

Tecnociencia, Vol. 28, N°1: 196-225

Enero-Junio 2026

ISSN L 2415-0940

Sísmica de microtremores aplicada a la caracterización del subsuelo en el Campus Harmodio Arias Madrid

Ambient Noise Seismology for Subsurface Characterization at the Harmodio Arias Madrid Campus

Mayubell Alvarado-Valdes

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. mayubell.alvarado-v@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0007-7017-956X>

Alberto Caballero

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Departamento de Física, Panamá. alberto.caballero@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-8502-8288>

Bairon Pérez Ruiz

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá. bairon-e.perez-r@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0005-3602-8632>

José Luis Álvarez

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá. jose.alvarez03@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0001-7208-8780>

David Quintero Ramírez

Universidad de Panamá, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ciencias de la Tierra, Panamá. david-a.quintero-r@up.ac.pa <https://orcid.org/0009-0009-6324-8066>

Humberto Edward

Universidad de Panamá, Centro Regional Universitario de Coclé, Coclé humberto.edwardh@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0002-2658-2892>

Juan Cedeño

Universidad de Panamá, Laboratorio de Hidrología, Isotópica y Geofísica Aplicada, Panamá. juan.cedenoc@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0001-7511-8175>

Arkin Tapia

Universidad de Panamá, Instituto de Geociencias, Panamá. arkin.tapiae@up.ac.pa <https://orcid.org/0000-0003-2355-4615>

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2025
Fecha de aceptación: 12 de noviembre de 2025

DOI: <https://doi.org/10.48204/j.tecno.v28n1.a8959>

RESUMEN

Se caracterizó el subsuelo somero del Campus Harmodio Arias Madrid (Ciudad de Panamá) mediante sísmica de microtremores (ReMi) para estimar la velocidad de onda de corte (Vs) y clasificar el tipo de suelo. Se ejecutaron seis perfiles con dos configuraciones: tendidos de 110 m (espaciamiento 10 m) y de 55 m (espaciamiento 5 m). La adquisición utilizó un sismógrafo multicanal DAQLink-III® (24 bits, 0–4 kHz) y geófonos verticales de 10 Hz, registrando 25 ventanas de 30 s por perfil con muestreo de 2 ms. El procesamiento en SeisOpt® ReMi™ (Vspect y Disper) incluyó preprocessamiento, construcción del espectro ρ -f, selección de la curva de dispersión y modelado iterativo por capas, con ajuste objetivo RMS < 10 m/s.

Los modelos 1D y mapas 2D (0–40 m) identifican tres unidades: (i) capa superficial blanda (rellenos/arcillas muy blandas), (ii) unidad intermedia arenoso-arcillosa y (iii) sustrato más competente (roca blanda/gravas). Las Vs promedio por perfil (\sim 242–307 m/s) clasifican el sitio como suelo tipo D (IBC). Espacialmente, noreste y noroeste son más rígidos; el sureste es más blando y el suroeste muestra compactación con la profundidad. La proximidad al drenaje del río Curundú incrementa la vulnerabilidad. ReMi demostró ser idónea en entornos urbanos para delimitar espesores y variaciones laterales de Vs, aportando insumos para evaluación sismorresistente y planificación geotécnica.

PALABRAS CLAVE

Microtremores, velocidad de onda de corte, suelos urbanos, evaluación geotécnica.

ABSTRACT

The shallow subsurface of the Harmodio Arias Madrid Campus (Panama City) was characterized using microtremor seismic (ReMi) to estimate shear-wave velocity (Vs) and classify soil type. Six profiles were carried out with two configurations: 110 m spread (10 m spacing) and 55 m spreads (5 m spacing). Data acquisition employed a DAQLink-III® multichannel seismograph (24 bits, 0–4 kHz) and 10 Hz vertical geophones, recording 25 windows of 30 s per profile with a 2 ms sampling rate. Processing in SeisOpt® ReMi™ (Vspect and Disper) included preprocessing, construction of the ρ -f spectrum, dispersion curve picking, and iterative layered modeling, with a target RMS misfit < 10 m/s.

The 1D models and 2D maps (0–40 m) identified three units: (i) a soft surface layer (fills/very soft clays), (ii) an intermediate sandy-clayey unit, and (iii) a more competent substratum (soft rock/gravels). Average Vs values per profile (\sim 242–307 m/s) classify the site as soil type D (IBC). Spatially, the northeast and northwest sectors are stiffer; the southeast is softer, and the southwest shows compaction with depth. Proximity to the Curundú River drainage increases site vulnerability. ReMi proved suitable in urban environments for delineating thicknesses and lateral variations of Vs, providing inputs for seismic-resistant evaluation and geotechnical planning.

KEYWORDS

Microtremors, shear wave velocity, urban soils, geotechnical assessment.

INTRODUCCIÓN

El conocimiento detallado de la constitución y comportamiento del terreno es un componente esencial en la planificación y ejecución de proyectos de ingeniería civil. La identificación de las características físicas y dinámicas del subsuelo no solo contribuye a evaluar la vulnerabilidad sísmica ante eventos de gran magnitud, sino que también respalda la toma de decisiones en planificación urbana y el diseño de estructuras en contextos de riesgo (Pulido Vásquez & Rodríguez Gutiérrez, 2015).

En entornos urbanos, el constante dinamismo de las actividades humanas genera un ruido sísmico ambiental dominado principalmente por ondas Rayleigh, lo que ofrece una oportunidad para el análisis espectral de ondas superficiales (Pinilla, 2012). Estas señales, generalmente consideradas indeseadas, se convierten en un recurso valioso para métodos de exploración geofísica que permiten caracterizar el subsuelo de manera no invasiva y a un costo relativamente bajo.

En este marco, la técnica de Refracción de Microtremores (ReMi), introducida por Louie (2001), se ha consolidado como una herramienta eficaz para estimar la velocidad de propagación de ondas de cizalla (V_s) en el subsuelo (Ortega Contreras & Pérez Pallares, 2020). Dichas velocidades poseen un alto valor geotécnico, ya que permiten caracterizar estratos con buena resolución vertical, incluso en escenarios complejos donde se presentan inversiones de velocidad (Granda Sanz et al., 2015; Ochoa Cornejo, 2007).

La versatilidad de ReMi se refleja en aplicaciones que abarcan desde la identificación de heterogeneidades laterales hasta la evaluación del potencial de licuefacción en suelos (Pancha et al., 2021). Además, su carácter no destructivo y el uso de equipos sísmicos convencionales facilitan su implementación en contextos donde los métodos invasivos resultan costosos o impracticables, como en áreas urbanas densamente construidas o en zonas de relleno (Rivera, Piedra, & Paripanca, 2016).

En este estudio se aplica la técnica ReMi para caracterizar las propiedades geotécnicas del subsuelo en el Campus Harmodio Arias Madrid de la Universidad de Panamá. El objetivo es identificar interfaces hasta la profundidad máxima investigada, clasificar las condiciones locales del terreno y aportar información geológica de valor en un área con escasos antecedentes.

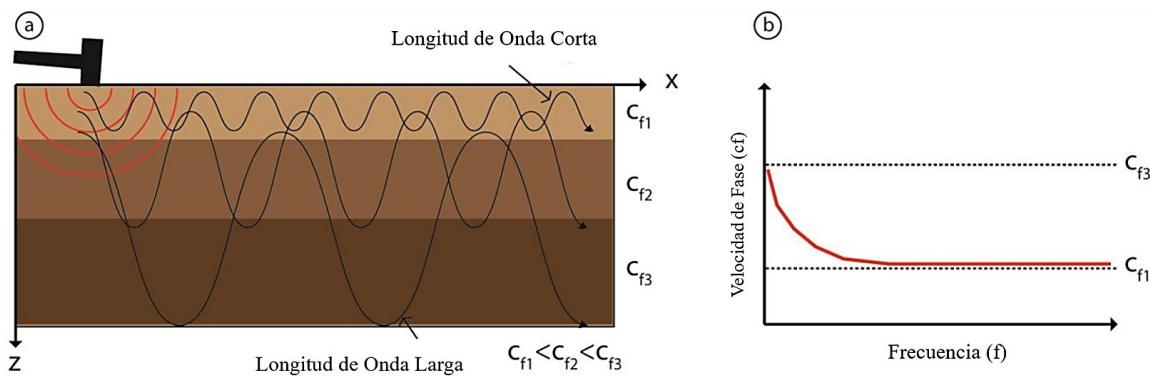
En síntesis, la sísmica de microtremores representa una herramienta robusta para la caracterización de suelos en contextos urbanos, respaldando la planificación de obras civiles y la gestión de riesgos (Rivas Lucero, 2016; Louie, 2021). Su capacidad para alcanzar profundidades de decenas de metros, junto con su enfoque no invasivo, la consolidan como una técnica clave en la geofísica aplicada y en el análisis geotécnico moderno (Granda Sanz et al., 2015; Louie, 2021).

Características de las Ondas Superficiales Rayleigh

En entornos urbanos, el ruido sísmico ambiental está dominado por ondas Rayleigh, que concentran la mayor parte de la energía registrada y presentan una atenuación más lenta que las ondas corporales (Granda Sanz et al., 2015). Estas ondas poseen propiedades que las hacen especialmente útiles para la caracterización del subsuelo, entre ellas la disminución exponencial de la amplitud con la profundidad, la relación inversa entre frecuencia y longitud de onda, y la variación de su velocidad en función de las propiedades elásticas de los estratos (Dobrin & Savit, 1999; Pérez Santisteban, 2012).

Figura 1.

a) Propagación y dispersión de ondas Rayleigh en medios heterogéneos. b) Curva de dispersión de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh (Adaptado de Pérez Cuevas, 2015).



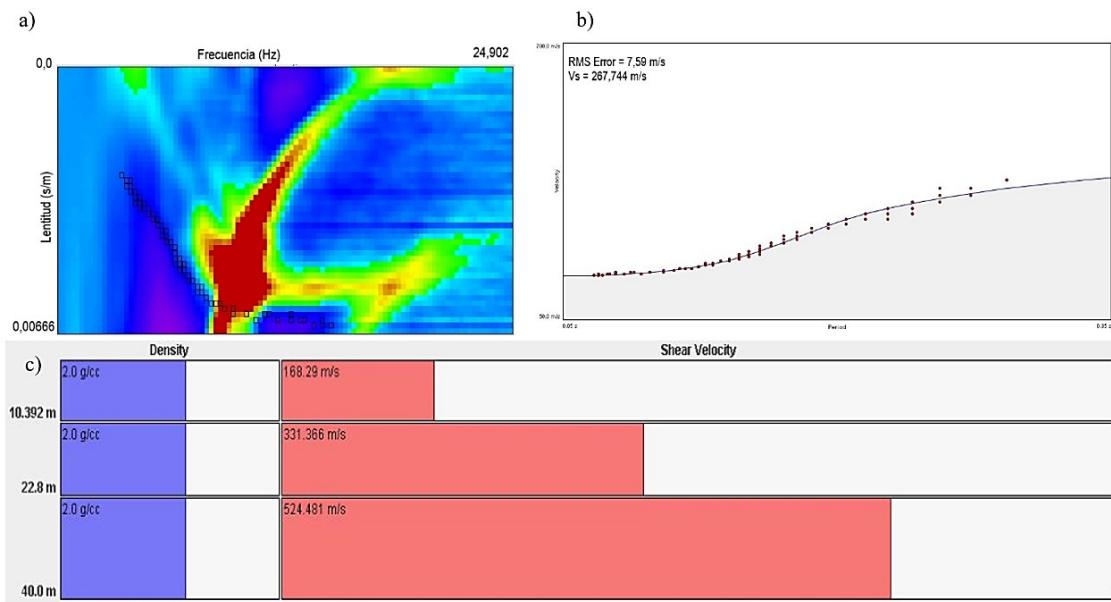
En medios estratificados, la propagación de ondas Rayleigh adquiere un carácter dispersivo, ya que la velocidad de fase depende de la frecuencia o de la longitud de onda. Las longitudes de onda más grandes penetran a mayores profundidades y son sensibles a las propiedades de capas profundas, mientras que las más cortas se limitan a describir las condiciones de los estratos superficiales (Xia et al., 1999). Este comportamiento dispersivo posibilita la construcción de curvas de dispersión que representan la variación de la velocidad de onda de corte (V_s) con la profundidad, constituyendo una herramienta esencial para la elaboración de perfiles sísmicos en terrenos heterogéneos (Khaheshi et al., 2010).

