

COMPAÑÍA MINERA SAN JUAN S.A.
SVS INGENIEROS S.A.C.

Depósito de Relaves 1-2
TAMBORAQUE, Huarochirí, Lima

**PERFILES DE REFRACCIÓN SÍSMICA
CON INTERPRETACIÓN POR TOMOGRAFÍA ICÓNICA
MODELADO DE ONDAS “S” CON EL MÉTODO DE ANÁLISIS
ESPECTRAL DE ONDAS DE SUPERFICIE - MASW**

Mayo 2008



Estudio N° 713A-08
ARCE GEOFÍSICOS
Petit Thouars 4380, Miraflores, Lima 18, Perú
Telf.: (51-1) 422-7205. Fax: (51-1) 442-6946
josearce@geofisicos.com.pe
<http://www.geofisicos.com>

COMPAÑÍA MINERA SAN JUAN S.A.
SVS INGENIEROS S.A.C.

Depósito de Relaves 1-2
TAMBORAQUE, Huarochirí, Lima

**PERFILES DE REFRACCIÓN SÍSMICA
CON INTERPRETACIÓN POR TOMOGRAFÍA ICÓNICA
MODELADO DE ONDAS "S" CON EL MÉTODO DE ANÁLISIS
ESPECTRAL DE ONDAS DE SUPERFICIE - MASW**

Mayo 2008

Contenido

Página

Introducción y Trabajo de Campo	1
Ubicación de Sondeos Geofísicos: Programa de CMSJ-SVS	2
Plano de Ubicaciones del trabajo realizado	3
Refracción Sísmica con Tomografía Icónica	4
Interpretación de Refracción Sísmica	5
La técnica MASW	6
Resultados de la Refracción Sísmica	7
Resultados del MASW	8

Lámina de Secciones Modeladas: Tomografía de Refracción Sísmica de Onda P.

Estudio No. 713A-08



ARCE GEOFÍSICOS

Petit Thouars 4380, Miraflores, Lima 18, Perú
Telf.: (51-1) 422-7205. Fax: (51-1) 442-6946
josearce@geofisicos.com.pe
<http://www.geofisicos.com>

INTRODUCCIÓN

Con fecha 19 de abril de 2007 presentamos a la Compañía Minera San Juan S.A. nuestro informe N° 713-08 con secciones tomográficas de Resistividad Eléctrica y de Refracción Sísmica de la zona de Tamboraque, Lima.

El 19 de mayo de 2008 sometimos a la consideración de los señores Rod Lamond e Ing. Pedro Chmochumbi una propuesta preparada con instrucciones del Ing. Edwin Vásquez, de SVS Ingenieros S.A.C. para levantar perfiles de Refracción Sísmica y medir columnas de onda "S" con la técnica MASW.

El trabajo sísmico de campo fue realizado entre el 22 y 23 de mayo de 2008.

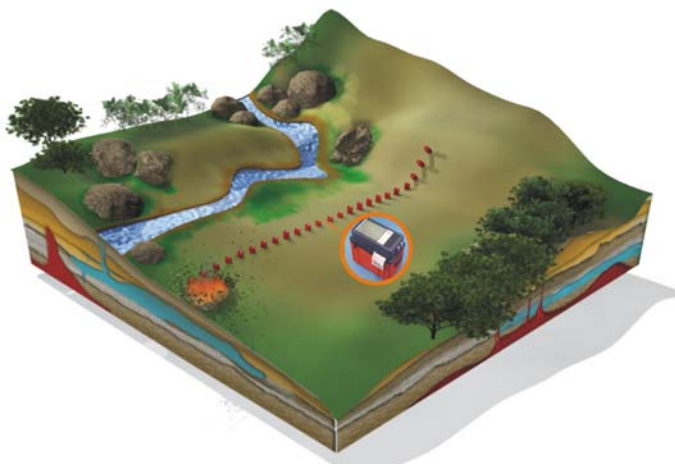
TRABAJO DE CAMPO

El sismógrafo portátil digital Geometrics StrataView R24, con capacidad de apilamiento vertical de señales, fue utilizado en este trabajo, a más de 24 geófonos de 14Hz y cables de refracción, con tendidos de 480 metros (20 metros entre geófonos). Los impactos mecánicos, se aplicaron a intervalos de cada seis geófonos del despliegue total. El levantamiento de Refracción Sísmica consistió de 3 perfiles y una longitud acumulada de 1440 metros, con traslapes de 50% y redundancias del 75%. La energía sísmica se obtuvo con explosivos.

La medición de velocidades de onda de corte se realizó en 7 estaciones con la técnica MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*), también conocida como SASW (*Spectral Analysis of Surface Waves*). Para realizar estas mediciones se utilizó el sismógrafo Geometrics StrataView R24 y un total de 24 geófonos verticales con frecuencia de medición mínima de 4.5Hz. La separación entre geófonos fue de 2 metros y los impactos, a 7m, 10m 15m, 20m, 25m, 30m y 40m fuera de los tendidos.



