

Monitoreo sísmológico y estudio geoelectrico somero para evaluar la geodinámica del volcán El Totumo

Seismic Monitoring and Shallow Geoelectric Study to the Geodynamic Behavior of El Totumo Volcano

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.1.2020.03>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 30/05/2019. Fecha de Aceptación: 15/11/2019

Alfredo Ghisays-Ruiz 

Universidad del Atlántico. Barranquilla (Colombia)
alfredoghisays@mail.uniatlantico.edu.co

Freddy Humberto Escobar 

Universidad Surcolombiana. Neiva (Colombia)
fescobar@usco.edu.co

Zoraya Martínez Lara 

Universidad de Córdoba. Córdoba (Colombia)
zymartinezlara@correo.unicordoba.edu.co

Nelson Rangel Buitrago 

Universidad del Atlántico. Barranquilla (Colombia)
nelsonrangel@mail.uniatlantico.edu.co

Carlos Lozano Lozano 

Universidad de Santander. Bogotá (Colombia)
carloslozano53@gmail.com

Para citar este artículo:

A. Ghisays Ruiz, F. H. Escobar, Z. Martínez Lara, N. Rangel Buitrago, C. Lozano. "Monitoreo sísmológico y estudio geoelectrico somero para evaluar la geodinámica del volcán El Totumo", INGE CUC, vol. 16, no. 1, pp. 35–52, 2020. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.1.2020.03>

Resumen

Introducción: El incremento de la actividad sísmica como fuente energética asociada a las erupciones volcánicas de lodo en Urabá (Mayo 2017), Cartagena (Junio 2017) y en Canalete, Córdoba (Diciembre 2017), motivó un estudio detallado del comportamiento dinámico del volcán El Totumo en límites de los departamentos de Bolívar y Atlántico en la región Caribe de Colombia.

Objetivo: El objetivo de este trabajo es presentar los resultados de un estudio Geofísico para determinar anomalías relativas a la dinámica del volcán.

Metodología: En este estudio se aplicaron dos métodos Geofísicos: Prospección Geoelectrica y Monitoreo Sísmico, con el fin de detectar en detalle la distribución de los materiales litológicos en profundidad, así como los rasgos estructurales más importantes. Todo lo anterior se logró mediante el análisis de tomografías y el método SPAC (por sus siglas del Inglés, Spatial Autocorrelation) que permitió correlacionar las velocidades de las señales con los estratos sedimentarios, e identificar el soporte estructural del volcán El Totumo.

Resultados: Al llevar a cabo el procesamiento de los datos geofísicos se observó una distribución litológica, característica de las resistividades del subsuelo. No obstante, no se observaron anomalías o rastros de actividad sísmica en la base del volcán.

Conclusiones: No se presentaron anomalías relativas al comportamiento dinámico del volcán en éste periodo de tiempo, se sugiere aplicar la misma metodología para estudios futuros del mismo fenómeno con el fin de generar alertas tempranas sobre los riesgos que su actividad implica frente a los habitantes vecinos de la población Loma de Arena (Bolívar, Colombia) y a la población turística que a diario visita este sitio.

Palabras clave– Salses; volcán de lodo; monitoreo sísmológico; diapirismo; flujo de lodo; tomografías eléctricas; microtremores; ondas de Corte

Abstract

Introduction: The increase in seismic activity as an energy source associated with volcanic mud eruptions in Urabá (May 2017), Cartagena (June 2017) and Canalete, Córdoba (December 2017), deserved a detailed study of the dynamic behavior of El Totumo Volcano located in limits of the departments of Bolívar and Atlántico in the Caribbean region of Colombia.

Objective: The objective of this work is to present the results of a Geophysical study to determine anomalies related to the dynamics of the volcano.

Methodology: In this study, two Geophysical methods were applied: Geoelectric Prospection and Seismic Monitoring, in order to detect in detail the distribution of lithological materials in depth, as well as the most important structural features. All the above was achieved through the analysis of tomographies and the SPAC method (Spatial Autocorrelation), which allowed to correlate the velocities of the signals with the sedimentary strata, and to identify the structural support of the El Totumo volcano.

Results: When carrying out the processing of the geophysical data, a lithological distribution was observed, characteristic of the resistivities of the subsoil. However, no anomalies or traces of seismic activity were observed at the base of the Totumo volcano.

Conclusions: : There were no anomalies related to the dynamic behavior of the volcano in this period of time, it is suggested to apply the same methodology for future studies of the same phenomenon in order to generate early warnings about the risks that its activity implies in front of the inhabitants of the population. Loma de Arena (Bolívar, Colombia) and the tourist population that visits this site every day.

Keywords– Salses; mud volcano; seismological monitoring; diapirism; sludge flow; electrical tomographies; microtremors; shear waves



I. INTRODUCCIÓN

A. *Volcanes de lodo – volcanismo sedimentario*

Los volcanes de Lodo (VL) son rasgos superficiales del volcanismo sedimentario, proceso cortical relacionado con la extrusión de lodo, brecha, hidrocarburos líquidos o gaseosos y, agua salina, en cuencas sedimentarias petrolíferas. Son macrofiltraciones de topografía positiva, relacionados con estructuras piercing como los diapiros de lodo [1]. Se distribuyen ampliamente en continentes (onshore) como océanos (offshore) alrededor del mundo y, ocupan diversos escenarios tectónicos como: Márgenes activos, márgenes pasivos, regiones deltaicas, regiones diapíricas y cuencas sedimentarias profundas en bordes de placas [2], [3]. Aproximadamente el 80%, se localizan en áreas sujetas a estilos tectónicos compresionales asociados con acreción de sedimentos y márgenes transformantes y convergentes [3], [4]. La caracterización de los volcanes de lodo ha sido abordada históricamente a escala regional mediante la definición de aspectos morfológicos, tectónicos e hidrogeológicos, con base en la información generada por las actividades de exploración de hidrocarburos. En los últimos años, el interés ambiental de los volcanes de lodo, en atención a la generación de gases efecto invernadero y las geoamenazas asociadas, ha favorecido la ejecución de investigaciones detalladas del subsuelo somero que permiten ampliar el conocimiento estratigráfico y estructural en directa relación con los sistemas de conducción de lodo y la disposición de materiales como arcillas, lodo fluido [5].

De conformidad con la geodinámica prevaleciente, los volcanes de lodo pueden ser clasificados según su actividad en eruptivos, dormidos, extintos y fósiles. La mayor parte de los VL se encuentran en estados dormidos donde son comunes las emisiones pacíficas degas y lodo; este comportamiento se alterna con fases eruptivas caracterizadas por la emisión violenta de brecha de lodo, lodo fluido, aceite y, gas que puede generar conflagraciones [6]. La brecha de lodo característica de las erupciones violentas es una mezcla de importantes cantidades de lodo, fragmentos de roca sedimentaria, agua, metano y en menor proporción CO₂, N₂, y He. Como explican [7], muchos VL catalogados como eruptivos por la literatura científica son en realidad VL dormidos con presencia esporádica de filtraciones. La correlación geofísica -estratigráfica de los materiales distribuidos en profundidad y emitidos por el volcán de conformidad con los estados de actividad, tienen directa relación con la geodinámica del mismo.

B. *Área de estudio y Geología Regional*

El área de estudio es el volcán El Totumo y se encuentra en una sección cortical geodinámicamente inestable de la Cuenca del Bajo Valle del Magdalena en el norte de Colombia. Se considera una cuenca de *antearco* creada durante la subducción de la litósfera oceánica de la placa del Caribe hacia el Este debajo de la corteza continental de la Placa Sudamericana [7], [8]. La región está constituida por rocas sedimentarias Cretáceas a Recientes.

El volcán El Totumo hace parte de un conjunto de volcanes de lodo ubicados en la costa norte del Caribe colombiano entre los límites de los departamentos del Atlántico y Bolívar con coordenadas (10° 44' 41" N) y (75° 14' 27" O) (Fig. 1).

El volcanismo de lodo en Colombia ha sido estudiado preferencialmente en la cuenca sedimentaria Sinú-San Jacinto, donde la adquisición de información de carácter regional ha permitido mejorar el conocimiento de los aspectos que definen la manifestación del fenómeno en materia de estilo tectónicos [9], inventarios de volcanes, cartografía geomorfológica regional, modelos geológico-geofísicos, e identificación de amenazas [8]. La zona de estudio territorialmente se sitúa entre los límites de los departamentos de Atlántico y Bolívar, y estratigráficamente en la cuenca sedimentaria Sinú-San Jacinto de la región Caribe colombiana [10], zona noroccidental de Suramérica, controlada tectónicamente por la convergencia entre las placas Cocos, Caribe, Suramérica y Nazca [8]. En el litoral del Caribe colombiano se presenta este fenómeno desde los límites del departamento del Atlántico hasta la región del Urabá, tanto dentro como fuera de la costa.

