



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOFÍSICA
**OPTIMIZACIÓN DE REDES DE MONITOREO SÍSMICO
APLICADO A CAMPOS GEOTÉRMICOS**

Tesis que para optar por el grado de:

Maestro en Ciencias de la Tierra

Presenta

Ing. Leonarda Isabel Esquivel Mendiola

Director de tesis

Dr. Marco Calò

Instituto de Geofísica, UNAM.

Jurado

Dra. Xyoli Pérez Campos

Instituto de Geofísica, UNAM.

Dr. Marco Calò

Instituto de Geofísica, UNAM.

Dr. Javier Francisco Lermo Samaniego

Instituto de Ingeniería, UNAM.

Dr. Víctor Hugo Márquez Ramírez

Centro de Geociencias, UNAM.

Dr. Ángel Gregorio Figueroa Soto

Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH.

CDMX, a agosto de 2020.



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Contenido

1.	Introducción.....	9
1.1	Motivación.....	9
1.2	Objetivos.....	10
1.3	Campo geotérmico: Acoculco, Pue., Méx.	10
1.4	Análisis previo de la sismicidad.....	13
2.	Teoría	15
2.1	Redes de monitoreo sísmico	15
2.1.1	Objetivos de una red de monitoreo	15
2.1.2	Características instrumentales.....	15
2.1.3	Tipos de instalación.....	20
2.2	Optimización de redes de monitoreo	21
2.2.1	Concepto de optimización	21
2.2.2	Criterio de optimización D.....	22
2.2.3	Parámetros prácticos.....	23
2.3	Sensibilidad de una red de estaciones.....	27
2.3.1	Modelo de fuente de Brune.....	27
2.4	Sismicidad inducida.....	28
2.4.1	Mecanismos de la sismicidad inducida.....	28
3.	Método.....	31
3.1	Niveles de ruido	34
3.1.1	Cálculo de niveles de ruido por estación.....	35
3.1.2	Cálculo de los mapas de niveles de ruido.....	37
3.2	Optimización de la red	37
3.2.1	Generación de datos sintéticos	38
3.2.2	Criterio D.....	41
3.3	Gradiente topográfico.....	45
3.4	Sensibilidad de la red.....	46
4.	Resultados	48
4.1	Niveles de ruido	48

4.2	Gradiente topográfico.....	52
4.3	Optimización de la red de estaciones.....	54
4.3.1	Modelo de velocidades 1D.....	56
4.3.2	Modelo de velocidades 3D.....	63
5.	Análisis y discusión de resultados.....	69
6.	Conclusiones.....	73
7.	Referencias.....	75

Agradecimientos

A mi madre Rufina Mendiola López, quien me ha apoyado e impulsado a lo largo de mi vida. A mi familia y amigos que han confiado y fortalecido en muchas ocasiones.

Al Dr. Marco Caló por el conocimiento y enseñanzas impartidas durante este trabajo. Por su apoyo y disposición para fortalecer mi formación académica y cultural.

A la Dra. Anna Tramelli por proporcionarnos el código de optimización base y por la disposición y contribución para su modificación.

Al Instituto Nacional de Geofísica y Vulcanología (INGV- Observatorio Vesubiano) que me permitió realizar una estancia para comprender y modificar el código de optimización, de acuerdo con el convenio entre la UNAM y el INGV de la República Italiana, que tiene el objetivo de desarrollar herramientas e investigación sísmológica en campos volcánicos y energía geotérmica, que permite el desarrollo de un protocolo metodológico para aplicarlo a los sistemas volcánicos de los dos países.

Al jurado que ha evaluado y mejorado este trabajo. Por su disposición y apoyo.

Al Posgrado en Ciencias de la Tierra y a los profesores que me compartieron un poco de su conocimiento y experiencia.

Al Sistema Nacional de Becas (CONACYT) por el apoyo económico brindado que me permitió financiar mis estudios.

Al proyecto PT5.2 de GEMex, Convocatoria CONACyT-SENER S0019, 2015-04 proyecto N: 267084, y a todo el personal que colaboró en las distintas campañas de instrumentación sísmica, en especial al M. C. Joel Angulo Carrillo.

Resumen

El monitoreo de la actividad sísmica en una región frecuentemente es un reto en Sismología, independiente del fin con el que se realice, investigación o como parámetro de control. El objetivo del monitoreo es poder detectar y localizar los eventos sísmicos con la mayor precisión y eficiencia posible, y depende esencialmente de dos factores principales: 1) diseño del arreglo de estaciones y 2) el método de localización empleado. En este trabajo se atiende el primer factor, el diseño de un arreglo de estaciones, que permita mejorar la resolución y cobertura de la red en la zona que se desea estudiar.

El campo geotérmico de Acoculco, Pue., es un campo catalogado como de roca seca, donde sólo existen dos pozos exploratorios. Como parte de un proyecto futuro, se desea realizar una estimulación del pozo con el objetivo de analizar la sismicidad inducida que posiblemente se registrará. Para ello es necesario planear la instalación de una red de monitoreo sísmico óptima y mejorar su sensibilidad. Por otra parte, el complejo volcánico tiene una topografía abrupta, por lo tanto, se considera conveniente adicionar como criterio de optimización el gradiente topográfico.

En el presente trabajo se realizó una modificación del algoritmo de optimización de redes sísmicas desarrollado por Tramelli *et al.* (2013), el cual considera la ubicación hipocentral y magnitud y caída de esfuerzos de un evento, cantidad de sensores y sitios disponibles; además de propiedades del medio como: niveles de ruido, factor de calidad, densidad, velocidad de ondas S, entre otros. El código calcula para todas las combinaciones posibles el valor del determinante de la matriz $\mathbf{M} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$, cuyo valor inverso es proporcional al volumen del elipsoide del error. De tal manera que calcula todas las combinaciones que maximicen el valor del determinante, es decir, aseguren un mínimo error en la localización. Atendiendo las características topográficas del campo geotérmico se agrega como parámetro de optimización el gradiente topográfico. Como resultado se obtiene un conjunto de combinaciones que minimizan el error en la localización y evitan regiones con topografía accidentada; por lo tanto, permite realizar una planeación más viable de las campañas de instalación.

El algoritmo fue probado utilizando distintas cantidades de estaciones y modelos de velocidades, unidimensionales (1D) y tridimensionales (3D). Los resultados muestran la importancia del modelo de velocidades, ya que en el caso 1D, la distribución de estaciones genera agrupamientos de sensores en zonas aleatorias; por lo tanto, la sensibilidad incrementa, pero no la región objetivo. Mientras que al emplear un modelo de velocidades 3D, las estaciones son dispuestas en la región objetivo y aseguran una buena cobertura acimutal.

Abstract

Monitoring seismic activity is frequently a challenge in Seismology. Independently from the initial purpose (basic or applied research), the monitoring target has to be able to efficiently detect and locate seismic events. Seismic monitoring depends on two main factors: 1) seismic network design and 2) location method. In this work, I focus on the seismic network design to improve the resolution and network coverage in the region.

Acoculco geothermal field (Puebla, Mexico) has been considered a Hot Dry Rock geothermal system with only two exploratory boreholes. Since a borehole stimulation is planned in the site, the planning of an optimized seismic network is necessary to record and analyze properly the possible induced seismicity. Additionally, the complex volcanic history of the region resulted in a rugged topography. Thus, I added the topography gradient as a criterion for the network optimization.

In this work, I show a modification of the seismic network optimization algorithm developed by Tramelli *et al.* (2013). The algorithm considers several parameters to make the optimization, e.g., the hypocenter location, magnitude, number of available sensors, and some seismic properties of the medium such as noise levels, stress drop, quality factor, density, S wave velocity, etc. The code computes, for every station combination, the determinant value of the matrix $\mathbf{M} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$, whose inverse value is proportional to the error ellipsoid volume. The result is a list of all the combinations with a maximum of the determinant value; i.e., the results ensure a minimal location error. Finally, I added the topographic gradient as an optimization parameter that provides a set of combinations with minimal location error and avoiding regions with rugged topography. Therefore it allows a better planning of the installation campaigns.

The algorithm was run using a different number of stations and velocity models. The use of one-dimensional velocity model had the tendency to generate networks with stations clustered in several regions and more randomly distributed. This resulted in configurations suggesting position of the stations distributed in unwanted regions. Conversely, the use of an appropriated three-dimensional model of the region, led to propose networks where the

stations were located in the target region ensuring a better azimuth coverage and a more suitable distribution of the expected resolution of the network.

Capítulo 1

1. Introducción

1.1 Motivación

El monitoreo de la actividad sísmica en una región es un problema común en Sismología, independiente del fin con el que se realice, investigación o como parámetro de control. El objetivo del monitoreo es poder detectar y localizar los eventos sísmicos con la mayor precisión y eficiencia posible. La localización precisa de un sismo es un factor clave para desarrollar análisis de la actividad sísmica, estudios de estructura y monitorear zonas de interés, tales como, márgenes tectónicos, vulcanismo activo, casos de sismicidad inducida, entre otros. El monitoreo sísmico depende de dos factores principales: 1) diseño del arreglo de estaciones y 2) el método de localización empleado. El diseño de un arreglo incluye varios factores, como el tipo de sismicidad que se pretende detectar y localizar, la búsqueda de sitios apropiados en función de los niveles de ruido y de los sensores que se eligen, de la dificultad de acceso al sitio, vulnerabilidad de éste, etc. Por otra parte, el método de localización incluye aspectos teóricos matemáticos sobre las propiedades de propagación de las ondas en el medio, la estimación de los errores en la determinación del foco, la capacidad de localizar eventos en condiciones diferentes; p.ej., sismos afuera del arreglo o muy someros, enjambres sísmicos o extremadamente dispersos, sismos extremadamente someros o profundos en comparación de la apertura de la red utilizada, etc. En este trabajo se atiende el primer factor, el diseño de un arreglo de estaciones, que permita mejorar la resolución y cobertura de la zona que se desea estudiar.

En el caso especial de la explotación y valoración de producción de un campo geotérmico, el monitoreo sísmico es una herramienta fundamental. A partir de ella se da seguimiento a la evolución del sistema, ya que es posible inferir la distribución y conexión de posibles fallas y estructuras, componentes de una porosidad secundaria que permite el movimiento de fluidos.

1.2 Objetivos

El objetivo de este trabajo es implementar y modificar un algoritmo que permita diseñar un arreglo de estaciones sísmicas que considere factores como: 1) nivel de ruido, 2) número mínimo de sensores necesarios y disponibles, 3) cualidades sísmicas del medio, 4) características hipocentrales y magnitud del evento sísmico y 5) gradiente topográfico. Con lo que se busca determinar un arreglo óptimo de estaciones sísmicas que permita detectar y localizar sismicidad asociada a la estimulación del pozo exploratorio EAC1 en el campo geotérmico de Acoculco, Pue., Méx.

1.3 Campo geotérmico: Acoculco, Pue., Méx.

El campo geotérmico de Acoculco se encuentra en los límites del estado de Puebla e Hidalgo. Se localiza aproximadamente a 130 km al noreste de la Ciudad de México y 80 km de la ciudad de Puebla. El complejo volcánico se ubica en la intersección de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) con la Sierra Madre Oriental (Figura 1.1).

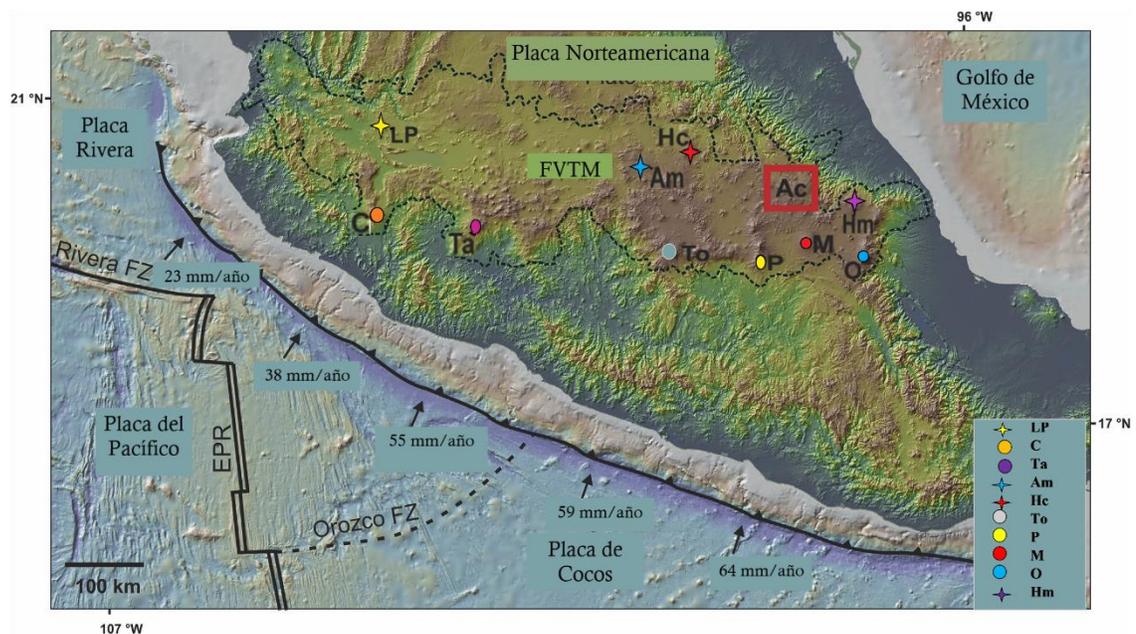


Figura 1.1. Tectónica involucrada en el centro de México. Se muestra los márgenes tectónicos, la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) y con un cuadro rojo la ubicación del complejo volcánico Acoculco; además otros volcanes como La Primavera (LP), Fuego de Colima (C), Tancítaro (Ta), Amealco (Am), Huichapan (Hc), Nevado de Toluca (To), Popocatepetl (P), Malinche (M), Pico de Orizaba (O) y Humeros (Hm) (Modificado de Avellán *et al.*, 2020).

Se compone de extensas lavas de composición riolítica-dacítica-andesítica-basáltica y tobas riolíticas-dacíticas, datadas entre 1.4 y 0.24 Ma (López-Hernández y Castillo-Hernández, 1997). Con respecto al estado de esfuerzos en la región, la tectónica compresiva tardía generó el ensamble de pliegues y fallas inversas orientadas NW-SE. Mientras que al final del régimen compresivo, una fase extensiva generó fallas normales en la misma dirección, que cortan la secuencia sedimentaria. Finalmente, el último régimen tectónico del Plioceno, produjo fallas normales en dirección NE-SW y fracturas que afectan toda la secuencia. El emplazamiento del centro volcánico de Acoculco ocurrió en la intersección de este sistema con el previo fallamiento en dirección NW-SE (López-Hernández y Castillo-Hernández, 1997). Las rocas de la caldera están deformadas por tres sistemas de fallas principales: el sistema de fallas NE Tenochtitlán-Apan y el sistema de fallas NW Tulancingo-Tlaxco. Localmente, el sistema Tenochtitlán-Apan es representado por las fallas Apan-Tlaloc y Chignahuapan, y el sistema Tulancingo-Tlaxco es representado por la falla Manzanito (Avellán *et al.*, 2018). La caldera tiene una forma semi-circular, con diámetro entre 16-18 km, limitada al norte por el escarpe Atotonilco, la falla NW-SE Manzanito en el oeste y ventilas dispersas en las partes este y sur. La distribución de la ignimbrita Acoculco, la brecha lítica y sedimentos lacustres definen la falla del anillo de la caldera (Avellán *et al.*, 2018).

La cronología eruptiva que dio origen al complejo volcánico que observamos hoy día ha sido estudiada desde tiempo atrás. Avellán *et al.* (2020) logró recopilar e integrar información geocronológica local (e.g., García-Palomo *et al.*, 2002; López-Hernández, 2009) y regional (e.g., Avellán *et al.*, 2018; Sosa-Ceballos *et al.*, 2018; Calcagno *et al.*, 2018) de estudios anteriores en un nuevo mapa geológico (Figura 1.2); tales datos fueron correlacionados y sustentados con dataciones $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, ^{14}C y estudios aeromagnéticos (Avellán *et al.*, 2020). De tal forma que agruparon las 30 unidades geológicas en cuatro fases eruptivas: la etapa syn-caldera (~2.7 Ma) (Sc), ésta involucra el colapso de la cámara magmática y la formación de un lago intracaldera; la etapa post-caldera temprana (~2.6 - ~2.1 Ma) (Epc), considera la generación de 27 km³ de flujos de lava y domos; la etapa post-caldera tardía (~2.0 - ~0.016 Ma) (Lpc), donde la actividad migró del borde de la caldera a la periferia, emplazando 90 km³ de material en domos riolíticos, flujos de lava, conos de escoria y dos ignimbritas jóvenes; por último, la etapa extra-caldera (~2.4 - 0.19 Ma) del campo Apan-Tezontepec (ATVF) donde se originaron domos de escoria y flujos de lava

basáltica. Además, los datos aeromagnéticos mejoraron la delimitación del borde de la caldera y permitieron la identificación de cuatro cuerpos intrusivos a una profundidad aproximada de 1 km; y cuya existencia los supone como la fuente de calor que alimenta las manifestaciones hidrotermales en superficie y el sistema geotérmico actual (Avellán *et al.*, 2020).

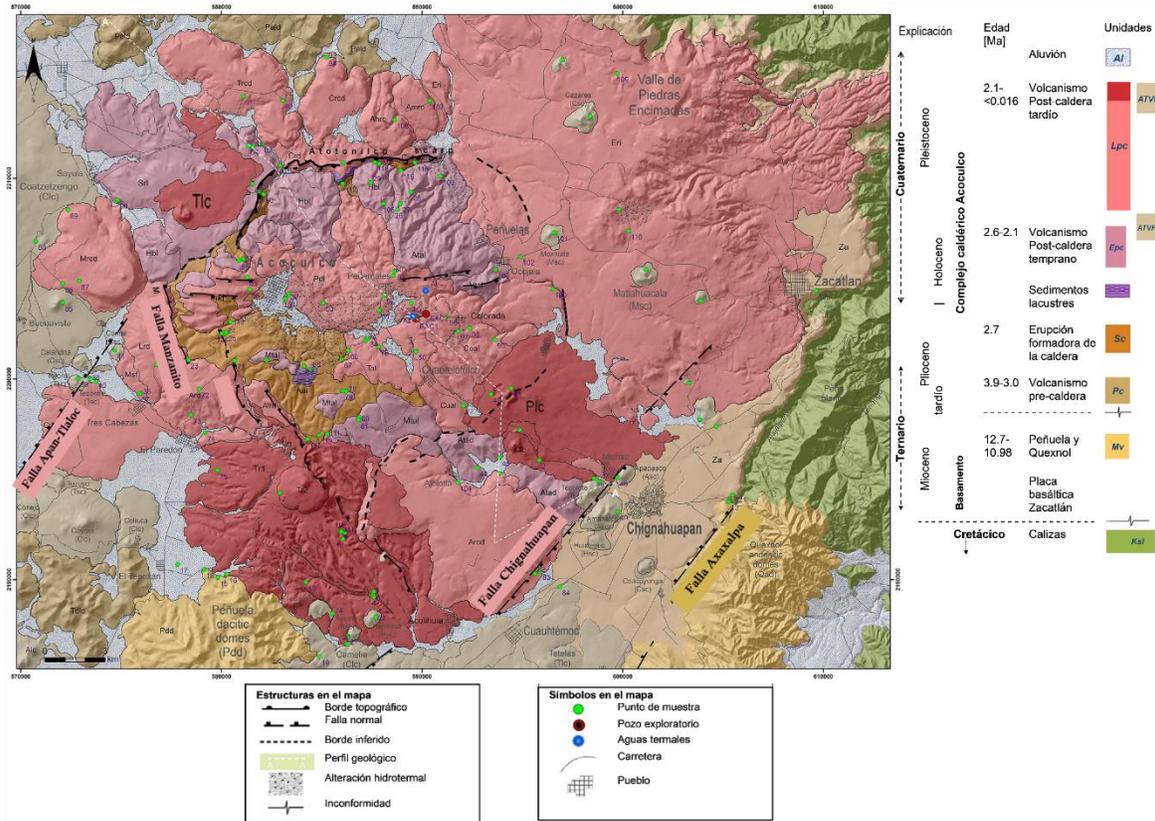


Figura 1.2. Mapa geológico del complejo volcánico de Acoculco. Se muestra la distribución espacial de las 30 unidades geológicas analizadas y agrupadas en las cuatro etapas de formación, las principales fallas, los caminos, carreteras, pueblos, localización de los puntos de muestreo, sitios con alteración hidrotermal de interés y los dos pozos exploratorios de CFE (Modificado de Avellán *et al.*, 2020).

Por otra parte, durante el programa de exploración regional que condujo la Comisión Federal de Electricidad (CFE) de México, el complejo de Acoculco capturó la atención por la gran cantidad de manifestaciones superficiales de alteración hidrotermal, como manantiales ácidos y descargas de gas. Posteriormente, con la realización de estudios geofísicos y geoquímicos, dictaminaron en 1995 la perforación del primer pozo exploratorio EAC-1 que se construyó cerca de Los Azufres, una manifestación termal con numerosas emisiones de gas (López-Hernández *et al.*, 2009), y una profundidad aproximada de 1810 m. En 2008 se perforó el segundo pozo exploratorio EAC-2 a 1900 m de profundidad (ver Figura

2). Se considera que el sistema geotérmico probablemente presenta un cambio de régimen convectivo a conductivo, debido a que el sistema no se ha reciclado. A pesar de ello, se considera que el campo tiene un importante potencial energético según el volumen del yacimiento y la temperatura de 300 °C medida en ambos pozos (Viggiano-Guerra *et al.*, 2011). Por tal motivo se continúan realizando estudios exploratorios del campo geotérmico, para certificar la capacidad de producción de calor del campo.

Guerrero-Martínez *et al.* (2019) realizó una simulación de temperatura tridimensional en la caldera de Acoculco, donde los resultados numéricos mostraron que son necesarias fuentes de calor someras de al menos 750 °C para producir las mediciones de temperatura que se han realizado en el campo con una profundidad entre 3100 m y 3400 m; es decir, un rango de profundidad más somero que el determinado mediante estudios unidimensionales.

Por otra parte, Sosa-Ceballos *et al.* (2018) investigó, con análisis petrofísicos, geoquímicos e isotópicos, el origen de distintos magmas expulsados durante la historia eruptiva de la caldera. Los resultados sugieren que después del colapso de la caldera (~2.7 Ma) el campo de esfuerzos locales probablemente cambió, lo que generó el ascenso de magma peralcalino a través de un nuevo sistema de conductos, que se mezclaron con los magmas emplazados anteriormente. De tal modo que es probable que la fuente de calor que alimenta al sistema actual esté determinada por ese nuevo sistema de conductos. Además, sugieren que las fuentes de calor pueden deberse a dos escenarios: 1) zonas de calentamiento poco profundas y 2) presencia de magmas ajenos al sistema original que precalienta a los magmas preexistentes.

1.4 Análisis previo de la sismicidad

En 2009, Lermo *et al.* instalaron siete sismómetros, tres velocímetros de banda ancha, tres acelerómetros y un sensor de pozo. El objetivo del estudio era detectar sismicidad local y correlacionarla con rasgos estructurales. Sin embargo, durante el periodo de estudio de tres meses, no lograron detectar algún evento local asociado a la actividad hidrotermal. No obstante, con los sismos regionales registrados se empleó el Método de Autocorrelación Espacial (SPAC, por sus siglas en inglés), con lo que propusieron un modelo de velocidades unidimensional de ondas de cuerpo.