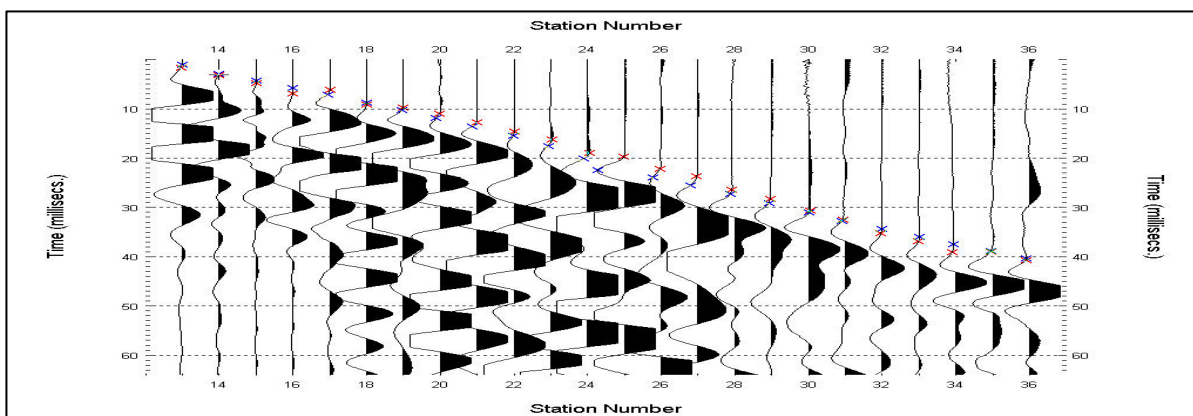
Sismógrafo Geometrics StrataView R24



Dispositivo de geófonos y de explosión

REFRACCIÓN SÍSMICA CON TOMOGRAFÍA ICÓNICA

Si en un lugar de la superficie del terreno se dispara una carga explosiva o se aplica un golpe suficientemente fuerte, las ondas elásticas viajarán en todas direcciones, como frentes concéntricos en el punto de impacto. Los frentes de onda al principio tienen arcos de corto radio pero al alejarse van haciéndose cada vez más planos hasta poder ser considerados como ortogonales a las trayectorias. La técnica sísmica supone la disponibilidad de sensores o geófonos colocados en línea recta, a distancias crecientes del punto de impacto y que reciben las ondas transformándolas en impulsos eléctricos. Las señales son enviadas a un sismógrafo donde son amplificadas para llevarlas a niveles adecuados de registro. Las ondas producidas por un golpe o explosión viajan a velocidades dependientes de la impedancia acústica del medio elástico en que se mueven. Parte de la energía se disipa en el aire como sonido, a 0.33 km/s de velocidad; el resto penetra al subsuelo siguiendo trayectorias que son modificadas por los cambios elásticos al pasar de un horizonte sísmico a otro. La característica más notable de un sismograma de refracción reside en su susceptibilidad de interpretación para calcular velocidades de onda y espesores de los medios elásticos atravesados. Usando técnicas de operación apropiadas se puede llegar a un elevado grado de resolución horizontal, con determinaciones de profundidad bajo cada geófono; es decir, teóricamente, un sismograma con cierto número de trazas permite calcular igual número de profundidades. Para ello debe obtenerse registros superpuestos parcialmente y de recorrido en doble sentido, con lo que se consiguen tiempos de llegada de onda procedentes de extremos opuestos de un mismo tendido. La interpretación y cálculo de sismogramas comienza con la identificación de llegadas de onda a cada geófono y su graficado en curvas de tiempo (llegadas) - distancia (a partir del punto de impacto), llamadas también "dromocrónicas". Estas curvas están realmente conformadas por segmentos cuyas pendientes son determinadas por las velocidades de las capas. Los tiempos de llegada, dos a cada geófono en los sismogramas de doble dirección, son relacionados con las duraciones totales de los registros y con las velocidades, para calcular las profundidades mediante técnicas conocidas como de "frentes de onda", o de "tiempos de retardo", o por "tomografía icónica de trayectorias" (εικονα=icono, imagen). Esta última, aplicada al presente estudio, es conocida en inglés como *WET TOMOGRAPHY*, o *wavepath eikonal tomography*.



Ejemplo de sismograma de Refracción Sísmica. Las aspas rojas marcan las primeras llegadas seleccionadas, mientras que las azules son las resultantes del modelo invertido.

