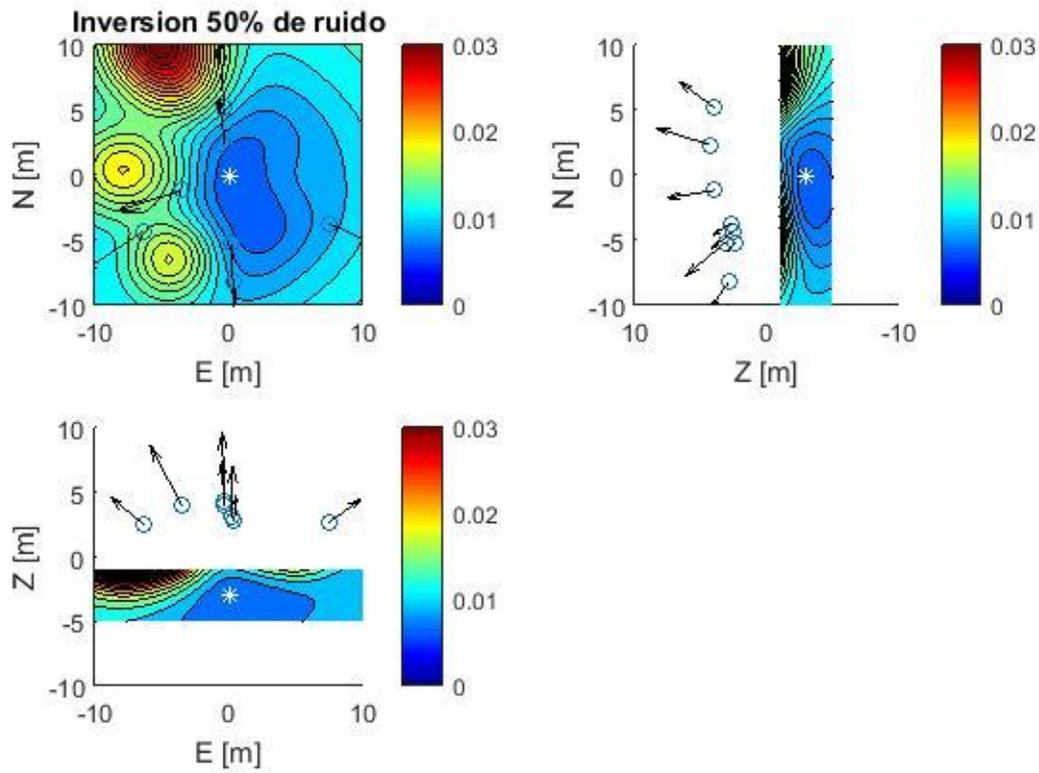


Fig. 5.36 Secciones 2D de la inversión con 50% ruido.

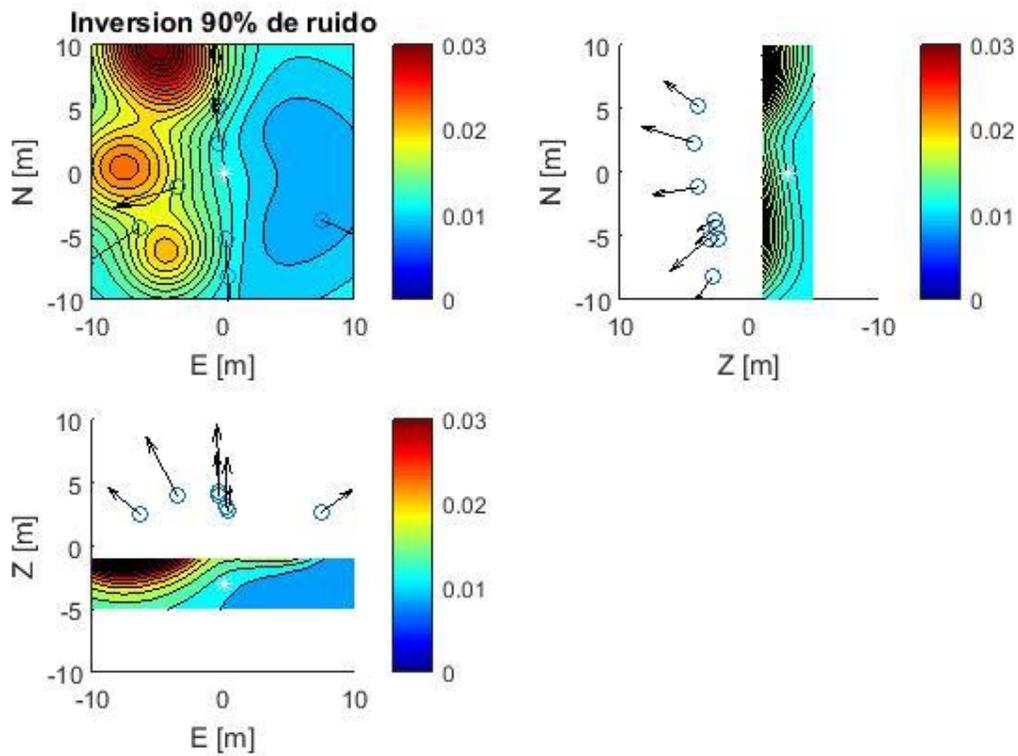


Fig. 5.37 Secciones 2D de la inversión con 90% ruido.

Pruebas de cobertura radial con fuente desplazada (Figs. 5.38-5.41) error en desajuste de modelo en milímetros (barra de color de contornos).

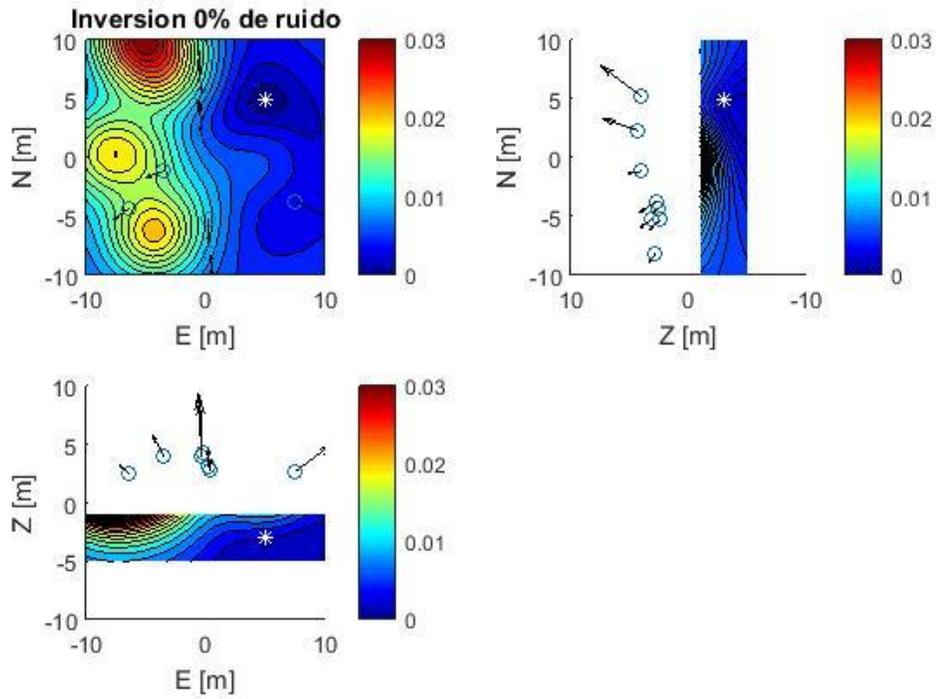


Fig. 5.38 Secciones 2D de la inversión con 0% ruido.

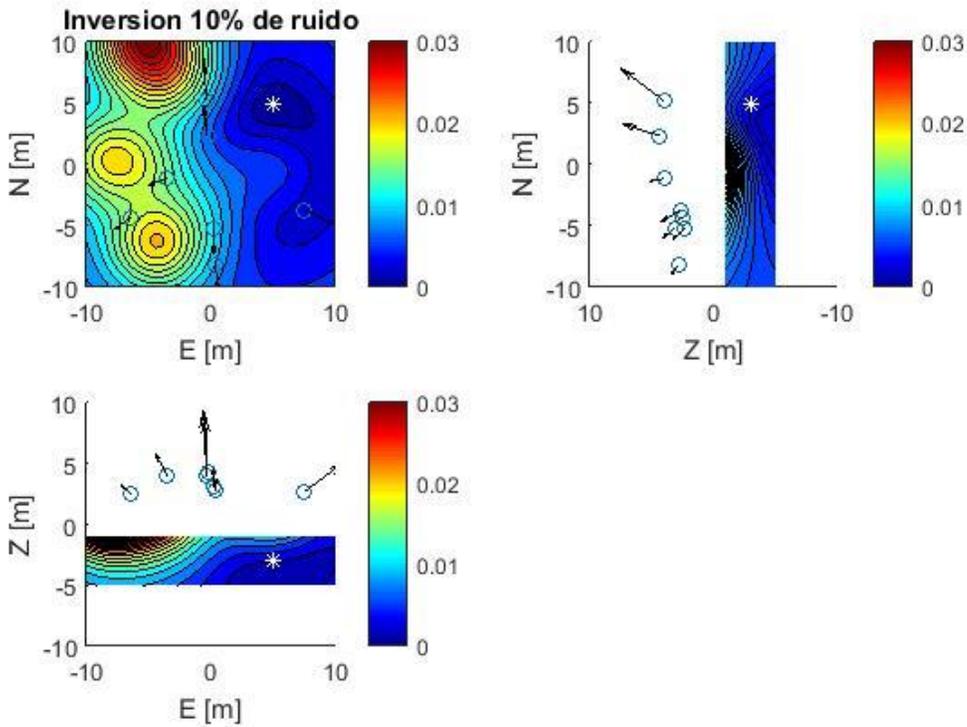


Fig.5.39 Secciones 2D de la inversión con 10% ruido.

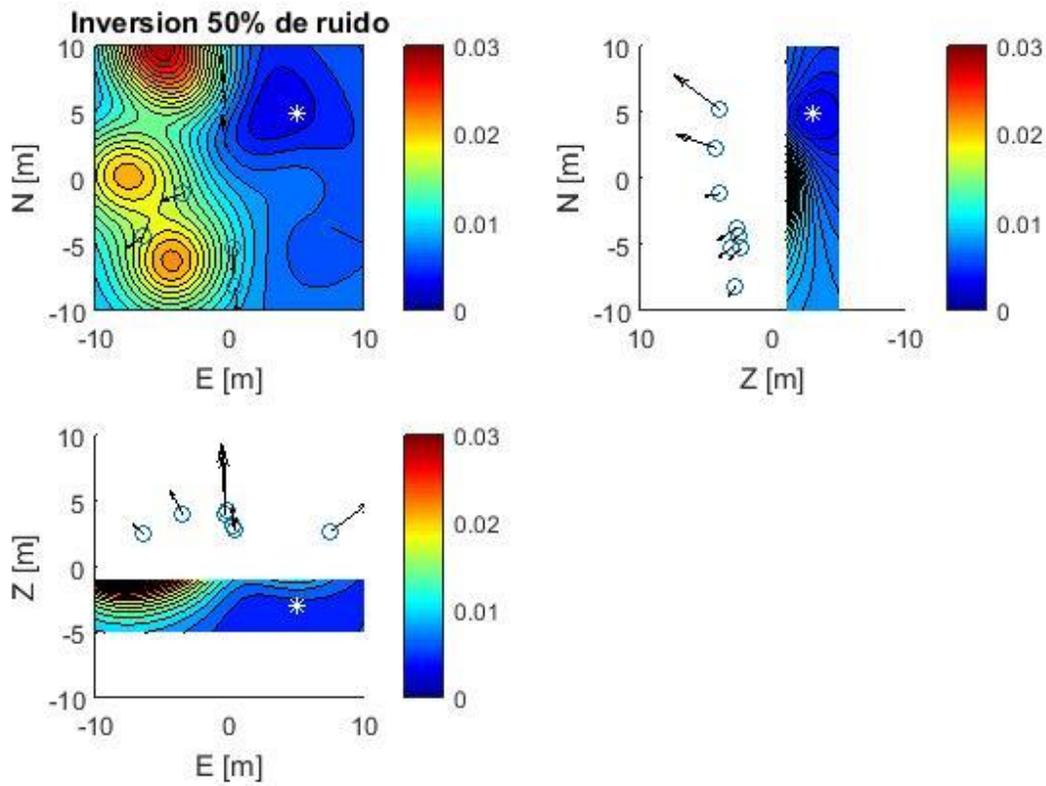


Fig. 5.40 Secciones 2D de la inversión con 50% ruido.

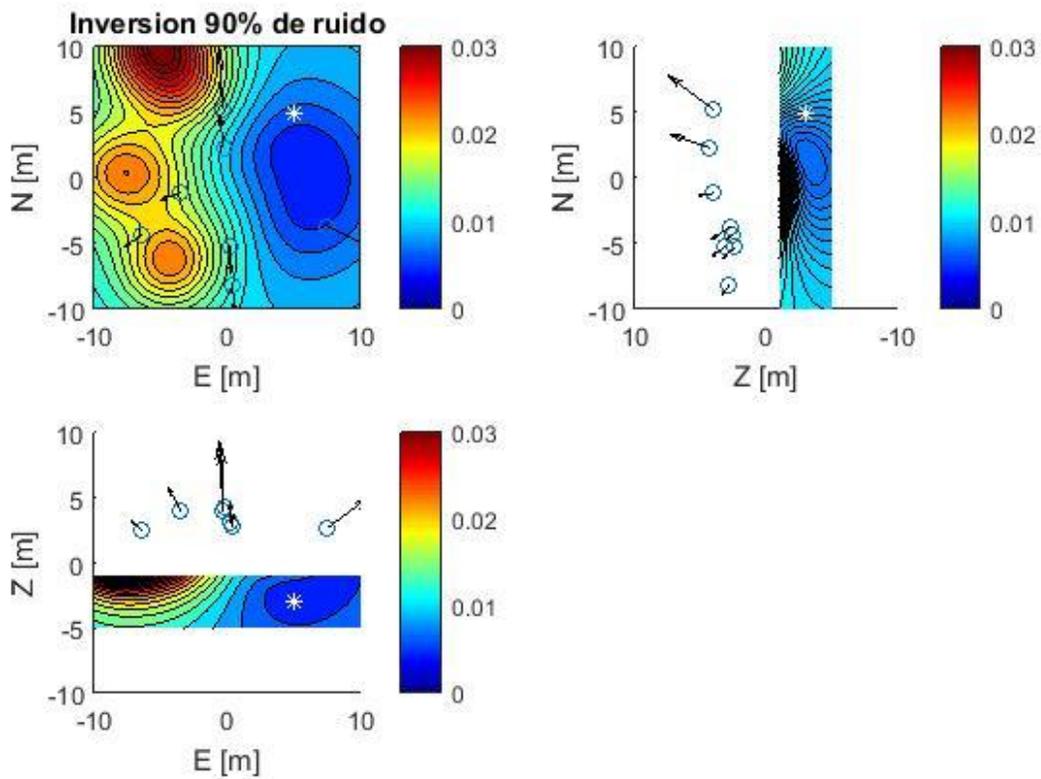


Fig. 5.41 Secciones 2D de la inversión con 90% ruido.

5.5.3 Arreglo de red propuesto: Cobertura acimutal expandida

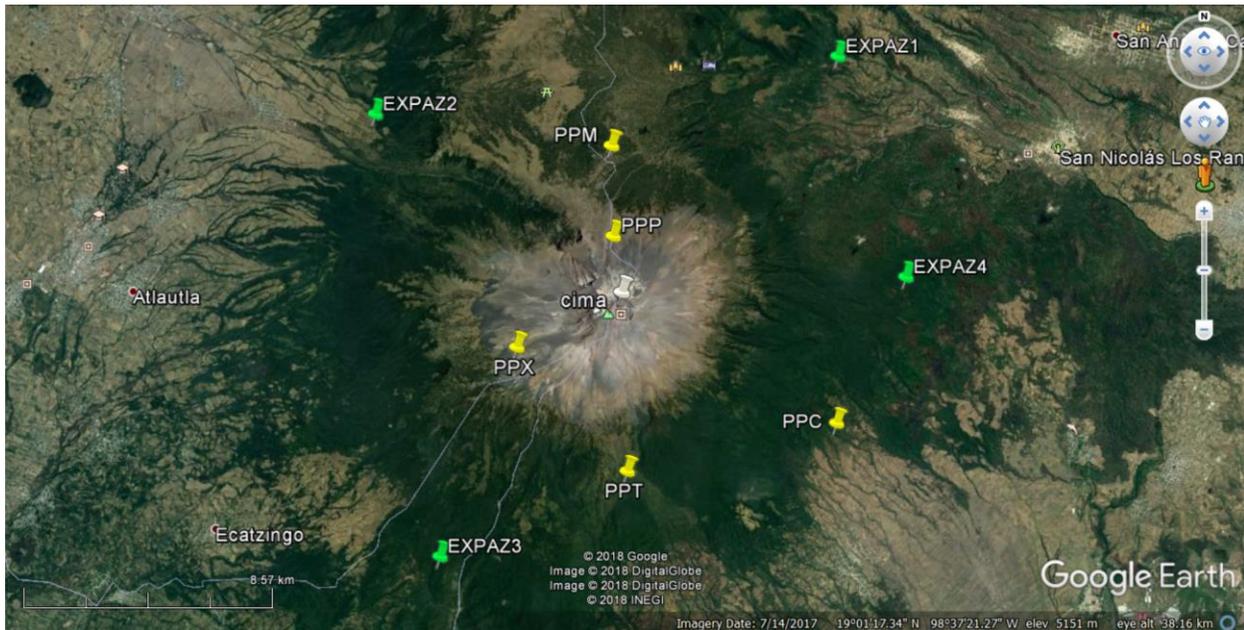


Fig. 5.42 localización de las estaciones reales (amarillo) en referencia a la cumbre del volcán (blanco) y la sugerencia de instalación de estaciones para lograr una cobertura acimutal y radial.

El arreglo de estación aquí propuesto busca obtener una mejor resolución que los arreglos anteriores beneficiándose de los resultados de ambos, al aumentar la cobertura acimutal, así como aumentar los puntos radiales del patrón de desplazamiento (Fig. 5.42).

Se sugiere el posicionamiento de estaciones alejadas de la cumbre para obtener más información del decaimiento del desplazamiento general alrededor de la cumbre. Con la finalidad de cubrir acimutalmente las lagunas que el arreglo actual posee, mientras que las estaciones, al estar lejos de la cumbre, se considera serán menos proclives a ser afectadas en caso de que el volcán tenga actividad violenta, y lo bastante alejadas de poblaciones para evitar el ruido y alteraciones que conlleva la cercanía con poblaciones cercanas

Pruebas cobertura acimutal expandida con distintos niveles de ruido (Figs. 5.43-5.46) error en desajuste de modelo en milímetros (barra de color de contornos).

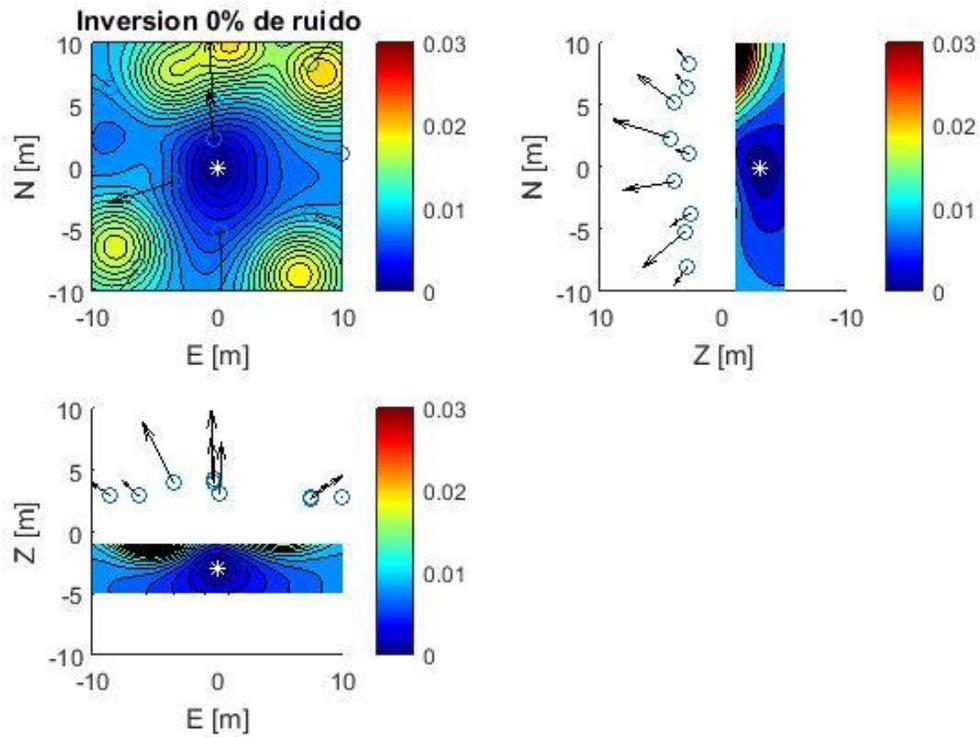


Fig. 5.43 Secciones 2D de la inversión con 0% ruido.