Los volcanes de lodo de Pueblo Nuevo y El Totumo en el municipio de Santa Catalina en Bolívar, son manifestaciones del volcanismo sedimentario. El volcán de lodo El Totumo (VL El Totumo) es un cono de lodo que hace parte de un sistema volcánico sedimentario

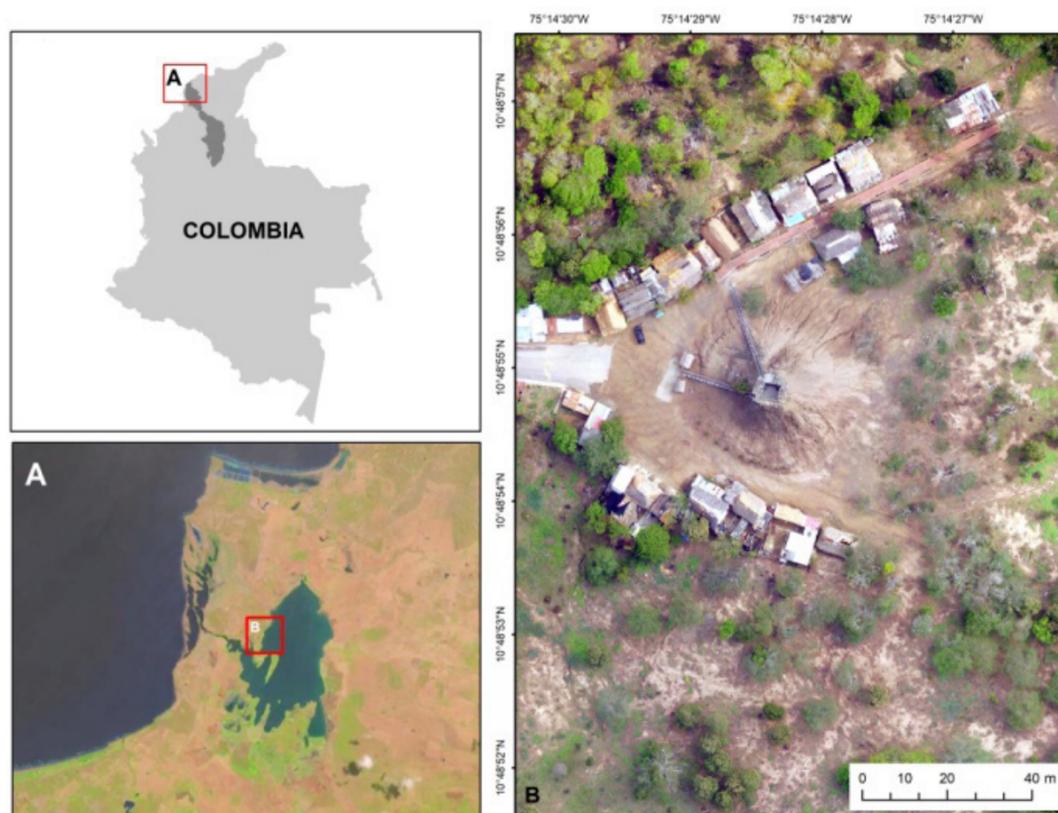


Fig. 1. Ubicación geográfica del departamento del Atlántico y el volcán El Totumo o área de estudio con coordenadas ($10^{\circ} 44' 41''$ N) y ($75^{\circ} 14' 27''$ O).

Fuente: Autores.

más amplio con morfología cómica de cima ligeramente plana, que tiene como rasgos geomorfológicos principales lagos salsa, grifos, piscinas, coladas de lodo, coladas de brecha de lodo y el cono de lodo. El cono del lodo llamado VL El Totumo por su relevancia paisajística, ha sido históricamente objeto de un importante número de investigaciones. Se tienen evidencias de una erupción de cerca de 35.000 m^3 de lodo, ocurrida el 23 de agosto de 2000, en la cima del domo de lodo, indicando características geodinámicas diferentes a las del cono de lodo utilizado con fines turísticos. Un estudio reciente sobre el volcán de lodo El Totumo [7], afirma que existe una gran actividad debido a los componentes del lodo fino almacenado en una piscina de salmuera con infiltraciones de gas, aunque no se descarta la sismicidad por compresión tectónica. Otro estudio complementario afirma que debido a la falla de Mamonal (Bolívar, Colombia), todos estos volcanes son estimulados por el fracturamiento a emitir lodos hacia el exterior, aunque reconocen que no existen suficientes monitoreos sobre esta actividad [11].

El volcán es conocido por ser un lugar turístico, y relativamente pacífico, ya que su dinámica a nivel de vibraciones sísmica es relativamente baja, y su última erupción se presentó en agosto del año 2000. Tiene un diámetro un poco mayor a 400 m y una altura aproximada de 24 m [12].

C. Información geofísica

El uso de tomografías de resistividad eléctrica ha sido exitoso en muchos campos de aplicación de las geociencias como en materia ambiental, permitiendo analizar problemas relacionados con la variación de los contenidos de agua que inciden en la caracterización de materiales o litologías en el subsuelo, procesos de contaminación, identificación de estructuras subsuperficiales, muchos realizados en zonas de volcanismo sedimentario [5]. Estas aplicaciones son eficaces en la medida que las tomografías permiten evaluar la resistividad aparente del subsuelo mediante la medición de la variación de los potenciales de resistividad, luego de la inyección de corriente continúan al terreno.

El propósito de éste estudio fue determinar a través del modelo geoelectrico la presencia de anomalías del subsuelo somero que indiquen la posibilidad de flujos violentos de lodo y gas, pero finalmente los dos métodos geofísicos aplicados mostraron un equilibrio geo-

dinámico con pocos flujos hacia el exterior durante la época de adquisición de los datos. Esto no excluye un aumento de actividad en épocas futuras, se sugiere que estos volcanes de lodo deben ser monitoreados continuamente usando las técnicas geofísicas como herramientas de investigación importantes en el contexto del conocimiento stratigráfico y estructural de estas geoformas.

II. METODOLOGÍA

A. Método Geo-eléctrico

1) Levantamiento de perfiles

Una visita previa a la zona nos permitió ubicar el área de estudio como también diseñar la geometría respectiva de los perfiles necesarios para el levantamiento de los cuatro tendidos (PN: Perfil Norte, PS: Perfil Sur, PE: Perfil Este, PO: Perfil oeste); alrededor del volcán y un tendido al lado de los cráteres, salses o manaderos secundarios (Fig. 2).



Fig. 2. Diagrama de los cuatro perfiles: PN: Perfil Norte, PE: Perfil Este, PS: Perfil Sur, PO: Perfil Oeste.
Fuente: Imagen tomada con dron por autores.

2) Trabajo de campo

Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), son una técnica que permite registrar o detectar anomalías relativas a un parámetro físico, en este caso la resistividad del suelo [13]. Así, una tomografía eléctrica es un corte transversal del terreno que muestra las anomalías de resistividad permitiendo identificar los diferentes estratos existentes, producto de un sondeo eléctrico vertical [13]. Las actividades iniciales de campo correspondiente a los métodos geofísicos (sondeos geoelectricos y monitoreo sísmico), se inician con el reconocimiento de la zona de estudio. Durante esta visita se corroboró que los transeptos previamente dibujados y marcados en el mapa de la Fig. 2 coincidieran con las condiciones reales del terreno.

3) Prospección eléctrica

Una vez finalizado el reconocimiento del terreno, se procedió a la realización de los sondeos eléctricos verticales multielectrónicos, para lo cual se empleó un resistivímetro de corriente continua cuyas principales especificaciones son presentadas en la Tabla 1.

TABLA 1. FICHA TÉCNICA DEL RESISTIVÍMETRO DE CORRIENTE CONTINUA.

PASI: EarthResistivity Meter	Modelo: 16GL-N
Instrumento multiproceso	Lecturas simultáneas de voltaje y corriente
Memoria para almacenar datos	Hasta 18.000 datos
Alta sensibilidad, Voltaje mínimo de lectura	610nV
Voltaje máximo de lectura	1280V
Corriente máxima de lectura	1A
Filtros automáticos para reducción de ruido	50/60 Hz
Fuentes adicionales de voltaje x 3	12 VDC

Fuente: Diseño Autores para resumir datos técnicos del fabricante.

4) Método de medida (Método de las cuatro puntas)

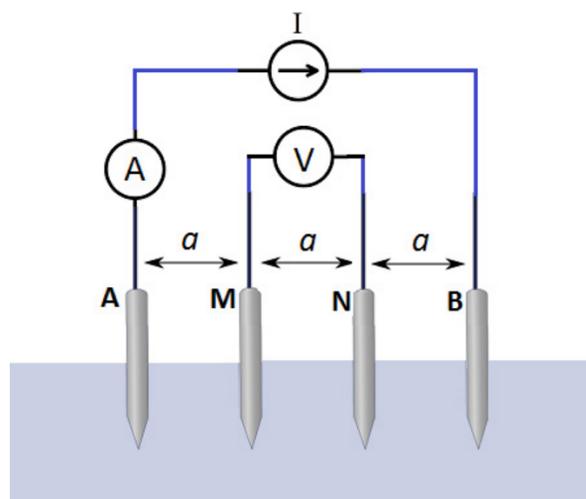


Fig. 3. Representación esquemática del método de las cuatro puntas.

Fuente: Diseño autores.

Consiste en inyectar una corriente eléctrica al subsuelo mediante electrodos A y B y medir el potencial generado en los puntos M y N (Fig. 3), para lo cual se hace necesario el uso de 4 electrodos (método de las cuatro puntas). Al introducir corriente eléctrica en el terreno a través de los electrodos A y B ésta se puede propagar en el subsuelo de tres formas diferentes: conducción dieléctrica, electrónica y electrolítica, siendo esta última la base de los métodos de resistividad. Se puede calcular la resistividad del subsuelo usando la relación (1):

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K (\Omega m) \quad (1)$$

Donde:

Δ es la diferencia de potencial entre los electrodos MN; es la corriente inducida y se designa como el factor geométrico y depende solo de las distancias a los electrodos (2):

$$K = \left(\frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}\right)} \right) \quad (2)$$

La aplicación Geoelectrica es una técnica que permite registrar el comportamiento anómalo del subsuelo. Por lo tanto su uso en este trabajo permitirá el registros de imágenes que muestren los flujos de lodo ascendente. Igualmente el análisis de los perfiles de velocidades de corte, permitira determinar alteraciones estructurales en los estratos sedimentarios ocasionados por la diferencia de presión que obligan al lodo a salir.

