

Aplicación de la tomografía sísmica para la detección de fallas estructurales en una formación terciaria

Victor A. Rinaldi¹, Horacio V. Ibarra², Ricardo F. Viguera³ y Juan C. Harasimiuk³

¹*Departamento de Construcciones Civiles, Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

²*Louis Berger Group Inc., Panamá*

³*CIM Group Inc., Panamá*

Fecha de recepción del manuscrito: 08/03/2016

Fecha de aceptación del manuscrito: 01/09/2016

Fecha de publicación: 30/09/2016

Resumen—La técnica de sísmica de refracción es una herramienta geofísica de aplicación creciente en los estudios geológicos-geotécnicos, tanto para el mapeo de las distintas formaciones del subsuelo como para la detección del techo de roca. Por otro lado, la velocidad de propagación de ondas es un parámetro relacionado directamente con importantes propiedades geotécnicas de los suelos y rocas. Actualmente la evolución de la técnica de medición y procesamiento de los datos, permite la obtención de imágenes tomográficas, que han incrementado significativamente su potencial. En este trabajo se describe los principios básicos de la tomografía sísmica y se presenta un caso histórico de aplicación de esta técnica al estudio de fallas internas de un macizo terciario de la Formación Gatún en Panamá. En todos los casos se obtuvo una excelente correlación entre el perfil sísmico y el perfil geológico encontrado durante las prospecciones directas mediante perforaciones orientadas realizadas en el sitio.

Palabras clave— Geofísica, Sísmica de Refracción, Detección de Fallas, Formación Gatún.

Abstract—Refraction seismic technique is an increasingly useful geophysical tool for geotechnical studies in Civil Engineering work including the mapping of different soil formation of subsoil and detection of the bed rock. Additionally, wave velocity is a key parameter which correlates directly with significant geotechnical parameters of soils and rocks. Today, the evolution of the measurement technique in the field and the data processing allows for obtaining tomographic images which increases its potential for applications to evaluate structuration of rock mass. This work describes the basic principles of seismic tomography and a case history of an application in civil works used to detect hidden faults in the Gatun formation. The correlation between the seismic profile and geologic profile obtained from direct prospection showed very good agreement. Subsequent directed boreholes performed at the site confirmed the position and nature of the faults detected.

Keywords— Geophysics, Seismic Refraction, Faulting detection, Gatun Formation

INTRODUCCIÓN

En el método de refracción sísmica se mide el tiempo en que una onda elástica de compresión o corte llegan a través del medio geológico a los distintos sensores que se encuentran dispuestos a lo largo de una línea de prospección. Esta línea se conoce también como tendido sísmico o línea de refracción. Las ondas elásticas se generan en los extremos y puntos intermedios del tendido por medio de martillos, caídas de masas, rifles, explosivos, etc. Estas ondas son detectadas por sensores llamados geófonos que miden la velocidad de vibración con que la onda elástica excita el punto donde se encuentran dispuestos. En general se utilizan 12, 24 o 48 geófonos. La separación entre geófonos depende de la

profundidad de prospección deseada en cada caso. En general, puede estimarse una profundidad de entre 1/4 y 1/3 de la longitud total del tendido. La señal capturada por los geófonos es acondicionada (ej. amplificadas y filtradas) por un sismógrafo que permite también mostrar en una pantalla o display los registros de las señales de todos los geófonos dispuestos a lo largo del tendido. De los registros se determinan los tiempos de arribo de las ondas de compresión, principalmente desde que la señal es emitida y llega a cada uno de los geófonos. Las curvas tiempo versus separación de geófonos se denominan dromocronas. El análisis de estas curvas permite determinar el perfil sísmico-estratigráfico. Los métodos más comunes de interpretación son: tiempos de intercepto, velocidades aparentes, frentes de onda, tiempos de retardo y recíproco generalizado (ej. Sarria Molina, 1996; Redpath, 1973; y Kearey, 2002). El advenimiento de los métodos computacionales cada vez más sofisticados, han permitido el desarrollo de algoritmos de procesamientos tomográficos de la

Dirección de contacto:

Victor A. Rinaldi, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 5353800 interno 29000, vrinaldi@efn.uncor.edu

refracción. Estos algoritmos permiten resolver variaciones o gradientes de velocidades en profundidad y cambios laterales en medios altamente variables como por ejemplo debido a la presencia de oquedades, fallas, karst etc. En Jacob et al. (2005) se discuten las ventajas y limitaciones de los principales algoritmos que se consiguen comercialmente en la actualidad tales como: Rayfract, GeoCT-II y SeisImager-2D. Las imágenes tomográficas generalmente muestran variaciones graduales de los cambios de velocidades opuestamente a lo que se obtiene en los métodos tradicionales donde los estratos identificados poseen velocidades constantes dentro de cada uno. Las limitaciones de la Tomografía con variaciones graduales de velocidad son discutidas en Rucker (2002). En ambientes sedimentarios donde la velocidad de propagación aumenta con la profundidad debido al cambio de confinamiento, la variación gradual de la velocidad es más realista que la que se obtendría con un sistema multicapas de velocidades constantes. Lo opuesto puede entenderse en ambientes con cambios bruscos de velocidades como es el caso de sedimentos sobre techo de roca o en general donde los cambios debido al agua o la cementación de los complejos tengan un rol preponderante.