Recientemente y como parte de las actividades del PT5.2 del proyecto GEMex, (e.g., Maldonado-Hernández *et al.*, 2019) fueron instaladas 16 estaciones de banda ancha con dos objetivos: 1) calcular un modelo de velocidades 3D y 2) caracterizar la sismicidad del campo generada por el fallamiento activo. La red de estaciones permitió localizar eventos en un radio de 80 km y asociar la sismicidad al sistema de fallas con direcciones NE y NW. Hasta la etapa 5 del proyecto GEMex se han reportado un total de 35 sismos en los alrededores de la caldera de Acoculco (Reporte Interno GEMex PT5.2, noviembre de 2019) algunos de estos sismos posiblemente asociados a los sistemas de fallas NE y NW.

Capítulo 2

2. Teoría

2.1 Redes de monitoreo sísmico

2.1.1 Objetivos de una red de monitoreo

El monitoreo sísmico es una actividad primordial en Sismología, ya que a partir de ésta es posible obtener datos de interés para el análisis y estudio de la sismicidad en una región determinada. Una red de monitoreo es una configuración de estaciones sísmicas, de velocidad o aceleración, en superficie o en pozo, que tiene como objetivo registrar con eficiencia todas las señales posibles en un área de estudio, y con ello conocer la estructura del interior de la Tierra. Los datos generados por el monitoreo sísmico pueden ser utilizados para trabajos de investigación como tomografías sísmicas, análisis de ruido, análisis telesísmicos, atenuación, etc., además de usos inmediatos como el alertamiento temprano ante la ocurrencia de sismos grandes.

Su disposición espacial dependerá del objetivo a analizar, es decir, estudios locales, regionales o globales. Desde el punto de vista sismológico, el monitoreo se asocia con zonas volcánicas, márgenes tectónicos, actividades antropogénicas, como presas, minas, pruebas nucleares, zonas geotérmicas, entre otros.

Por otra parte, si el objetivo es localizar sismos, entonces la configuración de una red de estaciones sísmicas es evaluada en términos de la eficiencia con la que es posible localizar un evento sísmico en un volumen determinado. Por lo tanto, parámetros de control esenciales para la estimación de la eficiencia de una red sísmica instalada son: la magnitud mínima del evento que se logra detectar de forma satisfactoria y el error en la estimación de cada uno de los parámetros de localización, tanto espaciales (X, Y, Z), es decir, el hipocentro y el temporal (t) (Lienert *et al.*, 1986).

2.1.2 Características instrumentales

El diseño de una red de monitoreo y la elección de los sensores depende de la dimensión del estudio, es decir, monitoreo local, regional o global. Sin embargo,

independientemente del objetivo, los factores más importantes a considerar en cuanto a características del sensor son los siguientes:

- Tipo de sensor: sismómetro o acelerómetro y número de componentes del sensor
- Sensibilidad y rango dinámico del sensor
- Rango de frecuencias de operación
- Portabilidad del sensor

A continuación, se detallarán algunas de las consideraciones anteriores.

2.1.2.1 Tipo de sensor y número de componentes

El tipo de sensor se refiere a detectores de velocidad o aceleración, es decir, sismómetros o acelerómetros.

Los velocímetros o sismómetros, dependiendo del rango de frecuencias, suelen ser muy sensibles a señales de alta frecuencia, rasgo que se incrementa con sismos pequeños. Por lo que son idóneos para la detección de microsismicidad y sismos de magnitud moderada, ya que, la gran sensibilidad genera que los registros se saturaren con sismos grandes localizados a cortas distancias del instrumento.

En general, los acelerómetros son menos sensibles a señales de pequeñas amplitudes y baja frecuencia; además de tener un menor rango dinámico, por lo que son óptimos para el registro de sismos grandes, debido a que estos registros no se saturan.

Sin embargo, la última generación de acelerómetros tiene una sensibilidad cercana a los sismómetros estándar de periodo corto, con frecuencias alrededor de 1 Hz y un amplio rango dinámico. Además, los sensores de banda ancha ahora son más asequibles y tienen un amplio rango dinámico, lo que los hace viables para sismos de magnitud moderada. Por último, en términos del procesamiento, no existe diferencia en utilizar un sismómetro o un acelerómetro, ya que al corregir por su respuesta instrumental y derivar o integrar se obtiene señales muy similares (Havskov *et al.*, 2011).

En cuanto al número de componentes, en un inicio los sensores sólo contaban con una componente, es decir, la componente vertical. Esto se debía a que el registro era analógico y

empleaba papel, por lo que la mecánica de un instrumento de tres componentes era más difícil y costosa. Con el avance de la tecnología el coste instrumental se vio favorecido y actualmente se cuenta con registradores digitales de tres componentes, es decir, una vertical (Z) y dos horizontales, este (E) y norte (N), debido a que los instrumentos son capaces de manejar y transmitir los datos por tres canales (Havskov *et al.*, 2011).

2.1.2.2 Sensibilidad y rango dinámico

La sensibilidad de un sensor está relacionada con la relación existente entre una señal mínima de entrada para generar una señal de salida legible, por ejemplo, alta sensibilidad es equivalente a poder detectar sismos débiles. De tal modo que es necesario incorporar un factor de ganancia o amplificación de la señal. Se considera que los acelerómetros son poco sensibles, ya que están diseñados para registrar eventos fuertes a cortas distancias epicentrales y evitar que se saturen. Por otra parte, los sismómetros están diseñados para ser más sensibles; es decir, detectar movimientos débiles, aunque no puedan detectar grandes amplitudes como un acelerómetro. Los sismómetros son capaces de medir eventos pequeños o distantes, los cuales generan movimiento de la tierra comparable con las amplitudes del ruido sísmico de fondo (Havskov *et al.*, 2011).

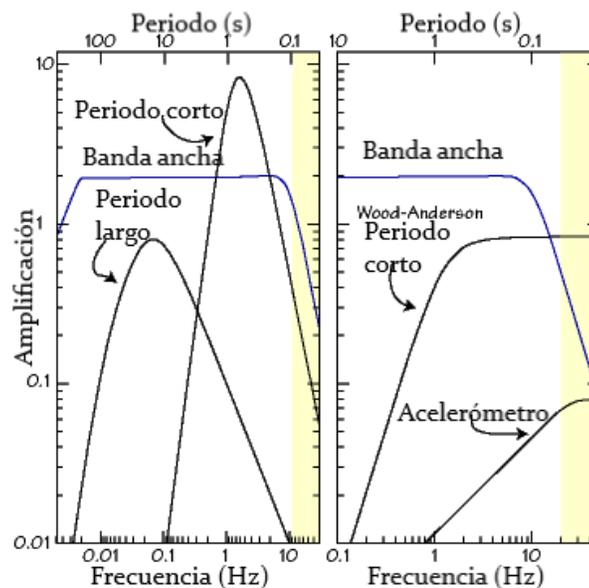


Figura 2.1. Respuesta instrumental de distintos instrumentos sísmicos. Figura modificada de Ammon (2010).

El rango dinámico de un sensor es la relación entre la amplitud máxima y mínima que es capaz de detectar y registrar un sensor. Además, se tiene el rango en frecuencias, que está relacionado con el tiempo y que conlleva a una clasificación de los sensores (Figura 2.1).

Los sensores de velocidad están divididos en tres categorías:

Los sismómetros de periodo corto (SP, por sus siglas en inglés) miden señales desde aproximadamente 0.1 a 100 Hz con una frecuencia de esquina (f_c) en 1 Hz, frecuencia a partir de la cual tiene una respuesta plana.

Los sismómetros de periodo largo (LP, por sus siglas en inglés) detectan señales entre 0.01 a 10 Hz con una frecuencia de esquina (f_c) en 0.09 Hz.

Sismómetros de banda ancha (BB, por sus siglas en inglés) tienen una respuesta plana aproximadamente entre 0.01 a 50 Hz. Ejemplos típicos de estos son los sismómetros Guralp CMG3T (0.008-50 Hz), el Wieland-Streckeisen STS2, el Streckeisen STS2.5 (0.00833-50 Hz) y el STS-1 con rango de 0.008-40 Hz (Havskov *et al.*, 2011).

Además, existen instrumentos de banda amplia, comúnmente conocidos como SP, los cuales tienen una respuesta plana ente 1 – 80 Hz, similar a los Wood-Anderson. Por lo tanto, la característica de tener un rango de frecuencias mayor que los de banda ancha le atribuye el nombre de banda amplia; un ejemplo de éste es el sismómetro Lennartz de 1 Hz (Caló, comunicación personal, 2020). Los límites de frecuencias mencionados son las frecuencias de esquina de las funciones de respuesta de los sismómetros. Lo que significa que por debajo del límite inferior o por arriba del límite superior, es siempre posible registrar un movimiento, pero con ganancia o sensibilidad reducida.

En cuanto a los acelerómetros, el rango de frecuencias está aproximadamente entre 0.1-200 Hz. Partiendo del hecho que la diferencia de voltaje que miden es proporcional a la aceleración del terreno, estos sensores enfatizan las altas frecuencias y reducen las amplitudes de las bajas frecuencias; razón por la cual no sufren un efecto de saturación con los movimientos fuertes (Havskov *et al.*, 2011). En la Tabla 2.1 se muestra un listado de frecuencias de interés para distintos objetivos de estudio. Dicho modelo fue propuesto por Havskov *et al.* (2011).

Tabla 2.1. Estudios sísmicos de interés y rangos de frecuencia de interés aproximados (Havskov *et al.*, 2011).

Aplicación	Rango de frecuencias Hz
Eventos asociados a minería	5 - 2000
Sismos locales y pequeños, por ejemplo, sismicidad inducida	1 - 100
Sismicidad local	0.2 - 80
Movimientos fuertes	0.0 - 100
Sismología regional	0.05 - 20
Estructura de la corteza	0.02 - 1
Dispersión de ondas superficiales	0.003 - 0.2

2.1.2.3 Otros componentes en la instalación

El sensor sísmico, sismómetro o acelerómetro, sólo detecta la señal. Sin embargo, se requiere de otros componentes para armar una estación sísmica. Es común englobar todos los componentes en un registrador.

El registrador está compuesto por un amplificador, un digitalizador e intrínsecamente por una serie de filtros para mejorar la calidad de la señal, además de un reloj y un dispositivo de almacenamiento.

El digitalizador se encarga de convertir una señal analógica en una digital, es decir, pasar de una señal continua a una discreta convirtiendo las variaciones de voltaje en cuentas.

El amplificador se encarga de amplificar la señal, pero asegurando que no haya distorsión en amplitud ni fase de ésta, por lo tanto, debe ser estable y aportar el mínimo nivel posible. En esta parte de amplificación es en donde se involucra la ganancia del digitalizador, es decir, el factor que amplificará la señal. Todos los amplificadores utilizan filtros pasa bajas o pasa altas para limitar el rango de frecuencias y evitar el ruido.

El dispositivo de almacenamiento depende del tipo de instalación y la infraestructura de telecomunicaciones para la transmisión de datos. Si no es posible transmitirlos, el almacenamiento generalmente se efectúa en una memoria física interna o externa.

Por último, todas las instalaciones deben considerar GPS, que además de precisar la ubicación de la estación, llevan la marca de tiempo. Parámetro fundamental en la localización y otros análisis de la señal.

2.1.3 Tipos de instalación

Además de la elección del tipo de sensor idóneo de acuerdo con nuestras necesidades, es importante considerar el tipo de instalación que se realizará. Las características de la instalación dependerán del periodo de estudio. Dependiendo del tiempo que dura el monitoreo la red puede considerarse como temporal o permanente.

Una red temporal, como su nombre lo indica, está en funcionamiento desde horas, días o por sólo algunos meses o inclusive años. Sin embargo, eso no restringe el área cubierta con el arreglo, las dimensiones sólo dependen de la escala del experimento. El corto periodo de funcionamiento hace que no se requiera una instalación muy robusta. Pueden emplearse estaciones de pozo o simplemente enterrarse los sensores a un par de metros. En cuanto a la fuente de energía, comúnmente se emplean baterías y paneles solares para la recarga. En muchas ocasiones, este tipo de proyectos no requiere la transmisión de datos en tiempo real, por lo que se puede empelar el almacenamiento interno de los dispositivos, y con cierta periodicidad acudir a cada estación y recuperar los datos.

Usualmente, una red de monitoreo sísmico permanente tiene como objetivo proveer información a organizaciones de protección civil, y con ello activar protocolos de alerta temprana. Por lo tanto, es fundamental contar con una transmisión de datos eficiente y asegurar el funcionamiento continuo de las estaciones. La instalación es más robusta y costosa; requiere de la construcción de infraestructura que disminuya la afectación por fuentes de ruido; la energía es generalmente suministrada por una compañía; además que se debe tener una fuente de respaldo, por posibles fallas en el suministro. La transmisión de datos se asegura con una sólida infraestructura de telecomunicaciones; la señal puede transmitirse vía radio, satelital, conexiones como celular o red comercial de internet. La elección del método de comunicación se basa en la cobertura y rapidez del flujo de datos.

2.2 Optimización de redes de monitoreo

Independientemente del tipo de red e instalación es necesario planear la logística a seguir. Los parámetros más importantes en la instalación de la red son: 1) delimitación del objetivo de estudio, 2) elección de los sitios disponibles para cada estación y 3) geometría de la red.

La elección de los sitios disponibles se basa en un análisis previo de cada uno de ellos, donde se consideran factores como: 1) geología (efectos de sitio), 2) niveles de ruido, 3) acceso a fuentes de energía, 4) vías de comunicación y 5) seguridad.

La geometría de la red debe asegurar buena cobertura azimutal y una densidad que permita detectar movimientos débiles. Sin embargo, en muchas ocasiones la geometría del arreglo se configura dependiendo del número de sitios disponibles, es decir, considerando parámetros prácticos.

2.2.1 Concepto de optimización

El propósito de la optimización de redes sísmicas es maximizar el rendimiento de la red para recuperar parámetros sísmicos específicos (Tramelli *et al.*, 2013). El parámetro más común de análisis e interés sismológico es la localización de sismos, que requiere el mínimo error en el cálculo de cada hipocentro.

La localización de eventos sísmicos depende principalmente de cuatro parámetros: 1) error en la identificación de fases sísmicas, 2) calidad del modelo de velocidades, 3) cobertura del arreglo de estaciones y 4) calidad del registro, esto último está en función de la magnitud del evento, nivel de ruido en la estación y características instrumentales. Por lo tanto, suponiendo que el modelo de propagación de las ondas sísmicas (de velocidades y de atenuación) es el adecuado y el mínimo error en la identificación de fases, entonces modificando la configuración y número de estaciones es posible disminuir el error en la localización del evento.

La optimización de redes puede realizarse mediante la búsqueda de geometrías que maximicen o minimicen funciones objetivo que describan su poder de resolución para la localización de sismos (Tramelli *et al.*, 2013).

2.2.2 Criterio de optimización D

Las funciones objetivo que son consideradas como criterios de optimización pueden tener diferentes formas. Sin embargo, autores como Rabinowitz y Steinberg (1990; 2000), abordan el criterio de optimización D (D-optimality, por su nombre en inglés).

El criterio primordial en la optimización de la configuración de una red se basa en minimizar el volumen del elipsoide de confianza, que es proporcional al error de la localización,

$$(\Phi - \bar{\Phi})^T \mathbf{M} (\Phi - \bar{\Phi}) \leq Const. \quad (1)$$

La ecuación 1 muestra la forma del elipsoide de confianza donde Φ representa las coordenadas del hipocentro y tiempo de origen, $\bar{\Phi}$ es la estimación de los mismos parámetros con mínimos cuadrados, $\mathbf{M} = \mathbf{A}^T \mathbf{A}$ es conocida como la matriz de información en la literatura estadística y \mathbf{A} es la matriz de $N \times 4$ que contiene las derivadas parciales de los tiempos de viaje con respecto a cada uno de los parámetros. Dicha teoría supone una distribución Gaussiana de los errores (Rabinowitz y Steinberg, 2000).

2.2.2.1 Criterio de optimización para una fuente

El volumen del elipsoide de confianza es proporcional al $\det(\mathbf{M})^{-1/2}$, teniendo en mente que el objetivo es minimizar el volumen, resulta obvio que se requiere encontrar una red de estaciones que maximice el $\det(\mathbf{M})$. La configuración que maximice dicho determinante se llama D óptima (D-optimal). Por otra parte, es más común utilizar como criterio el $\det(\mathbf{M})^{1/4}$ que el determinante en sí, ya que el exponente corresponde al número de parámetros que se intentan resolver con el problema inverso. Algunas propiedades de las redes D óptimas son:

- 1) Para un modelo de capas, la configuración D óptima debe situar todas las estaciones de manera concéntrica al epicentro, con estaciones equidistantes una de otra. Lo cual concuerda con la intuición lógica de mantener una cobertura azimutal.
- 2) Para un hipocentro en una capa sobre un semiespacio, la configuración D óptima incluye una estación sobre el hipocentro y las otras distribuidas en dos anillos

concéntricos al epicentro. Los anillos deben estar localizados de tal manera que se detecten los arribos directos y se eviten las refracciones.

Además de las características mencionadas, las redes D óptima pueden ser caracterizadas teóricamente utilizando el teorema de equivalencia de Kiefer y Wolfowitz (1961), donde se demuestra que la derivada de Fréchet de $\det(\mathbf{M})$ es proporcional a $v = \mathbf{f}^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{f}$, donde \mathbf{f} es el vector de derivadas parciales de los tiempos de arribo con respecto a cada uno de los parámetros. Michell (1974) utilizó el teorema y desarrolló un algoritmo llamado DETMAX, posteriormente Rabinowitz y Steinberg (1990) desarrollaron un algoritmo de optimización de redes. La regla simple en la que se basa el algoritmo es seguir un criterio para agregar o quitar una estación en el proceso de construcción de un arreglo óptimo de estaciones. El algoritmo incorpora sitios de una lista finita, en función de un posible número de estaciones disponibles. De tal modo que el criterio D se aplica al agregar una estación que minimice la cantidad v , por lo tanto, ésta es un criterio para agregar u omitir estaciones de una determinada configuración. En general, el algoritmo trabaja de manera iterativa agregando y quitando estaciones de una red, y progresivamente mejora el valor del criterio. Aunque, comúnmente este problema tiene muchos máximos locales, lo que hace necesario un número aleatorio de configuraciones iniciales y con ello incrementar la probabilidad de encontrar un máximo global (Rabinowitz y Steinberg, 2000).

Para el caso de más de una fuente, como lo es en el caso de regiones bien estudiadas donde se conocen las zonas en las cuales se restringe la sismicidad, las propiedades del criterio D se mantienen y el cálculo del volumen del elipsoide se realiza para cada hipocentro.

2.2.3 Parámetros prácticos

Los parámetros prácticos para la optimización de una red sísmica son las características inherentes al campo que influyen en la elección de un sitio.

El primer factor es el nivel de ruido en un sitio. El diseño de una red de estaciones está en función de su poder de resolución de ciertos parámetros sísmicos de interés. La calidad de las lecturas depende en gran medida de la elección de un lugar con bajo nivel de ruido, es decir, regiones alejadas de grandes poblados, con buena calidad del suelo y por lo tanto

ruido de fondo que permita identificar amplitudes asociadas a sismos de magnitud pequeña.

El segundo factor es el gradiente topográfico, el cual está más relacionado con la accesibilidad y practicidad de instalación instrumental. Aunque el algoritmo de optimización pueda indicar una configuración óptima, dado un bajo error en la localización, posiblemente involucre un mayor costo o un sitio inaccesible, dependiendo de la elevación del terreno. De tal modo, que una elección de estaciones posterior a la optimización probablemente reduzca los problemas en la instalación.

2.2.3.1 Niveles de ruido

2.2.3.1.1 Modelo de Peterson

En 1993 Peterson utilizó los registros continuos, de 2 a 3 años, de 75 estaciones alrededor del mundo, para calcular las líneas base de los niveles de ruido. Su trabajo se basó en la estimación de los espectros de densidad de potencia de aceleración de cada una de las estaciones para todo el periodo de estudio y determinar los niveles mínimo y máximo. Como resultado reportó dos curvas, conocidas actualmente como curvas de Peterson, que establecen los límites del nivel de ruido en el mundo, y por lo tanto son un referente para evaluar la calidad del registro de una estación. En la Figura 2.2 se muestran las curvas de Peterson asociadas a los espectros de densidad de potencia de aceleración (P_a) y el referente al nivel inferior para el caso de desplazamiento (P_d) y velocidad (P_v).

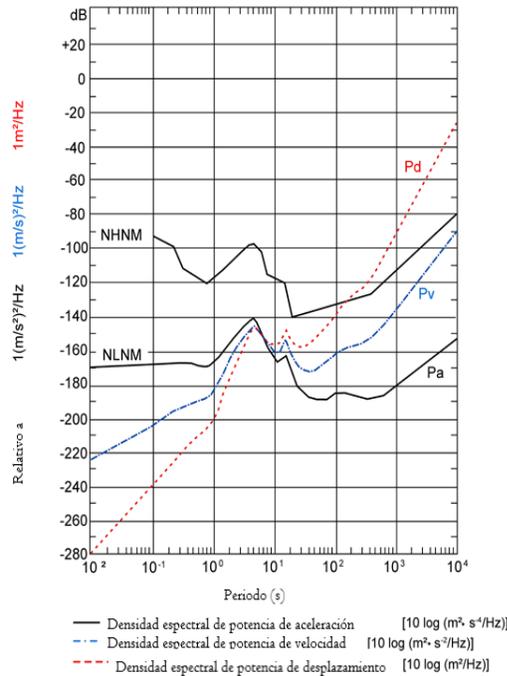


Figura 2.2. Curvas envolventes del espectro de densidad de potencia de aceleración (Pa) calculadas por Peterson en 1993. Se muestran los niveles bajo (NLNM) y alto (NHNM) de ruido para Pa y el nivel inferior para los espectros de densidad de potencia de desplazamiento (Pd) y velocidad (Pv) (Modificada de Bormann y Wielandt, 2013).

2.2.3.1.2 Modelo de McNamara y Buland

En 2004 McNamara y Buland emplearon registros de entre 2 y 3 años de 159 estaciones de una red mundial para calcular los niveles de ruido en el mundo. Sin embargo, a diferencia del trabajo de Peterson, donde fue necesario excluir señales transitorias de los registros, ellos emplearon los registros continuos. Analizaron las señales desde un enfoque estadístico con el objetivo de generar un modelo más robusto.

Para estimar la variación de ruido en una estación se calculan las funciones de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) para cada periodo. Sin embargo, con el objetivo de reducir el número de operaciones, McNamara y Buland (2004) realizan un muestreo de las PSD y toman promedios de cada 1/8 de intervalo, con esto se reduce el número de frecuencias y se gana eficiencia computacional. Este proceso es repetido para todas las PSD del intervalo de estudio. Lo que resulta en una gran cantidad de curvas, a partir de las cuales se construye una PDF empírica, realizando una normalización de las curvas en cada periodo por el número total de segmentos que contribuyen en cada uno. Es decir, se obtiene un

histograma para cada periodo, en la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de un histograma de potencia para cuatro periodos diferentes.