B. Métodos Sísmico

1) Método de exploración con microtemores (Método SPAC)

El método SPAC fue presentado en 1957 [14] sentando sus bases, y ha sido revisado para responder a problemas prácticos, especialmente en arreglos irregulares desplegados sobre el terreno [15]. El presunto básico del método consiste en considerar al ruido ambiental como constituido principalmente de ondas superficiales, con un frente de ondas planas, estacionarias en el tiempo y en el espacio, que se presentan en un medio isotrópico. Estos presuntos, permiten la simplificación de las ecuaciones. El funcionamiento básico de este análisis consiste en calcular la correlación entre dos registros simultáneos de dos sensores separados por una distancia y orientada en un acimut φ (Fig. 4). Las curvas de autocorrelación se obtienen con base en las curvas de dispersión de las ondas superficiales que componen una parte importante del ruido sísmico, estas curvas ofrecen información sobre las características del subsuelo. Después de la inversión de las curvas de autocorrelación, se obtienen los perfiles de velocidad de ondas de corte.

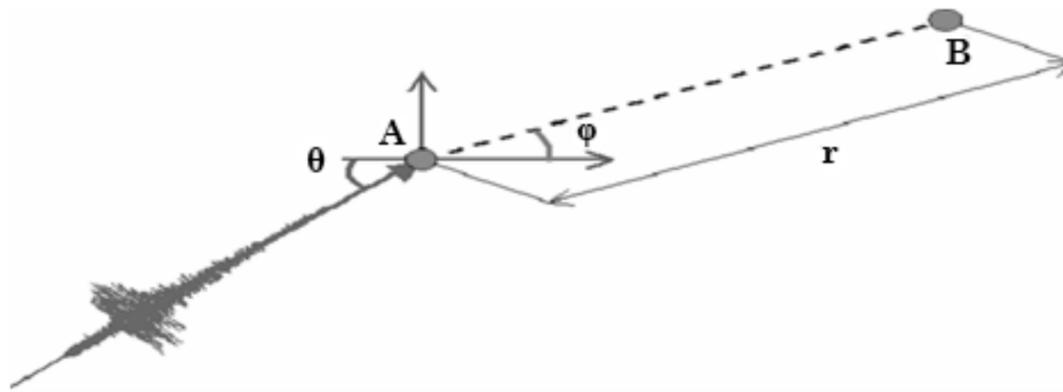


Fig. 4. Esquema de dos sensores A y B separados por una distancia r , con un acimut θ y con una onda que se propaga en la dirección (acimut de propagación).

Fuente: Modificado de [16].

La relación de autocorrelación espacial se define (3):

$$\rho(r, \omega_0) = \cos\left(\frac{\omega_0}{c(\omega_0)} * r\right) \quad (3)$$

Donde:

$\rho(r, \omega_0)$ es la relación de autocorrelación espacial, ω es la frecuencia angular y $c(\omega)$ es la velocidad de fase, dependiente de la frecuencia.

En el caso de una onda Rayleigh registrada por la componente vertical y descartando el índice de frecuencia ω_0 , la ecuación (3) da (4):

$$\bar{\rho}_z(r, \omega) = J_0\left(\frac{\omega r}{c_R(\omega)}\right) \quad (4)$$

Donde $c_R(\omega)$ es la velocidad de fase de las ondas Rayleigh (que son dispersivas). El término $\bar{\rho}_z(r, \omega)$ puede obtenerse midiendo $\rho_z(r, \varphi, \omega)$ para varias estaciones localizadas a una distancia con una estación de referencia. Conociendo $\bar{\rho}_z(r, \omega)$ en diferentes valores de la frecuencia, la velocidad de fase $c_R(\omega)$ puede calcularse. Con base en la referencia [17] empleando una geometría de arreglo lineal para el análisis con el método SPAC, partiendo del presunto de que los microtemores cumplen condiciones de estacionalidad en el tiempo y en el espacio, usando registros obtenidos en estaciones sismológicas para diferentes distancias entre las estaciones.

2) Metodología de estudio por monitoreo sísmico

Un esquema general de esta modificación al método SPAC se muestra en la Fig. 5, con el siguiente procedimiento: Primero, despliegue del arreglo lineal de estaciones en el área de estudio comenzando con una distancia entre estaciones “ x ” con una longitud total de arreglo de $2x$ para obtener una longitud de $4x$ (Fig. 5A). Segundo, se determinan las curvas de autocorrelación promediadas para cada una de las distancias entre las estaciones que componen el arreglo lineal (Fig. 5B). Tercero, es posible obtener la curva de velocidad de fase de ondas superficiales con respecto a la frecuencia para cada una de las curvas de autocorrelación espacial (Fig. 5C). Cuarto, construcción de los perfiles de velocidad de ondas de corte a partir de la inversión de las curvas de dispersión de velocidad de fase (Fig. 5D).

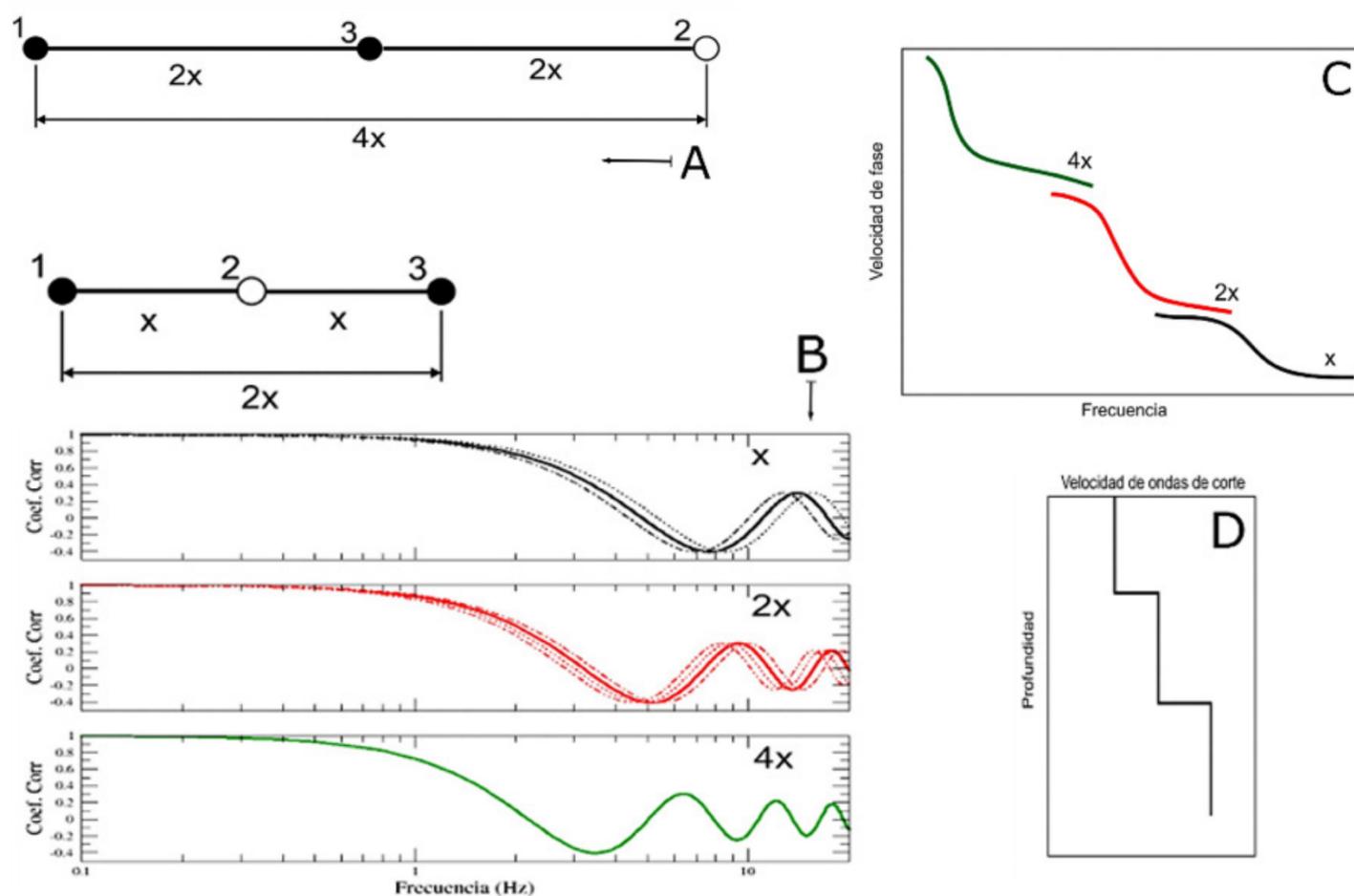


Fig. 5. Procedimiento para el análisis con el método SPAC propuesto por Carvajal [12].

A: Arreglo de estaciones para el registro de microtremores.

B: Cálculo de las curvas de autocorrelación espacial promediadas.

C: Cálculo de las curvas de velocidad de fase de ondas superficiales.

D: Construcción del perfil de velocidad de ondas de corte

Fuente: [18].

3) Adquisición de registros de microtremores

Los arreglos realizados en el volcán El Totumo son de geometría lineal, los cuales consisten en una pareja de sismómetros ubicados a una distancia inicial entre estaciones registrando microtremores durante un tiempo determinado. Posteriormente se incrementa el intervalo de distancia sucesivamente dependiendo de las limitaciones en el despliegue del arreglo. La geometría de los arreglos realizados en el volcán El Totumo y la configuración de los arreglos lineales se muestran en la Fig. 6 y en la Fig. 7, respectivamente. El equipo sismológico empleado para el registro de microtremores cuenta con un rango de frecuencia para respuesta plana en el rango 120-50 Hz, sensibilidad de $1201 V/(m/s)$, voltaje de salida 40 V (pico a pico), capacidad para tres canales de registros, resolución de 24 bits, sensibilidad nominal de 1 cuenta/ μV , rango dinámico mayor que 141 dB y voltaje máximo de entrada de 40 V (pico a pico) diferencial (Fig. 8).



Fig. 6. Localización de los arreglos lineales en el volcán El Totumo.
Arreglo lineal No. 1: Línea continua. **No. 2:** Línea a trazos largos. **No. 3:** Línea trazos cortos.
Fuente: Autores.