La refracción sísmica tiene numerosas aplicaciones en la ingeniería civil incluyendo: evaluación de la variación estratigráfica de un sitio, la determinación de la profundidad del techo de roca, posición del nivel freático, grado de fracturación, alteración y competencia de la roca, detección de fallas geológicas, nivel de compacidad y cementación de los complejos sedimentarios, entre las principales que pueden mencionarse. Actualmente se ha extendido su uso a la determinación de los parámetros dinámicos del suelo para su uso en los diseños sísmicos y la determinación de parámetros geotécnicos para el diseño de fundaciones. Probablemente la mayor limitación de la sísmica de refracción se debe a que la técnica requiere que la rigidez de los estratos aumente en profundidad. La presencia de alguna intercalación de menor rigidez puede ocasionar importantes errores de interpretación. Finalmente puede indicarse que su aplicación en medios urbanos está condicionada a la extensión libre que se encuentre para su implementación. Espacios reducidos no permiten extender los tendidos y por ende su profundidad de prospección está más limitada.

En este trabajo se revisan los conceptos básicos del método de refracción sísmica y del algoritmo SeisImager 2D. Se presenta un ejemplo de aplicación en donde se utilizó la técnica tomográfica basada en este algoritmo para evaluar el fallamiento del techo de roca de la Formación Terciaria de la Formación Gatún que se presenta en el cruce del Río Chagres a la salida del vertedero y las esclusas del lago Gatún del canal de Panamá en dirección hacia el Atlántico. Los resultados obtenidos se corroboraron mediante perforaciones con muestreo dirigidas, lo cual permitió validar el método empleado y reconocer sus limitaciones.

LOCALIZACIÓN DEL SITIO Y BREVE RESEÑA GEOLÓGICA

La Figura 1 muestra la localización geográfica del Río Chagres en las inmediaciones a la localidad de Colón, al noroeste de Panamá, próxima a la costa atlántica.

El istmo de Panamá estaría conformado por un bloque rígido (muchas veces designado como micro placa de Panamá), localizado entre las placas tectónicas de Cocos y Nazca al sur, la placa del Caribe al norte y la placa de América del Sur al este, y que forma parte del arco volcánico de Centroamérica América originado en el Mioceno hace unos 17 millones de años. El continuo movimiento de América del Norte y América del Sur, siendo actualmente de unos 25 mm/año, es la responsable de la deformación interna del istmo que se traduce en pliegues y fallamientos interiores (Rockwell et al, 2010). Las direcciones predominantes de las fallas se muestran paralelas al canal de Panamá en dirección Noroeste-Sureste y algunas en dirección Noreste-Suroeste (Pratt et al, 2003) y con alto grado de buzamiento (Jones, 1950), siendo las más reconocidas entre las primeras las fallas de Pedro Miguel y Limón y entre las segundas la Falla del Río Gatún. En la Figura 2 se presenta el plano geológico del sector de estudio y el estudio de fallamientos realizado por Pratt (2003) mostrando el posible control estructural del Río Chagres. A pesar de la complejidad tectónica descrita, se reconoce una muy baja actividad sísmica actual aunque la mencionada información genera una importante incertidumbre en la evaluación del riesgo sísmico en Panamá.



Fig. 1. Localización del sector de estudio en el cruce del Río Chagres al Norte de Panamá próxima a la costa del Atlántico.

La estratigrafía del sector de interés ha sido extensivamente descrita por Jones (1950) y Woodring (1957) como una consecuencia de depósitos del Mioceno y Holoceno sobre formaciones volcánicas Pre-Terciarias. El depósito sedimentario más profundo es la Formación Gatún que en algunos lugares sobreyace sobre la roca volcánica directamente y en otros se interpone una formación Oligocena. Sobre la Formación Gatún se reconoce la Formación Chagres como una arenisca depositada en el Mioceno tardío.

La Formación Gatún está conformada por secuencias alternadas de areniscas, limolitas, conglomerado y turbas marinas, coloración verde grisáceo, con un buzamiento suave hacia el Noroeste. La Formación encierra contenidos de micro y macro fósiles en muy buenas condiciones de preservación. El mismo posee un espesor máximo estimado en unos 500 m con una elevación aproximada de +100 m en el sur de la Bahía Limón y reduce su elevación por debajo del nivel del mar hacia la costa del Caribe. La Formación Chagres por sobre el Gatún, se compone de roca arenisca masiva, algunas limolita y se destaca un elemento de esta Formación encontrada en su base identificada como caliza de Toro.