Curvas de Dispersión

La dispersión de las ondas Rayleigh permite analizar sus propiedades mediante un espectro de velocidad de fase en función de la frecuencia. Este espectro revela curvas características del suelo, proporcionando información clave sobre la distribución de las velocidades de onda de corte (V_s) según la profundidad (Fig. 2a).

Figura 2.

2a) El espectro de dispersión de ondas superficiales muestra la velocidad aparente (m/s) en función de la frecuencia (Hz), con una escala de colores que indica la intensidad de la energía. Los puntos seleccionados (picks) en el espectro definen la curva de dispersión. 2b) La inversión de la curva de dispersión muestra la variación de la velocidad de fase (m/s) en función del periodo (s), indicando el ajuste entre los datos experimentales y el modelo teórico. En el gráfico se presenta el error cuadrático medio (RMS) del ajuste y la velocidad promedio de onda de cortante (V_s) obtenida del modelo. 2c) Esquema estratigráfico del suelo hasta 40 m de profundidad.



Park et al. (1998) explican que las ondas Rayleigh se vuelven dispersivas cuando varían las propiedades del material cerca de la superficie, lo que altera su velocidad de propagación en función de la frecuencia. Además, Park et al. (1999) señalan que el suelo, al ser un medio atenuante, reduce la amplitud de estas ondas a medida que se alejan de su fuente, afectando su propagación.

A partir de los datos obtenidos, se genera un espectro p-f (velocidad de fase versus frecuencia), que facilita la construcción de una gráfica de periodos contra velocidad de fase de las ondas Rayleigh (Fig 2b)). Esta gráfica, según Lazcano (2007), permite obtener la curva de dispersión, con la cual se determinan los espesores de los estratos y las velocidades de onda de corte (V_s).

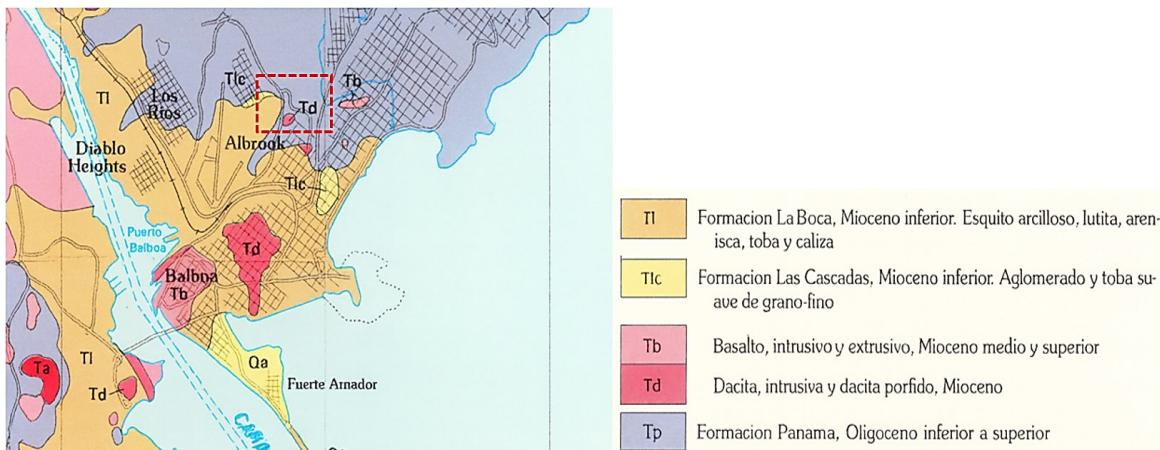
El análisis de dichas curvas de dispersión proporciona información clave sobre la variación de la velocidad de onda de corte en diferentes niveles del subsuelo (Fig. 2c)). Dado que la rigidez del suelo aumenta con la profundidad, las ondas de baja frecuencia permiten caracterizar los estratos más profundos, mientras que las de alta frecuencia describen las capas superficiales. En este contexto, el uso del criterio del período fundamental aplicado al espectro de velocidad de fase frente a frecuencia resulta esencial para estimar la profundidad de penetración asociada a cada par ordenado de la curva de dispersión.

CONTEXTO GEOLÓGICO

El campus se ubica en la región de Curundú, sobre el límite geológico que separa la Formación La Boca, compuesta por rocas sedimentarias del Mioceno inferior, y la Formación Panamá, en su facie volcánica del Oligoceno-Mioceno. En el área también afloran depósitos terciarios volcánicos y sedimentarios, conformados por tobas, ignimbritas y conglomerados.

Figura 3.

Esquema Geológico de la zona de estudio localizada dentro del recuadro rojo (Adaptado de “Mapa Geológico de la Zona del Canal” compilado por R.H. y J.L. Stewart, 1980).



Entre las unidades más relevantes se encuentran: la Formación La Boca, integrada por esquistos arcillosos, lutitas, areniscas y calizas; la Formación Las Cascadas, constituida por aglomerados y tobas suaves de grano fino; y la Formación Panamá, caracterizada por aglomerados andesíticos y depósitos volcánicos de corriente. Adicionalmente, se identifican cuerpos intrusivos y extrusivos de basalto y dacita (Fig. 3) (ETESA, 1999; URS Holdings, 2007).

La geología del sitio refleja un terreno previamente modificado con rellenos sobre manglares y pantanos, lo que alteró sus condiciones originales. Los suelos contienen altos porcentajes de arcillas principalmente montmorillonita e ilmenita junto con areniscas meteorizadas y limonitas. En general, predominan materiales de grano fino como arcillas, arenas arcillosas y cenagosas, caracterizados por su blandura y susceptibilidad a la intemperie (CAM.S.A., 1998).

Desde el punto de vista geomorfológico, el área corresponde a una terraza de inundación del río Curundú, bordeada por colinas volcánicas bajas como la del Campus Universitario Octavio Méndez Pereira y la Loma La Pava. El drenaje superficial, incluido el río Curundú, ha sido canalizado para reducir las inundaciones. En términos morfo-cronológicos, la actividad volcánica del Mioceno dio origen a la Formación Panamá, posteriormente modificada por procesos de meteorización, erosión, sedimentación y transgresiones marinas hasta el Holoceno. La zona, antes cubierta por manglares y ciénagas, fue transformada mediante rellenos antrópicos en sectores como Albrook y el Domo Universitario (CAPRA, 2015).

Finalmente, la Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Panamá clasifica estos suelos en las categorías 3 y 4, correspondientes a depósitos blandos limo-arcillosos y de relleno, lo que representa un factor crítico para la estabilidad y seguridad de futuras construcciones (CAPRA, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

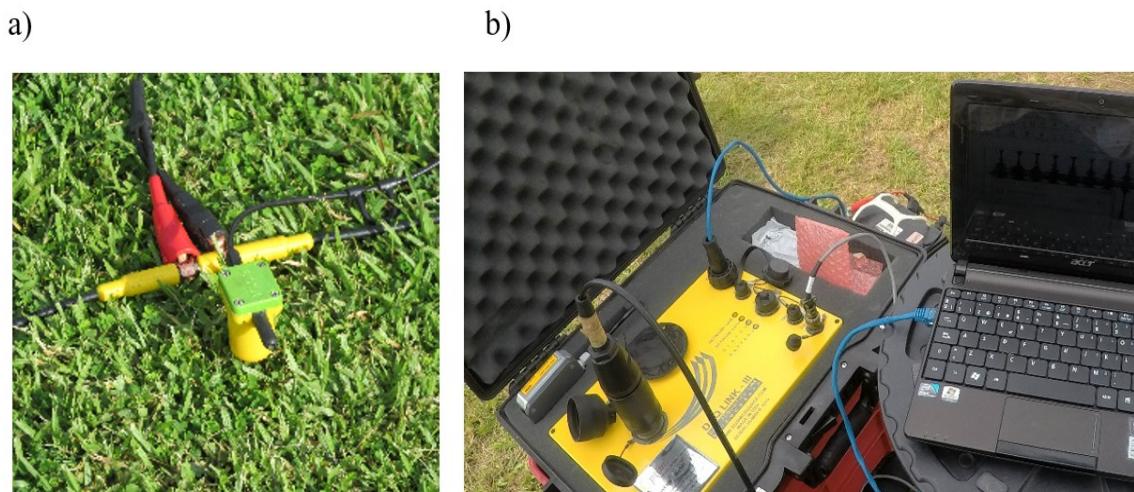
Descripción Técnica de la Instrumentación

Los geófonos son dispositivos que, en contacto directo con la superficie terrestre, convierten las oscilaciones sísmicas en señales eléctricas. En este estudio se emplearon geófonos con una frecuencia de resonancia de 10 Hz, los cuales registraron la componente vertical de la velocidad del movimiento del terreno (Fig. 4a). Para la adquisición de datos, se utilizó un cable sísmico multicanal que permite conectar hasta 12 geófonos con una separación máxima de 10 m, transmitiendo de manera eficiente la señal generada por cada dispositivo (Dobrin & Savit, 1999).

La información recolectada se procesó mediante un sismógrafo multicanal DAQLink-III®, equipado con una unidad de adquisición de 24 bits (144 dB). Este equipo es capaz de registrar entre 6 y 24 canales de manera simultánea, ofreciendo un ancho de banda operativo de 0 a 4 kHz (Fig. 4b). Estas características aseguran una adecuada resolución en la captura de las señales sísmicas, lo que resulta fundamental para la calidad y confiabilidad del análisis (Linares Montenegro, 2005).

Figura 4.

a) *Implantación de geófono en el terreno y conectado al cable sísmico. b) El sismógrafo (DAQLink-III®) registra las señales adquiridas.*



Descripción de los Perfiles

La disposición en campo consistió en seis perfiles, establecidos con separaciones de 10 m y 5 m, correspondientes a longitudes de 110 m y 55 m, respectivamente. Los perfiles fueron enumerados de acuerdo con la longitud del tendido, identificándose con la letra A para los trazos de 110 m (ejemplo: P1A) y con la letra B para los de 55 m (ejemplo: P1B). Los ensayos de muestreo se organizaron en una configuración lineal sobre la superficie, de los cuales cuatro perfiles se dispusieron de forma paralela a la cancha y dos de manera perpendicular a la misma (Fig. 5).

