

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA

UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO

MAESTRÍA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLES



TESIS:

**“APLICACIÓN DEL MÉTODO DE COCIENTES ESPECTRALES
PARA EXPLORACIÓN MINERA: CASO MINA LA INDIA EN
SAHUARIPA, SONORA”**

PRESENTA:

GILBERTO SANTIAGO MORENO HURTADO

COMITÉ TUTORIAL:

**Dr. Daniel Morales Romero
Dr. David García Martínez
Dra. Carmen Isela Ortega Rosas**

HERMOSILLO, SONORA.

ENERO 2020

UNIVERSIDAD ESTATAL DE SONORA

UNIDAD ACADÉMICA HERMOSILLO

MAESTRIA EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN BIOSUSTENTABLES

T E S I S

**APLICACIÓN DEL MÉTODO DE COCIENTES ESPECTRALES PARA
EXPLORACIÓN MINERA: CASO MINA LA INDIA EN SAHUARIPA, SONORA**

COMITÉ REVISOR

Presidente



Dr. Daniel Morales Romero

Secretario



Dr. David García Martínez

Vocal



Dra. Carmen Isela Ortega Rosas

Hermosillo, Sonora.

Enero, 2020.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Agnico Eagle México, la Asociación de Ingenieros en Minas Metalurgistas y Geólogos de México (AIMMGM Distrito Sonora), en especial el Ing. Fernando Oviedo, por facilitar y permitir realizar el trabajo de la presente investigación en la mina La India. Al Ing. Iván Romero y a todo el personal del departamento de Exploración-Operación por ayudarnos en la logística de trabajo de campo y por toda su atención durante nuestra estancia dentro y fuera de la mina.

A mis padres, María del Rosario y Santiago; mis hermanos Ramón y Demetrio, que siempre les estaré agradecido de por vida por todo su apoyo en todos los proyectos que he realizado y por ayudarme a salir adelante.

A mi comité de tesis, Dr. David Garcia, Dr. Daniel Romero, Dra. Carmen Ortega, les agradezco infinitamente soportar y creer en mi proyecto de principio a fin y por todas sus enseñanzas durante el posgrado. A mis maestros, Dr Jesus Quiroz, Dr. Alberto Macías, Dra. Lourdes Rivera, Dra. Mabeth Burgos y a la Lic. Rocío Ramos por todo su tiempo y paciencia al adentrarme al área de la sostenibilidad. A mis compañeros de posgrado, Cesar Valencia, Jesus Pacheco y Marco Martínez que siempre estuvimos juntos para brindarnos ayuda en los momentos más complicados durante el posgrado.

A todos los maestros del P.E. de Ingeniería en Geociencias y al Dr. Leobardo López, por animarme a ingresar a estudiar un posgrado y siempre darme ánimo en los momentos más difíciles, gracias por escucharme y por todos sus consejos, los cuales me fueron muy útiles durante estos dos años. A los estudiantes Hiram Morales y Luis Ortega por su apoyo en el trabajo de campo y por ayudarme en procesar los datos.

A todos mis amigos y a Lydia, por siempre creer en mí y en alentarme a seguir las ideas y metas que me he propuesto, por su amistad, por estar en los buenos y malos momentos y por dejarme y ser parte de su vida. Al alprazolam y escitalopram...

INDICE

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	8
1.2 OBJETIVO	9
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.4 HIPÓTESIS.....	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	10
2.1-EXPLORACIÓN MINERA	11
2.2 PRINCIPALES TÉCNICAS UTILIZADAS EN LA EXPLORACIÓN GEOLÓGICO-MINERA	11
2.2.1 <i>Sensoria remota</i>	11
2.2.2 <i>Cartografía geológica</i>	12
2.2.3 <i>Muestreo de obras mineras antiguas</i>	12
2.2.4 <i>Muestreo geoquímico</i>	13
2.2.5 <i>Perforación</i>	13
2.2.6 <i>Geofísica</i>	14
2.3 - MÉTODO DE COCIENTES ESPECTRALES (H/V).....	16
3- ANTECEDENTES.....	18
CAPITULO III: METODOLOGÍA.....	25
3.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	25
3.1.1 <i>Localización</i>	25
3.1.2- <i>Geología regional</i>	26
3.1.3- <i>Distrito minero Mulatos</i>	27
3.1.4- <i>Geología local – Área mina La India</i>	29
3.1.5- <i>Mineralización</i>	33
3.1.6- <i>Tipo de yacimiento</i>	34
3.2- TRABAJO DE CAMPO	34

3.3- MUESTREO	36
3.4- MANEJO DE DATOS	39
CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	42
4.1 COCIENTES ESPECTRALES DEL ÁREA EL REALITO	42
<i>Punto ER-01</i>	42
<i>Punto ER-02</i>	43
<i>Punto ER-03</i>	44
<i>Punto ER-04</i>	45
<i>Punto ER-05</i>	46
<i>Punto ER-06</i>	47
<i>Punto ER-07</i>	48
<i>Punto ER-08</i>	49
<i>Punto ER-09</i>	50
4.2 COCIENTES ESPECTRALES DEL ÁREA LOS TUBOS.....	52
<i>Punto LT-01</i>	52
<i>Punto LT-02</i>	53
<i>Punto LT-03</i>	54
<i>Punto LT-04</i>	55
<i>Punto LT-05</i>	56
<i>Punto LT-06</i>	57
<i>Punto LT-07</i>	58
<i>Punto LT-08</i>	59
<i>Punto LT-09</i>	60
<i>Punto LT-10</i>	61

<i>Punto LT-11</i>	62
<i>Punto LT-12</i>	63
4.3 CORRELACIÓN ESPACIAL ENTRE EL COCIENTE ESPECTRALES Y LA GEOLOGÍA DEL ÁREA.....	64
4.3.1 <i>El Realito</i>	64
4.3.2 <i>Los Tubos</i>	79
4.4 TABLA DE RESUMEN.....	84
4.5 DISCUSIÓN	85
5. CONCLUSIÓN	90
BIBLIOGRAFIA	93

INDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Participación de los metales y minerales en el valor de la producción minero-metalúrgica en 2019.....	1
Fig. 2. Ciclo de vida de un proyecto minero.	10
Fig. 3. Obtención de Imágenes de satélite multiespectral sobre la superficie terrestre.	12
Fig. 4. Mapa de isoperiodos de sitio para la ciudad de Mayagüez Puerto Rico.	18
Fig. 5. Mapa de curvas de profundidad mediante la aplicación de método H/V en Colonia, Alemania.	19
Fig. 6. Se muestra que la Frecuencia obtenida a los 0.5 Hz, 1 Hz, 4 Hz y >.	20
Fig. 7. Mapa de frecuencias naturales localizado en el CRIT Hermosillo.	21
Fig. 8. Perfiles geoelectricos Norte - Sur y Este - Oeste. Fuente: Estudio geológico-geofísico de riesgos ambientales para el sitio del CRIT.	22
Fig. 9. Zonificación del riesgo sísmico para la localidad de Loreto, Baja California Sur.....	23
Fig. 10. Se muestra: a) Frecuencia natural de vibración de muestra de riolita en 10.5 Hz y b) Frecuencia natural de vibración de una veta de cuarzo de 29 Hz.	24
Fig. 11. Localización del área de estudio.	25
Fig. 12. Mapa geológico regional. Tomado y modificado del Servicio Geológico Mexicano H12-12 TECORIPA,	27
Fig. 13. Columna estratigráfica del distrito Mulatos.	28
Fig. 14. Geología local del proyecto La India.	30
Fig. 15. Columna estratigráfica del área de La India.	31
Fig. 16. Columna estratigráfica del área El Realito.	32
Fig. 17. Mapa de localización de los proyectos El Realito y Los Tubos.	35
Fig. 18. Distribución de puntos de muestreo en el área de El Realito.....	36
Fig. 19. Distribución de puntos de muestreo en el área de Los Tubos.....	37

Fig. 20. Acelerógrafo Guralp 5TD y ventana de registro de las componentes Norte, Este y Vertical.	37
Fig. 21. Instalación del acelerógrafo Guralp 5TD.....	38
Fig 22. Procedimiento para convertir archivos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.	39
Fig. 23. Procedimiento para la aplicación del método de cocientes espectrales.	40
Fig. 24. Procedimiento para visualizar información.	40
Fig. 25. Cociente espectral del punto ER-01.....	42
Fig. 26. Cociente espectral del punto ER-02.....	43
Fig. 27. Cociente espectral del punto ER-03.....	44
Fig. 28. Cociente espectral del punto ER-04.....	45
Fig. 29. Cociente espectral del punto ER-05.....	46
Fig. 30. Cociente espectral del punto ER-06.....	47
Fig. 31. Cociente espectral del punto ER-07.....	48
Fig. 32. Cociente espectral del punto ER-08.....	49
Fig. 33. Cociente espectral del punto ER-09.....	50
Fig. 34. Cocientes espectral del punto LT-01.	52
Fig. 35. Cociente espectral del punto LT-02.....	53
Fig. 36. Cociente espectral del punto LT-03.....	54
Fig. 37. Cociente espectral del punto LT-04.....	55
Fig. 38. Cociente espectral del punto LT-05.....	56
Fig. 39. Cociente espectral del punto LT-06.....	57
Fig. 40. Cociente espectral del punto LT-07.....	58

Fig. 41. Cociente espectral del punto LT-08.....	59
Fig. 42. Cociente espectral del punto LT-09.....	60
Fig. 43. Cociente espectral del punto LT-10.....	61
Fig. 44. Cociente espectral del punto LT-11.....	62
Fig. 45. Cociente espectral del punto LT-12.....	63
Fig. 46. Distribución espacial de frecuencias superficiales del área El Realito.....	64
Fig. 47. Brecha hidrotermal aflorando en el área El Realito.....	65
Fig. 48. Medición del punto ER-07 sobre la unidad V1TDI.....	66
Fig. 49. Sección litológica 3178095N.....	67
Fig. 50. Sección de alteraciones 3178095N.....	67
Fig. 51. Muestra de dacita porfídica (DacP) para el punto ER-05.....	68
Fig. 52. Muestra de brecha hidrotermal (HBx) para el punto ER-05.....	68
Fig. 53. Sección litológica 3178112N.....	69
Fig. 54. Sección de alteraciones 3178112N.....	69
Fig. 55. Muestra del contacto entre dacita porfídica (DacP) y brecha hidrotermal (HBx) para el punto ER-03.....	70
Fig. 56. Sección litológica 3178130N.....	71
Fig. 57. Sección de alteraciones 3178130N.....	71
Fig. 58. Muestra de dacita porfídica (DacP) con alteración argílica avanzada (SIC) para el punto ER-03.....	72
Fig. 59. Sección litológica 3178236N.....	73
Fig. 60. Sección de alteraciones 3178236N.....	73
Fig. 61. Muestra de toba lítica (V1TDI) para el punto ER-07.....	74

Fig. 62. Muestra de dacita porfídica (DacP) para el punto ER-07.	74
Fig. 63. Sección litológica 3178307N.	75
Fig. 64. Sección de alteraciones 3178307N.	75
Fig. 65. Muestra de andesita (AndF) para los puntos ER-07 y 08 con presencia de arcillas.	76
Fig. 66. Muestra de la unidad volcániclaística para el punto ER-09.	76
Fig. 67. Material fragmentado considerado como parte de fallamiento.	77
Fig. 68. Muestra de andesita (AndF) para el punto ER-09.	77
Fig. 69. Sección litológica 3178342N.	78
Fig. 70. Sección de alteraciones 3178342N.	78
Fig. 71. Ejemplo de conducto alimentador localizado a profundidad.	78
Fig. 72. Frecuencias superficiales del área Los Tubos.	79
Fig. 73. Segundo rango de frecuencias del área Los Tubos.	80
Fig. 74. Tercer rango de frecuencias del área Los Tubos.	81
Fig. 75. Cuarto rango de frecuencias del área Los Tubos.	82

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Participación y volumen en valor del estado de Sonora en la producción nacional.	2
Tabla 2. Resultados obtenidos para el área El Realito y Los Tubos.	84
Tabla 3. Rangos de frecuencias propuestos para las unidades litológicas del proyecto El Realito y Los Tubos.	90

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, México ha sido reconocido por tener un alto potencial en recursos minerales. Durante el 2019, la participación del sector minero-metalúrgico representó el 2.3% del PIB Nacional, aportando 228 mil 296 millones de pesos. Los metales con mayor participación en la producción minero-metalúrgica en México son: oro, cobre, plata, zinc, fierro, plomo, carbón, sal, entre otros (Fig. 1) (CAMIMEX, 2020).

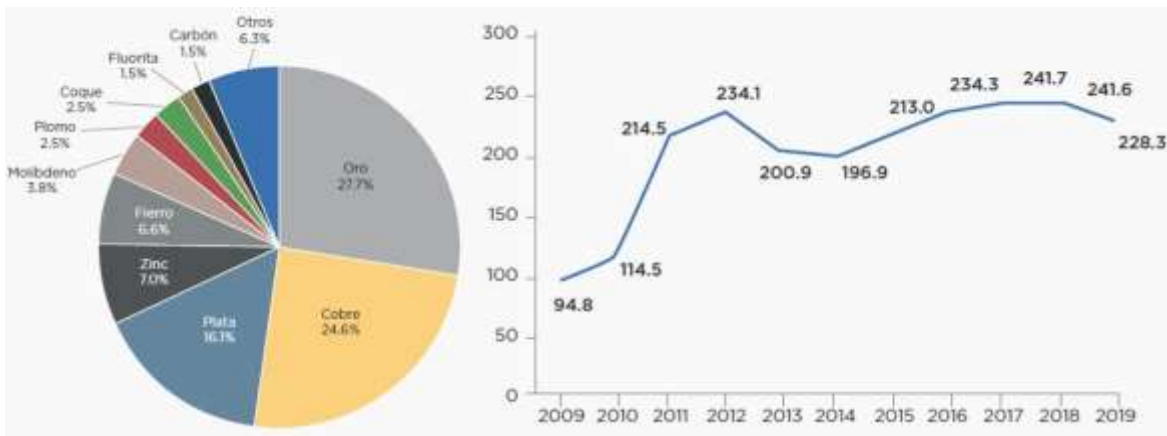


Fig. 1. Participación de los metales y minerales en el valor de la producción minero-metalúrgica en 2019.

Durante el 2020, la Cámara Minera de México dio a conocer las cifras de inversión en exploración minera en México, invirtiéndose solamente durante el 2019 un total de 376 millones de dólares en esta actividad, experimentando una disminución del 25% respecto al año anterior. Uno de los factores de mayor influencia fue la incertidumbre de los inversionistas ante las políticas mineras manifestadas por el nuevo gobierno. Es muy importante aclarar que la minería es considerada desde el punto de vista del inversionista como una actividad de alto riesgo, pues la mayoría de los proyectos de exploración no tendrán el potencial de llegar a la etapa de explotación.

Los diversos eventos geológicos y tectónicos ocurridos en Sonora han generado las condiciones necesarias para el emplazamiento de diversos depósitos minerales metálicos y no metálicos. Actualmente en el estado, se dispone de un total de 57 minas en explotación;

entre metálicos, no metálicos y bancos de material. Asimismo, al presente se tienen detectadas 59 empresas realizando trabajos de exploración en todo el estado, siendo la mayoría procedente de Canadá. De igual forma, Sonora es reconocida por ocupar el primer lugar en la producción de cobre, oro, y siendo el único productor de molibdeno (Tabla 1); dentro de los no metálicos se destaca la producción de grafito y wollastonita (SGM, 2018).

Tabla 1. Participación y volumen en valor del estado de Sonora en la producción nacional.

PRODUCTOS	VOLUMEN	VALOR (PESOS)	PARTICIPACIÓN (%)
ORO (KG)	42,290.40	32,319,611,392.46	28.4
PLATA (KG)	408,842.00	4,264,328,630.15	3.73
COBRE	624,265.00	72,642,985,237.60	63.68
FIERRO	1,500.00	1,047,634.63	9.18
MOLIBDENO	13,985.00	4,621,829,203.03	100
SELENIO	112.00	80,183,100.00	100

Durante el desarrollo de cualquier proyecto minero, la exploración juega un papel fundamental para el éxito de este. En esta etapa se inicia la búsqueda de un yacimiento mineral con potencial de ser económicamente explotable, en otras palabras, que represente un negocio su exploración, explotación y beneficio. Previamente las compañías mineras o de exploración realizan una prospección general en las áreas de interés, iniciando con una investigación bibliográfica, información técnica disponible de trabajos antiguos, visitas de campo, entre otras. Lo anterior con el objetivo de poder detectar las zonas que presenten condiciones, principalmente geológicas, para la búsqueda de un depósito mineral con potencial económico.

Los trabajos de exploración minera requieren de diversas técnicas, tecnologías, ciencias y disciplinas durante su desarrollo. A manera de inicio, se planifican campañas de muestreo las cuales consisten en la obtención de muestras de roca, suelo y sedimento de arroyos presentes en el lugar. Posteriormente los resultados obtenidos del muestreo junto con los trabajos de cartografía geológica ayudan a definir la continuidad del proyecto. La

exploración minera se puede realizar de manera directa e indirecta. La primera está enfocada en la elaboración de zanjas, exploración de pozos o socavones y finalmente la perforación con broca de diamante (DD) o circulación inversa (RC). El objetivo es definir con mayor precisión los límites de contactos litológicos, alteraciones y finalmente conocer la concentración de los elementos de interés contenidos en la roca (oro, plata, cobre, plomo, zinc, etc.). De esta manera, la perforación se reconoce como una parte importante en la evaluación de un proyecto minero debido a que es el punto de partida para el cálculo de reservas de un yacimiento (William, 1978). Por su parte, las técnicas de exploración indirecta o métodos de exploración geofísica buscan definir la geometría de un “target” (blanco u objetivo) o de una estructura geológica mediante la determinación de los parámetros físicos de la roca en el subsuelo como su diferencia de densidad, velocidad y conductividad eléctrica, por mencionar algunas características. En la minería, la búsqueda de yacimientos por medio de estos métodos está liderada principalmente por los métodos gravimétricos, magnéticos, eléctricos, electromagnéticos y sísmicos (Telford et al., 1990). En la actualidad, no existe una metodología establecida en lo que respecta a los trabajos de exploración minera, sin embargo, ambas técnicas se complementan entre sí por lo que dependerá mucho de las condiciones geológicas del proyecto y el capital con el que disponga la compañía en el momento para la aplicación de la más adecuada o una combinación de ambas.

La actividad minera genera bastantes contribuciones a la economía y desarrollo de un país, sin embargo, no está exenta de generar impactos ambientales diversos como lo es la pérdida de suelo por erosión, modificación del paisaje, afectación del agua superficial y subterránea, sedimentación, generación de ruido y vibración, contaminación por polvo, alteración a la flora y fauna, inestabilidad del terreno y subsidencia, este último generado por la minería subterránea (Ayala-Carcedo et al., 2004). Desde el punto de vista ambiental y considerando el reporte de la Conferencia de Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas A/CONF.216/16 (20-21 de junio del 2012), los minerales y metales hacen una contribución importante a la economía mundial y a la sociedad. Las actividades mineras, además de maximizar el beneficio económico y social, deben de abordar de manera efectiva los efectos

negativos ambientales y sociales, mediante una fuerte regulación a las industrias mineras, mediante marcos legales, normativas, políticas y prácticas efectivas que brinden beneficios económicos, sociales y ambientales.

En México, además de la LGPEEA (2018), la Norma Ambiental que aplica a la exploración minera está publicada en el Diario Oficial de la Federación, como la NOM-120-SEMARNAT-2011, que reglamenta las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa, la mayoría enfocada en establecer las dimensiones de caminos, campamentos, patios de maniobras, planillas de barrenación, pozos, zanjas y socavones; ocasionando el desmonte de especies vegetales. La Norma en particular también hace énfasis en uso del agua en los trabajos de perforación, la cual debe ser reciclada o recirculada, así como el uso de aditivos o lodos de perforación del tipo biodegradables. Para los trabajos de exploración geofísica o indirecta, no existe una Normatividad Ambiental en México que aplique directamente a esta actividad.

Actualmente, la información de la aplicación de este método en empresas durante la etapa de exploración minera es escasa, por lo que han optado proponer el método de cocientes espectrales, HSVR o Nakamura para utilizarlos en esta área. Este método en particular es considerado como un método de fuente sísmica pasiva dentro de las técnicas de exploración indirecta. Nakamura (1988) propuso el uso de los espectros de Fourier correspondientes a las componentes vertical y horizontal para determinar la frecuencia natural de vibración del suelo con la finalidad de ser utilizada en la zonificación de riesgo sísmico, el cual utiliza ruido sísmico ambiental como fuente de excitación y tiene la ventaja de generarse de forma continua (García-Jerez, 2010).

El método de cocientes espectrales se caracteriza por no requerir de una fuente generadora de vibración, como lo puede ser una explosión o el impacto de un martillo, a diferencia de otros métodos sísmicos. Los métodos de prospección de sísmica pasiva han aumentado su popularidad durante los últimos años en diversas áreas de las ciencias de la Tierra debido a que requieren de la vibración o resonancia natural de terreno permitiendo

realizar su exploración a bajo costo, reducción de impacto ambiental, por el desarrollo de caminos o cualquier tipo de desmonte, en los cuales se puede mencionar los trabajos de (Mundepi et al., (2015), (Kuo et al., (2016), (Michel et al., (2016), (Ullah et al., (2016) y (Gosar, (2017); pero su aplicación se ha realizado desde hace cincuenta años aproximadamente (Cuadra-Monreal, 2007).

El objetivo principal de este trabajo es probar la factibilidad de este método en la búsqueda de yacimientos minerales con característica de ser potencialmente económicos. La aplicación de este método estuvo formalmente en colaboración con la Empresa Agnico Eagle en la Unidad Minera La India dentro del estado de Sonora, México. La información acerca de la implementación del método de cocientes espectrales en dicha industria es escasa a nivel mundial, incluso en México, no dispone de registros publicados por compañías mineras. En Sonora, López-Pineda (2011) presenta un informe técnico para la compañía Minera México-Grupo México; en el cual se propone el uso del método de cocientes espectrales para la detección de vetas de cuarzo en proyectos de exploración minera. De igual forma, se tiene registro de un trabajo realizado por el Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora (CESUES, ahora Universidad del Estado de Sonora UES), el cual consintió en medir la frecuencia natural de materiales geológicos a nivel laboratorio, entre las muestras analizadas se pueden destacar minerales de mena wollastonita, galena, barita, etc. (Moreno-Hurtado, 2015). No obstante, se desconoce el éxito en la aplicación de esta técnica la cual puede considerarse en un futuro cercano como una herramienta alternativa, accesible y aplicable a la prospección minera.

Durante las últimas décadas, la imagen de la Industria Minera se ha visto afectada debido a los diversos impactos ambientales y sociales que genera. Durante el desarrollo de los trabajos de exploración, el impacto ambiental generado no es significativo a comparación de la explotación, en cambio, factores como una supervisión deficiente por parte de las empresas han demostrado que los impactos ambientales en la exploración minera pueden ser considerables.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estado de Sonora tiene el primer lugar en la inversión de proyectos de exploración en todo el país. La etapa de exploración geológico-minera, desde su inicio, implica una inversión económica considerable y de alto riesgo, pues no hay certeza de que esta se recupere. El desarrollo de una campaña de este tipo requiere de muchos elementos como el establecimiento de campamentos (no necesario), contratación de personal especializado y auxiliar, adquisición y renta de vehículos de trabajo, además del resto de gastos adicionales que implica tener una oficina de trabajo.

Los costos de una campaña de exploración pueden variar conforme a los contratos realizados, un ejemplo de esto son los precios de perforación con diamante que suelen estar entre los 100 a 150 dólares por metro perforado y mediante circulación inversa en 80 dólares el metro perforado aproximadamente, sin considerar los costos de “*stand by*” (tiempo de espera o tiempo muerto), que rondan alrededor de 100 dólares por hora. Cada una de las etapas anteriores y la misma perforación deben ser altamente justificadas geológicamente debido a la alta incertidumbre que se tiene en la búsqueda de un yacimiento mineral que sea económicamente explotable.

El elevado costo de la aplicación de los métodos de exploración indirecta (métodos geofísicos), no es la excepción; la selección del método a utilizar y su efectividad dependerán de lo que se desea encontrar, pues existe una variedad de métodos para medir diferentes propiedades en el subsuelo. Un ejemplo es el método eléctrico de polarización inducida (IP), que consiste en medir la conductividad o caídas de potencial del terreno mediante la inyección de corriente eléctrica de alto voltaje; la implementación de esta técnica tiene un costo de 2,200 dólares por día de trabajo, sin considerar los costos de movilización, visita del terreno, preparación del equipo, desmovilización y el “*stand by*” que tiene un costo de 900 dólares por día.

Dentro del aspecto ambiental, la exploración minera es considerada como una actividad que genera un impacto ambiental menor o poco significativo, si es comparada con la explotación minera y la extracción metalúrgica. Los principales impactos ambientales generados en la exploración minera es la afectación de flora y fauna mediante la construcción, rehabilitación de caminos y planillas de perforación; afectaciones a la atmosfera por la generación de polvo y gases por el uso de maquinaria. Los informes preventivos referentes a los trabajos de exploración minera directa, en algunos casos, no se especifica claramente el impacto ambiental cuantificado; debido a que no se incluye un conteo de flora y fauna del lugar a impactar, la cantidad de recursos naturales utilizados, como suele ser la cantidad de agua para riego de caminos, programa de reforestación y perforación.

Dado lo anterior, en este trabajo se propone aplicar el método de cocientes espectrales como una alternativa a los métodos de exploración ya establecidos. Por medio del análisis de ruido sísmico ambiental se pretende inferir la geología del subsuelo y para fines de este trabajo la experimentación se realizará en la mina La India, propiedad de la empresa Agnico Eagle. Con la implementación de este método se busca apoyar, en las diferentes etapas de la exploración geológica-minera, la interpretación de la geología del subsuelo, geología estructural y la definición de cuerpos mineralizados con posibilidad de ser explotados a futuro. Una de las ventajas que presentaría el éxito de esta técnica es el de beneficiar a las empresas en el aspecto económico, pues se ahorraría en el uso de personal, adquisición y renta de maquinaria, logística de transporte y materiales; ambos para la exploración directa e indirecta. Por otra parte, una de las bondades de esta técnica es que resulta ser una técnica sumamente amigable con el ambiente debido a que no requiere desmontes de vegetación para caminos, reubicación de flora y fauna, y no genera ruidos o vibraciones en el lugar.

Una de las principales desventajas es que el método de cocientes espectrales tiene una escasa aplicación en la búsqueda de yacimientos minerales alrededor del mundo, solo se dispone de escasos trabajos técnicos acerca de este tema; por lo que se desconoce aún la precisión que pueda tener en los resultados, pero considerando la confiabilidad que ofrece esta metodología en diferentes disciplinas en las ciencias de la Tierra e ingeniería, la facilidad

del obtener datos y procesar la información, la hacen una alternativa a utilizar en la búsqueda de yacimientos minerales, así como una técnica de prospección minera a bajo costo.

1.1 JUSTIFICACIÓN

Actualmente la aplicación de los diversos métodos de exploración, tanto geofísicos o de perforación, se ven limitados por los altos costos para algunas compañías mineras, especialmente el sector del pequeño minero; por lo que se propone el método de cocientes espectrales como una herramienta alternativa, accesible y aplicable a la prospección minera. La aplicación de esta técnica como herramienta de exploración geológico-minera, apoyada por la empresa Agnico Eagle en su Unidad Minera La India, busca ayudar en la reducción de costos de logística durante las etapas tempranas de exploración, con la finalidad de reducir el número de personal, maquinaria a utilizar y elementos que impacten al ambiente. Con la implementación y desarrollo de esta técnica, se tiene contemplado la reducción del impacto ambiental en la disminución de las áreas de desmonte para caminos de acceso, rehabilitación y plazas de perforación, así como la reducción del uso de sustancias contaminantes y el uso de recursos naturales como el agua, que se verán reflejados en la seguridad y salud del trabajador.

Considerando lo anterior, se tiene la posibilidad de generar una nueva herramienta de prospección geofísica, aplicable a la búsqueda de yacimientos minerales, mediante un nuevo enfoque a lo que respecta al método de cocientes espectrales, siendo una herramienta de fácil uso y de bajo costo.

1.2 OBJETIVO

Comprobar la presencia de cuerpos mineralizados con potencial de ser económicamente explotables a través del método de cocientes espectrales mediante el análisis de la frecuencia natural de vibración en superficie para ser utilizado en el área de la exploración geológico-minera.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Determinar la frecuencia natural de vibración de los diferentes tipos de roca que se localizan en el área de estudio.

Comparar los resultados obtenidos con la información proporcionada por la empresa con la finalidad de hacer las comparaciones entre el método propuesto y los métodos tradicionales.

Generar un mapa modelo que muestre la distribución de la frecuencia natural de vibración de los distintos materiales geológicos y hacer el análisis correspondiente para encontrar asociaciones.

1.4 HIPÓTESIS

La aplicación del método de cocientes espectrales puede considerarse como una herramienta factible para localizar cuerpos geológicos a profundidad, por lo tanto, su principal uso podría apoyar a los métodos de exploración minera y ser aplicable en las etapas iniciales de dicha área.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En el día a día, los minerales están presentes en todas partes, por lo tanto, por medio de la minería obtenemos las materias primas para la fabricación, construcción e industria química. Para la obtención de las materias primas, las compañías mineras requieren desarrollar procesos complejos, lentos y de alto riesgo. Las distintas fases en el desarrollo y producción exitosa de un proyecto minero implican encontrar y delimitar un cuerpo mineral por medio de la exploración. Lo anterior, seguido de la planeación y explotación del yacimiento, el procesamiento del mineral y finalmente el cierre de mina con la reclamación del lugar, esta serie de etapas en conjunto se le conoce como el “ciclo minero” (Fig. 2). El tiempo que transcurre entre el descubrimiento del depósito mineral y su explotación generalmente es largo, considerando la magnitud del proyecto (Bustillo-Revuelta, 2018).

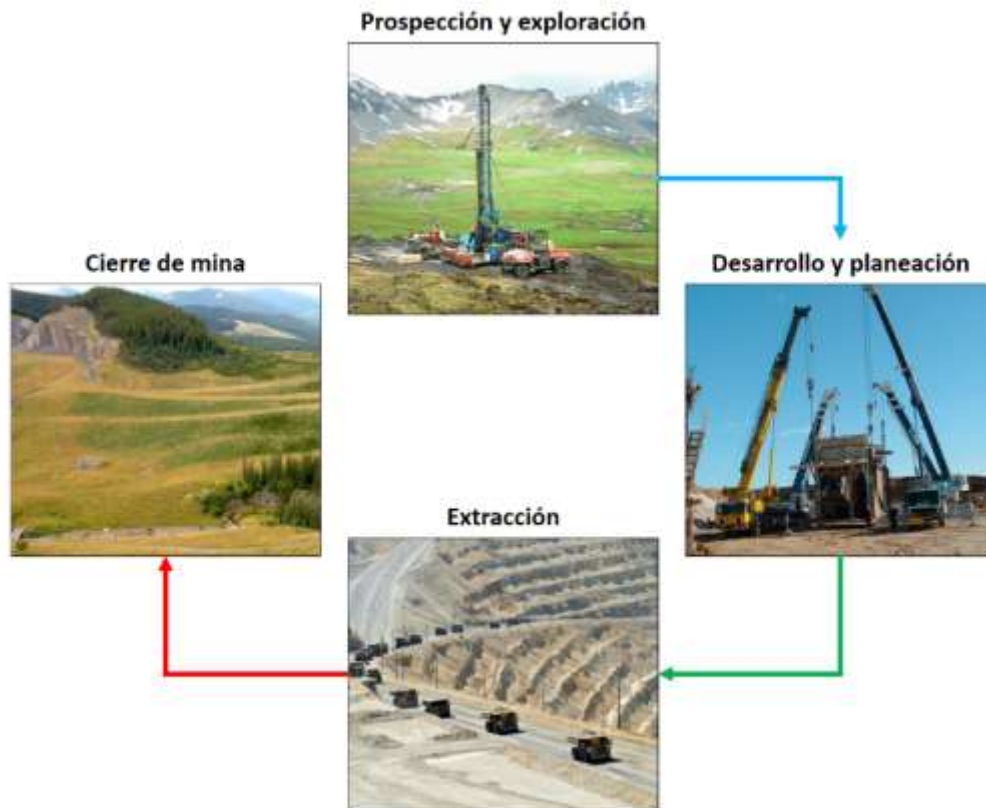


Fig. 2. Ciclo de vida de un proyecto minero.

2.1-EXPLORACIÓN MINERA

La exploración minera se puede definir como las actividades que conforman la localización y definición de un determinado producto mineral dentro de una provincia minera, en la cual, se pueden localizar distintos prospectos mineros. Un prospecto se puede definir como un volumen restringido de terreno que tiene la posibilidad de alojar un yacimiento mineral. De esta forma, un prospecto puede ser la ocurrencia de mineralización aflorando en superficie, la evidencia de antiguos trabajos mineros, nacer de una idea geológica, una anomalía geofísica o geoquímica (Marjoribanks, 2010).

2.2 PRINCIPALES TÉCNICAS UTILIZADAS EN LA EXPLORACIÓN GEOLÓGICO-MINERA

Durante la búsqueda de un yacimiento de interés económico, la etapa de exploración o prospección requiere de la aplicación de un alto nivel de conocimiento geológico, el cual es soportado mediante la aplicación de diversas técnicas, unas basadas en el criterio o experiencia, y otras mediante instrumentación. La aplicación de las diversas técnicas difiere en el costo de aplicación, por lo que su uso debe estar totalmente justificado, a continuación, se mencionan algunas de las principales técnicas aplicadas durante esta etapa:

2.2.1 Sensoria remota

El uso de las imágenes de satélite ha asistido a la exploración durante décadas, desde el lanzamiento del satélite Landsat 1, en 1972. Durante los últimos años se ha tenido la necesidad de involucrarse más en la interpretación de imágenes satelitales del tipo multiespectral y aéreas de alta resolución, para la búsqueda de yacimientos, generalmente del tipo masivo, ocultos bajo la cubierta vegetal o aluvión (Whateley, 2009). Lo anterior se basa en que los materiales en la superficie terrestre, pudiendo ser este una evidencia de alteración hidrotermal, tienen características únicas de reflexión, absorción y emisión de energía en el espectro electromagnético (Fig. 3), por lo que es posible reconocerlos e identificarlos usando

sensores multiespectrales instalados en satélites, y a las características únicas para cada material se les denomina firma espectral (Mendívil-Quijada, 2012).