Como sedimentos más recientes del Cuaternario el Lodo Atlántico del Pleistoceno y Holoceno, que se sobrepone a la formación Gatún rellenando los bajos y canales originados por la erosión. De esta forma el Lodo Atlántico se encuentra ampliamente distribuida en el área del Lago Gatún entre la orilla norte del lago y Gamboa. Ello comprende los valles Chagres, Trinidad y Río Gatún, con el interior asociado y pantanos costeros áreas con espesores que pueden alcanzar los 80 m de profundidad. El Lodo Atlántico está conformado por arcillas, limos y arenas finas con abundante materia orgánica y en condiciones de elevada saturación dado su nivel respecto al nivel del mar.

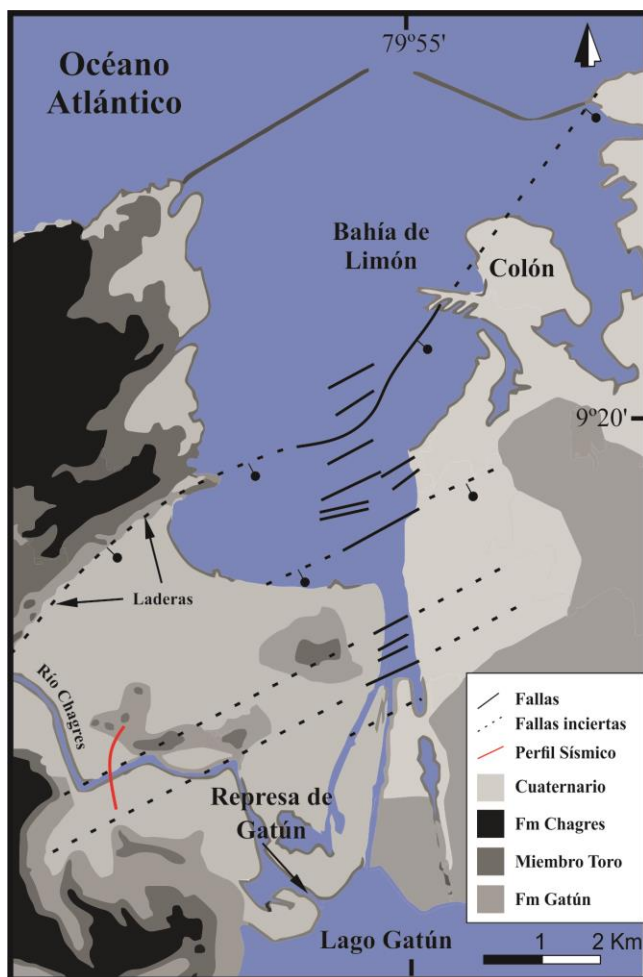


Fig. 2. Mapa Geológico del sector de estudio, modificado de Pratt (2003).

La topografía en el sector de interés es de muy ligera pendiente, esencialmente el resultado de la sedimentación progresiva, en contraste con los procesos de erosión que participan en las áreas adyacentes. En un período geológico relativamente reciente, la superficie de la tierra era más alto que en la actualidad y los ríos más importantes de la vertiente atlántica generaron por erosión profundos valles. Un período de subsidencia siguiente, causó una reducción en la velocidad de las corrientes, sobre todo a lo largo de sus cursos inferiores, con la deposición resultante de limo y restos vegetales. Invasiones periódicas de mar resultaron deposiciones en condiciones de agua salobre y una mezcla de arcilla, limo y materia vegetal con sedimentos marinos. El último movimiento en la zona costera del Atlántico levantó las superficies de los canales del estuario pantanosas y planicies de marea unos pocos pies sobre el nivel del mar.

FUNDAMENTOS DEL ALGORITMO TOMOGRÁFICO SEISIMAGER 2D

En la Figura 3 se muestran esquemáticamente los dispositivos de tendidos sísmicos posibles. En el caso de la Figura 3.a se presenta el tendido con puntos de energización en los extremos (tiro cercano y lejano a ambos extremos) y punto medio que es de aplicación usual en el caso del método de interpretación basado en los tiempos de intercepción y del recíproco generalizado descritos en Ref. [6]. En la Figura 3.b se muestra el dispositivo y los puntos de energización convenientemente distribuidos para la ejecución de una tomografía sísmica. En este caso se requiere de un mayor número de detonaciones de geófonos. Mientras mayor sea el número de estos último mejor será la definición de la imagen tomográfica resultante. Actualmente se usan 24 ó 48 geófonos como mínimo. Estos métodos requieren de geófonos con frecuencias naturales de vibración de entre 8 y 40 Hz, algo mayores a los empleados en la sismología tradicional.