INTERPRETACIÓN DE REFRACCIÓN SÍSMICA

Los registros sísmicos fueron analizados para fijar las primeras llegadas de onda P, en milisegundos, a cada uno de los geófonos. El proceso fue relativamente sencillo para las distancias cortas a partir de los puntos de impacto, pero se hizo progresivamente más difícil en los tramos alejados, debido a la atenuación de altas frecuencias y a la ocurrencia predominante de largas longitudes de ondas. Este problema es normal y ocurre siempre, salvo casos especiales de buena transmisión de frecuencias altas, sobre todo relacionada con terrenos húmedos.

La refracción sísmica tiene como condición, *sine qua non*, que las velocidades de onda sean siempre mayores a profundidad. Esto ocurre en la mayor parte de los casos de estudios geotécnicos, cuando la columna litológica consiste de una sobrecarga de baja velocidad, arriba, y materiales gradualmente más compactos hacia abajo, usualmente alcanzando roca de alta velocidad.

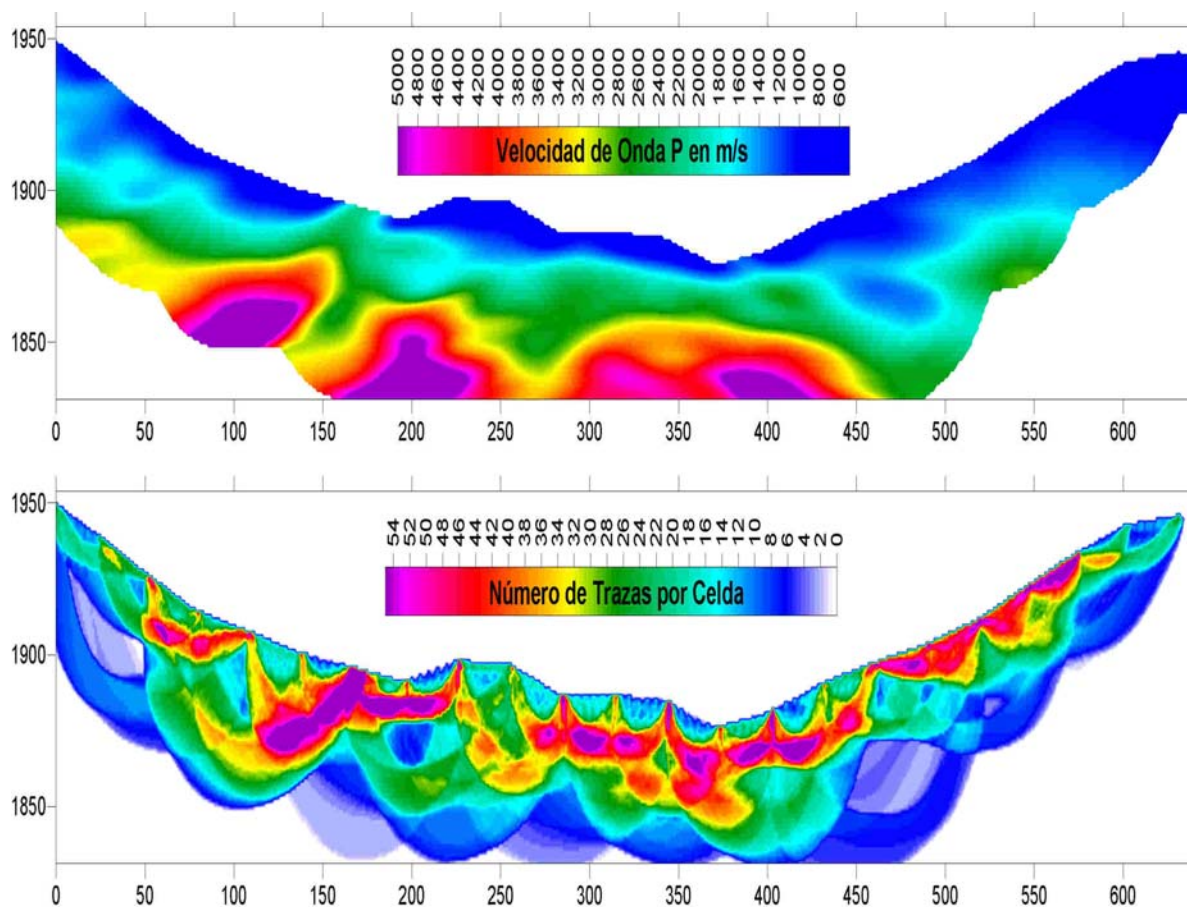
Las zonas fracturadas o falladas, que ocurren como sectores de velocidad baja en el basamento sin mostrar potencia suficiente de relleno, son señaladas como zonas de debilidad o, simplemente, como de baja velocidad. Es materia de la interpretación del geólogo el relacionar tales estructuras con la geología regional y local para decidir cuándo se trata de fallas, cuándo de zonas de cizallamiento, cuándo de alteración hidrotermal o cuándo de variación litológica singenética. Un perfil sísmico permite disponer del primer cuadro del subsuelo obtenido con mediciones indirectas mediante la acción de un campo de energía de intensidad y ubicación controladas.