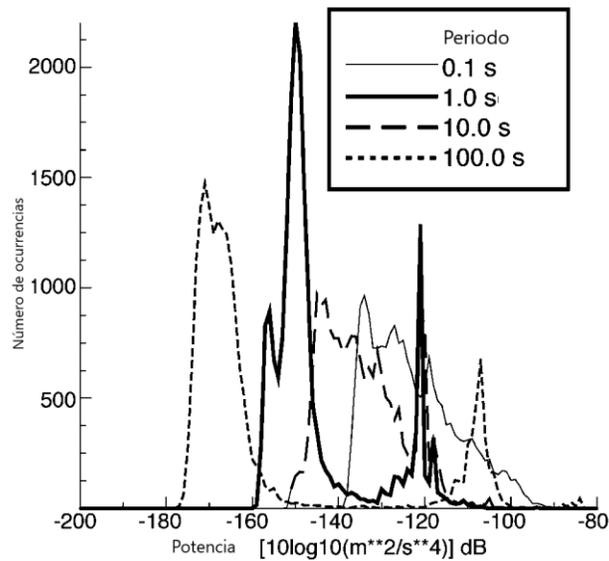


Figura 2.3. Histograma de potencia, en segmentos de 1 dB, para cuatro bandas de periodos (Modificada de McNamara y Buland, 2004).

2.2.3.2 Gradiente topográfico

En matemáticas el gradiente o vector gradiente se denota como $\vec{\nabla}F$, e indica la dirección de máximo cambio de un campo vectorial F . La definición general de gradiente se expresa en términos de derivadas parciales del campo F en cada una de las direcciones, tal como

$$\vec{\nabla}F = \frac{\partial F}{\partial x}i + \frac{\partial F}{\partial y}j + \frac{\partial F}{\partial z}k, \tag{2}$$

donde F en coordenadas cartesianas está en términos de (x, y, z) e i, j, k son los vectores unitarios de este sistema. De tal manera que al evaluar el vector gradiente (ecuación 2) en un punto determinado, se conoce la dirección de máxima o mínima pendiente, según sea el signo. En el caso particular de topografía este concepto resulta ser útil para identificar regiones con mayor pendiente, y por lo tanto de difícil acceso.

El diseño de la logística de campo a seguir para la instalación de cualquier red de monitoreo, en este caso monitoreo sísmico, requiere consideraciones de la topografía. Por lo que, si se incorpora como un criterio de elección para un sitio de instalación de una estación sísmica, reduce el número de sitios disponibles, pero hace más práctico el trabajo en campo.

2.3 Sensibilidad de una red de estaciones

La sensibilidad de una red de estaciones expresa la capacidad de detección de un evento sísmico de determinada magnitud. Entre mayor sea el rango en magnitud de detección, la sensibilidad de la red es mejor. Comúnmente es más difícil detectar sismicidad de pequeña magnitud, ya que los niveles de ruido en la zona y atenuación del medio reducen tanto la amplitud que es poco probable registrarla.

Una forma de evaluar la sensibilidad de una red es generar datos sintéticos y simular los efectos de dispersión y atenuación del medio. Se calcula la amplitud registrada en cada estación y dependiendo del nivel de ruido en cada una se determina si es capaz de registrar el evento, por lo tanto, si la estación es útil para la localización. Por simplicidad se emplea el modelo de Brune (1970) para estimar la amplitud en la fuente y a partir de ella se consideran los efectos de dispersión y atenuación del medio. La razón principal de dicha simplificación es que la amplitud de las fases (P y S) dependen del patrón de radiación sísmica que a su vez está en función de su mecanismo focal. Por lo tanto, como no es posible predecir y describir con certidumbre todos los mecanismos focales posibles en una región, se simplifica el problema y se emplea un modelo de fuente sencilla, como lo es el modelo de ruptura de Brune.

2.3.1 Modelo de fuente de Brune

En 1970 James Brune introdujo un modelo de fuente cuyo espectro es parametrizado en términos de la caída de esfuerzos y las dimensiones de la falla. El modelo supone una dislocación en una falla circular debido a una caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$) simultánea en toda la falla. La onda que se propaga desde el centro de la falla hasta el receptor puede expresarse como

$$\sigma(x, t) = \sigma H\left(t - \frac{x}{\beta}\right), \quad (3)$$

donde $H(t)$ es la función Heaviside. De tal modo que el desplazamiento paralelo generado en la falla es

$$u(t) = \frac{\Delta\sigma\beta t}{\mu} \quad (4)$$

Entonces, calculado la derivada de la ecuación 4, la velocidad de la partícula \dot{u} es directamente proporcional a la caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$) y la velocidad de ondas S (β), e inversamente proporcional a la rigidez μ , tal como se muestra en la ecuación 5

$$\dot{u}(t) = \Delta\sigma(\beta/\mu) \quad (5)$$

2.4 Sismicidad inducida

Un campo geotérmico por su naturaleza tiene sismicidad asociada, la cual lo revela como un sistema dinámico. Sin embargo, cuando inician las actividades de explotación y producción del campo se puede inducir o disparar sismicidad, ya que las variaciones de presión al extraer o inyectar el fluido geotérmico, provocan cambios en las propiedades del medio, y por ende en el estado de esfuerzos.

Los sismos inducidos con magnitudes lo suficientemente grandes como para sentirlos en superficie son un resultado indeseable en la operación de un sistema geotérmico (Buijze *et al.*, 2019). Sin embargo, es importante entender cuándo y cómo ocurren, no sólo como parámetro en el riesgo y peligro sísmico, sino como método de análisis de la estructura y evolución de un campo geotérmico, con la gestión y monitoreo de posible migración de fluidos.

2.4.1 Mecanismos de la sismicidad inducida

Las operaciones en un campo geotérmico generan cambios de temperatura y presión en el medio, las cuales se traducen en cambios en el volumen y esfuerzos. Los cambios en el estado de esfuerzos se suman al preexistente esfuerzo tectónico. El esfuerzo inicial puede estar cercano a la fractura, entonces sólo se requiere un pequeño cambio para la reactivación de la falla. En la Figura 2.4, en el círculo de Mohr, la línea punteada azul representa un límite de fractura de una roca intacta, mientras que la línea punteada roja muestra el límite de fractura de fallas preexistentes. El cuadrado amarillo son todas las fallas que se encuentran críticamente orientadas y que sólo necesitan un ligero cambio de esfuerzos para reactivarse.

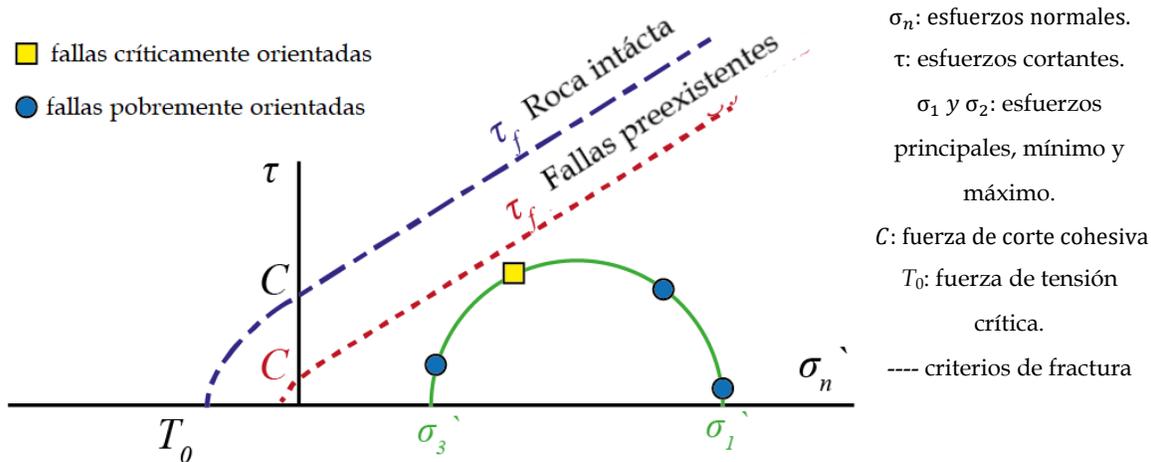


Figura 2.4. Mecanismo dominante de la sismicidad inducida. Fallas estables y críticamente orientadas. Figura modificada de Buijze, *et al.* (2019).

Los cambios en la presión de poro generados por la producción o reinyección son las perturbaciones más obvias en los sistemas geotérmicos. Un incremento en la presión en una falla, provocada por ejemplo con la inyección de fluidos, reduce el esfuerzo normal efectivo y la acerca a la fractura (Buijze *et al.*, 2019).

La presión del fluido en el poro (p) juega un papel muy importante. Terzaghi (1936) argumentó que la presión de poro contrarresta el esfuerzo aplicado y actúa como un esfuerzo de tensión y por lo tanto introduce el concepto de esfuerzo efectivo, tal como se expresa en

$$\sigma_{i,efec} = \sigma_{i,tot} - p, \quad (6)$$

donde $\sigma_{i,tot}$ es el esfuerzo total y p es la presión de poro en el fluido, el cual debe considerarse en el criterio de fractura. Visto en la representación gráfica del estado de esfuerzos, es decir el círculo de Mohr, el concepto de esfuerzo efectivo (Ecuación 6) hace que el círculo se desplace a la izquierda y se aproxime al límite de fractura, tal como se muestra en la Figura 2.5.

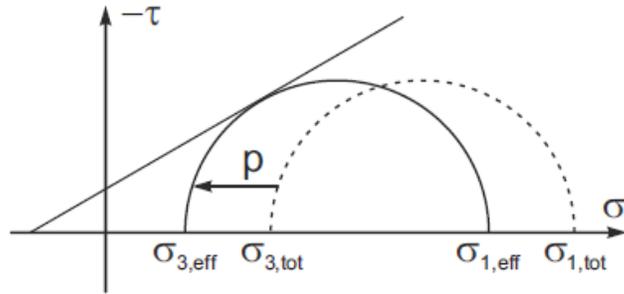


Figura 2.5. Criterio de Mohr-Coulomb con el efecto de presión de poro sobre el esfuerzo total y el criterio de fractura de Coulomb (Schoenball, 2014).

El incremento en la presión se difunde desde el pozo de inyección como una función de tiempo y espacio, incrementando la presión e induciendo sismicidad a partir de la fuente. Cuando la inyección ocurre en un material relativamente permeable y fracturado, las fracturas dominan el flujo y dirección del fluido. Lo que provoca, que la sismicidad puede continuar por un cierto tiempo aun después de terminar con la inyección, ya que en zonas relativamente alejadas la presión puede seguir aumentando (Buijze *et al.*, 2019); la distancia de propagación depende de algunos factores del medio como nivel de fracturación, permeabilidad, porosidad, etc., además de la viscosidad y temperatura del fluido inyectado.

Capítulo 3

3. Método

El estudio de optimización de la red de estaciones del campo geotérmico de Acozulco, Pue., Méx., tiene como propósito mejorar la cobertura de estaciones para el monitoreo de sismicidad inducida debida a la estimulación del pozo EAC-1. Con el objetivo de obtener información a priori se consideró el diseño de la red temporal de estaciones preexistente (PT5.2 GEMex); esta red se diseñó con el fin de reconstruir la estructura del campo usando métodos de ruido sísmico como SPAC y tomografía de ondas superficiales. En el campo se dispusieron un total de 18 sismómetros (Figura 3.1) durante el periodo de mayo de 2018 a junio de 2019, el objetivo del arreglo era estudiar características estructurales y sísmicas.

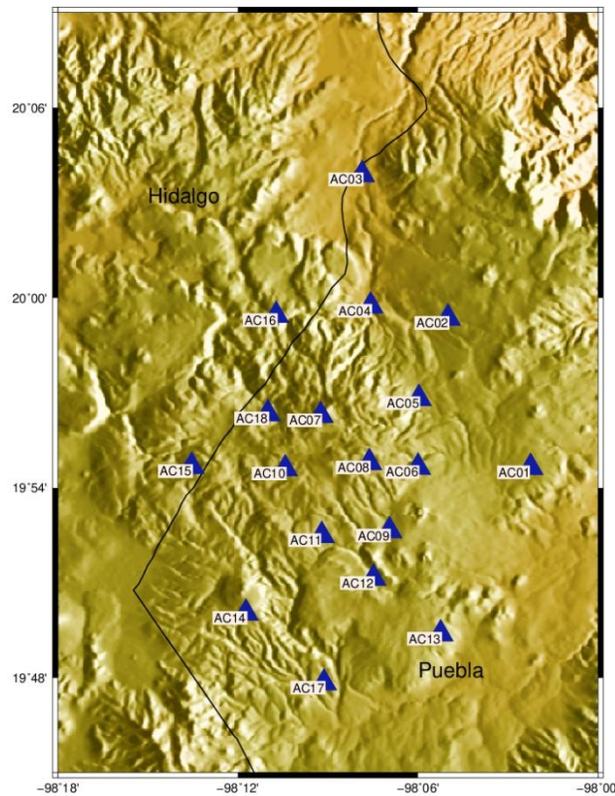


Figura 3.1. Ubicación de sismómetros (triángulos azules) en el campo geotérmico de Acozulco, Pue., Méx.

Para las estaciones de la 1 a 16 se emplearon sensores de pozo Trillium Compact de 120 s, con registradores Data Cube³, mientras que en las estaciones 17 y 18 se instalaron

registradores Reftek con sensores Trillium Compact de 120 s. Todas las estaciones contaron con controlador de carga, batería, panel solar y antena GPS, este último elemento para la precisión en el tiempo de los registros sísmicos. El tipo de instalación (Figura 3.2) fue superficial, aunque se intentó enterrar los sensores lo más posible, la dureza del suelo limitó la profundidad de la instalación a 1-1.5 m, aproximadamente. La elección de los sitios se basó en medidas de seguridad y se optó por ubicarlos en lugares como domicilios privados, clínicas, escuelas, entre otros.



Figura 3.2. Tipo de instalación de la estación AC03. La numeración indica los distintos elementos de cada una de las estaciones: 1) Cubeta con sensor de velocidad y material aislante, 2) batería y controlador de carga y 3) registrador Data Cube.

Uno de los primeros resultados del análisis de los datos de la red temporal fue el modelo tridimensional de velocidades de onda S, calculado por Maldonado-Hernández *et al.* (2019). El cálculo se realizó empleando el método de correlaciones cruzadas de ruido sísmico para la obtención de la función de Green empírica y las velocidades de ondas superficiales asociadas. Además, se realizó el cálculo de H/V (Ibarra-Bustos, 2019) y la inversión conjunta para calcular la velocidad de onda de corte en la región (Maldonado-Hernández *et al.*, 2019).

En particular, en este trabajo se emplearon los registros en un periodo de septiembre de 2018 a abril de 2019 para estimar los niveles de ruido promedio en el campo. La elección del periodo se basó en contemplar las variaciones de temperatura generadas por el cambio de día-noche y estacional.

Como información a priori se utilizan los niveles de ruido, el modelo de velocidades de onda de corte 3D (Maldonado-Hernández *et al.*, 2019) y su caso particular en 1D calculado como el promedio de las velocidades en cada capa. Se tomó como referencia el área cubierta por el experimento desarrollado por Maldonado-Hernández *et al.* (2019) y se construyó una lista inicial de estaciones dispuestas en un área similar, pero con mayor densidad de estaciones. La elección de sitios disponibles es criterio de la persona que diseña el arreglo. Sin embargo, el algoritmo determina el conjunto de estaciones que mejor logra detectar y localizar la sismicidad.

Utilizando información geológica y la delimitación de un área donde se espera generar o encontrar sismicidad, según sea el objetivo de estudio, se establece la localización de un conjunto de hipocentros para los cuales se tiene interés en monitorear, y las coordenadas de estaciones de una red inicial, ésta puede conformarse por estaciones fijas o hipotéticas. En este caso el objetivo fue monitorear la posible sismicidad asociada a la estimulación del pozo EAC-01, por lo tanto, el hipocentro se supone a una profundidad de 2 km en la ubicación del pozo.

Posteriormente, utilizando las coordenadas de los hipocentros objetivo y la red inicial, que puede estar compuesta por estaciones instaladas, sitios supuestos o una combinación de ambas; se aplica el criterio de optimización D y el resultado es un listado de configuraciones que aseguran la detección y bajo error en la localización de cada hipocentro de interés.

A partir del listado de configuraciones resultante de la optimización, se realiza una última elección basada en características topográficas y su gradiente; esta etapa tiene como objetivo hacer más práctico y fácil el trabajo en campo durante la instalación de los sensores. Por último, se realiza una prueba de sensibilidad de la red e identifica el rango de magnitudes posibles de registrar. En la Figura 3.3 se muestra el esquema general del proceso empleado en este trabajo.

En las siguientes secciones se describe con mayor detalle cada uno de los procesos realizados.

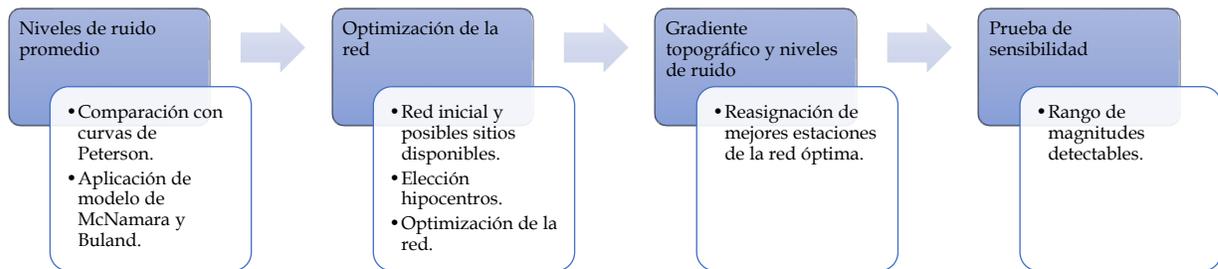


Figura 3.3. Esquema general de trabajo.

3.1 Niveles de ruido

El cálculo de los niveles de ruido promedio para cada una de las estaciones tiene como objetivo generar mapas y partir de una interpolación sea posible suponer un valor más apegado a la realidad de los niveles de ruido en cualquier punto del campo de Acoculco, Pue., Méx.

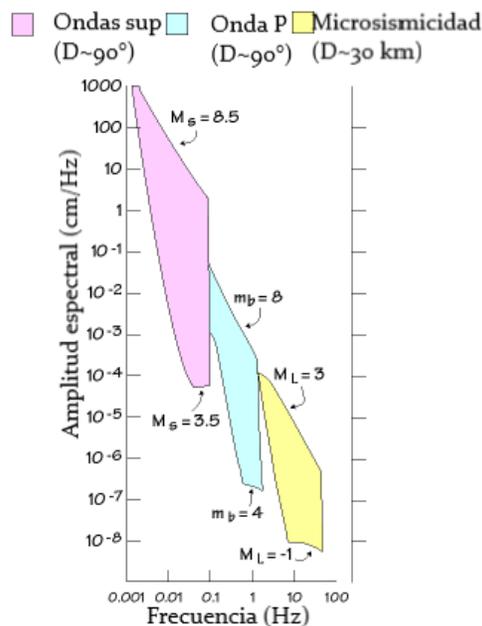


Figura 3.4. Rango de amplitud espectral de ondas superficiales, onda P y microsismicidad en función de la frecuencia; además de las magnitudes mínimas y máximas asociadas a cada tipo de señal. Figura modificada de Ammod (2010).

Para cada una de las estaciones se estiman las curvas de ruido siguiendo el método de McNamara y Buland (2004), cuyas bases se definen el trabajo de Peterson (1993). Posteriormente, teniendo en cuenta el ancho de banda de los sensores, se utiliza el valor medio de las curvas en cuatro rangos de periodos, 0.025-0.1 s, 0.1-1 s, 1-10 s y 10-120 s; siendo los de mayor interés 0.025-0.1 s y 0.1-1 s, ya que se asocian con el rango de frecuencias donde se registra la microsismicidad (Figura 3.4), como la sismicidad inducida en un campo geotérmico. En la Figura 3.5 se muestra el proceso para estimar los niveles de ruido por estación.

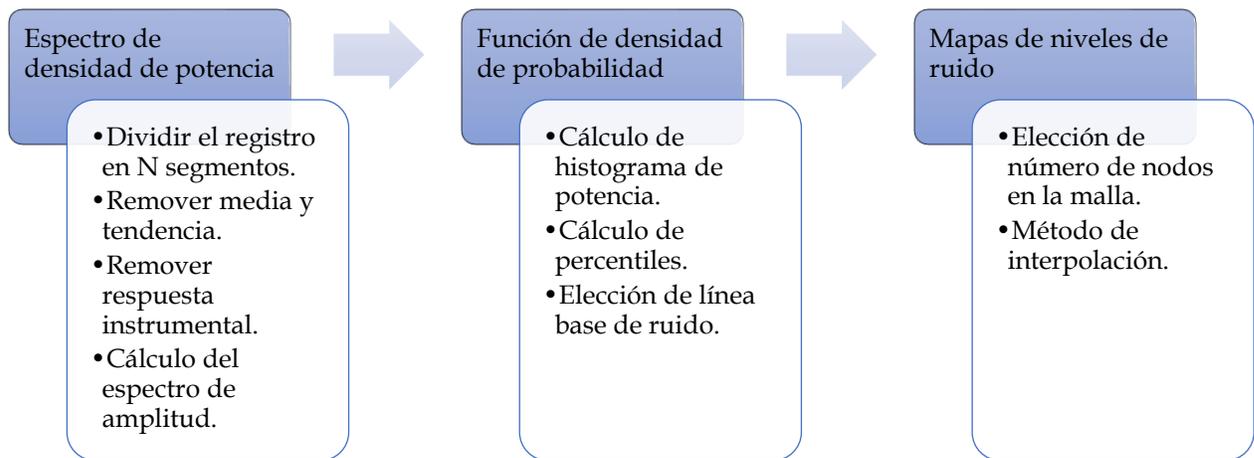


Figura 3.5. Proceso en el análisis de los niveles de ruido en el campo geotérmico de Acoculco, Pue., Méx.

3.1.1 Cálculo de niveles de ruido por estación

Las líneas base de los niveles de ruido por cada componente de una estación son determinadas con el cálculo de las curvas correspondientes a distintos percentiles de la función de densidad de probabilidad de los espectros de densidad de potencia. Aunque para este trabajo se considera como línea base el percentil 50. De tal modo que el procedimiento general seguido en este trabajo consta de dos pasos: 1) calcular el espectro de densidad de potencia y 2) estimar la función de densidad de probabilidad para un conjunto de espectros.

3.1.1.1 Cálculo del espectro de densidad de potencia

El primer paso es calcular los espectros de densidad de potencia (PSD, por sus siglas en inglés) de un registro cuya duración puede ser horas, días, meses o años. En primera

instancia el registro se divide en N segmentos, en el trabajo de McNamara *et al.* (2009) utilizan 13 subsegmentos, con una cantidad de muestras variable por ventana dependiendo del muestreo por estación, para el caso de las estaciones de Acoculco se emplean ventanas de 60 s. A cada segmento se le aplica lo siguiente: 1) remover la media, 2) remover la tendencia, 3) emplear un filtro tipo coseno con 10% en la banda de transición, 4) transformar al dominio de las frecuencias con la transformada de Fourier, 5) retirar la respuesta instrumental, es decir, dividir entre la función de transferencia del instrumento, 6) convertir el registro a aceleración, 7) obtener el espectro de amplitud y 8) elevar al cuadrado el espectro de amplitud para obtener el espectro de potencia.

El espectro de densidad de potencia se define como

$$P_a = \frac{2\Delta t}{N} |Y_a|^2, \quad (7)$$

donde Δt es el intervalo de muestreo en el tiempo, N el número de muestras y Y_a el espectro de amplitud de aceleración. La ecuación 7 muestra que el espectro de densidad de potencia es simplemente el cuadrado del espectro de amplitud de aceleración multiplicado por un factor de normalización $\frac{2\Delta t}{N}$ (McNamara y Buland, 2004).

Por otra parte, los niveles de ruido son determinados como

$$\text{Nivel de ruido} = 10 \log[P_a(\omega)/(m/s^2)^2/Hz], \quad (8)$$

donde P_a representa el espectro de densidad de potencia de aceleración (Havskov y Ottemöller, 2010).