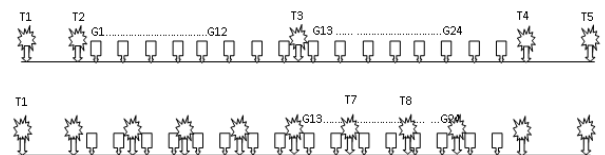


Figura 3. Esquema de dispositivos empleado para el estudio de refracción sísmica utilizando detonaciones extremas y punto medio (a) y múltiples detonaciones (b).

Las leyes fundamentales que rigen la propagación y la trayectoria de las ondas sísmicas son el principio de Huygens, el principio de Fermat y la ley de Snell o ley de la refracción. Estos principios permiten comprender los fenómenos de propagación de ondas en los medios y en especial los procesos que resultan en medios no homogéneos donde se producen los fenómenos de difracción, dispersión y scattering. La difracción es el desvío de los rayos, en cierta extensión, ocurrido cuando

se limita parte del frente de ondas. La dispersión es la variación de la velocidad de una onda para distintas frecuencias. En un medio elástico homogéneo no hay dispersión, pero si ocurre en un medio imperfectamente elástico como son los geomateriales. Finalmente, el Scattering corresponde a la formación de pequeñas ondas que propagan la energía en todas las direcciones y se produce cuando un frente de ondas choca con objetos de distinta impedancia pequeños comparados con su longitud de onda.

La disminución de la energía sísmica con la distancia es causada en parte por los procesos descritos anteriormente y otros procesos como son: el amortiguamiento material (perdida de energía por fricción y disipación de calor fundamentalmente), la absorción (los geomateriales actúan filtrando las altas frecuencias que atenúan la amplitud de los pulsos en el dominio del tiempo) y la atenuación geométrica (a medida que la energía se aleja de la fuente que lo produce se distribuye afectando un mayor volumen).

El método tomográfico del programa SeisImager 2D [8] empleado en este trabajo, requiere asumir un modelo de semiespacio de velocidades (congruente con el modelo geológico) el cual se discretiza en sectores denominado pixels tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 4. El algoritmo matemático de cálculo consiste en el trazado iterativo de rayos (frentes de onda) que cruzan el modelo físico asumido y comparar los tiempos calculados con los medidos en los trabajos de campo. En caso de que la diferencia entre estos tiempos sea mayor a un error medio aceptable, se modifica el modelo teórico hasta que la diferencia entre los tiempos medidos y calculados sea minimizada por ejemplo empleando la técnica de los mínimos cuadrados. El objetivo fundamental es el encontrar el tiempo mínimo de viaje de la onda entre el emisor y el receptor para cada par emisor-receptor. En este problema es conveniente definir la “lentitud” o slowness de cada pixel como la inversa de la velocidad ($v_{i,j}$):

$$s_{i,j} = \frac{1}{v_{i,j}} \quad (1)$$

Asumiendo que en cada pixel la onda viaja una distancia $l_{i,j}$, el tiempo de viaje para una iteración entre el un emisor y un receptor se puede escribir como:

$$\begin{aligned} t_1 &= l_{1,1} s_1 + l_{1,2} s_2 + \dots + l_{1,j} s_j \\ t_2 &= l_{2,1} s_1 + l_{2,2} s_2 + \dots + l_{2,j} s_j \quad (2) \\ t_i &= l_{i,1} s_1 + l_{i,2} s_2 + \dots + l_{i,j} s_j \end{aligned}$$

Las ecuaciones (5) se pueden escribir en notación matricial como:

$$[L][S] = [T] \quad (3)$$

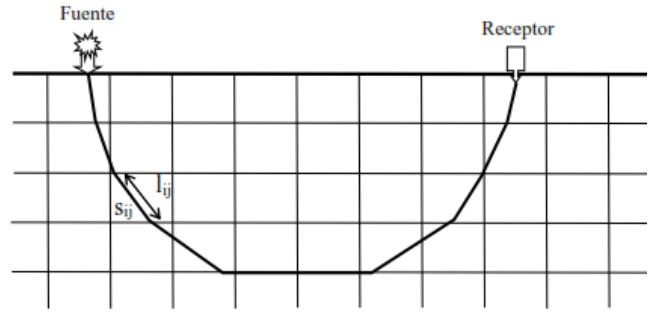


Figura 4. Discretización del modelo teórico para la ejecución de una tomografía sísmica según el algoritmo de cálculo del programa SeisImager 2D. En donde $l_{i,j}$ es la longitud que recorre el rayo en el pixel i,j con lentitud $s_{i,j}$

En donde la incógnita desconocida son los elementos de la matriz S . En general este sistema está sobre terminado, dado que existen más ecuaciones que incógnitas.