La energía de un impacto en la superficie del terreno se desplaza en todas direcciones, lateral y verticalmente. Como consecuencia de ello, las interpretaciones sísmicas tienen carácter definidamente volumétrico (o sea, en tres dimensiones), a diferencia de la información de los medios geognósticos (taladros o túneles) que es esencialmente lineal. Por lo tanto, se debe tener cuidado al comparar geofísica con taladros, a menos que haya varias perforaciones correlacionables y que se acepte el efecto de "suavización" de los planos de contacto elástico contruidos por interpretación sísmica. En la interpretación por tomografía icónica de trayectorias se utiliza el concepto de "Haz de Rayos de Fresnel" (*Fresnel volumes*), en lugar de los tradicionales "rayos lineares", permitiendo así corregir las deformaciones topográficas y la definición de propiedades elásticas que varían progresivamente (contactos gradacionales) en lugar de los planos teóricos convencionales. Por otra parte, el procedimiento de tomografía icónica considera ciertas condiciones de inversión de velocidades que eran inaceptables en las técnicas de "rayos" individuales.

La interpretación sísmica de este estudio ha sido realizada con un programa iterativo de inversiones. El primer paso fue el de la selección de llegadas de onda P en los sismogramas de campo. Con tales tiempos de llegada se estimaron las velocidades iniciales del material de sobrecarga con el método de "frente de ondas" para luego calcular modelos completos de velocidad con el método *Delta t-v*, y con la definición del tamaño apropiado de las celdas que serían luego utilizadas para la tomografía icónica. Se consiguió así la "imagen" (εικονα) del subsuelo representada por cambios elásticos radicales y gradacionales corregidos para la deformación topográfica.

En los gráficos que siguen hay una sección típica interpretada por la técnica de la tomografía icónica de trayectorias, con corrección topográfica. La roca comienza en la franja delgada de color celeste pero se trata de roca alterada. La roca compacta comienza en la franja amarilla (más de 3000 m/s en este caso) y se nota que su estructura es muy irregular. Solamente las masas coloreadas con rojo á violeta peden ser consideradas como sólidas y resistentes.

Resultado de la tomografía icónica de un perfil sísmico

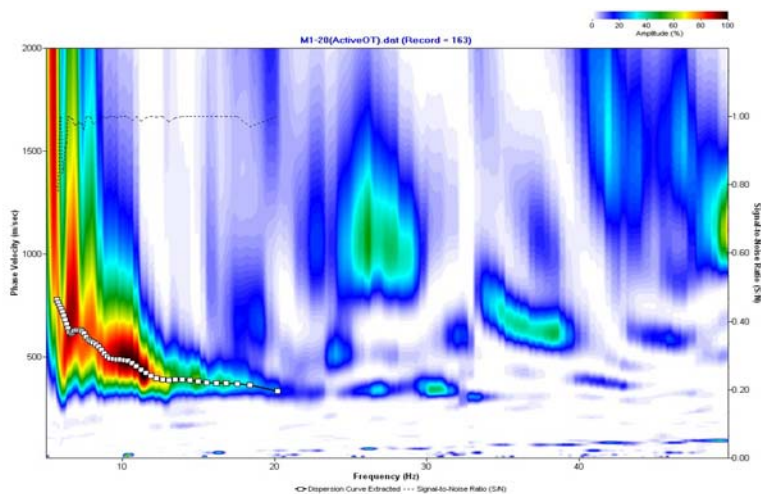


Cobertura de trayectorias del mismo perfil

LA TÉCNICA MASW

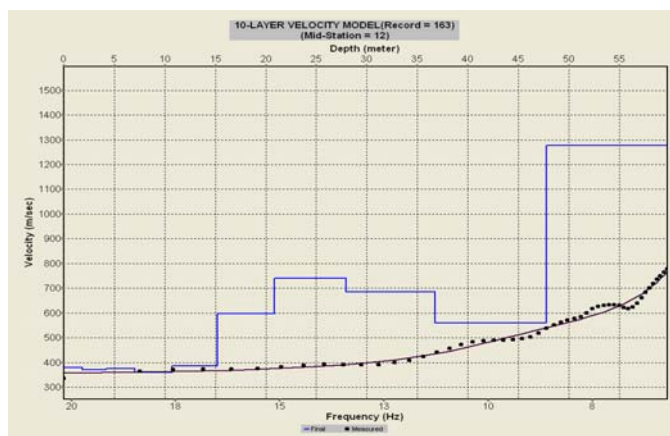
El método SASW o *Spectral Analysis of Surface Waves* fue desarrollado entre 1999 y 2000 por los ingenieros y científicos del Kansas Geological Survey (KGS). Ahora es más aceptado el nombre de *Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW)*. Las técnicas de modelado han sido mejoradas desde entonces hasta obtener la precisión disponible en la actualidad, la cual es mayor que la de los registros convencionales tipo *Down-Hole*. Una de las ondas menos utilizadas en el pasado era la onda de superficie, también conocida como *Rayleigh* o *Groundroll*, por interferir con las reflexiones y refracciones de las ondas de sonido, necesarias para los estudios sísmicos. Los investigadores del KGS pudieron determinar que las ondas de superficie tienen un componente principal de más de 98% de onda S y menos de 2% de onda P. La investigación también mostró que las ondas de superficie se atenúan a mayores frecuencias y con una disminución de velocidad de fase. La imagen que se ve a continuación muestra la atenuación típica de una onda de superficie, desde sus inicios a 5Hz hasta su desaparición a 30Hz, con los colores rojo-amarillo-verde-celeste. Una vez que la onda de superficie ha sido correctamente identificada, se procede al modelado de la onda S mediante un proceso iterativo, para obtener como resultado final una curva de variación de velocidad de onda S a diversas profundidades.