Fig. 3. Obtención de Imágenes de satélite multiespectral sobre la superficie terrestre.

2.2.2 Cartografía geológica

Uno de los elementos claves en la exploración de un proyecto es la elaboración de un mapa geológico, su escala y detalle dependerá del programa de exploración realizado. La cartografía geológica de un prospecto de yacimiento mineral, desde el punto de vista de la geología económica, es similar a la cartografía geológica convencional. En el caso de la geología económica, la atención se presta en las zonas de mineralización y alteraciones hidrotermales. que deben evaluados junto con la evaluación geología con base a las características del modelo geológico buscado (Moon et al., 2009).

2.2.3 Muestreo de obras mineras antiguas

Algunos prospectos mineros contienen o consideran como punto de partida minas antiguas, siendo estos puntos atractivos como objetivo de exploración. Durante esta etapa es

importante verificar el aspecto histórico de los antiguos trabajos mineros; pero es necesario tener precaución, pues la información no puede ser confiable o estar incompleta. El objetivo principal de este trabajo es el uso de muestreo subterráneo sistemático, requiriendo una planificación considerable y la cual, es más costosa que la exploración superficial considerando la mano de obra durante su desarrollo y la seguridad implementada (Moon et al., 2009).

2.2.4 Muestreo geoquímico

El muestreo geoquímico se utiliza prácticamente en todos los programas de exploración, tomando en cuenta el análisis de una muestra hasta la química del entorno que rodea el depósito para localizarlo. Esta actividad requiere de material superficial como suelo, sedimentos, rocas y vegetación. El objetivo es definir una anomalía geoquímica la cual será distinguida de los valores de fondo (Moon, 2009). Existen diferentes tipos de muestreo dependiendo del ambiente de mineralización, como el muestreo de roca, suelo, zanjas y muestreo de placeres, los cuales son practicados en superficie. Otro tipo de muestreo es el de canal o esquirlas, utilizados en trabajos de exploración superficial y subterráneo, así como en núcleo proveniente de la perforación de diamante y las esquirlas de roca de circulación inversa (Haldar, 2018).

2.2.5 Perforación

La perforación se reconoce como el medio más efectivo para la exploración de depósitos minerales de todo tipo y otras actividades geológicas. Esta actividad facilita la definición de la geometría del subsuelo con la factibilidad de su proyección en tres dimensiones. De esta forma, puede determinarse fácilmente la presencia o ausencia del objetivo mineral y obtener así una idea sobre la ley y tamaño, probando la información geológica como tipo de roca, estratigrafía, estructuras, alteraciones y la zonificación, entre otros. Se recurre al uso de la perforación cuando los estudios geológicos preliminares como cartografía, geofísica, etc. indican la probabilidad de encontrar un depósito en el área de

interés. La precisión de los datos generados por la perforación es el factor más importante para predecir las reservas correctamente (Gandhi & Sarkar, 2016).

2.2.6 Geofísica

Gadallah y Fisher (2009) mencionan que existen diversos métodos de prospección geofísica que se implementan en tierra o alta mar. Cada uno de estos métodos mide algo relacionado con las rocas presentes en el subsuelo y su configuración geológica, por lo que, rocas y minerales varían de distintas maneras como: la densidad, susceptibilidad magnética, velocidad de propagación, resistividad y polarización inducida, auto potencial y la reflexión y transmisión de ondas electromagnéticas.

Se ha documentado que, en la minería, la búsqueda de yacimientos minerales por métodos geofísicos está liderada principalmente por los siguientes métodos que se dividen en: gravimétricos, magnéticos, eléctricos, electromagnéticos y sísmicos (Telford, Geldart y Sheriff, 2010).

Métodos gravimétricos: Involucran las variaciones del campo gravitacional de la Tierra, utilizada como herramienta de reconocimiento para la exploración de petróleo y como método secundario en la exploración de minerales metálicos, para este caso, la técnica se realiza empleando un magnetómetro portable de protones, obteniendo la medición del campo magnético total terrestre.

Métodos eléctricos: Consiste en la detección de anomalías mediante el flujo de corriente eléctrica en el suelo y dispone de una variedad de técnicas como autopotencial, telúrico, resistividad, AFMAG y polarización inducida; esto debido a la diferencia de conductividad eléctrica en diferentes rocas y minerales.

Métodos electromagnéticos: Considera la propagación continua de ondas o campos electromagnéticos en la Tierra, en algunos sistemas electromagnéticos la fuente de energía es inducida en el suelo.

Métodos sísmicos: Considerados como métodos de alta precisión, alta resolución y gran penetración, su principal uso es en la industria petrolera, aunque también son importantes en la búsqueda de agua subterránea en ingeniería civil, para conocer la profundidad del basamento y relacionado con la construcción de edificios, presas y carreteras. Los métodos sísmicos tienen poca aplicación directa en la exploración directa de minerales, un ejemplo puede ser el contacto irregular entre dos tipos de roca que son altamente irregulares.

Dentro de los métodos sísmicos, existen los métodos de sísmica pasiva, como el método de cocientes espectrales, también conocido como HVSR o método de Nakamura, el cual emplea ruido ambiental como fuente de excitación y tiene la ventaja de generarse de forma continua (García, 2010). Este método a diferencia de los métodos sísmicos no dispone de una fuente artificial generadora de vibración como explosiones o la utilización de martillos. Los métodos pasivos han aumentado su popularidad en los últimos años, tomando como ejemplo los trabajos de Mundepi (2015), Kuo (2016), Michel (2016), Ullah (2016) y Gosar (2017), solo por mencionar algunos, debido a que utilizan vibraciones naturales o ya presentes en el campo que permiten realizar exploración en el subsuelo sin involucrar altos costos, reducir costos de logística y reducción de impactos ambientales por desarrollo de caminos o cualquier tipo de desmonte; por otra parte los equipos utilizados para esta actividad pueden almacenar una cantidad considerable de datos en caso de requerir una alta densidad de puntos.

2.3 - MÉTODO DE COCIENTES ESPECTRALES (H/V)

El concepto de cocientes espectrales surge alrededor de 1971 por Nagoshi e Igarashi. El método de cocientes espectrales muestra la relación con la curva de elipticidad de la onda Rayleigh, la coincidencia entre el máximo de frecuencia más baja de la curva del cociente espectral H/V con la frecuencia de resonancia fundamental del suelo, utilizado como un indicador de una estructura subterránea, citado en Jaramillo, Piña, y Aguilar (2012).

La metodología establecida por Nakamura (Nakamura, 2000), ha permitido conocer las características de amplificación del suelo en función de la frecuencia natural de vibración utilizando mediciones de ruido sísmico ambiental. La amplificación mencionada anteriormente es producida por la geología local y es conocida como amplificación de efecto de sitio y la frecuencia asociada se conoce como frecuencia natural. Nakamura (1989), propone una función de transferencia mediante un cociente que relaciona la respuesta de un sistema a una señal de entrada o excitación.

La función de transferencia corresponde a:

$$St = \frac{S Hs}{S Hb}$$

Hs = Espectro de Fourier horizontal de superficie.

Hb = Espectro de Fourier horizontal del basamento.

Debido a que las ondas internas de los microtremores contiene ondas superficiales, es necesario corregirlas removiendo los efectos de las ondas superficiales (Jaramillo et al., 2012). Nakamura propone que el efecto de las ondas Rayleigh está incluido en el espectro de ondas verticales superficiales (E Vs) y no en la base (E Vb) y se puede definir como:

$$E_s = \frac{E V_s}{E V_b}$$

H_s = Espectro de Fourier vertical de superficie.

H_b = Espectro de Fourier vertical del basamento.

Si no hay efecto de ondas Rayleigh, $E_s = 1$, E_s tomará un valor mayor a “1” con el incremento del efecto de las ondas Rayleigh.

Asumiendo que el efecto de las ondas Rayleigh es igual para las componente vertical y horizontal (S_t y E_s), por lo que se puede considerar una función de transferencia más confiable (S_{tt}) después de remover el efecto de las ondas Rayleigh:

$$S_{tt} = \frac{S_t}{E_s} = \frac{R_s}{R_b}$$

Donde:

$$R_s = \frac{S H_s}{S V_s} \quad y \quad R_b = \frac{S H_b}{S V_b}$$

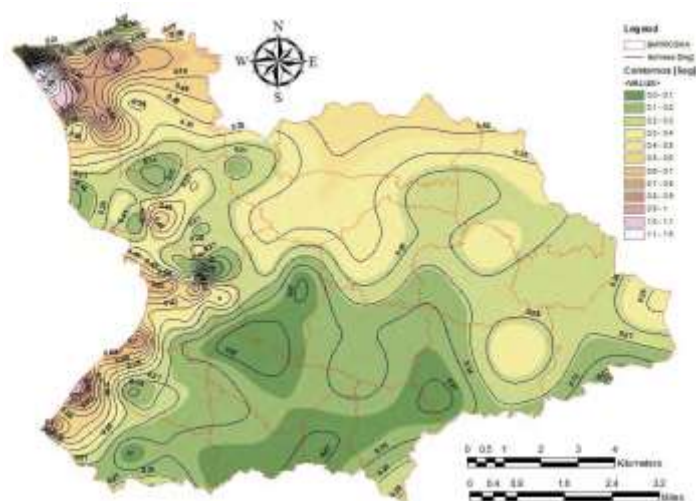
R_s y R_b fueron obtenidos dividiendo el espectro horizontal y vertical de los espectros de Fourier. Entonces $R_b = 1$ y por lo tanto $S_{tt} = R_s$. Entonces, para obtener la frecuencia natural de vibración se utiliza la función:

$$R_s = \frac{S H_s}{S V_s}$$

3- ANTECEDENTES

Entre los primeros trabajos referentes al análisis de la frecuencia de vibración se encuentra Akamatsu (1961), Nogoshi (1970) e Igarashi (1971), quienes consideraron que las microtrepidaciones o ruido sísmico ambiental, se componen principalmente de ondas superficiales (Rosales-Climent, 2001). De la misma manera Nakamura (1989), propuso un método para analizar las frecuencias naturales de vibración mediante el cociente espectral entre las componentes horizontales y verticales de las microtrepidaciones.

El método de cocientes espectrales es aplicado principalmente al registro de microtemblores o vibración ambiental para la determinación del periodo fundamental de vibración del suelo, con la finalidad de construir mapas de isoperiodos, como el realizado para la ciudad de Mayagüez Puerto Rico, donde se presentan zonas con periodos de tiempo altos hacia el Oeste, característicos de depósitos blandos y en el lado Este se tienen periodos de tiempo menores, relacionados con la zona montañosa del lugar (Fig. 4). El uso de vibración ambiental es una herramienta muy simple y económica que se puede aplicar en cualquier momento y no requiere esperar como con otras técnicas, la ocurrencia de un terremoto (Ritta, 2009).



Parolai, Bormann y Milkereit (2002), analizaron la velocidad de ondas secundarias u ondas S en el área de Colonia, Alemania. Lo anterior mediante la medición de ruido ambiental con el objetivo de comparar el grosor de la capa de sedimentos mediante el método H-V y pozos perforados anteriormente, donde 32 sitios de medición fueron realizados en las cercanías de los pozos. Los resultados obtenidos de ondas S muestran un incremento gradual arriba de 1800 m/s en la secuencia Terciaria, elevándose los valores arriba de 2000 a 2500 m/s en las rocas sedimentarias Mesozoicas. El área de Colonia se caracteriza por sedimentos de edad Terciario y Cuaternario con un basamento Devoniano, el espesor de la capa de sedimentos varía desde los 0 m hasta 300 m, cerca del sistema de fallas Erft, la profundidad varia de 600 m a 1000 m aproximadamente (Fig. 5).

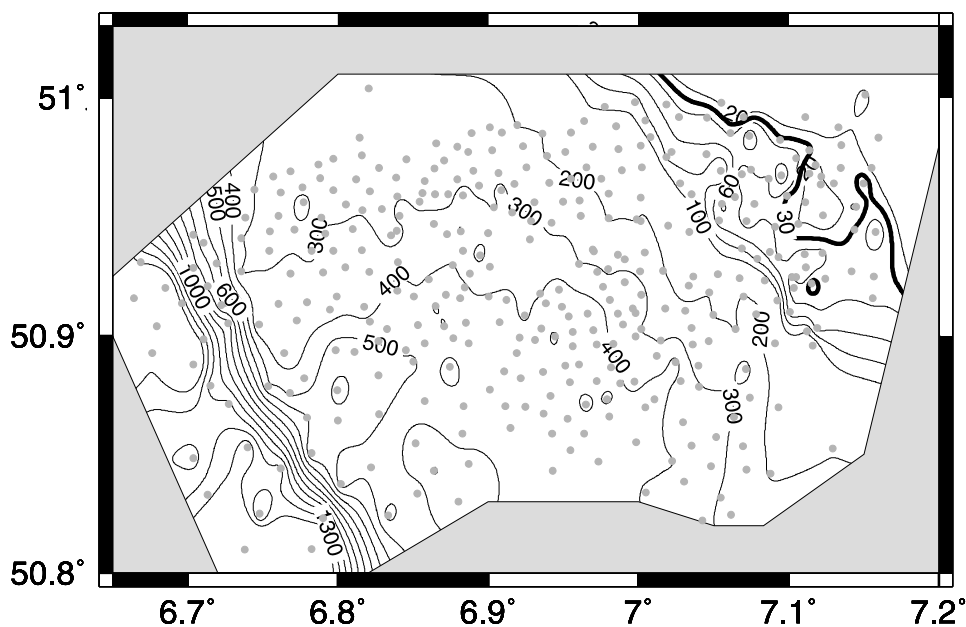


Fig. 5. Mapa de curvas de profundidad mediante la aplicación de método H/V en Colonia, Alemania.

El método consiste en el registro del tiempo en las tres componentes de vibración de ruido ambiental obteniendo la transformada de Fourier de cada una de las componentes, con base a trabajos de Mazzoni et al. (2014), la amplificación es altamente variable en pocos metros de distancia por lo que se requiere de precaución al momento de realizar el mapeo de riesgo sísmico. Una de sus principales ventajas es que la técnica HVSR es una de las más

baratas y disponibles para estudiar efectos de sitio usando ruido sísmico ambiental. De esta forma, se considera que el método es una alternativa válida comparándola con métodos como el ensayo de penetración con cono estático y la perforación, siendo así el uso de una sola estación apoyada por una base de datos geotécnicos bastante completa para ser del método HVSR económicamente viable. El método H/V es una manera rápida y de bajo costo para obtener información sísmica del sitio en la cual, basándose en los resultados obtenidos se ha considerado una herramienta válida para la investigación de estructuras en el subsuelo (Panzera et al., 2016).

Panzera et al. (2016), realizaron registros de ruido sísmico ambiental en el área de Salinelle en Paterno, la cual presenta una importante actividad volcánica (Fig. 6). La selección de sitios se hizo de manera aleatoria, utilizando dos perfiles con 32 puntos de medición con duración de 60 minutos con un rango de muestreo de 100 Hz, considerando las frecuencias por arriba de los 0.1 Hz para el estudio. Para fines de este tipo de trabajos se recomienda realizar el muestreo después de un tiempo recomendando de aproximado de 10 minutos para la estabilización del sensor. Los resultados obtenidos muestran diferentes rangos de frecuencias con los cuales se puede inferir la estructura del subsuelo mostrando “picos” en diferentes frecuencias.

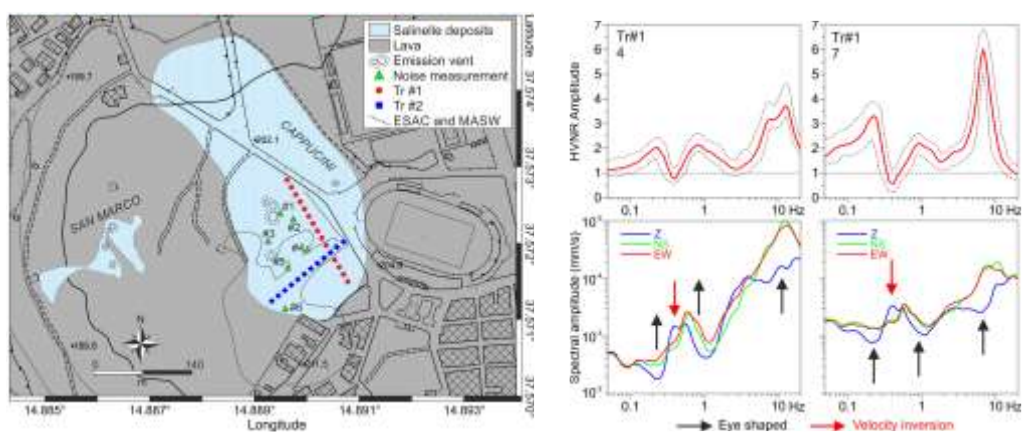


Fig. 6. Se muestra que la Frecuencia obtenida a los 0.5 Hz está asociado a la discontinuidad entre arcillas y calizas. Por otra parte, el pico de frecuencia alcanzado a los 1 Hz y considerando la información geológica disponible puede ser interpretado como la discontinuidad entre arcilla y lava, los mayores a 4 Hz relacionados a los depósitos de Salinelle y >10 Hz ligados al ruido generado por la emisión de gases.

La aplicación de esta metodología requiere de una estación sísmica móvil y un poco de tiempo para el registro de datos. En la Isla de Lampeluz, en el mar Mediterráneo, se realizaron mediciones para obtener la respuesta en términos de frecuencia y amplitud en función de la geología aflorante y las principales estructuras geológicas. Lo anterior fue realizado mediante la distribución de 92 sitios de medición de ruido ambiental distribuidos homogéneamente en un rango de 600 metros aproximadamente a 128 Hz con series de tiempo de 20 minutos y ventanas subdivididas de 20 segundos. El espectro de Fourier fue calculado en el rango de 0.5 Hz a 20 Hz (Panzera et al., 2017).

En Sonora, se tiene evidencia de un estudio de microsismicidad mediante el método de cocientes espectrales el cual fue realizado en el Centro de Rehabilitación Infantil (CRIT) (López-Pineda 2010). Las muestras de ruido sísmico ambiental fueron obtenidas tomando ocho lecturas donde fue construida la edificación, obteniendo de cada punto los componentes Norte, Este y Vertical a razón de 100 muestras por minuto (Fig. 7). Se determinó que la frecuencia natural de vibración del terreno en donde fue construido el CRIT está entre los 4 Hz a 4.5 Hz caracterizándose como un suelo duro. Contrariamente en el lado este, se obtuvieron frecuencias de 1.2 a 3.2 Hz siendo más vulnerable a agentes sísmicos (Fig. 7).

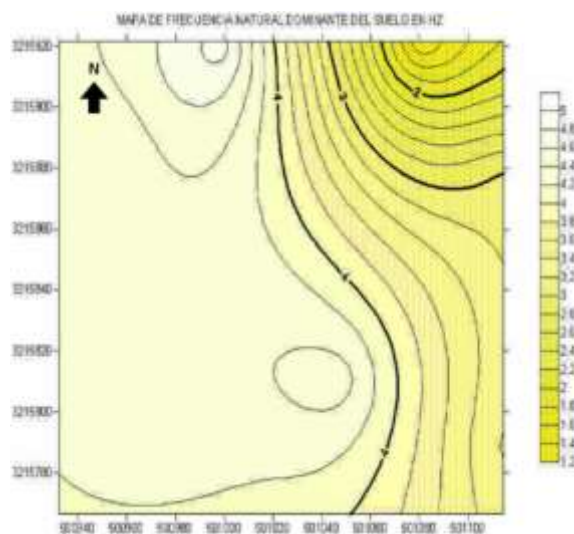


Fig. 7. Mapa de frecuencias naturales localizado en el CRIT Hermosillo.

Apoyado por un estudio geofísico de resistividad (Fig. 8), el perfil Norte-Sur del área de estudio en Hermosillo, refleja una resistividad de 80ohm/m, interpretado como un suelo duro y asociado a las frecuencias de 4 Hz del estudio de frecuencias naturales. Por otra parte, el perfil Este-Oeste con resistividades de 20 ohm/m está relacionado con suelos menos compactados, en muchos casos asociados con agua y coincidiendo con las frecuencias obtenidas de 2.0 Hz.

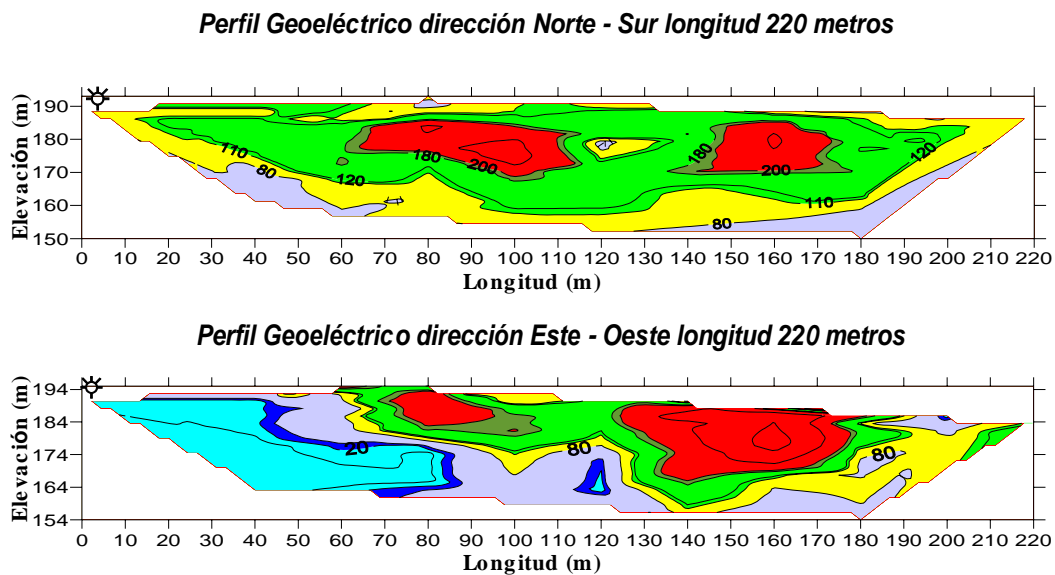


Fig. 8. Perfiles geoelectricos Norte - Sur y Este - Oeste. Fuente: Estudio geológico-geofísico de riesgos ambientales para el sitio del CRIT (López-Pineda, 2010).

Gallegos-Hernández (2012), evaluó y zonificó el riesgo sísmico en la región de Loreto, Baja California Sur, con la finalidad de apoyar a la industria de la construcción mediante la interpretación de cocientes espectrales obtenidos de estaciones distribuidas en la localidad. Se detectaron frecuencias con valores a los 0.5 Hz considerándolas como zonas críticas con especial atención a la hora de construir. La mayoría de las zonas estudiadas presentaron este tipo de frecuencias producto de una mala consolidación del terreno (Figura 9).

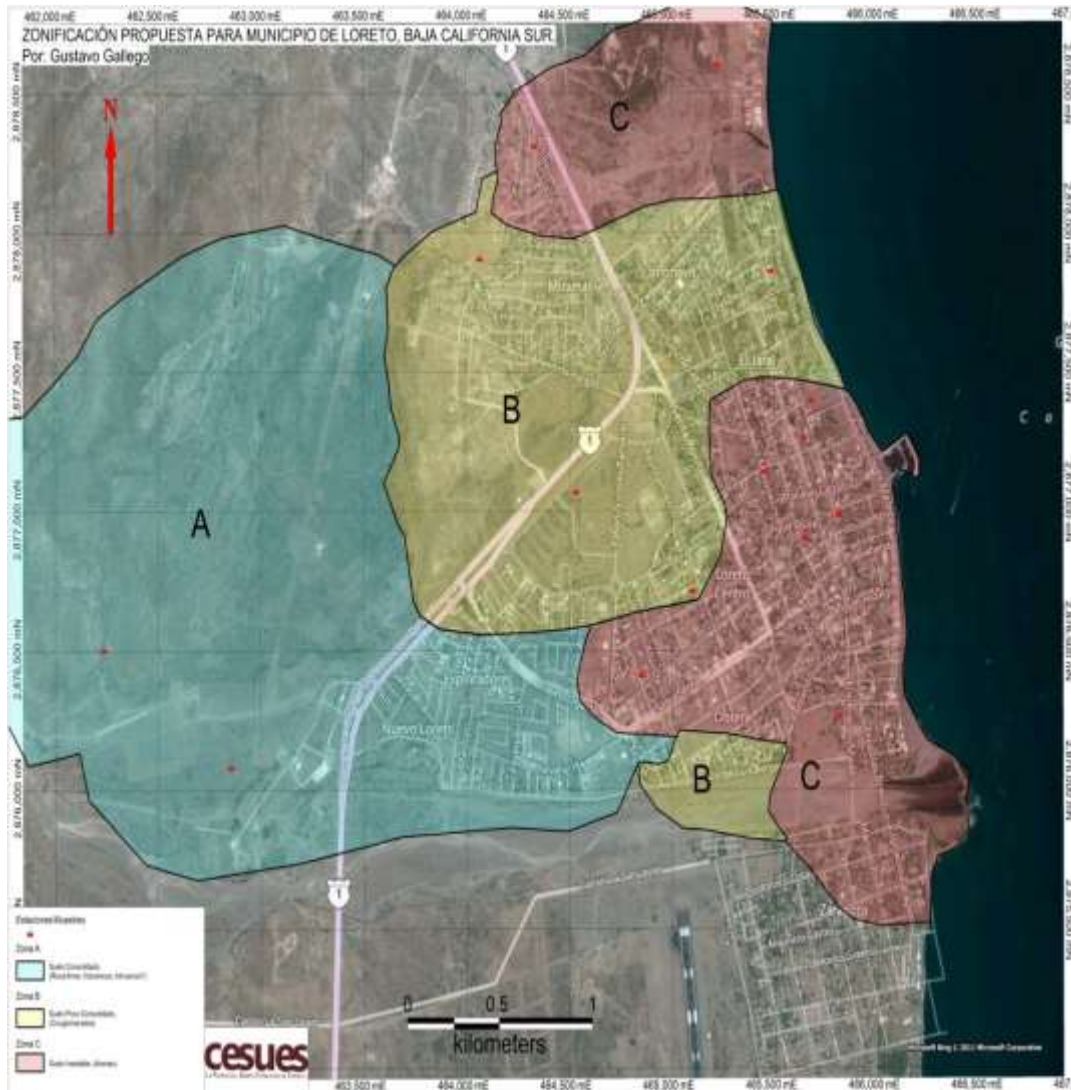


Fig. 9. Zonificación del riesgo sísmico para la localidad de Loreto, Baja California Sur (Gallegos-Hernández, 2012).

De los pocos trabajos existentes, acerca de la aplicación de la frecuencia natural de vibración en materiales geológicos, enfocado a la exploración minera fue por López-Pineda & Durazo-Tapia (2011), mediante un estudio de resistividad y frecuencia natural de vibración a muestras de rolita y cuarzo para la compañía Industrial Minera México. El trabajo dio como resultado una frecuencia de 10.5 Hz para la rolita y 29 Hz para la muestra de veta de cuarzo, detectando contraste entre la resistividad y la frecuencia natural del material geológico, justificando su uso para la búsqueda de materiales de interés económico (Fig. 10).

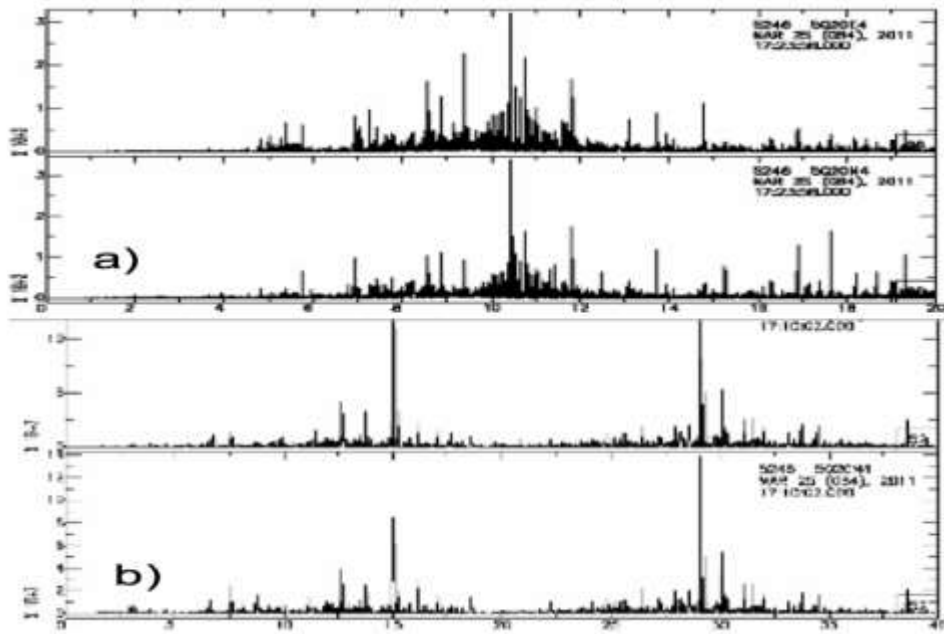


Fig. 10. Se muestra: a) Frecuencia natural de vibración de muestra de riolita en 10.5 Hz y b) Frecuencia natural de vibración de una veta de cuarzo de 29 Hz (López-Pineda, 2011).

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

3.1.1 Localización

La mina La India se localiza en el municipio de Sahuaripa, Sonora; aproximadamente a 200 kilómetros en línea recta al sureste de la ciudad de Hermosillo, capital de Estado, y a 30 kilómetros de la frontera Sonora-Chihuahua; en las coordenadas UTM 3' 179,000 m Norte y 706,000 m Este (Fig. 11).

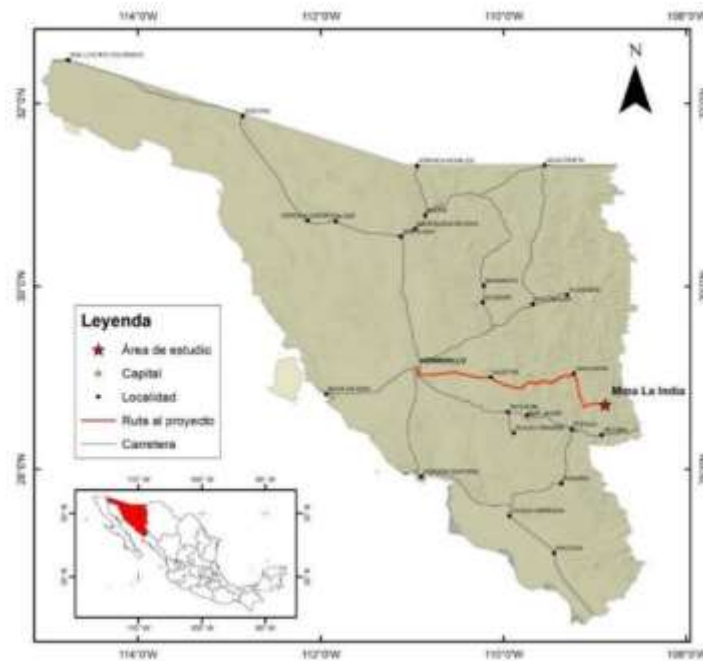


Fig. 11. Localización del área de estudio.

El acceso al área de estudio, desde la ciudad de Hermosillo, es por medio de la carretera estatal 104, tramo Hermosillo-Sahuaripa, hasta llegar al municipio de Sahuaripa, hacia el sur hasta Arivechi y posteriormente la localidad de Tacupeto; en donde se toma un camino de terracería, con una longitud de 20 kilómetros aproximadamente hasta llegar a la

comunidad de Tarachi, después se recorren 10 kilómetros en terracería hasta llegar al área de estudio.

3.1.2- Geología regional

La mina la India se localiza dentro de la provincia de la Sierra Madre Occidental (SMO) en una extensa región volcánica del Eoceno a Mioceno. El espesor total de la secuencia volcánica es de 2 km aproximadamente y esta descansa sobre rocas sedimentarias de edad Mesozoica (Doucet et al., 2012). Esta provincia se caracteriza por un relieve montañoso interrumpida por altiplanos con una elevación promedio de más de 2,000 msnm, un ancho de 200 a 400 km y un largo de 1,200 km aproximadamente.

La SMO abarca desde la frontera con Estados Unidos pasando los estados del occidente mexicano hasta la Franja Volcánica Transmexicana, mientras que sus fronteras laterales son, al Este, el Altiplano Central (mesa Central) y al Oeste el Golfo de California (Ferrari et al., 2005). El inicio de la SMO se relaciona con un margen volcánico continental asociado a un largo periodo de subducción de la placa Farallón por debajo de la placa Norteamericana de edad Cretácico a Mioceno temprano con actividad durante el Eoceno, Oligoceno y Mioceno temprano (Aguirre-Díaz et al., 2008). En esta región se describen dos secuencias volcánicas, la primera definida por McDowell y Keizer (1977) como Complejo Volcánico Inferior, la cual está conformado por rocas volcánicas andesíticas y dacítico-riolíticas del Eoceno. Por otra parte, el Supergrupo Volcánico Superior compuesto por ignimbritas silíceas emplazadas en su mayoría en dos pulsos, en el Oligoceno temprano y el Mioceno temprano (Fig. 12) (McDowell y Clabaugh, 1979).

El área del proyecto La India está dominada por afloramientos de tobas andesíticas a dacíticas las cuales fueron intrusionadas por diorita y granodiorita, que posteriormente fueron cubiertas por tobas riolíticas lavas de andesita basáltica y conglomerados. Estas rocas se encuentran dentro de una zona de extensión del Mioceno con tendencia noroeste, donde ocurrió un fallamiento normal norte a noroeste, interrumpió la estratigrafía regional.