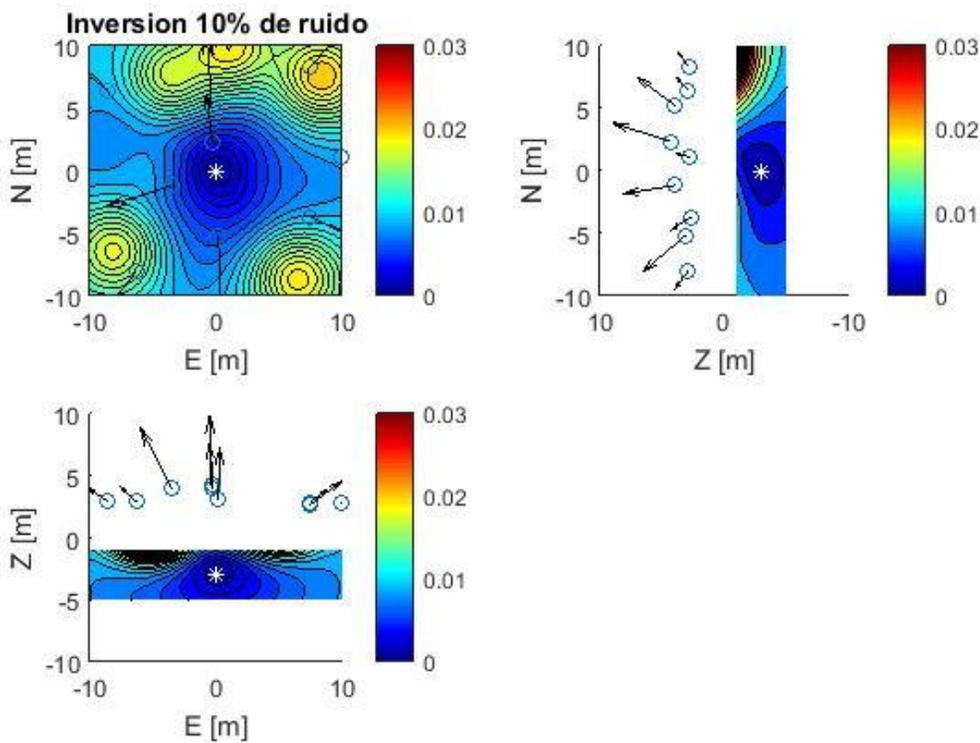


Fig. 5.44 Secciones 2D de la inversión con 10% ruido.

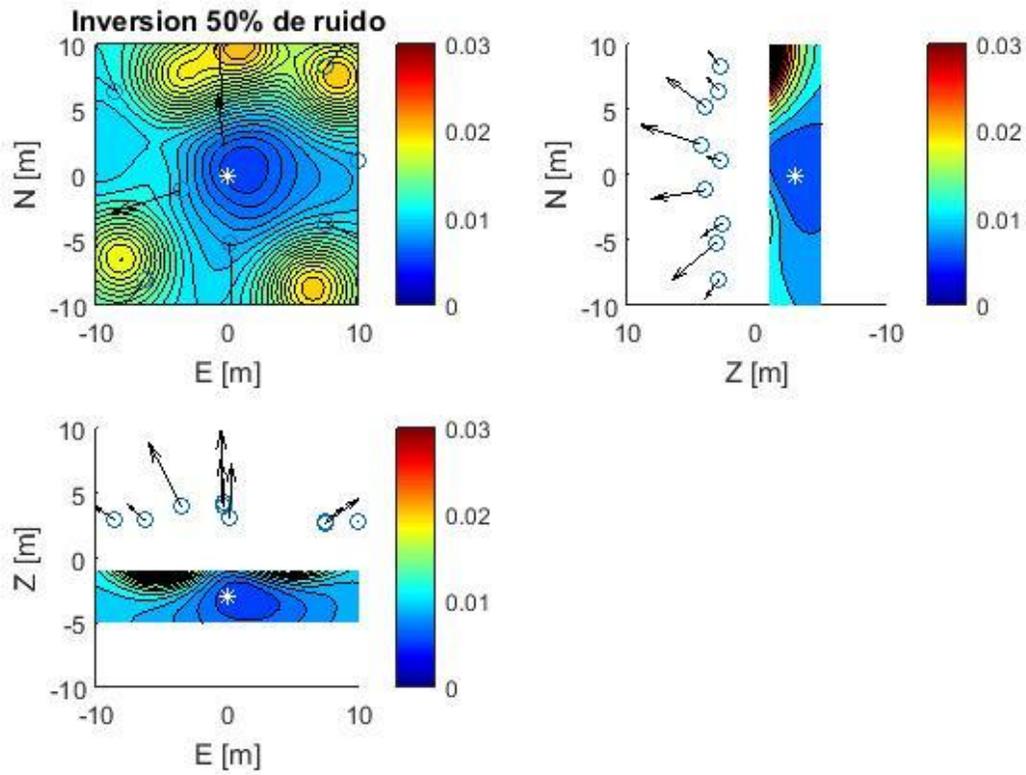


Fig. 5.45 Secciones 2D de la inversión con 50% ruido.

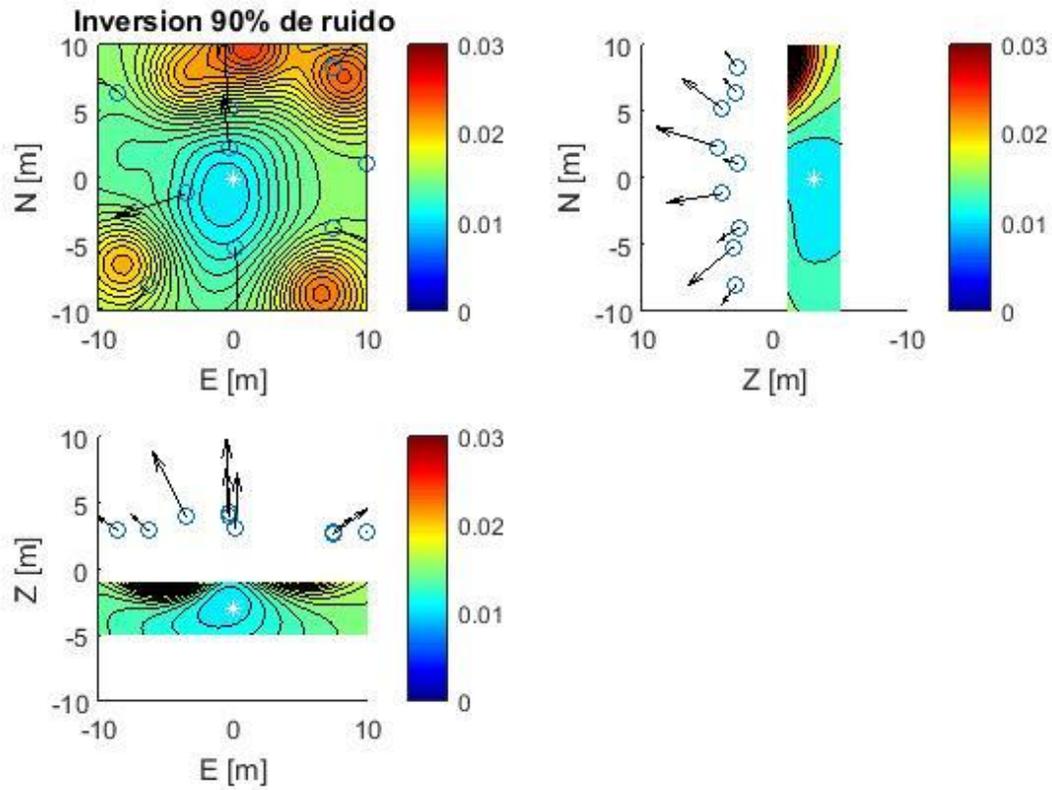


Fig. 5.46 Secciones 2D de la inversión con 90% ruido.

Pruebas cobertura acimutal expandida con fuente desplazada (Figs. 5.47-5.50) error en desajuste de modelo en milímetros (barra de color de contornos).

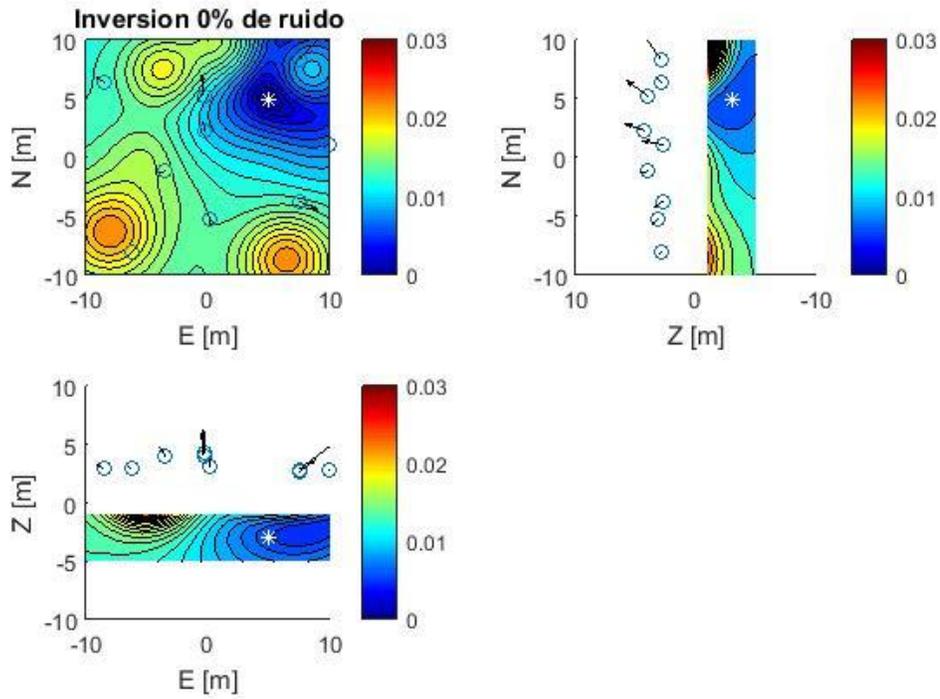


Fig. 5.47 Secciones 2D de la inversión con 0% ruido.

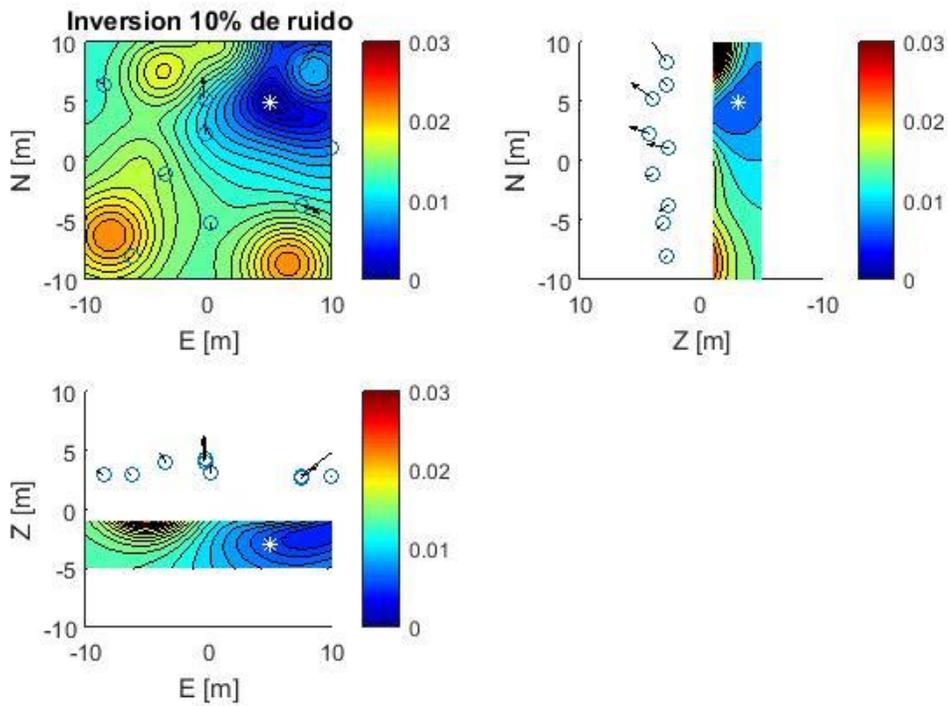


Fig. 5.48 Secciones 2D de la inversión con 10% ruido.

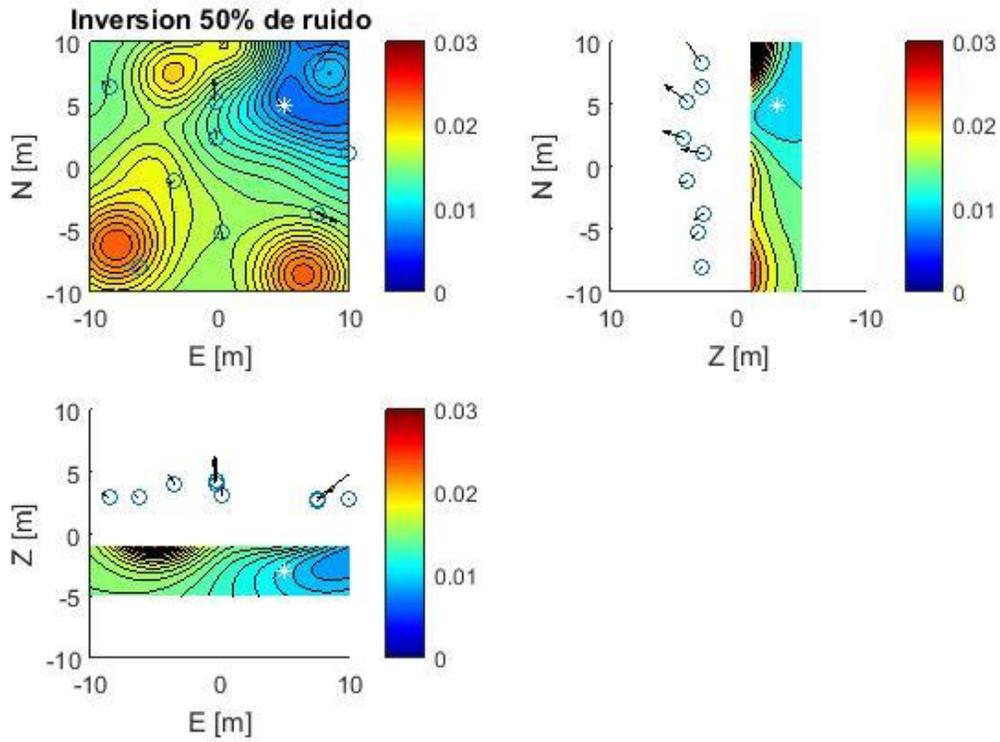


Fig. 5.49 Secciones 2D de la inversión con 50% ruido.

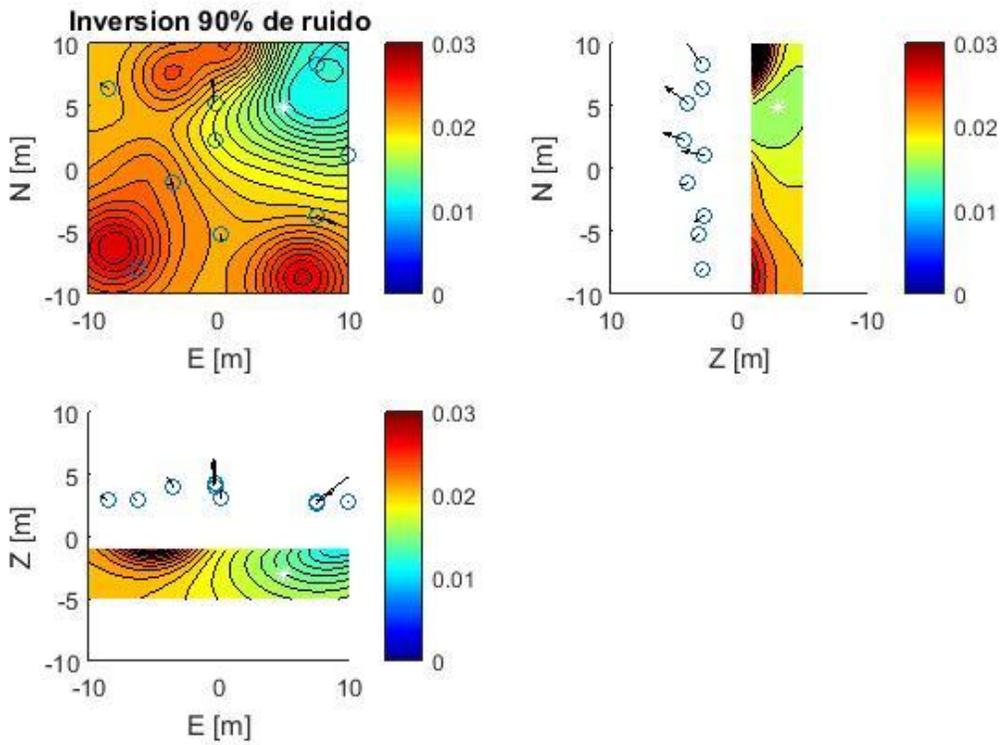


Fig. 5.50 Secciones 2D de la inversión con 90% ruido.

5.6 Análisis de caracterización de parámetros completa

En esta sección se procede a analizar la inversión de los 5 parámetros que definen nuestra fuente, localización X, Y, Z, presión y radio, para esto utilizamos los datos sintéticos que simulan datos obtenidos en campo, y los sometemos a nuestra inversión, donde ahora en cada punto del posible universo de soluciones de nuestra malla, se utilizan un número determinado de posibles combinaciones aleatorias de presión y radio de la fuente.

Los datos sintéticos que simulan mediciones fueron creados mediante el algoritmo de método directo anteriormente presentado con los siguientes parámetros:

Presión: 1 Mpa.

Radio: 1 km

Localización 0,0,3 km

La localización de la fuente usa como referencia la cumbre del volcán y la profundidad a partir desde el nivel medio del mar.

De los cálculos de error en cada ubicación se grafican respecto a cada parámetro asumiendo que el punto de menor error global representa los parámetros más aproximados a la solución real, asumiendo que el error mínimo es la localización de la fuente. Esta prueba se llevó a cabo sin la función de ruido para observar el comportamiento de cada parámetro con mayor precisión. Se graficaron en la primera imagen todos los resultados juntos, y después se hizo un zoom sobre el error mínimo (Figs. 5.51 y 5.52)

Caracterización de la fuente completa dentro de la malla mediante método de Monte Carlo

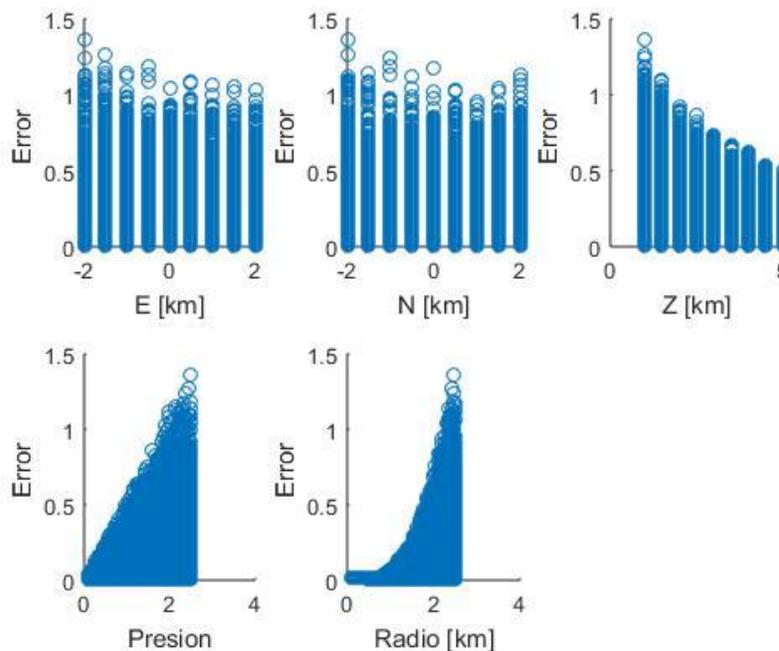


Fig. 5.51 Gráfico de parámetros contra error.