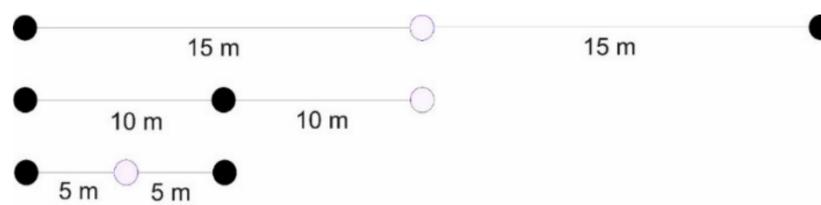


Fig. 7. Configuración de cada uno de los arreglos lineales de estaciones para el registro de micro-tremores en el volcán El Totumo, para distancias entre estaciones de 5, 10 y 15 m.
Fuente: Autores.

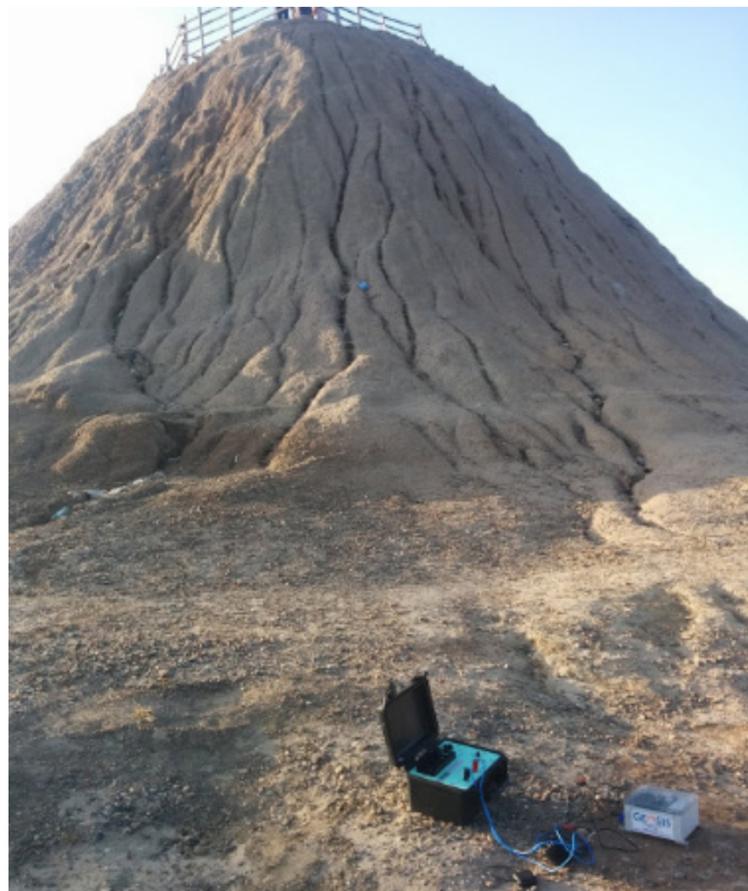


Fig. 8. Equipo sismológico empleado en los arreglos lineales para el registro de micro-tremores en el volcán El Totumo.
Fuente: Foto tomada con dron por autores.

C. Procesamiento de datos geoelectricos

El software empleado, es un programa que procesa los datos obtenidos en campo mediante algoritmos matemáticos, usando elementos finitos o diferencias finitas y algunas rutinas especiales para iterar los valores de la resistividad y arrojar finalmente un mapa o imagen de las resistividades del subsuelo. El modelo o algoritmo matemático usado [19], es el de mayor uso ya que permite procesar variaciones de resistividad usando el método de Gauss-Newton Least-Squares method (Mínimos cuadrados), esta es la opción usada para el diseño de todas las tomografías en este trabajo. Se expresa en la siguiente ecuación (5):

$$(J_T J + \mu F)d = J_T g \quad (5)$$

Donde: $F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$, tal que J es la matriz de derivadas parciales (Jacobiano), μ es un factor de decaimiento (Multiplicador de Lagrange), d es un vector de perturbación, f_x es un filtro horizontalmente plano, g es un vector de discrepancia y f_z es un filtro verticalmente plano.

Una de las ventajas del método es que tanto el factor de decaimiento como los filtros horizontales de plano puede ser ajustados a diferentes tipos de datos [19].

1) Proceso de inversión

La inversión utilizada por el software se puede resumir en los siguientes tres pasos, enunciados [11] así:

- Cálculo de las resistividades aparentes.
- Cálculo de la matriz Jacobiana para obtener el vector de corrección.
- Cálculo del mejor valor de la resistividad.

D. Procesamiento de datos sísmicos

Para el procesamiento de registros de microtemores, se emplearon los programas de uso libre GEOPSY que forman parte del paquete de programas SESARRAY (<http://www.geopsy.org/>) [20]. Los registros se organizan en una base de datos en el programa GEOPSY, del cual se hace una extracción de las series de tiempo (velocidad) de componentes verticales para cada una de las estaciones y se ingresan los parámetros para el cálculo de las curvas de autocorrelación espacial donde se seleccionan las frecuencias de interés en la curva de dispersión.

Luego se cortan y se muestrean las curvas de autocorrelación espacial, se calculan las curvas de dispersión y, por último, mediante un modelo inicial de capas se determina el perfil óptimo de velocidad de ondas de corte.

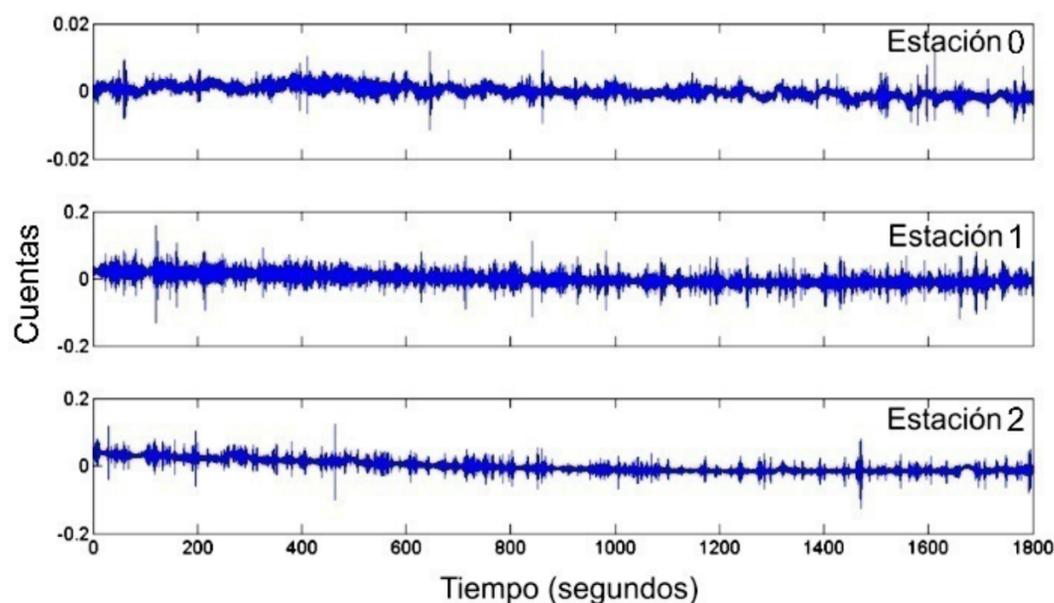


Fig. 9. Registros de microtemores en la componente vertical en las estaciones sísmológicas ubicadas a 0 y 5 m para los arreglos lineales.

Fuente: Diseñado por autores con información obtenida al procesar los datos sísmicos.

Para el cálculo de las curvas de autocorrelación espacial se utilizaron los registros de micro-tremores (Fig. 9). Las curvas de autocorrelación espacial (Fig. 10) presentan la forma de una función Bessel de orden cero, las cuales son adecuadas para calcular el perfil de velocidad de ondas de corte.

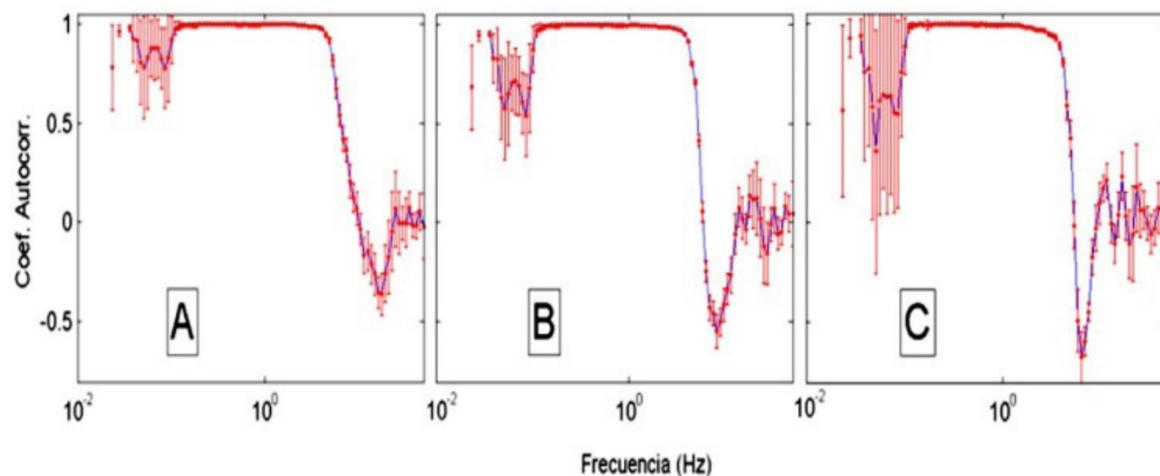


Fig. 10. Curvas de autocorrelación espacial promediadas para los arreglos 1, 2 y 3. Distancias de 5 m (A), 10 m (B), 15 m (C) y 20 m.

Fuente: Diseñado por autores con información obtenida al procesar los datos sísmicos.