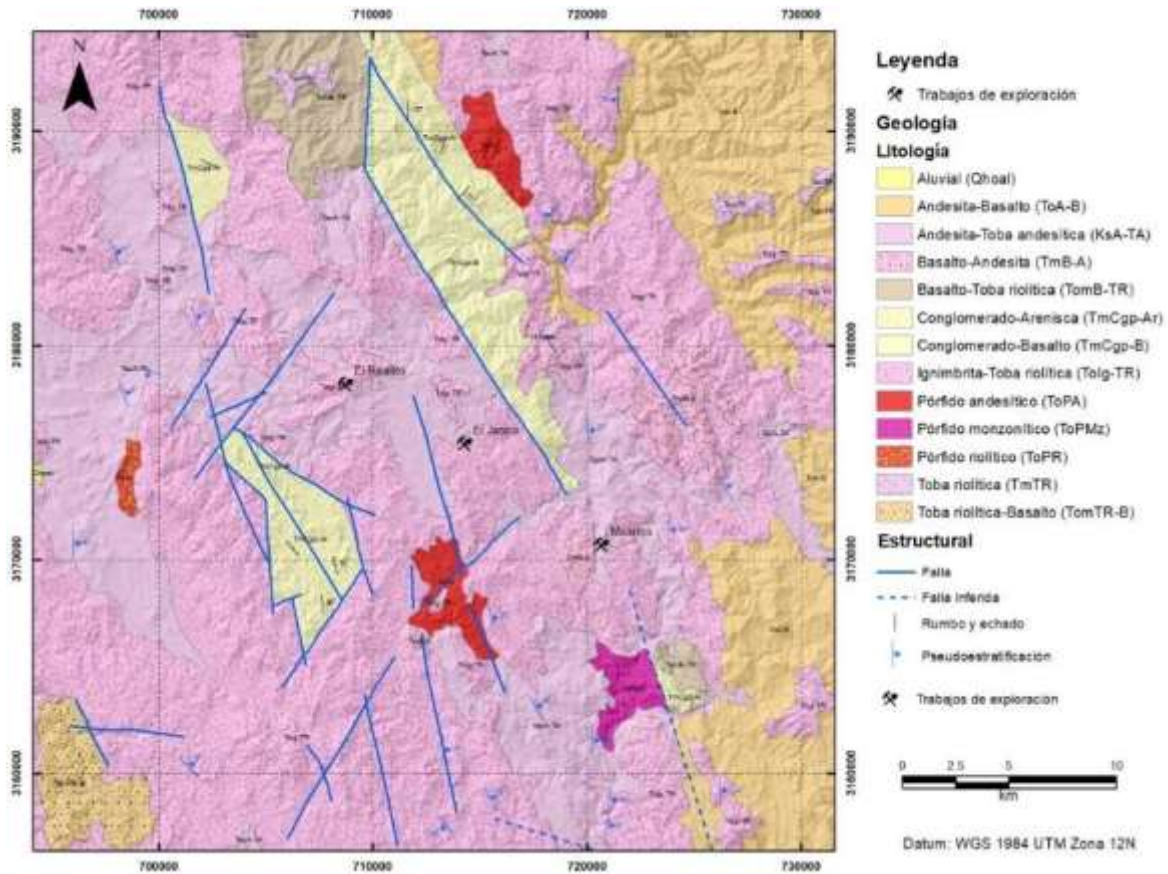


Fig. 12. Mapa geológico regional. Tomado y modificado del Servicio Geológico Mexicano H12-12 TECORIPA,

3.1.3- Distrito minero Mulatos

El distrito minero Mulatos se localiza en la parte norponiente de la Sierra Madre Occidental. El distrito se encuentra relacionado cercanamente con otros distritos de metales preciosos como La Chipriona, La Amargosa y La Cura, caracterizándose por la presencia de alteración argílica avanzada en un área de 150 km² aproximadamente (Staude, 2001). Dentro de la región de Mulatos se encuentra una gran cantidad de minas, la mayoría inactivas, entre las que se encuentran San Carlos, San Lorenzo, El Víctor, Viejo Mulatos, Cerro Estrella; en el distrito La Dura se encuentra las minas El Yaqui, El Halcón, La Dura, Zaragoza; en el distrito La Amargoza, localizado al NW de la región de Mulatos, se localiza la mina El Realito, La Viruela, La Cruz y La India y en el distrito Chipriona se encuentra la mina Chipiriona (Dolores-Reyes, 2014).

La mineralización en el distrito Mulatos se encuentra expuesta en una sección volcánica vertical de más de un kilómetro (Fig. 13) con un buzamiento de 25° y dirección E-NE, las capas post-mineralización constituidas por basaltos y andesitas tienen de 5° a 10° en dirección NE, interpretándose dos eventos de basculamiento, que fueron datados en arcilla de fallas mediante el método $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$, dando como resultado un evento a los 31 Ma y otro a los 25 Ma. El aspecto estructural jugó un papel importante en la mineralización del distrito, las fallas pre-mineralización, con rumbo N-S sirvieron de conductos para la circulación de fluidos con mineralización, por otra parte, las fallas post-mineralización cortaron, inclinaron y expusieron las estructuras presentes en el distrito (Staude, 2001).

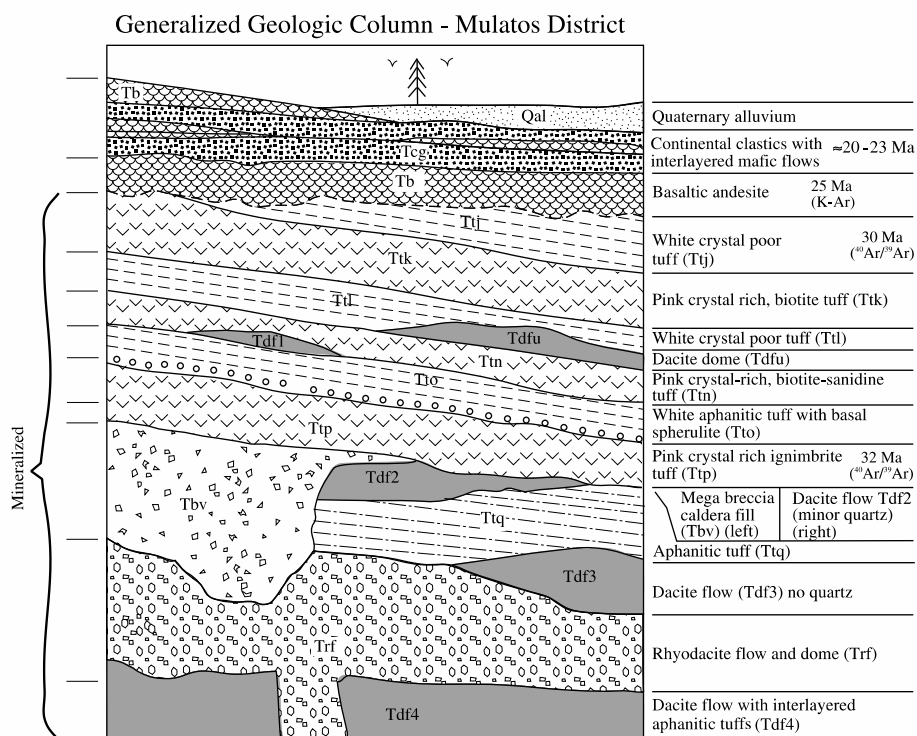


Fig. 13. Columna estratigráfica del distrito Mulatos.

En cuanto las alteraciones hidrotermales, la alteración argílica avanzada junto con sílice “vuggy” (cuarzo oqueroso), se encuentran relacionadas con la pirita aurífera y la mineralización de sulfosales. Esta alteración contiene principalmente pirofilita-dickita ± diásporo, sin alunita. En esta alteración se presenta el oro y en menor cantidad cobre. La

alteración presenta cambios conforme se aleja de los centros mineralizados, tornándose a una asociación caolinita ± pirofilita dentro de zonas ricas en caolinita con incremento de clorita, eventualmente formando un halo exterior de montmorillonita (Staude, 2001). La mineralización profunda se encuentra principalmente diseminada, mientras que la superficial en estructuras en forma de vetas. El ambiente para la mineralización es interpretado como volcánico activo relacionado a domos dacíticos ricos en sulfuros con ventilados hacia superficie. La mineralización continuó durante y después del magmatismo riolítico y declinó con el inicio de la transición a basáltico (Staude, 2001).

3.1.4- Geología local – Área mina La India

En el área de la mina La India se encuentra la secuencia volcánica de la Serie Inferior, compuesta por rocas volcánicas andesíticas, las rocas más antiguas en la mina La India corresponden a dacíticas del Paleoceno, intercaladas con rocas epiclásticas de composición similar. Por encima de la andesita se encuentra una secuencia traquiandesítica de biotita-piroxeno, así como flujos dacíticos, domos y tobas. Estas rocas se superponen a las andesitas inferiores con disconformidad erosiva; las tobas dacíticas de grano fino intercaladas con rocas epiclásticas (Fig. 14) (Doucet et al., 2012).

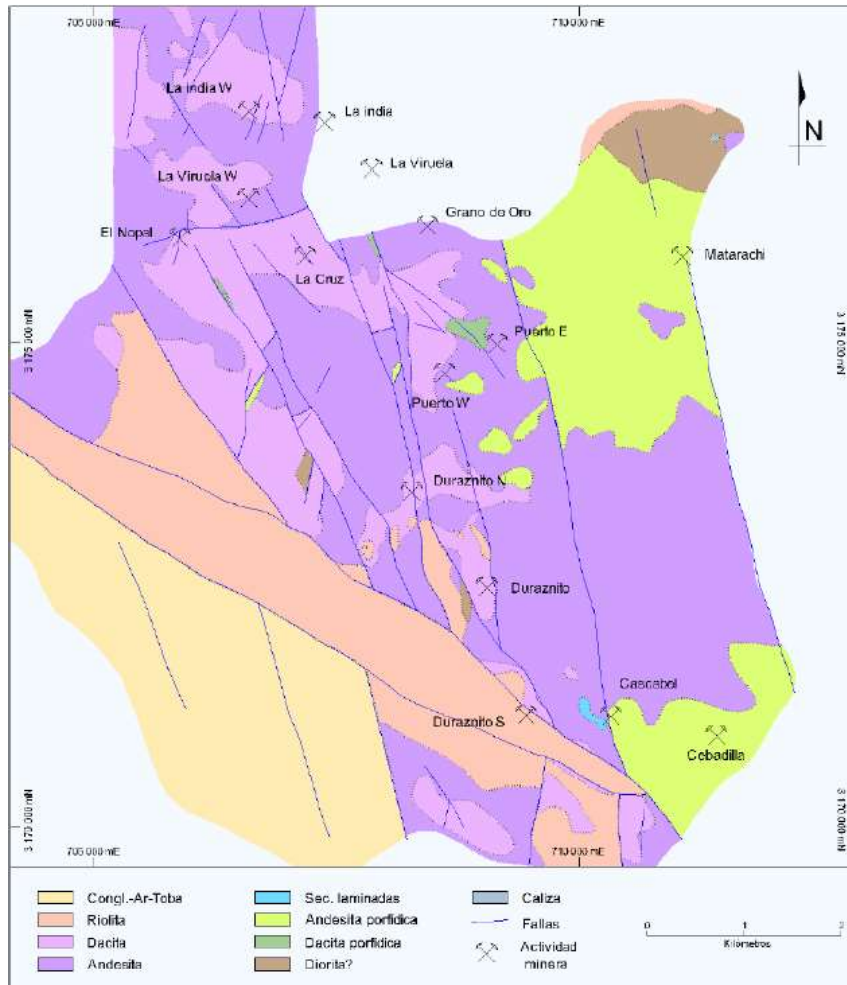


Fig. 14. Geología local del proyecto La India, Doucet et al., 2012.

Dentro de los trabajos geocronológicos (Doucet et al., 2012) se han determinado edades en $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ en plagioclasas para las secuencias dacíticas inferiores y andesíticas superiores, arrojando edades del Paleoceno de 62.5 y 55.8 Ma. Se determinaron edades de $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ en plagioclasas de los pórfidos, las cuales fueron de 43.3 y 36.9 Ma dentro del Eoceno. Los pórfidos dacíticos y feldespáticos intrusionaron a las rocas volcánicas andesíticas y dacíticas en el área de La India (Longo, 2006a) y una granodiorita intrusionó en el límite sur del proyecto (Moore, 2006).

Los depósitos de ignimbritas riolítica superponen a la andesita y dacita más antiguas, esta tiene el nombre de ignimbrita Nopal y la datación por $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ en biotitas produjo una edad del Eoceno superior de 33.9 Ma (Fig. 15).

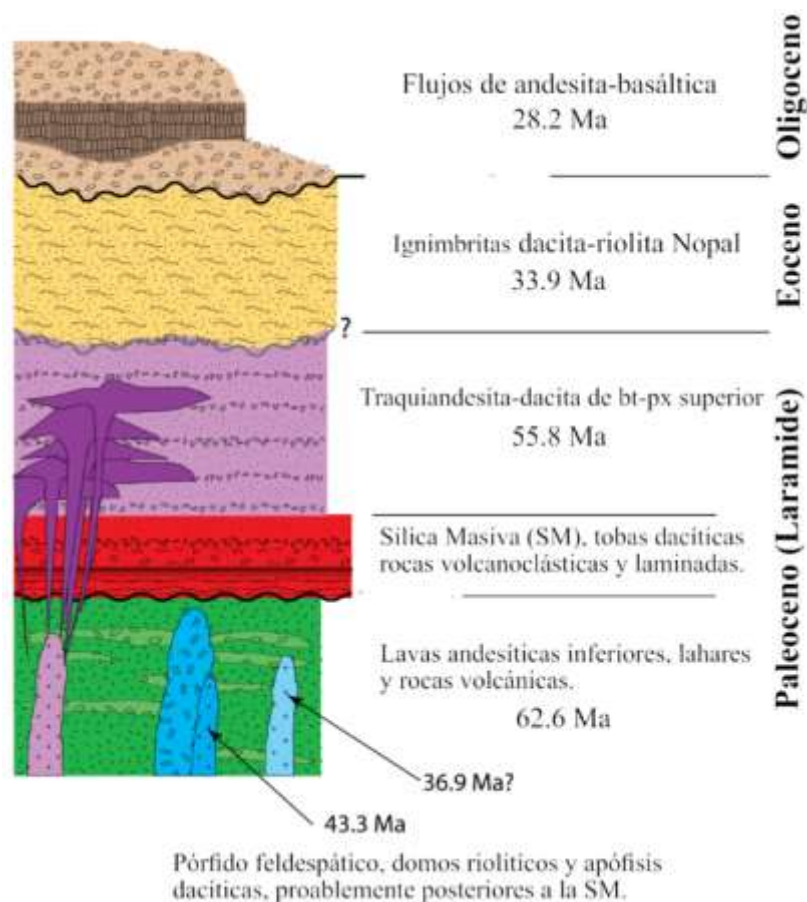


Fig. 15. Columna estratigráfica del área de La India, tomada y modificada de T. Longo, en Doucet et al, 2012.

Las rocas pertenecientes a la Serie Superior incluyen lavas de andesita basáltica y brechas de flujo que cubren a la ignimbrita Nopal con disconformidad erosiva. Una muestra de roca total en lavas por medio de $^{40}\text{Ar} / ^{39}\text{Ar}$ arrojó una edad del Oligoceno de 28.3 Ma. Los flujos de lavas se encuentran intercalados con conglomerados aluviales, por otra parte, los cuerpos de roca en el área de La India presentan una orientación NW con echado de 25° a 30° hacia el NE en la parte SE del área y un echado de 15° y 25° hacia el W-SW en la parte norte.

Dentro de la mina La India, se encuentra el proyecto El Realito, el cual está conformado por dos unidades principales que son la unidad andesítica y unidad dacítica. La unidad andesítica, descrita por Bustamante-Pablos (2019), está formada por rocas volcánicas, volcanoclástica y epiclásticas de composición andesítica. Entre las rocas que confirman esta unidad, se incluye una toba de lapilli de composición andesítica de cuarzo, plagioclasa y biotita, esta roca es sobreyacida por un estrato delgado de dacita y sobre esta una toba de lapilli ignimbrítica de composición riolítica; sobre esta y con un espesor mayor, se encuentra una toba de lapilli lítica y de composición dacítica, porfídica de feldespato y cuarzo. Por último, con un espesor importante, se tiene un flujo de composición dacítica, con un fechamiento $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ de 62.56 ± 0.28 Ma en roca total por Páez-Beltrán (2013).

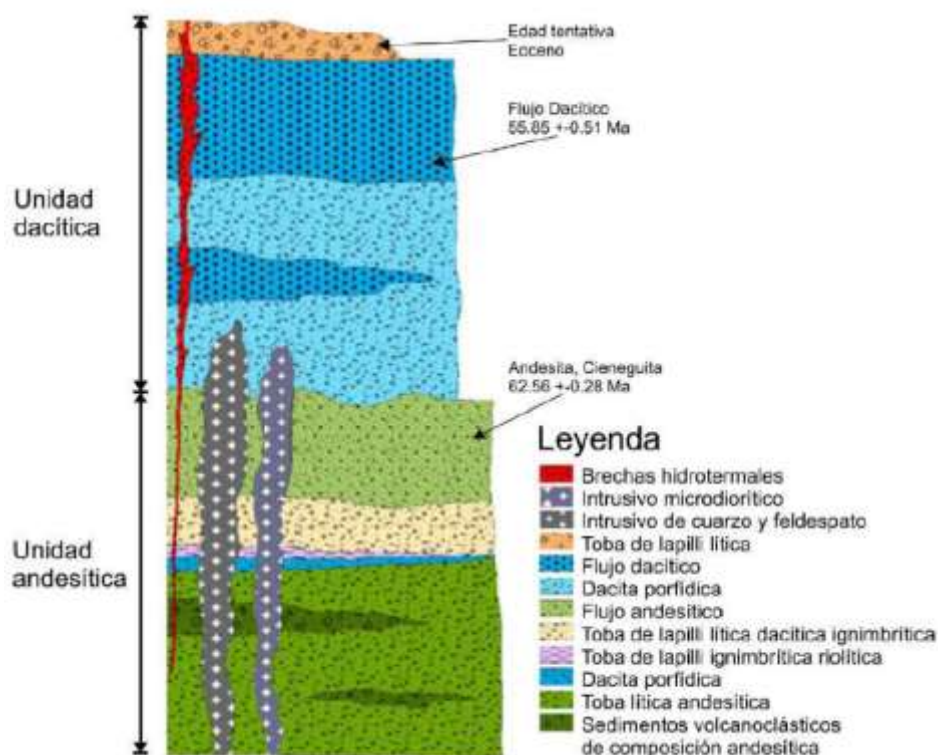


Fig. 16. Columna estratigráfica del área El Realito, modificada por Romero-Córdova et al. (2017).

Bustamante-Pablos (2019) describe la unidad dacítica, sobrepuesta a la unidad dacítica, está conformada por una litofacies no continua, denominada como flujo dacítico

autobrechado de textura porfídica y fragmentos líticos, principalmente de dacita porfídica. Por encima de esta unidad, se encuentra una dacita porfídica, caracterizada por ser la roca huésped de la mineralización, la cual contiene zonas de oxidación, pero presentarse de color gris a gris-oscuro en zonas de sulfuros, esta roca presenta mayormente alteración argílica avanzada. Esta roca fue fechada por Páez-Beltrán (2013) mediante el método de $^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$ en plagioclasas, obteniendo una edad 55.8 ± 0.5 Ma (Fig. 16).

3.1.5- Mineralización

Existen numerosas ocurrencias epitermales de oro, las cuales están expuestas en pequeñas minas abandonadas o trabajos de exploración. Las zonas mineralizadas se caracterizan por la presencia de alteración que incluye alunita, dickita y/o pirofilita, acompañado de un intenso reemplazo de sílice en la roca huésped con intensidad variable de pirita-hematita, la pirita se encuentra diseminada o en microvetillas. Las zonas de oxidación se conforman de hematita relictas, limonita y goethita, en algunas zonas, la especularita hipogénica está asociada a zonas auríferas (Doucet et al., 2012).

La mineralización económica consta principalmente de oro con menores cantidades de cobre en forma de enargita y escasa calcopirita. La mineralización se encuentra fuertemente asociada a las zonas con alteración sílice “*vuggy*” con pirita fina diseminada y en fracturas con trazas de alunita, caolinita en cuerpos subestratiformes a irregulares, con valores promedio de 1.5 gr/t de oro. La mineralización también se encuentra asociada a zonas con fuerte brechamiento y fracturamiento con cuarzo-hematita, hematita-especularita y ocasionalmente presencia de barita con valores por encima de 1.0 gr/t de oro. Las zonas de alta ley, ± 10.0 gr/t de oro, se localizan por debajo de grandes cuerpos silicificados, con fuerte fracturamiento y brechamiento con las rocas alteradas a Sílice, Alunita-Sílice Arcilla, con presencia de dickita, alunita y caolinita más óxidos de hierro en vetillas y fracturas (Crúz-Beltrán, 2008).

3.1.6- Tipo de yacimiento

La ocurrencia mineral que se presenta en La India, tanto en la North Zone y Main Zone son definidos como depósitos de oro y plata de alta sulfuración (HS) del origen hidrotermal alojado en rocas volcánicas. Las características de los depósitos HS incluyen:

- Ubicación dentro de arcos plutónico-volcánico.
- Asociado con rocas calco-alcalinas, a menudo con complejos de domos.
- Minerales de alteración indicativos de alta temperatura en fluidos hidrotermales ácidos, incluyendo alteración argílica avanzada caracterizada por pirofilita, alunita, dickita y caolinita.
- Silicificación y lixiviación ácida de los principales conductos de fluidos hidrotermales (Alteración de sílice “*vuggy*”).
- Presencia de minerales indicativos de alta sulfuración, principalmente la enargita
- Cantidades económicamente importantes de oro y/o plata y/o cobre.

Actualmente se producen más de 250,000 onzas de oro por año a partir de este tipo de depósito en la región de la Sierra Madre (Doucet et al., 2012).

3.2- TRABAJO DE CAMPO

El trabajo de campo se realizó durante el mes de septiembre del 2019 en la mina La India, con apoyo del personal de departamento de Exploración-Operación de la empresa Agnico Eagle, propietaria de dicho proyecto.

En una primera parte, el trabajo consistió en la revisión de información existente del proyecto como cartografía geológica, muestreo geoquímico, núcleos de perforación, secciones geológicas, base de datos de barrenación, datos del modelo geológico y posteriormente una revisión bibliográfica a detalle con el objetivo de definir el área de trabajo. Considerando lo anterior, la disponibilidad de vehículos y sugerencias del personal del departamento de Exploración-Operación, se exploró el área conocida como “El Realito”,

con una superficie de 0.181 km² aproximadamente y que actualmente dispone de un “pit” (tajo) de reservas y recursos lo cual implica el proyecto está en puerta a su explotación. De igual forma se consideró también explorar el área de “Los Tubos”, con aproximadamente 0.06 km² de superficie de trabajo y de la que se dispone de barrenos de exploración. No obstante, en el lugar no se ha realizado una evaluación de sus reservas y recursos (Fig. 17).

Una vez definidas las áreas de trabajo se procedió a precisar los puntos de muestreo considerando la densidad de barrenos y la cartografía geológica del sitio, con la finalidad de tener datos de referencia para las interpretaciones realizadas conforme al muestreo de ruido sísmico ambiental.

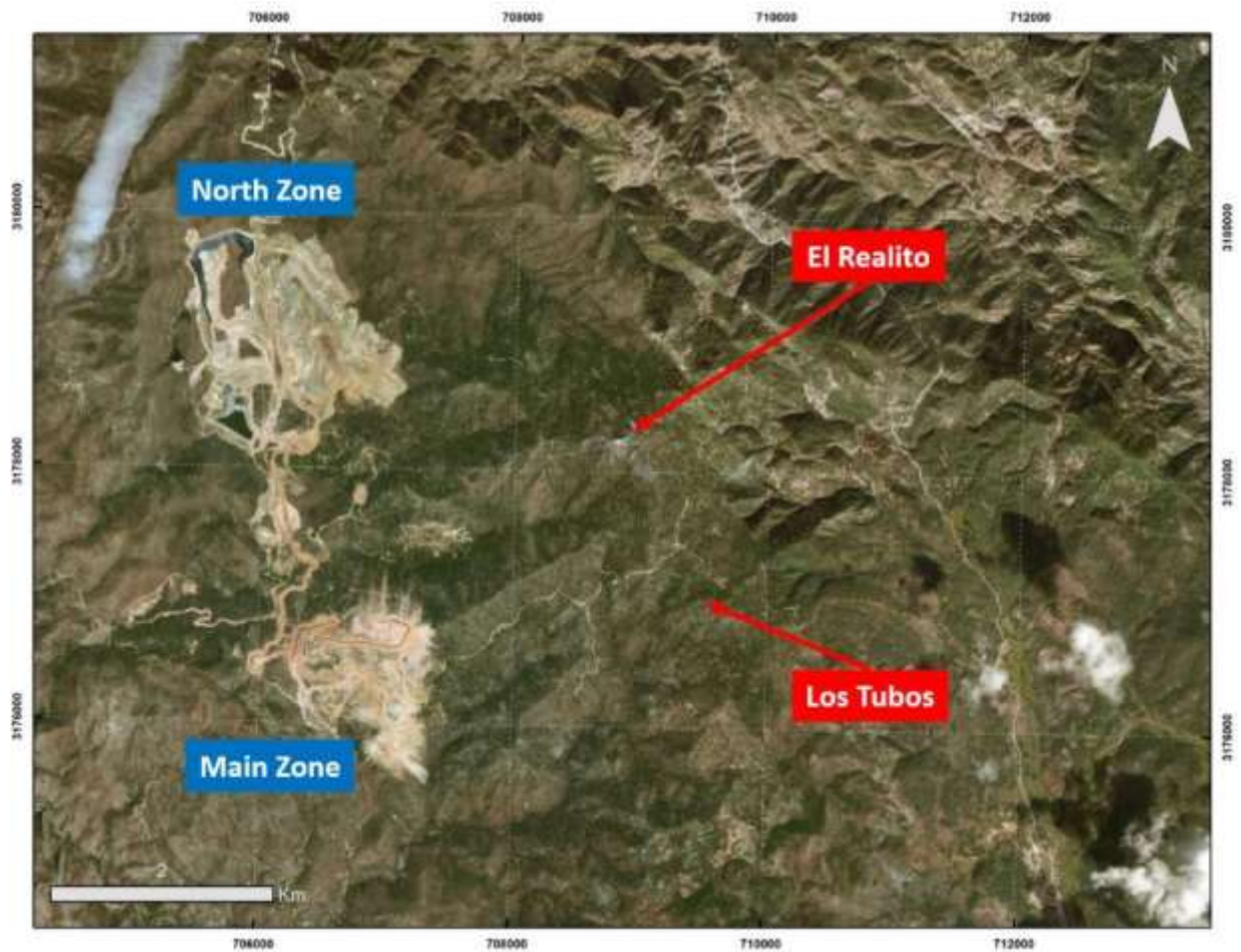


Fig. 17. Mapa de localización de los proyectos El Realito y Los Tubos.

3.3- MUESTREO

Las mediciones de ruido sísmico ambiental se realizaron mediante un acelerógrafo de la marca Guralp modelo 5TD, propiedad de la Universidad Estatal de Sonora (UES). El rango de registro de frecuencias es de 0.03 Hz a 50 Hz, registrándose las tres componentes: Norte, Este y Vertical. Dentro del área de estudio, en total se tomaron 21 puntos de medición: nueve en el área conocida como “El Realito” (Fig. 18) y doce en el área conocida como “Los Tubos” (Fig. 19). La duración del registro de ruido sísmico ambiental en cada punto fue de tres minutos con uno muestreo por triplicado (Fig. 20). Para la selección de los puntos de muestreo se consideró la geología superficial, con el fin de obtener los registros de frecuencias de las rocas presentes en el área.

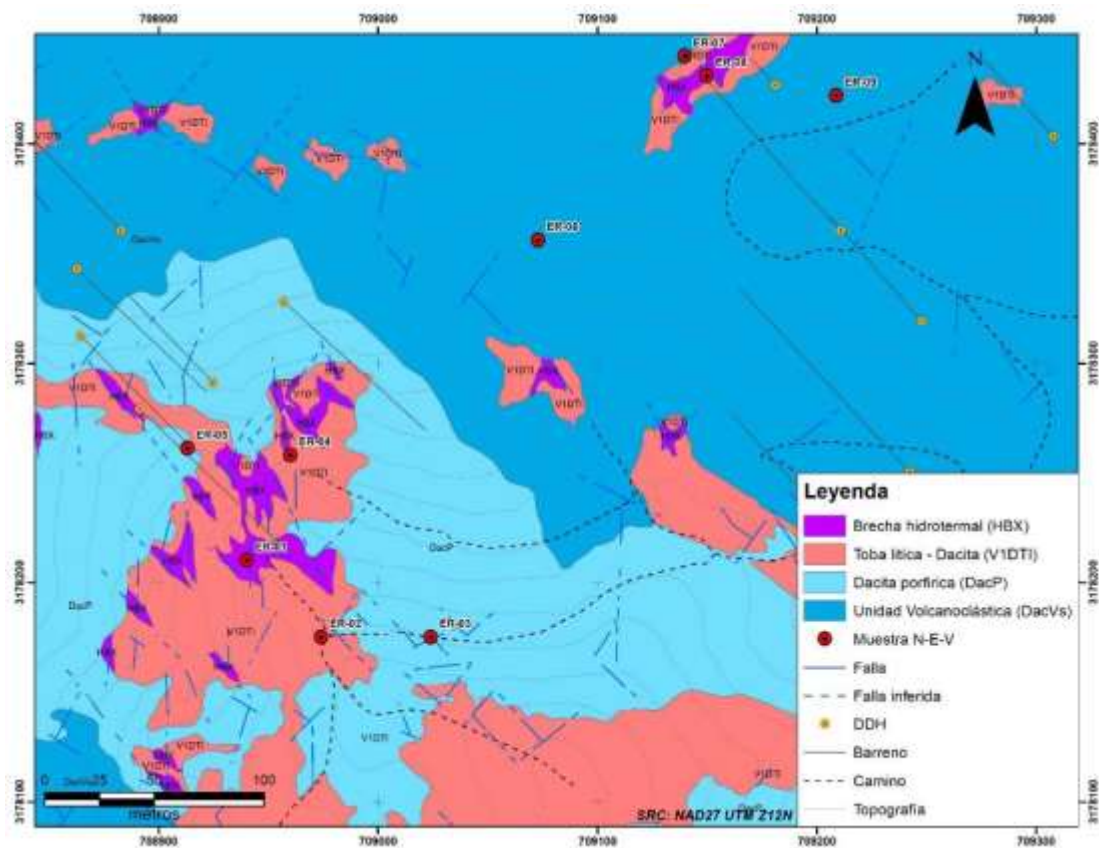


Fig. 18. Distribución de puntos de muestreo en el área de El Realito.

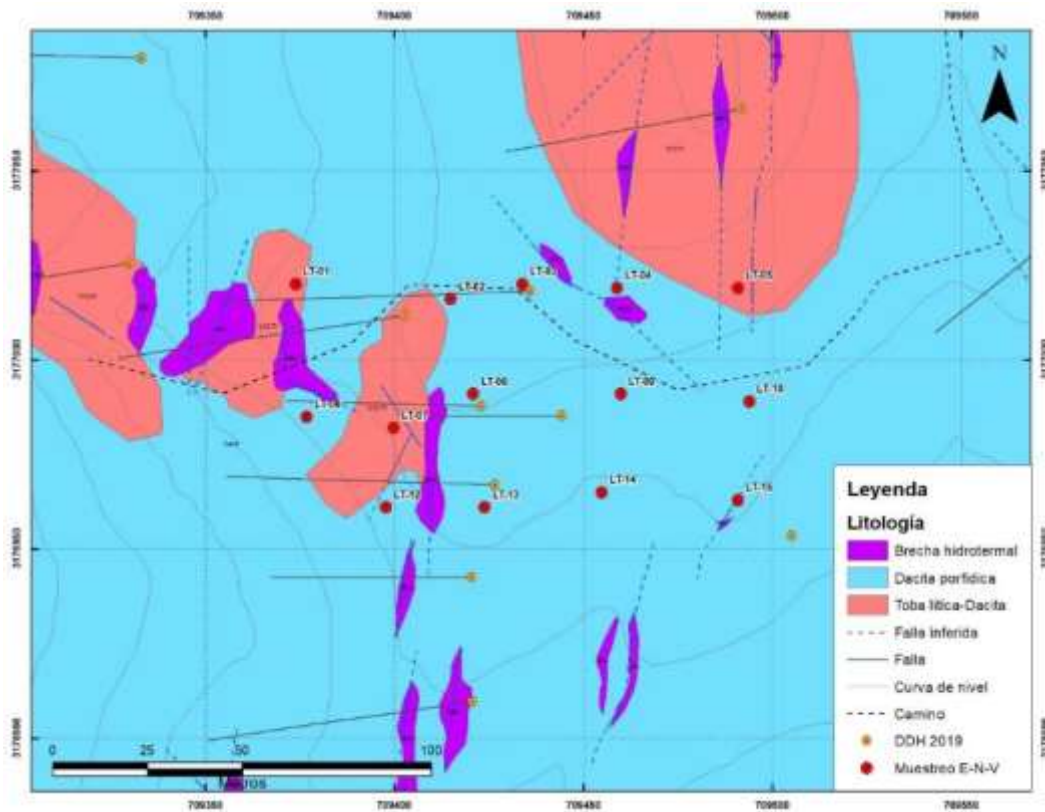


Fig. 19. Distribución de puntos de muestreo en el área de Los Tubos.

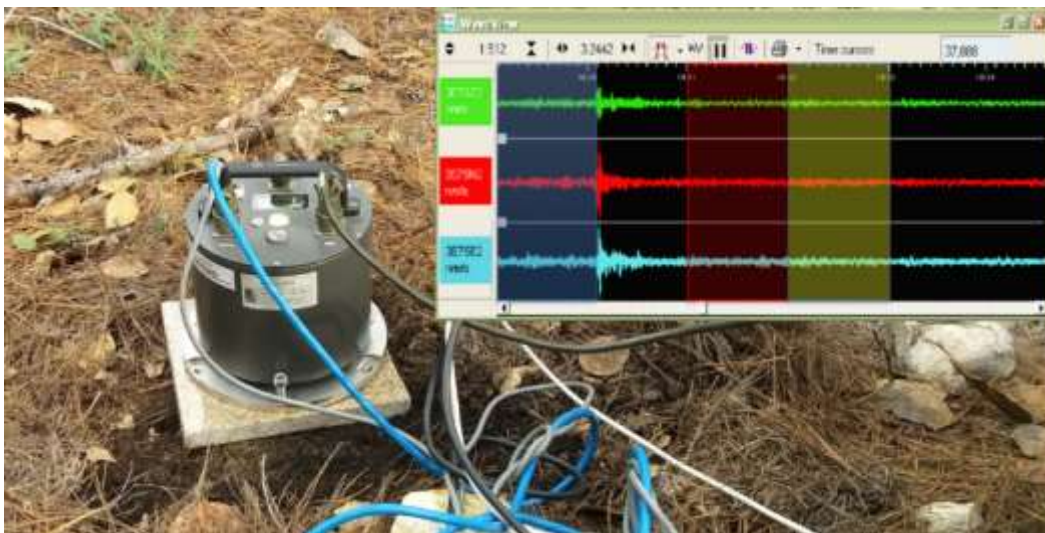


Fig. 20. Acelerógrafo Guralp 5TD y ventana de registro de las componentes Norte, Este y Vertical.