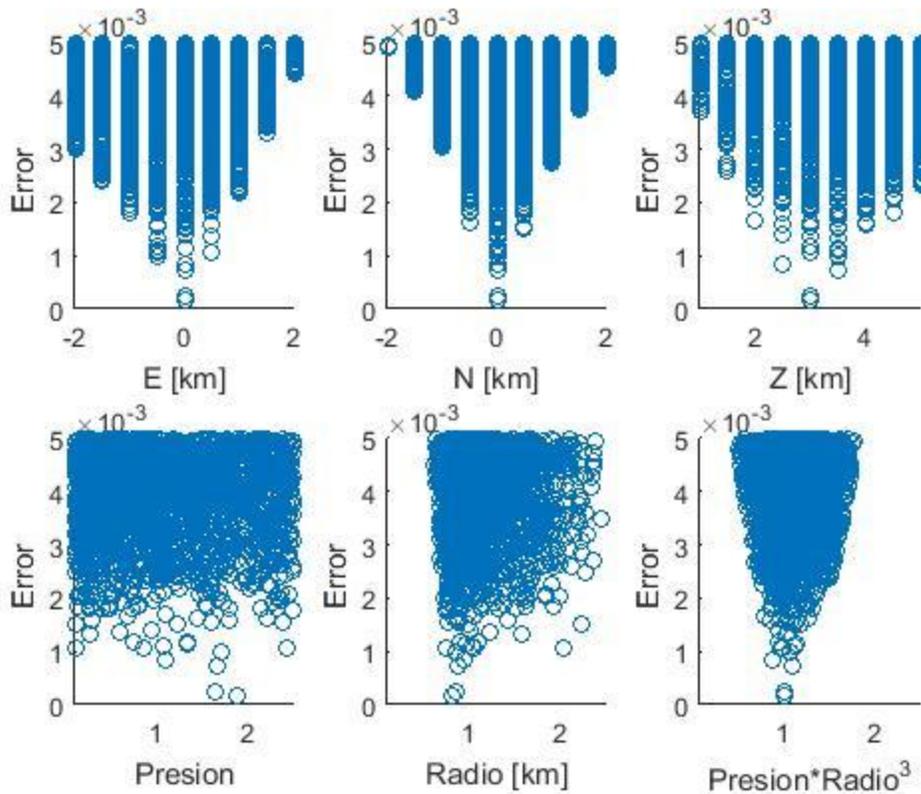


Fig. 5.52 Gráfico de parámetros y nivel de error desajuste en [m] enfocado en los errores mínimos.

En este gráfico (Fig 5.52) podemos observar los parámetros de la fuente no son determinados de manera única, a pesar de hacer constantes 3 de los 5 parámetros para determinar el error mínimo en la fuente verdadera, esto se debe a que es un problema de dos incógnitas y una ecuación. Es por ello que se crea el último gráfico (abajo derecha) el cual es el factor $P * R^3$ el cual convierte nuestro sistema original de una ecuación y dos incógnitas en un sistema lineal de una ecuación y una incógnita, con la desventaja de que un número infinito de combinaciones de presión y radio pueden resultar en el mismo resultado. Esto es un problema bien conocido y estudiado de trade-off entre parámetros no lineales (Jackson, 1973) en este caso la presión y el volumen de una fuente esférica.

A continuación, se presentan los resultados de errores respecto a cada parámetro en escala reducida para cada arreglo de estaciones propuestas (Figs. 5.53-5.55), para observar si hay una diferencia en la convergencia del error a causa del número y arreglo distinto de estaciones.

Análisis de error por parámetro individual, arreglo de estaciones de cobertura acimutal (COBAZ)

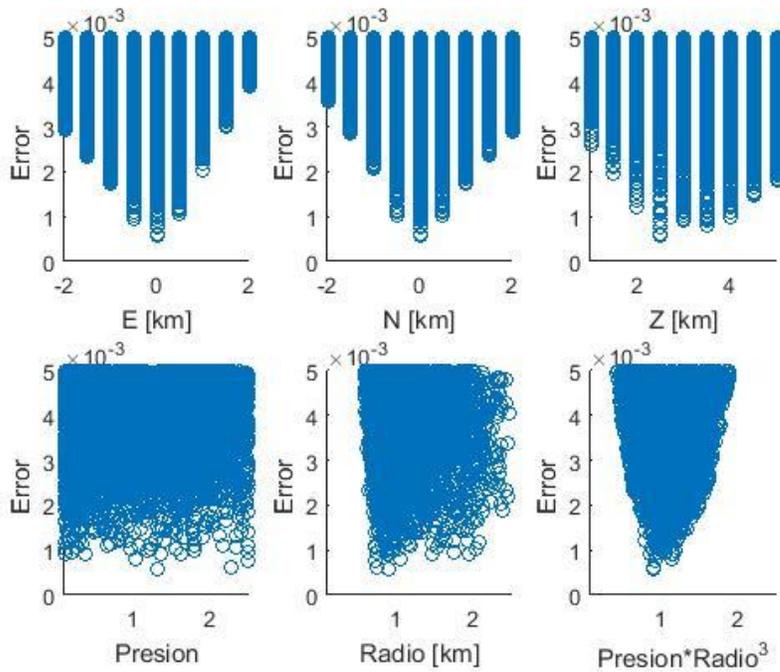


Fig. 5.53 Gráfico de parámetros y nivel de error desajuste en [m] enfocado en los errores mínimos para arreglo. COBAZ

Análisis de error por parámetro individual, arreglo de estaciones de cobertura radial (COBRA)

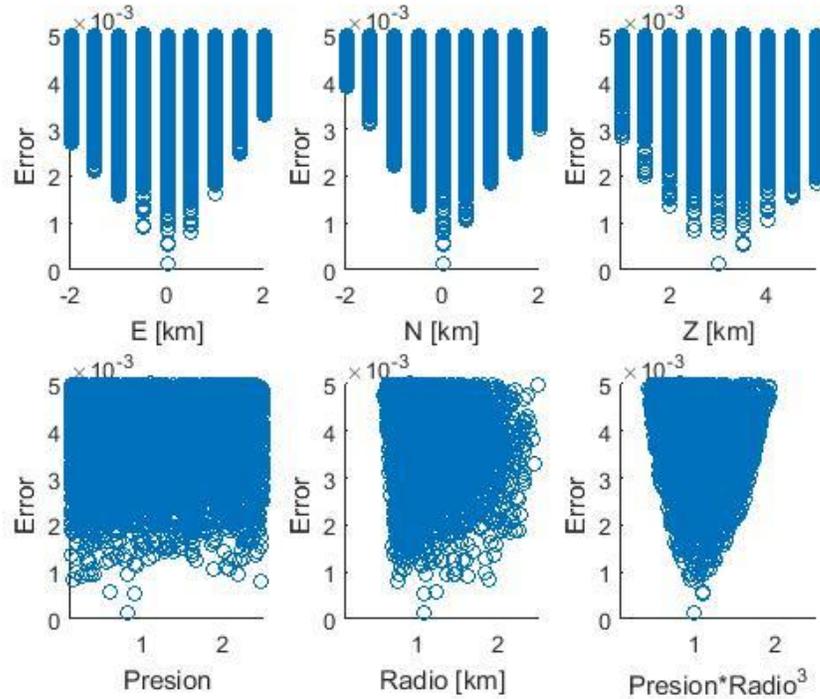


Fig. 5.54 Gráfico de parámetros y nivel de error desajuste en [m] enfocado en los errores mínimos para arreglo COBRA.

Análisis de error por parámetro individual, arreglo de estaciones de expansión acimutal (EXPAZ)

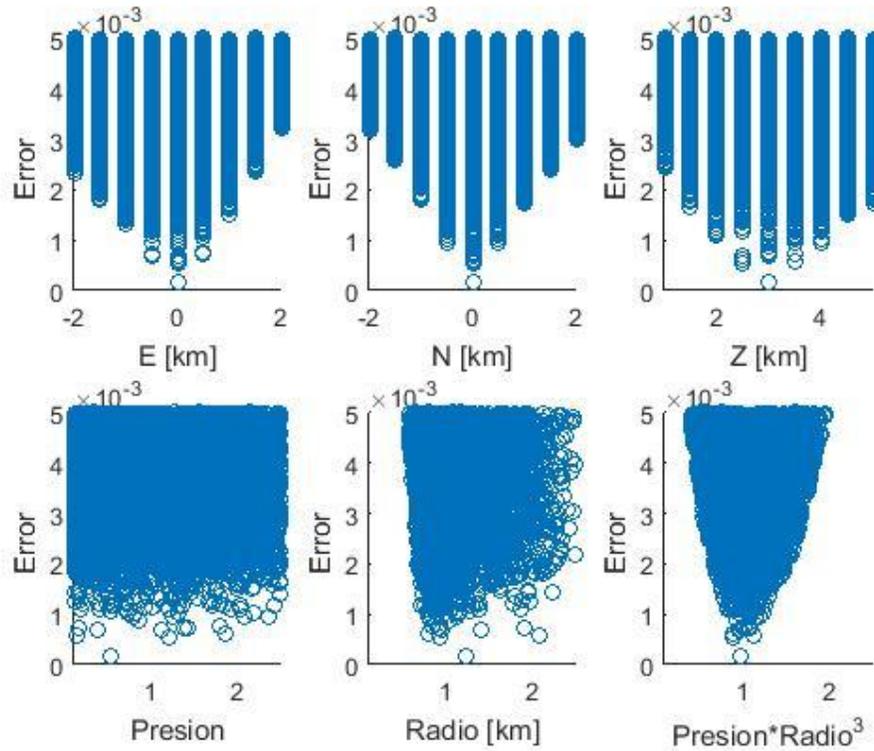


Fig. 5.55 Gráfico de parámetros y nivel de error desajuste en [m] enfocado en los errores mínimos para arreglo EXPAZ.

Después de observar el fenómeno de no unicidad en la solución del método inverso para algunos de los arreglos de estaciones, se graficaron los errores en todas las posibles soluciones que pueden obtenerse de presión y radio para observar cómo se comporta la relación entre estos parámetros (Fig. 5.56), con la finalidad de encontrar la convergencia en la solución única.

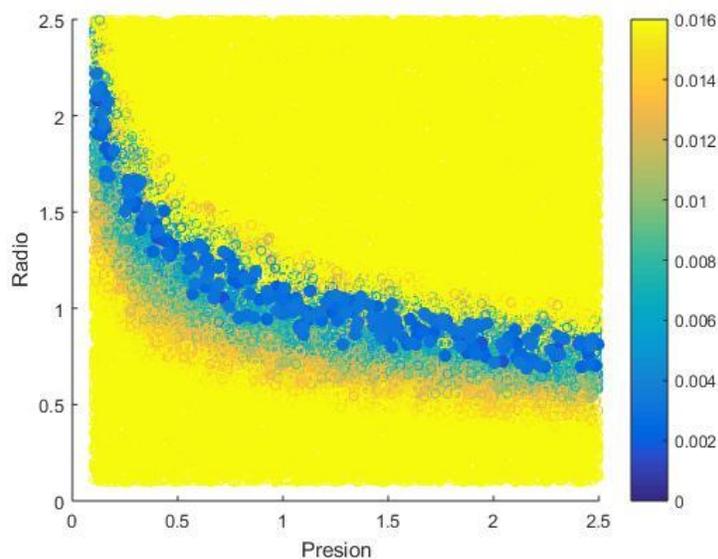


Fig. 5.56 Relación entre presión y radio de todas las posibles soluciones en el espacio y las combinaciones posibles, en la escala de color el error de ajuste en [m].

Podemos observar claramente una tendencia de todos los valores de presión y radio que determinan la existencia de no unicidad en la solución, por lo que se procede a observar las 250 soluciones con el menor error, graficando sus parámetros de Presión contra Radio de la fuente (Fig. 5.57).

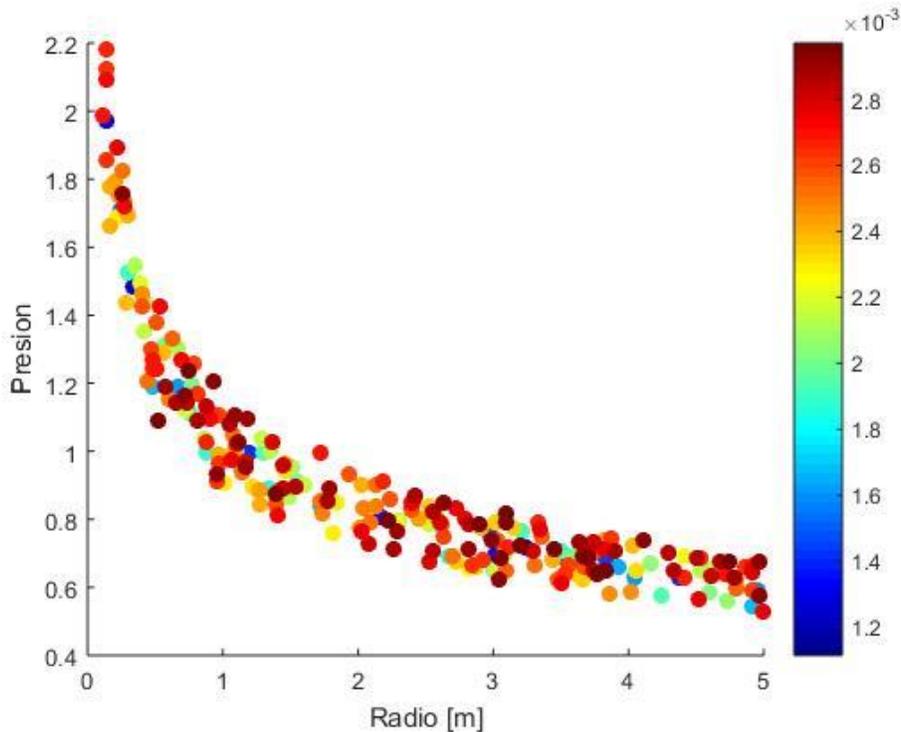


Fig. 5.57 Gráfico de los 250 valores de menor error graficando parámetros de Presión y Radio.

Lo primero que se observó, fue una relación hiperbólica entre el radio y la presión donde los errores mínimos variaban entre estos dos parámetros, esto es causado por el problema algebraico, nuestro modelo de desplazamiento posee cinco incógnitas. Al definir una localización de la malla nuestro problema pasa de una ecuación y cinco incógnitas, a ser un problema de una ecuación y dos incógnitas; sin embargo, esto aún no permite una solución única del problema, por lo que se observa el fenómeno en la figura 5.53 y 5.54 donde las soluciones mínimas no convergen a una sola combinación de parámetros sino a una relación de posibles combinaciones por lo que se calculó también el error para una variable combinada de presión y volumen, lo cual redujo el problema a una ecuación y una incógnita.

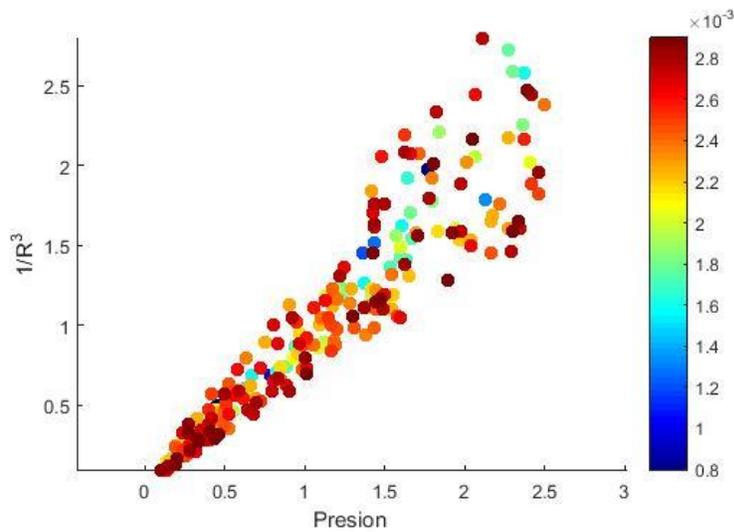


Fig. 5.58 grafico de los 250 valores de menor error graficados respecto a los parámetros presión y el valor $1/R^3$

Se observa en el gráfico con los datos filtrados una correlación clara donde los valores de menor error tienen una distribución a lo largo de una curva semejando una hipérbola, la cual en el grafico 5.58 se acoplan a una recta entre los valores de presión y el parámetro $\frac{1}{R^3}$, mostrando el problema de no unicidad para el modelo de presión hidrostática de una fuente esférica. Esto es, una fuente de gran radio y poca presión puede generar desplazamientos similares a una fuente de radio pequeño con gran presión.

Una vez observado esto, se procedió a usar el mismo algoritmo para una nueva serie de pruebas, esta vez para observar el comportamiento del método inverso, al dejar uno de los parámetros aleatorios (Presión y Radio) constante en su valor real, utilizando los mismos valores de fuente sintética, esto asemejará a haber obtenido esta información mediante estudios auxiliares como análisis de fumarolas, tomografía de ruido sísmico entre otras. Con esta prueba también se busca observar el tradeoff que existe entre la profundidad y los demás parámetros, pues al tener un tradeoff entre dos parámetros de la fuente independiente de la localización, no permite observar la relación de estos parámetros con la localización claramente.

Mediante este experimento se procede a mostrar los resultados de convergencia usando métodos de Monte Carlo para un solo parámetro para el arreglo de estaciones actualmente instalado en el Popocatépetl.

5.6.1 Caracterización de fuente con presión constante

Se procedió a caracterizar los parámetros de la fuente considerando que se conoce uno de los parámetros aleatorios, en este caso la Presion de 1 MPa.

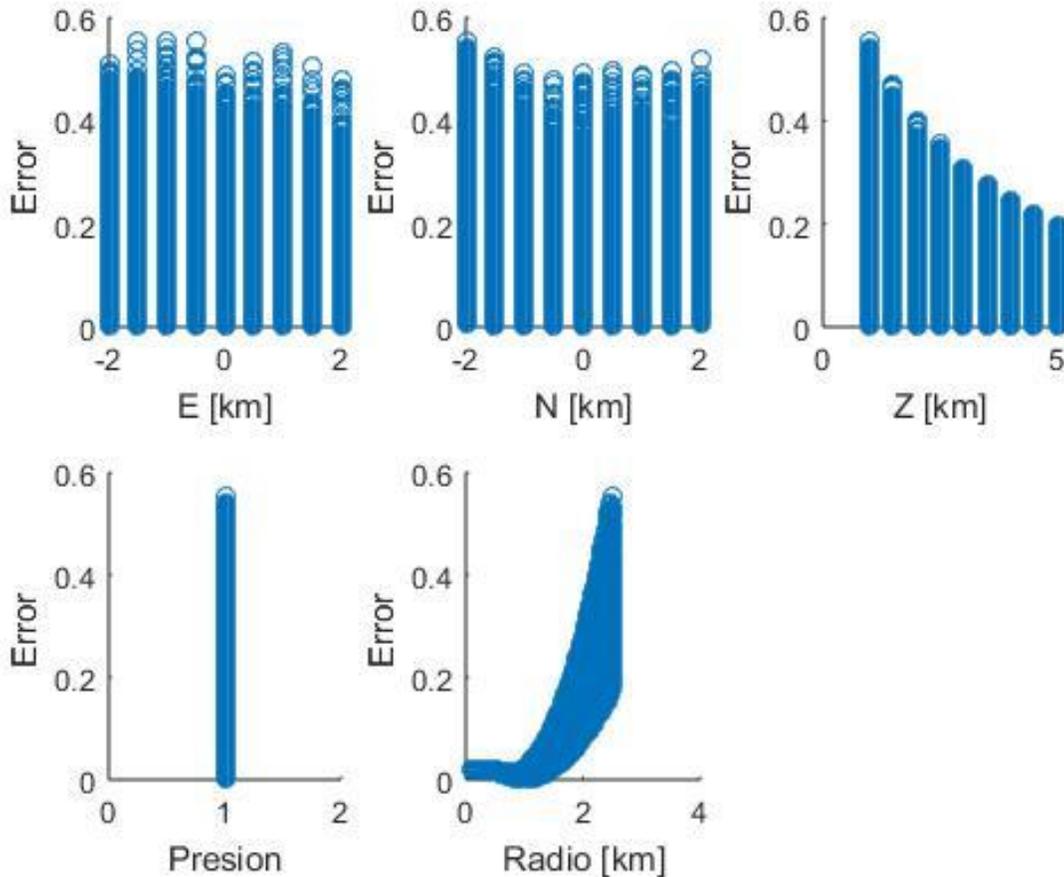


Fig. 5.58 Gráfico de parámetros y nivel de error con presión de valor constante.