Si se asume una función error de la forma:

$$E = [T] - [L][S] \quad (4)$$

y pretendemos minimizar la función cuadrática del error,

$$E = \{[T] - [L][S]\}^T \{[T] - [L][S]\} = \|[T] - [L][S]\|^2 \quad (8)$$

Para cuando la variación del error (o la derivada) es cero, resulta:

$$L^T L S = L^T T \quad (5)$$

O lo que es lo mismo:

$$S = (L^T L)^{-1} L^T T \quad (6)$$

Una vez obtenida la matriz de slowness S para cada par emisor-receptor queda determinado el modelo que mejor aproxima a las mediciones de tiempos. Este modelo es considerado el perfil sísmico del sitio.

En general el problema resulta más complejo de lo expuesto, por cuanto en la ecuación (3) la matriz L es también función del slowness (S) y el problema se transforma en no lineal por lo que debe proponerse un modelo inicial S_0 y con este calcular la matriz Jacobiana L_0 y los tiempos teóricos resultantes T_0^c . A partir de allí se determina la función error (e) para cada iteración (k):

$$(e_i)_k = t_i - \sum l_{ij} S_{jk-1} \quad (11)$$

Luego el error se distribuye para crear el modelo de distribución de slowness en forma proporcional a las longitudes de cada rayo en cada pixel:

$$(S_j)_{k+1} = (S_j)_k + \frac{(e_i)_k}{\sum (l_{ij})^2} l_{ij} \quad (12)$$

Existen dos algoritmos iterativos ART (Algebraic Reconstruction Technique) y SIRT (Sequential Image Reconstruction Technique). ART actualiza el vector $[S]$ luego de cada rayo procesado en cambio SIRT corrige $[S]$ posterior al procesamiento de todos los rayos.

TRABAJOS REALIZADOS

El estudio geofísico del cruce del Río Chagres se realizó como parte de un programa tendiente a evaluar las condiciones geotécnicas del sitio para la fundación del puente en el tramo del viaducto entre las progresivas 7147 a 8154 aproximadamente. La Figura 2 muestra la localización geográfica del cruce del Río Chagres en las proximidades de la costa atlántica. El programa geotécnico incluyó estudios geofísicos y perforaciones. En total se realizaron 33 perforaciones rotativas hasta un máximo de 117 m de profundidad en coincidencia con cada una de las pilas del puente. Los estudios geofísicos consistieron en una línea sísmica realizada mediante la técnica de refracción a lo largo del eje del puente, ensayos de down-hole (DH) en dos pozos y 5 ensayos de análisis espectral multirreglo de ondas de superficie (MASW).

En este trabajo se realizaron 5 tendidos sísmicos entre las progresivas 7147 y 8154 con un total de aproximadamente 840 m de cobertura de tendidos. Para este trabajo se empleó un Equipo Geometrics Geode 24. Cada uno de los tendidos se realizó con 24 geófonos con separaciones de 5 m entre ellos. Los sensores se clavaron en el suelo mediante insertos de 8 cm de longitud asegurando siempre su fijación. Todas las prospecciones se realizaron en sentido lineal y con una longitud variable entre 115 a 135 m, según la lejanía de los tiros extremos con respecto a los geófonos externos. Para cada tendido sísmico se realizaron 5 disparos correspondientes a: tiros extremos, cuartos y centro. Además, se realizaron mediciones con tiros lejanos correspondientes a la margen opuesta del río en los tendidos 1, 2, 3 y 4, para obtener continuidad de datos. La energización en cada punto se realizó utilizando un sistema de cañón de gas comprimido accionado mediante un sistema de electroválvula. Este sistema permitió aumentar la energía de impacto respecto a una masa accionada manualmente y por lo tanto aumentar la profundidad de penetración.

En la Figura 5 se muestra el cañón utilizado en este trabajo. Dado que mayor parte de la traza se encontraba en condiciones de anegamiento, una tarea fundamental fue la selección de puntos para la colocación del tendido y los geófonos. Para realizar la cobertura del río, sin necesidad de emplear hidrófonos, los tendidos se colocaron sobre las márgenes y se energizó alternativamente desde las márgenes opuestas a los tendidos.



Fig. 5. Cañón de aire comprimido empleado en este trabajo como fuente de energización en este estudio. Gentileza del Lic. Armando Imhof.