El muestreo se realiza colocando una placa base de granito (Fig. 21a), para facilitar la nivelación de acelerógrafo en el terreno, posteriormente se coloca la placa metálica (Fig. 21b) que sirve para dar nivelación de mayor precisión al equipo. Una vez que el acelerógrafo este sobre la placa metálica (Fig. 21c) se procede a orientar hacia el norte mediante una brújula, utilizando de referencia la flecha norte marcada en la parte superior del equipo y se puede proceder con la conexión de los cables de energía, datos y GPS. Finalmente, el equipo se nivela mediante los tornillos situados en la placa metálica y se procede con el registro de datos (Fig. 21d).

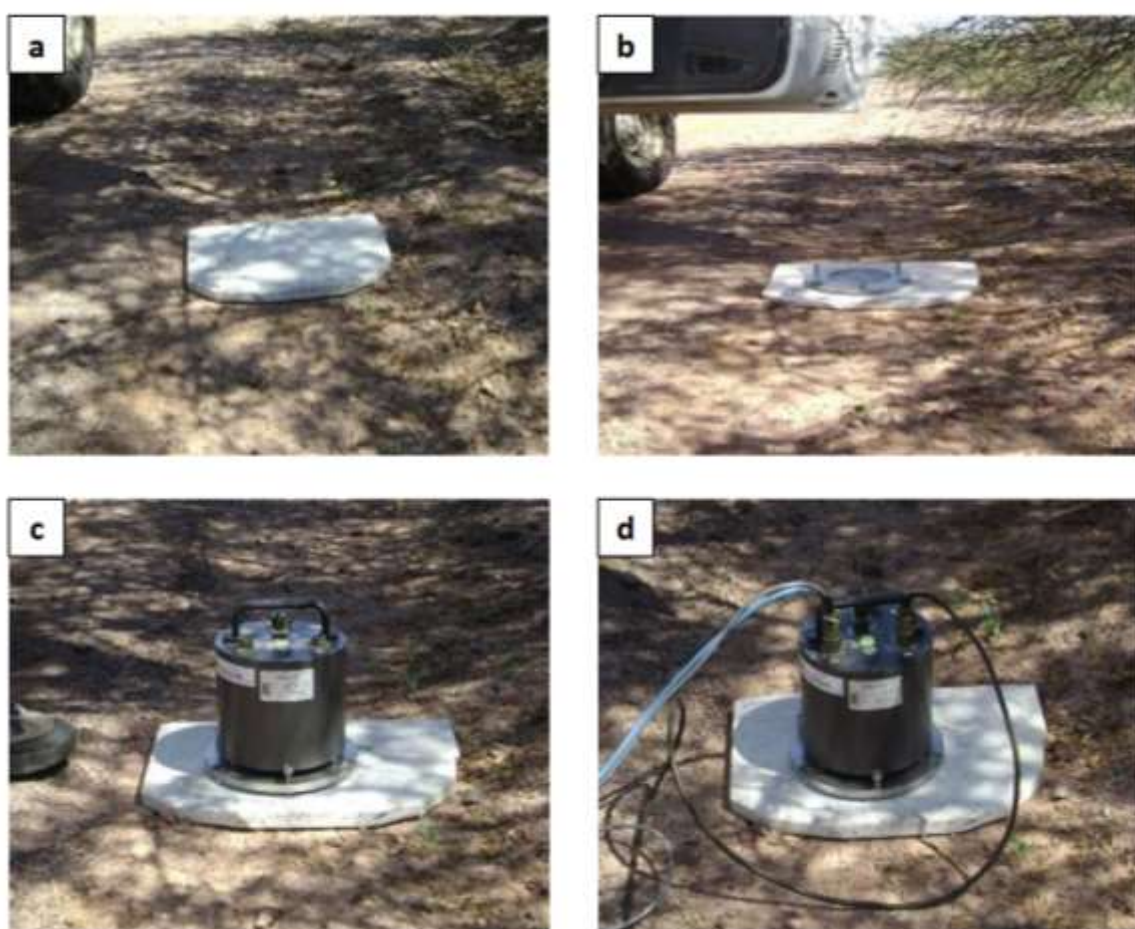


Fig. 21. Instalación del acelerógrafo Guralp 5TD.

3.4- MANEJO DE DATOS

El procesado de la información, análisis e interpretación de resultados se realizó en las instalaciones de la UES mediante una workstation Sun Microsystem con sistema operativo Unix, propiedad de la carrera de Ingeniería en Geociencias. Las muestras de ruido sísmico obtenidas en formato “.sac” (Seismic Analysis Code) son importadas desde el acelerógrafo hacia la computadora, para manipularse en el programa SAC. Este programa es el encargado de procesar el registro de ruido sísmico en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia aplicando la transformada de Fourier. En manejo de datos inicia con la lectura del archivo que contiene el registro de ruido sísmico, el espectro resultante se guarda para el procesamiento posterior. Este procedimiento es aplicado para todas las muestras de ruido sísmico ambiental (Fig. 22).

```
$ sac #Abrir programa sac.
SEISMIC ANALYSIS CODE [11/11/2013 (Version 101.6a)]
Copyright 1995 Regents of the University of California
SAC> r archivo_componente_E.sac #Leer archivo de componente Este.
SAC> rmean #Remover parte media del registro en el dominio del tiempo.
SAC> fft #Aplicar transformada de Fourier.
SAC> writesp nombre_archivo_E #Espectro de Fourier de La componente E.

SAC> r archivo_componente_N.sac #Leer archivo de componente Norte.
SAC> rmean
SAC> fft
SAC> writesp nombre_archivo_N #Espectro de Fourier de La componente E.

SAC> r archivo_componente_Z.sac #Leer archivo de componente Vertical.
SAC> rmean
SAC> fft
SAC> writesp nombre_archivo_Z #Espectro de Fourier de La componente V.
```

Figura 22. Procedimiento para convertir archivos del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Los archivos en el dominio de la frecuencia son utilizados para aplicar el método de cocientes espectrales, dividiendo el espectro de la componente Este entre la componente Vertical y para la componente Norte entre la componente Vertical. Este procedimiento es

aplicado para todos los archivos que componen una muestra de ruidos sísmico ambiental. El formato de los archivos utilizados es “.am” (Fig. 23).

```
SAC> r nombre_archivo_E.am #Leer espectro de Fourier: Componente Este.
SAC> divf nombre_archivo_V.am #Dividir entre el espectro Vertical.
SAC> w nombre_archivo_EZ #Cociente espectral Este/Vertical.

SAC> r nombre_archivo_N.am #Leer espectro de Fourier: Componente Norte.
SAC> divf nombre_archivo_V.am
SAC> w nombre_archivo_NZ #Cociente espectral Este/Vertical.
```

Fig. 23. Procedimiento para la aplicación del método de cocientes espectrales.

Como resultado se obtienen dos archivos, uno perteneciente a la componente Norte/Vertical (N/Z) y otro a la Este/Vertical (E/Z). Para poder visualizar los resultados se realiza la siguiente secuencia de comandos considerando la Figura 24.

```
SAC> r nombre_archivo_EZ nombre_archivo N/Z #Leer cociente espectral.
SAC> xlim 0 50 #Rango de frecuencias en el eje x, 0 Hz a 50 Hz.
SAC> p1 #Visualizar gráfica.
```

Fig. 24. Procedimiento para visualizar información.

Los resultados de la gráfica de cocientes espectrales pueden presentar variaciones según la localización seleccionada para realizar las pruebas, influyendo en ésta las características geológicas del lugar, condiciones climatológicas, actividad industrial y humana que se realice.

La frecuencia natural de vibración del terreno no manifiesta grandes cambios independientemente de la hora del día. Esto demuestra la estabilidad del método y que la frecuencia fundamental es una propiedad del terreno. Prueba también que la amplitud del cociente espectral varía según la hora del día en que se tome la medición. Las amplitudes

más bajas ocurren durante la noche, momento en que la actividad humana e industrial se reduce, mientras que las amplitudes más altas ocurren durante el día; (Ritta, Suárez, y Pando, 2012)

Para el análisis de las frecuencias resultantes de los puntos de muestreo se utilizará el software ArcGIS 10.6. La información se desplegará para realizar el análisis espacial de la distribución de las frecuencias obtenidas, mediante el método de cocientes espectrales, con el objeto de encontrar asociaciones entre el tipo de roca en superficie y las frecuencias presentes en el lugar.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se presentan los resultados de cocientes espectrales pertenecientes al área del El Realito y Los Tubos pertenecientes a la mina La India.

4.1 COCIENTES ESPECTRALES DEL ÁREA EL REALITO

Punto ER-01

La muestra de ruido sísmico ambiental ER-01 (Fig. 25) fue obtenida en las coordenadas 708,940 m Este y 3'178,210 m Norte, el punto de muestreo se localiza sobre la brecha hidrotermal (HBX) con presencia de un grado moderado de oxidación, silificación y alteración argílica, por otra parte, la estructura cuenta con un rumbo N 30° W y un echado de N 75° E.

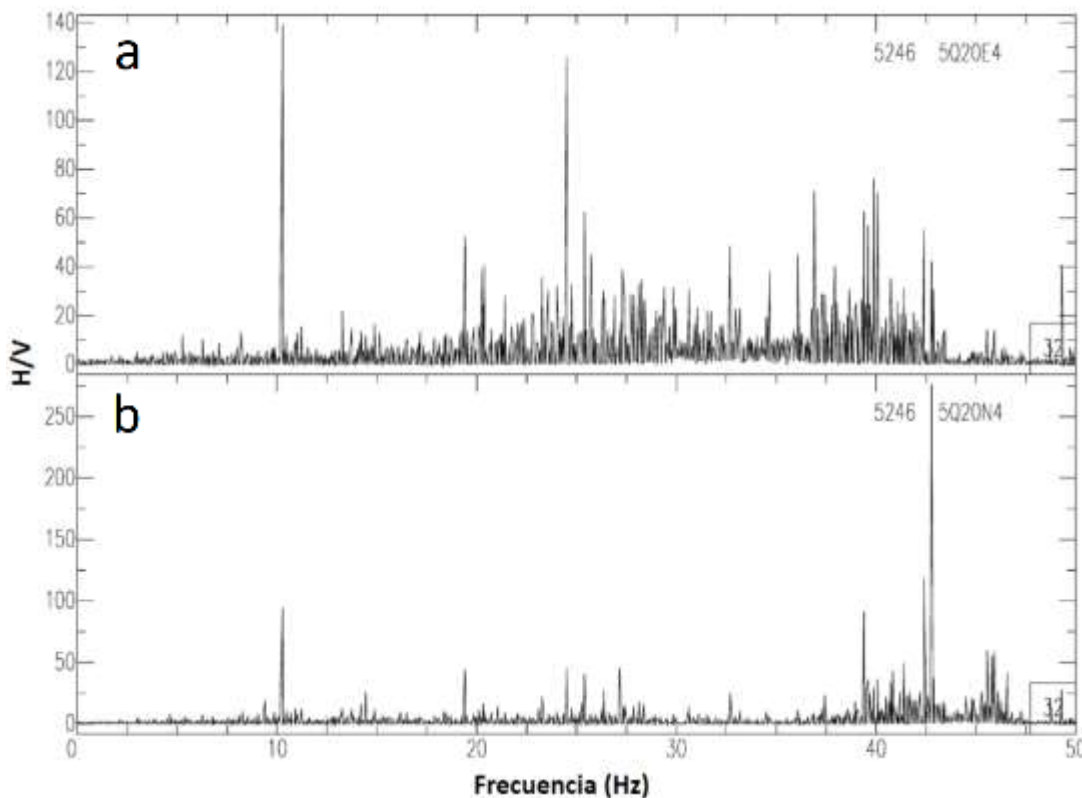


Fig. 25. Cociente espectral del punto ER-01.

La frecuencia más alta registrada para el punto ER-01 se encuentra a los 42.5 Hz con un H/V de 275 en la componente Norte (Fig. 25b) y de 45 en la componente Este (Fig. 25a). Por otra parte, se presenta una amplificación importante a los 10.0 Hz con un H/V de 140 en la componente Este (Fig. 25a) y de 100 en la componente Norte (Fig. 25b) y a los 24.5 Hz se tiene un H/V de 120 en la componente Este (Fig. 25a), pero con poca presencia de esta última en la componente norte con un H/V de 45 (Fig. 25b).

Punto ER-02

El punto ER-02 se localiza en las coordenadas 708,974 m Este y 3'178,175 m Norte, el muestreo de ruido sísmico ambiental se realizó sobre un afloramiento de una roca clasificada como toba lítica de dacitas (VITDI) al costado de un camino del área de El Realito. La gráfica del cociente espectral (Fig. 26) muestra como frecuencia más alta los 27.5 Hz con un H/V de 200 en la componente Norte (Fig. 26b) y de 75 en la Este (Fig. 26a).

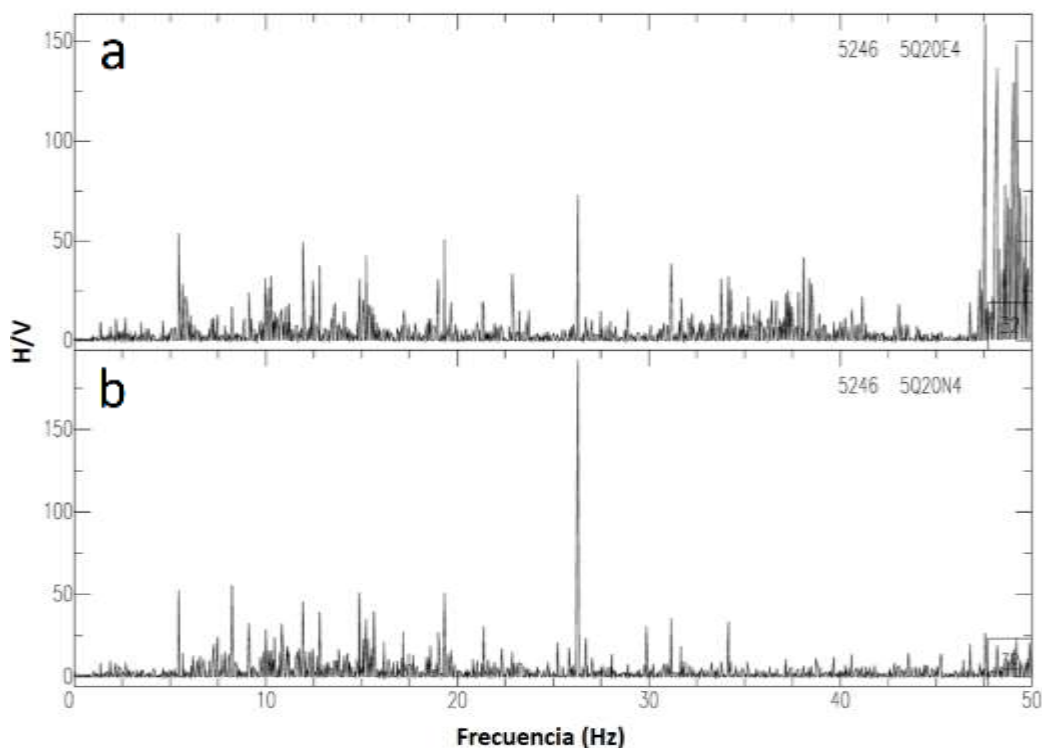


Fig. 26. Cociente espectral del punto ER-02.

Se presenta también una frecuencia de 19.0 Hz con un H/V de 50 manifestado en ambas componentes (Fig. 26a y b), por último, se consideró una frecuencia de 31.5 Hz con un H/V de 40 en la componente Este (Fig. 26a) y de 35 en la Norte (Fig. 26b).

Punto ER-03

La muestra de ruido sísmico ambiental para el punto ER-03 se registró en las coordenadas 709,024 m Este y 3'178,175 m Norte sobre dacita porfídica (DacP). En la gráfica de cocientes espectrales (Fig. 27) la frecuencia más alta está registrada a los 37.0 Hz con un H/V de 100 en la componente Este (Fig. 27a) y de 70 en la Norte (Fig. 27b).

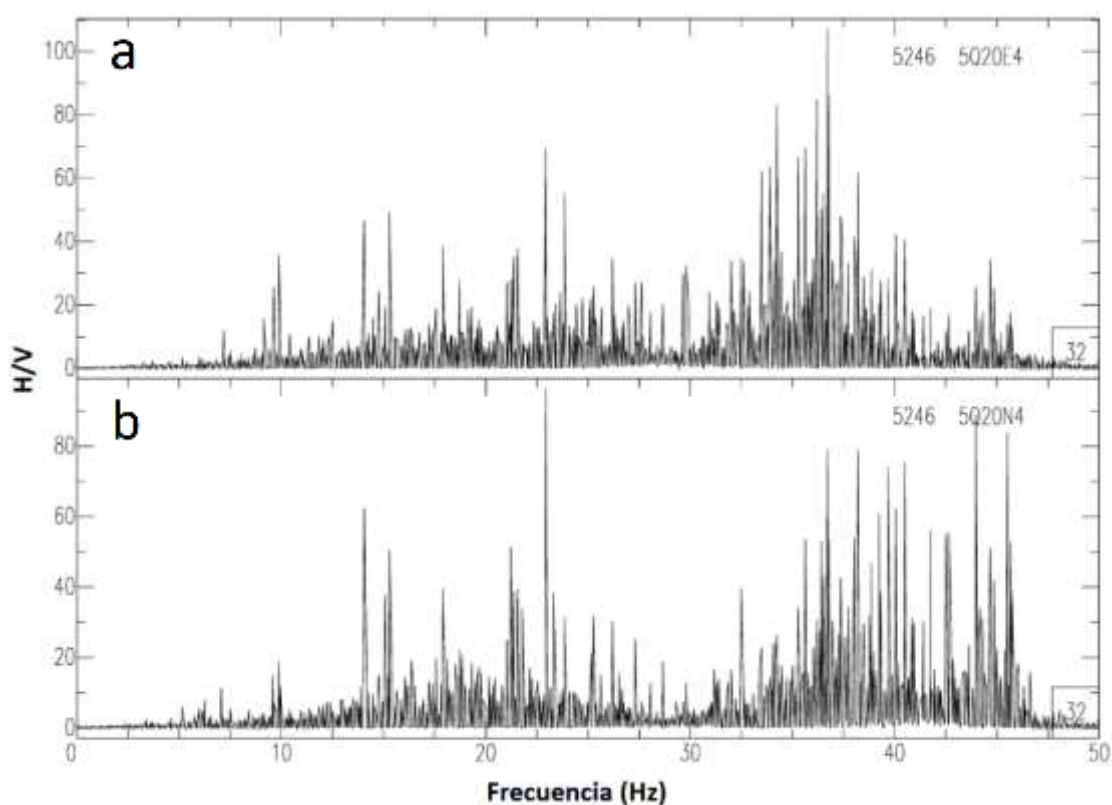


Fig. 27. Cociente espectral del punto ER-03.

Se obtiene otra frecuencia importante a los 23.0 Hz con un H/V en la componente Norte de 100 (Fig. 27b) y de 70 para la componente Este (Fig. 27a); a los 14.0 Hz se observa

un H/V de 60 en la componente Norte (Fig. 27b) y 45 en la Este (Fig. 27a); se puede considerar la presencia de una frecuencia de 10.0 Hz manifestada en ambas componentes.

Punto ER-04

El punto ER-04 se localiza en las coordenadas 708,960 m Este y 3'178,258 m Norte, la medición de ruido sísmico ambiental (Fig. 28) se realizó sobre una roca clasificada como toba lítica de composición dacítica (VITDI) la cual presenta un grado de alto de silicificación, posiblemente por su cercanía con la brecha hidrotermal (HBX).

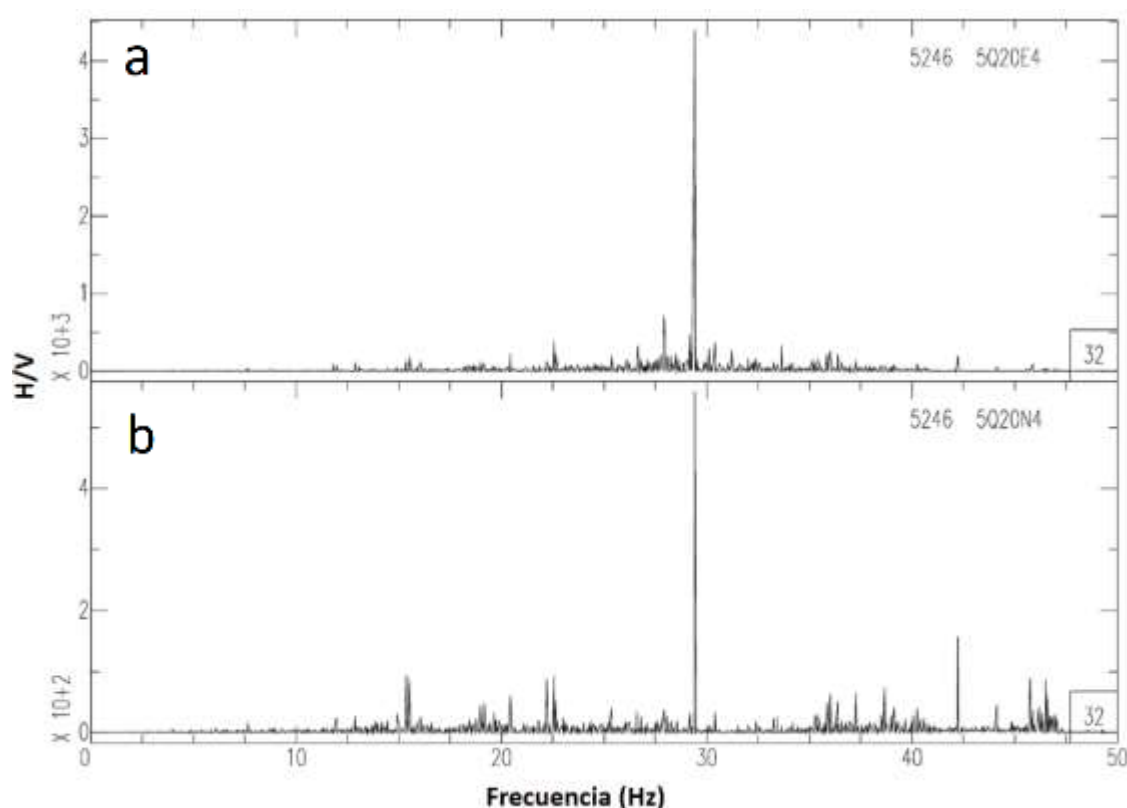


Fig. 28. Cociente espectral del punto ER-04.

Se presenta una frecuencia importante a los 29.0 Hz en ambas componentes, con un H/V de 4.5×10^3 en la componente Este (Fig. 28a) y de 5×10^2 para la componente Norte (Fig. 28b); se puede observar una frecuencia de 22.5 Hz con mayor H/V en la componente Norte con 1×10^2 (Fig. 28b) y en la componente Este de 0.5×10^3 (Fig. 28a); la gráfica resultante

también presenta una frecuencia de 20.5 Hz con un H/V de 0.1×10^3 en la componente Norte (Fig. 28b) y 0.5×10^3 en la componente Este (Fig. 28a).

Punto ER-05

El punto de muestreo se ubica en las coordenadas 708,913 m Este y 3'178,261 m Norte, la medición de ruido sísmico ambiental (Fig. 29) se realizó sobre una roca descrita como una dacita porfídica (DacP) con presencia de un grado moderado de oxidación en las cercanías de una antigua obra minera.

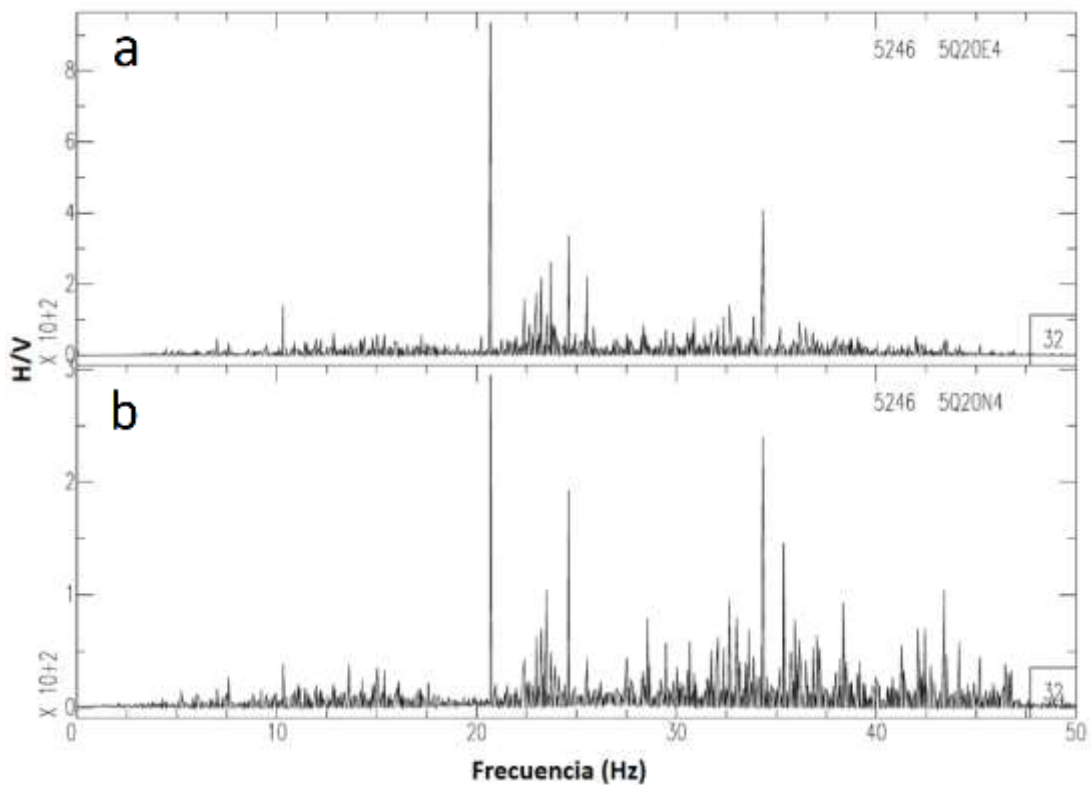


Fig. 29. Cociente espectral del punto ER-05.

La frecuencia más alta registrada en la gráfica de cocientes espectrales es de 21.5 Hz con un H/V de 8.5×10^2 en la componente Este (Fig. 29a) y con menor manifestación en la componente Norte con un H/V de 3×10^2 (Fig. 29b), por otra parte, se tiene presencia de una frecuencia de 34.5 Hz en ambas componentes; por último, se presenta un pico a los 24.5 Hz

con un H/V mayor en la componente Este de 2.5×10^2 (Fig. 29a) y de 2×10^2 en la componente Norte (Fig. 29b).

Punto ER-06

La muestra de ruido sísmico se localiza en las coordenadas 709,073 m Este y 3'178,356 m Norte. La roca identificada en el punto de muestreo fue clasificada como una dacita porfídica en la Unidad Volcanoclástica (DacVs).

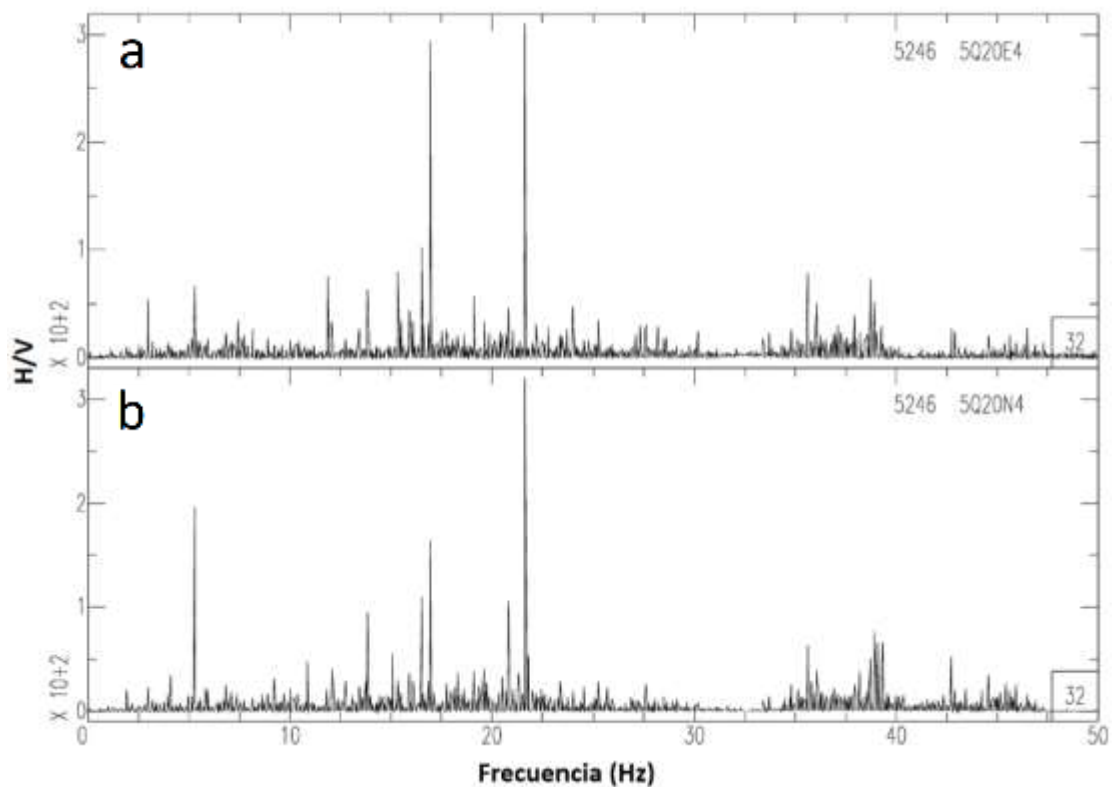


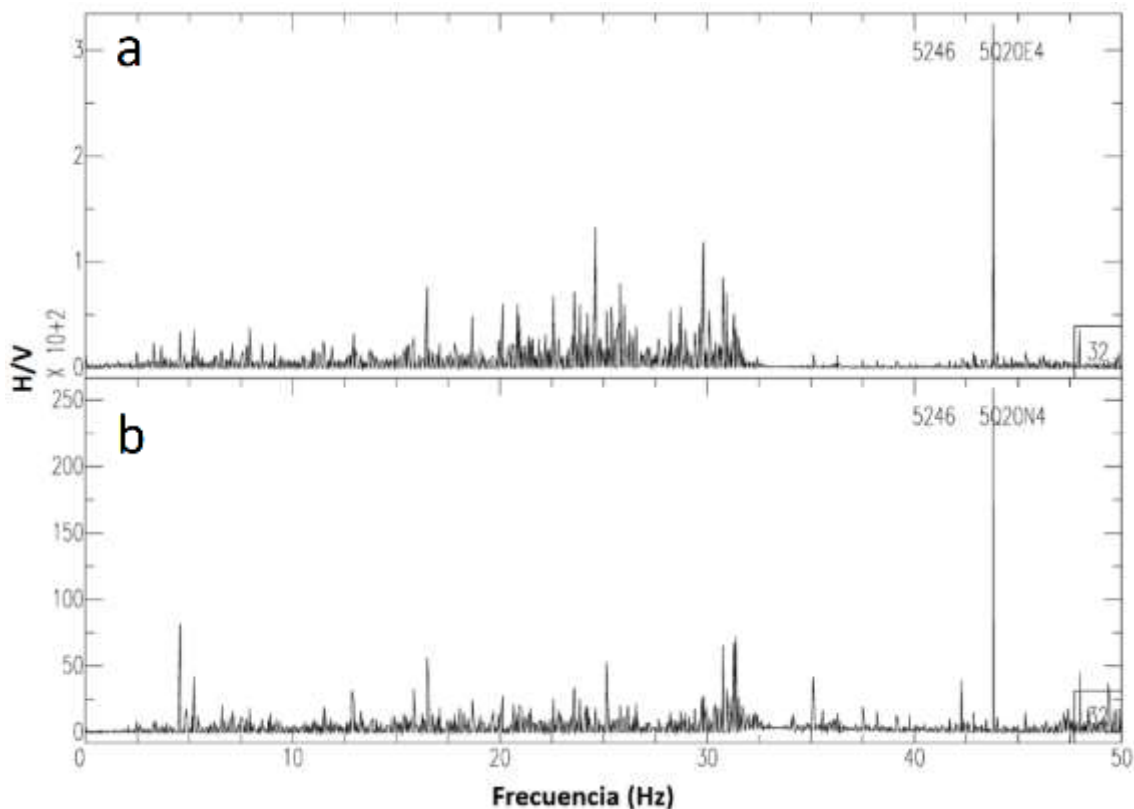
Fig. 30. Cociente espectral del punto ER-06.

En la gráfica de cocientes espectrales (Fig. 30) se tiene el pico más alto a los 22.0 Hz con una H/V de 3×10^2 tanto para la componente Este y Norte (Fig. 30a y b). Se tiene la presencia de un pico a los 17.0 Hz con una mayor amplificación del H/V en la componente Este con 3×10^3 (Fig. 30a) y 1.5×10^2 para la componente Norte (Fig. 30b). Por último, se

presenta una frecuencia baja a los 5.0 Hz con un H/V de 2×10^2 en la componente Norte (Fig. 30b) y de 0.5×10^2 (Fig. 30a) en la componente Este.

Punto ER-07

El punto de muestreo de ruido sísmico ambiental se localiza en las coordenadas 709,140 m Este y 3'178,447 m Norte. El tipo de roca presente en el punto de muestreo fue clasificado como una toba lítica de composición dacítica (VITDI) la cual presenta un alto grado de silicificación.



En la gráfica del cociente espectral del punto ER-07 (Fig. 31) presenta la frecuencia más alta a los 43.0 Hz, manifestada en ambas componentes, la componente Este presenta un H/V de 3.25×10^2 (Fig. 31a) y en la componente Norte de 250 (Fig. 31b); por otra parte, se presenta una frecuencia a los 25.0 Hz con un H/V de 1.25×10^2 en la componente Este (Fig.