En la figura 5.58 se observa como el error respecto al parámetro del radio de la fuente diverge rápidamente, una vez que se aleja del valor real, consistente con la condición del modelo de presión hidrostática, que requiere que el radio de la fuente sea menor que la profundidad, por otro lado los valores menores cuando tienden al valor verdadero de la fuente tienden a converger con una pendiente menos pronunciada.

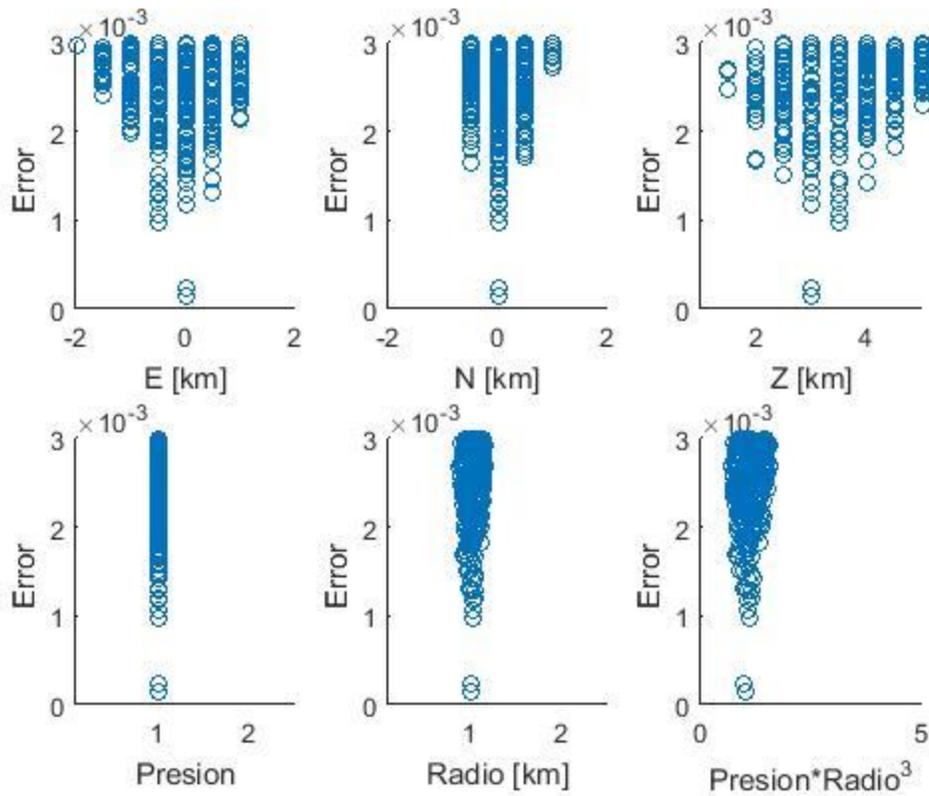


Fig. 5.59 Acercamiento a los valores mínimos de error para cada parámetro.

En la imagen de acercamiento al error mínimo (Fig. 5.59) podemos observar que los parámetros tienden a la convergencia a los parámetros reales de fuente, a pesar de que al tener 100 iteraciones en cada punto del espacio para ubicar la fuente con diferentes valores de presión y ruido es probable no alcanzar el valor de error mínimo dada la baja densidad de iteraciones, la aproximación se considera con una convergencia adecuada para el algoritmo.

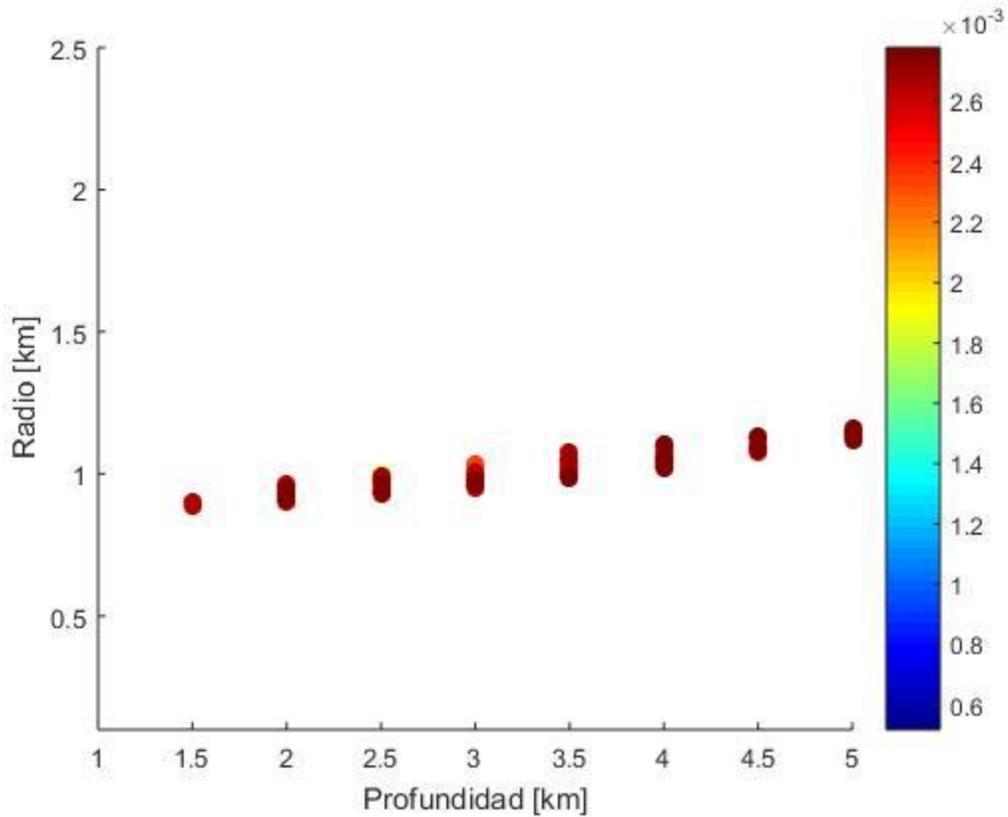


Fig. 5.60 Relación entre radio de la fuente y profundidad en los valores de menor error. El error está representado con un código de color de azul a rojo, los puntos de error mínimo se sobreponen los de mayor sobre los de menor por lo que todo el gráfico aparece rojo.

En la figura 5.60, el cual se hace a partir de las 250 soluciones de error menor sin importar su ubicación en el espacio, observamos la relación que existe entre los valores mínimos de error en relación con la profundidad y el radio de la fuente cuando consideramos la presión constante, se aprecia como una fuente de mayor radio a mayor profundidad puede generar desplazamientos similares a una fuente de menor radio a menor profundidad.

A continuación, se presentan los gráficos de parámetros y error para el caso donde el radio de la fuente es fijo en 1 km.

5.6.2 Errores de cada parámetro de la fuente suponiendo radio constante de 1 km

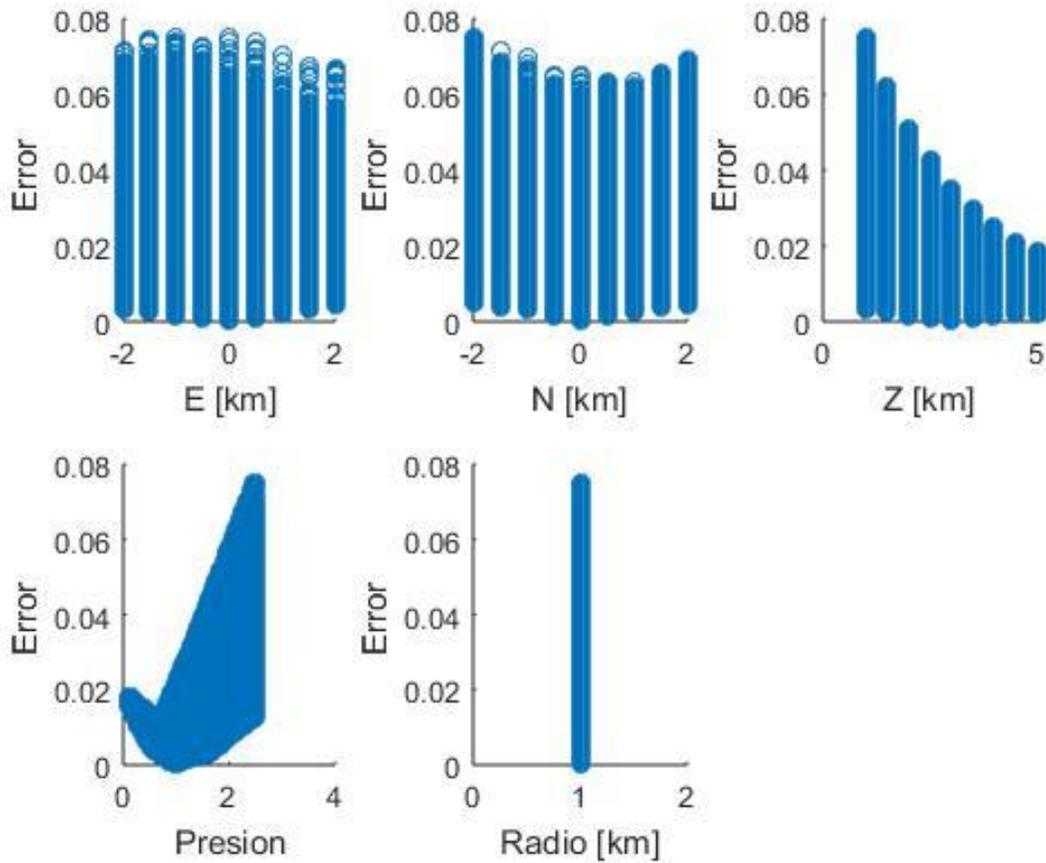


Fig. 5.61 Gráficos de parámetros y nivel de error con radio constante de 1 km.

En la figura 5.61 la cual representa el resultado de todas las posibles combinaciones, de localización y parámetros, con su valor de error, podemos observar una tendencia similar del error en el parámetro de la presión, al que se observaba en la Fig. 5.58 para la tendencia del error del radio cuando la presión es constante, sin embargo, se observa que esa tendencia tiene un mejor contraste en el parámetro del radio, observando cómo en esta figura, la curva del radio tiene un abanico más extendido de posibles niveles de error.

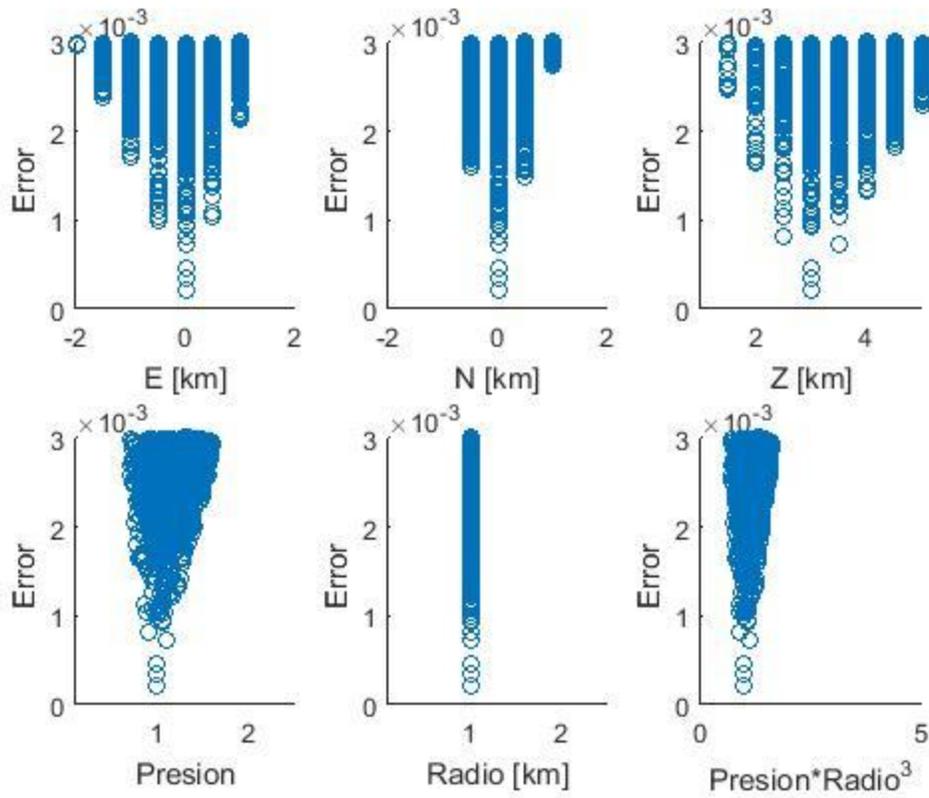


Fig. 5.62 Análisis de errores mínimos de los parámetros de localización y presión con radio constante de 1 km.

Se observa en la Fig. 5.62 que los parámetros espaciales, así como la presión, convergen con buena resolución hacia los valores sintéticos utilizados.

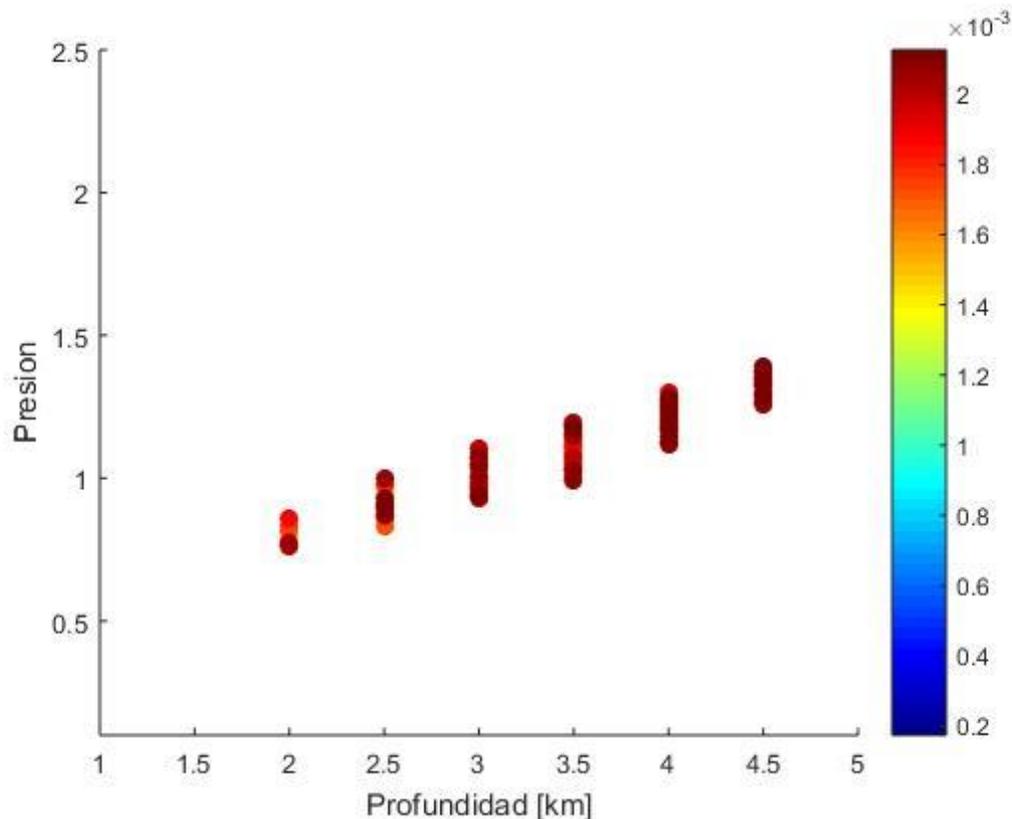


Fig. 5.63 Diagrama de presión en función de la profundidad para las 250 mejores soluciones. El código de color representa el error calculado entre los vectores calculados y los vectores originales. Se aprecia un tradeoff casi lineal entre presión y profundidad.

En la figura 5.63 se observa una relación lineal entre la presión y la profundidad cuando fijamos el radio a una constante, en este caso 1 km. Si se localiza a mayor profundidad y mayor presión, puede generar desplazamientos superficiales similares a una fuente de menor profundidad y menor presión. A diferencia con la relación radio-profundidad podemos observar una pendiente más pronunciada en esta curva ($m=0.32$) mientras que en el gráfico 5.60 ($m=0.1$), lo cual nos indica que las presiones cambian mucho más en función de la profundidad cuando el radio es constante que en el caso contrario, los radios no varían tanto con la profundidad cuando la presión es constante. Como tenemos una idea de los valores de presión en función de la profundidad y una idea del radio de la fuente, eso permite tener un rango de valores posibles de todos estos parámetros de la fuente. Por ejemplo, una fuente muy superficial no podrá ser muy grande debido a la forma misma del volcán. Y al revés, una fuente más profunda puede ser más grande. Estudios geológicos y técnicas geofísicas nos permiten tener una idea de la profundidad y tamaño de esta fuente.

Como parte de las pruebas subsecuentes, se procede a correr estas mismas pruebas para los casos propuestos de redes ideales descritos anteriormente en el método inverso de localización con ruido de la ubicación, estos son: Cobertura Acimutal (COBAZ), Cobertura Radial (COBRA) y Expansión Acimutal (EXPAZ) presentados en la sección 5.5. Con el objetivo de mejorar el contraste y resolución de los parámetros y su tendencia a la fuente verdadera en los datos sintéticos sea más certera. Se presentan las imágenes consecutivamente y se presentara una discusión comparativa al final.

5.6. Error de los parámetros de la fuente en función de diferentes distribuciones de estaciones

Inversión de parámetros con presión constante para la red COBAZ (Figs. 5.64-5.66)

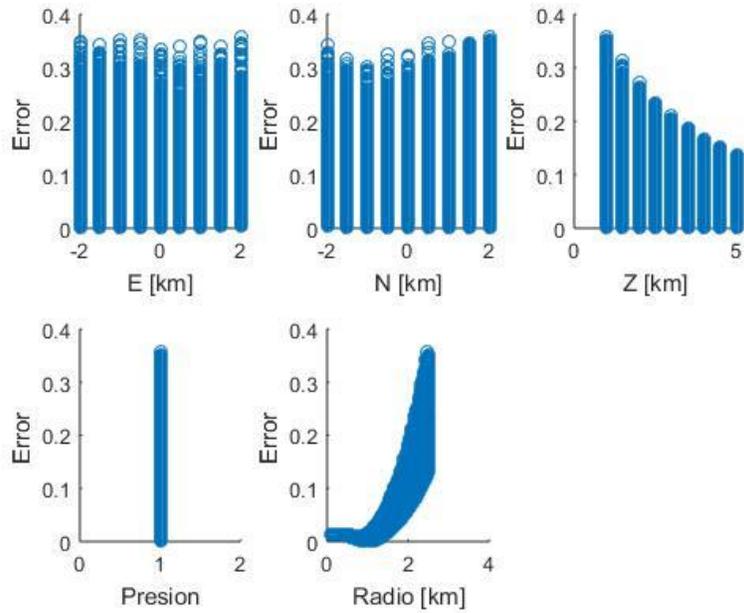


Fig. 5.64 Gráfico de parámetros contra error, todas las posibles soluciones red COBAZ con una presión constante de 1Mpa.