Figura 5.

Localización y disposición de los perfiles de ensayo sísmico en el Campus Harmodio Arias Madrid en coordenadas UTM 17P.

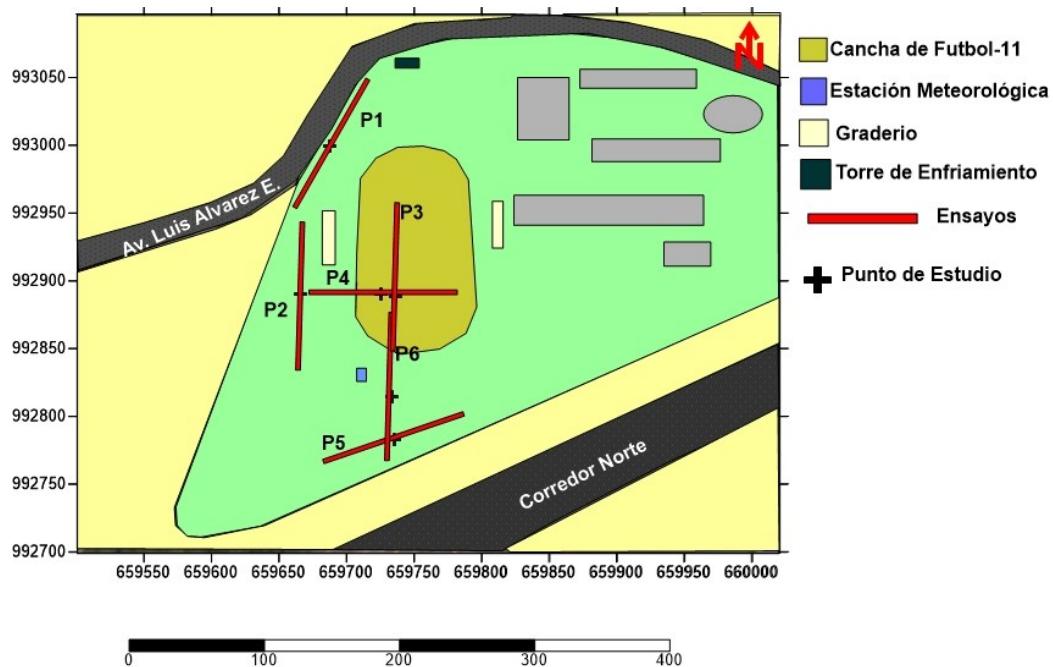


Tabla 1.

Nomenclaturas y orientación de perfiles.

Perfiles	Dirección	Ubicación
P1	Orientado de noroeste a sureste.	Cercano a Av. Luis Álvarez E
P2	Orientado de norte a sur.	Paralelo al límite del predio
P3	Orientado de oeste a este.	Centro del campo, sobre la cancha
P4	Orientado de norte a sur.	Cercano al graderío
P5	Orientado de noreste a suroeste.	Próximo al Corredor Norte
P6	Orientado de norte a sur.	Intersecando la cancha de fútbol

Técnicas de Recolección de Datos

El registro de la información se realizó mediante un sismógrafo, el cual digitaliza las ondas propagadas en el terreno, muestrea la señal en intervalos fijos y almacena los valores de amplitud en cada punto (Fig. 6). La resolución de los registros depende de dos factores principales: el rango dinámico, que expresa la relación entre las amplitudes máxima y mínima detectables, y la frecuencia de muestreo, que determina el número de puntos registrados por unidad de tiempo o distancia (Pérez Santisteban, 2012).

Figura 6.

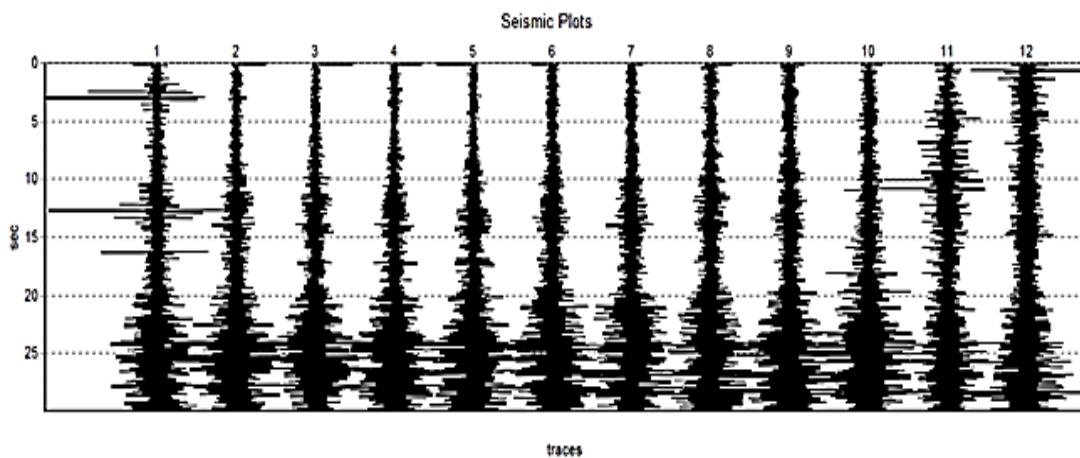
Montaje con geófonos y sismógrafo para registrar ondas para caracterizar el subsuelo (Adaptado de SEGOB, 2018).



Cada perfil incluyó 12 registros de 30 s con un muestreo de 2 ms (Louie, 2001), equivalente a 500 Hz de muestreo y un límite de 250 Hz según Nyquist (Pérez Santisteban, 2012).

Figura 7.

Registro de la traza sísmica almacenada en VibraScope® obtenida in situ en un arreglo de 12 sensores para una ventana de 30 segundos y un intervalo de muestreo de 2 ms.

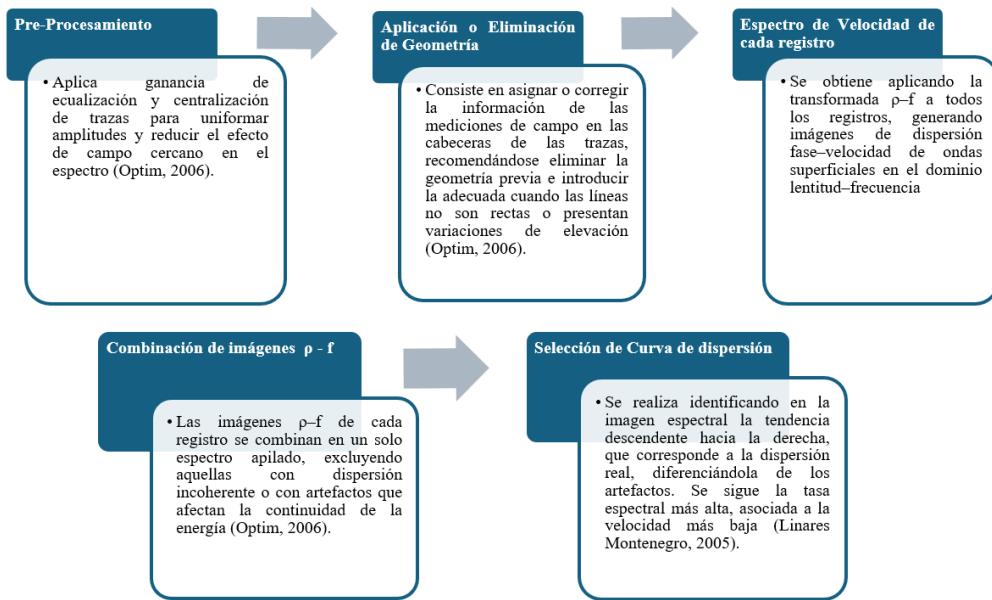


Procesamiento de Datos

La interpretación de los datos se realizó utilizando el programa SeisOpt® ReMi™, compuesto por dos módulos principales *ReMiVspect* y *ReMiDisper*.

Figura 8.

ReMiVspect convierte los registros sísmicos en un espectro de energía (frecuencia vs. lentitud de onda de cizalla), a partir del cual se seleccionan puntos para trazar la curva de dispersión.



La selección de puntos en el espectro $p-f$ se basó en la continuidad y coherencia de la energía, considerando solo máximos bien definidos y descartando picos aislados. En frecuencias altas (>10 Hz), se eligieron zonas con amplitud superior al 60 % del máximo, y la lentitud se verificó según la pendiente del espectro y la coherencia del gradiente de velocidades, asegurando una tendencia física consistente con la dispersión de las ondas Rayleigh.

Posteriormente, el segundo módulo, *ReMiDisper*, ajusta dicha curva mediante un proceso de modelado que considera la variación de parámetros como la profundidad y las velocidades de las ondas S en cada estrato del subsuelo (Linares, 2005).

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Tabla 2.

Resumen de los resultados de los modelos de profundidades de capas, Vs y Vs Promedio.

Separación entre geófono 10,0 m				
Capa 1				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1A	10,55	175,59	9,48	168,97
P2A	11,33	162,46		
P3A	10,40	170,77		
P4A	8,00	179,78		
P5A	6,20	156,94		
P6A	10,39	168,29		
Capa 2				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1A	12,07	317,12	12,06	293,56
P2A	12,67	363,28		
P3A	12,20	319,40		
P4A	10,00	219,24		
P5A	13,00	210,93		
P6A	12,41	331,37		
Capa 3				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1A	17,38	547,93	18,46	543,17
P2A	16,00	553,39		
P3A	17,40	519,13		
P4A	22,00	559,78		
P5A	20,80	554,29		
P6A	17,20	524,48		

Figura 9.

La curva de dispersión del PIA, tiene una velocidad promedio de 270, 929 m/s y el tipo de suelo es D.

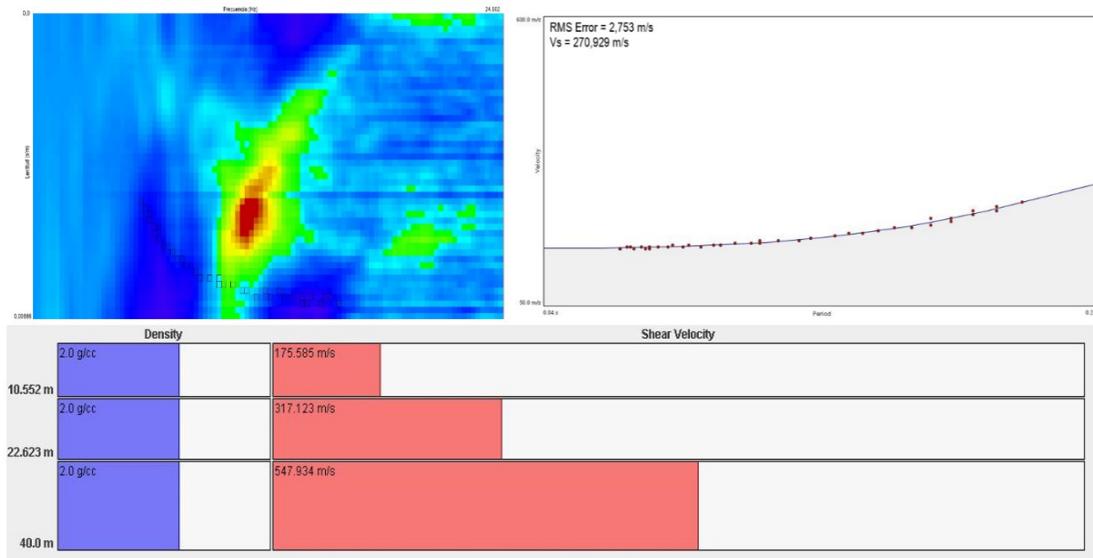


Figura 10.