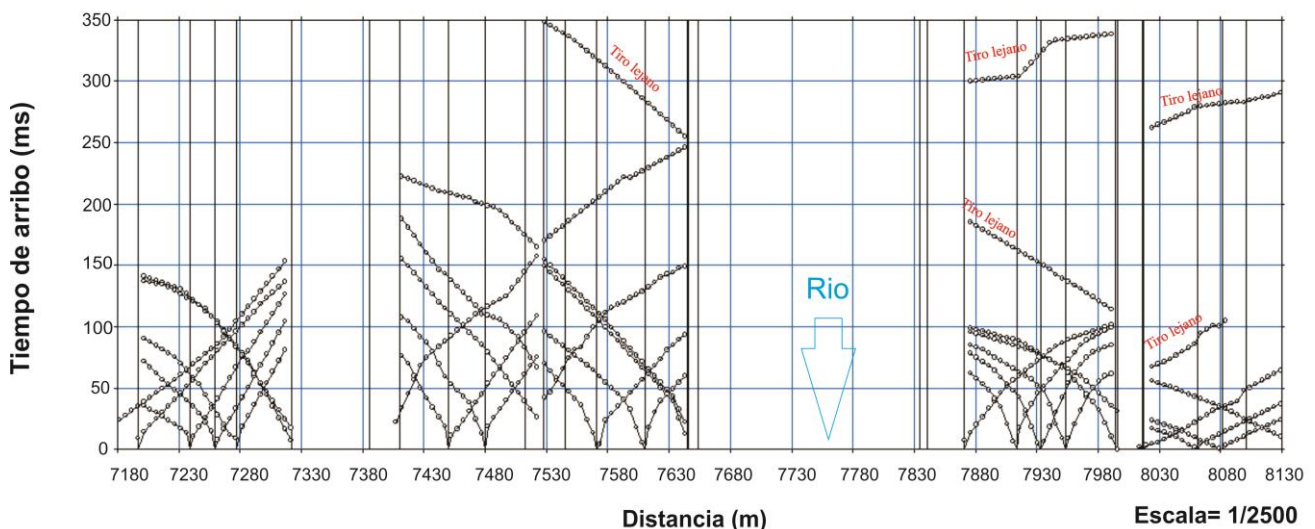


Fig. 6. Domocronas correspondientes a los 5 tendidos Sísmicos. Nota: Los tendidos 1, 2, 3 y 4 presentan arribos obtenidos de tiros lejanos correspondientes al margen opuesto del río.

Los registros obtenidos en campo fueron procesados e interpretados con detalle en gabinete utilizando los programas computacionales Pickwin y Plotrefa de Geometrics. Para este procesamiento se emplearon las siguientes etapas:

- a. Estudio detallado de los registros: Los registros fueron estudiados señal por señal, a los fines de evaluar la calidad de las mismas y la coherencia.
- b. Procesamiento de los Registros: Las señales obtenidas en bruto fueron filtradas en el ancho de banda de los sensores, a los fines de eliminar ruidos de línea, extraños a las mediciones.
- c. Determinación de los Arribos: De los registros procesados, se determinaron los tiempos de arribo de las ondas de compresión. La detección de estos puntos se realizó manualmente mediante el programa computacional Pickwin.
- d. Trazado de los Perfiles: Con los primeros arribos se determinaron las curvas espacio-tiempo denominadas dromocronas como se muestra en la Figura 6.
- e. Obtención del Perfil sísmico: A partir del análisis de estas curvas dromocronas se obtuvieron los perfiles transversales. Para esta operación se empleó un software de procesamiento tomográfico de ondas P (Plotrefa de Geometrics). El programa emplea la rutina iterativa de minimización por cuadrados mínimos descripto más arriba para aproximar los tiempos calculados del modelo con los medidos en campo.
- f. Interpretación del Perfil Sísmico: El perfil sísmico fue interpretado empleando un programa de imágenes genérico que permite el trazado de líneas divisorias y rotulaciones.

DESCRIPCIÓN DE LOS RESULTADOS

El resultado de componer y procesar en forma conjunta los 5 tendidos sísmicos se presentan en la tomografía de la Figura 7. El resultado muestra un perfil de velocidades crecientes en profundidad. Los sedimentos no consolidados a ligeramente consolidados y saturados se les pueden atribuir una velocidad de propagación de entre 500 m/s y hasta valores de 1000 m/s. La velocidad máxima es menor que la correspondiente a la del agua (1500 m/s) debido al contenido de gases producto del alto contenido de materia orgánica. Estos materiales aumentan su espesor hacia el eje del río reduciéndose a medida que se aleja hacia los márgenes de la planicie de inundación. Materiales con mayor contenido de arenas y/o mayor nivel de estructuración pueden encontrarse con valores de velocidad de propagación entre 1000 m/s y 1800 m/s. Velocidades de propagación entre 1800 m/s y 2500 m/s se pueden asociar a materiales muy consolidados y a la formación Gatún muy alterada y/o fracturada. Esta transición es difícil de atribuir a un material específico debido a una superposición de rangos de velocidades. Las velocidades de propagación mayores a 2500 m/s se atribuyen a una roca en buenas condiciones estructurales como se muestra en la tomografía de la sección. Valores transicionales contornean la superficie atribuida al techo de roca y puede atribuirse en mayor grado a transiciones producto de alteración y/o fracturación por tectonismo.