31a) y de 50 en la Norte (Fig. 31b); por último, se presenta un pico en la frecuencia de 31.5 Hz con una amplificación en H/V de 0.9×10^2 para la componente Este (Fig. 31a) y 75 en la componente Norte (Fig. 31b).

Punto ER-08

La localización del punto de muestreo ER-08 se encuentra en las coordenadas 709,150 m Este y 3'178,431 m Norte. El registro de ruido sísmico ambiental se realizó sobre una roca descrita como brecha hidrotermal (HBX) con presencia un grado de oxidación de bajo a moderado.

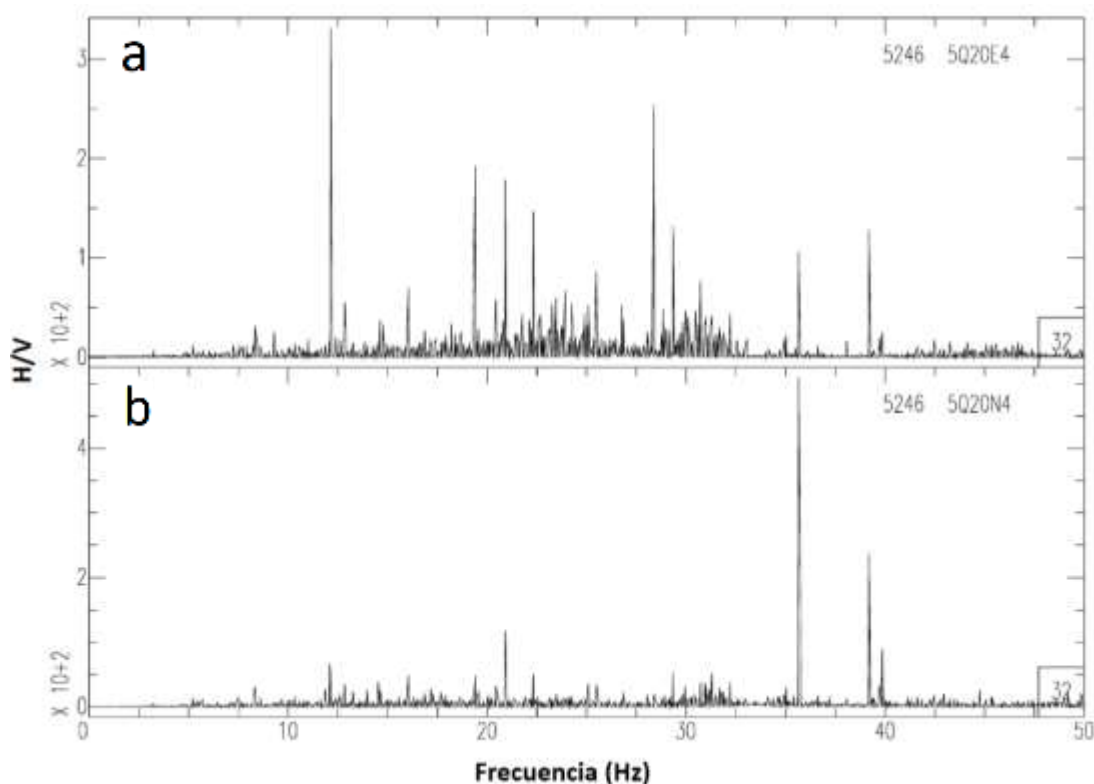


Fig. 32. Cociente espectral del punto ER-08

La gráfica de cocientes espectrales (Fig. 32) muestra cierto grado de complejidad, la frecuencia más alta a los 35.5 Hz, mostrando un H/V mayor en la componente Norte de 4.5×10^2 (Fig. 32b) y de 1×10^2 en la Este (Fig. 32a); por otra parte, se presenta una frecuencia

a los 12.0 Hz con un H/V más intensificado en la componente Este de 3.25×10^2 (Fig. 32a) y en la componente Norte de 0.75×10^2 (Fig. 32b). Se presenta una frecuencia de 21.0 Hz con un H/V de 1.75×10^2 en la componente Este (Fig. 32a) y de 1×10^2 en la componente Norte (Fig. 32b), además, se muestra una frecuencia de 39.0 Hz con un H/V de 2.25×10^2 en la componente Norte (Fig. 32b) y de 1.25×10^2 en la Este (Fig. 32a).

Punto ER-09

La muestra de ruido sísmico ambiental del punto ER-09 se localiza en las coordenadas 709,209 m Este y 3'178,422 m Norte, dicho registro se realizó sobre una roca clasificada como una toba de composición dacítica, perteneciente a la Unidad Volcanoclástica (DacVs) con presencia de un alto grado de oxidación.

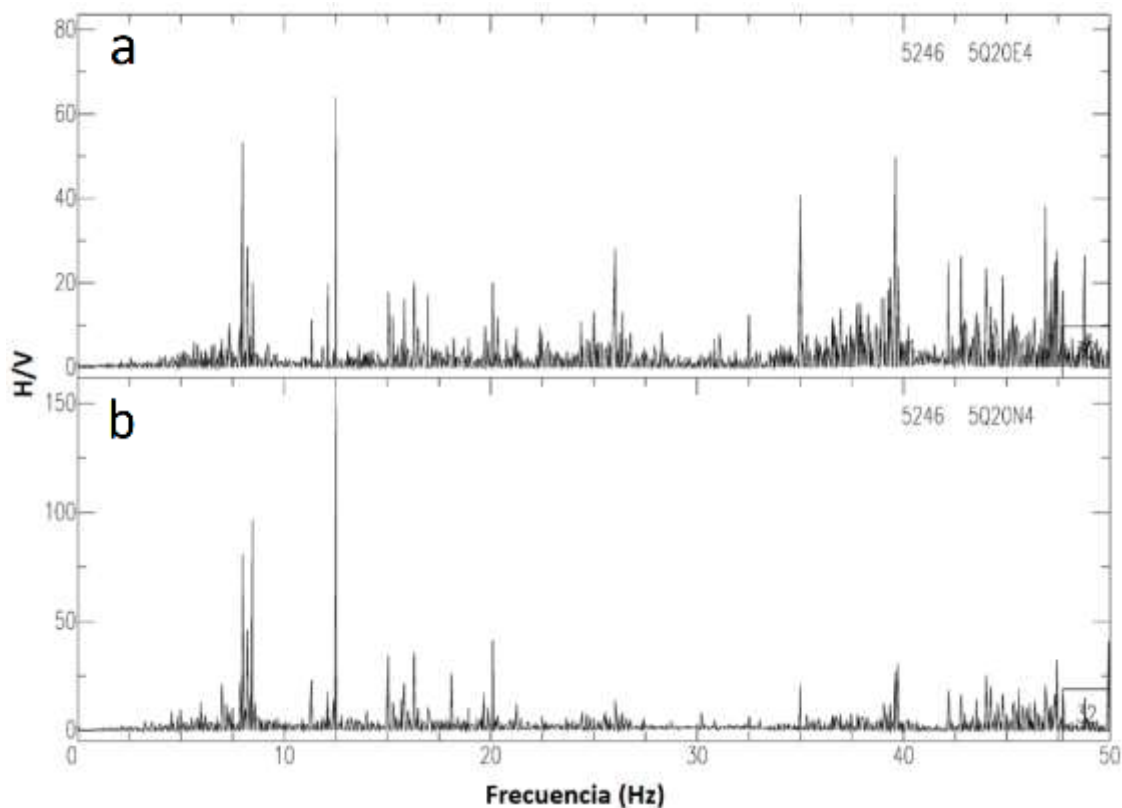


Fig. 33. Cociente espectral del punto ER-09.

La grafica de cocientes espectrales (Fig. 33) muestra la frecuencia más alta a los 12.5 Hz con un H/V más intensificado en la componente Norte de 150 (Fig. 33b) y de 65 en componente Este (Fig. 33a), en cambio, se tiene la presencia de una frecuencia a los 8.0 Hz con un H/V de 100 para la componente Norte (Fig. 33b) y de 55 para la Este (Fig. 33a). Se presenta una frecuencia a los 17.5 Hz con un H/V de 45 para la componente Este (Fig. 33a) y de 20 en la componente Norte (Fig. 33b); también a los 35.0 Hz con una amplificación en H/V de 40 en la componente Norte (Fig. 33b) y de 20 en la Este (Fig. 33a).

4.2 COCIENTES ESPECTRALES DEL ÁREA LOS TUBOS

Punto LT-01

El punto de muestreo de ruido sísmico ambiental se localiza en las coordenadas 709,374 m Este y 3'177,720 m Norte. La lectura fue realizada sobre una roca clasificada como brecha hidrotermal (HBX) la cual presenta un grado moderado de silicificación y óxidos de hematita.

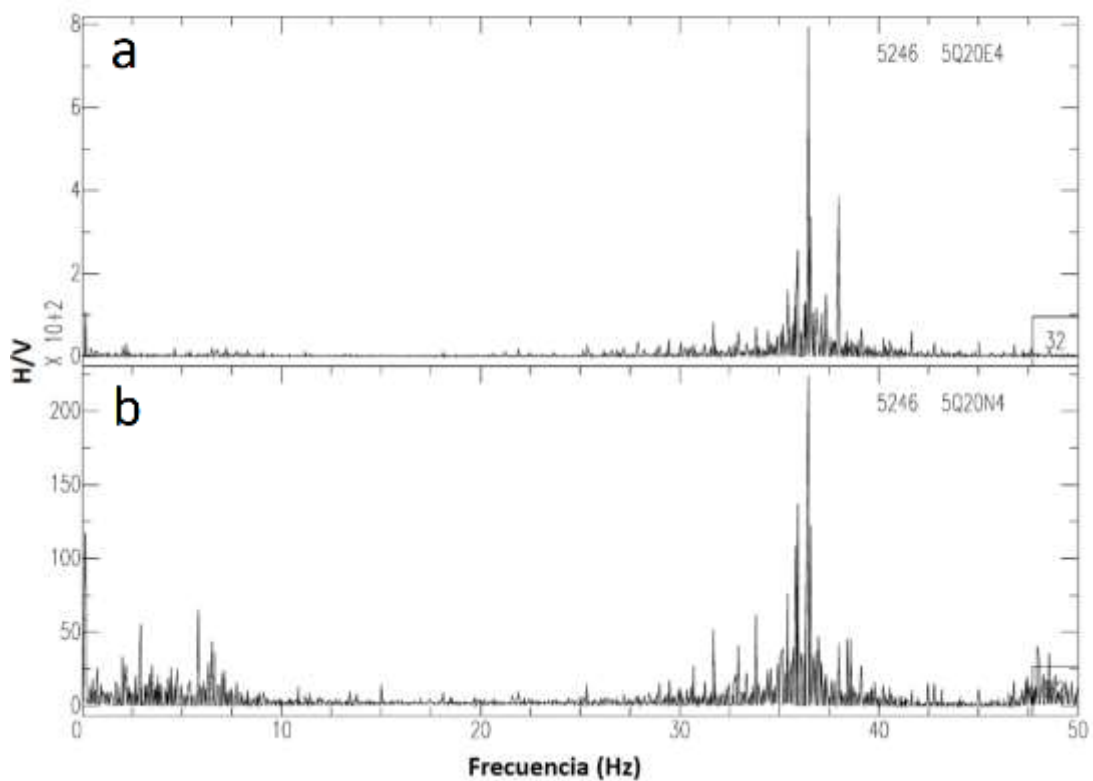


Fig. 34. Cocientes espectral del punto LT-01.

La grafica de cocientes espectrales (Fig. 34) muestra su frecuencia más alta a los 37.0 Hz, con un H/V de 8×10^2 para la componente Este (Fig. 34a) y de 250 en la Norte (Fig. 34b). Contrariamente, en la componente Norte se observa la manifestación de una frecuencia a los 6.0 Hz y a los 3.0 Hz, con un H/V de 70 y 55 respectivamente (Fig. 34b), aunque debido a la amplificación del H/V de la frecuencia de 37.0 Hz estos no son perceptibles (Fig. 34a).

Punto LT-02

El punto de registro ruido sísmico ambiental se localiza en las coordenadas 709,434 m Este y 3'177,020 m Norte, el tipo de roca sobre la que se realizó la medición fue clasificada como una dacita porfídica (DacP) que presenta un bajo grado de oxidación, cerca del punto de muestreo se localiza el barreno INLT-18-047.

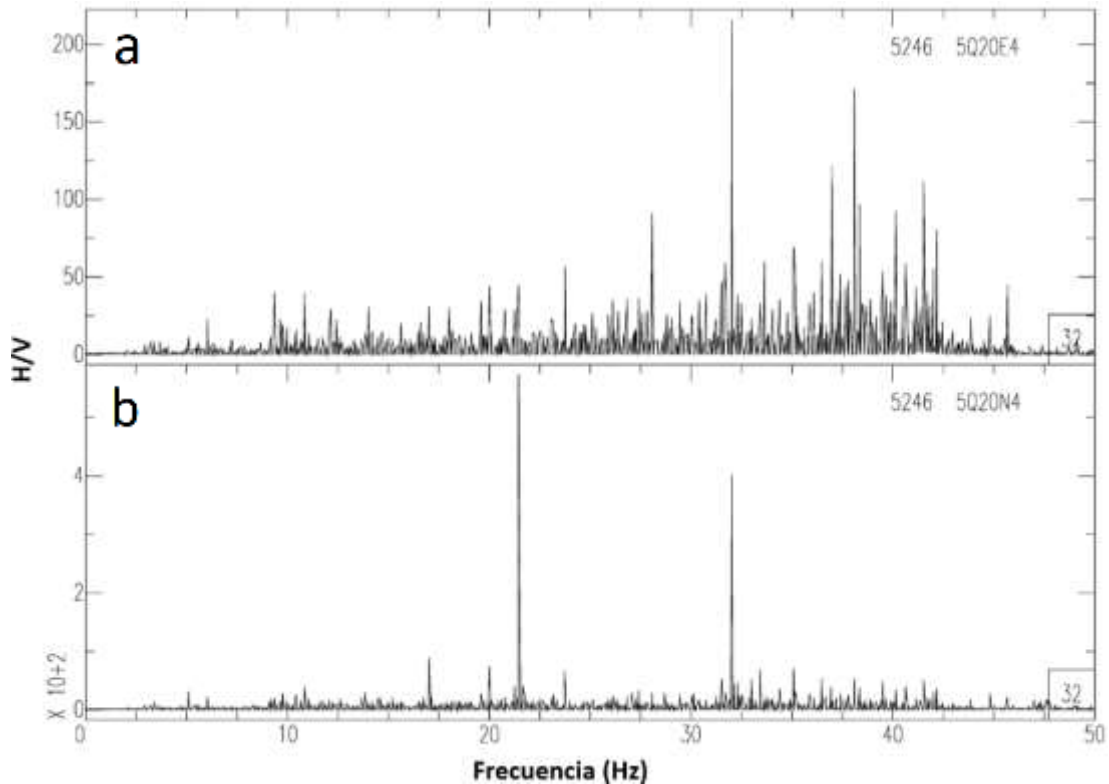


Fig. 35. Cociente espectral del punto LT-02.

La frecuencia más alta en la gráfica de cocientes espectrales (Fig. 35) está a los 22.0 Hz mostrando un H/V de 5×10^2 en la componente Norte (Fig. 34b) y en la componente Este con un valor bajo de 45 (Fig. 35a). Se presenta una frecuencia alta a los 32.0 Hz con un efecto de amplificación mayor del H/V en la componente Norte de 4×10^2 (Fig. 35b) y en la Este con 250 (Fig. 35a), por otra parte, hay manifestación de una frecuencia de 10.5 Hz con el H/V más amplificado en la componente Este de 40 (Fig. 35a) y de 0.25 en la componente Norte (Fig. 35b).

Punto LT-03

El registro de ruido sísmico ambiental del punto LT-03 se localiza en las coordenadas 709,459 m Este y de 3'177,019 m Norte sobre una roca clasificada como dacita porfídica (DacP), la cual presenta oxidación y silicificación de moderado a bajo grado.

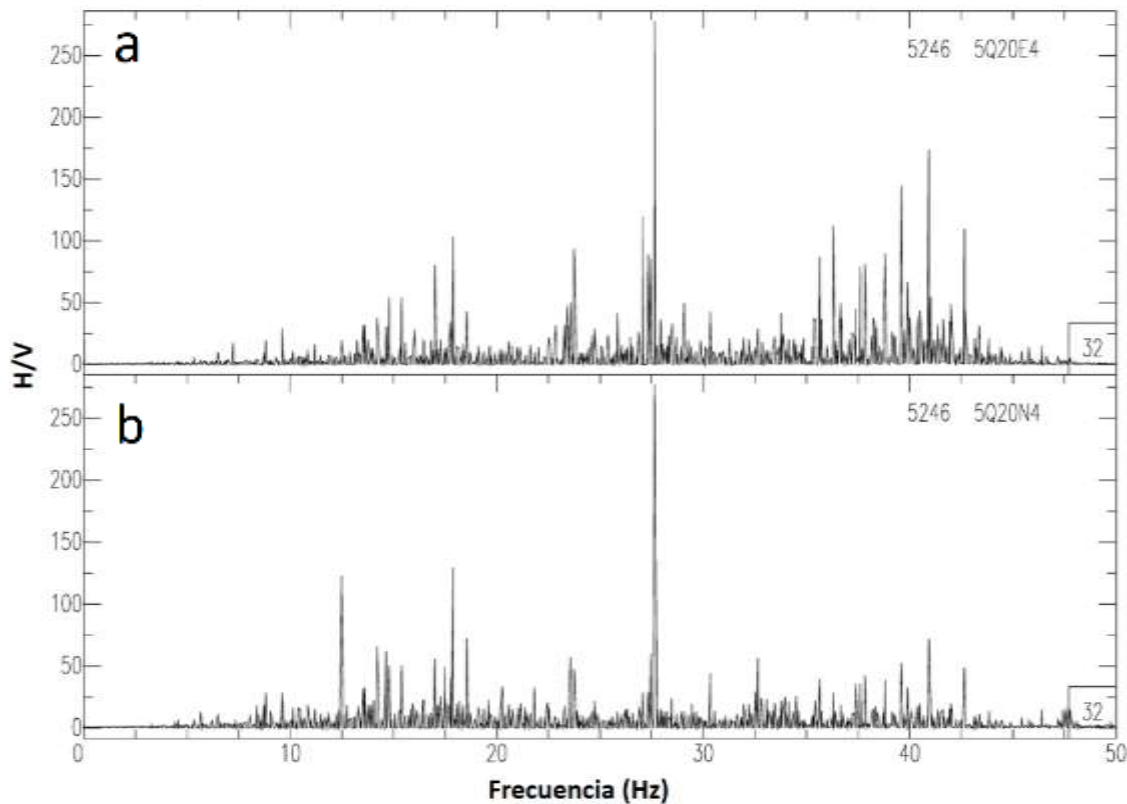


Fig. 36. Cociente espectral del punto LT-03.

En la gráfica de cocientes espectrales (Fig. 36), la frecuencia más alta se encuentra a los 27.5 Hz, con una amplificación del H/V de 275 para ambas componentes (Fig. 36a y b). Por otra parte, se presenta una frecuencia a los 41.5 Hz con un H/V mayor amplificado en la componente Este de 175 (Fig. 36a) y de 70 en la Norte (Fig. 36b). Además, se puede observar una frecuencia de 17.5 Hz con un H/V de 125 en la componente Norte (Fig. 36b) y de 100 para la Este (Fig. 36a). Por último, se identifica una frecuencia a los 23.0 Hz presentando un H/V de 95 en la componente Este (Fig. 36a) y de 50 para la componente Norte (Fig. 36b).

Punto LT-04

Las coordenadas del registro de ruido sísmico ambiental para el punto LT-04 son 709,491 m Este y 3'177,019 m Norte, la muestra fue colectada sobre una roca clasificada como una dacita porfídica (DacP) con presencia de oxidación y silicificación de grado moderado, la cual está en cercanía con la brecha hidrotermal (HBx).

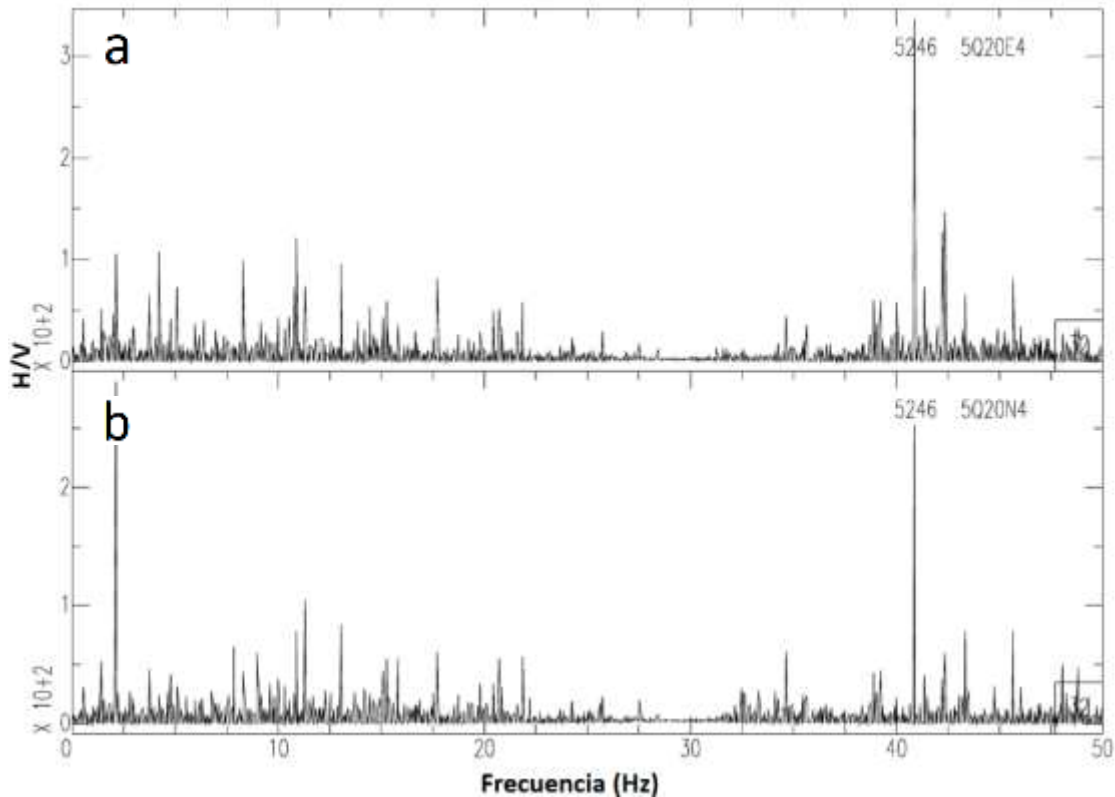


Fig. 37. Cociente espectral del punto LT-04

La gráfica de cocientes espectrales (Fig. 37) muestra la frecuencia más alta a los 41.0 Hz con un H/V de mayor amplificación en la componente Este de 3.25×10^2 (Fig. 37a) y de 2.5×10^2 en la Norte (Fig. 37b), también se manifiesta una frecuencia a los 2.0 Hz con un mayor H/V en la componente Norte de 3.0×10^2 (Fig. 37b) y de 1.0×10^2 para la Este (Fig. 37a); en cambio, hay presencia de una frecuencia a los 11.5 Hz con su H/V de 1.2×10^2 en la componente Este (Fig. 37a) y de 1.0×10^2 en la Norte (Fig. 37b).

Punto LT-05

Las coordenadas correspondientes al registro de ruido sísmico ambiental del punto LT-05 son 709,377 m Este y 3'176,985 m Norte, el tipo de roca descrito en el sitio fue clasificado como una toba lítica de composición dacítica (VITDI) con un alto grado de silicificación y presencia de oxidación en grado moderado.

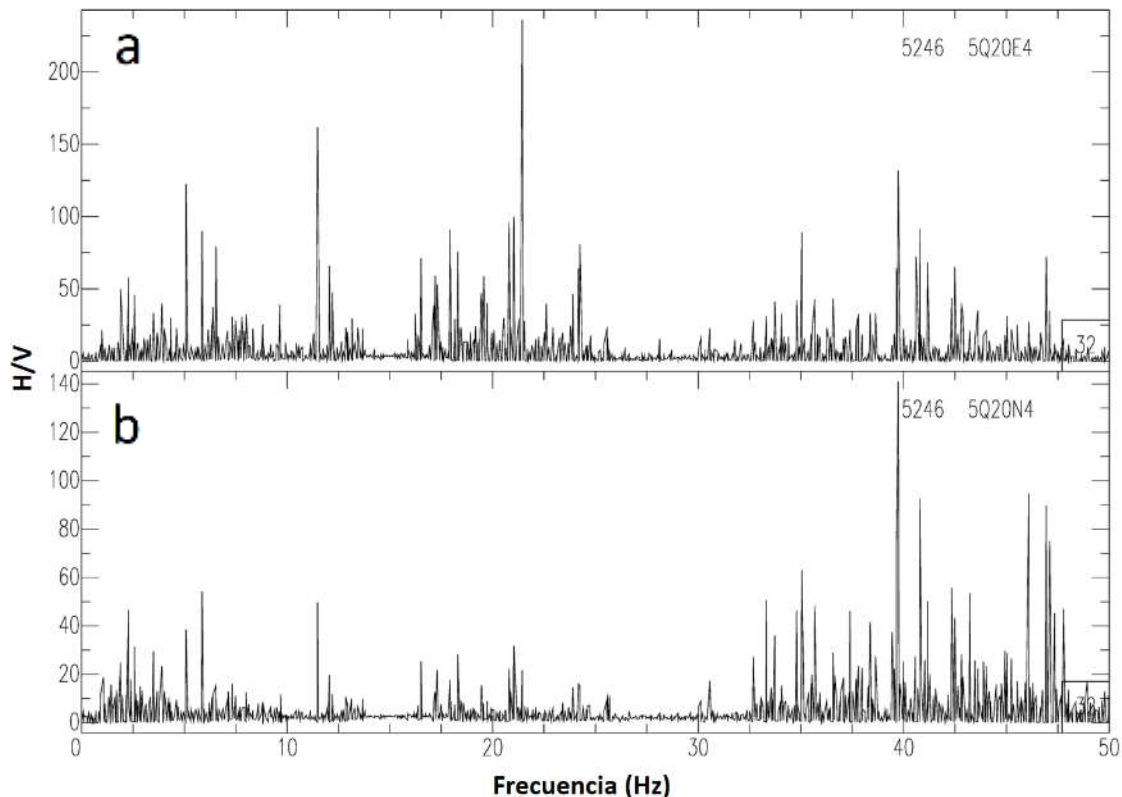


Fig. 38. Cociente espectral del punto LT-05

La gráfica de cocientes espectrales (Fig. 38) presenta la frecuencia más alta a los 21.5 Hz, mayormente amplificada en la componente Este con un H/V de 280 (Fig. 38a) y en la componente Norte de 30 (Fig. 38b), además, se presenta un pico a los 11.5 Hz con un H/V de 165 en la componente Este (Fig. 38a) y 50 para la componente Norte (Fig. 38b). Se manifiesta una frecuencia de 39.5 Hz con un H/V de 140 en la componente Norte (Fig. 38b) y de 130 en la Este (Fig. 38a) y por último se observa un pico a los 5.0 Hz con el H/V más alto en la componente Este de 125 (Fig. 38a) y de 50 para la Norte (Fig. 38b).

Punto LT-06

El punto de registro de ruido sísmico ambiental se localiza en las coordenadas 709,400 m Norte y 3'176,982 m Norte y fue realizada sobre una toba lítica de composición dacítica (V1TDI) con presencia de fuerte oxidación goethita-hematita.

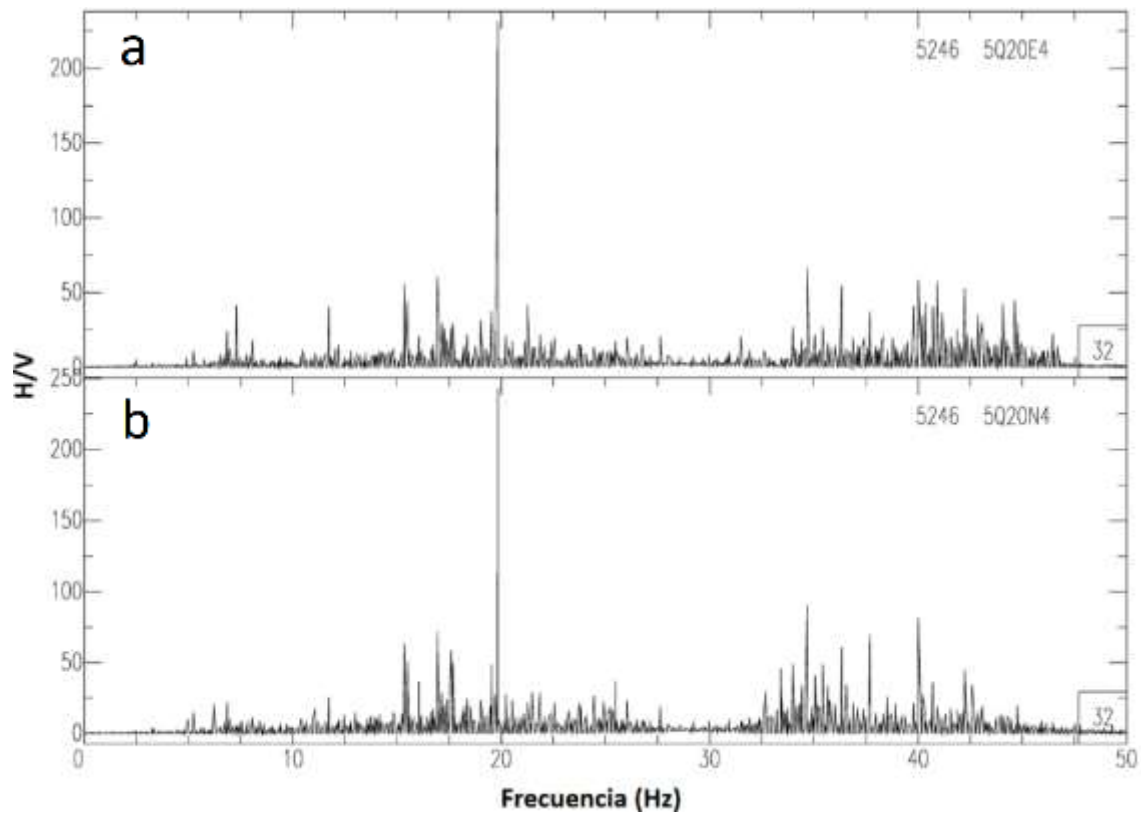


Fig. 39. Cociente espectral del punto LT-06.

La gráfica de cocientes espectrales (Fig. 39) presenta el pico más alto en la frecuencia de 20.0 Hz con mayor amplificación en la componente Norte mostrando un H/V de 240 (Fig. 39b) y de 230 para la Este (Fig. 39a). Por otra parte, se muestra una frecuencia de 34.5 Hz con un H/V de 90 para la componente Norte (Fig. 39b) y 70 para la componente Este (Fig. 39a); también se observa una frecuencia a los 17.0 Hz con un H/V de 75 para la componente norte (Fig. 39b) y de 60 para la Este (Fig. 39a), por último, hay manifestación de un pico a los 7.0 Hz con un H/V mayor en la componente Norte de 40 (Fig. 39b) y de 25 para la Este (Fig. 39a).

Punto LT-07

El registro de ruido sísmico ambiental para el punto LT-07 se localiza en las coordenadas 709,460 m Este y 3'176,991 m Norte sobre una dacita porfídica (V1TDI) y considerada como zona de oxidación con presencia de moderada silicificación; por otra parte, se consideró la presencia de un equipo de perforación trabajando en las inmediaciones.

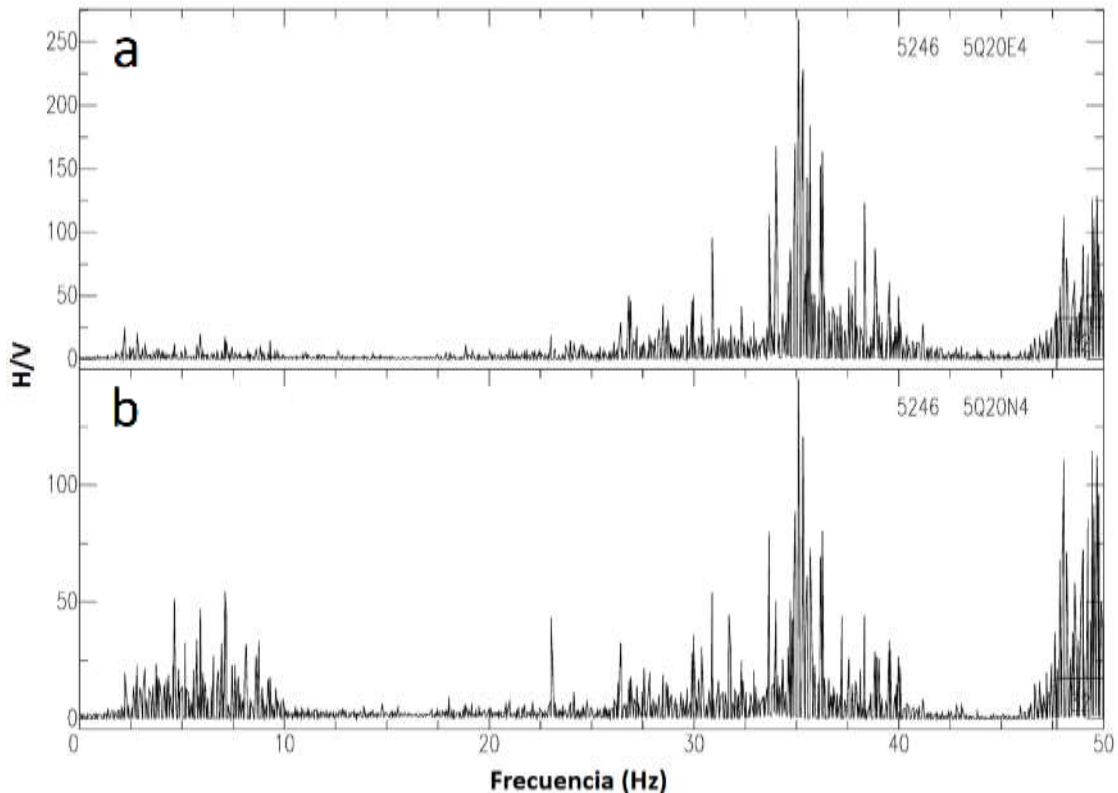


Fig. 40. Cociente espectral del punto LT-07.