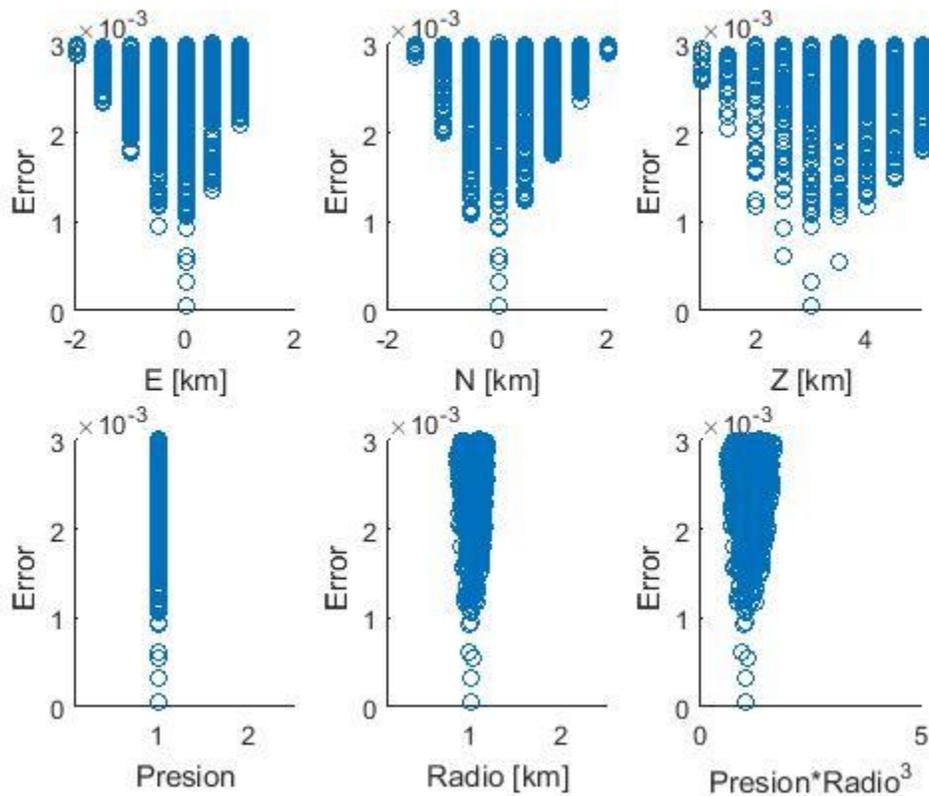


Fig. 5.65 Zoom del grafico 5.64.

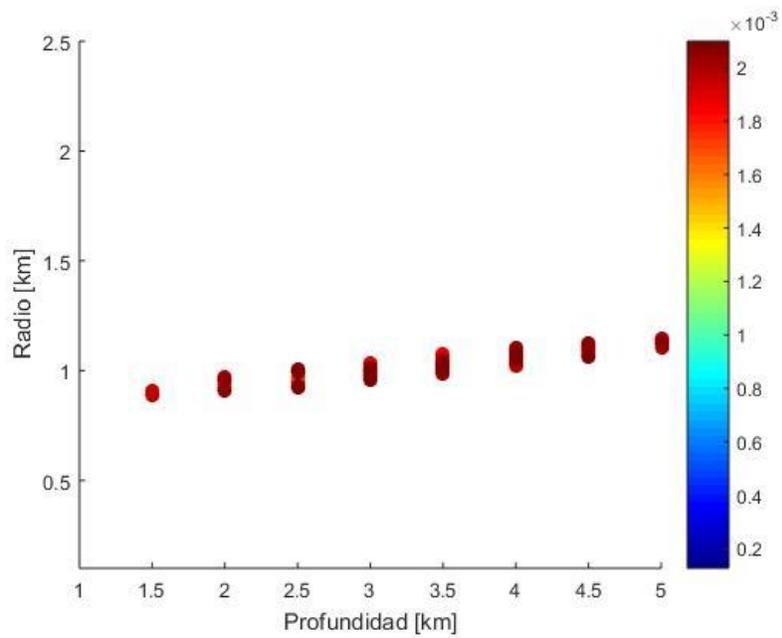


Fig. 5.66 Diagrama de radio en función de la profundidad para las 250 mejores soluciones para red COBAZ con presión constante en 1 MPa en color se representa el error entre los datos originales y los calculados, una vez más los puntos de mayor error se superponen a los puntos de menor error marcando la tendencia de un trade-off casi lineal entre el radio y la profundidad.

Inversión de parámetros con radio constante R=1km (Figs. 5.67-5.69)

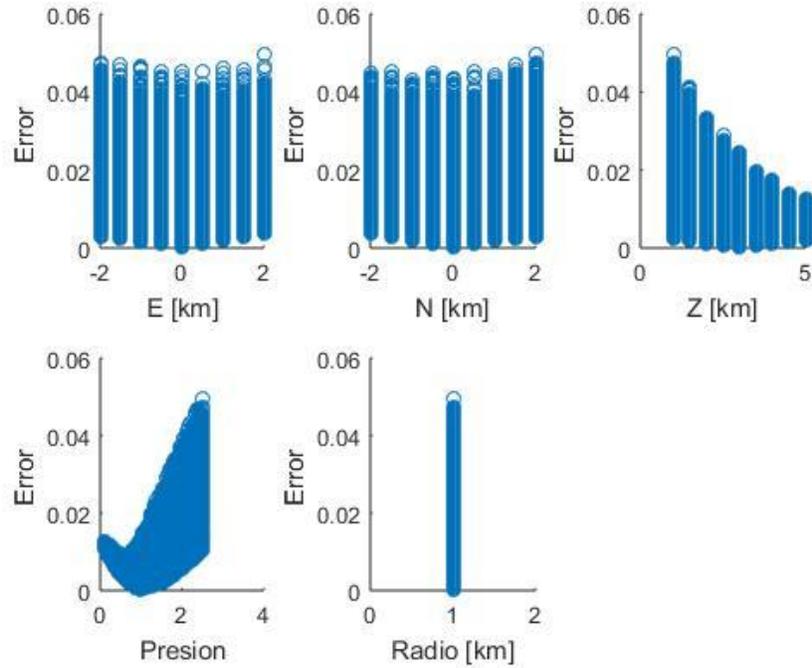


Fig. 5.67 Gráfico de parámetros contra error red **COBAZ**, todas las posibles soluciones radio 1 km.

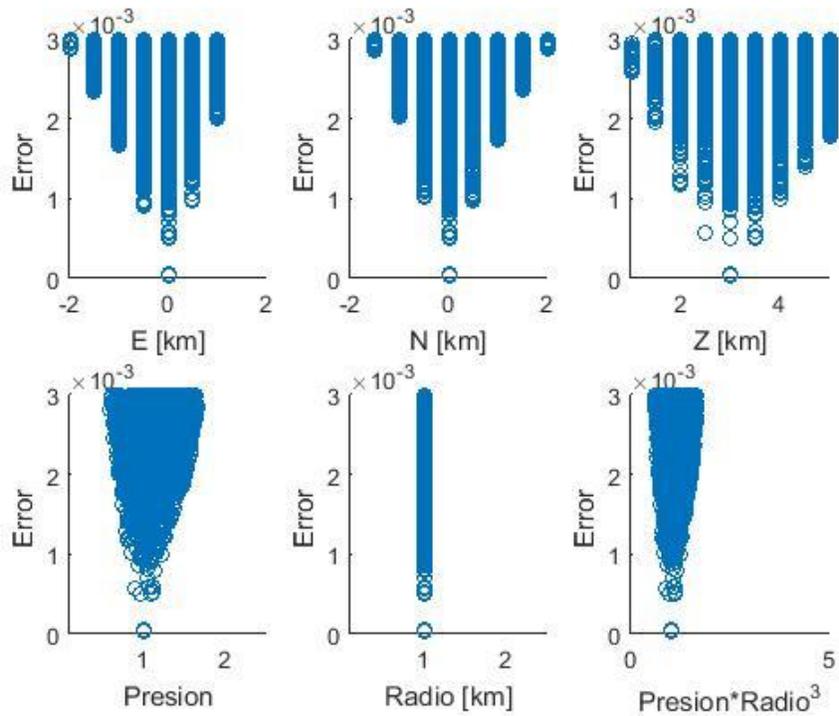


Fig. 5.68 Zoom del gráfico 5.67.

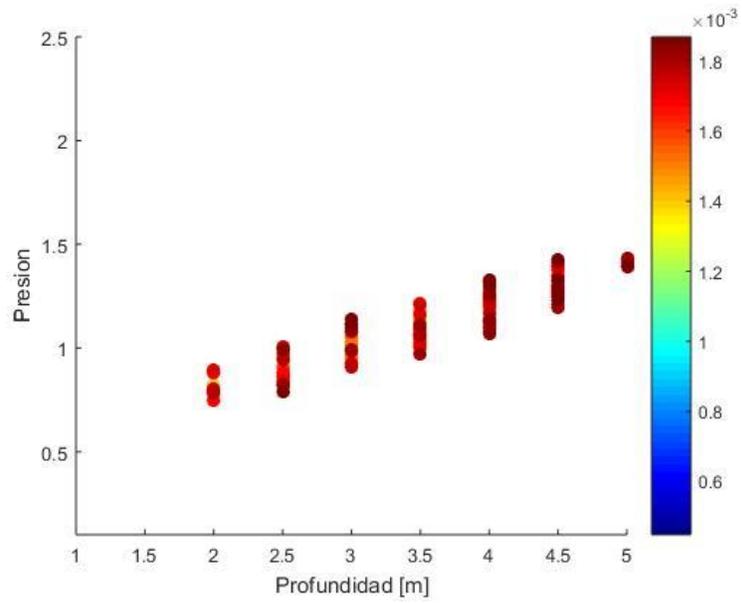


Fig. 5.69 Diagrama de presión en función de la profundidad para las mejores 250 soluciones, el código de color representa el error entre los datos originales y los datos calculados para cada punto, los puntos de mayor error sobreponen a los de menor error marcando la tendencia de trade-off casi lineal entre el radio y la profundidad red COBAZ radio constante en 1 km.

Inversión de parámetros con presión constante ($p=1$ Mpa) para la red COBRA (Figs. 5.70-5.72)

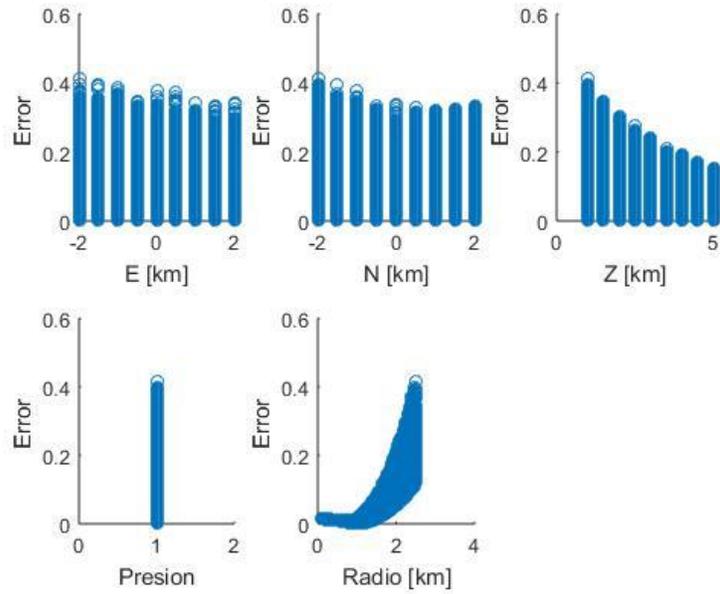


Fig. 5.70 Gráfico de parámetros contra error red **COBRA**, todas las posibles soluciones presión 1 MPa.

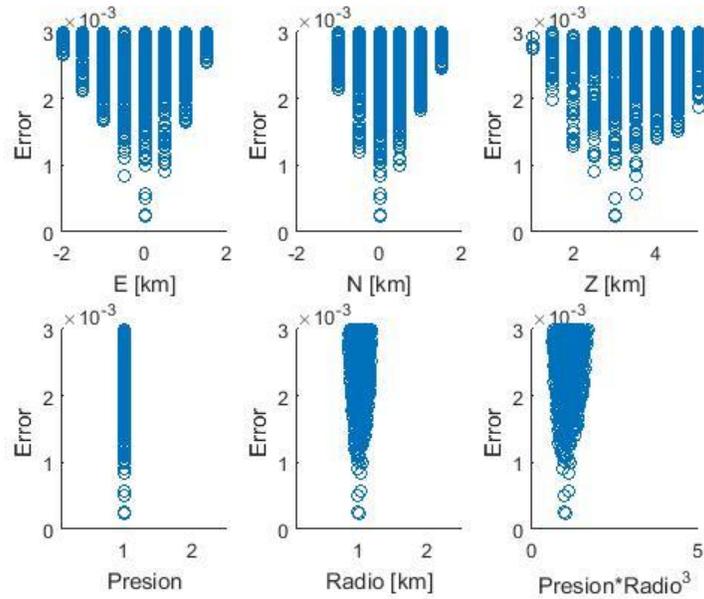


Fig. 5.71 Zoom del gráfico 5.70.

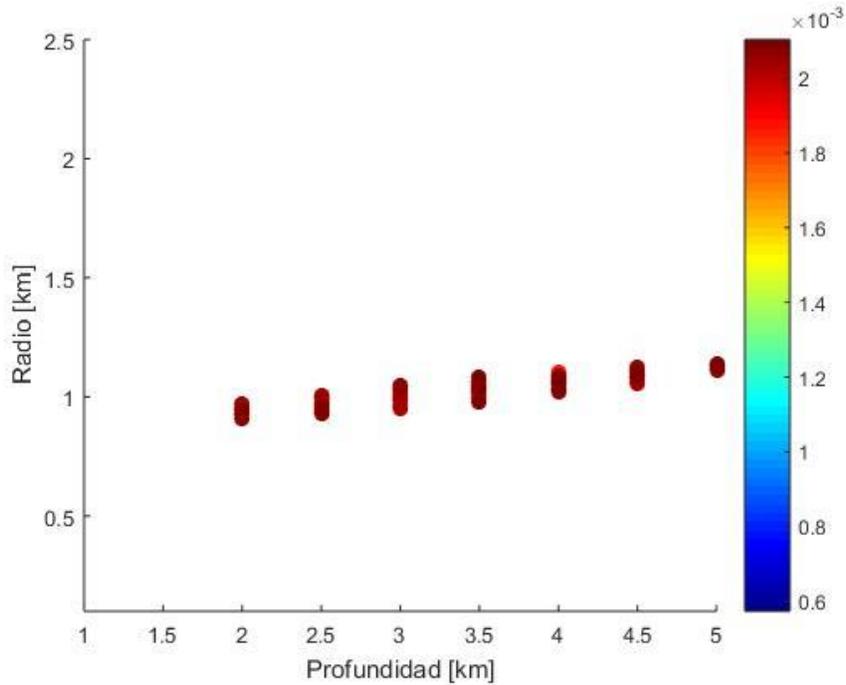


Fig. 5.72 Diagrama de radio en función de la profundidad para las 250 mejores soluciones en color se representa el error entre los datos originales y los calculados, una vez más los puntos de mayor error se sobreponen a los puntos de menor error marcando la tendencia de un trade-off casi lineal entre el radio y la profundidad red COBRA presión 1 Mpa.

Inversión de parámetros con radio constante R=1km para la red COBRA (Figs. 5.73-5.75)

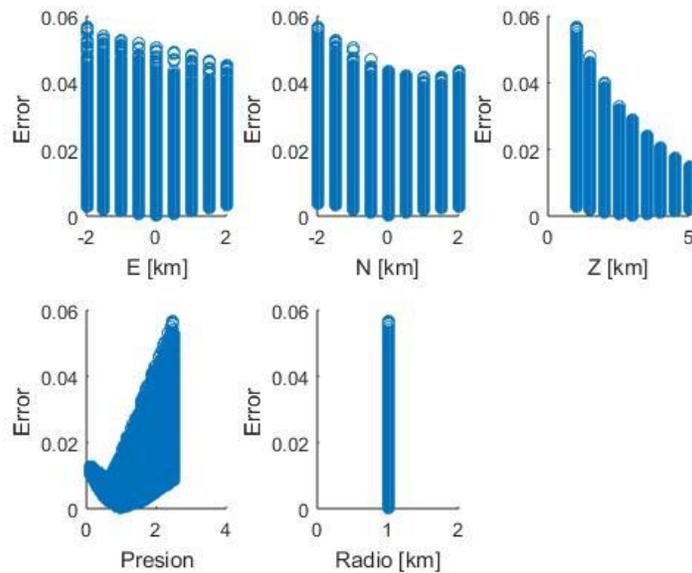


Fig. 5.73 Gráfico de parámetros contra error red COBRA, todas las posibles soluciones radio 1 km.

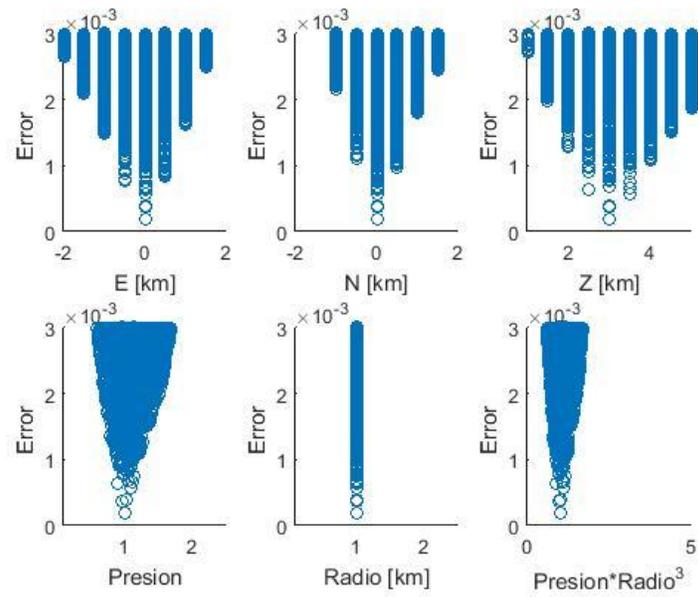


Fig. 5.74 Zoom del gráfico 5.73.

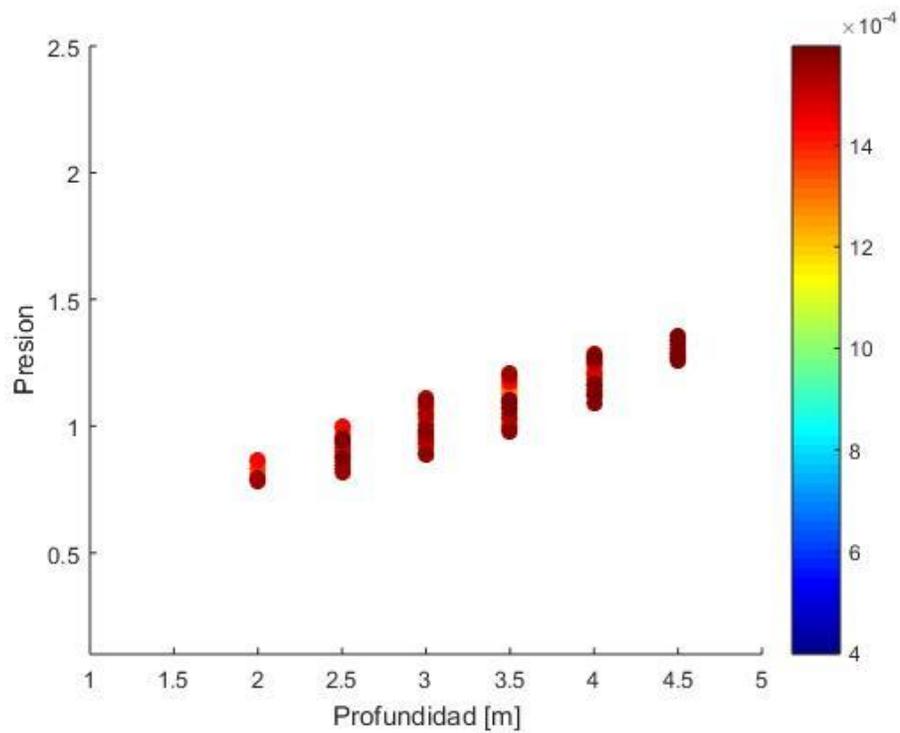


Fig. 5.75 Diagrama de presión en función de la profundidad para las 250 mejores soluciones en color se representa el error entre los datos originales y los calculados, una vez más los puntos de mayor error se sobrepone a los puntos de menor error marcando la tendencia de un trade-off casi lineal entre el radio y la profundidad red COBRA radio 1 km.