A continuación se muestra los resultados obtenidos e interpretados en la estación M1 de Tamboraque. La información es confiable hasta unos 40 metros de profundidad.



Tamboraque M1
Análisis Overtone

Tamboraque M1
Columna de velocidades S



RESULTADOS DE LA REFRACCIÓN SÍSMICA

En los levantamientos geofísicos de Refracción Sísmica realizados para estudios geotécnicos todos los resultados están expuestos gráficamente, de la forma como aparecen en la lámina de este informe. El geólogo que va a utilizar estos datos debe contar con los criterios fundamentales interpretativos, en función de la estructura y litología del subsuelo que interesan en cada proyecto específico. Las secciones sísmicas están presentadas de manera geofísica estricta, como reconstrucciones de Tomografía Icónica de Trayectorias de Onda con utilización de Volúmenes Fresnel (Haz de Rayos Fresnel), sin asignar símbolos litológicos, en tanto que los geólogos del proyecto tienen mejores criterios para ello. El basamento elástico de alta velocidad (*bedrock*) está coloreado con rojo-rosado (más de 3600 m/s) y el procedimiento tomográfico automáticamente delimita la profundidad de interpretación una vez que se alcanza la velocidad alta, porque no es factible la refracción por debajo de un horizonte tal. Los cambios rápidos de color (celeste y amarillo) representan cambios radicales en la litología. Puede aceptarse que la cubierta de sedimentos no consolidados sea aquella coloreada en azul (menos de 1200 m/s). *Las secciones sísmicas no son propiamente secciones litológicas, sino más bien presentaciones de cuadros de variaciones elásticas.* La resolución de la técnica está dada por la separación entre los geófonos y por la redundancia de señales ocasionada por el número de puntos de impacto de cada tendido de geófonos. Por la necesidad de que los horizontes elásticos sean siempre más veloces (compactos) a profundidad, condición indispensable para que ocurra la refracción de ondas, toda "capa" de baja velocidad que pudiera existir bajo una de alta velocidad impediría la refracción a superficie e introduciría un error de interpretación insalvable en operaciones primarias como las de este estudio. Sin embargo, la tomografía icónica de trayectorias permite "manejar" ciertas inversiones de velocidad cuando se trata de volúmenes discretos incluidos en las secciones, como puede ocurrir en el caso de bloques dentro de aluviones o de cavernas y fracturas dentro del basamento y cercanas a su contacto superior.

Han sido diferenciados los siguientes tipos elásticos:

Sobrecarga: La cubierta exterior está constituida por sedimentos no consolidados o roca muy alterada, con velocidades P en el rango de 400-1200 m/s. Coloreada con azul. La banda celeste (1200-1800 m/s) puede ser considerada como la base de esta sobrecarga. Es material removible con escarificadores.