La curva de dispersión del perfil 2A, tiene una velocidad promedio de 262,003 m/s y el tipo de suelo para este perfil es D.

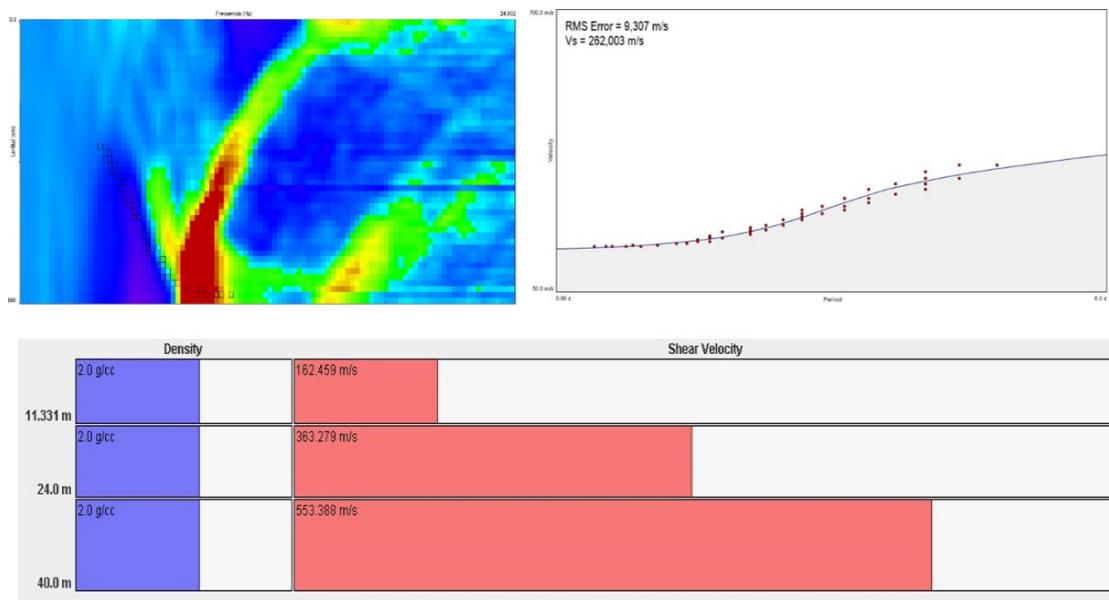


Figura 11.

La curva de dispersión del P3A tiene una velocidad promedio de 266,71 m/s y tipo de suelo D.

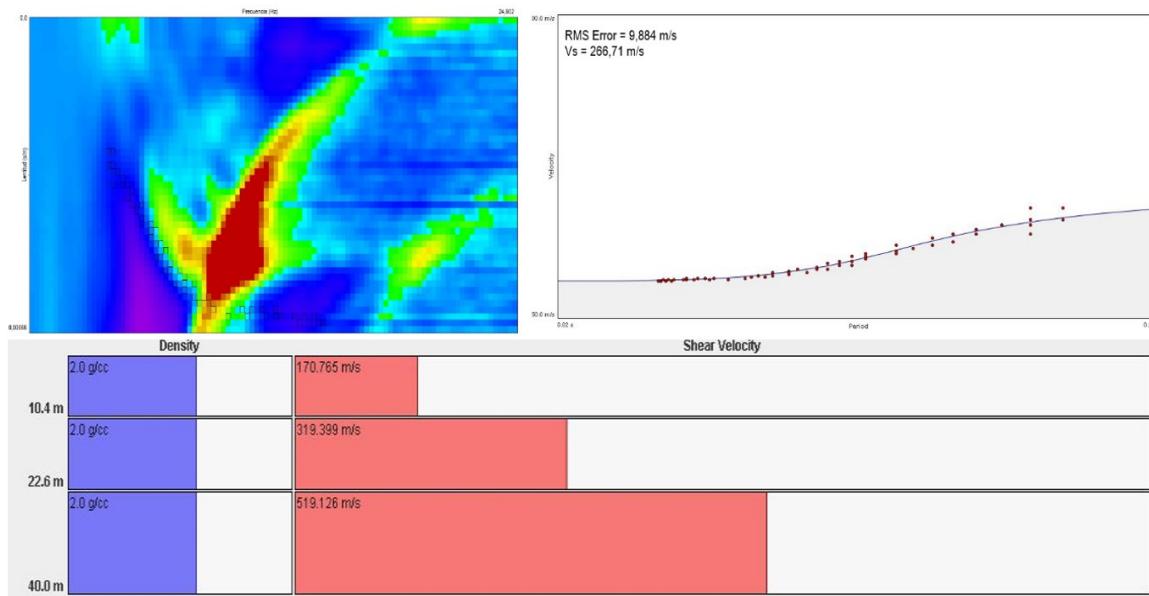


Figura 12.

La curva de dispersión del P4A posee una velocidad promedio (V_s) de 271, 153 y tipo de suelo D.

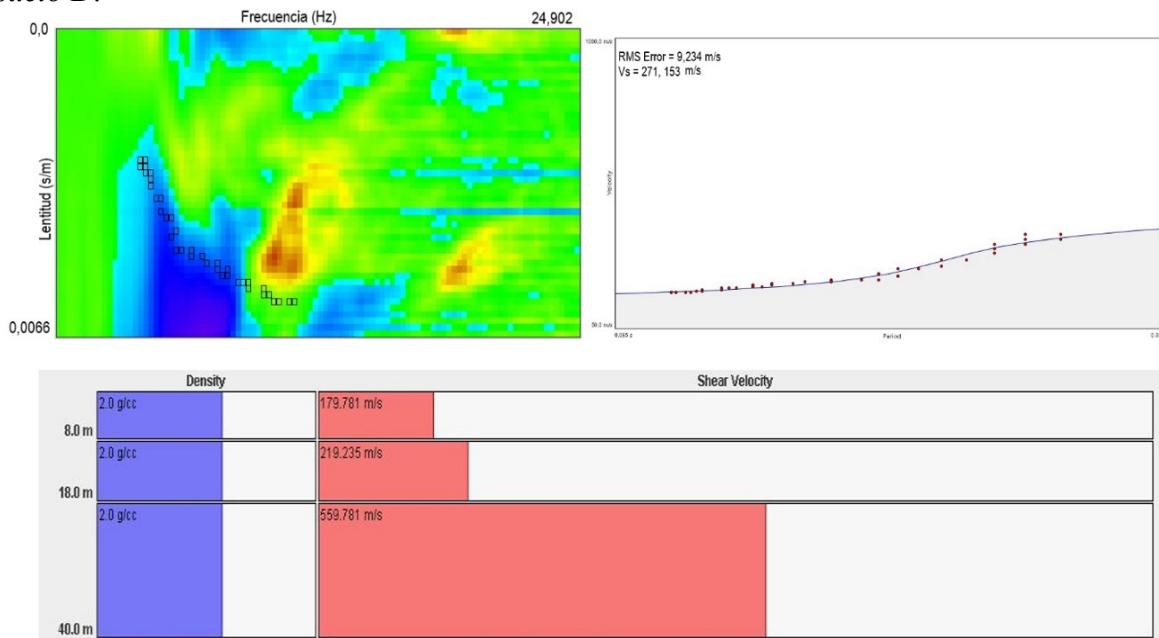


Figura 13.

La curva de dispersión de P5A tiene una velocidad promedio de 242,123 m/s y tipo de suelo D.

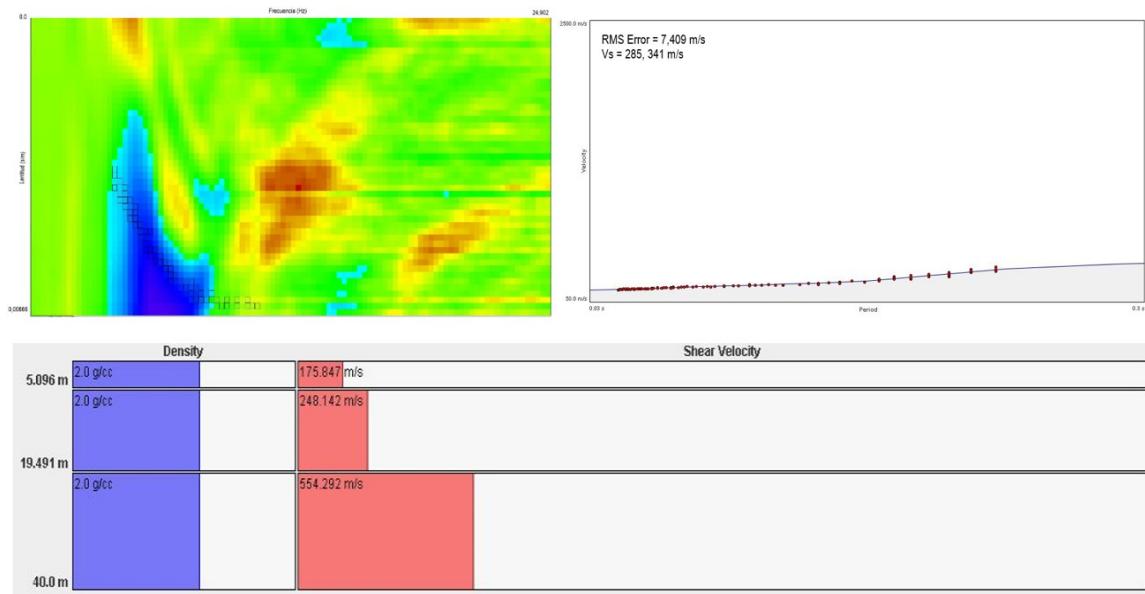


Figura 14.

La curva de dispersión del P6A tiene una velocidad promedio Vs de 267,744 m/s y tipo de suelo D.

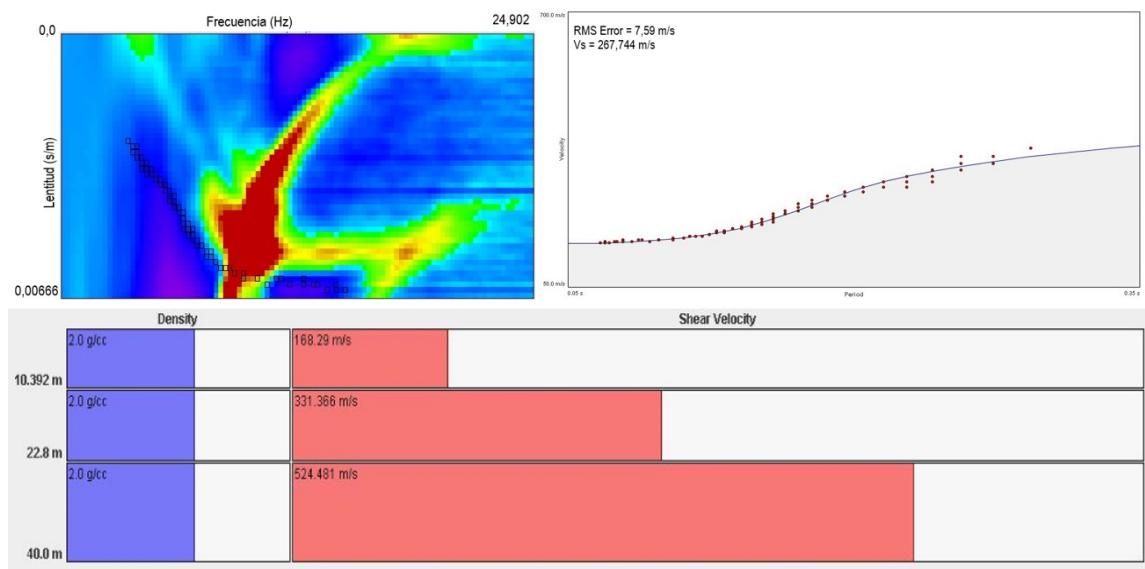


Tabla 3.