Inversión de parámetros con presión constante ($p=1$ MPa) para la red EXPAZ (Figs. 5.76-5.78)

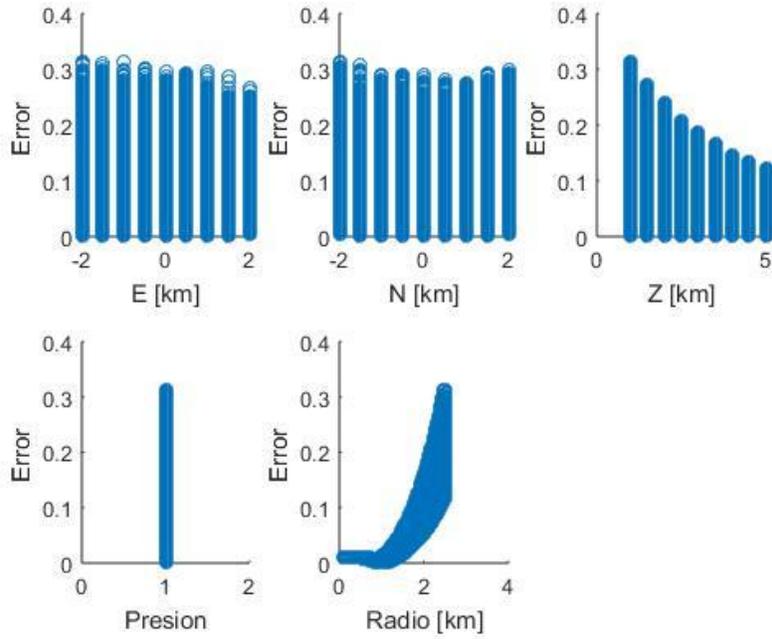


Fig. 5.76 Gráfico de parámetros contra error red **EXPAZ**, todas las posibles soluciones presión 1 MPa.

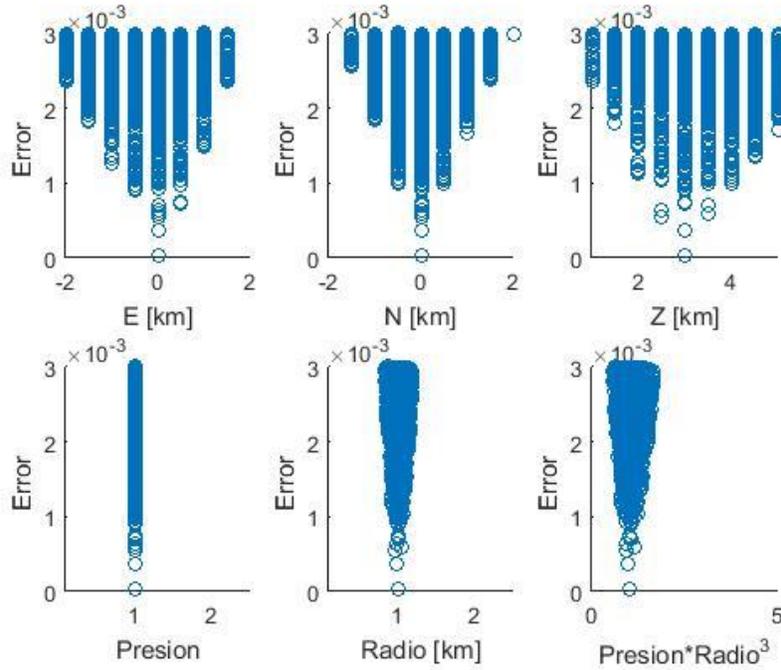


Fig. 5.77 Zoom del gráfico 5.76.

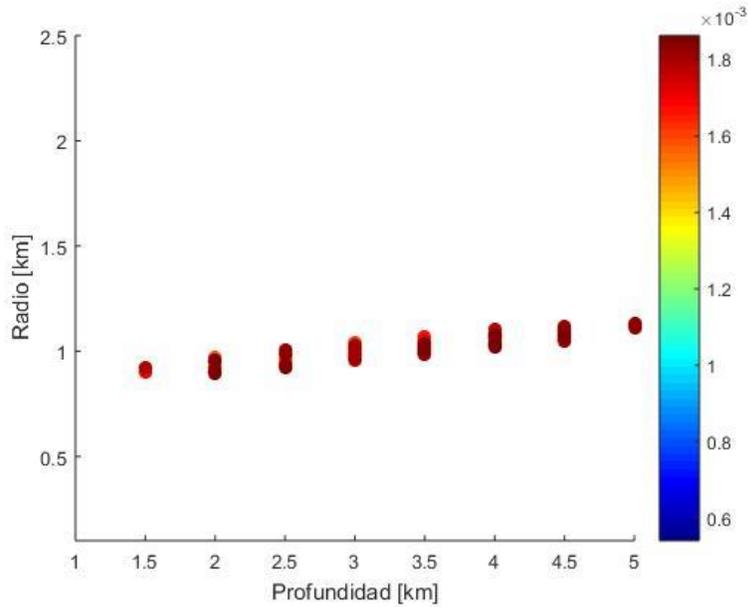


Fig. 5.78 Diagrama de radio en función de la profundidad para las 250 mejores soluciones en color se representa el error entre los datos originales y los calculados, una vez más los puntos de mayor error se sobrepone a los puntos de menor error marcando la tendencia de un trade-off casi lineal entre el radio y la profundidad red COBAZ presión 1 Mpa.

Inversión de parámetros con radio constante R=1km para la red EXPAZ (Figs. 5.79-5.81)

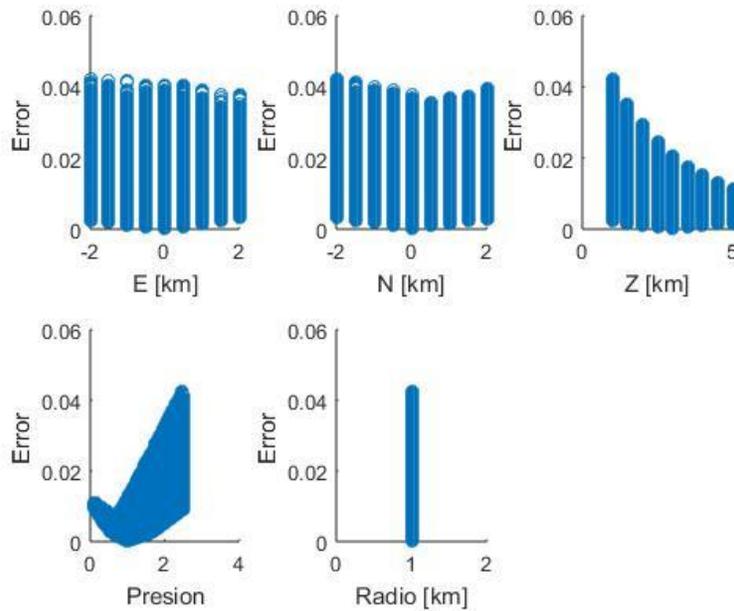


Fig. 5.79 Gráfico de parámetros contra error red EXPAZ, todas las posibles soluciones radio 1 km.

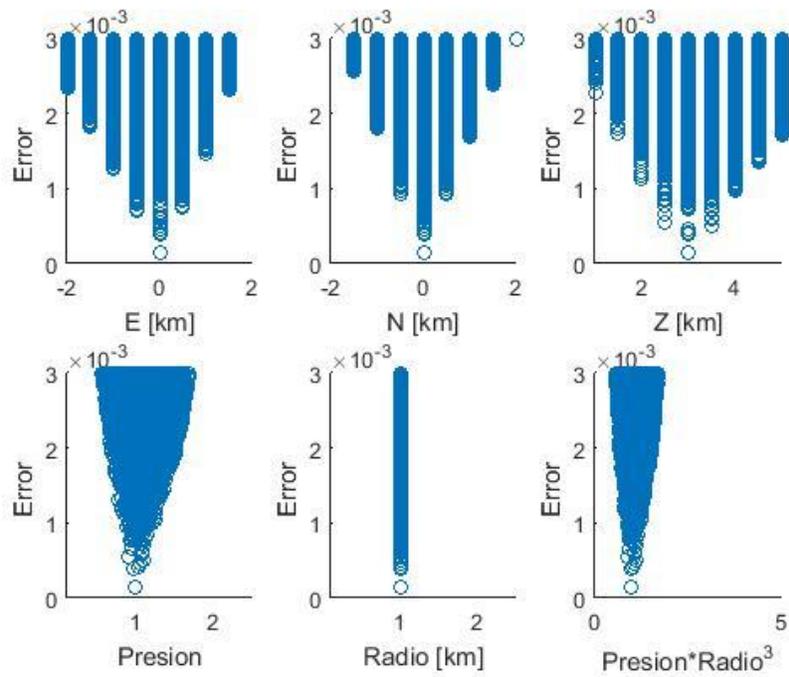


Fig. 5.80 Zoom del gráfico 5.79.

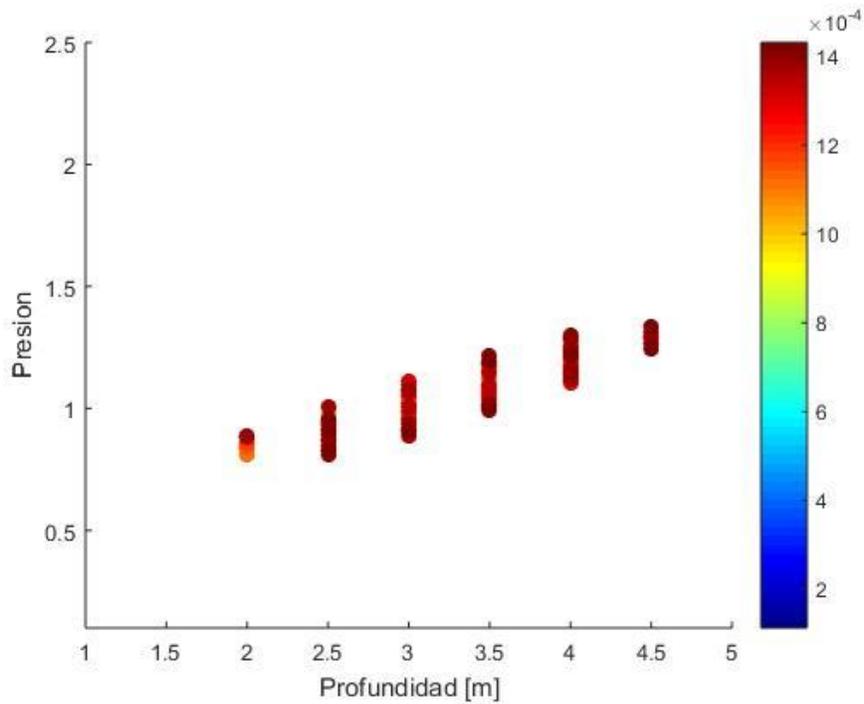


Fig 5.81 72 Diagrama de radio en función de la profundidad para las 250 mejores soluciones en color se representa el error entre los datos originales y los calculados, una vez más los puntos de mayor error se sobrepone a los puntos de menor error marcando la tendencia de un trade-off casi lineal entre el radio y la profundidad red EXPAZ radio 1 km.

5.7 Discusión de los resultados inversión de parámetros para diferentes geometrías de distribución de estaciones

Las figuras mostradas en la sección 5.5 presentan resultados de convergencia particulares, mientras todos los casos presentan convergencia hacia la localización de la fuente de los datos sintéticos, se presentan sutiles diferencias entre los 4 arreglos de redes aquí postulados, el arreglo real, y los 3 arreglos propuestos COBAZ, COBRA, EXPAZ.

Las pruebas de caracterización de parámetros para arreglos de redes propuestos aquí llamados COBAZ, COBRA, y EXPAZ, fueron capaces por sí mismos de aumentar la resolución de los parámetros, mediante el análisis de gráfico de menor error, considerablemente, al incluir más puntos de medición, sin embargo el arreglo de cada uno de ellos definió la eficiencia de cada uno de estos, se mostró cómo el arreglo COBRA (expandir los arreglos radiales en la misma dirección acimutal) obtuvo el menor aumento de eficiencia, tanto en la determinación de la profundidad, como en la caracterización de presión y radio, así como en la pendiente de los tradeoff de la profundidad y la presión y el radio respectivamente.

La convergencia de los parámetros espaciales, coordenadas X, Y, en el plano horizontal muestran un cambio drástico en el contraste entre las escalas de error mostrada en las barras de color, nos muestra que el contraste de error entre localizaciones es 20 veces más marcado entre el error máximo encontrado por la red actual de 5 estaciones (Figura 5.16) y el arreglo de cobertura acimutal (Figura 5.25), el cual únicamente se diferencia del arreglo original de 5 estaciones agregando 3 más como se describe en la sección 5.5.1.

La inversión de la sección 5.6 muestra resultados de convergencia para 4 de los 5 parámetros de fuente, sin embargo, el trade-off entre presión y radio de la fuente no permite una convergencia de los 5 parámetros de manera simultánea, cuando se tiene uno de los dos parámetros, presión o radio, el algoritmo converge adecuadamente, así como la prueba de convertir los 2 parámetros en uno con el parámetro $P \cdot R^3$ también converge adecuadamente, este parámetro nos permitirá conocer la relación con la que se comportan la presión y el radio en las pruebas que tengan el error menor.

El arreglo COBRA (cobertura radial) que solo se extiende en la dirección radial de cada estación previamente instalada parece ser el arreglo que presenta de los 3 arreglos propuestos la menor reducción de área de error menor, mediante el análisis visual podemos apreciar como las zona de error menor, en color azul oscuro son aun de un tamaño mayor lo cual indica que el algoritmo detecta posibles fuente de error bajo en zonas más alejadas a la localización real de los datos sintéticos usados, lo cual puede interpretarse como soluciones no únicas a nuestro problema.

Por otro lado, las redes que aumentan la cobertura acimutal muestran un ajuste de la zona de menor error más estrecha, no solo en la localización horizontal, sino en la profundidad y los parámetros de fuente (presión y radio) considerando en todo momento uno de estos parámetros constante. También el parámetro formado por la relación presión volumen parece tener una mejor convergencia, que el arreglo de cobertura radial y el arreglo actual de 5 estaciones

El arreglo COBAZ presenta un área menor de error mínimo en las pruebas de localización, permitiendo una convergencia a la solución única en el espacio, así como, presentando una diferencia entre su error máximo considerable con el arreglo de estaciones actuales, 20 veces más diferencia entre las zonas de error máximo. La localización de los parámetros de error mínimo tiene una buena aproximación a los

parámetros verdaderos y una brecha importante con el resto de posibles soluciones, lo que hace que sea un gráfico con mayor resolución.

El arreglo EXPAZ, expansión acimutal, presenta una reducción en el área de error mínimo similar al arreglo COBAZ, aunque no tan marcada, así como se observa la brecha entre el error mínimo calculado y los errores menores más cercanos, lo cual permite considerar la posibilidad de la solución única con mayor facilidad.

Las pruebas mostraron que los 3 arreglos de estaciones propuestos proveen a la red de una reducción de área de error mínimo para la localización correcta de una fuente, así como una inversión de los parámetros de radio y presión con una brecha entre el error mínimo y errores cercanos, que permiten considerar con mayor facilidad la existencia de la solución única.

Los gráficos de tradeoff radio-profundidad, así como presión-profundidad, no tuvieron cambios importantes en las pendientes, esto debido a que el trade-off entre estas variables no puede ser resuelto con más estaciones instaladas en la red, se considera que otro estudio de apoyo en la red de monitoreo puede ayudar a resolver el problema de trade-off como la única solución viable.

5.8 Inversión con dos fuentes combinadas.

Una vez realizadas las pruebas de inversión y optimización para una fuente simple, se procede a realizar pruebas de inversión con una fuente doble compuesta de una esfera de Mogi y una cilíndrica sobre la esfera usando el modelo elipsoidal (Fig. 5.82).

- ❖ Fuente esférica Mogi
 - Presión 1 MPa.
 - Radio 1 Km
 - Localización del centro de la fuente en km respecto a la cumbre (0,0,3)
- ❖ Fuente elipsoidal
 - Presión 1 MPa.
 - Radio menor 0.25 km
 - Semi eje mayor 6 km
 - Profundidad de tope del tubo 0 km snmm
 - Profundidad del fondo del tubo 6 km
 - Localización del centro de la fuente en km respecto a la cumbre (0,0,3) para que toque la esfera en su punto medio y represente el ducto de entrada y de salida de la fuente

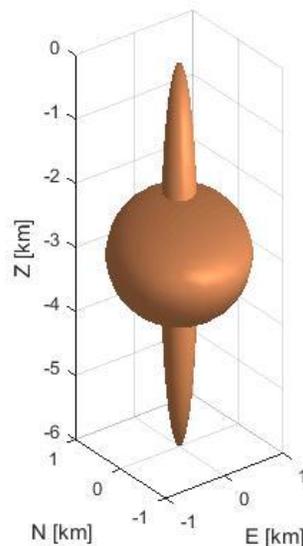


Fig. 5.82 representación gráfica de la fuente modelada que representa un reservorio magmático esférico, un conducto de alimentación y un conducto de salida, el sistema de referencia horizontal (x, y) tienen como punto de origen las coordenadas de la cumbre del volcán, la profundidad basada en el nivel medio del mar

Se calculó el desplazamiento superficial causado por cada una de las fuentes, después estos vectores de desplazamiento fueron sumados para generar el vector de desplazamiento combinado. Para ello se usó un código similar a la inversión anterior, con la diferencia que el método inverso en cada fuente esférica modelada también considera combinaciones distintas de cilindros de distintas dimensiones, lo que provoca que el código tenga un tiempo de procesamiento más largo. Con los parámetros determinados se obtuvieron los siguientes resultados (Figs. 5.82 y 5.83).

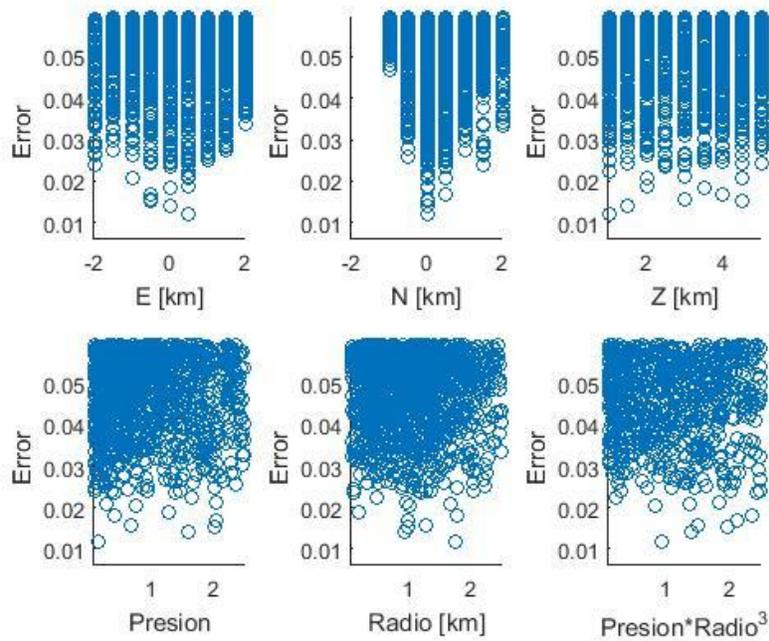


Fig. 5.82 Parámetros de error de la parte esférica de la fuente

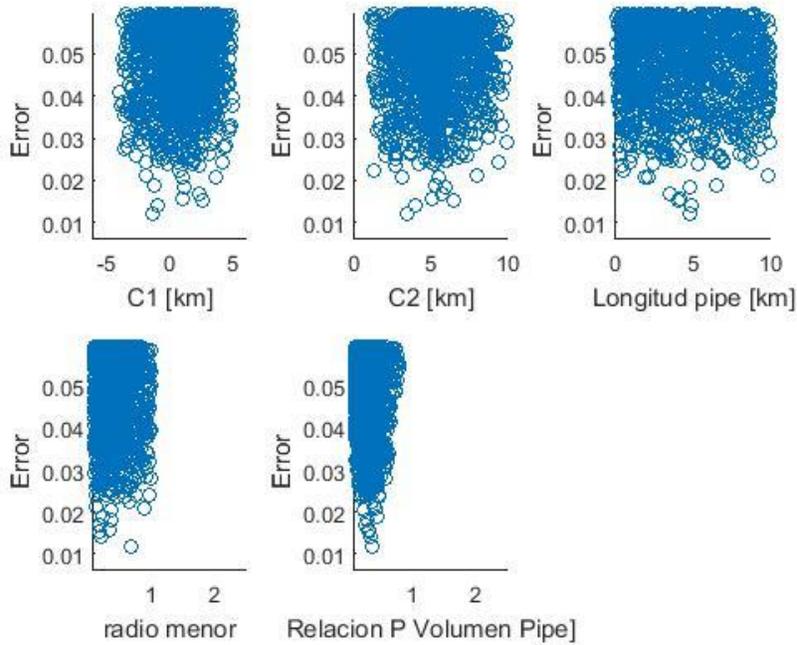


Fig. 5.83 Parámetros de componente elipsoidal de la fuente contra error

Podemos apreciar que los niveles de error manejados en esta prueba son mucho mayores que los niveles de ruido de pruebas anteriores Fig. 5.52, así como la localización de los parámetros ideales se ve afectada, una de las razones es por la falta de iteraciones, pues en cada punto del espacio solo se utilizaron un número muy limitado de iteraciones dado que el programa necesito un ciclo más de 50 iteraciones para

que en cada posible punto del espacio y en cada combinación de parámetros del modelo esférico se probaran 50 combinaciones.