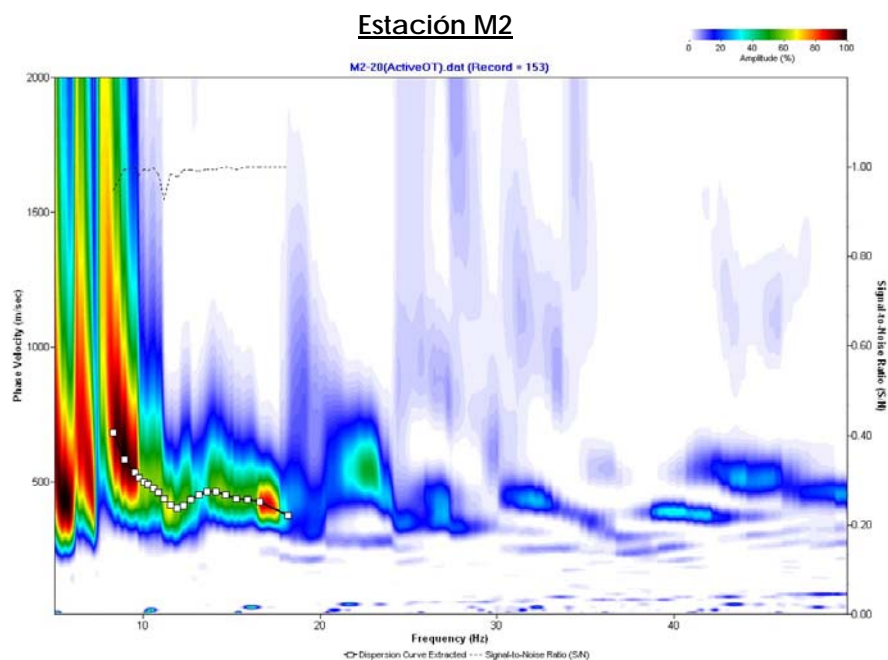
Horizonte intermedio: En todas las secciones ha sido encontrado un material con velocidades entre 2000m/s y 3000 m/s. Estas velocidades deben corresponder a roca alterada y están coloreadas con verde. Las zonas con menores velocidades de onda P (<2000 m/s) son removibles con escarificadores.

Profundo: En todas las secciones aparece un horizonte elástico de alta velocidad relativa, con más de 3000 m/s, por lo que puede ser considerado como roca firme, con reservas en los lugares con menor velocidad (3000-3600 m/s, amarillo/anaranjado). Coloreado con rojo/rosado. La banda de color amarillo/anaranjado representa el "contacto" superior.

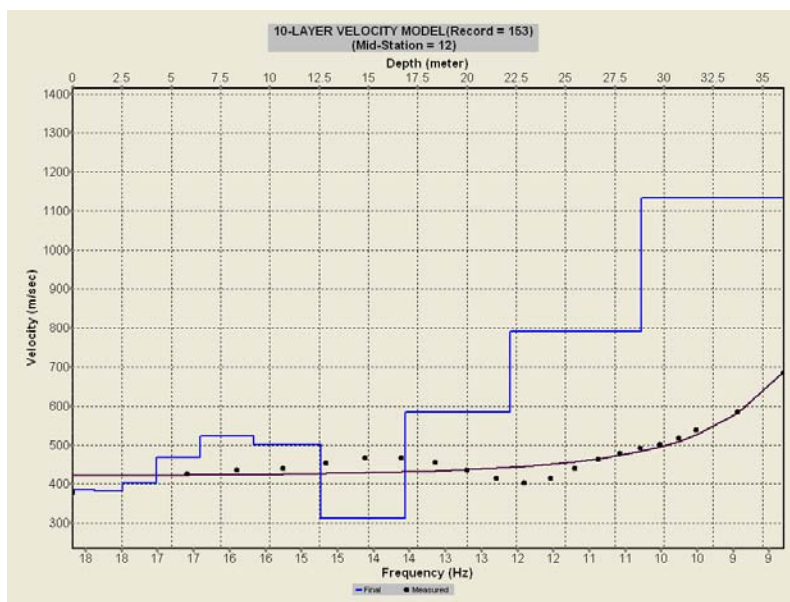
Hay dos sectores donde debe esperarse encontrar zona de falla o, al menos, zonas de debilidad elástica: En L1, entre las distancias 20m y 100m; en L3, entre 250m y 300m.

RESULTADOS DEL MASW

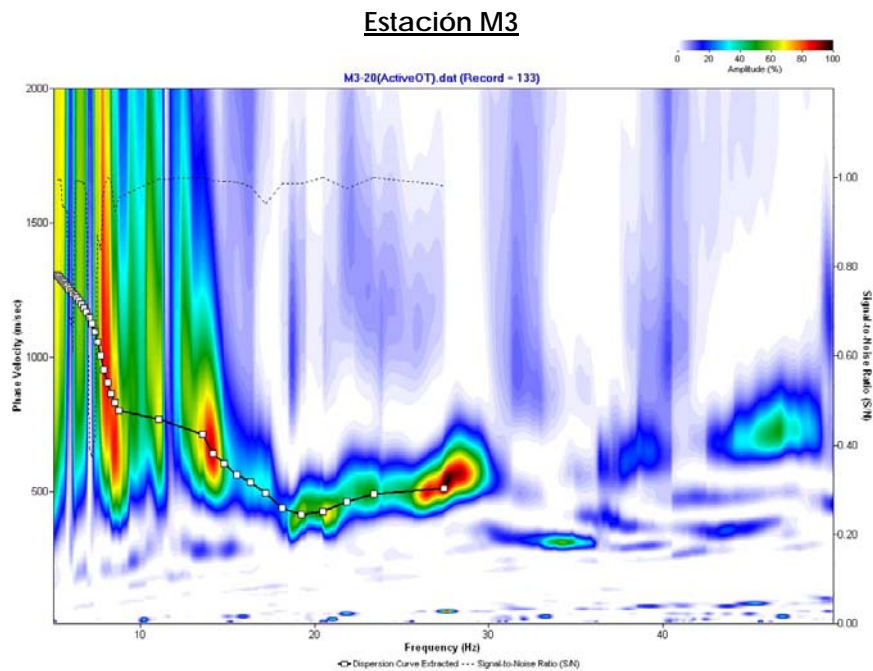
El primer gráfico OVERTONE y su columna interpretada están en la página 6. Los seis restantes OVERTONE y sus columnas interpretadas obtenidos en las estaciones de MASW M2 á M7 están expuestos a continuación. La información es confiable hasta unos 40 metros de profundidad.