Resumen de los resultados de los modelos de profundidades de capas, Vs y Vs Promedio.

Separación entre geófono 5,0 m				
Capa 1				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1B	6,79	166,11	8,51	170,67
P2B	9,78	158,31		
P3B	11,40	179,78		
P4B	9,20	184,97		
P5B	5,10	175,85		
P6B	8,80	159,02		
Capa 2				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1B	10,92	328,47	11,49	272,42
P2B	10,42	280,27		
P3B	10,60	253,50		
P4B	10,80	206,28		
P5B	14,40	248,14		
P6B	11,80	317,87		
Capa 3				
Perfiles	Espesor (m)	Vs (m/s)	Espesor Promedio (m)	Vs Promedio (m/s)
P1B	22,29	509,78	20,00	518,33
P2B	19,80	446,28		
P3B	18,00	510,98		
P4B	20,00	506,01		
P5B	20,51	554,29		
P6B	19,40	582,62		

Figura 15.

La curva de dispersión del P1B tiene una velocidad promedio de 307,3 m/s, el tipo de suelo que corresponde a D.

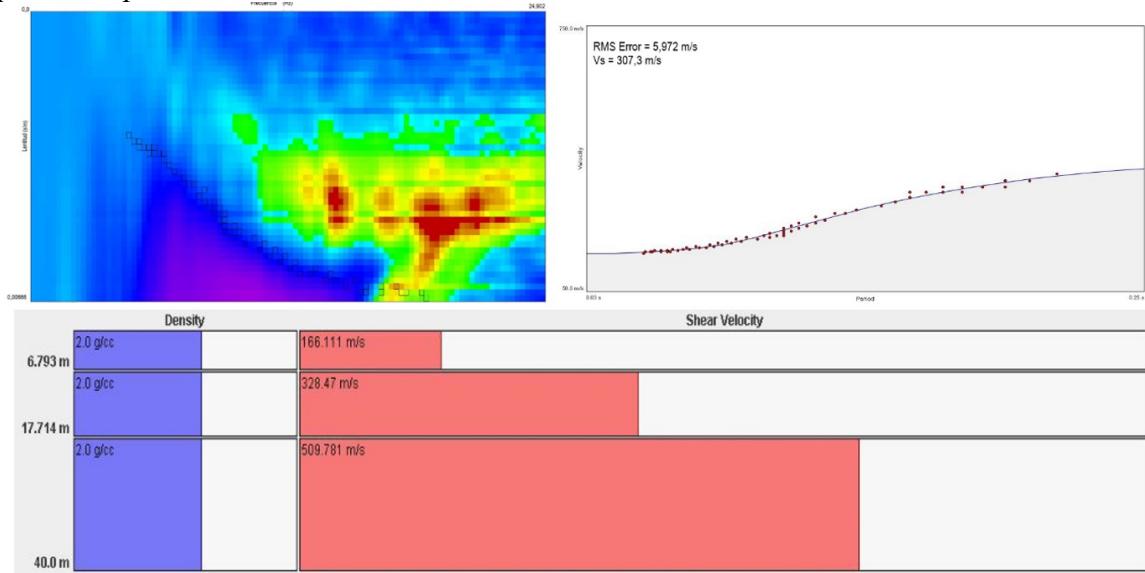


Figura 16.

La curva de dispersión del P2B posee valor de velocidad promedio de 249,85 m/s y el tipo de suelo es D.

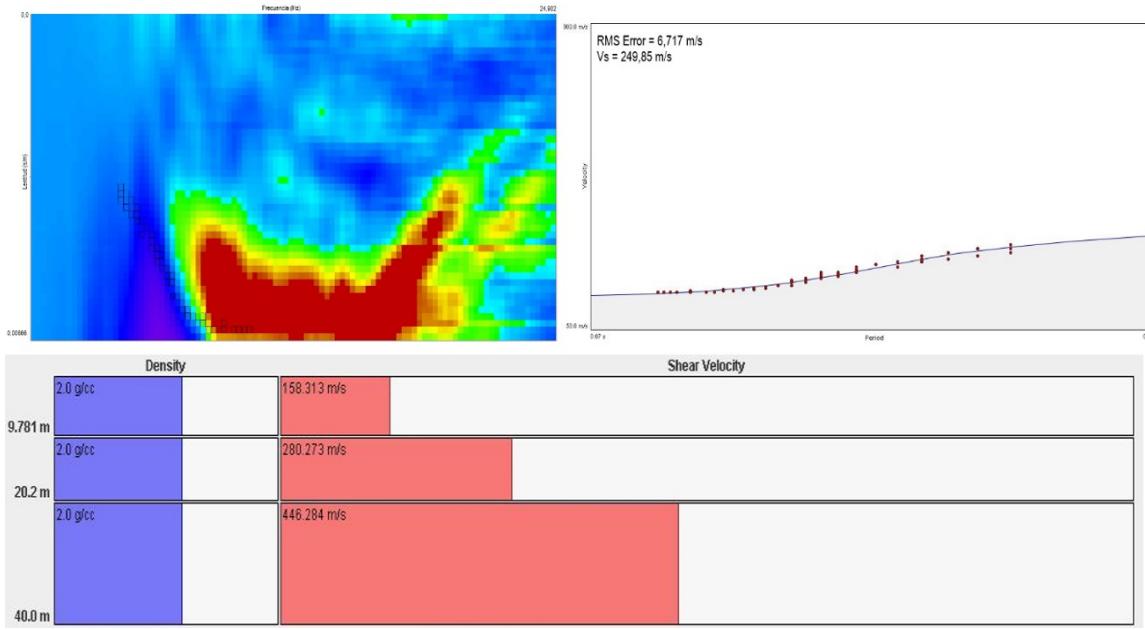


Figura 17.

La curva de dispersión del P3B tiene una velocidad promedio de 250,197 m/s, con un tipo de suelo D.

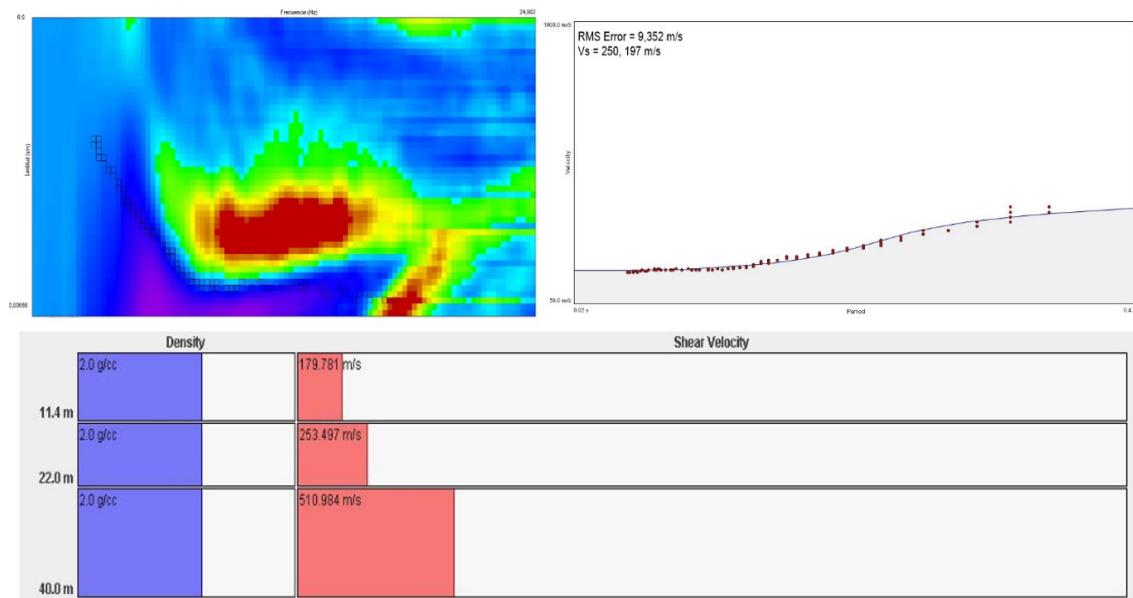


Figura 18.

La curva de dispersión para P4B presenta una velocidad promedio de 248,201 m/s y tipo de suelo D.

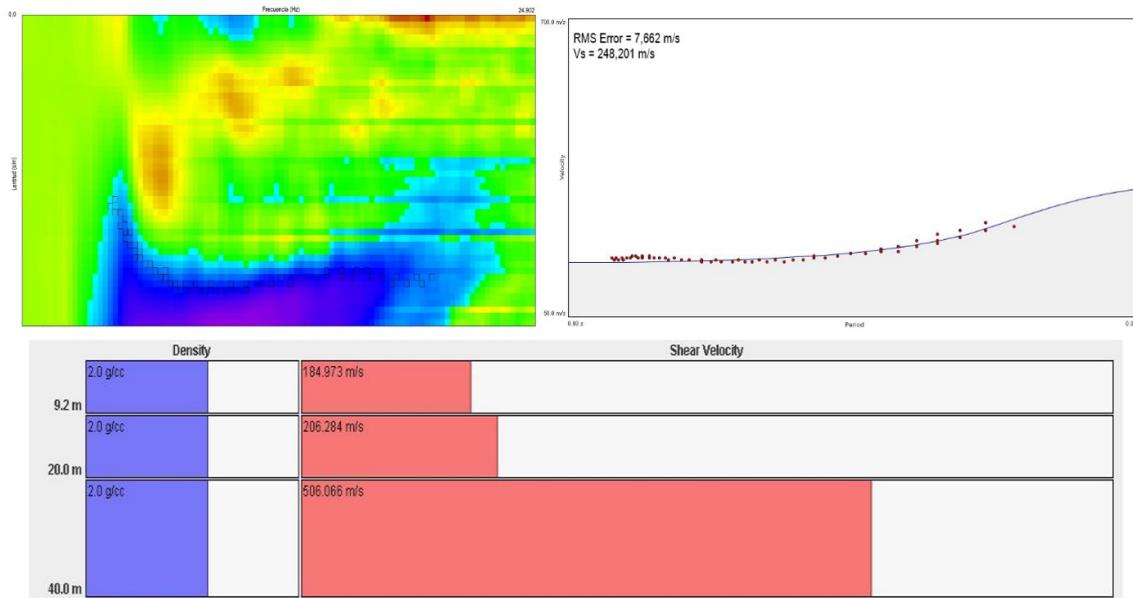


Figura 19.