3.1.1.2 Cálculo de la función de distribución de probabilidad

Para estimar la variación de ruido en una estación se calculan las funciones de densidad de probabilidad (PDF, por sus siglas en inglés) para cada periodo. Sin embargo, con el objetivo de reducir el número de operaciones, el trabajo de McNamara y Buland (2004) realizan un muestreo de las PSD y toman promedios de cada 1/8 de intervalo, con esto se reduce el número de frecuencias y se gana eficiencia computacional. Este proceso es repetido para todas las PSD del intervalo de estudio. Lo que resulta en una gran cantidad de curvas, a partir de las cuales se construye una PDF empírica, realizando una normalización de las curvas en cada periodo por el número total de segmentos que

contribuyen en cada uno. Es decir, se obtiene un histograma para cada periodo, en la Figura 2.3 se muestra un ejemplo de un histograma de potencia para cuatro periodos diferentes.

Posteriormente, para cada histograma de potencia se calculan sus percentiles, que en este caso fueron los percentiles 10, 50 y 90. De tal modo que a partir de cada percentil para cada periodo es posible construir una línea base de ruido de la estación.

3.1.2 Cálculo de los mapas de niveles de ruido

Como se mencionó al inicio de esta sección, el cálculo de los mapas de niveles de ruido para cada componente de cada estación en distintos rangos de periodos se realizó utilizando como línea base el percentil 50 de las funciones de densidad de probabilidad de los espectros de densidad de potencia. Por lo que se asocia un valor promedio del percentil 50 para diferentes intervalos de periodos de interés y se utiliza un método de interpolación, para realizar la gráfica de la distribución espacial de los niveles de ruido en el área donde se disponen las estaciones de Acoculco, Pue.

3.2 Optimización de la red

La optimización de una red sísmica puede emplear un conjunto de estaciones existente y un número determinado de nuevos sitios propuestos para ser agregados, o bien, una red de estaciones compuesta sólo por nuevos sitios. La función objetivo de la optimización, en este caso, es reducir el error en la estimación de los parámetros de localización de un sismo.

El método utilizado en este trabajo es una optimización de la técnica propuesta por Tramelli *et al.* (2013), el cual emplea la aproximación lineal del problema de localización, para solucionar el problema inverso se emplean mínimos cuadrados, técnica que busca minimizar el error entre datos observados y estimados. Como no se cuenta con datos observados reales, es necesario generar datos sintéticos para cada una de las estaciones que compongan la red inicial, tanto instaladas como propuestas, dado un hipocentro.

Una vez identificadas las estaciones capaces de registrar el evento, se procede a aplicar el criterio de optimización que se basa en la reducción del volumen del elipsoide de error y aplicar un criterio que permita discernir entre las estaciones que deben ser agregadas u

omitidas de la red propuesta. El procedimiento se muestra en la Figura 3.6, sin embargo, en las siguientes secciones se detalla cada una de las etapas.

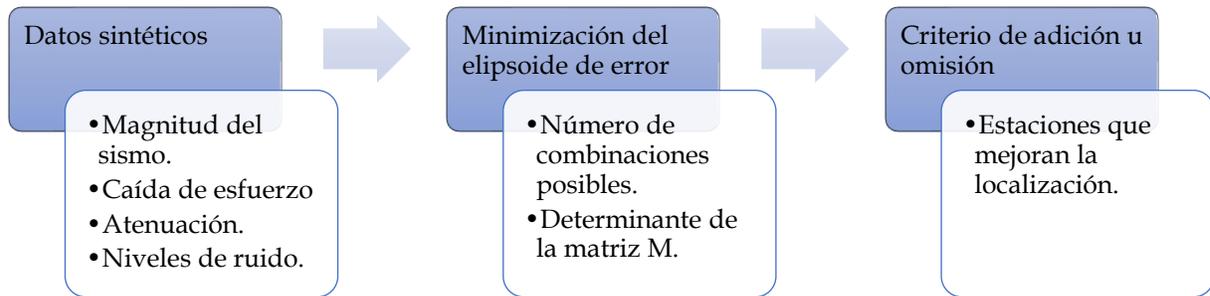


Figura 3.6. Proceso en la optimización de la red de estaciones. El algoritmo considera el conocimiento de información a priori como algunos parámetros sísmicos de la región y una preselección de sitios disponibles.

3.2.1 Generación de datos sintéticos

La generación de datos sintéticos tiene como objetivo construir un catálogo de datos sintéticos para cada una de las estaciones. Posteriormente a partir de la relación señal-ruido, la cual depende de la magnitud del evento, distancia fuente-receptor y características del medio como dispersión, atenuación y niveles de ruido, se determina el conjunto de estaciones que son capaces de detectar el evento. Sólo éstas son consideradas en la localización del evento, a partir de ellas se generan un conjunto de combinaciones para las cuales se calcula la matriz de información M y se conservan aquellas que mejoren la localización y reduzcan el elipsoide de error. La amplitud de la señal es calculada a partir de la amplitud de la fuente y su modificación por la propagación elástica y atenuación anelástica a lo largo de la trayectoria del rayo desde la fuente al receptor (Tramelli *et al.*, 2013).

Se considera el modelo de ruptura de Brune (1970), cuyo espectro es parametrizado en términos de la caída de esfuerzos y las dimensiones de la falla. La amplitud de la onda en la fuente es simulada en términos del modelo espectral de una frecuencia de esquina (Boatwright *et al.*, 1991) como un triángulo con área A proporcional al momento sísmico M_0 y con base proporcional a la caída de esfuerzos (Brune, 1970). A partir de la magnitud de momento (M_w) propuesta por el usuario se estima el momento sísmico (M_0) asociado, como

$$M_0 = 16.05 + 1.5M_w. \quad (9)$$

Empleando el concepto de Brune se calcula la base de la función de fuente, como la frecuencia de esquina (Ω_0) y la amplitud en la fuente del pulso como

$$A_f = \left(\frac{7 M_0}{16 \Delta\sigma} \right)^{1/3}. \quad (10)$$

A partir de la amplitud se calcula el tiempo de ruptura, con el cual es posible estimar la amplitud máxima en velocidad del impulso generado en la fuente.

El pulso se propaga en un medio elástico con atenuación anelástica Q desde la fuente al receptor. Primero se supone un modelo de velocidades 1D a tres capas (Figura 3.7.d), el cual se estimó como un promedio del modelo tridimensional. Posteriormente se emplea un medio complejo, cuya distribución de velocidades está dada por el modelo 3D reportado por Maldonado-Hernández *et al.* (2019) (Figura 3.7, incisos a, b y c). Existe gran diferencia entre los modelos de velocidad, unidimensional y tridimensional. En los distintos cortes del modelo 3D se observa que la variación de velocidad toma valores entre 2 y $4 \frac{\text{km}}{\text{s}}$, mientras que el modelo unidimensional considera valores entre 1.7 y $2.7 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Además, el cálculo de los tiempos de viaje y posterior construcción de la matriz de información \mathbf{M} difieren sustancialmente al emplear un modelo u otro; por lo tanto, la disposición de las estaciones en la optimización de la red se ve afectada.

En la Tabla 3.1 se resumen los parámetros empleados en este trabajo y las fuentes consideradas. Debido a que aún no se cuenta con catálogos de sismicidad, el valor de la caída de esfuerzo se toma del rango reportado por Lengliné *et al.* (2014), de acuerdo con el análisis de variación de esfuerzos en el campo geotérmico Soultz (Francia) durante la estimulación de un pozo. En este caso se opta por emplear el valor de $\Delta\sigma = 5$ bar. Por otra parte, el factor de calidad se desconoce para el campo geotérmico de Acoculco, Pue., de tal modo que se elige trabajar con un valor de $Q = 90$. Este valor se asocia a un factor de calidad promedio típico para terrenos blandos y en el rango de frecuencia considerado (0.025-1 s). Es importante mencionar que la elección de valores como la caída de esfuerzos y factor de calidad, se basó en el análisis de trabajos realizados en campos con ciertas similitudes geológicas y composicionales con Acoculco; sin embargo, también se realizaron pruebas y se acordaron los mínimos valores que aseguren la detección de los eventos.

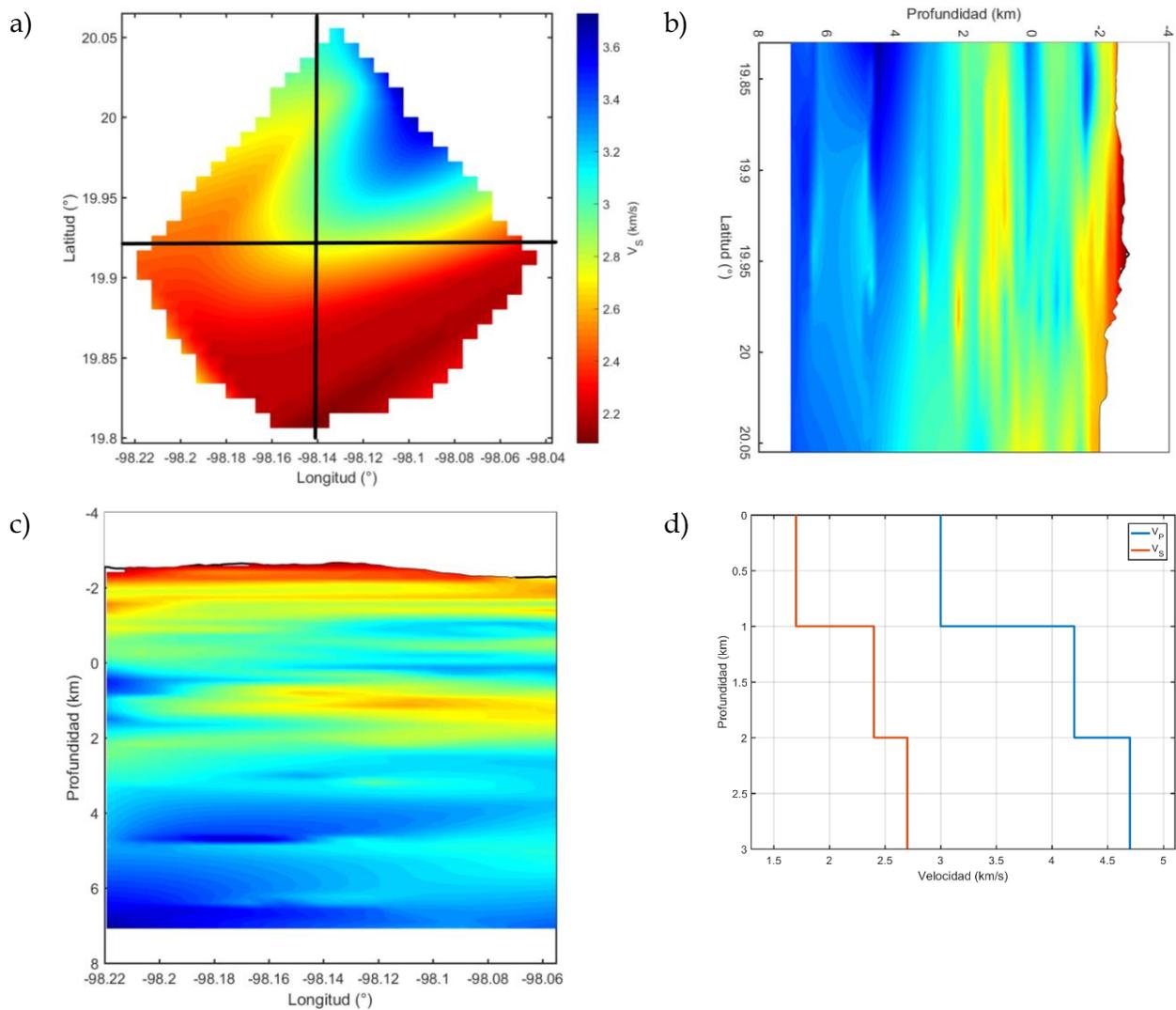


Figura 3.7 Modelo de velocidades de onda de corte. a) Corte horizontal a 2 km de profundidad del modelo 3D. b) Sección Norte-Sur del modelo 3D. c) Sección Este-Oeste del modelo 3D. d) Modelo de velocidad promedio 1D para las fases P y S (Modificado de Maldonado-Hernández *et al.*, 2019).

Tabla 3.1. Parámetros considerados en el cálculo de datos sintéticos.

Parámetro	Autor	Valor
Velocidad de ondas de corte V_S	Maldonado-Hernández <i>et al.</i> (2019)	$1.7 \frac{\text{km}}{\text{s}}$
Densidad (ρ)	López-Hernández (2009)	$2.4 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Caída de esfuerzos ($\Delta\sigma$)	Lengliné <i>et al.</i> (2014)	0.1 – 30 bar
Factor de calidad (Q)	GEMex (2019)	90

3.2.2 Criterio D

El concepto de optimización debe ser plasmado en términos matemáticos mediante una función objetivo, ésta a su vez requiere estar relacionada con parámetros sísmicos útiles. Como el objetivo de una red de monitoreo sísmico es detectar toda la sismicidad y localizarla, entonces los parámetros útiles son las coordenadas hipocentrales de eventos sísmicos.

El método de localización linealizado usualmente es utilizado, ya que el problema inverso puede ser resuelto con mínimos cuadrados, o alguna de sus variantes. La función objetivo a minimizar es

$$\delta t = t_{obs} - t_{est} \approx \sum_j \left. \frac{\delta t}{\delta m_j} \right|_{m_0} \delta m_j, \quad (11)$$

donde δ_{obs} y δ_{est} , son los tiempos observados y estimados, respectivamente. Además, la $\frac{\delta t}{\delta m_j}$ representa las derivadas parciales de los tiempos de viaje con respecto a los parámetros $m(x, y, z)$, por lo que a partir de éstas se representa el kernel de inversión o matriz A . En este trabajo se construyó la matriz A utilizando dos desarrollos descritos a continuación:

El primer desarrollo utiliza un modelo de velocidades 1D con N capas horizontales, a partir de éste se calcula el mínimo tiempo de viaje desde el hipocentro a cada una de las estaciones, considerando un medio homogéneo y $N - 1$ capas sobre un semiespacio. La búsqueda del mínimo tiempo de viaje se realiza utilizando el concepto de parámetro de rayo.

Sea el tiempo de arribo $T(\Delta)$, en función de la distancia Δ . El parámetro de rayo se estima midiendo la pendiente de la recta tangente en cada punto de la trayectoria de rayo, por lo que puede ser expresado como

$$p_i = \frac{dT}{d\Delta}. \quad (12)$$

Partiendo de este hecho, y de la representación $p = \frac{\text{sen}(i)}{C}$, donde i es el ángulo de incidencia y C es la velocidad de la onda sísmica. Se calculan las distancias recorridas por el rayo en cada una de las capas. Posteriormente se multiplica por la lentitud (S) y se estiman los tiempos para esa trayectoria, conservando sólo los tiempos mínimos. De esta manera se obtienen las derivadas parciales $\frac{dT}{dR}$, que representan los cambios en los tiempos de viaje con

respecto a la distancia; mismas que son utilizadas para la construcción de las derivadas parciales de los tiempos de viaje con respecto a cada uno de los parámetros (x, y, z).

El segundo desarrollo es construir la matriz A utilizando un modelo de velocidades 3D y a su vez éste tiene dos opciones de cálculo. La primera opción es emplear el algoritmo propuesto por Lomax *et al.* (2000), el cual utiliza un esquema de diferencias finitas y se basa en una aproximación del frente de onda completo (Tramelli *et al.*, 2013). La segunda opción, y la utilizada en este proyecto, es proporcionar el modelo de velocidades y realizar su lectura dentro del mismo código de optimización y calcular tiempos de viaje y derivadas parciales. Con fines de reducir el trabajo computacional se emplearon un conjunto de subrutinas extraídas del algoritmo de inversión Simul200 (Thurber, 1993; Eberhart-Phillips, 1993; Thurber y Eberhart-Phillips, 1999), el cual se basa en el método de *pseudo-bending* que es una forma de realizar el trazado de rayos empleando el método de flexión; es decir, cada segmento recto del rayo es dividido en dos de manera iterativa, hasta que se logra obtener el rayo curvo que describa una aproximación de la trayectoria del rayo sísmico desde la fuente al receptor.

La lista inicial de estaciones propuestas se consideró como una malla regular de dimensiones 20×28 km y un espaciamiento entre nodos de 0.5 km. Utilizando los tiempos de viaje calculados se construyen las derivadas parciales de los tiempos de viaje con respecto a cada uno de los parámetros con un esquema de diferencias finitas.

El código considera la dispersión geométrica $\frac{1}{R}$ como una ponderación que toma en cuenta la distancia R entre fuente-receptor. Este valor depende de las dimensiones del arreglo que se considera y varía para cada uno de los diseños. En este caso se emplea un factor de peso para la distancia de 10 a 15 km, el cual se encuentra dentro de las dimensiones de la malla propuesta.

3.2.2.1 Número de combinaciones de las estaciones

El cálculo de las derivadas parciales de los tiempos de viaje con respecto a las variables de localización se realiza para cada uno de los arreglos. Sin embargo, al hablar de una optimización es necesario considerar L combinaciones posibles, tal como

$$L = \frac{N!}{M!(N - M)!}, \quad (13)$$

donde M es el número de estaciones y N el número de sitios disponibles. Además, es necesario considerar el cambio entre combinaciones, con el objetivo de elegir la mejor y reducir el error en la estimación de los parámetros de localización.

Con el método Monte Carlo (MC) se generaron L listas de estaciones o combinaciones, cada combinación está compuesta por M estaciones identificadas por un número y su ubicación correspondiente; es decir, las combinaciones de estaciones son generadas con un criterio de elección aleatorio de acuerdo con el número de sitios iniciales (red propuesta) y de la red final requerida. Para cada una de las configuraciones se determina la capacidad de detección de cada una de las estaciones, con el objetivo de conservar sólo la ubicación de las estaciones capaces de registrar el evento; posteriormente se calcula el determinante de la matriz y el criterio de adición u omisión de una estación a la red.

El algoritmo permite suponer o no una red instalada existente. Para fines de este proyecto, se consideró una red inicial inexistente, es decir una red no instalada, dicha red está compuesta por 2378 sitios distribuidos en una malla regular en un área de 20 x 28 km; y con 18 sensores disponibles para la instalación. En el caso de una red inicial inexistente, el algoritmo tiene mayor grado de libertad en la elección y configuración de los sitios posibles, ya que todos los sensores disponibles serán ubicados en los sitios que mejoren la localización de la sismicidad y maximice el poder de resolución de la red. Sin embargo, en el caso de considerar una red de estaciones existente (estaciones instaladas) y adicionar estaciones con el objetivo de mejorar la cobertura, las estaciones existentes serán consideradas por el algoritmo como fijas y las estaciones a agregar serán distribuidas en sitios que mejoren la resolución pero que probablemente no la maximicen; ya que se restringe la libertad de elección de los sitios que podrían maximizar la resolución de la red.

3.2.2.2 Minimización del volumen del elipsoide de error

La optimización de una red de estaciones se realiza minimizando una función objetivo, que en este caso está relacionado con los errores en la estimación de los parámetros de localización. La matriz de covarianza es buen estimador del nivel de error en la

localización, se asume que depende solamente de los errores en la identificación de las fases, la localización hipocentral y la configuración de la red sísmica (Tramelli *et al.*, 2013).

La matriz de covarianza se define como

$$\mathbf{C} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1}, \quad (14)$$

donde \mathbf{A} es el kernel de inversión y contiene las derivadas parciales de los tiempos de viaje con respecto a cada uno de los parámetros, de tal modo que el número de filas es igual al número de tiempos de arribo y las columnas, al número de parámetros (x, y, z, t) .

Considerando el criterio de optimización de Rabinowitz y Steinberg (2000) se busca una configuración que maximice el $\det(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ y por lo tanto minimice el volumen del elipsoide de error

$$V \approx \det(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1/2}, \quad (15)$$

donde \mathbf{A} es la matriz de información compuesta por las derivadas parciales de los tiempos de viaje con respecto a cada parámetro y \mathbf{A}^T es su transpuesta.

Para cada una de las configuraciones se calcula el $\det(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ y se conserva sólo aquella que maximiza el valor del determinante. Posteriormente se prueba con una nueva configuración al mismo tiempo que se evalúa la calidad de detección de cada estación, valor que se emplea como criterio de adición u omisión para la nueva configuración.

El algoritmo utiliza dos ciclos importantes, el primero está relacionado con el cambio en la configuración y la elección aleatoria de estaciones para cada una de ellas. Mientras que el segundo se relaciona con el número de veces que se calcula el determinante $\det(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ y se busca aquella configuración que lo maximice. Por lo tanto, es importante utilizar un número de ciclos grande para probar varias combinaciones y cambios de estaciones.

3.2.2.3 Criterio de adición u omisión de una estación

El criterio de optimización puede asumir o no la existencia de una red instalada y agregar aquellas estaciones que mejoren la localización, empleando el teorema de equivalencia de Kiefer y Wolfowitz (1961) y el algoritmo desarrollado por Rabinowitz y

Steinberg (1990) (DETMAX). En el primero se demuestra que la derivada de Fréchet de $\det(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ es proporcional a $\mathbf{v} = \mathbf{f}^T (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{f}$, donde \mathbf{f} es el vector de derivadas parciales de los tiempos de arriba con respecto a cada uno de los parámetros. El segundo es un algoritmo que genera combinaciones aleatorias de estaciones y de manera iterativa calcula el valor de $\det(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ para cada una de ellas, arrojando como resultado las configuraciones que maximicen el valor del determinante y por lo tanto tenga un mínimo volumen del elipsoide de error de localización.

Posteriormente se toman de una lista finita de estaciones todos los sitios y estaciones disponibles, se calcula la derivada de Fréchet y se agrega la estación con mayor valor de \mathbf{v} , de tal forma que se mejora la calidad de la red empleada. En el caso donde no se cuenta con un número de estaciones instaladas, el algoritmo prueba cada combinación generada en cada iteración, emplea el mismo criterio de adición y detiene el proceso hasta que el determinante pare de decrecer al agregar u omitir estaciones.

3.3 Gradiente topográfico

En la práctica, la instalación de cualquier instrumento de monitoreo puede complicarse debido a la topografía. Instalar un instrumento en una pendiente pronunciada puede resultar en muchas ocasiones imposible e implica modificaciones en la logística de campo.

En este trabajo la adición del gradiente topográfico como parámetro de optimización se emplea como un valor de ponderación que ayuda a elegir la mejor configuración entre un conjunto de arreglos con valor de $\det(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ similar. Por lo tanto, en función de la pendiente del terreno se elige la configuración de estaciones que cumple con maximizar el valor de $\det(\mathbf{A}^T \mathbf{A})$ y suponga un gradiente mínimo o moderado. De manera similar, es posible considerar tantos parámetros de ponderación como se requieran como, topografía, costos, efectos de sitio, etc., dejando a consideración del usuario la elección de la red que permita localizar la sismicidad de interés.

El gradiente topográfico total fue estimado a partir de la ecuación 2 y del modelo digital de elevaciones con una resolución de 60 m, obtenido del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Con el objetivo de asignar un valor de gradiente topográfico

representativo del área circundante a cada una de las configuraciones se considera lo siguiente: 1) el promedio del conjunto de valores de gradiente total en un radio de tres veces la resolución de la malla de datos de altitud; es decir, 180 m para cada una de las estaciones, lo que da un total de aproximadamente 36 valores de altitud por estación; y 2) el promedio de los valores de gradiente total topográfico de las estaciones que componen cada configuración. Este valor se utilizó como factor de peso en la elección de la mejor configuración de estaciones.