Las curvas de dispersión que se utilizan para determinar el perfil de velocidad de ondas de corte, se obtienen a partir del gráfico de lentitud (slowness) versus frecuencia (Fig. 11). Los parámetros del modelo inicial se presentan en la Tabla 2, con una capa sedimentaria con velocidad de ondas de corte uniforme sobre un semi-espacio infinito.

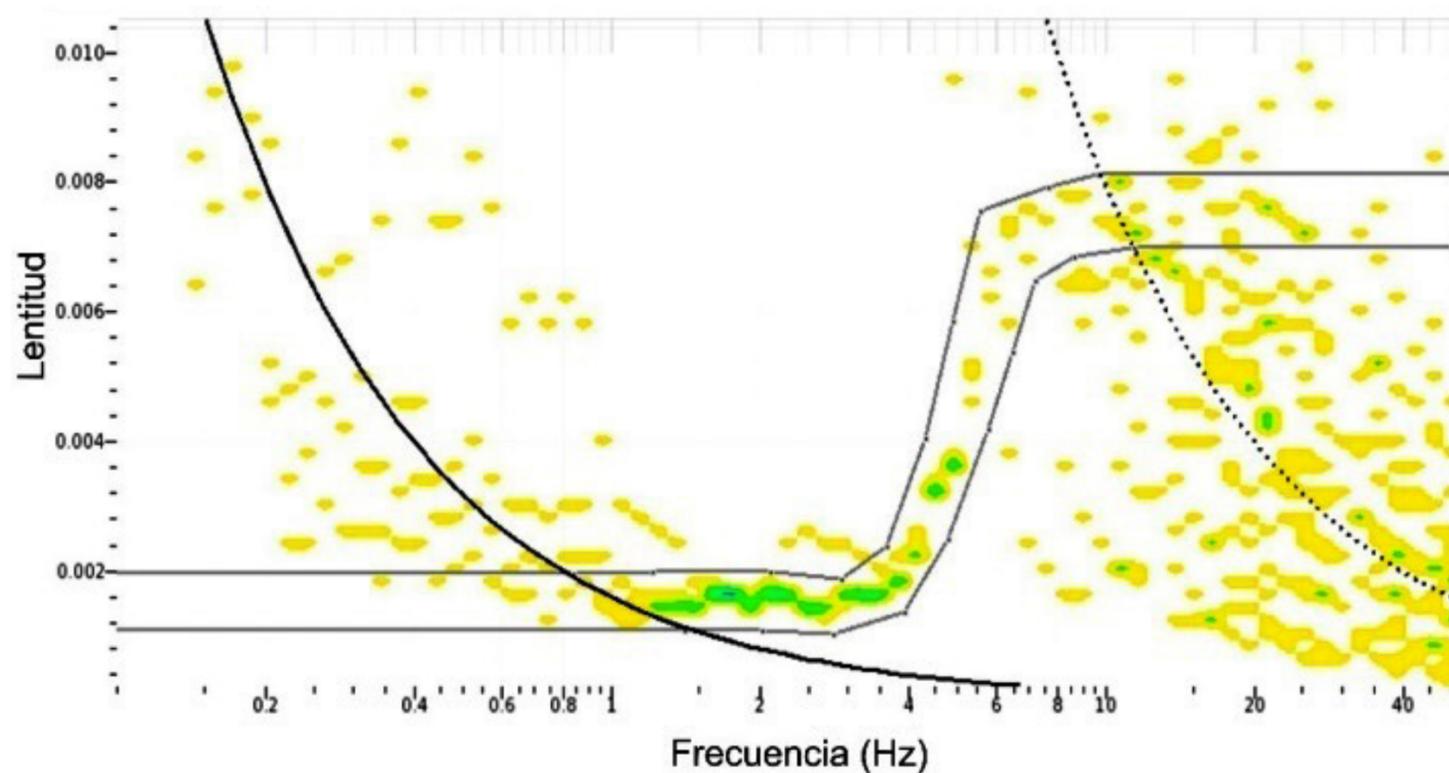


Fig. 11. Gráfico de Lentitud (slowness) vs Frecuencia, representativo de las soluciones de la curva de dispersión para las curvas de autocorrelación espacial de los arreglos lineales.

Fuente: Diseñado por autores con información obtenida al procesar los datos sísmicos.

TABLA 2. PARÁMETROS DEL MODELO INICIAL QUE SE COMPONE DE UNA CAPA CON V_s UNIFORME, SOBRE UN SEMI-ESPACIO INFINITO. V_p : VELOCIDAD DE ONDAS DE COMPRESIÓN, V_s : VELOCIDAD DE ONDAS DE CORTE.

Capa	Espesor (m)	V_p (m/s)	Rel. Poisson	V_s (m/s)	Densidad (Kg/m^3)
Sedimentos	1-100	200-1500	0.1-0.5	150-500	2000
Semi-Espacio	---	200-5000		150-3500	

Fuente: Autores.

III. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A. Método Geoeléctrico

El procesamiento de los datos geoeléctricos genera imágenes transversales del subsuelo denominadas tomografías, éstas exhiben una disposición estructural estratificada afín, a secuencias sedimentarias, con presencia de capas deformadas y depósitos de material superficial. Predominan resistividades que se correlacionan con sedimentos finos como arcillas, limos y arenas finas, así como materiales saturados con fluidos salinos. Los valores de resistividad comunes varían entre 0.3 a 30 Ωm .

La tomografía norte se presenta en la Fig. 12 y muestra un perfil ubicado entre las coordenadas P1 (75° 14' 27.4" O; 10° 44' 41.4" N) y P2 (75° 14' 28" O; 10° 44' 39.7" N). Presenta una longitud de 72 m y una profundidad de 8.6 m con valores de resistividad entre los 0.3 y 30 Ωm . Estratigráficamente se definen dos niveles, el superior con resistividades entre 4.15 y 15 Ωm que no supera los 2.7 m de profundidad promedio, constituido por depósitos de brecha de lodo, de espesor irregular.

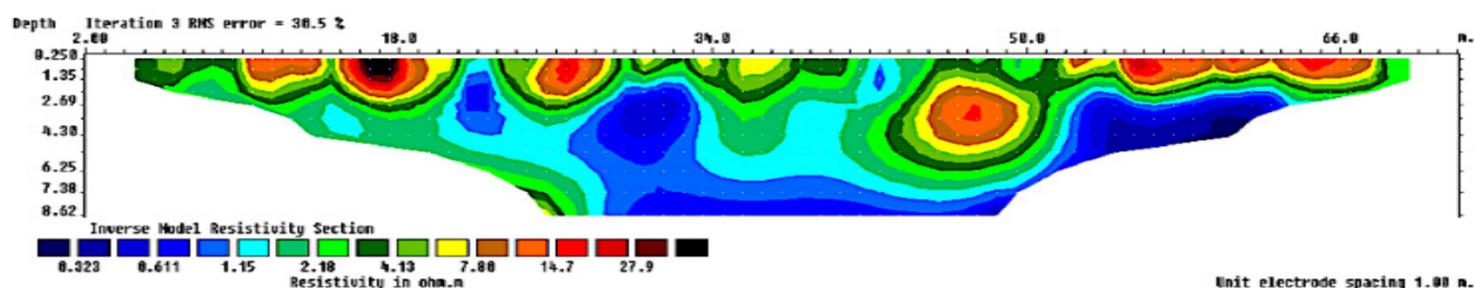


Fig. 12. Tomografía del perfil norte del volcán.

Fuente: Autores con información obtenida al procesar los datos geoeléctricos mediante software RES2DINV.

La brecha es una mezcla de arenas finas, limo y arcilla, con fragmentos de areniscas, arcillolitas y gravas de materiales silíceos; se observa horizontalmente una anomalía entre los 42 y 50 m, que implica un engrosamiento circular con radio de 6 m, lo cual puede relacionarse con eventos antiguos de extrusión de brecha. El nivel inferior es el predominante en el perfil ya que ocupa desde los 2.7 hasta los 8.62 m de profundidad, presenta resistividades inferiores a 4.15 Ωm asociadas con sedimentos finos como arcillas, limos y arenas finas dispuestas en capas que han sido deformadas por materiales de resistividades menores a 1.0 Ωm , (color negro) correlacionadas con lodos fluidos saturados de agua salina.

Estructuralmente el perfil muestra salidas de lodo a superficie en las longitudes de 21 a 23 m, y 41 a 43 m; otras importantes estructuras de ascenso de lodo que no han alcanzado la superficie se infieren entre las longitudes de 29 a 33m, y 54 a 62 m. La Fig. 13 muestra la tomografía occidental ubicado en las coordenadas P2 (75° 14' 28" O; 10° 44' 39.7" N) y P3 (75° 14' 28.2" O; 10° 44' 28.2" N). la longitud horizontal y profundidad del tendido fue establecido en 72 m y 8.6 m, respectivamente.

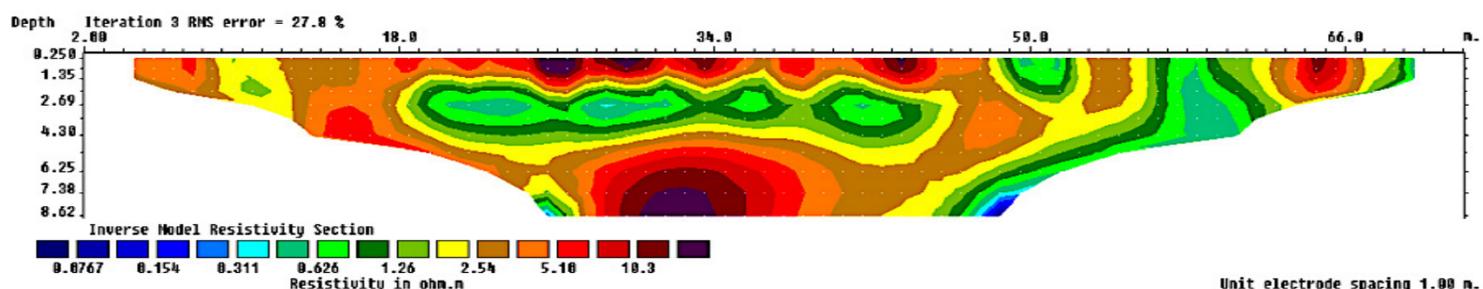


Fig. 13. Tomografía occidental del volcán.