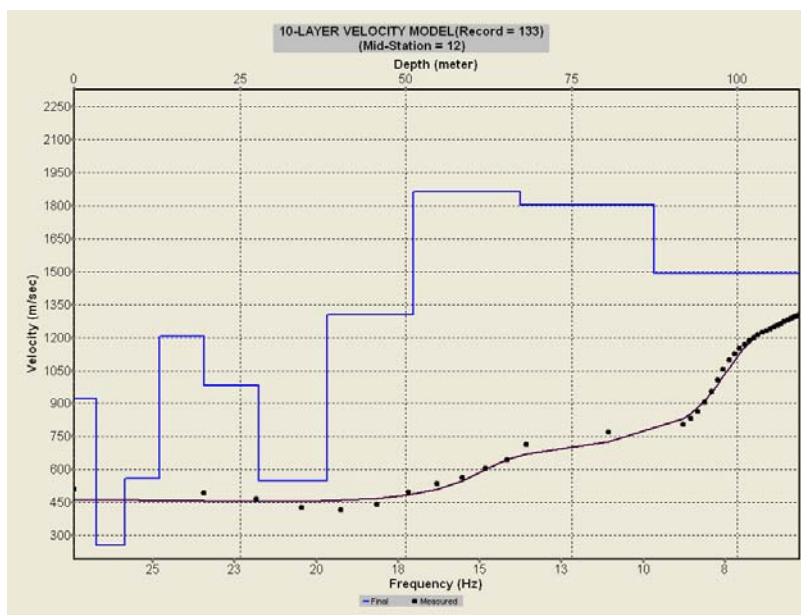
Análisis Overtone



Columna de velocidades "S"