3.4 Sensibilidad de la red

Una vez conocido el arreglo óptimo de estaciones es necesario evaluar la sensibilidad de la red. Para ello se utiliza el algoritmo SENSI desarrollado por Tramelli *et al.* (2015), éste se basa en el principio de determinar el número de estaciones que registran un sismo, y con ello establecer la magnitud mínima de un sismo que es capaz de detectar. Esta magnitud mínima depende del ruido sísmico del sitio y de la distancia fuente-receptor.

La amplitud de la señal sísmica en el registro de la estación es calculada como la amplitud de la fase P utilizando la aproximación del modelo de ruptura de Brune para un punto fuente con determinada magnitud, caída de esfuerzos y parámetros elásticos del medio. Para cada punto de una malla, el programa busca cuál es la magnitud mínima de un sismo para que la estación detecte la señal (Tramelli *et al.*, 2015).

La amplitud teórica se simula con la frecuencia de esquina del modelo espectral como un triángulo con área y base proporcionales al momento sísmico y caída de esfuerzos, respectivamente. Para el primer pulso P, su amplitud se evalúa como

$$A = \frac{\Omega}{T_r^2}, \quad (16)$$

donde Ω es el nivel inferior de la frecuencia espectral y T_r es el tiempo de ruptura. Del mismo modo, Ω se calcula como

$$\Omega = \frac{R_\theta M_0}{2\pi R \rho \alpha^3}, \quad (17)$$

para el cual M_0 es el momento sísmico, R es la distancia fuente-receptor, α es la velocidad promedio de la onda P, ρ es la densidad del medio y R_θ es el patrón de radiación. R_θ es

considerado como 0.52 para las ondas P y la velocidad se calcula como $\alpha = 1.73 * \beta$. El tiempo de ruptura se calcula a partir de la amplitud en la fuente entre la velocidad de ruptura, es decir, $T_r = \frac{A_f}{V_r} = \frac{A_f}{0.9 * \beta}$. De tal modo que la amplitud en la fuente A_f se calcula como

$$A_f = \sqrt[3]{\frac{7 M_0}{16 \Delta\sigma}}, \quad (18)$$

donde $\Delta\sigma$ es la caída de esfuerzos que, según la literatura, puede tomar valores entre 10 y 100 bares, dependiendo de las características tectónicas, y la distribución de esfuerzos (Tramelli *et al.*, 2015).

Capítulo 4

4. Resultados

4.1 Niveles de ruido

La estimación de las curvas de ruido se realizó empleando el registro continuo de las 18 estaciones dispuestas en el campo geotérmico de Acoculco, Pue. Méx.; se consideró un total de 246 días, comprendidos entre el mes de septiembre de 2018 a abril de 2019. El criterio con el que se eligió el periodo de tiempo fue lograr observar las variaciones de amplitud generadas por cambios en temperatura, debido a variaciones diurnas y diferentes estaciones del año.

En la Figura 4.1 se muestran las funciones de densidad de probabilidad de los espectros de densidad de potencia de las estaciones AC04, AC17, AC01, AC15 y AC08; localizadas en las zonas norte, sur, este, oeste y centro, respectivamente. De manera general se puede ver cómo el percentil 50 (línea negra) tiene un buen comportamiento, manteniéndose en los límites establecidos por las curvas de Peterson. Sin embargo, para la estación AC17, que se encuentra en la parte sur, los niveles de ruido son más elevados, rasgo que es predominante en los mapas de niveles de ruido generados. Por otra parte, los niveles mínimo y máximo (curvas roja y verde) del conjunto se separan del rango de la función de distribución de probabilidad y de las curvas de Peterson, aunque el nivel mínimo siempre se mantiene acotado.

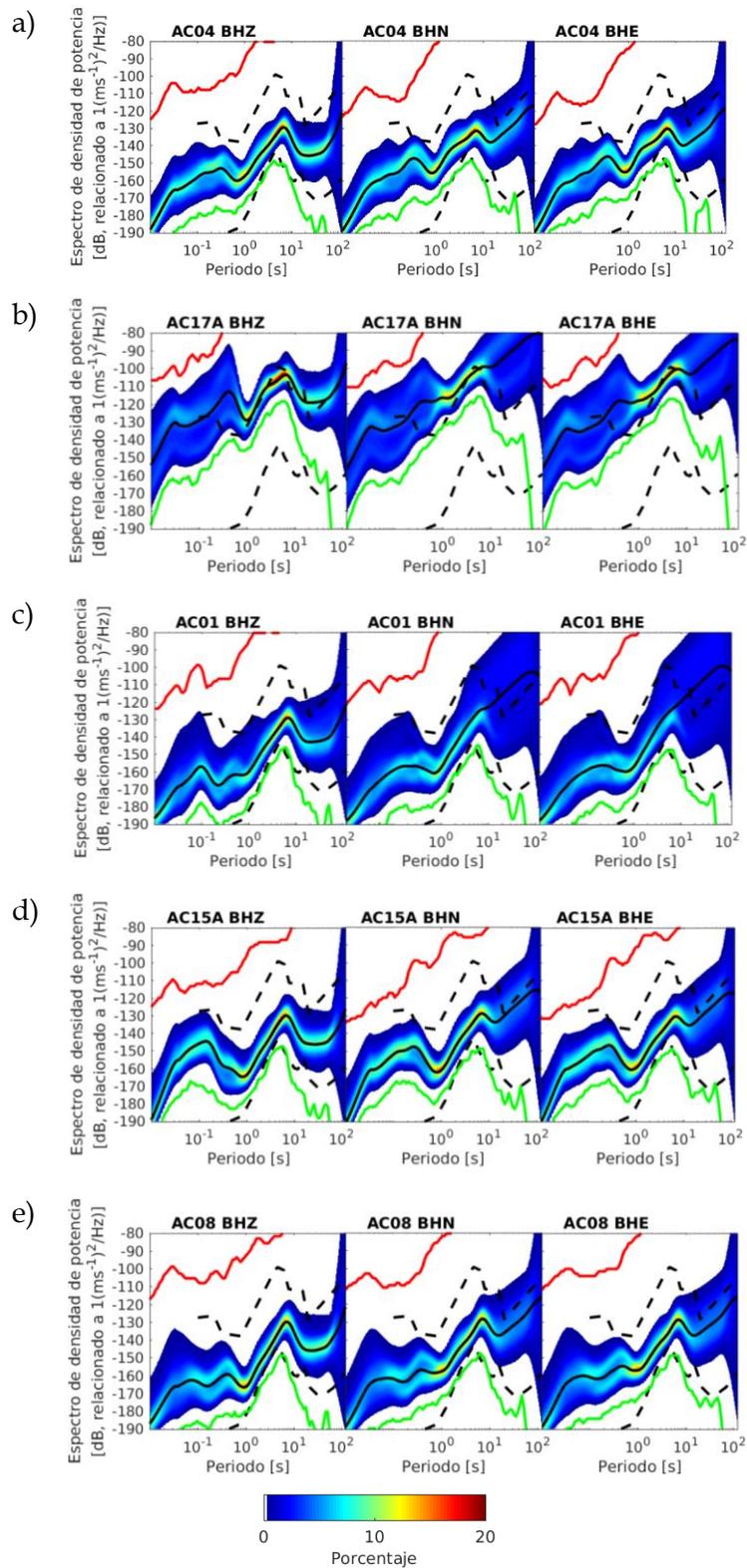


Figura 4.1. Funciones de densidad de probabilidad de los niveles de ruido en el campo geotérmico de Acoculco, Pue., Méx. La línea negra, roja y verde, representan el percentil 50, nivel máximo y mínimo, respectivamente. Curvas calculadas para estaciones en distintas regiones, a) norte, b) sur, c) este, d) oeste y e) centro.

La Figura 4.2 muestra las curvas de ruido para cada componente de las 18 estaciones en $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$. El comportamiento general muestra que los niveles se acotan a los niveles mínimo y máximo establecidos por Peterson. No obstante, las curvas correspondientes a las estaciones AC17 y AC18 muestran niveles de ruido ligeramente más elevados; causado probablemente por la cercanía de las estaciones con las viviendas y una posible instalación somera de las estaciones debida a la dureza del suelo.

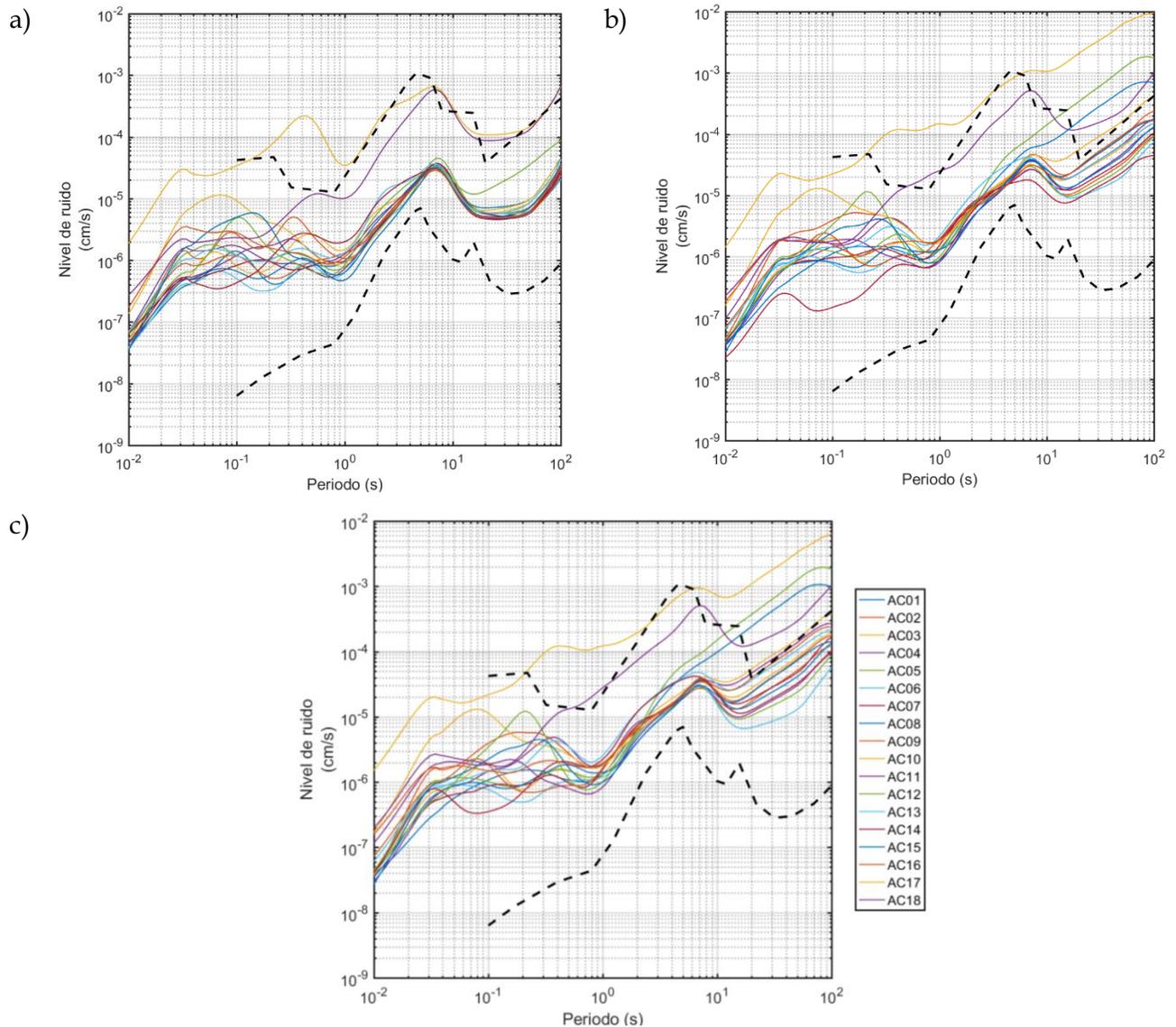


Figura 4.2. Comparación de los percentiles 50 de niveles de ruido de las 18 estaciones ubicadas en el campo geotérmico de Aocolco, Pue. Méx. con las curvas estimadas por Peterson (líneas discontinuas). a) Componente vertical, b) componente norte y c) componente este.

Por otra parte, las componentes horizontales a altas frecuencias (1 – 80 Hz) muestran mayores variaciones en la curva de nivel de ruido generadas principalmente por las

actividades antropogénicas, éstas pueden afectar el análisis realizado en este trabajo, ya que el rango de frecuencias a considerar es entre 10 y 40 Hz. Sin embargo, de manera general las curvas de ruido se acotan bien a los límites establecidos por las curvas de Peterson y son considerados como óptimos.

En la Figura 4.3 se muestra el mapa de nivel de ruido promedio para frecuencias entre 10 y 40 Hz (0.025-0.1 s) de las componentes vertical, norte y este; rango de frecuencias en el cual se registran sismos de pequeña magnitud ($M < 2$). Este rango de periodos es importante para este proyecto, dado que la sismicidad inducida en un campo geotérmico genera sismos con energía que se propaga en mayoría con frecuencias entre 10 y 40 Hz. Los mapas de niveles de ruido en dB denotan con mayor facilidad las variaciones del ruido, ya que el cálculo involucra un log por lo tanto las variaciones más pequeñas son enfatizadas.

A partir de los valores promedio del percentil 50 para distintos rangos de periodo, en específico entre 10 y 40 Hz, se realizó una interpolación de la información disponible para estimar niveles de ruido en sitios donde se desconoce, pero es factible instalar un sensor. Esta operación tiene importancia distinta en función de rango de frecuencia considerada debido a que las fuentes de ruido de más alta frecuencia se asocian a afectos más locales con respecto a las fuentes de ruido de frecuencia menor. De forma general, los mapas destacan que las componentes horizontales son más ruidosas e ilustran que las estaciones que tienen mayor aporte de ruido son las AC17 y AC18, que justo se ubican en los rasgos de la zona sur y oeste, respectivamente.

Con respecto a la relación del nivel de ruido con la topografía, no se observa una correlación directa, a excepción de que las regiones de alto ruido se encuentran débilmente correlacionadas con bajos topográficos. No obstante, esto no debe asumirse como una característica del medio, ya que es común que las poblaciones se establezcan en zonas con topografía más suave, es decir, regiones de valle, donde los sedimentos son más blandos y, por lo tanto, el suelo es menos competente.

Por último, es importante mencionar que los algoritmos de optimización y sensibilidad de la red utilizan los niveles de ruido en $\frac{cm}{s}$; además que en este trabajo sólo se utiliza la información de la componente vertical, ya que se requiere garantizar la detección del primer arribo para la localización del evento.

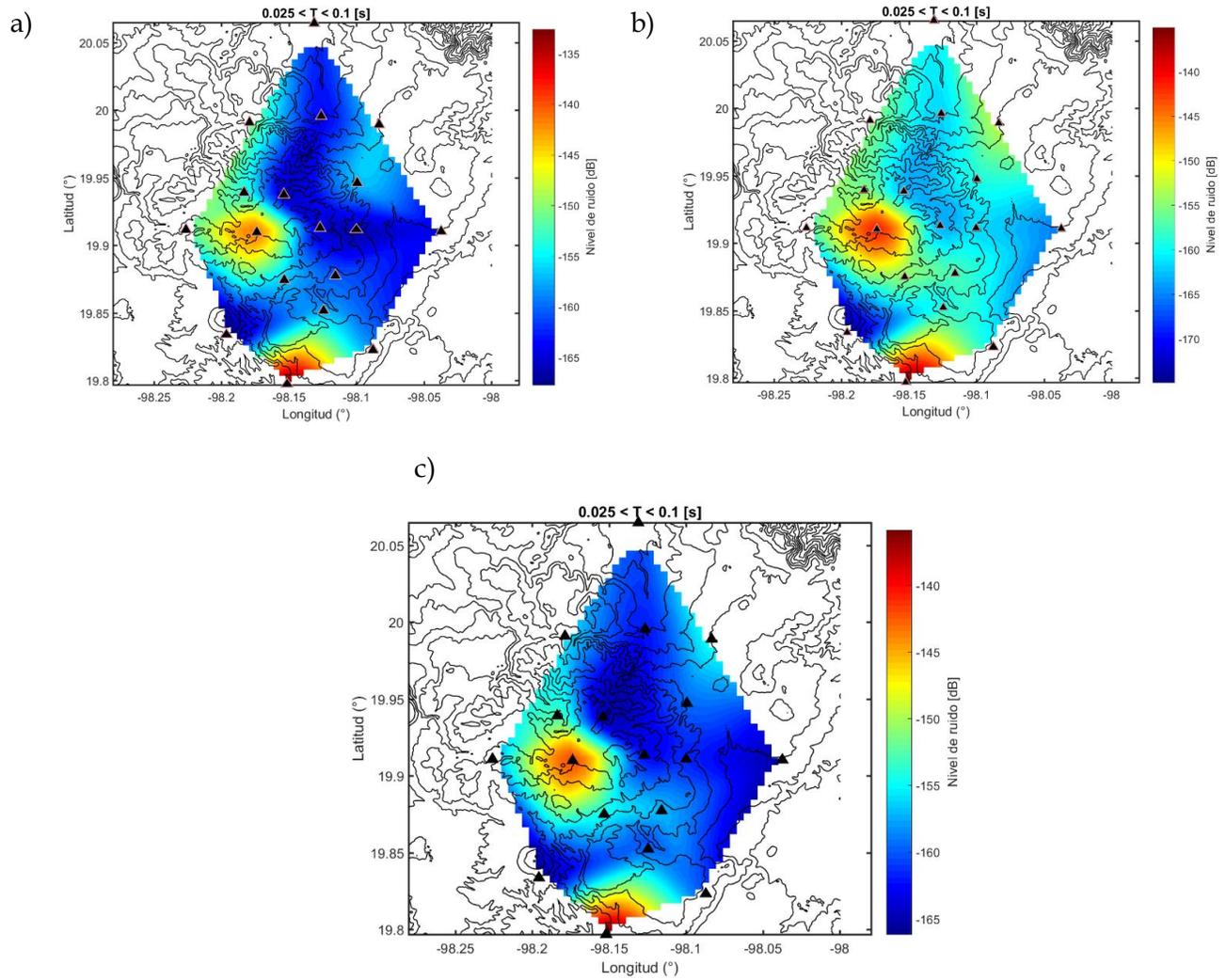


Figura 4.3. Mapas de niveles de ruido en dB. a) Componente vertical, b) componente norte y c) componente este; los triángulos negros representan las 18 estaciones del arreglo temporal utilizado para calcular los niveles de ruido del P5.2 GEMex.

4.2 Gradiente topográfico

El gradiente topográfico se calculó empleando el método y datos mencionados en el Capítulo 2. La Figura 4.4 muestra la topografía (INEGI), los gradientes horizontales NS (G_{NS}) y EW (G_{EW}), y el gradiente total calculado como $\sqrt{G_{NS}^2 + G_{EW}^2}$. El mapa topográfico (Figura 4.4.a) ilustra que la elevación del terreno con respecto al nivel del mar toma valores entre 2000 m y 3100 m; mientras que en la región de la caldera (zona oeste) la altitud varía entre 2600 m a 3000 m.

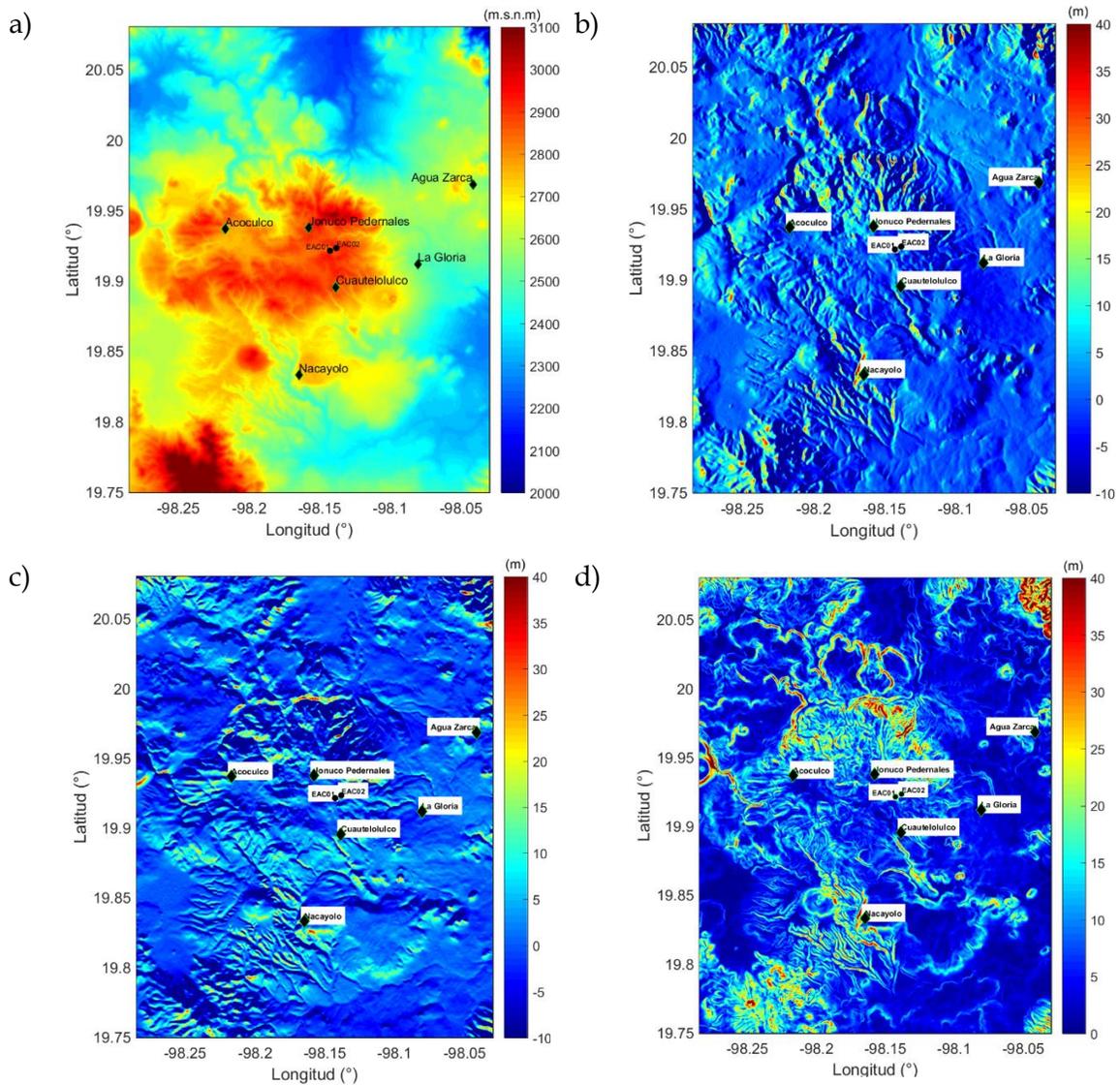


Figura 4.4. Mapas de elevación y gradientes. a) Mapa topográfico del campo geotérmico de Acapulco, Pue., Méx. b) Gradiente en dirección G_{EW} . c) Gradiente en dirección G_{NS} . d) Gradiente total de la región.

Por otra parte, los mapas de gradientes en dirección G_{EW} (Figura 4.4.b) y G_{NS} (Figura 4.4.c) muestran variaciones en la altitud entre -10 m y 40 m. En específico, el gradiente en dirección Y enfatiza los límites de la caldera, que se observa como un bajo topográfico. Sin embargo, el gradiente topográfico total, o sólo gradiente total (Figura 4.4.d), delimita mejor la caldera del complejo volcánico de Acapulco, en la zona oeste-centro del mapa, permitiendo observar el patrón de drenaje, caracterizado por variaciones de pendiente significativas. El gradiente total toma valores entre 0 y 40 m, mismos que son elevados, ya que la resolución de la malla es de 50 m. Por lo tanto, existen regiones donde por 50 m de distancia horizontal se cuenta con 40 m de altitud, es decir, una pendiente de aproximadamente 80%.