Fuente: Autores con información obtenida al procesar los datos geoeléctricos mediante software RES2DINV.

Los valores de resistividad obtenidos oscilaron entre 0.1 y 13 Ωm . A partir de estos resultados experimentales se pudo establecer que los valores de resistividad en el lado occidental fueron inferiores a los valores de resistividad registrados en la zona norte. Este comportamiento podría estar asociado a la presencia de sedimentos más finos y a un menor contenido de grava en las brechas en esta zona. Estratigráficamente observan tres niveles, uno

superficial con un espesor promedio de 1.35 m y resistividades entre 5 y 13 Ωm correspondiente a brecha de lodo.

El nivel intermedio muestra una cadena con borde blanco en la parte central del perfil entre los 18 y 38 m de longitud horizontal, con resistividades entre 0.2 y 2 Ωm se correlaciona con sedimentos finos como arcillas y limos, se establece que las resistividades inferiores a 1 Ωm es lodo fluido; este nivel se identifica en la parte central del perfil a una profundidad entre 2 y 5 m, y se asume aflorando hacia los 50 m y entre los 57-61 m horizontalmente. El tercer nivel se ubica a partir de los 5 m de profundidad y aunque estratigráficamente se encuentra en la base del perfil, tiene las mismas características que la brecha de lodo superficial (color negro).

Estructuralmente se observan lodos fluidos con tendencia al ascenso sobre las longitudes de 50 m y 58 m, posiblemente coincidente con fracturas y zonas de debilidad del sector.

La tomografía que representa el lado sur (Fig. 14) muestra un perfil ubicado entre las coordenadas P3 (75° 14' 28.2" O; 10° 44' 28.2" N) y P4 (75° 14' 27.5" O; 10° 44' 28" N) con una longitud de 72 m, una profundidad de 8.6 m y resistividades entre 0.5 y 14,0 Ωm .

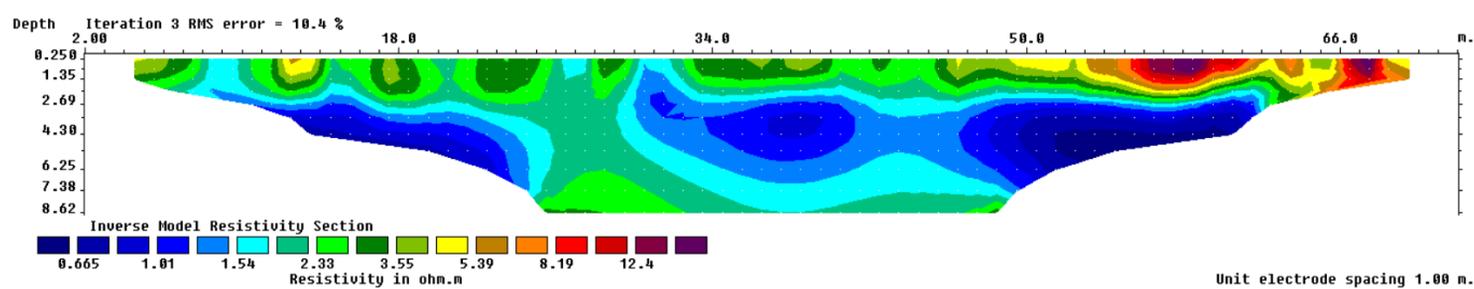


Fig. 14. Tomografía del perfil sur del volcán.

Fuente: Autores con información obtenida al procesar los datos geoelectricos mediante software RES2DINV.

Geoelectricamente presenta en promedio resistividades entre 0.5 y 11 Ωm , sin embargo, de forma puntual se registran algunas resistividades altas al oriente del sondeo eléctrico vertical (SEV). Estratigráficamente se definen dos niveles, uno superficial discontinuo con valores entre 4 y 14 Ωm relacionado con brecha de lodo; un nivel inferior (color negro) que predomina en el perfil, con valores por debajo de los 2 Ωm , constituido por sedimentos finos como arcillas y limos; en este nivel, los valores inferiores a 1 Ωm son lodo fluido salino. Hacia el extremo oriental del perfil, a una longitud de 65 m, se observa una anomalía de un material altamente resistivo con valores mayores a 14 Ωm , correspondiente a materiales calcáreos consolidados como areniscas o calizas. Estructuralmente se indican zonas de ascenso de lodo, posiblemente coincidentes con grietas o fallas a longitudes de 8 m, 31 m y 62 m.

La tomografía que representa el costado oriental del volcán, Fig. 15 muestra un perfil ubicado entre las coordenadas P4 (75° 14' 27.5" O; 10° 44' 28.0" N) y P1 (75° 14' 27.4" O; 10° 44' 41.4" N), con una longitud de 72 m, profundidad de 8.6 m y resistividades entre 0.34 y 4 Ωm . Geoelectricamente presenta los más bajos valores de resistividad del área. Estratigráficamente se observan dos sectores, el primero de colores oscuro y gris ocupa la mayor parte del perfil y tiene valores entre 1.5 y 4.0 Ωm asociado con sedimentos finos como limos y arcillas secos; el segundo, en tonos negro mate se caracteriza por valores inferiores a 1.5 Ωm , asociado a lodo fluido salino. Estructuralmente se observan debajo de 2 m de profundidad, estructuras que sugieren ascenso de lodo a longitudes de 19 m, 40 m, 57 m y 66 m.

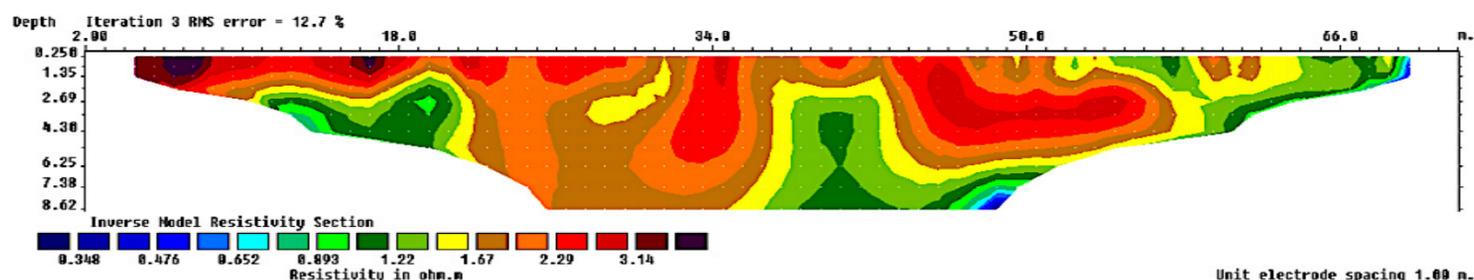


Fig. 15. PE = Perfil 4. Sector Oriental del volcán

Fuente: Autores con información obtenida al procesar los datos geoelectricos mediante software RES2DINV.

La Fig. 16 en la parte inferior, muestra un perfil realizado en las coordenadas P5 (75° 14' 84" O; 10° 44' 40" N) y P6 (75° 14' 33" O 10° 44' 81" N). Este es el perfil más extenso y de mayor profundidad (130 m de longitud por 18m de profundidad); ya que la topografía permitía ampliar el tendido para alcanzar mayor profundidad (18 m). Resulta ser por lo tanto, la tomografía más representativa del sector de mayor elevación de la zona de estudio, muy cercana a los salses o zona de emisión de brecha de lodo. Estratigráficamente se observan 3 niveles; el más superficial en colores oscuro y negro presenta resistividades aproximadas a 10 Ω m y corresponde a la brecha de lodo extruida por el volcán, mezcla de sedimentos finos como arcilla y limo con bloques de areniscas calcáreas y clastos de rocas como pedernales, arcillolitas meteorizadas y areniscas calcáreas; una capa intermedia en color gris claro con resistividades inferiores a 3,5 Ω m; entre los 5 y 12 m de profundidad, que representa sedimentos finos como limos, arcillas y lodo fluidos, estos últimos con resistividades inferiores a 1.0 Ω m.

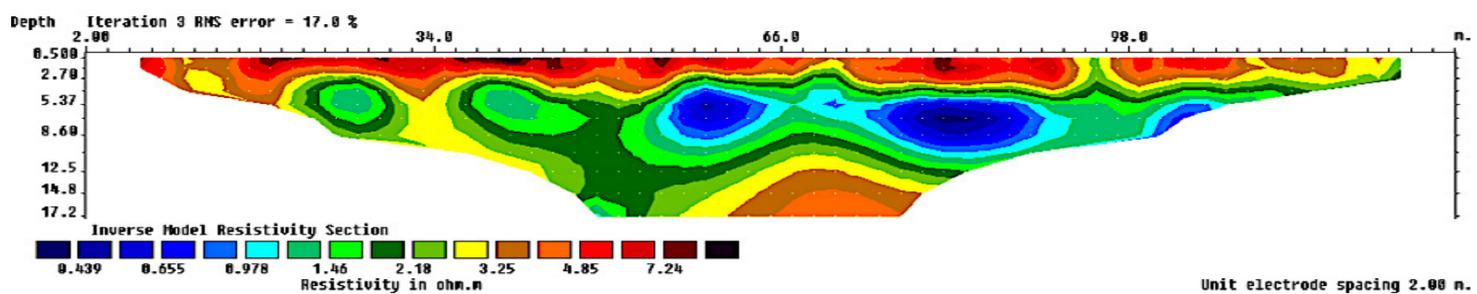


Fig. 16. Perfil de Salses. Sector aledaño al volcán. En este lugar existen varios salses o manaderos.
Fuente: Autores obtenida al procesar los datos geoelectricos mediante software RES2DINV.