La gráfica resultante de cocientes espectrales (Figura 40) muestra la frecuencia más alta a los 35.0 Hz con un H/V de 270 en la componente Este (Fig. 40a) y de 200 en la Norte (Fig. 40b), por otra parte, se tiene una frecuencia a los 7.0 Hz con un H/V de 52.5 para la componente Norte (Fig. 40b) y de 20 para la componente Este (Fig. 40a). A manera de interpretación se considera una frecuencia a los 23.0 Hz con un H/V de 40 en la componente Norte (Fig. 40b) y de 20 para la Este (Fig. 40a).

Punto LT-08

La medición de ruido sísmico ambiental se realizó en las coordenadas 709,494 m Este y 3'176,989 m Norte, el tipo de roca presente en el área fue descrito como una dacita porfídica (DacP) en una zona de oxidación hematita-goethita. Se ha tomado en cuenta la presencia de un equipo de perforación trabajando a los alrededores.

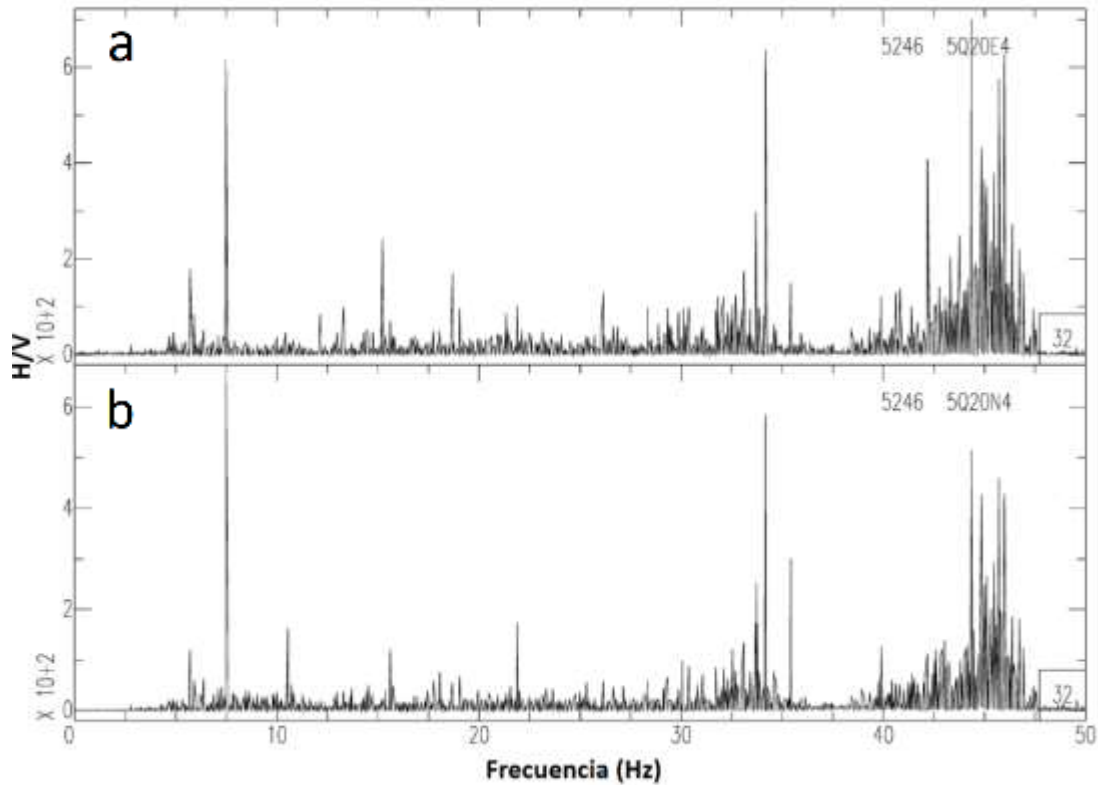


Fig. 41. Cociente espectral del punto LT-08.

La gráfica (Fig. 41) muestra la frecuencia más alta a los 7.5 Hz con el H/V de mayor amplificación en la componente Norte de 7×10^2 (Fig. 41b) y de 6×10^2 en la Este (Fig. 41a), se puede observar un pico a los 44.5 Hz con un H/V de 7×10^2 en la componente Este (Fig. 41a) y en la Norte de 5.25×10^2 ; se tiene presencia de una frecuencia de 33.0 Hz con aun H/V mayor de 6.4×10^2 en la componente Este (Fig. 41a) y de 5.8×10^2 para la componente Norte (Fig. 41b), por último, se observa una frecuencia de 15.5 Hz con un mayor efecto en H/V de 2.5×10^2 para la componente Este (Fig. 41a) y de 1.5×10^2 para la Norte (Fig. 41b).

Punto LT-09

El registro de ruido sísmico ambiental se encuentra en las coordenadas 709,398 m Este y 3'176,961 m Norte, el tipo de roca presente en el sitio de registro fue clasificado como una dacita porfídica (DacP).

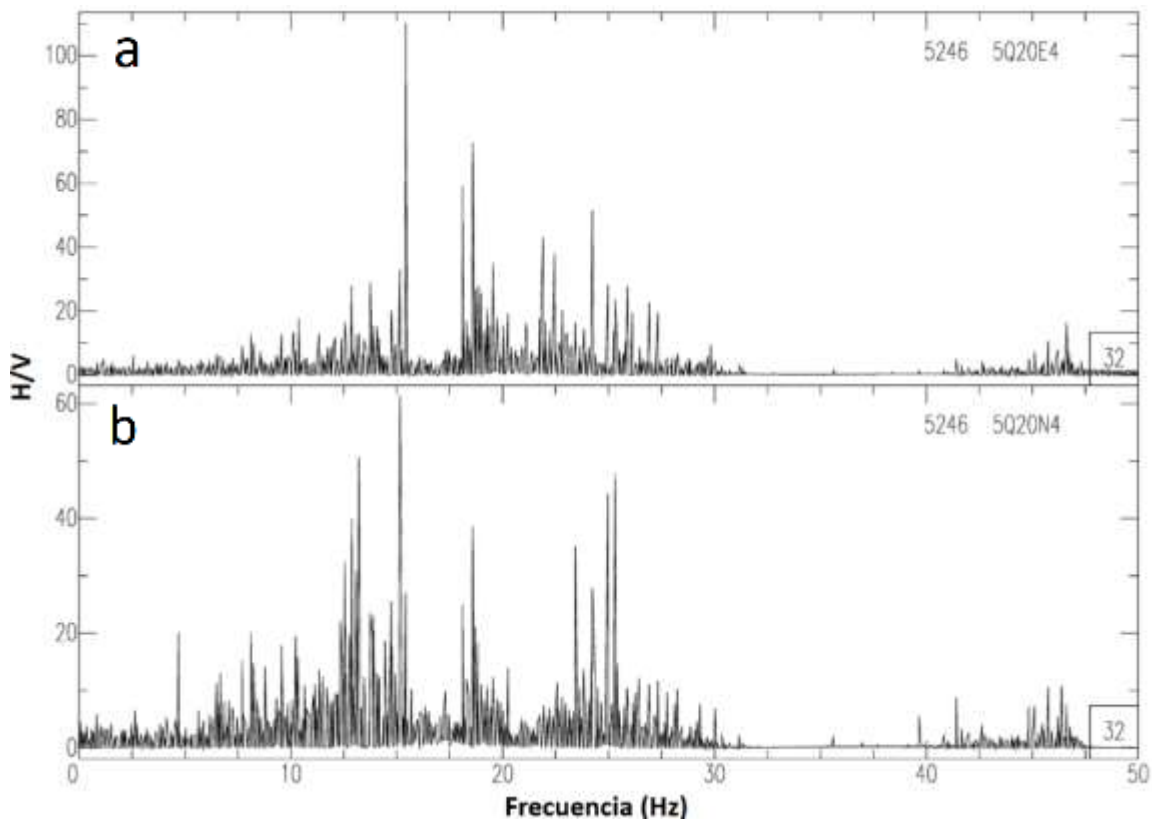
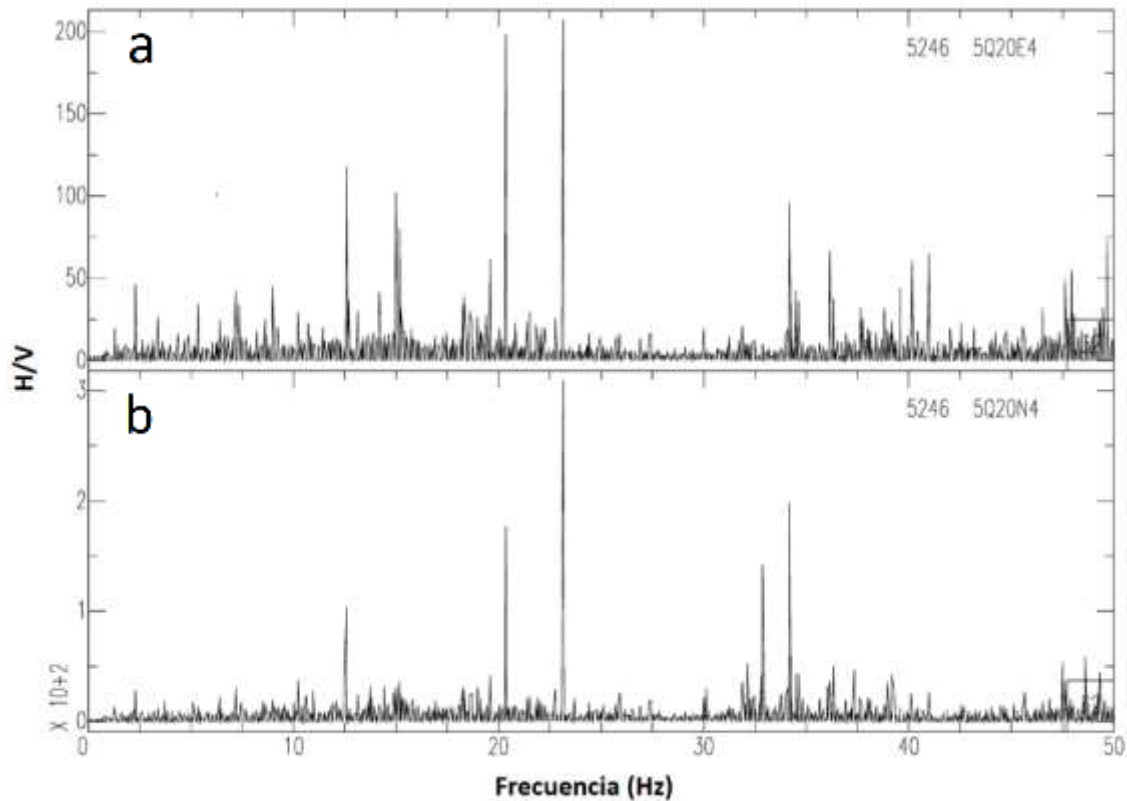


Fig. 42. Cociente espectral del punto LT-09.

La grafica muestra (Fig. 42) la frecuencia más alta a los 15.5 Hz, con el H/V de mayor amplitud en la componente Este de 110 (Fig. 42a) y para la componente Norte de 60 (Fig. 42b); por otra parte, se presenta una frecuencia de 18.0 Hz en la que se observa un H/V de 70 correspondiente a la componente Este (Fig. 42a) y 38 para la componente Norte (Fig. 42b), además, del registro se obtuvo de una frecuencia a los 24.0 Hz con un H/V mayor en la componente Este de 50 (Fig. 42a) y 28 en la Norte (Fig. 42b). Por último, se registró un pico a los 46.5 Hz con un H/V de 15 para la componente Este (Fig. 42a) y una amplitud menor en para la componente Norte de 10 (Fig. 42b).

Punto LT-10

El punto de registro de vibración sísmica ambiental se encuentra en las coordenadas 709,424 m Este y 3'176,967 m Norte, la medición se realizó sobre una roca clasificada como dacita porfídica (DacP) con presencia de un grado moderado de oxidación. Se consideró la presencia de una máquina perforadora trabajando en las cercanías del sitio.



En la gráfica de cocientes espectrales (Fig. 43) la frecuencia con mayor H/V se presenta a los 23.0 Hz con 3×10^2 para la componente Norte (Fig. 43b) y de 210 para la Este (Fig. 43a), en el registro se muestra una frecuencia de 21.0 Hz con un mayor efecto de amplificación en la componente Este de 190 (Fig. 43a) y de 1×10^2 para la Norte (Fig. 43b). Se detectó una frecuencia de 34.0 Hz con un H/V en la componente Norte de 2×10^2 (Fig. 43b) y de 100 para la Este (Fig. 43a), por último, se consideró la frecuencia de 15.0 Hz con un H/V de 120 en la componente Este (Fig. 43a) y de 1×10^2 en la Norte (Fig. 43b).

Punto LT-11

La medición de vibración sísmica ambiental fue realizada en el punto con coordenadas 709,455 m Este y de 3'176,965 m Norte sobre una roca clasificada como dacita porfídica (DacP) presentando fuerte oxidación y zonas de poca silicificación.

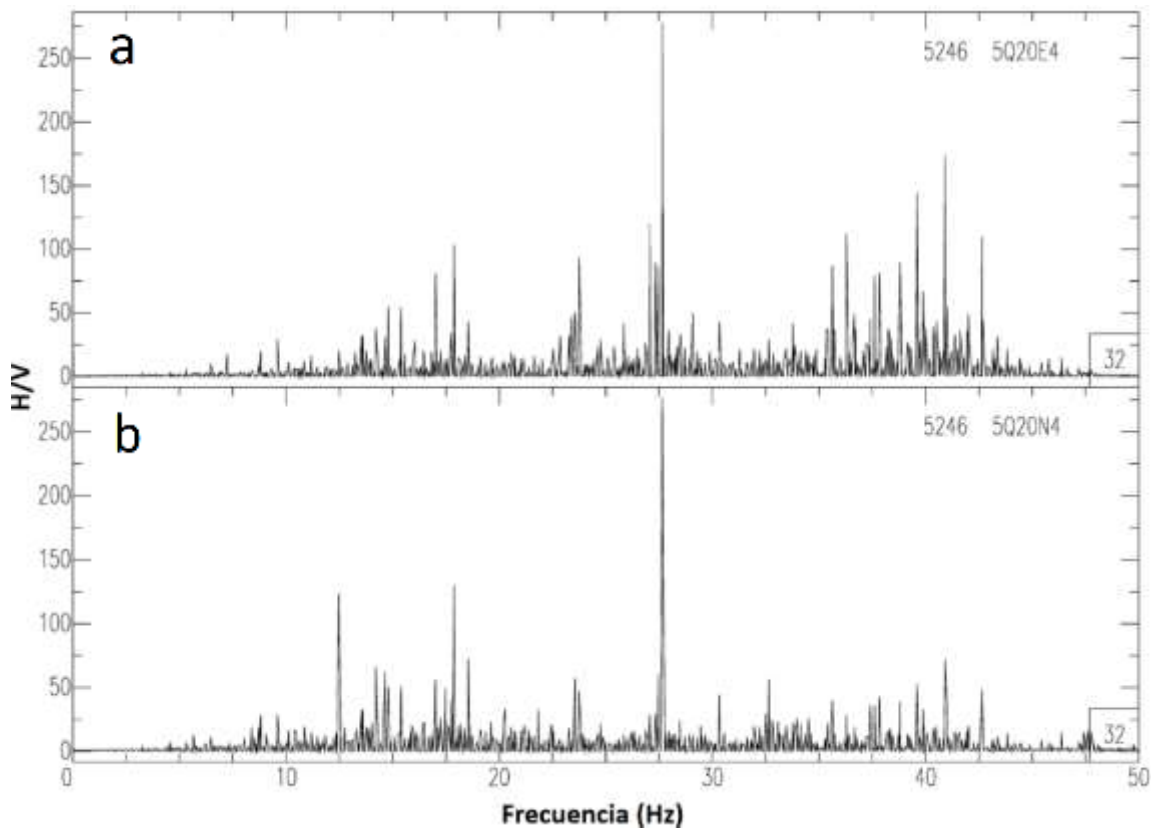


Fig. 44. Cociente espectral del punto LT-11.

La grafica de cocientes espectrales (Fig. 44) muestra la frecuencia más alta a los 27.0 Hz con un H/V de 275 para ambas componentes (Fig. 44a y b), por otra parte, se presenta una frecuencia a los 41.0 Hz con el mayor efecto de H/V de 175 en la componente Este (Fig. 44a) y de 75 para la Norte (Fig. 44b), seguido de esto se puede observar a los 17.0 Hz manifestando un H/V de 125 en la componente Norte (Fig. 44b) y de 100 en la Este (Fig. 44a), se ha considerado la presencia de una frecuencia a los 23.0 Hz con un mayor H/V de 90 para la componente Este (Fig. 44a) y 50 en la Norte (Fig. 44b).

Punto LT-12

El punto de medición de ruido sísmico ambiental se localiza en las coordenadas 709,481 m E y 3'176,963 m N, sobre una roca clasificada como dacita porfídica (DacP) la cual presenta un grado moderado de oxidación. Se consideró la presencia de maquinaria trabajando a los alrededores.

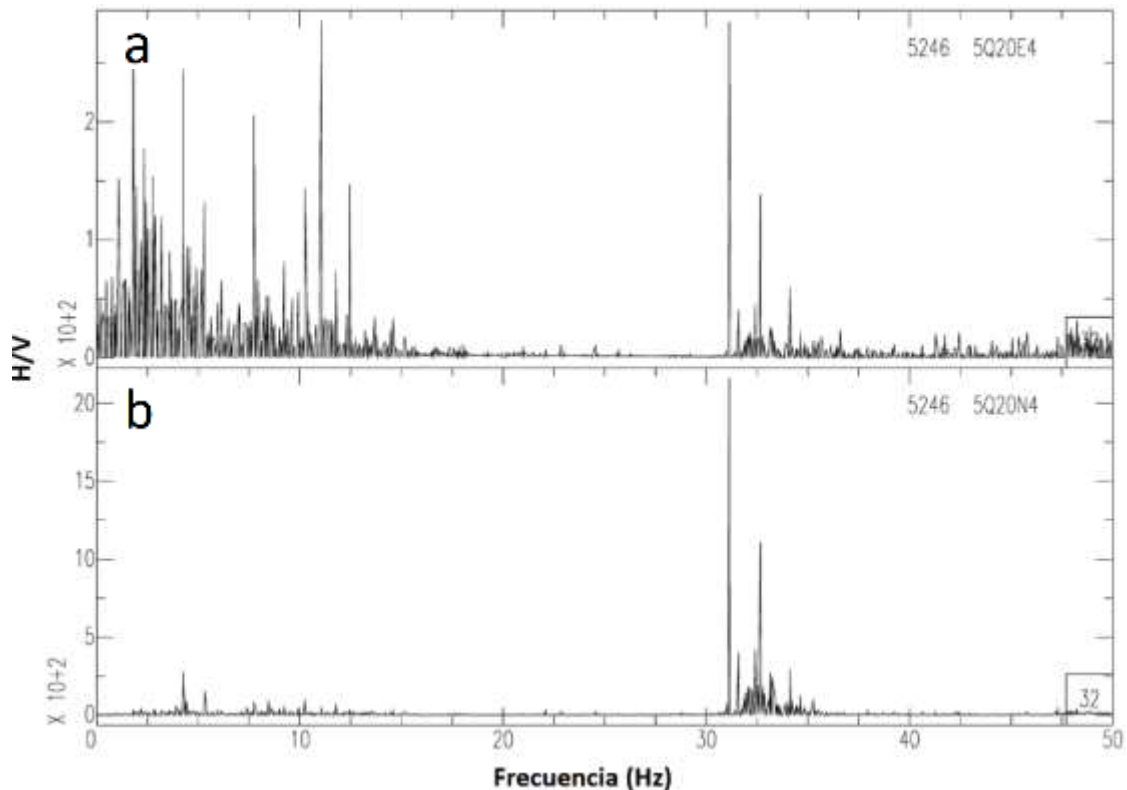


Fig. 45. Cociente espectral del punto LT-12.

La frecuencia con mayor amplificación (Fig. 45) se encuentra en la componente Norte con 31.5 Hz y un H/V de 25×10^2 en la componente Norte (Fig. 45b) y de 3×10^2 para la Este (Fig. 45a), por otra parte, se consideró la presencia de una frecuencia a los 32.5 Hz con un H/V mayor en la componente Norte de 12.5×10^2 (Fig. 45b) y un H/V de 1.4×10^2 para la Este (Fig. 45a). Se ha considerado un pico que aparece a los 4.5 Hz con un H/V de 2.6×10^2 en ambas componentes (Fig. 45a y b) y a los 10.0 Hz con presentando un H/V de 1.5×10^2 en la componente Norte (Fig. 45b) y de 1.75×10^2 en la Este (Fig. 45a).

4.3 CORRELACIÓN ESPACIAL ENTRE EL COCIENTE ESPECTRALES Y LA GEOLOGÍA DEL ÁREA

4.3.1 El Realito

Por medió del análisis espacial de los puntos de nuestro del área de El Realito, se ha relacionado la correlación geológica del área considerando las frecuencias superficiales obtenidas del análisis de cocientes espectrales y los rasgos geológicos del área (Fig. 46). En este apartado se agradece al departamento de Exploración-Operación de la mina La India por facilitar el acceso para consulta de algunas fotografías pertenecientes a los núcleos de perforación del área El Realito; por cuestiones de confidencialidad de datos por parte de la empresa, se omiten el despliegue total de las fotografías pertenecientes a los barrenos seleccionados.

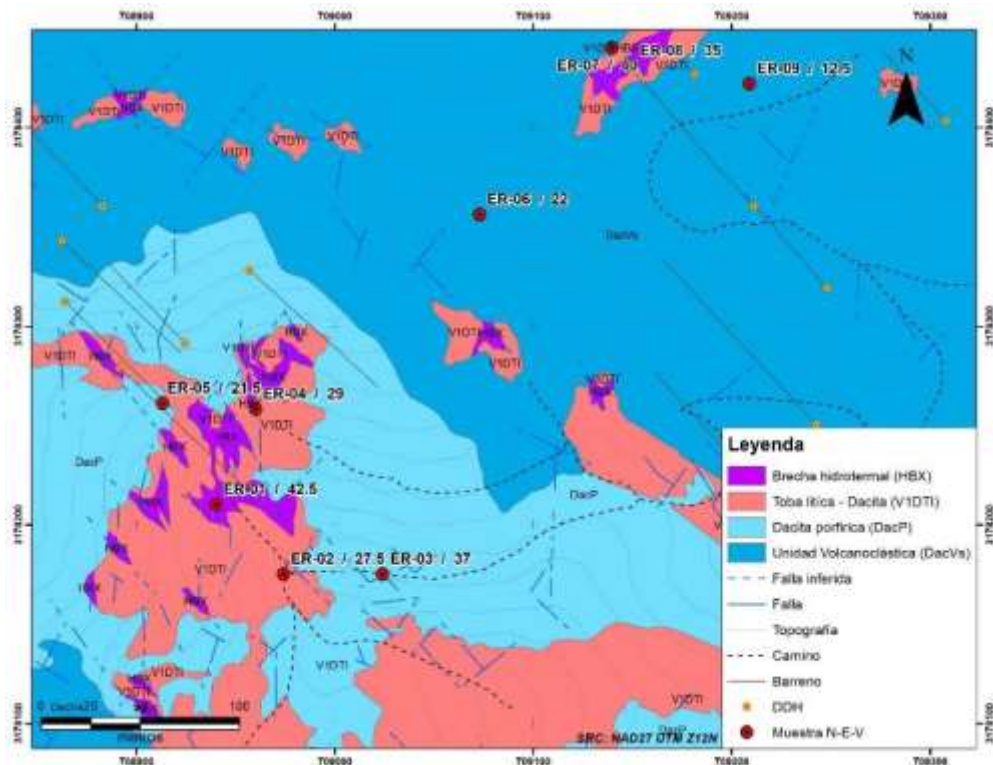


Fig. 46. Distribución espacial de frecuencias superficiales del área El Realito.

El registro del punto ER-01 y ER-08, fue realizado sobre la brecha hidrotermal (HBX), presentando en superficie valores de 42.5 Hz y 35.0 Hz respectivamente, considerándose la presencia de un alto grado de silicificación en la roca (Fig. 47).



Fig. 47. Brecha hidrotermal aflorando en el área El Realito.

Los puntos ER-02, ER-04, obtenidos sobre una toba lítica de composición dacítica (VITDI), presentan un rango de frecuencias de 21.5 Hz a 27.5 Hz, en los puntos de muestreo se detectó la presencia de un bajo grado de silicificación en la roca. Para el punto ER-07 se registró una frecuencia de 43.0 Hz; el punto de muestreo se localiza cerca de un afloramiento de la brecha hidrotermal (HBX) la cual presenta un alto grado de silicificación afectando a la toba lítica de composición dacítica (VITDI) como se muestra en la figura 48.

El punto ER-03, cuya medición se realizó sobre una dacita porfídica (DacP), presenta una frecuencia de 37.0 Hz debido a la presencia de un alto grado de silicificación. Por último, para punto ER-06, clasificada como una dacita dentro de la Unidad Volcanoclástica, la cual muestra una frecuencia de 22.0 Hz, el punto de muestreo presentaba un bajo grado de oxidación y la roca con un aspecto masivo (Fig. 46).



Fig. 48. Medición del punto ER-07 sobre la unidad V1TDI.

Los resultados obtenidos del punto ER-01 y ER-02 se interpretaron en la sección litológica 3178095N (Fig. 49), estableciendo una relación entre la andesita (AndF) en la parte inferior de la sección, ambas con 19 Hz en su cociente espectral. Por otra parte, se establece una correlación entre la frecuencia de 24.5 Hz del punto ER-01 asociada a la frecuencia de 27.5 Hz para la dacita porfídica (DacP) del punto ER-02.

En la gráfica de cocientes espectrales del punto ER-02, se consideró una frecuencia de 31.5 Hz, siendo la más alta obtenida y puede relacionarse con la frecuencia de 42.5 Hz asociada a la brecha hidrotermal (HBX) presente en el punto ER-01 y a una zona de alteración relacionada a silicificación, Silica Masiva, Silica Vuggy y Silicificación en Brecha Hidrotermal (SIM, SIV, SIBx).

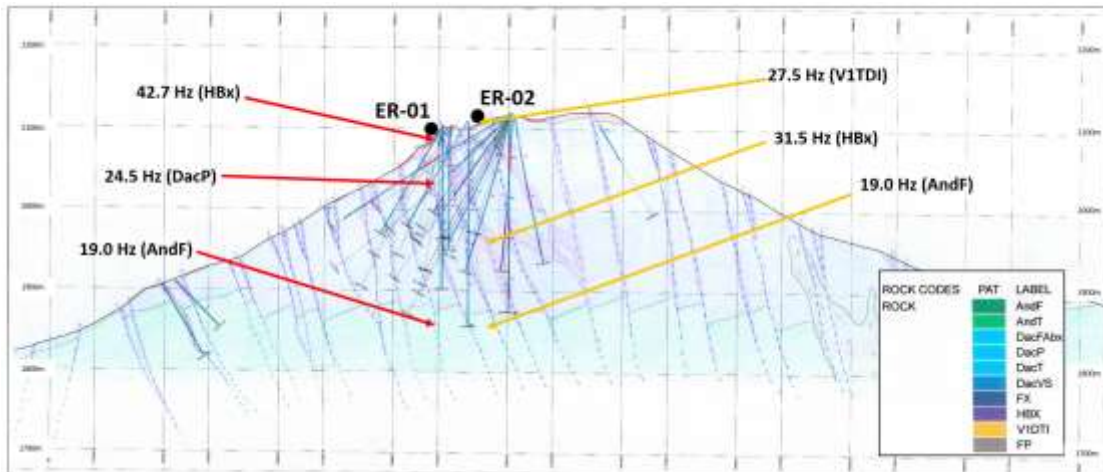


Fig. 49. Sección litológica 3178095N.

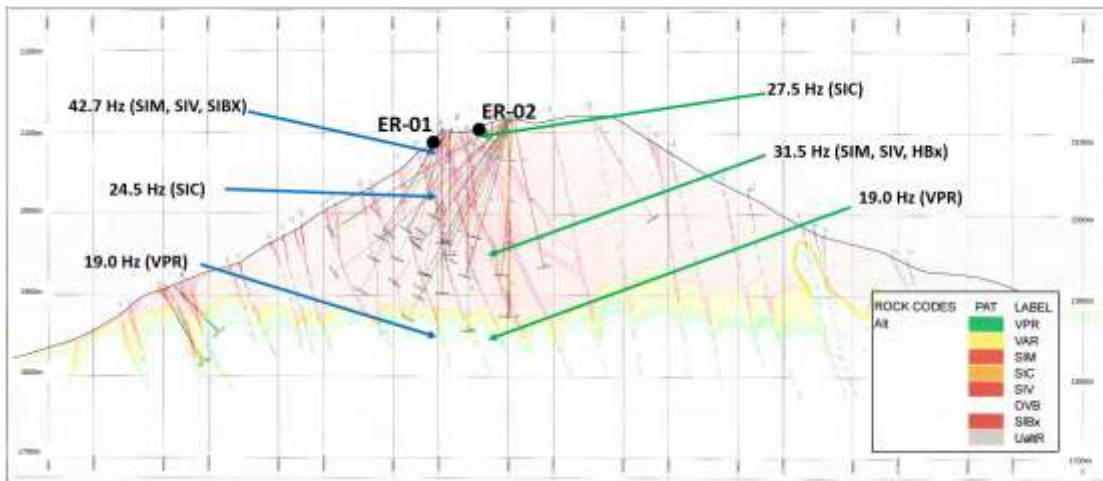


Fig. 50. Sección de alteraciones 3178095N.

Por otra parte, las frecuencias de 10.0 Hz y 12.0 Hz, se pueden interpretar como parte de material litificado debido a los cambios en el tipo de alteración hidrotermal; la frecuencia de 31.5 Hz que se encuentra en el cambio de silificación (SIM, SIV) a argílica avanzada/silica clay (SIC) y la frecuencia de 27.5 Hz, la cual se encuentra cerca de una zona de alta silificación (Fig. 50).

Para el análisis e interpretación de las frecuencias obtenidas de la gráfica de cocientes espectrales, correspondientes al punto ER-05, se utilizó la sección litológica 3178112N (Fig.

52), el registro de información en dicho punto esta exactamente en la línea de sección. La frecuencia obtenida directamente desde la superficie de registro fue de 21.5 Hz correspondiendo a la dacita porfídica (DacP) la cual presenta bajo grado de oxidación con silicificación (Fig. 51).



Fig. 51. Muestra de dacita porfídica (DacP) para el punto ER-05.

En la gráfica de cocientes espectrales, la frecuencia de 34.5 Hz fue asociada a la brecha hidrotermal (HBx), la cual no está aflorando en superficie, pero la estructura presenta un echado de N 75° E dando la posibilidad de ser detectada a profundidad por barrenación (Fig. 52). La frecuencia de 24.5 Hz fue interpretada para la dacita porfídica (DacP) este resultado puede estar asociado por las características de compactación de la roca a profundidad, a diferencia de la frecuencia de 21.5 Hz interpretada en el mismo punto. Por último, la frecuencia de 10.5 Hz ha sido asignada a la andesita (AndF) localizada en la parte inferior de la sección interpretada.



Fig. 52. Muestra de brecha hidrotermal (HBx) para el punto ER-05.

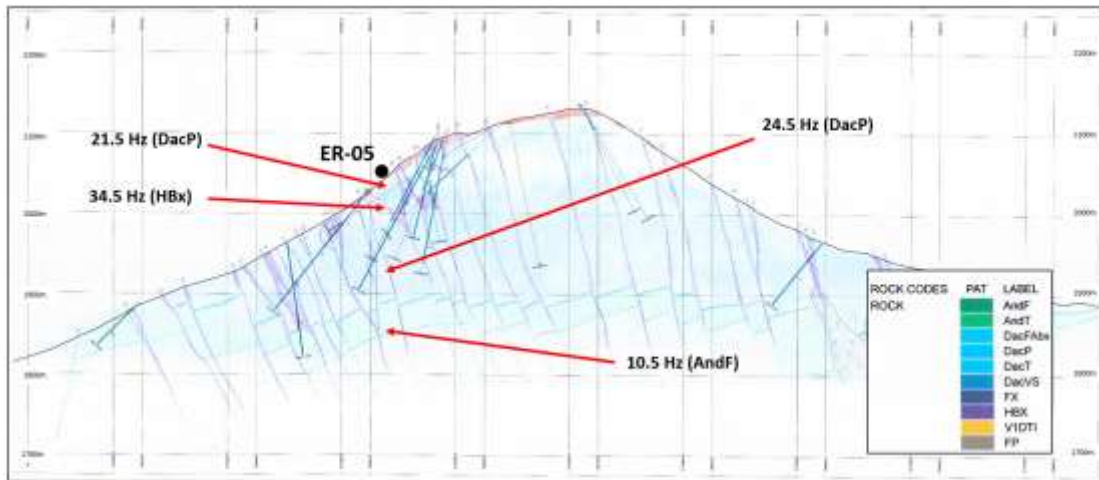


Fig. 53. Sección litológica 3178112N.

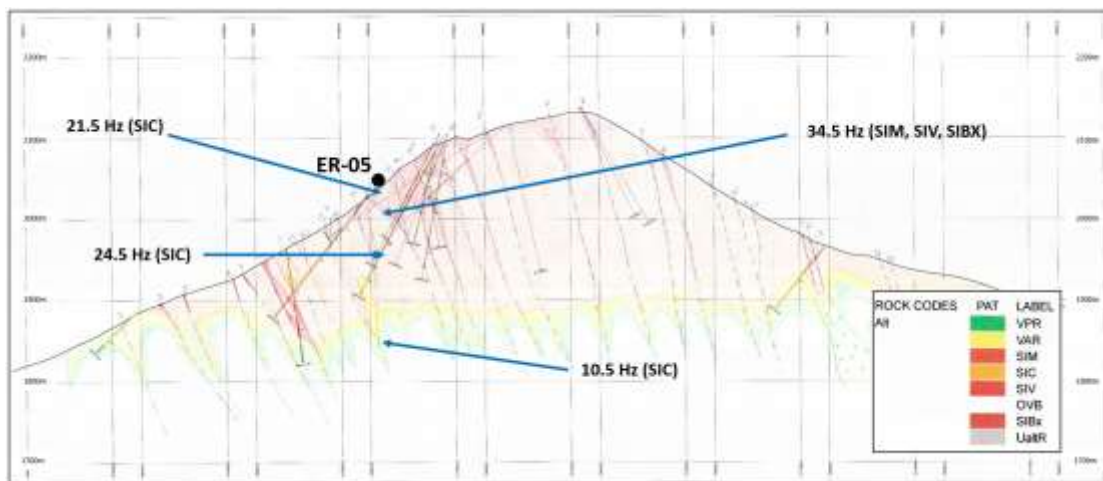


Fig. 54. Sección de alteraciones 3178112N.