4.3 Optimización de la red de estaciones

La optimización de la red de estaciones se basa en la capacidad de detección y registro del arreglo sísmico, por lo tanto, es sensible al tipo de modelo de velocidades que se emplee. Durante el desarrollo de este trabajo se observaron diferencias razonables al emplear cada modelo de velocidades, es decir, modelos 1D y 3D. Sin embargo, en todos los casos la configuración incrementa la sensibilidad en la región donde se supone la sismicidad inducida, ya que la red temporal instalada (Figura 4.5) en el campo con el objetivo de realizar estudios de la estructura sísmica tiene una sensibilidad restringida.

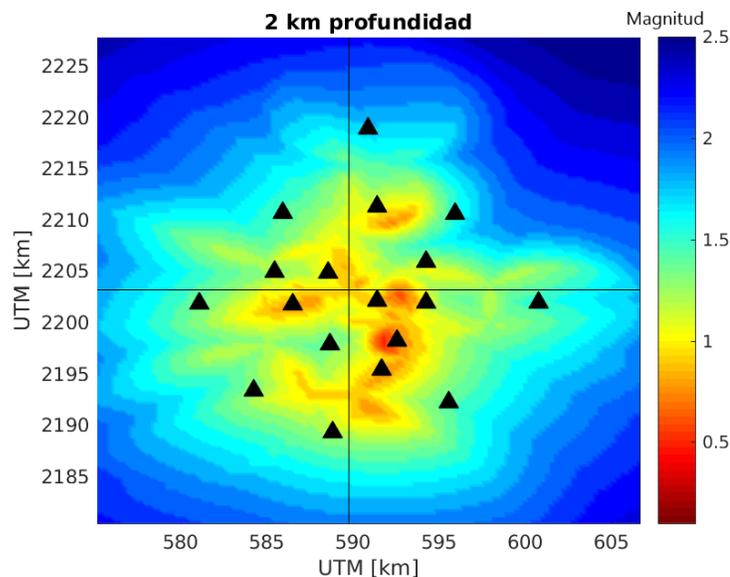


Figura 4.5. Mapa de sensibilidad de la configuración original compuesta por 18 estaciones en el campo geotérmico de Acoculco, Pue., Méx.

El mapa de sensibilidad de la red original (Figura 4.5) indica que para un sismo con epicentro en el punto de cruce entre las líneas rectas, es decir, la ubicación del pozo exploratorio EAC-1 y con profundidad de 2 km; las magnitudes toman valores entre $0.5 < M < 2$, siendo la región central la que tiene mejor cobertura. Por lo tanto, la sensibilidad es pobre y es necesario probar con una mayor densidad de estaciones.

Las estaciones y sitios disponibles se ubican en una malla regular, con espaciamiento entre ellas de 500 m. Por practicidad, en la Figura 4.6 se muestra una red de sólo 140 estaciones. Sin embargo, la red inicial cuenta con un total de 2378 estaciones, distribuidas en un área de 20×28 km que comprende una gran parte del complejo volcánico.

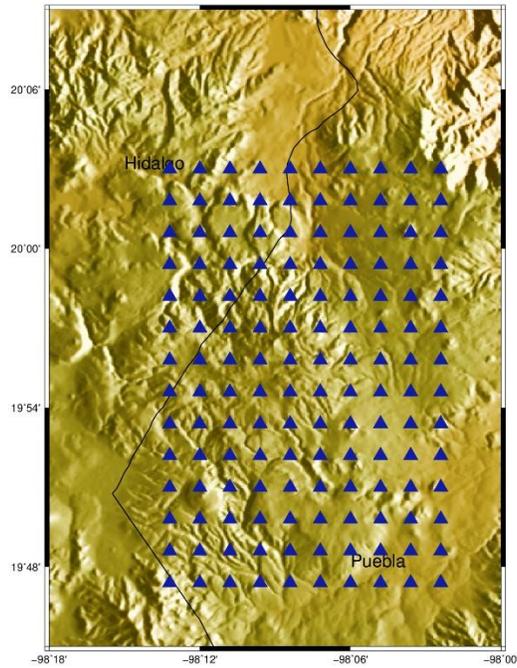


Figura 4.6. Configuración de la red de estaciones propuesta. Los triángulos azules representan los sensores.

Como el objetivo de este trabajo fue agregar criterios en la optimización, además de la capacidad de detección y localización de los eventos sísmicos, se agregan variables como el gradiente topográfico y el nivel de ruido.

Para conjuntar los criterios de determinante de la matriz de información, gradiente topográfico y nivel de ruido; fue necesario normalizar las cantidades, ya que es indispensable observar las diferencias, y así identificar las mejores configuraciones.

La normalización se realizó identificando primero los valores máximos de cada una de las variables, es decir, determinante de la matriz de información, gradiente total topográfico y nivel de ruido. Posteriormente, se realizó la división de cada uno de los valores de las variables correspondientes a cada configuración o red de estaciones entre su máximo correspondiente.

En el caso del determinante de la matriz de información es necesario identificar las configuraciones cuya normalización sea máxima o más próxima a la unidad. Dado que, si recordamos la relación inversa entre el determinante de la matriz de información con el volumen del elipsoide de error (ecuación 15), la red de estaciones que tiene un menor error

en la localización es aquella cuyo determinante sea máximo, de tal modo que se asegura que el evento sísmico pueda ser detectado y localizado.

Para el gradiente topográfico, la asignación de valores para cada configuración se realizó utilizando el promedio los gradientes correspondientes a cada estación. Sin embargo, para determinar el valor de gradiente de cada una de las estaciones se consideraron los puntos en un radio de 150 m alrededor de cada posición con el fin de hacer más robusta la ponderación y considerar variaciones de altitud circundante a cada estación.

Por último, la normalización de los niveles de ruido consideró los valores de ruido de cada una de las estaciones extraídos de los mapas de niveles de ruido calculados con anterioridad (Figura 4.3). En el caso del gradiente topográfico y niveles de ruido, la optimización busca valores pequeños de estos parámetros, ya que el objetivo es favorecer la logística de instalación y asegurar la detección de la señal.

En las siguientes secciones se muestran las configuraciones de estaciones resultantes dependiendo del tipo de modelo de velocidades empleado. Además, se comparan las variaciones de los parámetros a optimizar, como, determinante de la matriz de información, gradiente topográfico y nivel de ruido. Los dos últimos se incorporan como factor de peso, para ayudar al usuario a elegir o evaluar el conjunto de configuraciones que favorezcan a la detección, localización y practicidad en la instalación.

4.3.1 Modelo de velocidades 1D

La cantidad de soluciones óptimas que aseguran la localización del evento y mejoran la calidad del error difiere en dos casos: 1) el número de ciclos dictados por el usuario, el cual establece la cantidad de combinaciones o configuraciones de redes de monitoreo; y 2) la dimensión espacial del modelo de velocidades empleado.

En el caso de usar un modelo de velocidades unidimensional (1D), la cantidad de configuraciones óptimas incrementa sustancialmente. En la Figura 4.7 se muestran el número de configuraciones, que aseguran la detección contra las cantidades normalizadas del determinante de la matriz de información, el gradiente topográfico y nivel de ruido.

La Figura 4.7.a muestra la variación del determinante y el gradiente topográfico; mientras que la Figura 4.7.b los cambios del mismo determinante y el nivel de ruido. Aunque las

barras indican que los valores de gradiente topográfico y nivel de ruido son negativos, éstos fueron representados así con el objetivo de ilustrarlas en una misma gráfica e identificar con mayor facilidad las mejores configuraciones. En las gráficas es difícil identificar las configuraciones que cumplan con los tres criterios establecidos: 1) un determinante cercano a la unidad, 2) un gradiente mínimo y 3) nivel de ruido pequeño, ya que los cambios de estos valores son abruptos y aleatorios.

En la Figura 4.7.a se observa que los valores de gradiente topográfico calculado como el promedio de las ubicaciones seleccionadas son predominantemente mayores a 0.5 veces el gradiente topográfico de la región, lo que comprueba la presencia de pendientes abruptas. Pocos son los valores por debajo de 0.5 veces el gradiente máximo; sin embargo, estos no coinciden con valores altos del determinante, por ello los diamantes negros señalan las configuraciones para las cuales el determinante de la matriz de información es óptimo y el gradiente no excede el valor de 0.75 veces el gradiente máximo.

Por otra parte, en la Figura 4.7.b se muestra la comparación de la variación del determinante con el nivel de ruido. A diferencia del gradiente topográfico, el nivel de ruido conserva mayormente valores por debajo de 0.5 veces el número máximo del nivel de ruido. Del mismo modo que en la comparación anterior los diamantes negros señalan las configuraciones que cumplen con valores normalizados del determinante cercanos a la unidad, pero pequeñas cantidades en el gradiente topográfico y nivel de ruido.

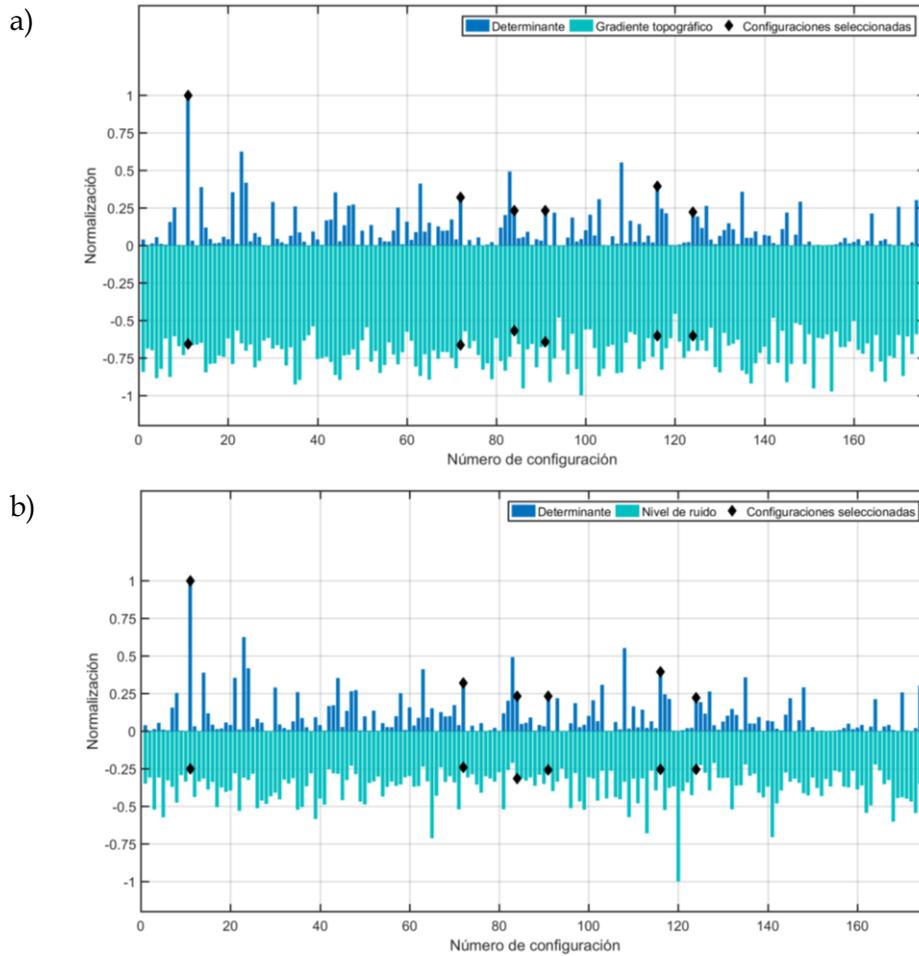


Figura 4.7. Variación de los valores de gradiente total, nivel de ruido y determinante de la matriz de información para distintas configuraciones empleando un modelo de velocidades 1D. a) Comparación de valores normalizados del determinante de la matriz de información (barras azules) y del gradiente total topográfico (barras cian). b) Comparación de valores normalizados del determinante de la matriz de información (barras azules) y del nivel de ruido (barras cian).

Por consiguiente, en la Figura 4.8 se ilustran los valores normalizados del determinante, gradiente topográfico y nivel de ruido, de las configuraciones óptimas electas. De esta manera, se observó que la mejor configuración, de acuerdo con los criterios establecidos, es la número 11, seguida por la número 116; esta última disminuye el gradiente topográfico, pero el determinante se ve afectado.

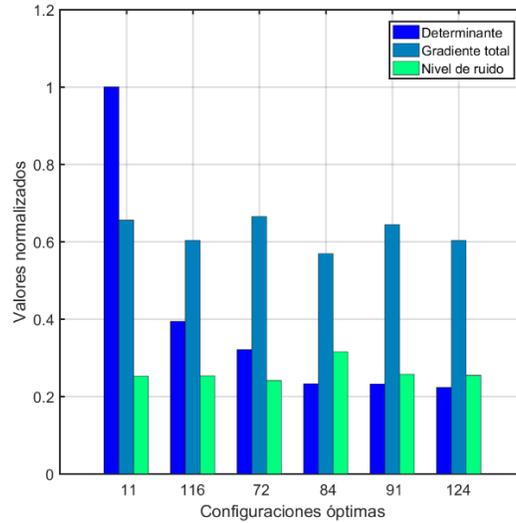


Figura 4.8. Valores normalizados de determinante de la matriz de información (barra azul), gradiente topográfico total (barra turquesa) y nivel de ruido (barra verde), de las configuraciones óptimas utilizando un modelo 1D.

En la Figura 4.9 se muestra la distribución de estaciones para las cuatro mejores configuraciones, acompañada del mapa de gradiente topográfico; donde el cruce de las líneas sólidas indica la posición del epicentro, que corresponde a la posición del pozo EAC-01. Un rasgo común de los mapas es que el algoritmo de optimización asegura la detección de los eventos, y por ello coloca estaciones muy cercanas o sobre el epicentro; además de evitar sitios con gradientes de hasta 40 m. De manera general, las configuraciones no difieren mucho entre sí, en lo que corresponde a las estaciones cercanas, sin embargo, muestra cambios considerables para el caso de estaciones lejanas. Por ejemplo, las configuraciones 11 (Figura 4.9.a) y 84 (Figura 4.9.d) muestran un exceso de estaciones en la zona este del campo. Mientras que las configuraciones 116 (Figura 4.9.b) y 72 (Figura 4.9.c) tienen una mejor cobertura azimutal.

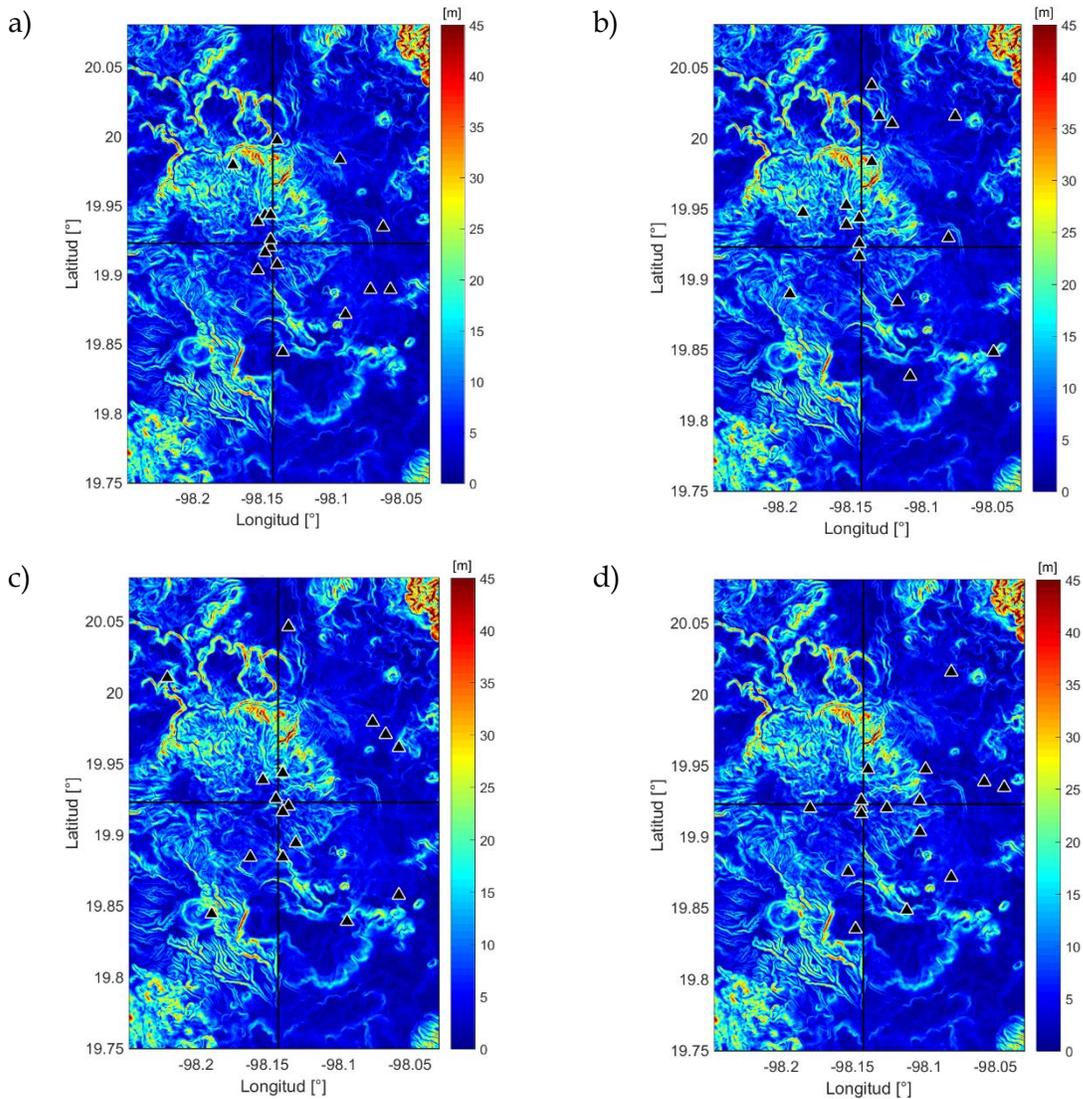


Figura 4.9. Distribución espacial de las primeras cuatro configuraciones óptimas empleando un modelo de velocidades 1D. Las configuraciones representadas son: (a) 11, (b) 116, (c) 72 y (d) 84. El gradiente topográfico total se ilustra por la escala de colores. Las estaciones que componen cada configuración se plasman como triángulos rojos. El cruce de las líneas sólidas representa la posición del epicentro.

Aunque los gráficos Figura 4.7 y Figura 4.8 contribuyeron a la elección de las redes, es imprescindible realizar pruebas de sensibilidad que validen su eficiencia, por consiguiente, los mapas de sensibilidad de las redes número 11 y 116 se muestran en la Figura 4.10 y Figura 4.11, respectivamente. Para cada configuración se realizó una vista en planta a 1 km sobre el nivel del mar (s.n.m), es decir, a una profundidad de 2 km; además de dos secciones, Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EW). De manera general y de acuerdo con las pruebas, las redes son capaces de detectar sismos con magnitud mayor que -2. Por lo tanto, se mejoró la sensibilidad de la red.

La poca cobertura azimutal de la distribución de estaciones correspondiente a la configuración 11 (Figura 4.10) causa que se generen dos zonas con mayor sensibilidad, en las regiones noroeste y sureste. La sensibilidad de la red no es radial a la posición del epicentro supuesto, que corresponde al cruce de las líneas discontinuas. Por otra parte, la sección NS (Figura 4.10.b) indica que la red de estaciones pierde sensibilidad a profundidades mayores a 3 km; aunque aparentemente se concentra en el centro del campo. Sin embargo, la sección EW (Figura 4.10.c) muestra la distribución no homogénea de la sensibilidad, ya que enfatiza la presencia de las dos regiones donde se concentra la sensibilidad.

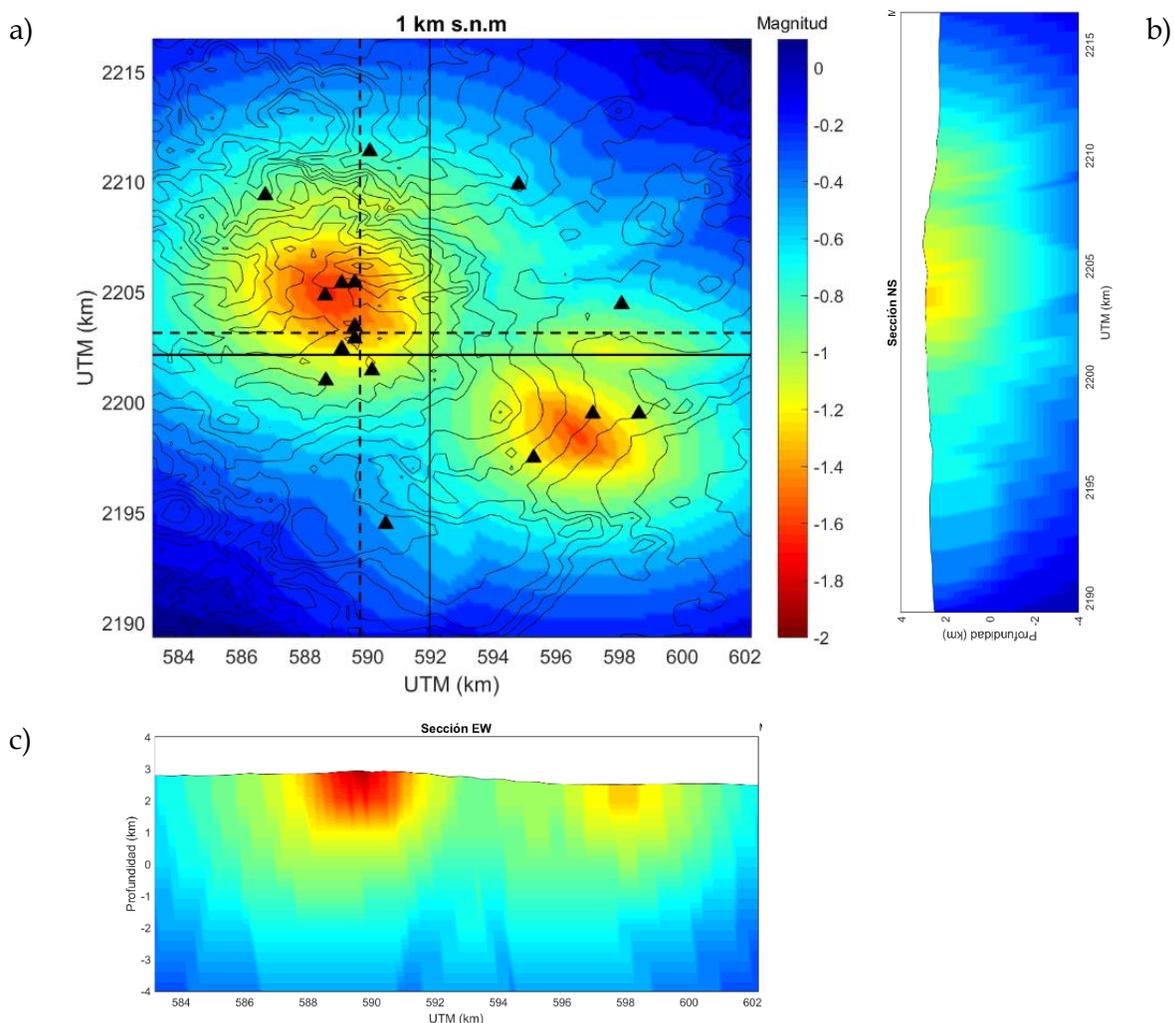


Figura 4.10. a) Sensibilidad del arreglo de estaciones de la configuración número 11 a una profundidad de 2 km con respecto a la superficie; la optimización se realizó utilizando un modelo de velocidades 1D. La paleta de colores indica el rango de magnitudes de cada capaz de ser detectado por el arreglo de estaciones. Los triángulos negros representan las estaciones que componen la red óptima. El cruce de las líneas discontinuas indica la localización del hipocentro. Las líneas sólidas vertical y horizontal indican la orientación de las secciones Norte-Sur (b) y Este-Oeste (c), respectivamente.