La tomografía sísmica obtenida presento un error medio cuadrático superior al conveniente para este tipo de ensayos, con un valor de RMS: 17.64% siendo ampliamente mayor al límite de 5%. Sin embargo, al contar con sondeos directos se pudo comprobar que los límites y transiciones de los estratos concuerdan con los obtenidos por los métodos tradicionales.

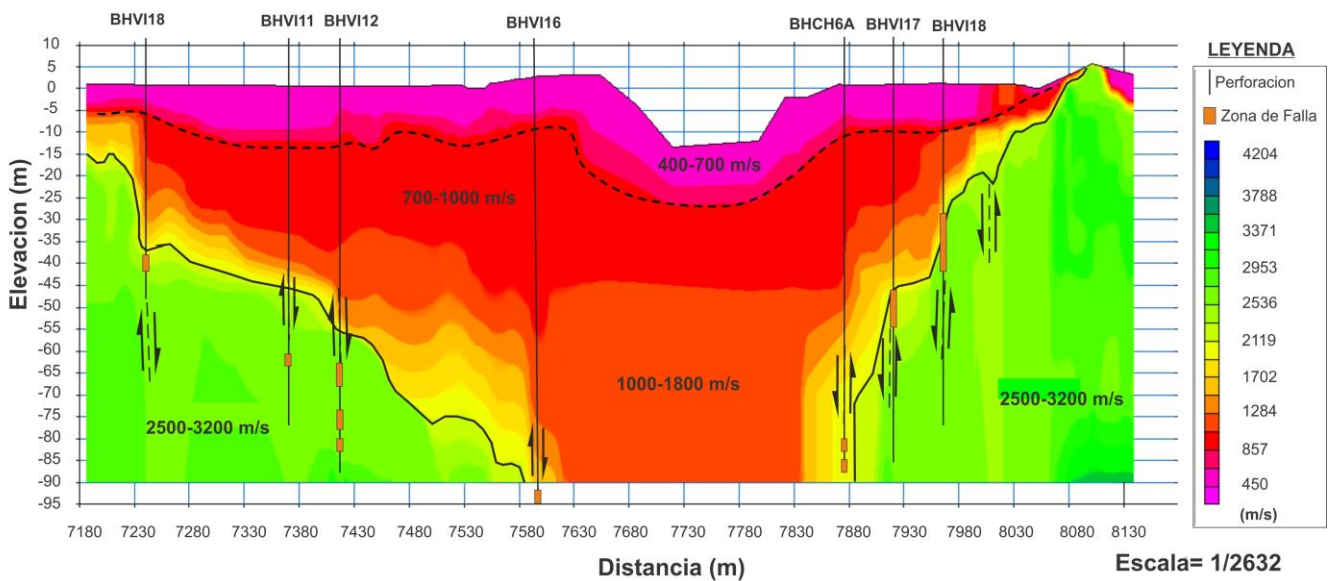


Fig. 7: Interpretación integrada de los 5 perfiles sísmicos refractivos. Método tomografía sísmica.

Una ventaja de este método, es permitir la visualización de las transiciones estratigráficas en sentido horizontal, como que también las variaciones verticales

observadas. Algunas consideraciones sobre los valores obtenidos: En la tomografía se han introducido flechas de cizalla que indican el movimiento de los bloques y recuadros coloreados en los sectores donde se constató la

existencia de fallas de tipo verticales a subverticales por medio de perforaciones. Las mismas se componen de estratos de areniscas brechosas de grano medio a grueso, con un alto grado de meteorización, completamente fracturadas y con altos contenidos de restos de caparzones. En algunos sectores las mismas se componen de capas alternadas de tufas calcáreas y arenas finas de matriz ligeramente limosa. Se identificaron siete zonas de fallas del tipo normal, correspondiente a una estructura del tipo Graven, como consecuencia a esfuerzos extensionales regionales. En total se han identificado 8 sectores en los cuales se observó una variación significativa de la velocidad de propagación en sentido horizontal. En el lecho del río no se ha observado la presencia de un reflector importante hasta la profundidad alcanzada por este estudio de aproximadamente 90 m. Se estima que esta falta de reflector puede deberse a la presencia de las fallas o discontinuidades laterales en las márgenes del río que no permitieron el paso del tren de ondas y/o a un elevado grado de fracturación de la roca en ese sector que podría describirse como un sector donde se desarrolla una posible falla de importante magnitud. Por tal motivo se ha incluido en la imagen signos de interrogación para indicar la falta de definición de la imagen en este sector.