Los resultados de la sección litológica 3178112N fueron integrados a la sección de alteraciones (Fig. 54), las frecuencias de 21.5 Hz y 24.5 Hz, con base a la interpretación en la sección, corresponden a la alteración argílica avanzada/silica clay (SIC); para la frecuencia de 34.5 Hz ha sido relacionada a la SIM-SIV; en cambio, el resultado obtenido de 10.5 Hz puede corresponder a la zona de alteración propilítica (VPR) y argílica (VAR) y una estructura de falla en la parte inferior de la sección.

Los resultados de los cocientes espectrales del punto ER-03 y ER-04 fueron interpretados utilizando la sección litológica 3178130N (Fig. 56). Para el punto ER-03, la frecuencia registrada de 37.0 Hz, fue interpretada como parte de la dacita porfídica (DacP), en contacto con la brecha hidrotermal (HBx) como se muestra en la figura 55. Sobre una zona de intersección de fallas de rumbo NE a NW, localizada en uno de los caminos del proyecto, la frecuencia de 23.0 Hz obtenida se ha asociado a la presencia de dacita porfídica (DacP) interpretada a mayor profundidad, por otra parte, la frecuencia de 14.0 Hz obtenida se ha relacionado con la andesita (AndF) localizada en el fondo de la sección.



Figura 55. Muestra del contacto entre dacita porfídica (DacP) y brecha hidrotermal (HBx) para el punto ER-03.

El punto ER-04 fue medido directamente sobre la brecha hidrotermal (HBx) obteniendo como resultado una frecuencia de 29.0 Hz, el punto de registro se localiza cerca del contacto con la toba lítica de composición dacítica (V1TDI). La frecuencia de 22.5 Hz obtenida de la gráfica de cocientes espectrales ha sido relacionada a la dacita porfídica (DacP), similar al resultado del punto ER-03 con un resultado de 23.0 Hz. La frecuencia de 20.5 Hz se ha interpretado como parte de la andesita (AndF) en la parte inferior de la sección.

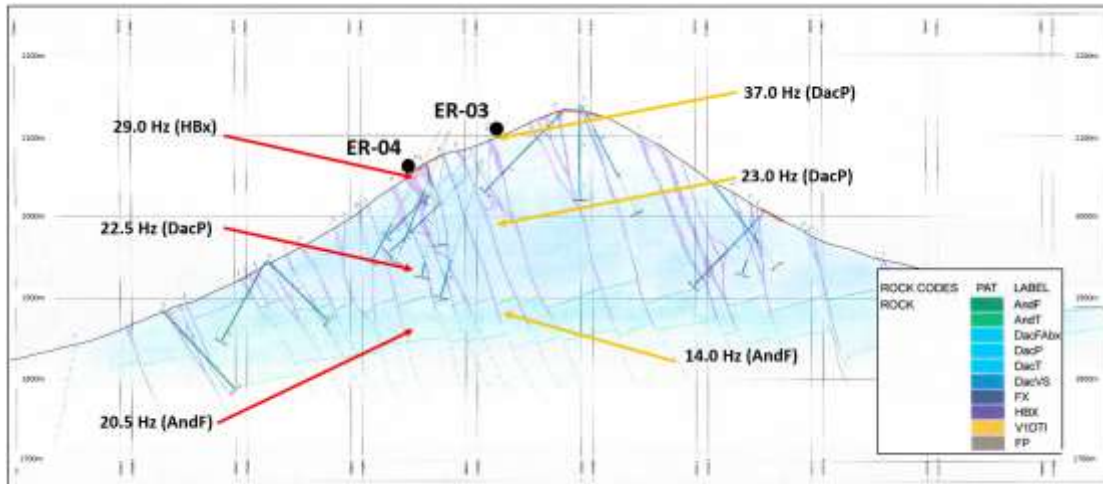


Fig. 56. Sección litológica 3178130N.

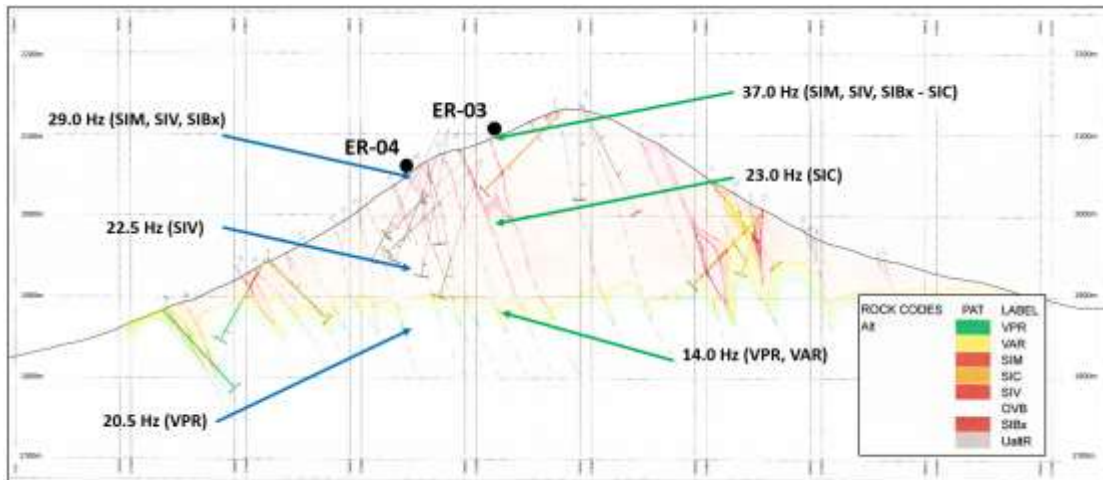


Fig. 57. Sección de alteraciones 3178130N.

Para complementar los resultados de la sección litológica se ha utilizado la sección de alteraciones 3178130N (Fig. 57). Para el punto ER-03, la frecuencia de 37.0 Hz está siendo afectada por la alteración argílica avanzada/silica clay (SIC) y parte de las alteraciones relacionadas a la brecha hidrotermal. La frecuencia de 23.0 Hz (Fig. 58) puede corresponder a zonas de alteración argílica avanzada/silica clay (SIC) y la frecuencia de 14.0 Hz asociada a la zona de alteración argílica (VAR).



Fig. 58. Muestra de dacita porfídica (DacP) con alteración argílica avanzada (SIC) para el punto ER-03.

En el punto ER-04, la frecuencia de 29.0 Hz en superficie se ha relacionado con la silicificación localizada en la brecha hidrotermal (SIM, SIV, SIBx); para la frecuencia de 22.5 Hz corresponde con la alteración argílica avanzada/silica clay (SIC) al igual que la frecuencia de 23.0 Hz del punto ER-03. Por último, la frecuencia de 20.5 Hz puede estar relacionada a la zona de alteración propilítica, a diferencia de la frecuencia de 14.0 Hz que se encuentra en la zona de alteración argílica, pero ambas en la roca clasificada como andesita (AndF).

La interpretación de las frecuencias de cocientes espectrales del punto ER-06, se utilizó la sección litológica 3178236N (Fig. 59), para el punto de registro en superficie se obtuvo una frecuencia de 22.0 Hz que fue interpretada como parte de la dacita porfídica (DacP), en cambio, considerando la interpretación de la sección litológica, la frecuencia de 17.0 Hz se consideró como efecto de resonancia de la andesita (AndF). En los alrededores del punto se tiene la presencia de fallas con orientación NE y que presentan un echado de 65° y 70° hacia el SE en las que se ha interpretado la presencia de la brecha hidrotermal y se ha asociado la frecuencia de 38.0 Hz a dicha estructura. En la gráfica de cocientes espectrales del mismo punto se presenta una frecuencia muy baja de 5.0 Hz, que puede ser interpretada como parte de la cubierta de suelo blando presente en el punto de registro.

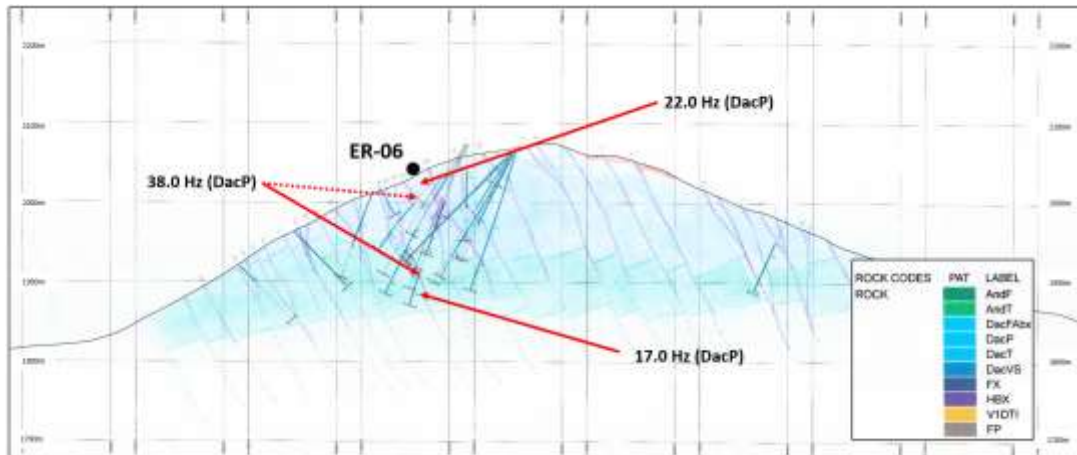


Fig. 59. Sección litológica 3178236N.

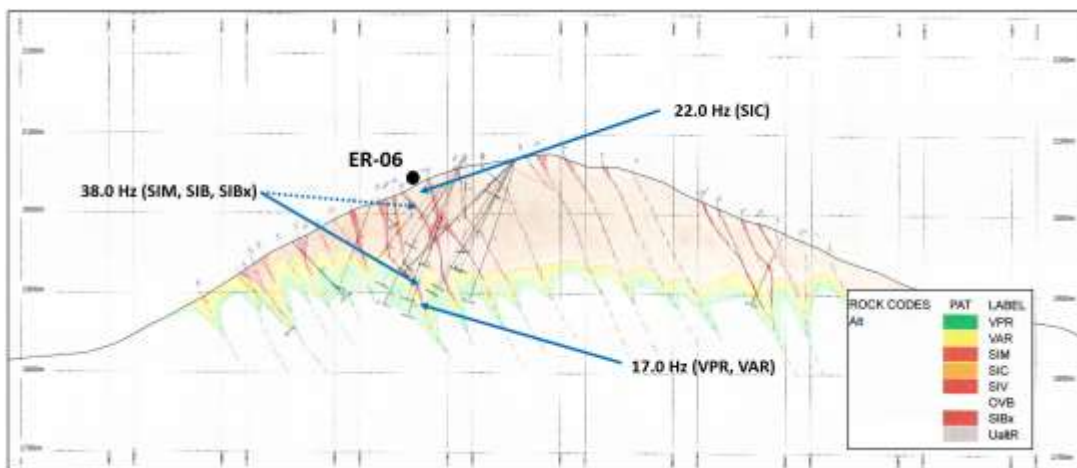


Fig. 60. Sección de alteraciones 3178236N.

La sección de alteraciones 3178236N (Fig. 60) se ha utilizado para interpretar los resultados de la sección litológica. La frecuencia de 22.0 Hz relacionada a la alteración argílica avanzada/silica clay (SIC), por otra parte, la frecuencia de 38.0 Hz se asocia principalmente a las alteraciones relacionadas a la brecha hidrotermal (SIM, SIV, SIBx). Por último, para la frecuencia de 17.0 Hz puede localizarse en la zona de transición entre la alteración argílica (VAR) y propilítica (VPR).

Para la interpretación de las frecuencias obtenidas del cociente espectral del punto ER-07 y ER-08 se utilizó la sección litológica 3178307N (Fig. 63). En superficie, el punto

ER-07 presenta una frecuencia de 43.0 Hz, cuyo registro se realizó sobre una toba lítica de composición dacítica (VITDI); en campo la roca presenta un aspecto compacto, pudiendo ser esto causante del registro obtenido (Fig. 61). En la gráfica de cocientes espectrales se registró un pico a los 25.0 Hz estableciendo una relación con la dacita porfídica (DacP) (Fig. 62), seguido de esto se presenta una frecuencia de 31.5 Hz, la cual se podría asociar a un conducto alimentador de la brecha hidrotermal (HBx); por último, la frecuencia de 18.0 Hz ha sido señalada como parte de la andesita (AndF).



Fig. 61. Muestra de toba lítica (VITDI) para el punto ER-07.



Fig. 62. Muestra de dacita porfídica (DacP) para el punto ER-07.

El registro del punto ER-08 se realizó sobre un afloramiento de la brecha hidrotermal (HBx), de la cual se obtuvo una frecuencia de 35.5 Hz, similar a la obtenida en el punto ER-07. El registro de 12.0 Hz fue interpretado como parte de la andesita (AndF) así como el de 21.0 Hz asociado a la dacita porfídica (DacP). La gráfica de cocientes espectrales muestra un

pico a los 38.0 Hz, el cual ha sido interpretado como parte de un alimentador relacionada a la brecha hidrotermal (HBx).

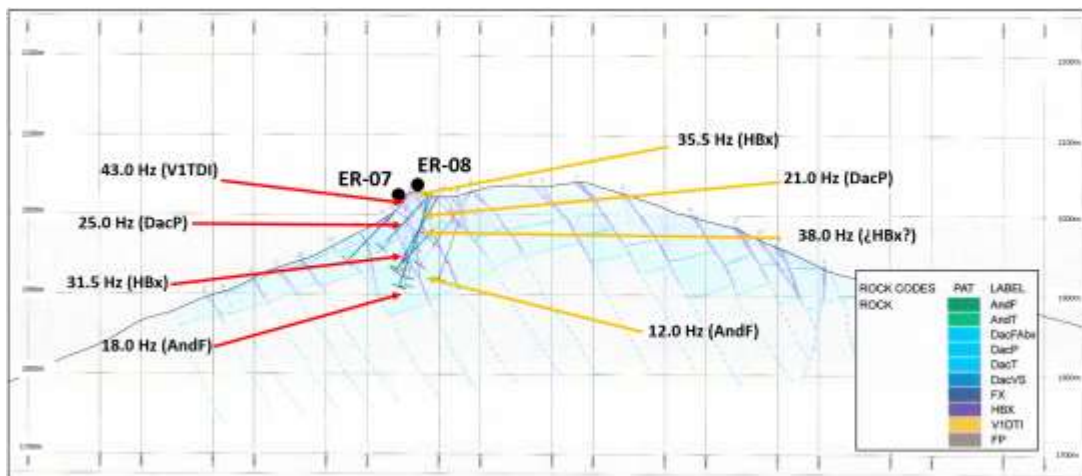


Fig. 63. Sección litológica 3178307N.

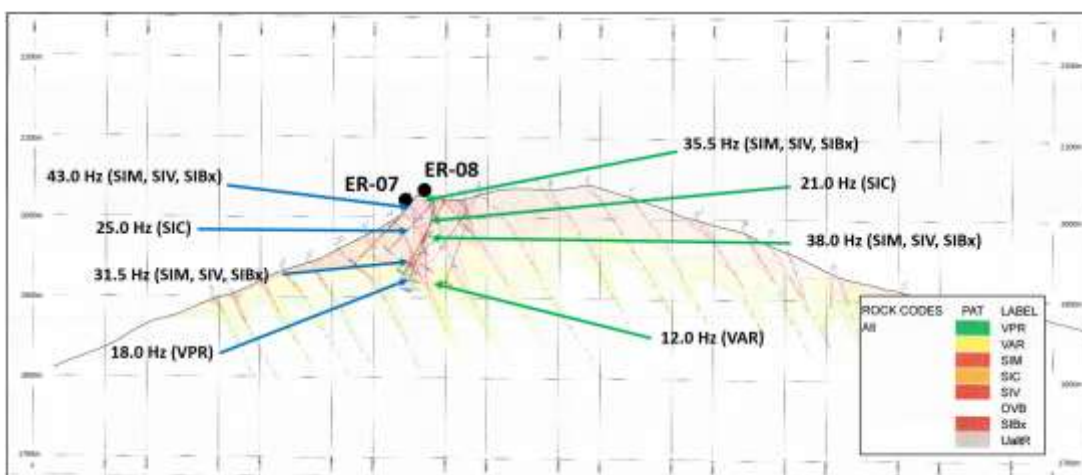


Fig. 64. Sección de alteraciones 3178307N.

La interpretación geológica de los puntos ER-07 y ER-08 ha sido complementada con la sección de alteraciones 3178307N (Fig. 64). Las frecuencias de 43.0 Hz, 35.5 Hz, 31.5 Hz y 38.0 Hz, pertenecientes a los puntos ER-07 y ER-08, se han asociado a zonas con silicificación (SIM, SIV, SIBx); las frecuencias relacionadas a la dacita porfídica (DacP), 25.0 Hz y 21.0 Hz, se correlacionaron con la alteración argílica avanzada o silica clay (SIC).

En el caso de la andesita (AndF), la frecuencia de 18.0 Hz se ha interpretado como parte de la zona de alteración propilítica, en su mayoría, y para los 12.0 Hz en la zona de alteración argílica (Fig. 65).



Fig. 65. Muestra de andesita (AndF) para los puntos ER-07 y 08 con presencia de arcillas.

El análisis del punto ER-09 se realizó utilizando la sección litológica 3178342N (Fig. 69). Conforme al resultado de la aplicación de cocientes espectrales se obtuvo una frecuencia en superficie de 12.5 Hz referida a la Unidad Volcanoclástica descrita en el área El Realito (Fig. 66); el punto de muestreo presenta condiciones de suelo poco consolidado con oxidación.



Fig. 66. Muestra de la unidad volcanoclástica para el punto ER-09.

El resultado de 8.0 Hz fue descrito como parte de una estructura tipo falla presente en el lugar, pero debido a las condiciones del sitio, esta no se observa en superficie (Fig. 67) y para la andesita (AndF) se ha establecido una relación con la frecuencia de 17.5 Hz (Fig. 68).

El pico de 35.0 Hz se puede inferir con la presencia de la brecha hidrotermal (HBx), la cual, espacialmente se puede localizar a profundidad, considerando el buzamiento SW de las estructuras de importancia económica en el área del proyecto.



Fig. 67. Material fragmentado considerado como parte de fallamiento.



Fig. 68. Muestra de andesita (AndF) para el punto ER-09.

Para complementar la información interpretada en la sección litológica, se ha empleado la sección de alteraciones 3178342N (Fig. 70). La frecuencia de 12.5 Hz ha sido asociada a una zona de alteración argílica avanzada (SIC). La frecuencia de 8.0 Hz se interpretó como la existencia de una falla, pudiendo contener material fragmentado y alto contenido de oxidación. La andesita se relacionó con la frecuencia de 17.5 Hz y con la presencia de alteración argílica (VAR). El resultado de 35.0 Hz se ha interpretado como parte de la brecha hidrotermal (SIM, SIV, SIBx), pudiendo ser a profundidad o el emplazamiento más somero de la estructura, sin presentar una potencia considerable, ± 1.5 metros (Fig. 71).

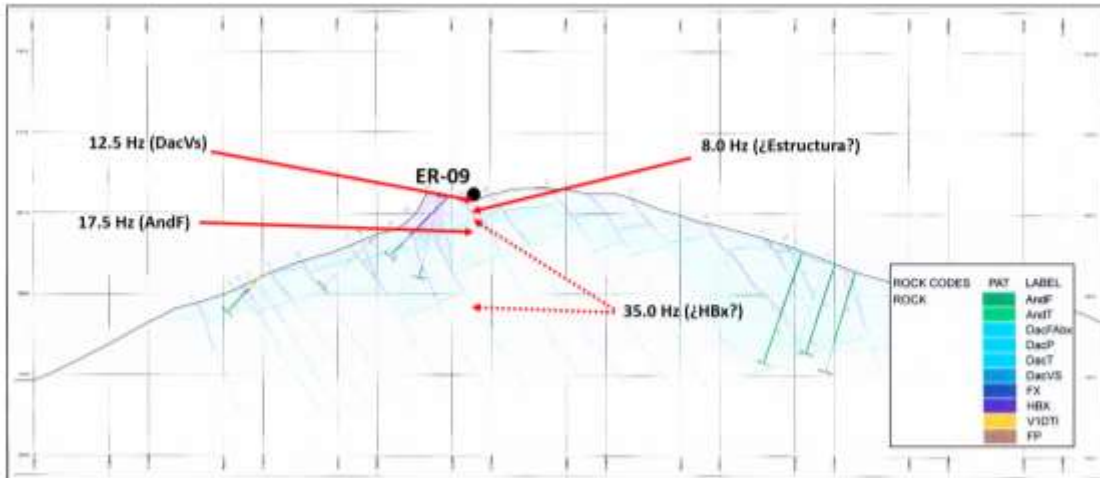


Fig. 69. Sección litológica 3178342N.

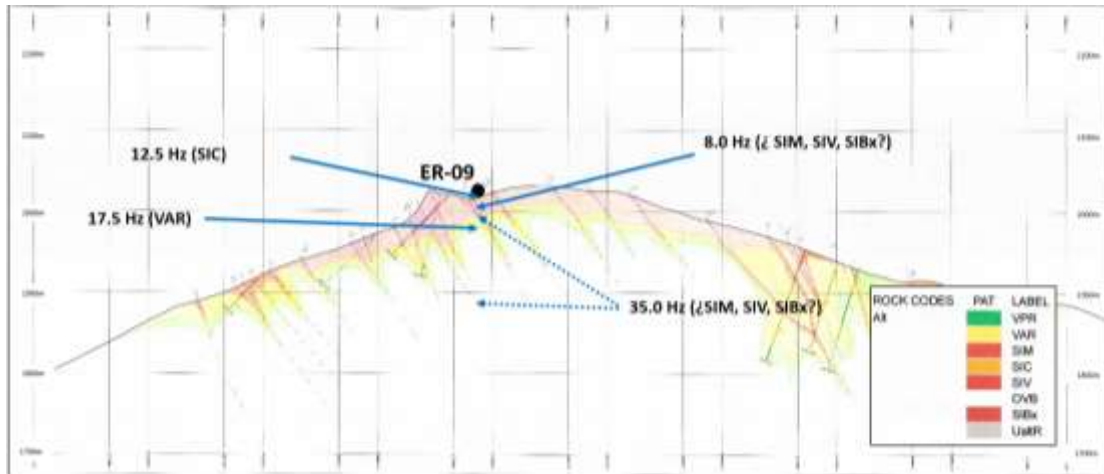


Fig. 70. Sección de alteraciones 3178342N.



Fig. 71. Ejemplo de conducto alimentador localizado a profundidad.

4.3.2 Los Tubos

La interpretación de los resultados del área de Los Tubos se ha realizado mediante el análisis de la distribución espacial de las frecuencias obtenidas en los puntos de muestreo, prestando atención a las frecuencias asociadas a la brecha hidrotermal registrada en el área El Realito. La figura 58 muestra las frecuencias superficiales obtenidas por medio de la aplicación del método de cocientes espectrales, en las cuales se observan frecuencias de 37.0 Hz (LT-01), 41.0 Hz (LT-04), 35.0 Hz (LT-07) y 31.5 Hz (LT-12), estos resultados se encuentran a pocos metros de las estructuras cartografiadas como brecha hidrotermal (HBx) y sobre la traza de fallas inferidas que sirven como conducto para el emplazamiento de los alimentadores, a excepción del punto LT-07 con 35.0 Hz, que puede estar relacionada con una estructura de característica HBx, la cual genera resonancia registrada a profundidad considerando el buzamiento N-E de las fallas presentes en el área.

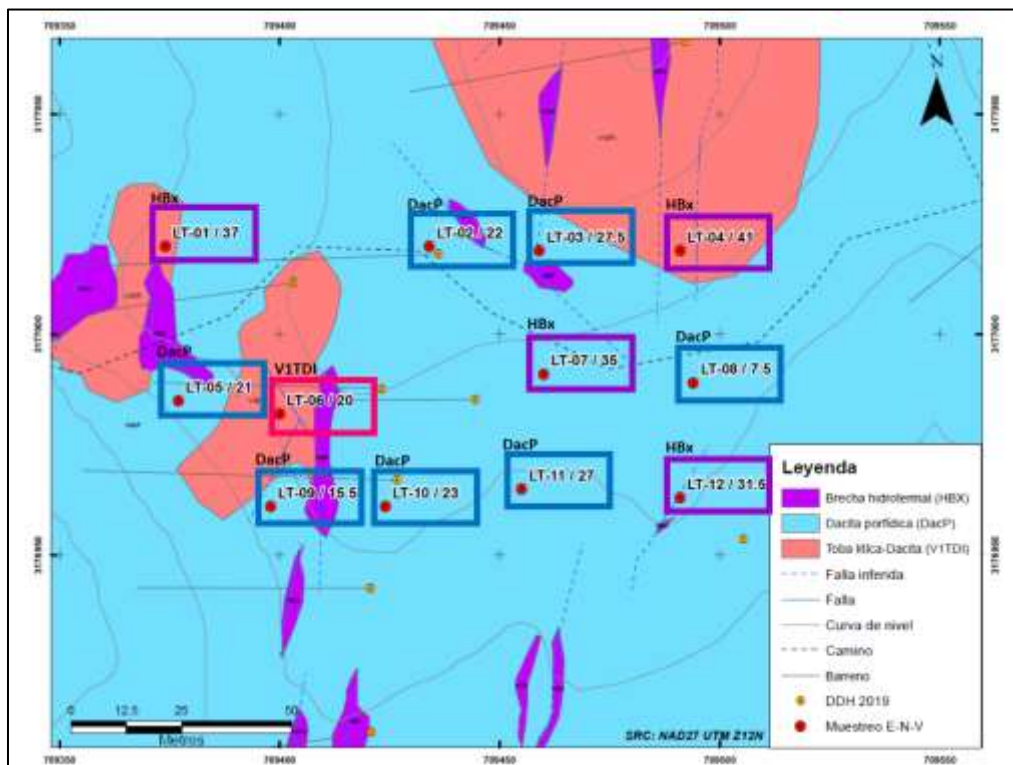


Fig. 72. Frecuencias superficiales del área Los Tubos.

El registro de puntos realizados sobre los afloramientos de dacita porfídica (DacP) presentan frecuencias de 27.5 Hz (LT-03), 7.5 Hz (LT-08), 15.5 Hz (LT-09), 23.0 Hz (LT-10) y 27.0 Hz (LT-11), conforme a las observaciones realizadas en campo, la roca aflorante presenta zonas de alteración relacionadas a oxidación y arcillas, así como un aspecto compacto en la roca. Para la toba lítica de composición dacítica (VITDI) se tiene una frecuencia de 20.0 Hz (LT-09) presentando una zona de oxidación fuerte.

El segundo rango de frecuencias de cocientes espectrales, analizado para el área Los Tubos (Fig. 59), muestra las frecuencias más altas en 32.0 Hz (LT-02), 41.5 Hz (LT-03), 44.5 Hz (LT-08), 41.0 Hz (LT-11), 32.5 Hz (LT-12) y 34.0 Hz (LT-06), considerando un echado de N75°E. La frecuencia de 41.5 Hz, 32.5 Hz y 44.5 Hz podrían estar relacionadas a la presencia de alimentadores, o la brecha hidrotermal a profundidad considerando el buzamiento de las fallas.

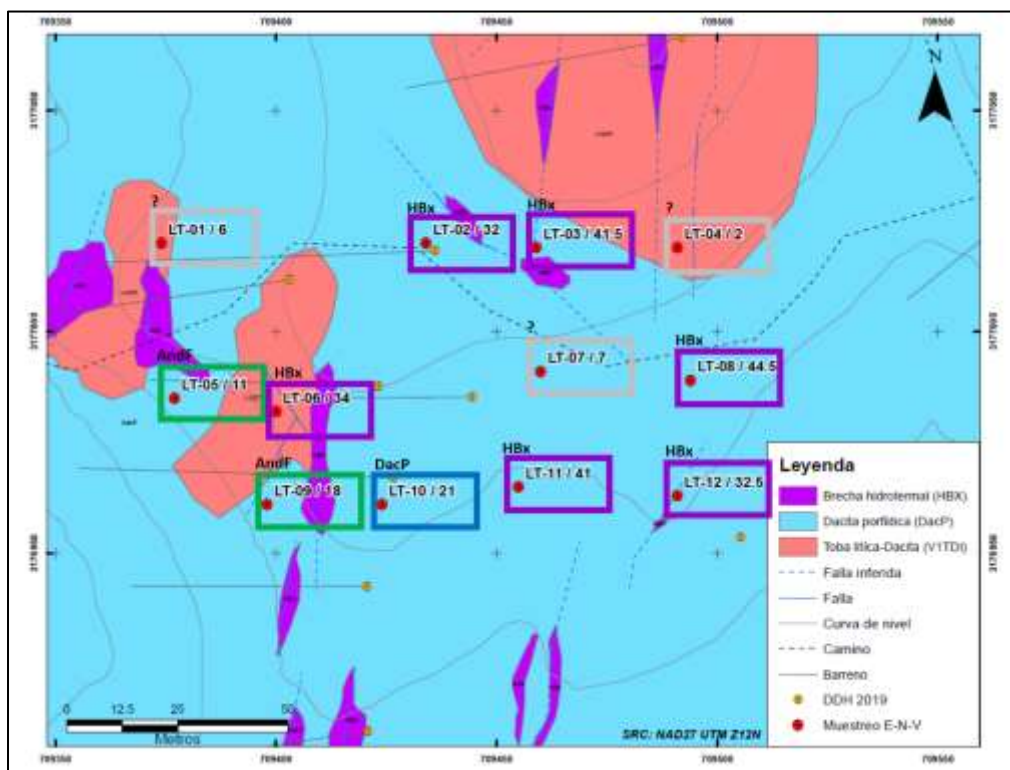


Fig. 73. Segundo rango de frecuencias del área Los Tubos.

El resultado de 21.0 Hz (LT-10) es el que presenta semejanza con la dacita porfídica (DacP) del área El Realito, así como la frecuencia de 18.0 Hz (LT-09) y 11.0 Hz (LT-11) mostrando similitud con la roca andesita (AndF) de la misma área. Los resultados obtenidos para los puntos LT-06, LT-07 y LT-11 pueden estar relacionados a materiales litológicos de menor compactación localizados en profundidad.

El tercer rango de frecuencias obtenidas de la gráfica de cocientes espectrales del área Los Tubos (Fig. 60) presenta las frecuencias más altas en 39.5 Hz (LT-05), 33.0 HZ (LT-08) y 34.0 Hz (LT-10). El resultado de 34.0 Hz (LT-10) y 33.0 Hz (LT-08) pueden guardar relación la presencia de un alimentador a profundidad (HBx) y para la frecuencia de 39.5 Hz (LT-05) al posible efecto de resonancia generado por maquinaria en las inmediaciones del punto de medición.

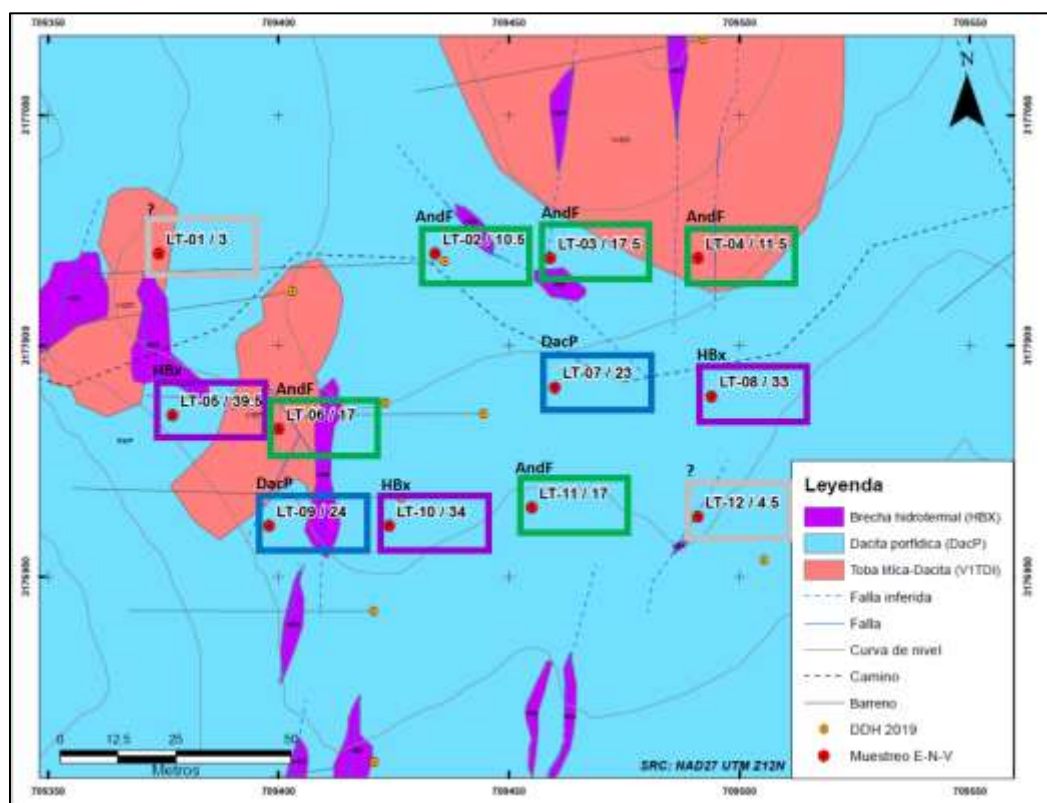


Fig. 74. Tercer rango de frecuencias del área Los Tubos

El resultado obtenido de 23.0 Hz (LT-07) 24.0 Hz (LT-09) presentan una mejor similitud con los obtenidos para la dacita porfídica (DacP) interpretada en el área El Realito. Las frecuencias de 10.5 Hz (LT-02), 17.5 (LT-03), 11.5 Hz (LT-04), 17.0 Hz (LT-06) aparentemente presentan un resultado al de la andesita (AndF) localizada en la parte inferior de las secciones geológicas, específicamente la frecuencia de 10.5 Hz (LT-02) y 11.5 Hz (LT-04) puede coincidir con las zonas de alteración argílica (VAR) y propilítica (VPR). Para los puntos 4.5 Hz (LT 12) y 4.5 HZ (LT-12) podrían presentar relación con material de baja compactación o no consolidado detectado a profundidad.