Aunque el valor máximo del determinante corresponde a la configuración 11 (Figura 4.10), la configuración número 116 (Figura 4.11) cuenta con una mejor cobertura azimutal; por lo tanto, la sensibilidad a 2 km de profundidad se concentra en el epicentro supuesto (cruce de líneas discontinuas). No obstante, la sección NS (Figura 4.11.b) indica que la distribución de la sensibilidad se sesga hacia el norte; mientras que en la EW (Figura 4.11.c) la sensibilidad incrementa en el centro del campo. Ambos cortes indican que la sensibilidad incrementa hasta los 3 km de profundidad.

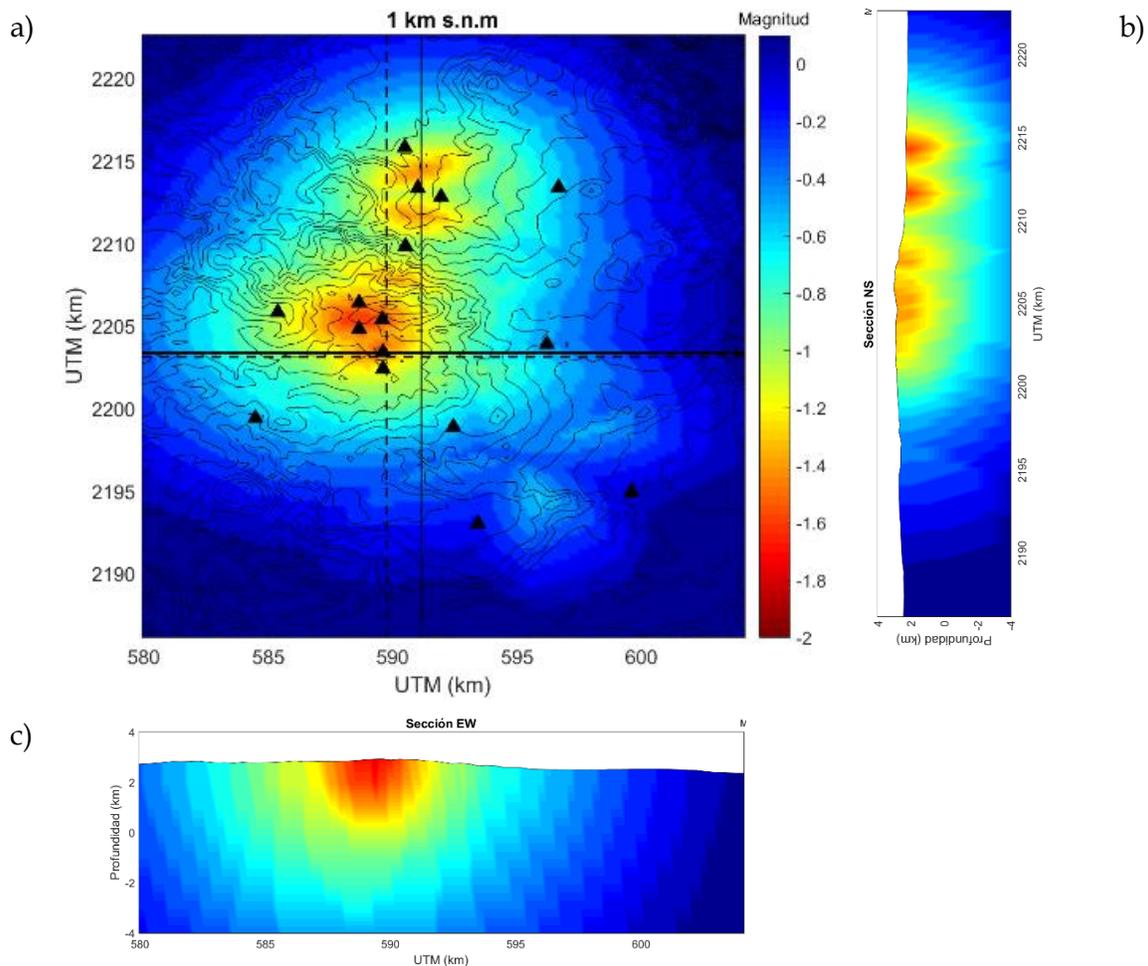


Figura 4.11. a) Sensibilidad del arreglo de estaciones de la configuración número 116 a una profundidad de 2 km con respecto a la superficie; la optimización se realizó utilizando un modelo de velocidades 1D. La paleta de colores indica el rango de magnitudes de coda capaz de ser detectado por el arreglo de estaciones. Los triángulos negros representan las estaciones que componen la red optima. El cruce las líneas discontinuas indica la localización del hipocentro. Las líneas sólidas vertical y horizontal indican la orientación de las secciones Norte-Sur (b) y Este-Oeste (c), respectivamente.

4.3.2 Modelo de velocidades 3D

El tiempo de cálculo de la optimización no se ve afectado por el tipo de modelo de velocidades que se utilice, unidimensional (1D) o tridimensional (3D). Sin embargo, los resultados son diferentes y más estables utilizando un modelo de velocidades 3D, aun cuando el resto de los parámetros que caractericen al medio sean los mismos. Al igual que en caso unidimensional, el arreglo de estaciones inicial se muestra en la Figura 4.6 y se indica que se dispone de 16 sensores para el monitoreo.

En la Figura 4.12, las gráficas con un total de 21 configuraciones muestran un menor número de redes de estaciones resultantes de la optimización. La comparación de la variación de los valores del determinante de la matriz de información y el gradiente topográfico (Figura 4.12.a), permite identificar que al menos 5 configuraciones tienen valores normalizados del determinante mayor o igual a 0.75 veces el máximo; además, la tendencia de altos valores de gradiente topográfico prevalece.

Por otra parte, en la Figura 4.12.b las variaciones del nivel de ruido disminuyen y se aprecia similitud entre ellas; por lo tanto, la diferencia de los niveles de ruido entre una configuración y otra no es sustancial. En ambos gráficos se señala con diamantes negros, aquellas configuraciones que cumplen con valores de determinante cercanos a la unidad, pero que aseguren un bajo gradiente topográfico y nivel de ruido.

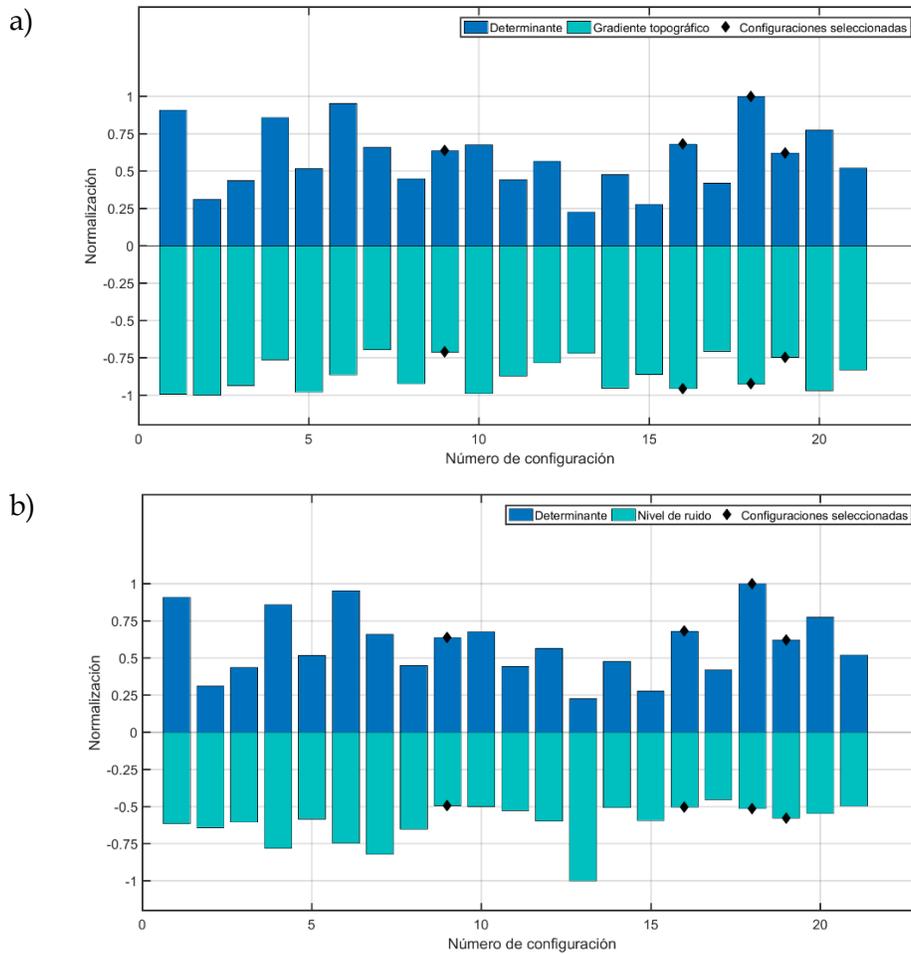


Figura 4.12. Variación de los valores de gradiente total, nivel de ruido y determinante de la matriz de información para distintas configuraciones empleando un modelo de velocidades 3D. a) Comparación de valores normalizados del determinante de la matriz de información (barras azules) y del gradiente total topográfico (barras cyan). b) Comparación de valores normalizados del determinante de la matriz de información (barras azules) y del nivel de ruido (barras cyan).

Las mejores redes resultantes se muestran en la Figura 4.13. Por consiguiente, se observa que la mejor configuración de estaciones es la número 18, ya que su determinante normalizado es de 1. Sin embargo, el gradiente topográfico es elevado. Por ello, una segunda opción de arreglo de estaciones es el número 9; aunque el determinante normalizado es de 0.7 veces el máximo, el gradiente topográfico decrece notablemente y el nivel de ruido se conserva.

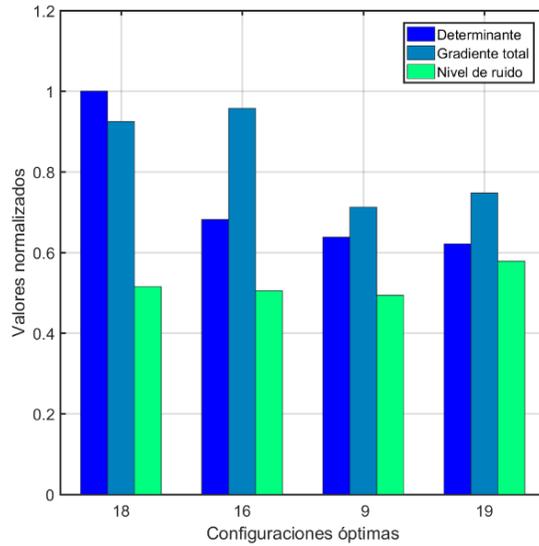


Figura 4.13. Valores normalizados de determinante de la matriz de información (barra azul), gradiente topográfico total (barra turquesa) y nivel de ruido (barra verde), de las configuraciones óptimas utilizando un modelo 3D.

La comparación de la distribución espacial de las mejores redes de estaciones empleando un modelo de velocidades 3D se muestra en la Figura 4.14, donde a ubicación de las estaciones entre cada red difiere un poco. En general el algoritmo de optimización asegura la ubicación de un conjunto de estaciones en la región cercana o sobre el epicentro, indicado por el cruce de las líneas sólidas; además de evitar sitios con elevados valores de gradiente topográfico. Sin embargo, sólo la configuración número 18 (Figura 4.14.a) cuenta con una mejor cobertura azimutal. Por otro lado, configuraciones como las número 16 (Figura 4.14.b), 9 (Figura 4.14.c) y 19 (Figura 4.14.d) muestran que las estaciones se localizan predominantemente en el norte o este del campo; de tal modo que la cobertura azimutal es mala y puede generar un sesgo en la localización de la sismicidad a monitorear.

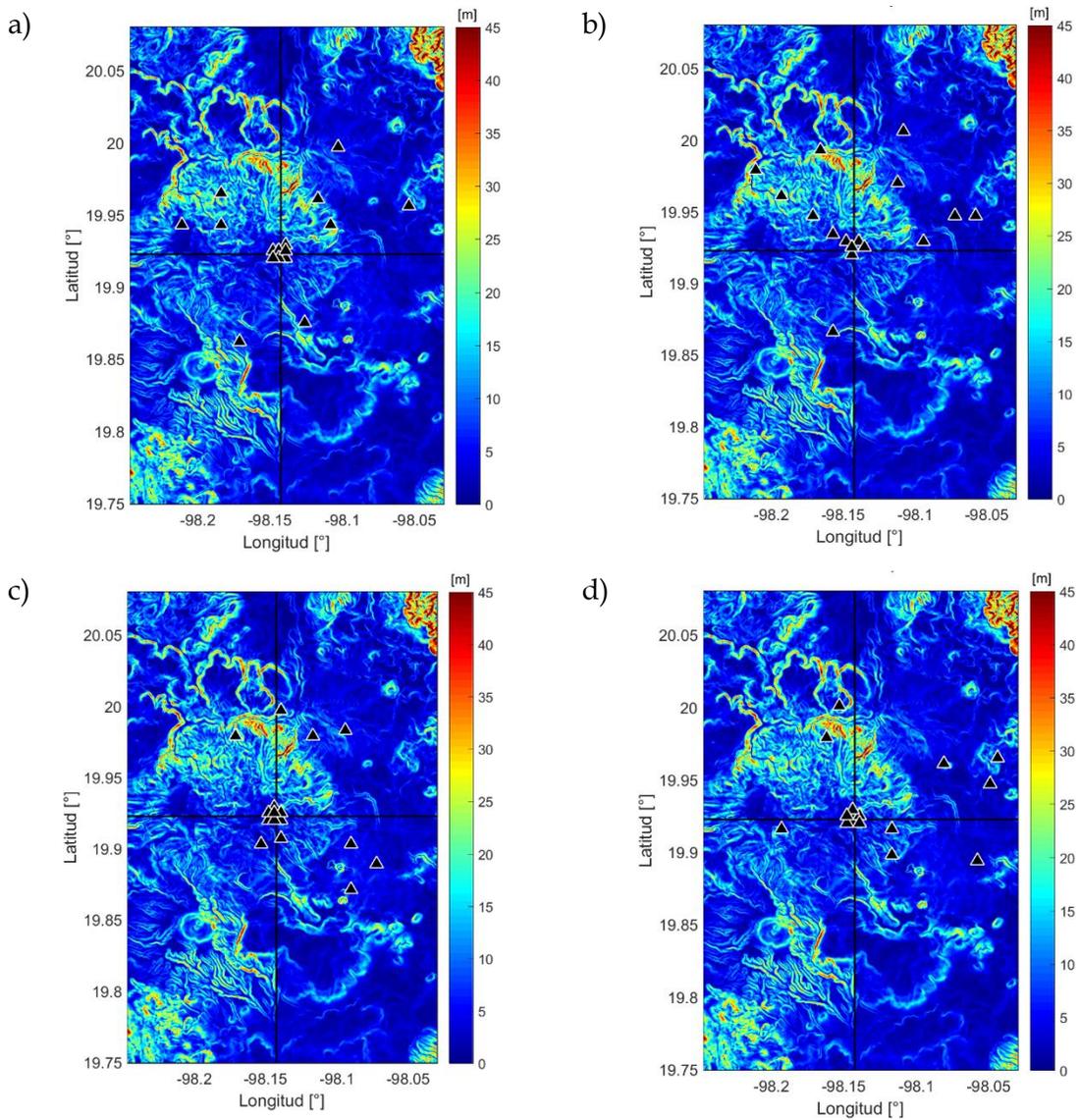


Figura 4.14. Distribución espacial de las primeras cuatro configuraciones óptimas empleando un modelo de velocidades 3D. Las configuraciones representadas son: (a) 18, (b) 16, (c) 9 y (d) 19. El gradiente topográfico total se ilustra por la escala de colores. Las estaciones que componen cada configuración se plasman como triángulos rojos. El cruce de las líneas sólidas representa la posición del epicentro.

Considerando la gráfica comparativa de las mejores redes de estaciones (Figura 4.13), se realizó la prueba de sensibilidad de las configuraciones número 18 y 9, Figura 4.15 y Figura 4.16, respectivamente. Los mapas de sensibilidad indican que las redes son capaces de detectar y son útiles en la localización de eventos con una magnitud mínima de -2.

El mapa de sensibilidad correspondiente a la configuración 18 (Figura 4.15) rectifica la buena cobertura azimutal del epicentro, ya que la sensibilidad se concentra justo en la región donde se estableció el hipocentro (cruce de las líneas discontinuas). Las secciones NS y EW

(Figura 4.15.b y Figura 4.15.c) corroboran que la sensibilidad se concentra en la zona hipocentral hasta una profundidad de 4 km, con un diámetro de aproximadamente 5 km.

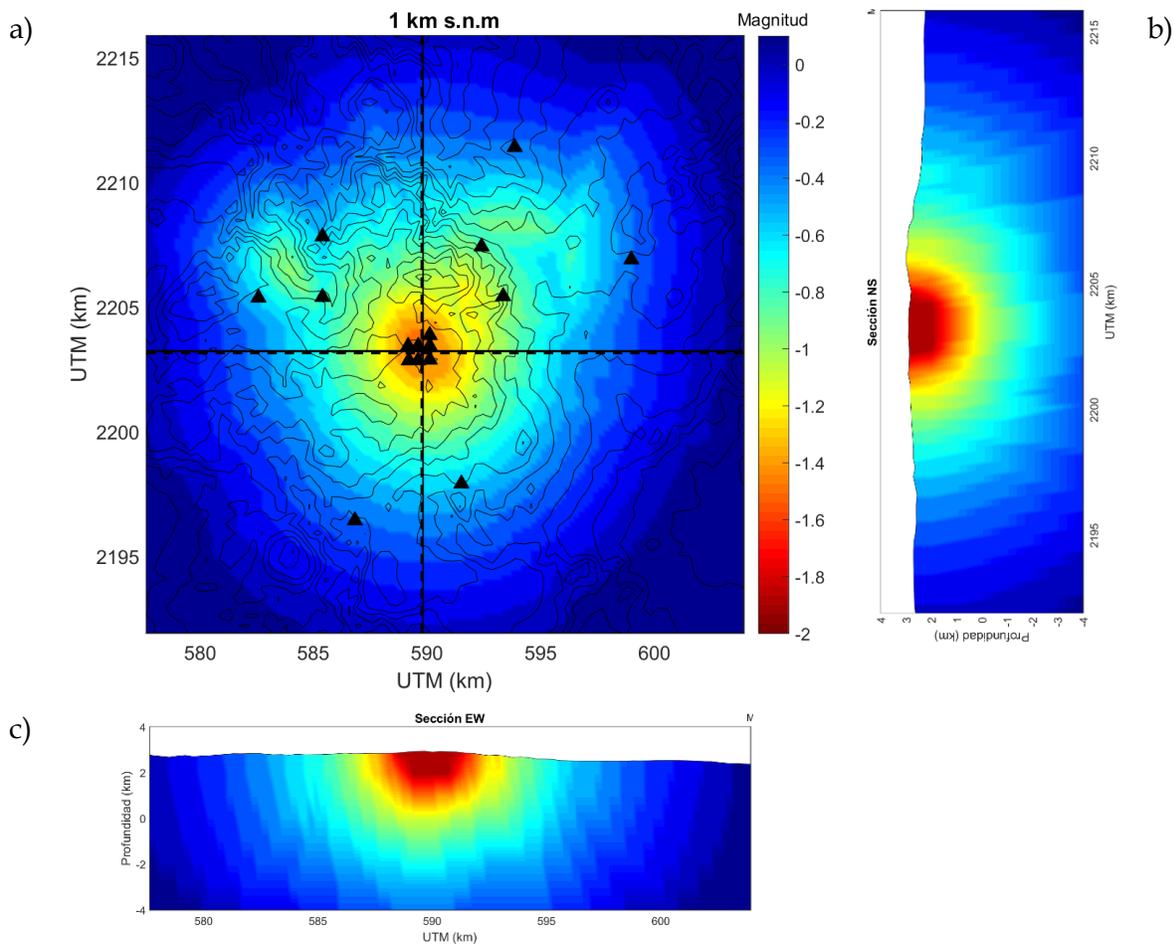


Figura 4.15. a) Sensibilidad del arreglo de estaciones de la configuración número 18 a una profundidad de 2 km con respecto a la superficie; la optimización se realizó utilizando un modelo de velocidades 3D. La paleta de colores indica el rango de magnitudes de coda capaz de ser detectado por el arreglo de estaciones. Los triángulos negros representan las estaciones que componen la red óptima. El cruce las líneas discontinuas indica la localización del hipocentro. Las líneas sólidas vertical y horizontal indican la orientación de las secciones Norte-Sur (b) y Este-Oeste (c), respectivamente.

Por otra parte, el mapa y secciones de sensibilidad de la configuración número 9 (Figura 4.16) ilustran que la distribución de estaciones no es la mejor, ya que a una profundidad de 2 km (1 km s.n.m.) se generan dos regiones de mayor sensibilidad, la primera en el oeste y otra en el sureste; además la capacidad de la red para detectar y ser utilizada en la localización no es simétrica con respecto a la posición del hipocentro (cruce de las líneas discontinuas). La sección NS (Figura 4.16.b) muestra que la red reduce su sensibilidad a una magnitud de -1.6 y se restringe a una profundidad de 2 km, mientras que la sección EW

(Figura 4.16.c) mantiene la sensibilidad de una magnitud de -2 y una profundidad de 4 km, pero sesgada al este.