La curva de dispersión P5B tiene una velocidad promedio 285,341 m/s, con tipo de suelo D.

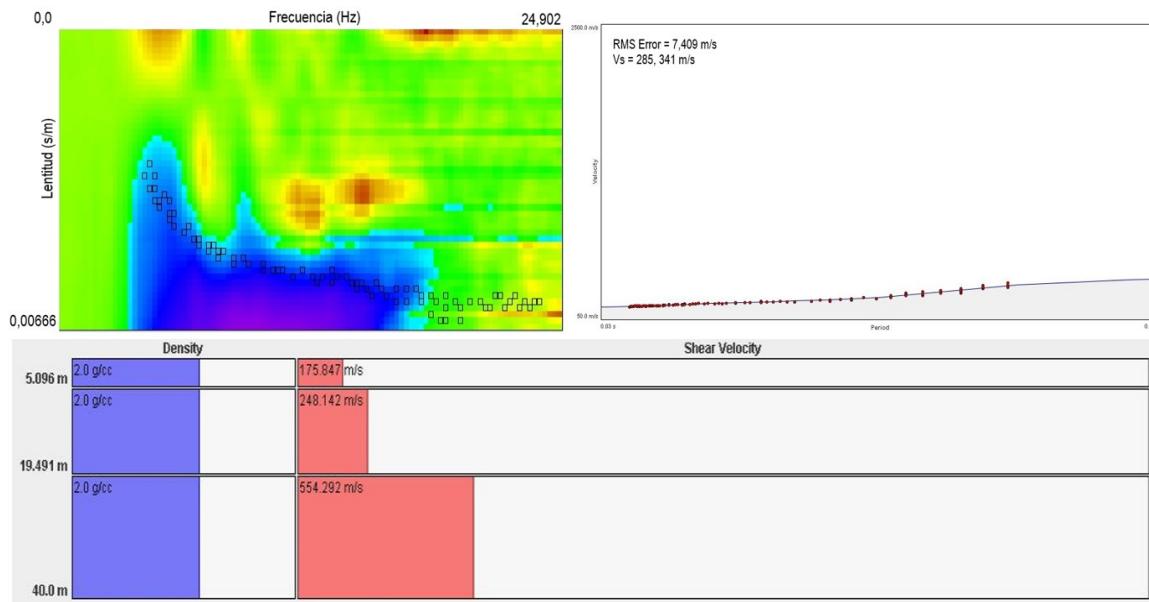


Figura 20.

La curva de dispersión del P6B posee una velocidad promedio Vs corresponde a 278,552 m/s y el tipo de suelo es D.

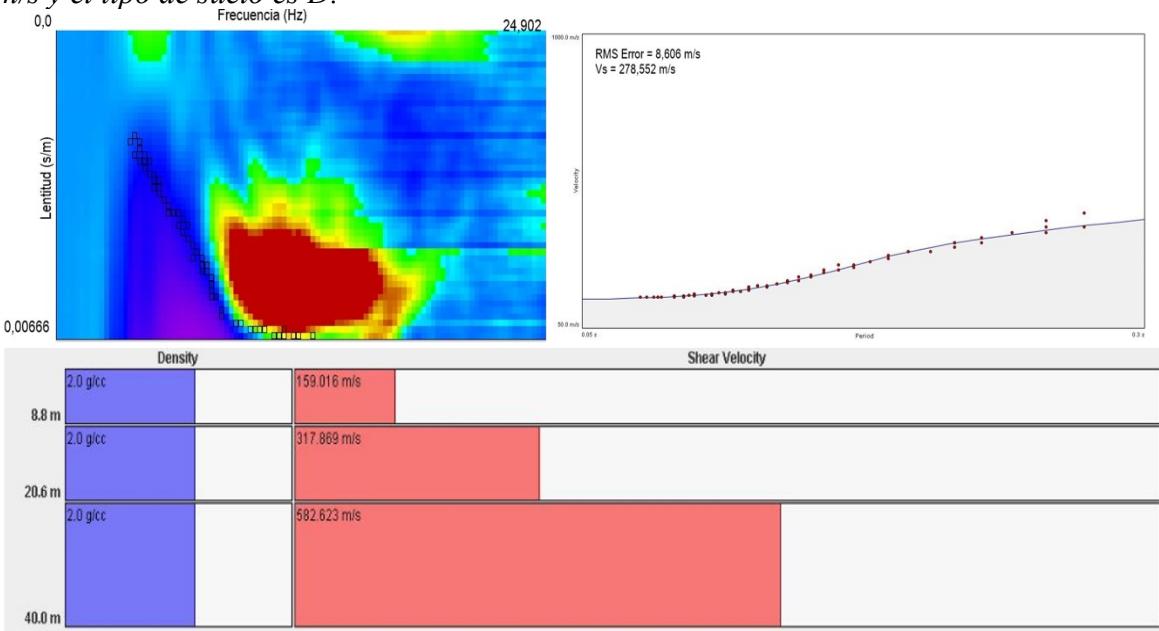


Figura 21.

En la primera capa, los materiales más blandos se concentran en el sur y sureste (P5, P6) y parte del noroeste (P1), mientras que los materiales relativamente más compactos y rígidos se localizan en el centro-norte y noreste (P3, P4 y cercanías de edificaciones).

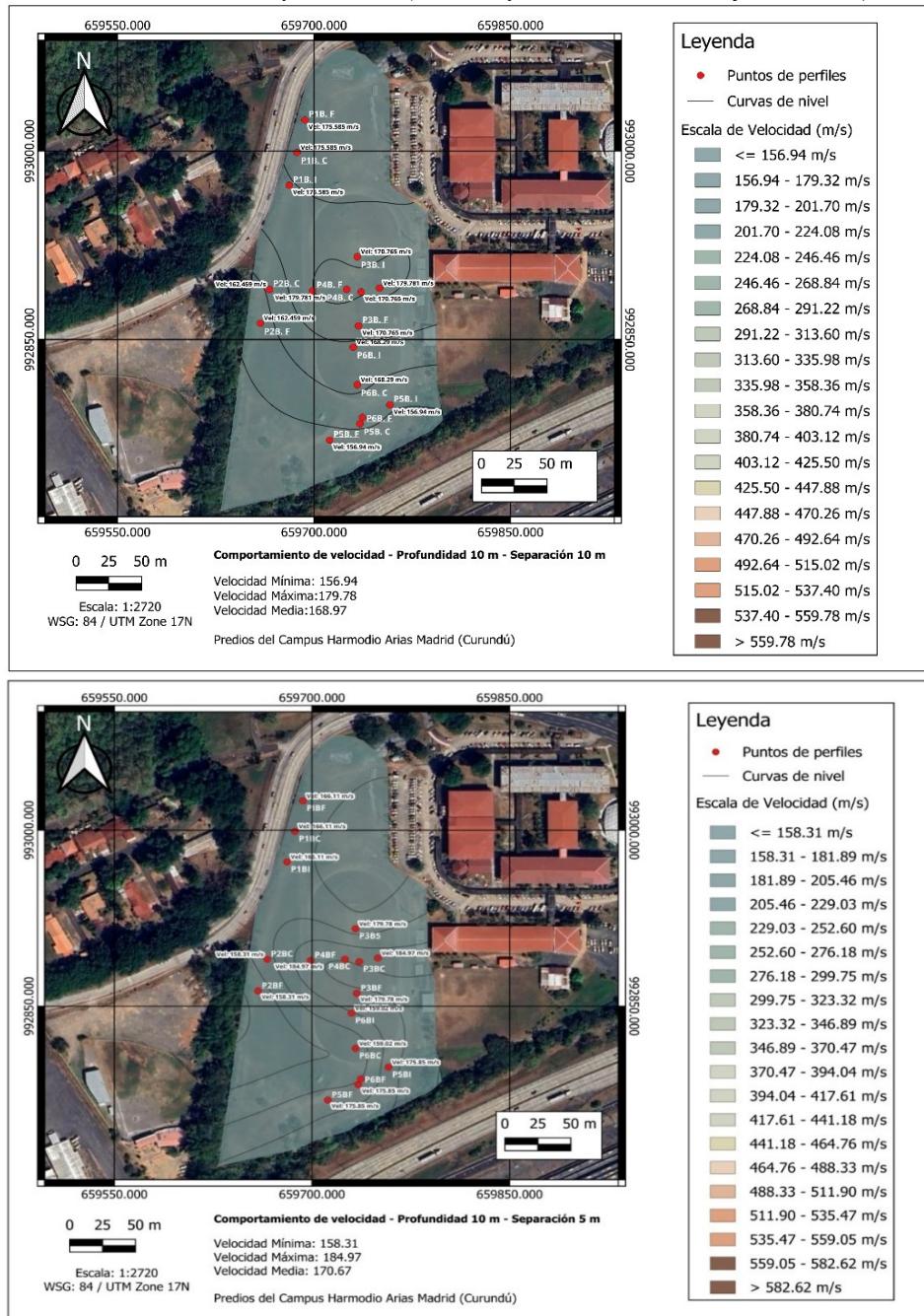


Figura 22.

En la capa de 10–20 m de profundidad, el sur y suroeste del campo (P5 y P6) continúan siendo más blandos y vulnerables, mientras que el norte y noreste (P1 y P2) presentan materiales más rígidos y compactos, indicando un mejor comportamiento geotécnico.