Por último, una capa ubicada a profundidades mayores, a 12 m con resistividades entre 4 y 8 Ω m; se presume que era el nivel superficial en otras épocas y hoy soporta extrusiones recientes y sedimentos que pueden contener lodo fluido.

Se puede afirmar de todas las tomografías, que los estratos sedimentarios no han sufrido variaciones considerables respecto a su sucesión a través del tiempo. Esto implica cierta estabilidad estructural en la dinámica del volcán; lo cual disminuye el riesgo que soportaba toda la población que interactúa con el volcán como lugar turístico.

B. Discusión de la información Geoelectrica

El modelo geofísico-estratigráfico (Tabla 3) resultado del análisis de las tomografías indica predominio de materiales finos como arcillas y limos en los aproximadamente 15 metros de profundidad investigados (Fig. 16). Por encima de 1,5 m en promedio, con resistividades aparentes entre 5 y 12 Ω m se observa de forma localizada la presencia de brecha de lodo seca, material que es emitido por los volcanes sedimentarios en épocas de actividad paroxismal, en fases activas.

TABLA 3. RESUMEN ESTRATIGRÁFICO DE TODOS LOS PERFILES. PRESENTA LA CORRELACIÓN ENTRE RESISTIVIDADES Y ESTRATOS SEDIMENTARIOS. PN, PE, PW, PS, P SALSSES: PERFIL DE LA TOMOGRAFÍA.

Resistividad (Ω m)	Estrato	Profundidad (m)	Columna estratigráfica
6 - 14	1	PN: 2,5 m PW, PE y PS: 1,35 m P Salses: 3,0 m	Brecha de lodo seca a suelos areno arcilloso, seco. Material constituido por gravas, arenas, ocasionalmente fragmentos de roca (cerca a lagos salse) con diferentes grados de consolidación.
1, 5 - 6	2	Espesor variable en la base de todos los perfiles.	Secuencias de sedimentitas finogranulares como arcillolitas, limolitas y areniscas muy finas secas que son intruidas por el lodo fluido.
<1,5	3	Asciende desde la parte inferior de los perfiles, desde debajo de los 9 m en PN, PW, PE y PS.	Lodo fluido de composición salina, constituido preferencialmente por limos y arcillas, en menor proporción arenas muy finas, presenta clastos de gravas.
>20	4	PN: <1,3 m	Material de construcción, residuos de material antropogénico.

Fuente: Autores.

La presencia de brecha de lodo indica épocas de alta energía donde el lodo y el gas extruidos pueden arrastrar bloques de areniscas y clastos de gravas de los estratos suprayacentes [2]. Este material superficial se observa en las tomografías norte, occidental, y la adjunta cerca a los lagos salsa, la brecha de lodo se observa distribuida superficialmente en coladas de brecha de lodo que fueron emitidas en la erupción del año 2000.

Resistividades entre 4-6 Ωm son correlacionables con depósitos de arenas y limos arenosos, o areniscas y areniscas conglomeráticas, para la mayoría de los casos, en forma de cuerpos lenticulares. Se identifican en la tomografía norte a profundidades entre 2m y 8 m, en la tomografía occidental por debajo de los 6m; y en la tomografía de los lagos salsa debajo de 12,5 m. La identificación de estos materiales en las mismas tomografías donde superficialmente se distribuyen las brechas de lodo, indican la presencia de depósitos y/o rocas blandas, de granulometrías más gruesas que las que conforman el lodo fluido; materiales que podrían ser la fuente de la brecha de lodo.

Las resistividades por debajo de 1.5 Ωm se correlacionan con lodo fluido salino, el cual se dispone subsuperficialmente en forma de cuerpos lenticulares encerrados entre depósitos de arcillas y limos con menor humedad. En las tomografías norte y sur del volcán, este material se observa ascendiendo hacia superficie en forma de columnas, las filtraciones ubicadas de 21 a 23 m, y 41 a 43 m son coincidentes con el cráter del cono de lodo del Totumo.

Existen otra serie de fracturas que favorecen el ascenso de lodo desde los cuerpos lenticulares en el interior y que sin embargo no se filtran a la superficie, indicando la presencia de estructuras que favorecen el ascenso o conducción de lodo, como fracturas o diaclasas. Existen sectores de alta resistividad ubicados en la tomografía sur, en cercanías a la ciénaga, que indican en superficie litologías consolidadas como calizas o areniscas calcáreas.

Las anteriores evidencias indican que hacia los lagos salsa y, los perfiles norte y occidental del cono de lodo denominado volcán El Totumo, ha sido extruido brecha de lodo en eventos que indican una alta energía. Estos eventos implican una geodinámica más activa que la observada en la época del estudio donde solamente se estaba emitiendo lodo fluido desde los lagos salsa y el cono de lodo. Los niveles con materiales gruesos en las tomografías norte, occidental y de los lagos salsa, pueden ser fuente de las brechas de lodo identificadas en superficie para las mismas tomografías. La distribución de los materiales en la columna, permite asumir secuencias similares a las halladas por otros estudios relacionados con volcanes de lodo en estado dormido [5], [21]. La brecha de lodo encontrado en la superficie de algunas tomografías permite inferir estados de actividad ocasionales en el volcán, tanto alrededor de los lagos salsa como en el cono de lodo, que contrasta con los estados de quietud comunes en la geodinámica actual.

C. Resultados: Método Sísmico

Con la información de las curvas de dispersión calculadas a partir de los arreglos lineales realizados en el volcán El Totumo, se determinaron las distintas soluciones de perfiles de velocidad de ondas de corte, V_s , y curvas de dispersión que se muestran en la Fig. 17A y Fig. 17B, respectivamente. En la Fig. 17A se observa una convergencia a la solución con el menor desajuste, la cual se presenta en la Fig. 17C correspondiente a un perfil de dos capas, determinando la presencia de un primer estrato cuya V_s es aproximadamente igual a 150 m/s y una segunda capa con una V_s de 375 m/s.

El perfil de velocidades que se obtuvo a partir de la sísmica de ondas superficiales permitió encontrar dos capas. La primera hasta una profundidad de 10 m con una velocidad de ondas de corte aproximada de 150 , la cual se puede asociar a material poco consolidado y se puede correlacionar con los resultados del ensayo de geoelectrica en el que se halló material arenoso calcáreo y lodos de grano fino intercalado con marga humedecida.

La segunda capa está a una profundidad aproximada entre 10 y 34 m con una velocidad de ondas de corte estimada en 375 , la cual corresponde a suelos rígidos de acuerdo a la clasificación de la Norma Sismo-Resistente NSR-10 (Anexo 1).

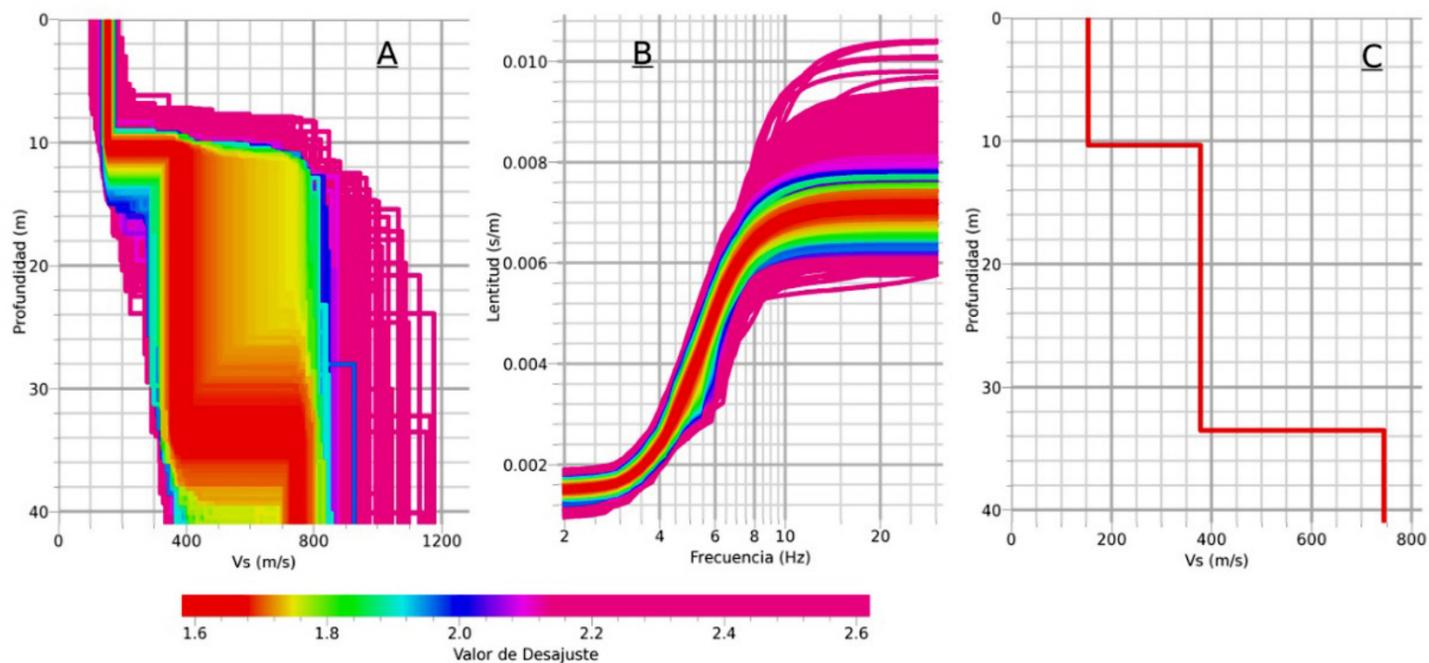


Fig. 17. Resultados del proceso de inversión de las curvas de autocorrelación espacial para los arreglos lineales realizados en el volcán El Totumo.

A: Perfil de velocidad de ondas de corte,

B: Curvas de dispersión de los modelos generados y

C: Mejor ajuste del perfil de velocidad de ondas de corte.