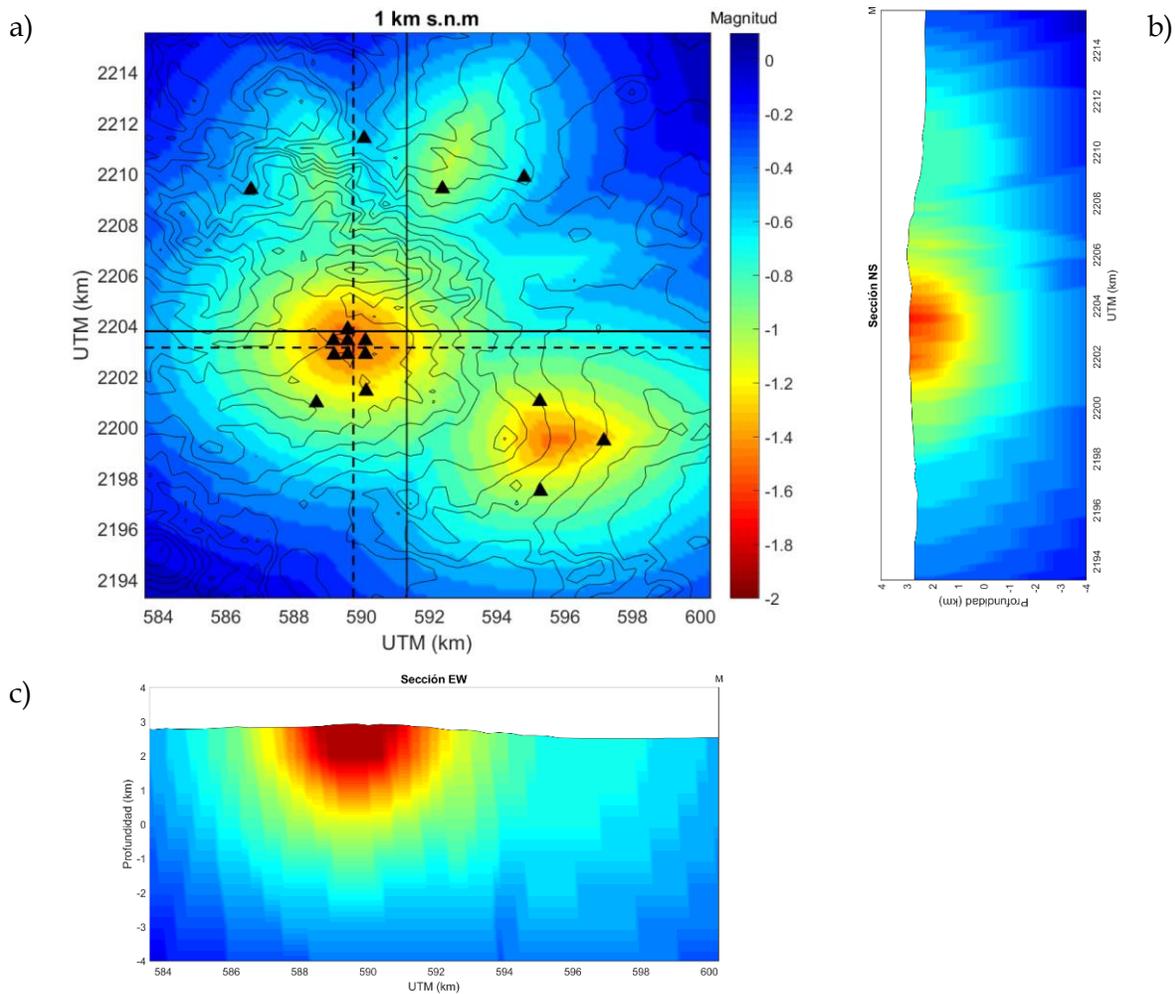


Figura 4.16. a) Sensibilidad del arreglo de estaciones de la configuración número 9 a una profundidad de 2 km con respecto a la superficie; la optimización se realizó utilizando un modelo de velocidades 3D. La paleta de colores indica el rango de magnitudes de cada capa capaz de ser detectado por el arreglo de estaciones. Los triángulos negros representan las estaciones que componen la red óptima. El cruce de las líneas discontinuas indica la localización del hipocentro. Las líneas sólidas vertical y horizontal indican la orientación de las secciones Norte-Sur (b) y Este-Oeste (c), respectivamente.

Capítulo 5

5. Análisis y discusión de resultados

Los niveles de ruido son valores imprescindibles para la elaboración de este proyecto; sin embargo, si éstos son desconocidos puede suponerse alguna cantidad considerando las distintas fuentes de ruido. A periodos cortos (0.5 - 50 Hz) se tienen fenómenos como el viento, que genera el movimiento de árboles, antenas, torreo y genera un fenómeno de turbulencia en irregularidades topográficas; el caudal de ríos y actividad volcánica. Muchas de las fuentes generadas por el hombre están distribuidas de forma aleatoria, y son estacionarios o móviles; por lo tanto, su contribución proviene de varias direcciones, es compleja y, en ocasiones, puede considerarse estacionaria. Por otra parte, en periodos largos (0.2 - 50 mHz) las fuentes de ruido son fluctuaciones atmosféricas, afectaciones en la masa del sensor que se reflejan principalmente en las componentes horizontales y cambios de temperatura (Bormann y Wielandt, 2013). Además de los agentes generadores de los dos picos microsísmicos, el primero (10-16 s) generado por corrientes oceánicas superficiales donde la energía de la ola se convierte en energía sísmica transmitida a través del rompimiento de la ola en la costa; y el segundo (4-8 s) generado por la superposición de las olas oceánicas del mismo periodo que viajan en direcciones opuestas. (McNamara y Buland, 2004).

El cálculo permitió identificar que las estaciones AC17 y AC18 tienen una mayor contribución de las fuentes de ruido (Figura 4.2), y considerando lo antes descrito se concluyó que las fuentes principales son: 1) el tipo de suelo y 2) la cercanía con actividades antropogénicas, ya que la instalación se realizó en áreas muy cercanas a viviendas. No se toma en cuenta fenómenos regionales, como los cambios en presión atmosférica o mareas oceánicas, ya que los efectos de éstos se observarían en el resto de las estaciones. Por otra parte, la cantidad de sensores es limitada dada la dimensión del campo geotérmico de Acapulco. La estimación de los mapas de niveles de ruido se considera robusta, ya que se utilizaron registros de un periodo de 246 días.

Además de los niveles de ruido se calculó el gradiente topográfico total (Figura 4.4), a partir de la topografía con una resolución de 50 m. Cada uno de los gradientes enfatizó algunos

rasgos geológicos que enfatizaron la morfología de la caldera del campo. Sin embargo, fue hasta el cálculo del gradiente topográfico total, cuando fue posible delimitar mejor la caldera y establecer la distribución de la red de estaciones inicial, con el objetivo de cubrir toda la región de interés. El mapa del gradiente topográfico permitió identificar que existen regiones muy accidentadas. Por lo que considerando que la resolución de la malla de elevación es de 50 m, entonces revela que en ciertas regiones es posible encontrar pendientes de un 80%; lo que consolida la necesidad de considerar el gradiente topográfico como parámetro de optimización importante para tener una planeación más viable de las campañas de instalación.

En este proyecto la consideración del gradiente topográfico se realizó con el fin de evitar regiones de difícil acceso, es decir, de pendiente pronunciada; sin embargo, algunos trabajos previos (e.g. Allen, 2007; Allen y Wald, 2009) indican la existencia de una correlación entre la topografía y la Vs30 (velocidad de onda S a 30 m), esta última se asocia con efectos de sitio; por lo tanto, es un factor importante en la elección de los sitios para el diseño de una red de monitoreo. Una manera posible de considerar el efecto de sitio es establecer intervalos de los valores de gradiente topográfico y para cada uno especificar una ponderación con valores entre 0 y 1. Para la obtención de los intervalos se utilizaría la correlación entre el gradiente topográfico y el modelo de velocidades de onda S a una profundidad de 30 m, estimado a partir del trabajo de Maldonado-Hernández et al. (2009). Posteriormente, dependiendo de la posición de las estaciones de cada una de las configuraciones consideradas como óptimas, se estima un valor promedio de las ponderaciones, éste es representativo del efecto de sitio para cada una de las configuraciones; por lo tanto, el objetivo sería elegir la configuración cuyo efecto de sitio sea mínimo.

En cuanto a la optimización el procedimiento establecido por Tramelli *et al.* (2013), sólo asegura la capacidad de detección y reducción del error en la localización de la red optimizada. Sin embargo, en este trabajo se busca implementar como factores de peso el gradiente topográfico y los niveles de ruido. Por lo tanto, la elección de la mejor configuración a partir de las redes resultantes que aseguran la detección y reducción del error se realizó utilizando los criterios de gradiente topográfico y niveles de ruido. Durante este proceso se utilizaron modelos de velocidades 1D y 3D, cuyos resultados fueron

significativamente distintos. Cuando se hace uso de un modelo unidimensional para el cálculo de los tiempos de viaje, la cantidad de configuraciones resultantes incrementa y es difícil identificar valores de determinantes normalizados cercanos a la unidad. Mientras que, al utilizar un modelo de velocidades tridimensional, la cantidad de soluciones óptimas se reduce y pocas redes cumplen con un valor de determinante normalizado igual o cercano a la unidad. En este punto, la elección de la mejor red corresponde al usuario, y es donde los criterios de gradiente topográfico y niveles de ruido cobran importancia. Todas las configuraciones electas mejoran la detección y localización de eventos sísmicos, sin embargo, no consideran los problemas de la logística de campo con la topografía y reducción de los niveles de ruido, ya que si este último incrementa se reduce el poder de detección de la red y pierde sensibilidad, por lo tanto, es importante mapear los niveles de ruido con la mayor eficiencia posible.

En la Figura 4.8 y Figura 4.13 se muestran las mejores configuraciones de estaciones empleando modelos de velocidades 1D y 3D, respectivamente, y ayudan al usuario a elegir la red que considere mejor. Sin embargo, cuando se muestra la distribución espacial de las estaciones (Figura 4.9 y Figura 4.14, caso 1D y 3D) es posible identificar la cobertura azimutal de las estaciones con respecto a la fuente de la sismicidad. Mismo que se rectifica al realizar pruebas de sensibilidad de la red.

La sensibilidad de las redes consideradas como mejores empleando cada uno de los modelos de velocidades (Figura 4.10, Figura 4.11, Figura 4.15 y Figura 4.16) hace visible la cobertura azimutal y la homogeneidad de la sensibilidad de cada una de las redes. En el caso del uso de un modelo de velocidades 1D, se determina que la mejor configuración de estaciones es la número 116; aunque el valor de determinante de la matriz no es máximo, el valor del gradiente topográfico disminuye, el nivel de ruido se mantiene (Figura 4.8) y la sensibilidad de la red (Figura 4.11) mejora en la zona hipocentral. Por otra parte, el uso de un modelo de velocidades 3D cambia significativamente los resultados, de tal modo que la configuración electa como mejor es la número 18. En este caso el valor del determinante normalizado corresponde al máximo, el gradiente no es poco pronunciado, el nivel de ruido se mantiene (Figura 4.13) y la sensibilidad de la configuración (Figura 4.15) se concentra en la región hipocentral, permitiendo localizar eventos de magnitud superior a -2 y hasta una profundidad de 4 km. Además, la comparación entre las soluciones propuestas utilizando

modelos 1D y 3D evidencia la importancia en el conocer previamente la estructura de la región de estudio para poder proponer redes de monitoreo más eficientes y confiables.

Capítulo 6

6. Conclusiones

La optimización de una red de monitoreo sísmico, que asegure la detección y utilidad en la localización de eventos, requirió el conocimiento previo de parámetros como: 1) número de sitios y sensores disponibles, 2) niveles de ruido de lugares factibles de instalación y 3) características sísmicas de la región, como modelo de velocidades del medio, densidad, velocidad promedio de la onda de corte, caída de esfuerzos y factor de calidad. Por lo tanto, entre mayor sea el número de factores conocidos, la optimización será más eficiente. Además, fue necesario establecer un conjunto de criterios prácticos que mejorarán la logística de campo; tales como, niveles de ruido y gradiente topográfico. Este último juega un papel muy importante en las maniobras de instalación, ya que se buscó evitar sitios con una pendiente pronunciada, y que por lo tanto son de difícil acceso, sin penalizar la calidad de la red propuesta.

El análisis de los niveles de ruido reveló que éstos se encuentran bien delimitados por las curvas de Peterson en el rango de frecuencia de interés para el monitoreo de sismicidad inducida; por lo tanto, el campo tiene pocas fuentes de ruido y, con relativa facilidad, se podría detectar microsismicidad. Sin embargo, las estaciones AC17 y AC18 muestran niveles de ruido ligeramente elevados, las posibles causas son, la proximidad de los sitios de instalación con viviendas o las propiedades mecánicas del suelo de los sitios. Por otra parte, todas las curvas mostraron mayor variación entre los 1 - 80 Hz; sin embargo, las curvas se encuentran acotadas dentro de las curvas de Peterson.

Un análisis similar se efectuó para la topografía del campo geotérmico; donde el cálculo del gradiente total mostró ser una herramienta útil para delimitar estructuras geológicas, que en este caso fue la caldera del campo geotérmico de Acoculco. El gradiente topográfico indicó la presencia de diferencias de altitudes de hasta 40 m; por lo que, considerando la resolución de la malla de elevaciones, denotó la existencia de pendientes de aproximadamente 80%. Por lo tanto, el gradiente topográfico, como uno de los criterios de la optimización, es un parámetro imprescindible que favorece a la logística de campo.

Los resultados finales de este trabajo, es decir, la optimización de la red de monitoreo del campo geotérmico de Acoculco, conformada por 18 estaciones; mostraron variaciones realmente significativas basadas en la dimensión espacial del modelo de velocidades utilizado. Las pruebas se realizaron empleando los mismos parámetros de entrada, excepto el modelo de velocidades. En el caso del modelo 1D, los valores del determinante cambian mucho entre configuraciones, por lo que es difícil identificar valores máximos; mientras que los valores de gradiente fueron predominantemente altos. De tal modo, que el conjunto de configuraciones electas tiene una distribución de estaciones compuesta, en muchos de los casos, por subconjuntos de estaciones concentrados en regiones distintas al hipocentro propuesto. Por lo tanto, la sensibilidad de la red se mejora en sitios distintos a los deseados y se limita a una profundidad de 3 km.

Por otra parte, el uso de un modelo 3D cambió notablemente los resultados. En este caso, el número de configuraciones que aseguran la detección y utilidad en la localización de los eventos se redujo de tal modo que resultó más fácil identificar valores máximos del determinante. No obstante, el rasgo de elevados valores del gradiente topográfico se mantuvo. Además, el algoritmo aseguró el posicionamiento de estaciones cercanas y circundantes al epicentro; mientras que el resto de éstas las distribuyó a una mayor distancia. Por consiguiente, la sensibilidad de la red mejoró, con una magnitud mínima de detección de -2 y una profundidad de hasta 4 km. Por lo tanto, comparando las mejores configuraciones, dependiendo del modelo de velocidades empleado, se concluye que la mejor red de monitoreo para el campo geotérmico de Acoculco, Pue., es la configuración 18 (Figura 4.15) que se obtuvo empleando un modelo de velocidades 3D.

Aunque el algoritmo de optimización indica las mejores configuraciones, e incluso establece aquella que tiene un error mínimo en la localización (valor máximo del determinante), evita pendientes pronunciadas (bajo gradiente topográfico) y asegura bajos niveles de ruido; la elección de la mejor red queda a consideración del usuario. Sin embargo, los distintos análisis realizados en este trabajo indican que la dimensión del modelo de velocidades es sumamente importante en el diseño óptimo de una red sísmica; ya que los resultados, como la disposición de los sensores y sensibilidad de la red, cambian notablemente.

7. Referencias

- Ammon, C. J. (2010). Waves, Seismograms and Seismometers. Class Notes. Department of Geosciences. College of Earth and Mineral Sciences.
- Allen, T. I. y Wald, D. J. (2007). Topographic slope as a proxy for seismic site-conditions (VS30) and amplification around the globe, U.S. Geol. Surv. Open-File Rept. 2007-1357, 69.
- Allen, T. I. y Wald, D. J. (2009). On the Use of High-Resolution Topographic Data as a Proxy for Seismic Site Conditions (VS30). *Bull. Seismol. Soc. Am.* 99 (2A), 935-943. doi: <https://doi.org/10.1785/0120080255>
- Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Cisneros, G., Sánchez-Núñez, J. M., Gómez-Vasconcelos, M. G., Pola, A., Sosa-Ceballos, G., García-Tenorio, F., Reyes-Agustín, G., Osorio-Ocampo, S., García-Sánchez, L., Mendiola, I. F., Martí, J., López-Loera, H. y Benowitz, J. (2018). Geology of the Late Pliocene - Pleistocene Acoculco caldera complex, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México). *Journal of Maps*, DOI: 10.1080/17445647.2018.1531075
- Avellán, D. R., Macías, J. L., Layer, P. W., Sosa-Ceballos, G., Gómez-Vasconcelos, M. G., Cisneros-Máximo, G., Sánchez-Núñez, J. M., Martí, J., García-Tenorio, F., López-Loera, H., Pola, A y Benowitz, J. (2020). Eruptive chronology of the Acoculco caldera complex - A resurgent caldera in the eastern Trans-Mexican Volcanic Belt (México). *Journal of South American Earth Sciences*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102412>.
- Boatwright, J., Fletcher, B. y Fumal, T. E. (1991). A general inversion scheme for source, site and propagation characteristics using multiply recorded sets of moderate-sized earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.* 81, 1754-1782.
- Bormann, P. y Wielandt, E. (2003). Seismic signals and noise. *New manual of seismological observatory practice*, 2, 1-62. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch4
- Brune, J. W. (1970). Tectonic stress and the spectra of the seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.* 75, 4997-5009.

Buijze, L., van Bijsterveldt, L., Cremer, H., Jaarsma, B., Paap, B., Veldkamp, H., Wassing, B., van Wees, J., van Yperen, G. y ter Heege, J. (2019). Induced seismicity in geothermal systems: Occurrences worldwide and implications for the Netherlands. European Geothermal Congress 2019.

Calcagno, P., Evanno, G., Trumpy, E., Gutiérrez-Negrín, L.C., Macías, J.L., Carrasco-Núñez, G., Liotta, D. y el equipo GEMex T3.1 (2018). Preliminary 3-D geological models of los Humeros and Acoculco geothermal fields (Mexico) – H2020 GEMex project. *Adv. Geosci.* 1, 1-13.

Eberhart-Phillips, D. (1993). Local earthquake tomography: Earthquake source regions, in *Seismic Tomography: Theory and Practice*, editado por H. M. Iyer y K. Hirahara, 613-643, Chapman and Hall, London, U. K.

García-Palomo, A., Macías, J.L., Tolson, G., Valdez, G., Mora, J.C. (2002). Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan región, east-central sector of the TransMexican Volcanic Belt. *Geofis. Int.* 41, 133-150.

Guerrero-Martínez, F. J., Prol-Ledesma, R. M., Granados-Pastrana, E. J., Carrillo-De La Cruz, J. L., González-Díaz, A. A. y González-Romo, I. A. (2019). Three-Dimensional Temperature Simulations of Acoculco Caldera Complex, Puebla, Mexico. *PROCEEDINGS*.

Equipo de trabajo GEMex PT5.2 (2019). Reporte Interno.

Havskov, J. y Ottemöller, L. (2010b). Routine data processing in earthquake seismology. Springer Science+ Business Media BV, DOI 10.1007/978-90-481-8697-6, 10, 978-90.

Havskov, J., Ottemöller, L., Trnkoczy, A. y Bormann, P., 2011. Chapter 8: Seismic Networks. DOI: 10.2312/GFZ.NMSOP-2_ch8

Ibarra-Bustos, P.D. (2019). Criticalidad de la corteza superior y sus relaciones tectónicas con el sistema geotérmico de Acoculco, Puebla a partir de registros de ruido sísmico. Pablo David Ibarra Bustos. Tesis de Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio, INICIT-UMSNH.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2019). Mapas: Continuo de elevaciones mexicano (CEM). <https://www.inegi.org.mx>

Kiefer, J. y Wolfowitz, J. (1960). The equivalence of two extremum problems. *Can. Math.* 12, 363-366.

Lengliné, O., Lamourette, L., Vivin, L., Cuenot, N. y Schmittbuhl, J. (2014). Fluid-induced earthquakes with variable stress drop. *J. Geophys. Res. Solid Earth.* 119, 8900-8913, doi:10-1002/2014JB011282.

Lermo, J., Antayhua, Y., Bernal, I., Venegas, S. y Arredondo, J. (2009). Monitoreo sísmico en la zona geotérmica de Acoculco, Pue., México. *Geotermia*, 22, 40-58.

Lienert, B. R., Frazer, L. N. y Rudman, A. J. (1986). Evaluation of Seismometer Arrays for Earthquakes Location. *Departamento of natural resources geological survey occasional*, 52, 1-53.

Lomax, A., Virieux, L., Volant, P. y Berge-Thierry, C. (2000). Probabilistic earthquake location in 3D and layered models: Introduction of a Metropolis-Gibbs method and comparison with linear locations, in *Advances Seismic Event Location*, C. H. Thurber and N. Rabinowitz (Editors), Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 101-134.

López-Hernández, A. y Castillo-Hernández, D. (1997). Exploratory Drilling at Acoculco, Puebla, Mexico: A Hydrothermal System With Only Nonthermal Manifestations. *Geothermal Resources Council Transactions*, 21, 429-433.

López-Hernández, A. (2009). Evolución volcánica del complejo Tulancingo-Acoculco y su sistema hidrotermal, Estados de Hidalgo y Puebla, México. Tesis doctoral. Universidad Nacional Autónoma de México.

López-Hernández, A., García-Estrada, G., Aguirre-Díaz, G., González-Partida, E., Palma-Guzmán, H. y Quijano-León, J. L. (2009). Hydrothermal activity in the Tulancingo-Acoculco Caldera Complex, central Mexico: Exploratory studies. *Geothermics*, 38, 279-293.

Maldonado-Hernández, L. T., Perton, M., Figueroa-Soto, A., Caló, M. y Jousset, P. (2019). Exploración sísmica de la caldera de Acoculco, Puebla. Resumen de Reunión Anual de la Unión Geofísica Mexicana (RAUGM). Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, UMSNH.

McNamara, D. E., y Buland, R. P. (2004). Ambient noise levels in the continental United States. *Bulletin of the seismological society of America*, 94(4), 1517-1527.

McNamara, D. E., Hutt, C. R., Gee, L. S., Benz, H. M., y Buland, R. P. (2009). A method to establish seismic noise baselines for automated station assessment. *Seismological Research Letters*, 80(4), 628-637.

Peterson, J. (1993). Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Geol. Survey Open-File Report, 93-322.

Rabinowitz, N. y Steinberg, D. (1990). Optimal configuration of a seismographic network: A statistical approach, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 80, no. 1, 187-196.

Rabinowitz, N. y Steinberg, D. (2000). A statistical outlook on the problem of seismic network configuration, in *Advances in Seismic Event Location*, C. H. Thurber and N. Rabinowitz (Editors), Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, The Netherlands, 51-69.

Schoenball, M. (2014). Evolution of stress and seismicity in fractured geothermal reservoirs. Tesis doctoral. Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Sosa-Ceballos, G., Macías, J.L., Avellán, D.R., Salazar-Hermenegildo, N., Boijseauneau-López, M.E., Pérez-Orozco, J.D. (2018). The Acoculco Caldera Complex magmas: genesis, evolution and relation with the Acoculco geothermal system. *J. Volcanol Geotherm. Res.* 358, 288-306.

Terzaghi, K. (1936). The shearing resistance of saturated soils and the angle between planes of shear. In *Proceedings of the First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 54-56.

Thurber, C. H. (1993). Local earthquake tomography: Velocities and V_p/V_s -theory, in *Seismic Tomography: Theory and Practice*, editado por H. M. Iyer and K. Hirahara, 563-583, Chapman and Hall, London.

Thurber, C., y Eberhart-Phillips, D. (1999). Local earthquake tomography with flexible gridding. *Computers & Geosciences*, 25, 809-818.

Tramelli, A., Troise, C., De Natale, G. y Orazi, M. (2013). A new method for optimization and testing of microseismic networks: An application to Campi Flegrei (Southern Italy). *Bulletin of Seismological Society of America*, 103, 3, 1679-1691. Doi: 10.1785/0120120211

Tramelli A, Peluso R, Orazi M, Troise C, Natale GD (2015). A FORTRAN Code for the Sensitivity Estimate of a Seismic Network: An Application to Campi Flegrei. *J Pet Environ Biotechnol*, 6: 254. doi:10.4172/2157-7463.1000254

Viggiano-Guerra, J. C., Flores Armenta, M. y Ramírez Silva, G. R. (2011). Evolución del sistema geotérmico de Aocolco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y de otras consideraciones. *Geotermia*, 24, 14-24.