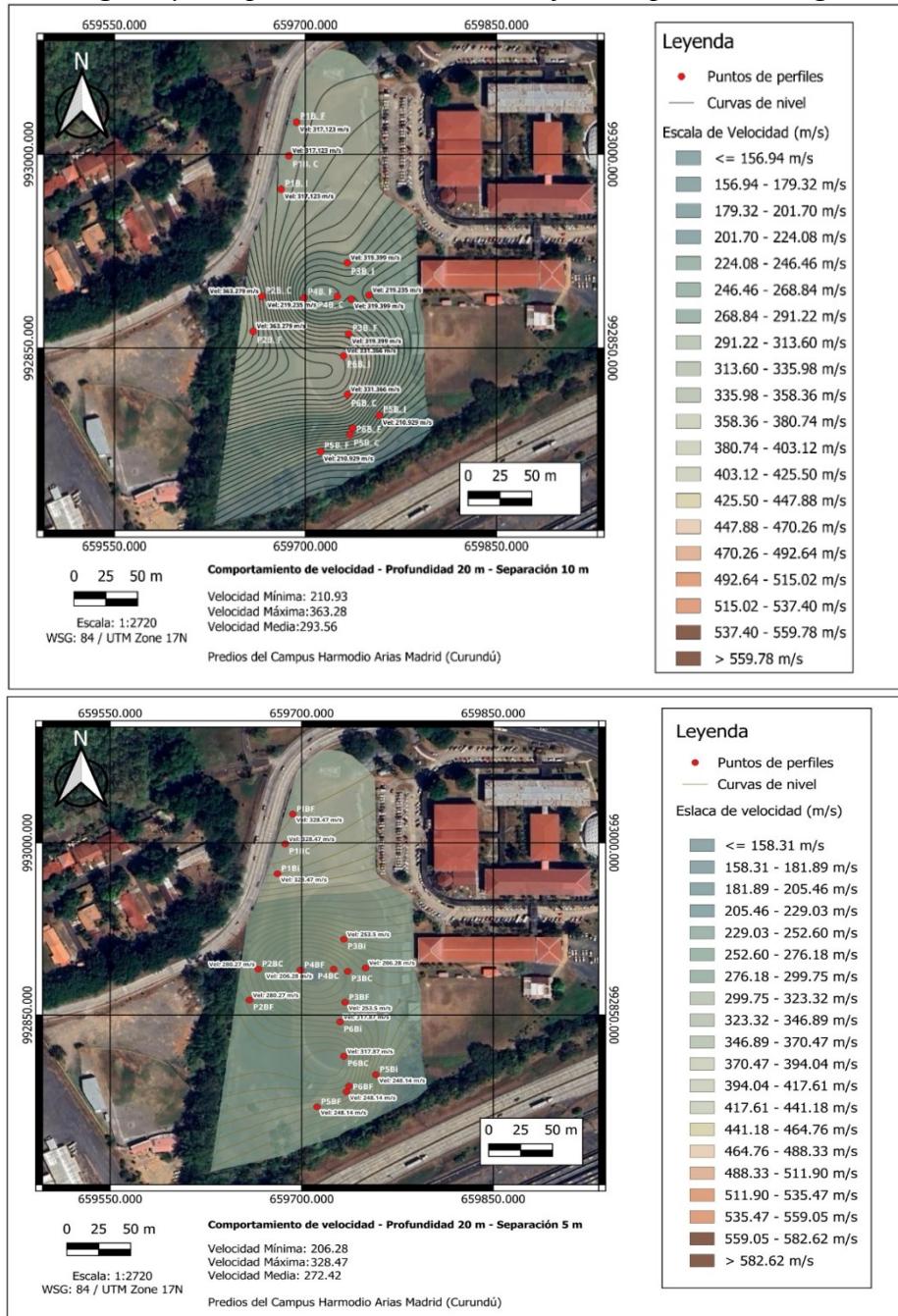


Figura 23.

El sur y sureste del campo (P5, P6) concentran los materiales más rígidos y compactos, actuando como el sustrato más competente del área. El centro (P3, P4) muestra rigidez intermedia, mientras que el noroeste (P1, P2) sigue siendo comparativamente menos compacto, reflejando mayor vulnerabilidad geotécnica por su relación con rellenos y drenajes. En la capa 3, ambas configuraciones coinciden en la tendencia general: el sur-sureste es el más rígido, el centro intermedio y el noroeste más blando. La diferencia es que el arreglo de 5 m resalta variaciones locales más extremas (máximos en el sur, mínimos en el noroeste), mientras que el de 10 m suaviza los contrastes y da un promedio más estable.

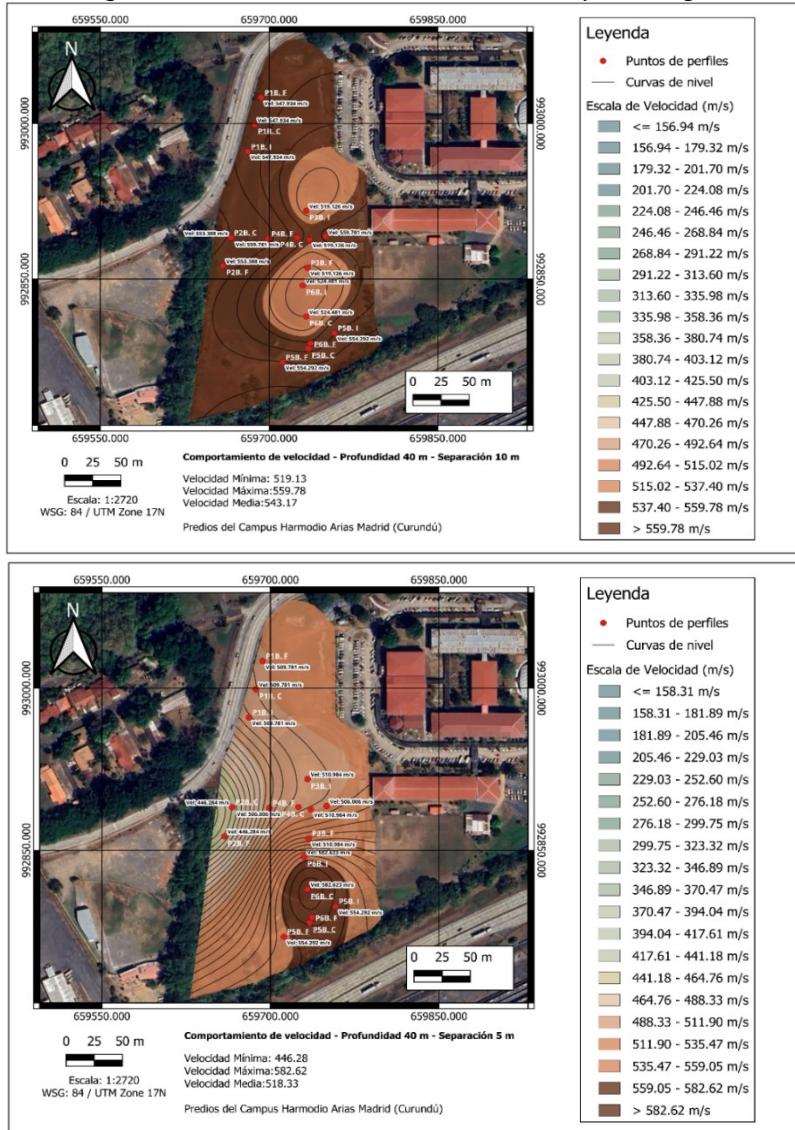
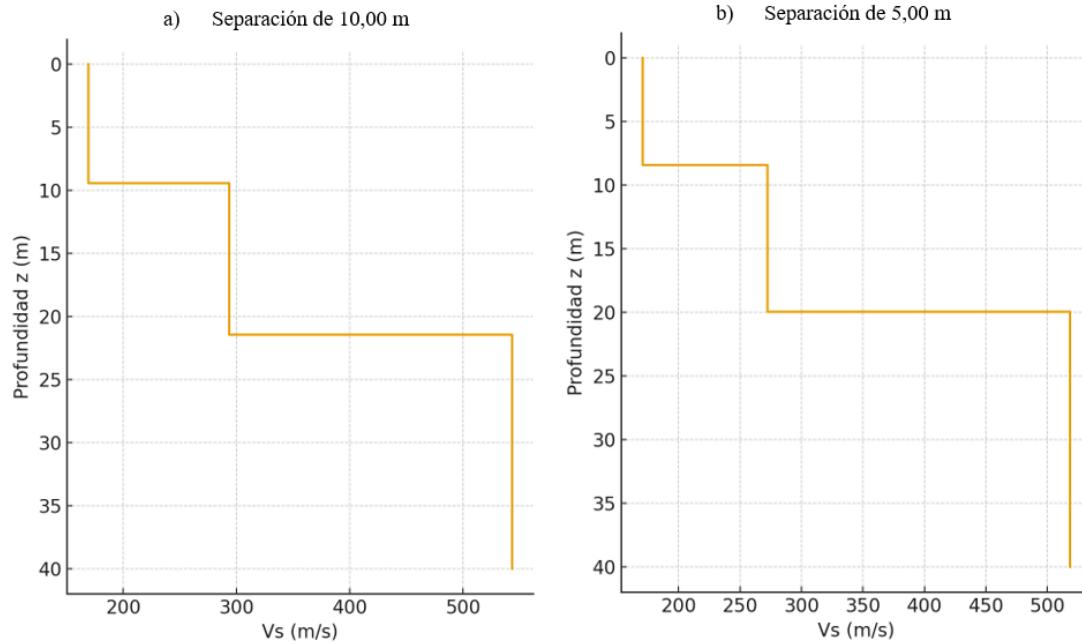


Figura 24.

Comparación de modelos de velocidad V_s en función de la profundidad obtenidos con separaciones de 10 m y 5 m.



La comparación de los modelos V_s obtenidos con separaciones de 10 m (P1A–P6A, longitud 110 m) y 5 m (P1B–P6B, longitud 55 m) permite evaluar la consistencia de los resultados y la influencia de la geometría del arreglo en la resolución del subsuelo.

Los espectros de dispersión de ondas superficiales evidencian una tendencia clara, con la energía concentrada entre 10 y 20 Hz y velocidades de 150 a 350 m/s, lo que corresponde a un estrato superficial de baja rigidez. A frecuencias menores (<10 Hz), la velocidad supera los 500 m/s, lo que indica la presencia de materiales más compactos y competentes en profundidad.

En la Capa 1, los espesores promedios son de 9,48 m para los perfiles a 10 m y 8,51 m para los perfiles a 5 m, con velocidades promedio de 168,97 m/s y 170,67 m/s, respectivamente. Estos valores son muy cercanos y reflejan una buena correspondencia entre ambas configuraciones, aunque los perfiles a 5 m tienden a mostrar mayor variabilidad local debido a la mejor resolución espacial.

En la Capa 2, se observa una ligera diferencia: el espesor promedio de los perfiles a 10 m es 12,06 m con $V_s \approx 293,56$ m/s, mientras que en los perfiles a 5 m el espesor promedio es 11,49

m con $V_s \approx 272,42$ m/s. Esto sugiere que el arreglo más cerrado capta una transición algo más gradual entre la segunda y tercera capa, reduciendo el valor medio de velocidad.

En la Capa 3, las diferencias son mínimas. El espesor promedio es 18,46 m con $V_s \approx 543,17$ m/s para los perfiles a 10 m, y 20,00 m con $V_s \approx 518,33$ m/s para los perfiles a 5 m. La correspondencia es consistente, aunque en algunos perfiles (por ejemplo, P6B) el arreglo de 5 m evidencia valores de V_s más elevados (hasta $\approx 582,62$ m/s), lo que refleja mayor sensibilidad a contrastes locales en profundidad.

En conjunto, ambos conjuntos de perfiles muestran una buena coherencia en la identificación de las tres capas principales, con variaciones atribuibles a la diferencia en la longitud y espaciamiento del arreglo. Los perfiles de 10 m (110 m de longitud total) permiten una mayor penetración y estabilidad en las velocidades promedio, mientras que los de 5 m (55 m de longitud total) ofrecen una resolución más detallada de variaciones locales. Esta comparación refuerza la validez de los resultados y confirma que el modelo de tres capas obtenido es robusto frente a cambios en la configuración de adquisición.

Tabla 4.

Velocidades promedio V_s para cada capa, su clasificación de tipo de suelo y material (ASCE, 2017).

Capa	Velocidad Promedio V_s (m/s)	Tipo de Suelo	Material
1	157 – 186	Suelo Blando	Relleno suelto, arcillas muy blandas y relleno antrópico.
2	210 – 370	Suelo Arenoso y Arcilloso	Arenas de consistentes, arcilla arenosa y arcilla sedimentaria.
3	480 – 585	Suelo Pedregoso	Roca blanda sedimentaria ígnea, arenisca, esquistos y gravilla.