El cuarto rango de frecuencias medidas dentro del área Los Tubos (Fig. 61), presenta en su cociente espectral las frecuencias más altas a 34.2 Hz (LT-04) y 46.5 Hz (LT-09), que pueden guardar relación con los alimentadores presentes que se interpretan como brecha hidrotermal (HBx) a profundidad.

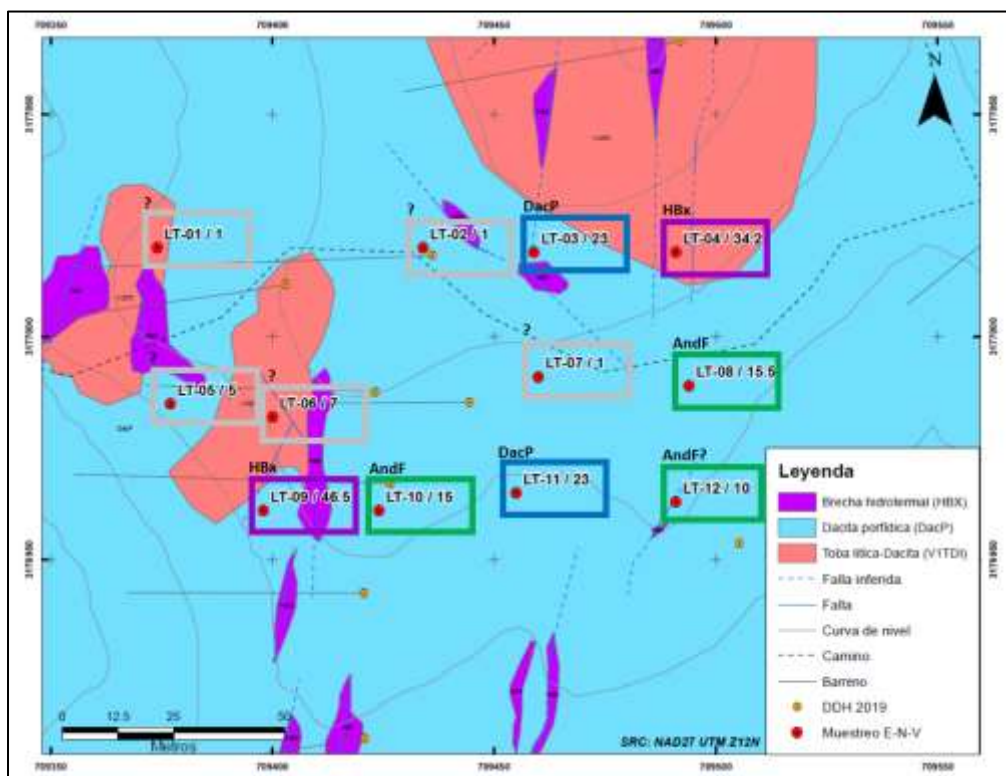


Fig. 75. Cuarto rango de frecuencias del área Los Tubos.

Los resultados de 23.0 Hz (LT-11) y 23.0 Hz (LT-03), considerando los resultados del área El Realito, presentan un parecido a las frecuencias interpretadas para la dacita porfídica (DacP), en cambio, para la roca descrita como andesita (AndF) se registraron frecuencias interpretadas a profundidad en 15.5 Hz (LT-08), 15.0 Hz (LT-10) y 10.0 Hz (LT-12). Las frecuencias con presencia a la gráfica de cocientes espectrales de 5.0 Hz (LT-05) y 7.0 Hz (LT-05), como se ha mencionado anteriormente, se puede establecer su origen a material poco consolidado o de baja compactación. Por último, para los puntos LT-01, LT-02 y LT-07, no fue posible determinar con precisión un resultado asignándose a 1.0 Hz.

4.4 TABLA DE RESUMEN.

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos de los cocientes espectrales registrados en el área de El Realito y en Los Tubos. Los campos con el símbolo (-) representan frecuencias que no pudieron ser asignadas a un material en específico considerando la litología y nomenclatura utilizada por la empresa.

Tabla 2. Resultados obtenidos para el área El Realito y Los Tubos.

Área	Punto	Coordenadas		Superficie		2do. Rango		3er. Rango		4to. Rango	
		Este	Norte	Frec. (Hz)	Roca	Frec. (Hz)	Roca	Frec. (Hz)	Roca	Frec. (Hz)	Roca
El Realito	ER-01	708490.0	3178210.0	42.7	HBX	10.0	-	24.5	DacP	19.0	AndF
	ER-02	708974.0	3178175.0	27.5	V1TDI	19.0	AndF	12.0	-	31.5	HBx
	ER-03	709024.0	3178175.0	37.0	DacP	23.0	DacP	14.0	AndF	10.0	-
	ER-04	708960.0	3178258.0	29.0	HBx	22.5	DacP	20.5	AndF	<1.0	-
	ER-05	708913.0	3178261.0	21.5	DacP	34.5	HBx	24.5	DacP	10.5	AndF
	ER-06	709073.0	3178356.0	22.0	DacVs	17.0	AndF	5.0	-	38.0	HBx
	ER-07	709140.0	3178447.0	43.0	V1TDI	25.0	DacP	31.5	HBx	18.0	AndF
	ER-08	709150.0	3178431.0	35.5	HBX	12.0	AndF	21.0	DacP	38.0	HBx
	ER-09	709209.0	3178422.0	12.5	DacVs	8.0	-	17.5	AndF	35.0	HBx
Los Tubos	LT-01	709374.0	3177720.0	37.0	V1TDI	6.0	-	3.0	-	<1.0	-
	LT-02	709434.0	3117020.0	22.0	DacP	32.0	HBx	10.5	AndF	<1.0	-
	LT-03	709459.0	3117019.0	27.5	DacP	41.5	HBx	17.5	AndF	23.0	DacP
	LT-04	709491.0	3177019.0	41.0	V1TDI	2.0	-	11.5	AndF	34.2	HBx
	LT-05	709377.0	3176985.0	21.5	DacP	11.5	AndF	39.5	HBx	5.0	-
	LT-06	709400.0	3176982.0	20.0	V1TDI	34.0	HBx	17.0	AndF	7.0	-
	LT-07	709460.0	3176991.0	35.0	DacP	7.0	-	23.0	DacP	1.0	-
	LT-08	709494.0	3176989.0	7.5	DacP	44.5	HBx	33.0	HBx	15.5	AndF
	LT-09	709398.0	3176961.0	15.5	DacP	18.0	AndF	24.0	DacP	46.5	HBx
	LT-10	709424.0	3176967.0	23.0	DacP	21.0	DacP	34.0	HBx	15.0	AndF
	LT-11	709455.0	3176965.0	27.0	DacP	41.0	HBx	17.0	AndF	23.0	DacP
	LT-12	709491.0	3176963.0	31.5	DacP	31.5	HBx	4.5	-	<1.0	-

En color rojo se muestran los resultados considerados como no válidos, debido a el valor registrado, es demasiado bajo para establecer relación con un material litológico en la gráfica de cocientes espectrales.

4.5 DISCUSIÓN

Generalmente en los procesos geológicos generadores de magma, primero se forman las rocas volcánicas y posteriormente las rocas intrusivas (graníticas), que intrusionan a su misma parte volcánica. La litología principal en la mina La India está compuesta por una serie de rocas volcánicas, que contienen a los conductos alimentadores que aportaron la mineralización económica, y alteraron a las rocas volcánicas posteriormente, por eso es importante conocer el contraste en la variación de las frecuencias volcánicas e intrusivas.

Litológicamente el proceso de barrenación en el área de mina no alcanzado a detectar ningún intrusivo, solamente se ha detectado a un cuerpo de composición dacítica con textura porfídica, a profundidad, y al cual no se le adjudica la mineralización, por lo que se recomienda utilizar arreglos geométricos con acelerógrafo como el método SPAC o F-K, metodologías alternativas de sismica pasiva, que tiene la ventaja de generar perfiles de velocidad de onda a profundidad mediante ondas Rayleigh y Love como lo propone (Flores-Estrella et al., 2004). La información de los perfiles puede ser utilizada para relacionar los cambios de velocidad de onda con el tipo de roca localizada en el subsuelo, como en Chávez-García et al., (2014), permitiendo establecer relaciones entre rocas volcánicas, intrusivas y la detección de los conductos alimentadores que contienen la mineralización económica del lugar.

Normalmente en las áreas de trabajo para realizar este tipo de estudio, la planeación y distribución de los puntos donde se tomarán las lecturas se realiza de forma geométrica, para establecer un mejor control de las variaciones espaciales, la topografía del área tuvo influencia en la toma del número de lecturas realizadas durante el trabajo de campo. Las condiciones del lugar y la pendiente, específicamente en el área El Realito, dificultaron la obtención de registros debido a la movilidad del personal de trabajo y el equipo; a diferencia de otras investigaciones en las que sus registros se encuentran en zonas planas o de bajo grado de inclinación como (Lozano et al., 2017) y (Parolai et al., 2002), permitiendo la obtención de una mayor cantidad de registros. Además, el tiempo disponible para trabajo de

campo influyó en la densidad de puntos de registro. Una mayor densificación de lecturas ayudaría a observar y definir mejor el comportamiento de los espectros de frecuencias en superficie y a profundidad.

Para complementar los resultados obtenidos directamente de campo y realizar interpretaciones más precisas en trabajos posteriores; se recomienda realizar el registro de lecturas de ruidos sísmico ambiental a nivel laboratorio como mencionan López-Pineda (2011) y Moreno-Hurtado (2015) a los intervalos de núcleos de barrenación, que representen a los distintos tipos de rocas y alteraciones. Con base a los registros obtenidos, se podría comparar con los obtenidos en el presente trabajo y realizar las correcciones correspondientes en las interpretaciones de campo. Debido a las condiciones presentes en la mina La India como el ruido de la operación minera, voladuras y vehículos, no es posible realizar dicha actividad.

El aspecto estructural puede influir en los resultados de los registros obtenidos, pues es importante considerar el fracturamiento y fallas presentes en la roca. La roca más saludable se encuentra a profundidad presentando un aspecto compacto y con ausencia de fracturamiento y en superficie la roca presenta un mayor fracturamiento con presencia de silicificación relacionada a zonas mineralizadas, por lo que es adecuado también tomar las frecuencias en los barrenos de roca en almacén y compararlo con los obtenidos en las lecturas.

Como se ha mencionado anteriormente, en los últimos años la exploración del subsuelo ha tomado fuerza mediante la aplicación de métodos de sísmica pasiva por lo que se recomienda seguir implementado su aplicación y obtener el máximo potencial de esta herramienta en la búsqueda de yacimientos minerales de carácter económico para ser promovida como una herramienta no invasiva, económica y segura.

Dentro de los métodos geofísicos o indirectos, el método de cocientes espectrales destaca en su aplicación por no utilizar explosivos, logística para instalación de cableados en métodos eléctricos y vuelos de magnetometría, sin considerar el costo que conlleva la

aplicación de estos métodos para un proyecto minero. Es importante considerar la escala del trabajo a realizar, pues el costo está ligado al tipo de herramientas e infraestructura requerida para dicha actividad. Asimismo, la metodología propuesta en este trabajo puede realizarse con un mínimo de recursos, considerando una plantilla reducida de personal, energía, equipo o herramientas de trabajo y sin la necesidad de utilizar materias primas o generación de alguna sustancia peligrosa al medio ambiente. Para efectos del resultado a obtener, dentro de los métodos geofísicos, se debe considerar el tipo de anomalía a detectar por el sensor utilizado. En la prospección geofísica, la diversidad de métodos indirectos que existen actualmente tiene ventajas y desventajas, con respecto a la manifestación de energía que se emite desde el subsuelo o la capacidad que tiene la roca de manifestarla mediante una fuente de energía externa, por lo que se toma como ejemplo el trabajo realizado por López-Pineda, (2010). La aplicación y factibilidad del método de cocientes espectrales dentro de la prospección minera, se está evaluando actualmente, por lo que aún se requiere realizar más investigación con el propósito de identificar a detalle las áreas de aplicación dentro de la geología económica.

En los métodos directos, como la perforación (diamante o circulación inversa), poseen una precisión muy alta si se compara con los métodos geofísicos o indirectos, pues su utilización permite conocer con exactitud la profundidad entre los contactos de roca, alteraciones, contenido mineralógico, calidad de la roca y geología estructural. Los puntos mencionados anteriormente hacen que el uso de los resultados de la perforación, junto con los ensayos de las muestras de núcleo obtenidos, hacen que sea lo requerido para realizar la cuantificación de recursos y clasificación de reservas de un yacimiento de carácter económico, considerando el índice de confiabilidad geológica que este genera. Dados los resultados que proporciona el método de cocientes espectrales actualmente, este no puede proporcionar la precisión en los resultados que ofrece la perforación con broca de diamante, aunque si se dispone de un registro considerable de lecturas de ruido sísmico ambiental y un buen criterio geológico, el método de cocientes espectrales puede proporcionar una perspectiva aceptable del subsuelo a bajo costo; pues el uso de la perforación implica una

inversión alta a los proyectos de exploración, la cual debe de estar altamente justificada mediante trabajos previos. Es importante considerar que la implementación de una campaña de perforación requiere de un alto grado de logística entre la empresa y el prestador de servicios como la instalación de campamentos, alimentación, rehabilitación y apertura de caminos, creación de planillas de perforación, suministro de agua, cuadrillas de trabajo, etc.

Desde el punto de vista ambiental, el desarrollo e implementación de herramientas como el método de cocientes espectrales dentro de la exploración minera, tiene como objetivo la reducción del impacto ambiental generado por los métodos directos e indirectos para la exploración geológica minera, como es el impacto al suelo por apertura de caminos, planillas de perforación, requerimiento de recursos naturales como el agua y el uso de sustancias que pueden ser perjudiciales al medio ambiente o que pueden generar algún tipo de alteración si no se tiene una supervisión eficiente. Actualmente la minería es una actividad que causa un impacto muy notable al medio ambiente, a la economía y sociedad; los impactos más notables suelen ser durante la etapa de explotación y beneficio de los productos, pero se tiene que considerar que los trabajos de exploración con una mala supervisión pueden causar un impacto considerable y en algunos casos irreversibles al ambiente. Por esta razón, la aplicación del método de cocientes espectrales, desde el eje social del desarrollo sustentable, puede considerarse como una técnica altamente segura durante su operación, por lo que el personal operativo no está expuesto a lesiones físicas, daños permanentes, probabilidad de un accidente fatal y no produce ninguna afectación al cuerpo humano al largo plazo; sin considerar las condiciones morfológicas del lugar, que puedan presentar un riesgo de accidente durante el trabajo de campo.

Desde un punto de vista económico, la barrenación con broca de diamante suele ser de los aspectos más costosos dentro de la exploración, su aplicación debe ser altamente justificada debido a los costos por metro perforado, que están alrededor de los 100 a 120 dólares, dependiendo del contrato con la empresa prestadora del servicio. La perforación mediante circulación inversa presume de ser un poco más económica, pero la precisión de los resultados presenta mucha variación con respecto a la barrenación con broca de diamante.

En los métodos indirectos (geofísicos), su aplicación requiere de cierto nivel de conocimiento geológico del área de interés con el objetivo de implementar el método geofísico que obtenga la mejor respuesta o manifestación de energía del subsuelo, los costos de su aplicación pueden variar desde 900 a 2,200 dólares por día aproximadamente. En algunos casos, la detección de una anomalía mediante un método indirecto no está relacionada a un yacimiento mineral, pero si puede proporcionar soporte para la búsqueda de cuerpos mineralizados. El método de cocientes espectrales no presenta alta precisión, por el momento, si se compara con la barrenación de diamante, circulación inversa o los métodos geofísicos sísmicos de fuente activa; la ventaja que presenta esta metodología es desde el punto de vista económico al proponerse como una técnica más barata que las anteriores pero con menor precisión en los resultados, por lo que se puede promover como una técnica de soporte a la prospección minera, considerando la disponibilidad de recursos económicos.

El método de cocientes espectrales presume de ser una metodología a bajo costo a diferencia de los métodos directos e indirectos, con bajo impacto al medio ambiente debido la cantidad de energía, herramientas y materiales para su funcionamiento, así como ofrecer total seguridad a la salud durante su implementación. La aplicación de esta metodología requiere un desarrollo continuo y a profundidad durante los próximos años para que sea considerada dentro de la exploración de yacimientos minerales, además de la construcción, mecánica de suelos y zonificación de riesgo sísmico, por mencionar las más importantes. Se propone desarrollar este método con el objetivo de aumentar la precisión y confiabilidad de los resultados; difícilmente puede sustituir a la perforación para la localización y cuantificación de recursos, pero puede complementar en una etapa previa para definir mejor los blancos de perforación para disminuir el impacto ambiental, el uso de recursos naturales y la reducción de costos en general.

5. CONCLUSIÓN

Mediante la aplicación del método de cocientes espectrales para los proyectos de El Realito y Los Tubos, se propone el rango de frecuencias para los tipos de roca presentes en las áreas mencionadas anteriormente; el rango de frecuencias interpretado para la brecha hidrotermal (HBx) está entre los 32.6 a 40.6 Hz, para la dacita porfídica (DacP) de 21.5 a 25.5 Hz, los valores estimados para la andesita (AndF) están en el rango de 13.0 a 18.0 Hz, el rango estimado en la toba lítica – dacita (V1TDI) se encuentra entre los 23.8 a 42.0 Hz y para la unidad volcanoclástica (DacVs) un valor de 22.0 Hz aproximadamente como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Rangos de frecuencias propuestos para las unidades litológicas del proyecto El Realito y Los Tubos

Roca	Código	Rango (Hz)
Brecha hidrotermal	HBx	32.6 – 40.6
Dacita porfídica	DacP	21.5 – 25.5
Andesita	AndF	13.0 – 18.0
Toba lítica - dacita	V1TDI	23.8 - 42.0
Unidad volcanoclástica	DacVs	± 22.0

Considerando los resultados de la Tabla 3, se puede concluir que no hay una diferencia clara en los resultados de la dacita porfídica (DacP), toba lítica – dacita (V1TDI) y la unidad volcanoclástica, atribuyéndose este resultado al origen ígneo extrusivo y composición dacítica; a diferencia de la andesita (AndF) y la brecha hidrotermal (HBx), esta última presenta los valores más altos en términos de frecuencia, que a su vez se relacionan con las zonas favorables para exploración y las cuales suelen presentar valores de interés económico.

Con base a las características geológicas de las zonas de interés en los proyectos pertenecientes a la mina La India, la detección de conductos alimentadores resulta compleja considerando las dimensiones que presentan estas estructuras a profundidad, pues su espesor tiende a 1 metro de potencia aproximadamente, diferenciándose su comportamiento en las

partes más superficiales debido al efecto de descompresión. Tomando en cuenta lo anterior, la detección por medio del método de cocientes espectrales no presenta la suficiente precisión para definir este tipo de estructuras a profundidad, así como las unidades litológicas, las cuales presentan diferentes grados de alteración hidrotermal impidiendo una diferenciación precisa por medio del método de cocientes espectrales. Debido a lo mencionado anteriormente y considerando las condiciones encontradas en los proyectos mineros El Realito y Los Tubos, pertenecientes a la mina La India, se sugiere continuar con la medición y muestreo de ruido sísmico ambiental en las diferentes unidades litológicas expuestas en superficie, con la finalidad de conocer con mayor precisión las firmas espectrales que pueden presentar los diferentes tipos de roca; debido a los eventos de alteración hidrotermal, las propiedades físicas de la roca han sido afectadas considerablemente por lo que se requiere generar una mayor cantidad de registros para obtener mayor precisión en los resultados obtenidos mediante el método de cocientes espectrales. Considerando el aspecto que presentan las zonas de interés económica del yacimiento, es necesario generar una mayor densificación de puntos para muestreo de ruido sísmico ambiental, pues los conductos alimentadores que presentan la mineralización económica del proyecto tienen a ser demasiado angostos a profundidad dificultando su detección con precisión considerando el método propuesto.

Se recomienda aplicar el método de cocientes espectrales en condiciones donde las características físicas de las unidades litológicas tengan contraste una de la otra, como la diferencia de densidades, grado de compactación en la roca, composición y contenido mineralógico, alteración e intemperismo.

El método de cocientes espectrales como herramienta para la búsqueda de yacimientos minerales requiere de su continuo desarrollo en los siguientes años con el propósito de identificar sus ventajas y desventajas dentro de esta área de aplicación. La finalidad de utilizar el ruido sísmico ambiental como fuente de energía proporciona a la técnica de ser una herramienta accesible a nivel económico debido a los bajos costos de operación, su aplicación no presenta un alto riesgo en la seguridad y salud del personal

operativo y finalmente destacando de no ser una técnica con bajo impacto al medio ambiente, si es comparada dentro de los métodos geofísicos (indirectos) o la perforación (directos), considerando los bajos consumos de energía, requerimiento de materia prima y el uso de sustancias dañinas al ambiente.

Los puntos mencionados anteriormente ubican al método de cocientes espectrales dentro de los tres ejes del desarrollo sostenible por lo que se propone continuar con su desarrollo para aumentar la precisión de los resultados obtenidos de los registros de ruido sísmico ambiental y seguir generando una base de datos de firmas espectrales que puede servir de referencia para trabajos posteriores, tanto a nivel laboratorio o aplicación en registros obtenidos de trabajo de campo.

Se cumple con la hipótesis planteada en este trabajo, pues se puede iniciar con la prospección mediante el método de cocientes espectrales enfocándose en las frecuencias altas, relacionadas a las estructuras de importancia económica, pero debido a las condiciones físicas del área de estudio y la disponibilidad de tiempo para la logística de trabajo de campo, impidieron continuar el registro de información de campo y cumplir con el objetivo propuesto.

BIBLIOGRAFIA

Aguirre-Díaz, G. J., Labarthe-Hernández, G., Tristán-González, M., Nieto-Obregón, J., & Gutiérrez-Palomares, I. (2008b). Chapter 4 The Ignimbrite Flare-Up and Graben Calderas of the Sierra Madre Occidental, Mexico. In J. Gottsmann & J. Martí (Eds.), *Developments in Volcanology* (Vol. 10, pp. 143–180). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1871-644X\(07\)00004-6](https://doi.org/10.1016/S1871-644X(07)00004-6)

Arriaga, L., Espiniza, J. M., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez y, E., & Loa, E. (2000). *Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México.*

Ayala-Carcedo, F. J., Valdillo-Fernández, L., López-Jimeno, C., Aramburu-Maqua, P., Escribano-Bombín, M., Escribano-Bombín, R., De Frutos-Gómez, M., Manglano-Alonso, S., Mataiz-González, C., & Toledo-Santos, J. (2004b). *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería.: Vol. Volumen 2.* Instituto Tecnológico GeoMinero de España.

Bustillo-Revuelta, M. (2018b). *Mineral Resources—From Exploration to Sustainability Assessment* (1st Edition). Springer International Publishing. 10.1007/978-3-319-58760-8

CAMIMEX. (2020). *Informe de la Octagésima Tercera Asamblea General Ordinaria de la Cámara Minera de México.* Cámara Minera de México.

Chávez-García, F. J., Manakou, M. V., & Raptakis, D. G. (2014). Subsoil structure and site effects: A comparison between results from SPAC and HVSR in sites of complex

geology. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 57, 133–142.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2013.11.008>

DOF. (2019). *NORMA Oficial Mexicana NOM-120-SEMARNAT-2011, Que establece las especificaciones de protección ambiental para las actividades de exploración minera directa, en zonas agrícolas, ganaderas o eriales y en zonas con climas secos y templados en donde se desarrolle vegetación de matorral xerófilo, bosque tropical caducifolio, bosques de coníferas o encinos.*
http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5238496&fecha=13/03/2012

Dolores-Reyes, G. (2014b). *Caracterización mineralógica de las alteraciones hidrotermales en el yacimiento de oro La India, Sonora, México.* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.

Doucet, D., Haldane, T., & Julien, M. (2012b). *Technical Report on the June 30, 2012 Update of the Mineral Resources and Mineral Reserves, La India Gold Project, Municipality of Sahuaripa, Sonora, Mexico.* (Technical Report M5C 2Y7; p. 312).

Enciso-Miranda, C. (2016). *Identificación de zonas prioritarias para reforestación en la ciudad de Hermosillo, Sonora* [Tesis de maestría]. Universidad Estatal de Sonora.

Ferrari, L., Valencia-Moreno, M., & Bryan, S. (2005b). *Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica. Volumen conmemorativo del centenario* (Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana), 37.

Flores-Estrella, H., Lomnitz-Aronsfrau, C., & Yussin-Guarneros, S. (2004). Estimación de velocidades de fase a partir del análisis con microtemores con el método SPAC. *Geos*, Vol. 24(No. 3), 438–445.

G. Mazzoni, Giannakogiorgos, A., & Haryono, M. (2014b). HVSR & seismic zonation: A case study based on current NZS 1170.5 subsoil classification methods. *New Zealand Geotechnical Society Inc (NZGS) - NZ Geomechanics News*, Vol. 88, 62–69.

Gadallah, M. R., & Fisher, R. (2009b). *Exploration Geophysics—An Introduction* (1st Edition). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI 10.1007/978-3-540-85160-8

Gallegos-Hernández, G. (2012b). *Zonificación del Riesgo Sísmico en la ciudad de Loreto, Baja California Sur, México*. [Tesis de licenciatura]. Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora.

Gandhi, S. M., & Sarkar, B. C. (2016b). *Essentials of Mineral Exploration and Evaluation*. Elsevier.

García-Jerez, A. (2010b). *Desarrollo y evaluación de métodos avanzados de exploración sísmica pasiva. Aplicaciones a estructuras geológicas locales del sur de España*. [Tesis doctoral]. Universidad de Almería.

Gosar, A. (2017b). Study on the applicability of the microtremor HVSR method to support seismic microzonation in the town of Idrija (W Slovenia). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, 925–973. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-925-201>

Haldar, S. K. (2018b). *Mineral Exploration-Principles and Applications* (2nd Edition). Elsevier.

Helfrich, G., Wookey, J., & Bastow, I. (2013). *The Seismic Analysis Code: A Primer and User's Guide*. Cambridge University Press; Cambridge Core. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139547260>

INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Sahuaripa, Sonora*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.

Khalili, M., & Mirzakarudeh, A. V. (2019). Fault detection using microtremor data (HVSr-based approach) and electrical resistivity survey. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 11(2), 400–408. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.12.003>

Kuo, C.-H., Chen, C.-T., Lin, C.-M., Wen, K.-L., Huang, J.-Y., & Chang, S.-C. (2016b). S-wave velocity structure and site effect parameters derived from microtremor arrays in the Western Plain of Taiwan. *Journal of Asian Earth Sciences*, 128, 27–41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.07.012>

Lee, V. W. (1984). Three-dimensional diffraction of plane P, SV & SH waves by a hemispherical alluvial valley. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 3(3), 133–144. [https://doi.org/10.1016/0261-7277\(84\)90043-3](https://doi.org/10.1016/0261-7277(84)90043-3)

LGEEPA. (2019). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0041-86332008000200026

Longo, T. (2006b). *La India field review report, 27 February 2006, private report prepared for Newmont Mining Corporation and Grayd Resource Corporation*. (p. p 43).

López-Pineda, L. (2010b). *Estudio geológico-geofísico de riesgos ambientales para el sitio donde se construye el Centro de Rehabilitación Infantil Teletón en Hermosillo, Sonora, México*. (p. 50) [Informe Técnico]. Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora.

López-Pineda, L., & Durazo-Tapia, G. (2011b). *Determinación de resistividad y frecuencias naturales de vibración de muestras de roca del prospecto de Industrial Minera México*. [Informe Técnico]. Centro de Estudios Superiores del Estado de Sonora.

Lozano, S., Brown, E., Ortega, B., Caballero, M., Werne, J., Fawcett, P., Schwalb, A., Valero-Garcés, B., Schnurrenberger, D., O'Grady, R., Stockhecke, M., Steinman, B., Cabral-Cano, E., Caballero-Miranda, C.-I., Sosa-Nájera, S., Soler, A., Pérez, L., Noren, A.,

Myrbo, A., & Vergara-Huerta, F. (2017). Perforación profunda en el lago de Chalco: Reporte técnico. *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 69, 299–311. <https://doi.org/10.18268/BSGM2017v69n2a2>

Marjoribanks, R. (2010b). *Geological Methods in Mineral Exploration and Mining* (2nd Edition). Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 10.1007/978-3-540-74375-0

McDowell, F., & Clabaugh, S. (1979b). *Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their relation to the tectonic history of western Mexico. Special Paper 180*(Geological Society of America), 13.

McDowell, F., & Keizer, R. (1977b). *Timing of mid-Tertiary volcanism in the Sierra Madre Occidental between Durango City and Mazatlan, Mexico. v. 88*(Geological Society of America Bulletin), 1479-1487,.

Mendivil-Quijada, H. (2012b). Uso de imágenes satelitales aplicadas a la exploración por yacimientos minerales. *Asociación de Ingenieros de Minas, Metalurgistas y Geólogos de México, A.C.*, 39(GEOMIMET), 156.

Michel, C., Fäh, D., Edwards, B., & Cauzzi, C. (2016b). Site amplification at the city scale in Basel (Switzerland) from geophysical site characterization and spectral modelling of recorded earthquakes. *Physics and Chemistry of the Earth*, 30, 1–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pce.2016.07.005>

Moon, C. J. (2009b). Exploration Geochemistry. In *Introduction to Mineral Exploration* (1st Edition, p. 496). Wiley-Blackwell.

Moon, C. J., Whateley, M. K. G., & Michel, C. (2009b). From Prospect to Prefeasibility. In *Introduction to Mineral Exploration* (1st Edition, p. 496). Wiley-Blackwell.

Moore, S. (2006b). *La India Project, Duraznito South area, results of mapping February 2006, private report dated 18 March 2006, prepared for Newmont Mining Corporation and Grayd Resource Corporation.* (p. 13).

Moreno-Hurtado, G. S. (2015). *Determinación de frecuencias naturales de vibración en materiales geológicos a nivel laboratorio, utilizando el método de cocientes espectrales* [Tesis de licenciatura]. Universidad Estatal de Sonora.

Mundepi, A. K., Galiana-Merino, J. J., Asthana, A. K. L., & Rosa-Cintas, S. (2015b). Soil characteristics in Doon Valley (north west Himalaya, India) by inversion of H/V spectral ratios from ambient noise measurements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 77, 309–322. <http://dx.doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.06.006>

Nakamura, Y. (2000b). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *Proceedings of the XII World Conference Earthquake Engineering, Paper no 2656.*

Paez-Beltrán, C. (2008). *Espectrometría de reflectancia (SWIR) aplicada para mapeo de alteración en la zona de Viruela-La Cruz, proyecto La India: Distrito Minero Mulatos, Sahuaripa, Sonora México.* [Tesis de licenciatura]. Universidad de Sonora.

Paez-Beltrán, C. (2013). *Geocronología y caracterización geoquímica del sistema epitermal de alta sulfuración de au la india, distrito minero de mulatos, municipio de Sahuaripa, Sonora, México.* [Tesis de maestría]. Universidad de Sonora.

Panzer, F., D'Amico, S., Galea, P., Lombardo, G., Gallipoli, M. R., & Pace, S. (2013). Geophysical measurements for site response investigation: Preliminary results on the island of Malta. *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*, 54(2), 111–128. <https://doi.org/10.4430/b/bgta008844>

Panzer, F., Lombardo, G., Sicali, S., & D'Amico, S. (2017b). Surface geology and morphologic effects on seismic site response: The study case of Lampedusa, Italy. *Physics and Chemistry of the Earth*, Vol. 98, 62–72.

Parolai, S., Bormann, P., & Milkereit, C. (2002b). New Relationships between Vs, Thickness of Sediments, and Resonance Frequency Calculated by the H/V Ratio of Seismic Noise for the Cologne Area (Germany). *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 92(9), 2521—2527.

Ritta, R. (2009b). *Periodos fundamentales de sitio utilizando microtebloros: Comparación con otros métodos y aplicación a Mayagüez, Puerto Rico*. [Tesis de maestría]. Universidad de Puerto Rico, Ingeniería Civil.

Ritta, R., Suárez, L., & Pando, M. (2012b). Determinación del período fundamental del suelo usando vibración ambiental y el cociente espectral Horizontal/Vertical. *Mecánica Computacional*, Vol. 38(Asociación Argentina de Mecánica Computacional), 1399–1419.

Romero, I., Estrada, I., García, S. R., Mendivil, E., & Chomina, F. J. (2017). *Realito Project (Preliminary core log manual): Sahuaripa Sonora, Agnico Eagle*. (p. 16) [Reporte técnico].

Rosales-Climent, C. (2001b). *Comportamiento sísmico de los depósitos de suelo del área de Cañaveralejo, Cali, Colombia*. [Tesis de licenciatura]. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería.

SGM. (2018b). *Panorama minero del estado de Sonora*. Servicio Geológico Mexicano.

Staudé, J.-M. (2001b). Geology, Geochemistry, and Formation of Au-(Cu) Mineralization and Advanced Argillic Alteration in the Mulatos District, Sonora, Mexico. In

Northern Sierra Madre Occidental Gold-Silver Mines, Mexico (Vol. 42, p. 0). Society of Economic Geologists. <https://doi.org/10.5382/GB.42>

Terzopoulos, D. (1988). The computation of visible-surface representations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, 417–438.

Ullah, I., & Prado, R. L. (2016b). The analysis of H/V curve from different ellipticity retrieval for a single 3c-station recording. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1–17. <https://doi.org/doi:10.5194/nhess-2016-370>, 2016

Vázquez Rosas, R., Aguirre, J., Flores Estrella, H., & Mijares Arellano, H. (2011). Microtremor studies using the SPAC method: Experiences and applications to four sites in Mexico. *Geofísica Internacional*, 50, 295–312.

Vella, A., Galea, P., & D'Amico, S. (2013). Site frequency response characterisation of the Maltese islands based on ambient noise H/V ratios. *Engineering Geology*, 163, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.06.006>

Whateley, M. K. G. (2009b). Remote Sensing. In *Introduction to Mineral Exploration* (1st Edition, p. 496). Wiley-Blackwell.

William, C. P. (1978b). *Exploration and mining geology*. John Wiley & Sons.