Después de analizar los parámetros de acuerdo con su nivel de error, se analizaron las 250 pruebas con menor error para analizar la relación entre presión y radio como se había hecho previamente en la prueba para una fuente de Mogi simple, en la figura 5.84 se observa una relación menos ordenada, la relación hiperbólica aun es apreciable, sin embargo, con más dificultad, esto debido a que en cada valor de radio en cada punto del espacio se tiene 50 cálculos de tubo, a lo cual la fórmula de desplazamiento calculado se le han agregado otros 2 parámetros de fuente los cuales son los valores de los semiejes mayor y menor del elipsoide, esto hace que tengamos un problema algebraico de 1 ecuación con 4 incógnitas lo cual provoca que un número mayor de combinaciones de radio de esfera y presión puedan tener valores de error bajos en comparación con los datos sintéticos originales.

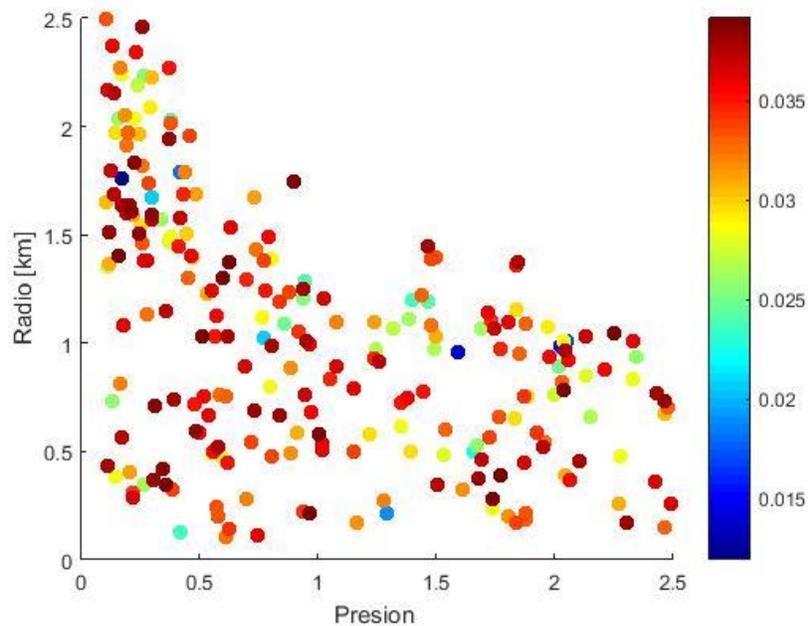


Fig. 5.84 relación presión-radio Mogi para las 250 pruebas con menor error 250 mejores soluciones en color se representa el error entre los datos originales y los calculados, una vez más los puntos de mayor error se sobreponen a los puntos de menor error marcando la tendencia de un trade-off casi linear entre el radio y la presión

Con los parámetros de error mínimo de la fuente combinada se procedió a realizar la prueba de localización del centro de la fuente para el arreglo de estaciones actuales. Como en las pruebas de localización se creó una malla de puntos donde se calcula el error en cada punto del espacio, y se grafica en 3 planos del espacio que intersecan donde la fuente artificial fue definida (Fig. 5.85).

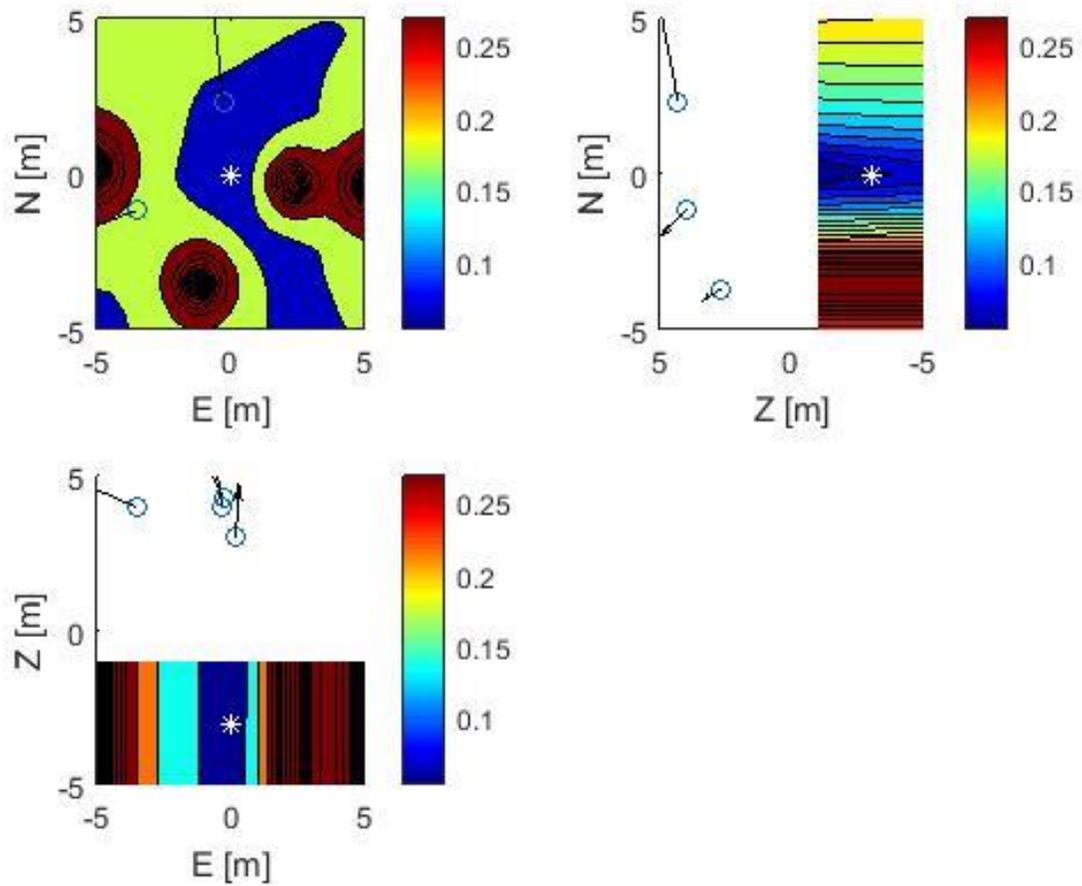


Fig. 5.85 Localización de la fuente con parámetros de error mínimo en color se representa el error entre los datos originales y los calculados, barra de color de contorno representa error RMS de desajuste entre modelos en metros

5.9 Inversión de datos de fuente combinada considerando esfera de Mogi.

Se corrió una prueba final donde usamos los datos sintéticos generados por el modelo de fuentes combinadas y se usa el método inverso que considera una fuente simple.

En las figuras 5.86 a 5.89 se presentan los gráficos de parámetros contra nivel de error. Se puede apreciar como el área de menor error en el plano horizontal (parámetro x, y) convergen a la localización real sin embargo los parámetros de profundidad y el parámetro de relación $P \cdot R^3$ están equivocados respecto a los parámetros usados para generar los datos sintéticos.

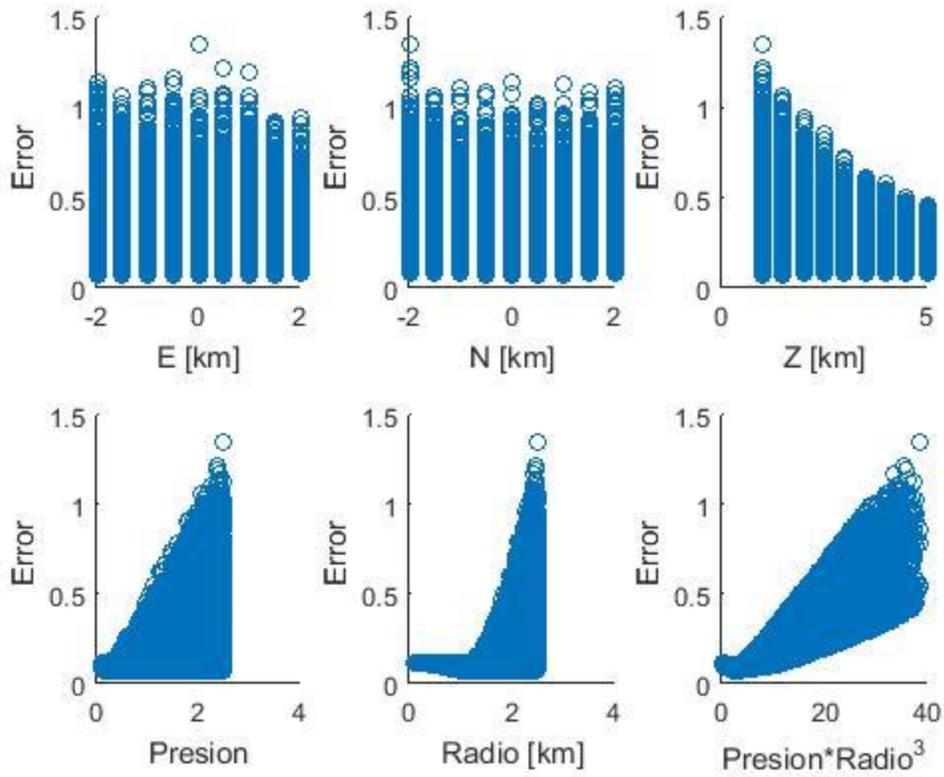


Fig. 5.86 Gráficos error-parámetro para fuente simple de Mogi con datos de fuente combinada

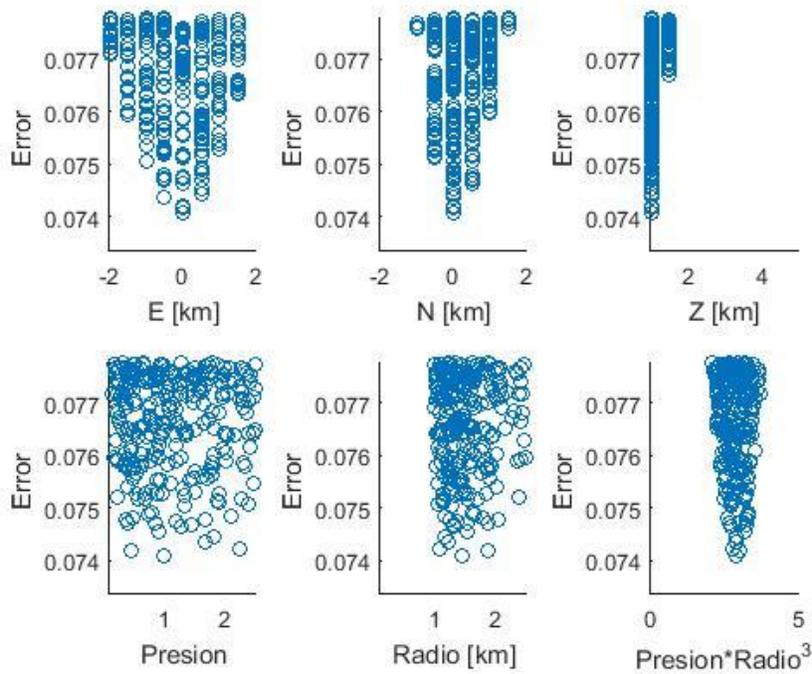


Fig. 5.87 Zoom del gráfico 5.87

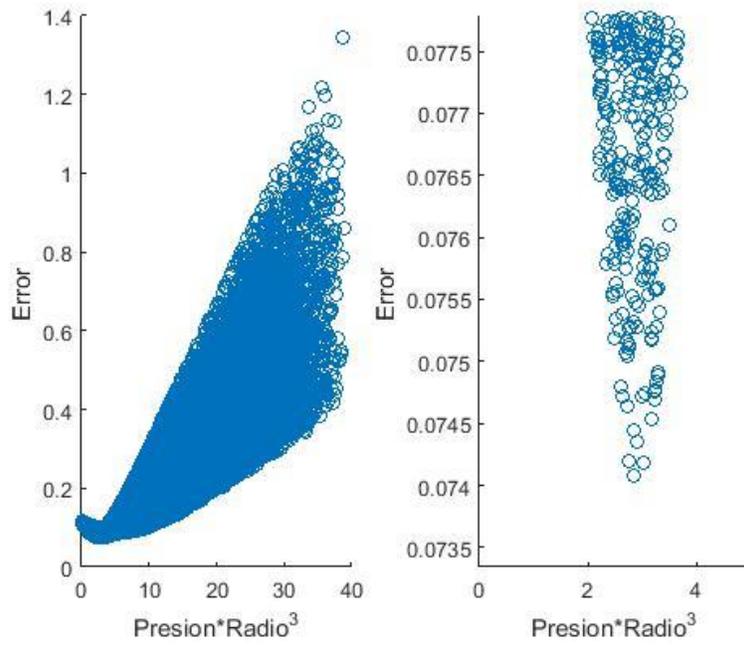


Fig. 5.88 Grafico error-presión* R^3

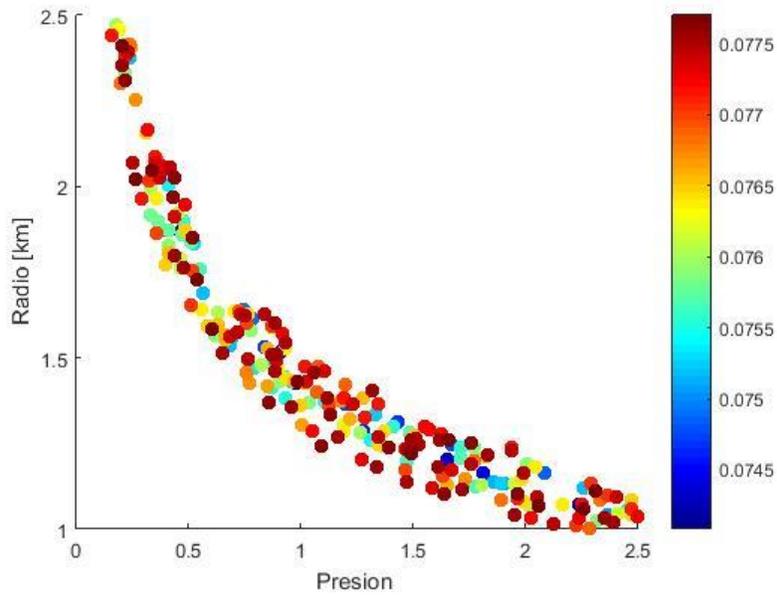


Fig. 5.89 Relación presión radio prueba Mogi simple con datos complejos 250 mejores soluciones en color se representa el error entre los datos originales y los calculados, una vez más los puntos de mayor error se sobreponen a los puntos de menor error marcando la tendencia de un trade-off casi lineal entre el radio y la profundidad

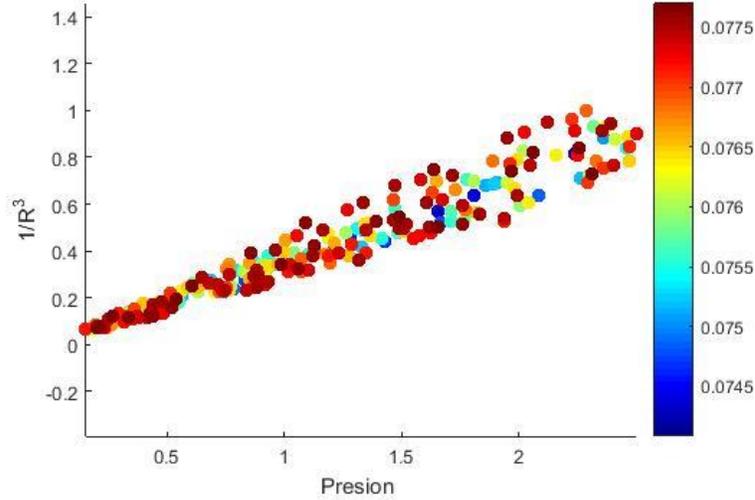


Fig 5.90 Relación presión- $\frac{1}{R^3}$ 250 mejores soluciones en color se representa el error entre los datos originales y los calculados, una vez más los puntos de mayor error se sobrepone a los puntos de menor error marcando la tendencia de un trade-off casi lineal entre el factor $\frac{1}{R^3}$ y la presión

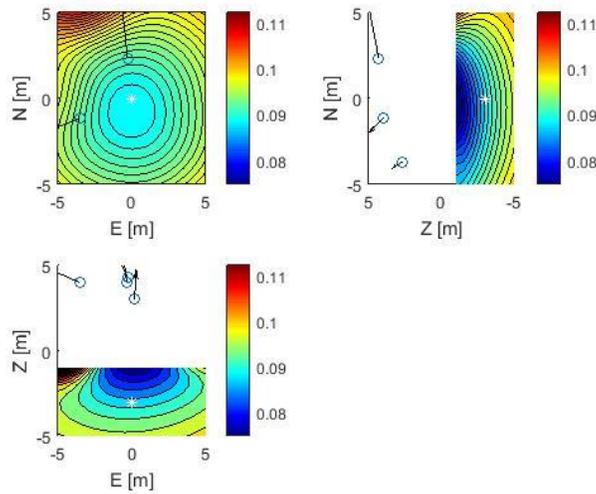


Fig. 5.91 Localización de fuente con parámetros de error mínimo inversión Mogi simple con datos complejos, colores de contornos representan el error de desajuste en metros

Las imágenes anteriores muestran como los parámetros de localización de fuente x, y tienen una convergencia adecuada hacia la posición de la fuente, sin embargo, asumir una fuente esférica para datos generados por una fuente combinada genera incertidumbre y una mala caracterización de profundidad, así como de la relación presión volumen de la esfera modelada, haciendo que el modelo inverso considere una fuente más somera con una relación presión-radio más alta.

Capítulo VI Discusión y conclusiones:

La determinación de los parámetros de fuentes volcánicas no es una técnica nueva, sin embargo, se encuentra en constante evolución, esto gracias a la mejora de la capacidad de cómputo que va haciendo cada vez más rápido lo que antes eran operaciones difíciles que consumían mucho tiempo. Sin embargo, en el tema de monitoreo volcánico es imprescindible contar con modelos de tiempo de procesamiento corto y resultados de alta resolución, lo cual representa un claro problema con muchas soluciones propuestas actualmente sobre la caracterización de la fuente. Sobre todo, cuando se busca su uso como una herramienta de monitoreo pre-eruptivo.

Para caracterizar una fuente adecuadamente se han utilizado distintos métodos, entre ellos el cálculo de sismogramas sintéticos en el dominio del tiempo (Legrand et al. 2000), con aproximaciones numéricas de elementos de frontera (Cayol y Cornet, 2003), o de diferencias finitas en el dominio de las frecuencias (Chouet, 2003).