Fuente: Autores con información obtenida al procesar datos sísmicos.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos mediante ambos métodos se determina un perfil de tres capas superficiales. Una primera capa con un espesor de 5 m representada por un suelo arenoso calcáreo y gravas. La segunda capa está a una profundidad aproximada entre los 5 y 12 m, representada por un material lodolítico de grano fino intercalado con marga humedecida. Una tercera capa a una profundidad mayor a 12 m representada por un suelo arenoso calcáreo, gravas y calizas, el cual presenta un mayor grado de consolidación.

Los resultados a nivel de Geofísica en ambos métodos no resaltan ninguna anomalía; en Geoeléctrica se observan pocos flujos ascendentes de lodo fino (proceso normal solo por diferencia de densidades) y en sismología no se evidencian perturbaciones que generen alarma, lo cual indica un comportamiento geodinámico en equilibrio, con muy pocas diferencias de presión; lo anterior implica poca emisión de gases efecto invernadero hacia la atmósfera.

Se sugiere realizar monitoreo geofísico en época invernal, ya que se alteran todas las variables del subsuelo.

FINANCIAMIENTO

El grupo de Investigación en Geología, Geofísica y Procesos Marino Costeros (GGPMC) participó a mediados del mes de junio de 2015 en la Convocatoria Interna EQUIDAD INVESTIGATIVA organizada por la vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad del Atlántico quien financió el proyecto que se inicia en Diciembre de 2015 y termina a mediados de 2017.

El presente artículo (Monitoreo Sísmico y Estudio Geoeléctrico Somero al Comportamiento Geodinámico del volcán El Totumo) constituye uno de los productos derivados de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] G. Etiope, *Natural Gas Seepage. The Earth's Hydrocarbon Degassing*, Cham, Ch: Springer International Publishing, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14601-0>
- [2] A. Mazzini and G. Etiope, Mud volcanism: An updated review, *Earth-Sci Rev*, vol 168, pp. 81–112, May. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.03.001>

- [3] A. V. Milkov, “Global Distribution of Mud Volcanoes and Their Significance in Petroleum Exploration as a Source of Methane in Atmosphere and Hydrosphere and as a Geohazard,” in *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity*, G. Martinelli and B. Panahi, Eds, SXF, DE: Springer-Verlag, 2005, pp. 29–34. https://doi.org/10.1007/1-4020-3204-8_3
- [4] A. J. Kopf, Significance of mud volcanism. *Rev. Geophys.*, vol. 40, no. 2, pp. 1–52, Sep. 2002. <https://doi.org/10.1029/2000RG000093>
- [5] M. Rainone, S. Rusi, and P. Torrese, “Mud volcanoes in central Italy: Subsoil characterization through a multidisciplinary approach,” *Geomorphology*, vol. 234, pp. 228–242, Apr. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.01.026>
- [6] S. Planke, H. Svensen, M. Hovland, D. Banks and B. Jamtveit, “Mud and fluid migration in active mud volcanoes in Azerbaijan,” *Geo-Mar Lett*, vol. 23, no. 3, pp. 258–268, Oct. 2002. <https://doi.org/10.1007/s00367-003-0152-z>
- [7] H. Dill and S. Kaufhold, “The Totumo mud volcano and its near-shore marine sedimentological setting (North Colombia) — From sedimentary volcanism to epithermal mineralization,” *Sedimentary Geology*, vol. 366, pp. 14–31, Apr. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2018.01.007>
- [8] J. H. Carvajal y D. Mendivelso, “Parte 2. Catálogo de los volcanes de lodo,” en *Volcanismo de Lodo del Caribe Central Colombiano*, L. E. Vásquez, Ed, Btá, Co: Servicio Geológico Colombiano, 2017. Available: <https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadadas/Documents/volcanismo-lodo.pdf>
- [9] C. Aristizábal, A. Ferrari y C. Silva, “Control neotectónico del diapirismo de lodo en la región de Cartagena, Colombia,” *Ing. Investig. Desarro.*, vol. 8, no. 1, pp. 42–50, Jul. 2009. <http://dx.doi.org/10.19053/issn.1900-771X>
- [10] D. Barrero, A. Pardo, C. A. Vargas and J. F. Martínez, *Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal*, Btá, Co: Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2007.
- [11] C. H. Atencio and C. D. Mendoza, “Assessment geological, geotechnical and environmental phenomena of mud volcano in the colombian caribbean coast,” *Scientia et rofesion*, vol. 23, no. 1, pp. 104–111, Mar. 2018. [Online]. Available: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/16061/11551>
- [12] J. H. Carvajal, “Características de la erupción del volcán de lodo El Totumo,” Ingeominas, CTG, Bol, Co, *Tech. Rep.*, 2000.
- [13] W. Lowrie, *Fundamentals of Geophysics, 2 ed.*, C. U. Press, Ed., Camb., UK: Cambridge University Press, 2007.
- [14] K. Aki, “Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremors,” *Bull. Earthq. Res. Inst.*, vol. 35, pp. 415–456, Dec. 1957. Available: <http://oceanrep.geomar.de/id/eprint/43280>
- [15] B. Bettig et al., “Analysis of Dense Array Noise Measurement Using the Modified Spatial Autocorrelation Method (SPAC): Application to the Grenoble Area,” *Boll. Geofis Teor Appl*, vol. 42, no. 3-4, pp. 281–304, 2001. Available: http://www.risknat.org/projets/sismoalp/CD2/ArticlesPDF/Bettig&al_AnalysisDenseArray.pdf
- [16] H. C. E. Cadet, “Combined use of method based on ambient noise for seismic microzonation studies,” *Doctoral dissertation*, UUF, GNB, France. 2007. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00271292>
- [17] F. J. Chavez-Garcia, “Subsoil Structure Using SPAC Measurements along a Line,” *Bull. SSA*, vol. 96, no. 2, pp. 729–736, Apr. 2006. <https://doi.org/10.1785/0120050141>
- [18] C. F. L. Lozano, “Uso de registros de microtremores para la determinación de modelos de velocidad de ondas de corte y respuesta dinámica del suelo en la ciudad de cúcuta, Colombia,” *Master’s thesis*, Fac. Cienc, Dpt. Geocienc, Univ Nacl Colombia, Btá, Cund. Co, 2013, Available: <http://bdigital.unal.edu.co/12843/>
- [19] C. DeGroot-Hedlin and S. Constable, “Occam’s inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data,” *Geophysics*, vol. 55, no. 12, pp. 1613–1624, Dec. 1990. <https://doi.org/10.1190/1.1442813>
- [20] M. Wathelet, D. Jongmans and M. Ohrnberger, “Surface-wave inversion using a direct search algorithm and its application to ambient vibration measurements,” *Near Surf Geophys*, vol. 2, no. 4, pp. 211–221, Nov. 2004. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2004018>
- [21] H. Zeyen, M. Pessel, R. Hébert, D. Bartier, M. Sabin and S. Lallemant, “3D electrical resistivity imaging of the near-surface structure of mud-volcano vents,” *Tectonophysics*, vol. 509, no. 3-4, pp. 181–190, Aug. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.05.007>

ANEXOS

Tabla correspondiente a la norma Sismo-Resistente NSR-10.

TABLA A.1. CLASIFICACIÓN DE LOS PERFILES DE SUELO

Tipo de Perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	1500 m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s 760 m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante.	760 m/s 360 m/s
	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	50 100kPa (1KgF/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda cortante	360 m/s 180 m/s
	Perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	50 15 100kPa (1KgF/cm ²) 50kPa (0.5KgF/cm ²)
E	Perfil que cumpla con el criterio de velocidad de la onda cortante	180 m/s
	Perfil que contiene un espesor total mayor de 3 m de arcillas blandas	20 40% 50kPa (0.5KgF/cm ²)
F	<p>Los perfiles de suelo tipo requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento A.s.10. Se contemplan las siguientes subclases:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. • Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (>3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). • Arcillas de muy alta plasticidad (>7.5 m con índice de plasticidad 75). • Perfiles de gran espesor de arcillas con rigidez mediana a blanda (>36 m). 	

Fuente: Autores.

Alfredo Ghisays Ruiz es profesor investigador con formación en Física y Maestría en Geofísica de la Universidad Nacional (Colombia), y trabajos en el área de Ciencias de la Tierra, línea de Investigación en Geofísica de la Universidad del Atlántico (Barranquilla, Colombia).

Freddy H. Escobar recibió BSc (u. de América), MSc y PhD (Universidad de Oklahoma, USA) y estudios en Ingeniería de Petróleo. Su área de interés es transient pressure analysis.

Zoraya Martínez Lara es Geóloga de la Universidad Nacional (Medellín, Colombia) y especialista en Ingeniería Ambiental (UPB-Montería, Colombia), Magister en Geomorfología y Suelos de la Universidad Nacional (Medellín, Colombia). Actualmente trabaja como docente en pregrado y posgrado de la Universidad de Córdoba (Colombia). Los trabajos en investigación y extensión han sido desarrollados en la costa Caribe de Colombia, en el campo de la Geología aplicada y Geología ambiental como, Cartografía geológica y Geomorfológica, Hidrogeología, Hidrogeoquímica de suelos ácidos, acidez de drenaje en minería, riesgos geológicos.

Nelson Rangel Buitrago es profesor tiempo completo de Geología en la Universidad del Atlántico (Barranquilla, Colombia). Sus áreas de estudio son Geología, Geomorfología Antrópica y Oceanografía.

Carlos Lozano Lozano recibió el título de Ingeniero Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander (Cúcuta, Colombia) y Magister en Ciencias-Geofísica de la Universidad Nacional (Bogotá, Colombia). Sus intereses de investigación incluyen Ingeniería sísmica, Dinámica de suelos, Sismología y Geofísica. Es director de la División de Ingeniería de GEOSIS INGENIERIA SAS e investigador de la facultad de Ingeniería de la Universidad de Santander (Colombia).