Debe mencionarse que debido al amplio rango de posible alteración de la formación Gatún, la transición es meramente una división de carácter ingenieril ya que la transición entre ambas clasificaciones puede ser más amplia.

CONCLUSIONES

El resultado del estudio sísmico en este trabajo presenta un perfil de velocidades crecientes en profundidad mostrados en la Figura 7. Los sedimentos no consolidados a ligeramente consolidados y semisaturados se les pueden atribuir una velocidad de propagación de entre 500 m/s y hasta valores de 1000 m/s. Estos materiales aumentan su espesor hacia el eje del río reduciéndose a medida que se aleja hacia los márgenes de la planicie de inundación. Materiales con mayor contenido de arenas y/o mayor nivel de estructuración pueden encontrarse con valores de velocidad de propagación entre 1000 m/s y 1800 m/s. Velocidades de propagación entre 1800 m/s y 2500 m/s se pueden asociar a materiales muy consolidados y a la formación Gatún muy alterada y/o fracturada. Esta transición es difícil de atribuir a un material específico debido a una superposición de rangos de velocidades. Las velocidades de propagación mayores a 2500 m/s se atribuyen a una roca en buenas condiciones estructurales como se muestra en la tomografía de la sección. Valores transicionales contornean la superficie atribuida al techo de roca y puede atribuirse en mayor grado a transiciones producto de alteración y/o fracturación por tectonismo.

La tomografía sísmica obtenida no solo permitió visualizar las transiciones estratigráficas en dirección vertical sino además fue posible realizar estimaciones sobre variaciones laterales observadas. En Figura 7, las flechas de cizalla indican probabilidad de presencia de fallas de tipo subverticales. En total se han identificado

ocho sectores con variaciones horizontales significativas de la velocidad de propagación. En el lecho del río no se ha observado la presencia de un refractor importante hasta la profundidad alcanzada por este estudio. Se estima que esta falta de refractor puede deberse a la presencia de las fallas o discontinuidades laterales en las márgenes del río que no permitieron el paso del tren de ondas y/o a un elevado grado de fracturación de la roca en ese sector que podría describirse como un sector donde se desarrolla una posible falla de importante magnitud. Por tal motivo se ha incluido en la imagen signos de interrogación para indicar la falta de definición de la imagen en este sector. Los resultados obtenidos se corroboraron mediante perforaciones con muestreo dirigidas, lo cual permitió validar el método empleado y reconocer sus limitaciones.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la gentileza de la Empresa Louis Berger Group Inc. por permitir la publicación de datos obtenidos para fines académicos y científicos.

REFERENCIAS

- [1] Jones, S.R., 1950. "Geology of Gatún Lake and vicinity". Geological Society of America Bulletin 61, 893-922.
- [2] Kearey P., Brooks M., Hill I., (2002) "An Introduction to Geophysical Exploration", *Blackwell Science Ltd.*, Osney Mead, Oxford, P. 281.
- [3] Redpath, Bruce B., 1973, "Seismic Refraction Exploration For Engineering Site Investigations", *U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Explosive Excavation Research Laboratory, Technical Report E-73-4*, Livermore, California, 51 p.
- [4] Rockwell, T., Bennett R., Gath E., and Francesci P., (2010), "Unhinging and Intender: A new tectonic model for the internal deformation of Panama", *Tectonics* 61 (4).
- [5] Rucker M. L., (2002) "Seismic Refraction Interpretation with Velocity Gradient and Depth of Investigation", *Proceedings of the Geophysics 2002 conference*, Los Angeles, California, p.11.
- [6] Santamarina, J. C.; Klein, K. Y. Fam, M., (2001) "Soils and Waves", John Wiley & Son, Inc.(Edition 1a. 2001). 553 pp..
- [7] Sarria Molina A. (1996), "Métodos Geofísicos con Aplicaciones a la Ingeniería Civil", *Ediciones Uniandes*, Santa Fe de Bogotá, Colombia, p. 300.
- [8] SeisImager/2DTM Manual, (Version 3.3, 2009), California, USA.
- [9] Sheehan J.R., Doll W.E., y Mandell W.A., (2005), "An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis", *Journal of Environ. Eng. Geophys.*, 2005, V. 10 no. 1, pp. 21-34.
- [10] Palmer D., (1980) "The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation". Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, OK, 104 p.
- [11] Pratt L.T., Holmes M., Schweig E., Gomberg J., Cowan H.A., (2003), "High Resolution Seismic Imaging of Faults Beneath Limon Bay, Northern Panama Canal, Republic of Panama", *Tectonophysics* 368, pp. 211-227.
- [12] Woodring, W.P., 1957. Geology and paleontology of Canal Zone and adjoining parts of Panama. United States Geological Survey Professional Paper 306-A (146 pp.).