Vemos la importancia de considerar la topografía ya que el desplazamiento del suelo es muy diferente cerca de la cumbre del volcán a la que se modela en un espacio plano. En cambio, si las estaciones están lejos de la cumbre, el efecto de topografía es menor. Esto muestra la importancia de instalar estaciones cerca de la cumbre, lo que en la práctica es casi imposible en un volcán como el Popocatepetl cuando está en actividad.

Los arreglos lineales simples (una sola línea) no son ideales para localizar bien la fuente por el problema de no unicidad en la solución tanto en el plano horizontal como en el vertical. Se puede tener una solución única en el plano horizontal si consideramos un arreglo de dos líneas perpendiculares cruzándose cerca de la fuente. Sin embargo, queda el problema de determinar la profundidad de la fuente con arreglos lineales.

También se muestra que poner un arreglo de estaciones (GPS o sismómetros) en círculo alrededor del volcán y considerar un semi-espacio plano equivale a tener un solo punto en el gráfico del desplazamiento en función de la distancia y no sirve para constreñir la profundidad de la fuente, pues cuando se considera el espacio plano y el arreglo radial de estaciones, el desplazamiento en función de la distancia hace que el número de estaciones que tengamos se conviertan a un solo punto de medición. Pero cuando se considera la topografía, se obtiene una serie de puntos a diferentes distancias de la fuente y no un solo punto cuando no consideramos la topografía. Esto permite obtener una descripción del decaimiento del desplazamiento con la distancia. También cabe resaltar que cuando la fuente se encuentra fuera del círculo de la red hay una pérdida rápida de resolución en el plano horizontal.

Podemos concluir que el epicentro este mejor determinado con una buena cobertura acimutal alrededor de la fuente que con una cobertura radial.

Se mostró que la combinación entre arreglos de redes circulares y de dos líneas son capaces, en conjunto, de determinar con mayor precisión la localización de fuentes aún fuera de la zona de cobertura acimutal de la red circular. Mientras que ésta aún es capaz de ayudar a determinar la profundidad que los arreglos lineales lo que por sí solos mostraron ser incapaces de hacer, las limitaciones de arreglos de redes como estos radican en la cantidad de sensores necesarios y su mantenimiento principalmente.

El arreglo de estaciones aleatorias mostró una buena capacidad de determinar la localización de la fuente en todos los planos analizados, esto abre pauta a considerar métodos de registro y medición de más puntos con menor resolución como lo serían InSAR y la fotogrametría.

Estos resultados pueden ayudar a tomar decisiones sobre el futuro de las redes de monitoreo actuales en el volcán Popocatepetl. Como la instalación de nuevas estaciones sísmicas o GPS y las ventajas que traería la ubicación adecuada de estas futuras estaciones de monitoreo para localizar la fuente mediante el análisis de desplazamientos del suelo.

Es más difícil encontrar los parámetros de la fuente si se considera un modelo combinado de una esfera de Mogi y un elipsoide los cuales representarían los ductos de entrada salida y reservorio del fluido ya sea magma agua o gas dada la mayor cantidad de parámetros que se debe definir, por el mayor número de iteraciones para alcanzar los parámetros de error mínimo. Sin embargo, este modelo es más cercano a la realidad y por lo tanto es importante considerarlo a pesar del requerimiento de más tiempo de cálculo. Hay que mencionar que muchos modelos de otros estudios consideran únicamente una esfera de Mogi, pero aquí, hemos demostrado las diferencias que genera considerar una fuente de Mogi simple para el método inverso cuando se tienen datos generados por una fuente combinada.

La presencia de un ducto somero genera una amplitud mayor en el desplazamiento superficial lo cual hace que el modelo esférico de Mogi considere que el centro de la fuente tenga una profundidad menor, y una relación presión volumen mayor que la que la fuente presenta. Concluimos la importancia que considerar una fuente combinada en el método inverso en vez de considerar una fuente simple esférica de Mogi, pues esto puede prestar a situaciones donde se sobre estimen ciertos parámetros con niveles de error considerables.

El trabajo de investigación aquí propuesto utiliza herramientas en la plataforma de MATLAB, con la finalidad de generar una apropiada caracterización de la fuente volcánica, (determinación de localización y del mecanismo) que puede ser utilizado para el monitoreo en tiempo real en Observatorios volcánicos y ayudar en la toma de decisiones para los centros de monitoreo del cualquier volcán del mundo.

También se puede adaptar fácilmente a otros tipos de datos (InSAR, GPS, fotogrametría, etc.) dada la capacidad de obtener datos de desplazamiento de una gran cantidad de puntos sin la necesidad de una extenuante campaña geodésica y un arreglo de estaciones costoso. Basándose en las particularidades de cada caso de estudio es posible analizar como posibles soluciones al problema de submuestreo, considerando la resolución de cada una de las alternativas, siendo las estaciones de banda ancha puntuales las de mayor resolución, y las técnicas de fotogrametría e InSAR como las técnicas de menor resolución e inversamente las técnicas de menor y mayor muestreo respectivamente.

Vale la pena considerar el monitoreo mediante estaciones GPS, actualmente capaces de mandar datos de su ubicación en series de tiempo, capaces de registrar sismos con base en su desplazamiento en vez de su velocidad o aceleración como las estaciones de banda ancha y acelerómetros y por lo tanto incapaces de ser saturados, y evitar el problema de recuperar la señal de baja frecuencia con precisión. Siendo las estaciones GPS también una solución económica respecto a las estaciones sismológicas de banda ancha, si se obtiene la resolución adecuada y los niveles de desplazamiento del sistema volcánico están en el espectro de medición del equipo.

Para el final de este trabajo de investigación se hizo de mi conocimiento que el Instituto de Geofísica había actualizado su red de monitoreo sobre el volcán instalando 4 estaciones más de monitoreo sobre las puestas de acuerdo al arreglo de estaciones descrito por CENAPRED en 2010 mostrado aquí en Fig 2.02 y Tabla 2.01

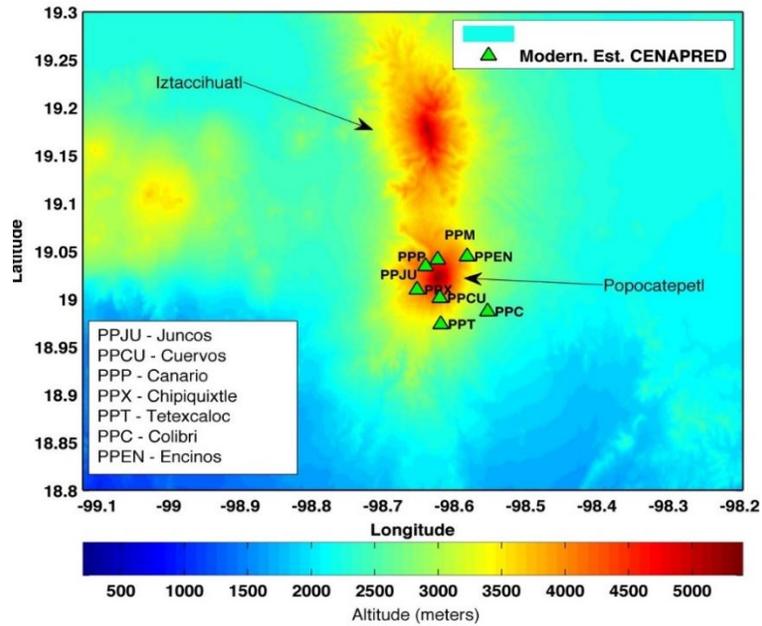


Fig. 6.01 Arreglo de estaciones sísmicas de banda ancha previo a la instalación de estaciones de Septiembre de 2018

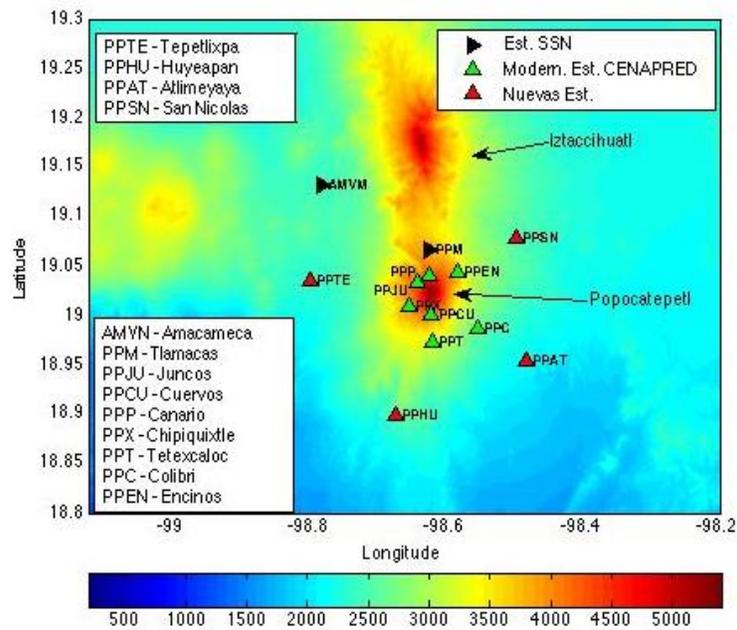


Fig. 6.02 estaciones actualizadas en septiembre 2018

Como se observa las estaciones son instaladas alrededor del volcán a una mayor distancia lo que concuerda con la premisa del arreglo propuesto aquí denominado cobertura acimutal expandida, comprobando que los resultados obtenidos por esta investigación concuerdan con las decisiones tomadas para la red de monitoreo del volcán lo que permitirá en un futuro mejorar esta red mediante el uso de estas herramientas y el monitoreo adecuado del volcán en un futuro cercano.

Bibliografía y Referencias

- Aki, K. & Richards, P.G. (1980). *Quantitative Seismology. Theory and Methods*, W.H. Freeman & Co. San Francisco, CA.
- Almendros J. Chouet B. (2003). Performance of the Radial Semblance Method for the Location of Very Long Period Volcanic Signals, *Bull. Seism. Soc. Am.* 93, 1890-1903.
- Amante, C. and B.W. Eakins, (2009). ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5C8276M.
- Arciniega A. Chouet B. (1999) Very long-period signals associated with vulcanian explosions at Popocatepetl Volcano, Mexico, *Geophys. Res. Lett.* V26 No 19 3013-3016.
- Arciniega-Ceballos, A., P. Dawson, and B. A. Chouet, Long period seismic source characterization at Popocatepetl volcano, Mexico, *Geophys. Res. Lett.*, 39, (2012) L20307, doi:[10.1029/2012GL053494](https://doi.org/10.1029/2012GL053494).
- Aster R. Zandomenighi D. Mah S. McNamara S. Henderson D.B. Knox H. Jones K. (2008). Moment tensor inversion of very long period seismic signals from Strombolian eruptions of Erebus Volcano, *J. Volcanol Geotherm Res* 177, 635-647.
- Battaglia M. Cervelli P. F. Murray J. R. (2013). MODELS: A MATLAB software package for modeling crustal deformation near active faults and volcanic centers *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 254, 1-4.
- Bean C. Lokner I. O'Brien G. (2008). Influence of near-surface volcanic structure on long-period seismic signals and on moment tensor inversions: Simulated examples from Mount Etna, *J. Geophys. Res.* 113 B08308.
- Buck W. R. Einarsson P. Brandsdottir B. (2006) Tectonic stress and magma chamber size as controls on dike propagation: Constraints from the 1975–1984 Krafla rifting episode, *JGR Solid Earth Vol* 111 Iss B12 <https://doi.org/10.1029/2005JB003879>
- Cannavo F. (2012). Sensitivity analysis for volcanic source modelling quality assessment and model selection. *Computers and Geosciences* 44 (2012) 52-59, Elsevier.
- Chaussard E, Amelung F. (2012). Precursory inflation of shallow magma reservoirs at west Sunda volcanoes detected by InSAR *Geophysical Research Letters*, Vol 39, L21311.
- Chouet, B. Saccorotti, G. Dawson, P. Martini, M. Scarpa, R. Deluca, G. Milana, G. and Cattaneo, M. (1999), Broadband Measurements of the Sources of Explosions at Stromboli Volcano, Italy, *Geophys. Res. Lett.* 26, 1,937–1,940
- Chouet, B. P. Dawson, T. Ohminato, M. Martini, G. Saccorotti, F. Giudicepietro, G. De Luca, G. Milana, and R. Scarpa, (2003) Source mechanisms of explosions at Stromboli Volcano, Italy, determined from moment-tensor inversions of very-long-period data, *J. Geophys. Res.* 108(B1), 2019, doi:10.1029/2002JB001919.
- Del Pezzo E, De Natale G, Martini M, Zollo A. (1987) Source Parameters of microearthquakes at phlegraean fields (Southern Italy) Volcanic area, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 47, (1987) 25-42, Elsevier.

- Dzurisin D. (2007). Praxis & Springer Volcano Deformation Geodetic Monitoring Techniques.
- Espinasa Pereña (2012) Historia de la actividad del VOLCAN POPOCATEPETL 17 años de erupciones, Centro Nacional de Prevención de Desastres link <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/225-HISTORIADELAACTIVIDADDELVOLCNPOPOCATPETL-17AOSDEERUPCIONES.PDF>
- Fudali, R.F. & Melson, W.G. (1971) Ejecta velocities, magma chamber pressure and kinetic energy associated with the 1968 eruption of arenal volcano Bull Volcanol 35: 383. <https://doi.org/10.1007/BF02596963>
- Fujita E. Ida Y. Oikawa J. (1995). Eigen oscillation of a fluid sphere and source mechanism of monochromatic volcanic tremor. J. Volcanol Geotherm Res.
- J.H. Curtiss, Monte Carlo methods for the iteration of linear operators, J. Math Phys. 32 (4) (1954) 209-232.
- Jackson D. D. (1973). Marginal Solutions to Quasi Linear inverse problems in Geophysics: the Edgehog Method, Geophysical Journal Research Astronomical Society 1973, 35, 121-136.
- Kawakatsu H. Kaneshima S. Matsubayashi H. Ohminato T. Sudo Y. Tsutstui T. Uhira K. Yamsato H. Ito H. Legrand D. (2000). Aso94: Aso seismic observation with broadband instruments Journal of Volc. & Geoth Res. 101, 129-154.
- Kawakatsu H. M. Yamamoto, (2007) Tohoku University, Sendai, Japan. 4.13 Volcano Seismology. Elsevier B.V.
- Kochanski G. Monte Carlo Simulation (2005) <http://kochanski.org/gpk/teaching/0401Oxford/>
- Kumagai, H. M. Nakano, T. Maeda, H. Yepes, P. Palacios, M. Ruiz, S. Arrais, M. Vaca, I. Molina, and T. Yamashima Broadband seismic monitoring of active volcanoes using deterministic and stochastic approaches (2010), J. Geophys. Res. 115, B08303, doi:10.1029/2009JB006889.
- Kumagai H, Palacios P, Ruiz M, Yepes H, Kozono T, (2011) Ascending seismic source during an explosive eruption at Tungurahua volcano, Ecuador Geophysical Research Letters, VOL. 38, L01306, doi:10.1029/2010GL045944.
- Kumagai H. Lacson R. Jr Maeda Y. Figueroa II M. Yamashina T. Ruiz M. Palacios P. Ortiz H. Yepes H. (2013) Source amplitudes of volcano-seismic signals determined by the amplitude source location method as a quantitative measure of event size J. Volcanol. Geotherm. Res. 257, 57-71.
- Larson, K. M., A. Bilich, and P. Axelrad, Improving the precision of high-rate GPS, (2007) *J. Geophys. Res.*, 112, B05422, doi:[10.1029/2006JB004367](https://doi.org/10.1029/2006JB004367).
- Legrand D. Kaneshima S. Kawakatsu H. (2000) Moment tensor analysis of near-field broadband waveforms observed at Aso Volcano, Japan J. Volcanol. Geotherm Res.101 155-169.
- Legrand D. Rouland D. Frogneux M. Carniel R. Charley D. Roult G. (2005) Interpretation of very long period tremors at Ambrym volcano, Vanuatu, as quasi-static displacement field related to two distinct magmatic sources. Geophys. Res. Lett. 32, L06314.

Lengline O, Marsan D, Got J.-L, Pinel V, Ferrazzini V. Okubo P. G. (2008) Seismicity and deformation induced by magma accumulation at three basaltic volcanoes *Journal of Geophysical Research* Vol 113 B12305.

Magee C. Stevenson C.T.E. Ebmeier S.K. Keir D. Hammond J.O.S., Gottsmann J.H. Whaler K.A. Schofield N. Jackson C.A.-L. Petronis M.S. O'Driscoll B. Morgan J. Cruden A. Vollger S.A. Dering G. Micklethwaite S. Jackson M.D. (2018) Magma Plumbing Systems: A Geophysical Perspective, *Journal of Petrology*, Volume 59, Issue 6, Pages 1217–1251, <https://doi.org/10.1093/petrology/egy064>

Mogi K. (1958) Relations Between the eruptions of various volcanoes and the deformation of the ground surfaces around them *Bull. Earthquakes Res. Inst.* 36 pp. 99-134.

Mosegaard K, Sambridge M, (2002) Monte Carlo analysis of inverse problems Institute of physics publishing R29-R54 *Inverse Problems* Volume 18 Number 3 IOPscience.

Neuberg J.W. Tuffen H. Collier L. Green D. Powell T. Dingwell D. (2006) The trigger mechanism of low-frequency earthquakes on Montserrat. *J. of Volcanol. Geotherm. Res.* 153 37-50.

Niño Alfonso, Nelcy Yazmín (2011) Generación de espectros de rayos x de baja energía por simulación Monte Carlo / Monte Carlo simulation of x ray spectra of low energies. Maestría thesis, Universidad Nacional de Colombia.

Pinel V, Hooper A, De la Cruz-Reyna S, Reyes-Davila G, Doin M. P. Bascou P. (2011) The challenging retrieval of the displacement field from InSAR data for andesitic stratovolcanoes: Case Study of Popocatepetl and Colima Volcano, Mexico. *Journal of volcanology and Geothermal Research* 200 (2011) 49-61. Elsevier.

R.Y. Rubinstein, *Simulation and the Monte Carlo Method* (John Wiley and Sons, Inc. New York, 1981).

Ramirez Olvera, Graciela (2003) Mallado tridimensional para elemento finito del volcán Popocatepetl, correlacionado con la sismicidad <http://132.248.9.195/ppt2002/0325949/Index.html>

Rendon Gutierrez Alan Fernando, (2012) Localización de eventos volcánicos cuasi-estáticos <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/2710/1/Tesis.pdf>

Salzer J. T, Milillo P, Varley N, Perissin D, Pantaleo M, Walter T. (2017) Evaluating links between deformation topography and surface temperature at volcanic domes: Results from a multi-sensor study at Volcan de Colima Mexico *Earth and Planetary Science Letters* 479 (2017) 354-365, Elsevier.

Salzer J. T, Nikkhoo M, Walter T. R, Sudhaus H, Reyes-Davila G, Breton M, Arambula R. (2014) Satellite radar data reveal short term pre-explosive displacements and a complex conduit system at Volcan de Colima Mexico, *Frontiers in earth science* June 2014 Volume 2 Article 12.

Sigurdsson H. et. al. (1999) Academic press *Encyclopedia of volcanoes*.

Snieder R. Trampert J. (1999) *Inverse Problems in Geophysics*. In: Wirgin A. (eds) *Wavefield Inversion*. International Centre for Mechanical Sciences (Courses and Lectures), vol 398. Springer, Vienna.

Tait S. Jaupart C. Vergnolle S. (1988) Pressure, gas content and eruption periodicity of a shallow, crystallising magma chamber Volume 92, Issue 1, February 1989, Pages 107-123 [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(89\)90025-3](https://doi.org/10.1016/0012-821X(89)90025-3)

Thun, J. I. Lokmer, and C. J. Bean (2015), New observations of displacement steps associated with volcano seismic long-period events, constrained by step table experiments, *Geophys. Res. Lett.* 42, 3855–3862, doi:10.1002/2015GL063924.

Wassermann, Joachim (2012), *Volcano Seismology*, IASPEI New manual of seismological observatory practice 2 (NMSOP-2), Second, edited by Peter Bormann, pp. 1-77, Potsdam : Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam, DOI:10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch13.

Zobin V. M. Elsevier Insights (2012) *Introduction to Volcanic Seismology*.