Este estudio clasifica el suelo del área de investigación como tipo D según la norma IBC, con una velocidad promedio de 269,91 m/s. Esta categoría corresponde a depósitos de suelos blandos, definidos por velocidades de onda de corte (V_s) en el rango de 180 a 360 m/s. Esta condición concuerda con estudios previos en la ciudad de Panamá (Batista, 2016; CAPRA, 2015) y resalta la vulnerabilidad de la zona frente a eventos sísmicos, especialmente por la influencia de los rellenos antrópicos y la proximidad al drenaje del río Curundú.

La comparación entre los arreglos de 5 m y 10 m evidenció la robustez del modelo, al mismo tiempo que destacó la capacidad del arreglo corto para identificar variaciones locales y del arreglo largo para ofrecer estabilidad en los valores promedio. No obstante, se reconoce como limitación la profundidad investigada de 40 m, suficiente para la estimación del V_{s30} pero insuficiente para definir con precisión el comportamiento de estratos más profundos que podrían incidir en la respuesta sísmica regional.

En consecuencia, los resultados obtenidos constituyen un aporte relevante para la microzonificación sísmica del campus y representan una base técnica que puede ser fortalecida en investigaciones futuras mediante la integración de otros métodos no invasivos, como MASW o H/V, a fin de consolidar un marco geotécnico más completo que respalde el diseño de infraestructuras resilientes y la gestión del riesgo en entornos urbanos.

CONCLUSIONES

El análisis comparativo de los perfiles con separaciones de 10 m y 5 m confirma la existencia de un modelo de tres capas bien definido. Los estratos superficiales presentan velocidades bajas (≈ 170 m/s), seguidos por una capa intermedia de transición y una base rígida con valores superiores a 500 m/s. Ambos arreglos muestran resultados consistentes: el de 10 m ofrece mayor estabilidad en los valores promedio, mientras que el de 5 m resulta más sensible a variaciones locales. En conjunto, el suelo se clasifica como tipo D según la norma IBC, con una velocidad promedio de 269,91 m/s, lo que evidencia la presencia de depósitos de suelos blandos en el área de estudio.

El montaje experimental, sencillo y práctico, resultó adecuado para las condiciones del área de estudio, favoreciendo la cobertura de grandes extensiones y disminuyendo la incertidumbre geológica entre sondeos puntuales. Los registros adquiridos, con intervalos de muestreo largos y repetidos, garantizaron una alta resolución espectral. La disposición de arreglos de 110 m y 55 m, con separaciones de geófonos de 10 m y 5 m respectivamente, permitió alcanzar una profundidad de exploración de hasta 40 m, identificando con claridad las tres capas principales.

Se comprobó que la selección de puntos en la curva de dispersión influye directamente en la precisión del ajuste: una mayor densidad de puntos reduce el error, mientras que una menor densidad lo incrementa significativamente.

Los valores de Vs obtenidos (200–300 m/s en promedio) clasifican el terreno como suelo tipo D, asociado a rellenos antrópicos, depósitos aluviales y suelos finos blandos y arenosos. En detalle, la primera capa (\approx 170 m/s) corresponde a relleno superficial; la segunda capa (\approx 280 m/s) se asocia a arcillas; y la tercera capa (\approx 585 m/s) se vincula a roca blanda.

Finalmente, se resalta que el sector oeste del área de estudio presenta mayor vulnerabilidad geotécnica, al encontrarse adyacente al drenaje del río Curundú, condición que lo hace más susceptible a efectos dinámicos y de inestabilidad del terreno.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Laboratorio de Hidrología, Isotópica y Geofísica Aplicada por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo, facilitando el acceso a sus instalaciones, equipos y recursos técnicos. Su contribución fue fundamental para la realización de las mediciones, el procesamiento de datos y la obtención de resultados confiables, lo que permitió cumplir de manera satisfactoria con los objetivos de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Civil Engineers (ASCE). Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE/SEI 7-16). Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2017. Sección 20.3, “Site Classification Procedure for Seismic Design”, Tabla 20.3-1.
- Aponte González, J. (2011). Tesis de Maestría "*Evaluación de Métodos No Convencionales de Caracterización Geotécnica*". Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Batista, L. (2016). Tesis de Grado "*Estudio de las ondas superficiales para caracterización del terreno en zonas urbanas, mediante la sísmica de microtremores (ReMi)*". Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología, Universidad de Panamá, Panamá, Panamá.
- CAPRA. (marzo de 2015). *Modelación probabilista de riesgo sísmico para la ciudad de Panamá*. Portafolios de Educación y Salud. Panamá.
- Dobrin, M. B. y Savit, C. H. (1999). *Introduction to Geophysical Prospecting*. Estados Unidos de América: 4th Edición, Mc GRAW-HILL.

Escalona Medina, A. K. (2016). *Determinación de la Vs30 a través del cálculo de razón espectral H/V* [Proyecto de título, Universidad del Bío-Bío]. Universidad del Bío-Bío.

Granda Sanz, A., Granda París, T. y Madrid Contreras, A. (2005). *El método de la Sísmica Pasiva: una herramienta fiable para la caracterización geotécnica del terreno en zonas urbanas*. International Geophysical Technology, 78-84.

Jaimes Villamizar, J. D. (2011). Tesis de Grado "Métodos Geofísicos Aplicados a la Caracterización de Suelos: Estado del Arte". Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander.

Keller, G. (1986). *An Introduction to Geophysical Exploration*. Transactions American Geophysical Union.

Khaheshi, B., Kasgin y Dariush M. (2010). *On the Efficiency of the Multi-Channel Analysis of Surface Wave Method for Shallow and Semideep Loose Soil Layers*. Ottawa, Canada.

Lazcano, S. (2007). *Caracterización de suelos arenosos mediante análisis de ondas de superficie*. México, pp. 1-28.

Lermo Samaniego, J. y Limaymanta Mendoza, F. M. (2007). *Uso de las funciones de transferencia empíricas (HVNR) obtenidas con microtremores para construir mapas con la clasificación de los terrenos de cimentación para diseño sísmico*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica.

Linares Montenegro, G. M. (2005). Trabajo de Grado "Introducción y Aplicación del Método de Sísmica de Microtremores en Áreas Urbanas". Sartenejas, Venezuela: Universidad Simón Bolívar.

Louie, J. (2001). *Faster,better:Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays*. Bulletin of the Seismological Society of America, 347-364.

Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of Geophysics*. New York: Cambridge University Press.

Muñoz Martín A. y Carbó Gorosabel A. (2006). *Resultados y experiencias de aplicación del método de Refracción por Microtremor (Sísmica Pasiva) para la investigación geofísica de las nuevas líneas de metro en Madrid (España)*. GEOGACETA, 40.

Ochoa Cornejo, F. (2007). *Caracterización Geotécnica a través del uso de ondas Rayleigh*. Chile.

Oliveras Cisternas, F. A. (2024). *Avances en la definición de indicadores de incertidumbre en el cálculo del Vs30 basado en métodos de ondas superficiales* [Memoria de título, Universidad de Chile]. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.

Optim. (2006). *User manual for SeisOpt ReMi Software. Computer Programs in Biomedicine*, 18(1-2).

Ortega Contreras, B. H., & Pérez Pallares, J. S. (2020). *Métodos de exploración del subsuelo para la determinación del perfil de velocidad de onda cortante* [Trabajo de grado, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña]. Facultad de Ingeniería Civil.

Pancha, A., Anderson, J. G., & Louie, J. N. (2021). *Multidisciplinary applications of refraction microtremor (ReMi) for site characterization: Mapping lateral heterogeneities and liquefaction potential*. Seismological Research Letters, 92(4), 2345-2357. <https://doi.org/10.1785/0220200356>

Park, C.B., Miller, R.D. y Xia, J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves*. Geophysics 64, pp. 800-808.

Park, C., Miller, R. D., Xia, J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves*.

Paz Penagos, H., Uyuban, J., Narváez, A. y Ferro Escobar, R. (2016). *DESARROLLO Y PRUEBA DE UN SISTEMA DE RADIO TELEMETRÍA PARA ADQUISICIÓN SÍSMICA*. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 27, núm. 1, 2017 Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. Obtenido de Ciencia e Ingeniería Neogranadina, vol. 27, núm. 1, 2017 Universidad Militar Nueva Granada.

Pérez Cuevas, J. (2015). *Desarrollo e implementación de métodos avanzados de exploración sísmica activa y pasiva, y del método del gradiente topográfico en el análisis de microzonificación sísmica en el sureste de la Península Ibérica* [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cartagena]. Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica.

Pérez Santisteban, I. (2012). Tesis Doctoral "Caracterización Geotécnica de los Suelos de Madrid Mediante la Técnica ReMi". Madrid: Universidad Complutense de Madrid.

- Pinilla, C. (2012). Tesis de Grado "*Correlación entre el perfil de velocidad de propagación de ondas de corte y el espectro de respuesta en suelos*". Universidad de Chile, Chile.
- Pulido Vásquez, J. y Rodríguez Gutiérrez, M. (2015). Tesis "*Caracterización del Subsuelo utilizando el Método Geofísico de Refracción por Microtremores ReMi para Segmento de la Avenida Circunvalar y Parque Central Simón Bolívar. Bogotá, Colombia*". Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Reynolds, J. M. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Rivas Lucero, R. A. (2016). *Efecto en la curva de dispersión a través del método MASW, al realizar variaciones en el peso de la fuente activa y el tipo de placa* [Proyecto de título, Universidad del Bío-Bío]. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Rivera, M.; Piedra, R. y Paripanca, Y. (2016). *Ensayos Geofísicos de Refracción Sísmica y de Medición de Ondas de Corte (MASW y MAM) para usos de cimentación en obras de edificaciones*. Revista CIVILIZATE, 50-55.
- Rix, G. (1988). *Experimental study of factors affecting the Spectral-Analysis-of-Surface-Waves method*. 315 pp. Austin: Universidad de Texas.
- Saito, M. (1979). *Computations of reflectivity and surface wave dispersion curves for layered media; I, Sound wave and SH wave*. Butsuri-Tanko 32, no. 5, pp. 15-26.
- San Martín Rosales, C. (2015). *Estudio de la eficiencia de diferentes configuraciones de geófonos para la utilización del método ESAC* [Proyecto de título, Universidad del Bío-Bío]. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental.
- Secretaría de Gobernación [SEGOB]. (2018). *Guía básica de procesamiento de datos para distintos métodos aplicados en estudios de microzonificación sísmica*. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). <https://www.cenapred.gob.mx>
- Serna Vásquez, A. (2015). Tesis de Magister "*Evaluación de la resolución del método de análisis de dispersión de ondas superficiales MASW (multichannel analysis of surface waves) en suelos residuales*". (D. d. Universidad Nacional de Colombia, Ed.) Medellín, Colombia.

Stewart, R.H., Stewart, J.L. y Woodring, W. P. (1980). *Mapa Geológico del Canal de Panamá y sus Alrededores, República de Panamá*. Panamá.

Udias, A. y Mezcua, J. (1997). *Fundamentos de Geofísica*. España: Alianza Editorial.

URS Holdings.Inc. (2007). *Geomorfología de la Ampliación del Canal. Estudio de Impacto Ambiental Categoría III, Proyecto de Ampliación del Canal de Panamá - Tercer Juego de Esclusas*. Panamá.

Xia, J.R., Miller, R. D. y Park, C.B. (1999). *Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves*. *Geophysics* 64, pp. 691-700.