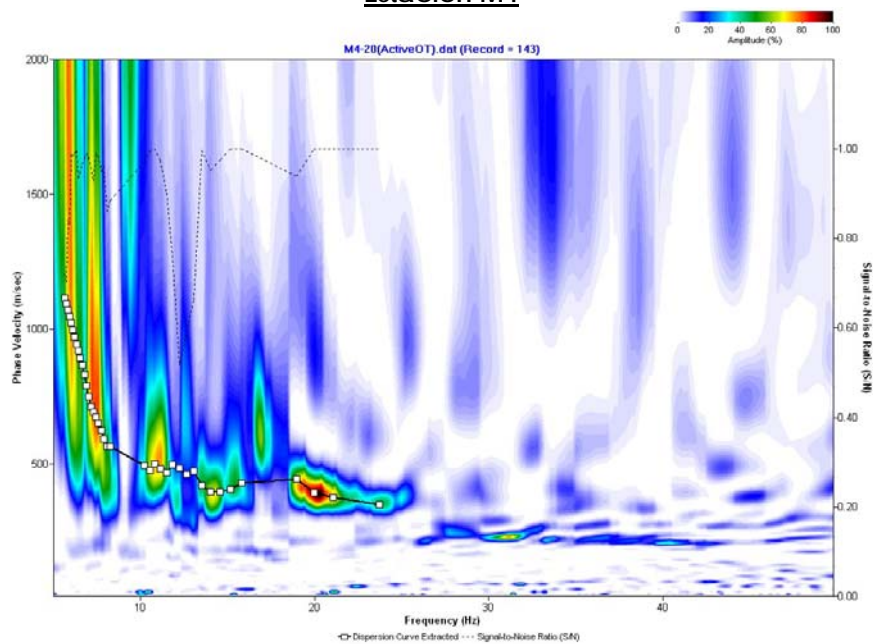


Análisis Overtone

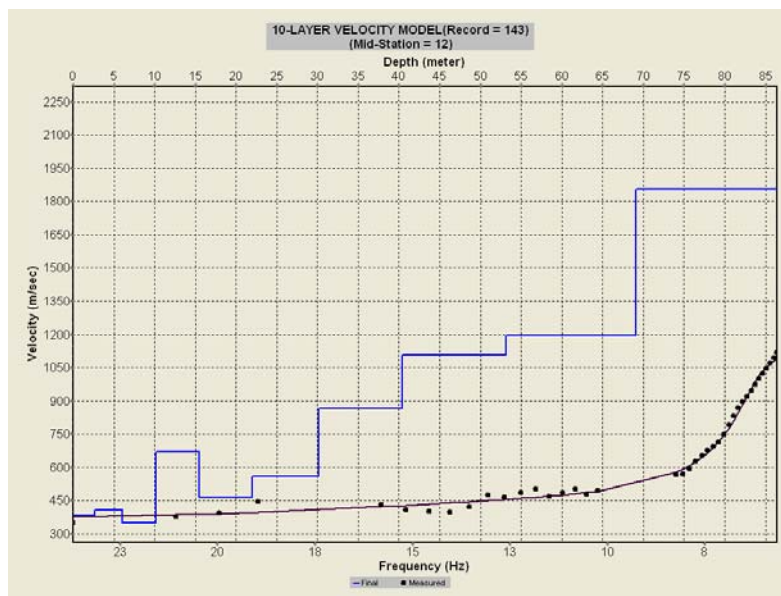


Columna de velocidades "S"

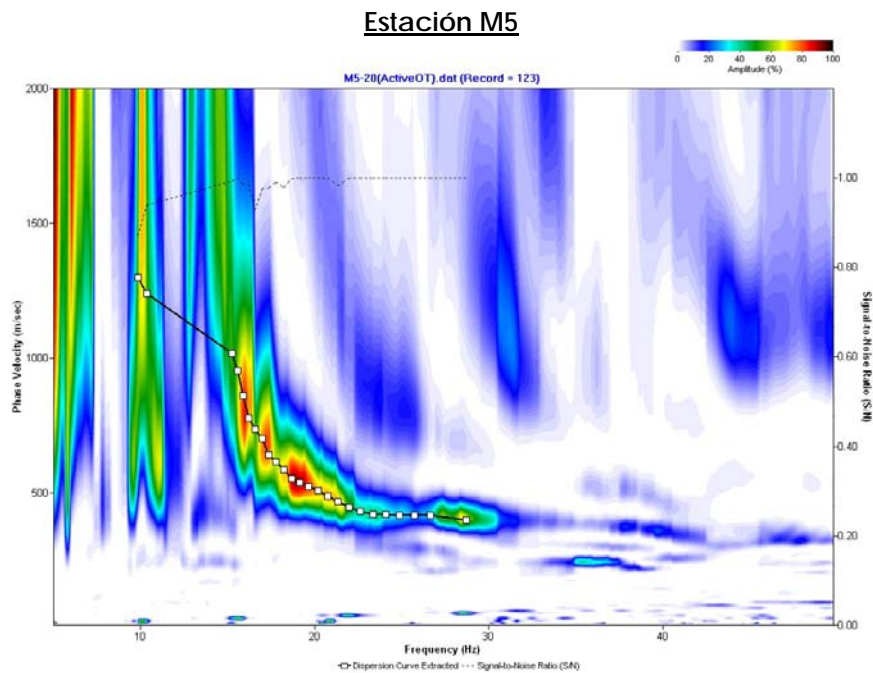
Estación M4



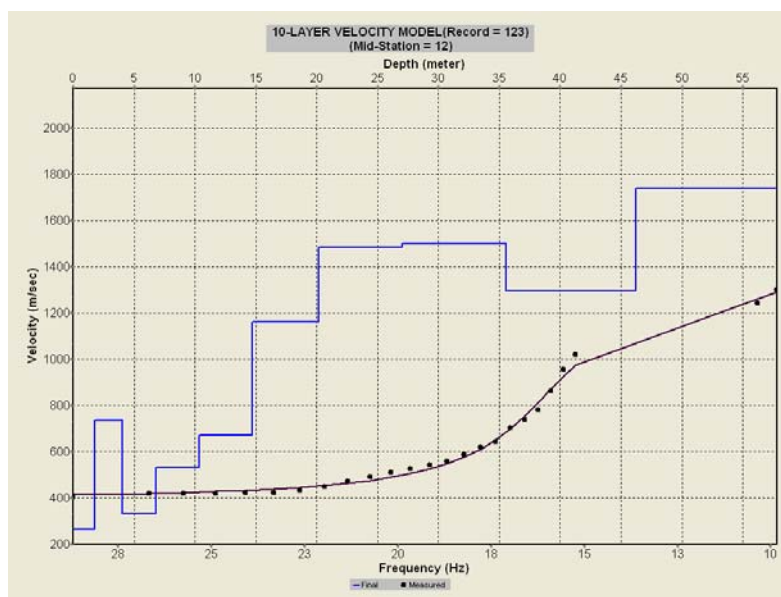
Análisis Overtone



Columna de velocidades "S"

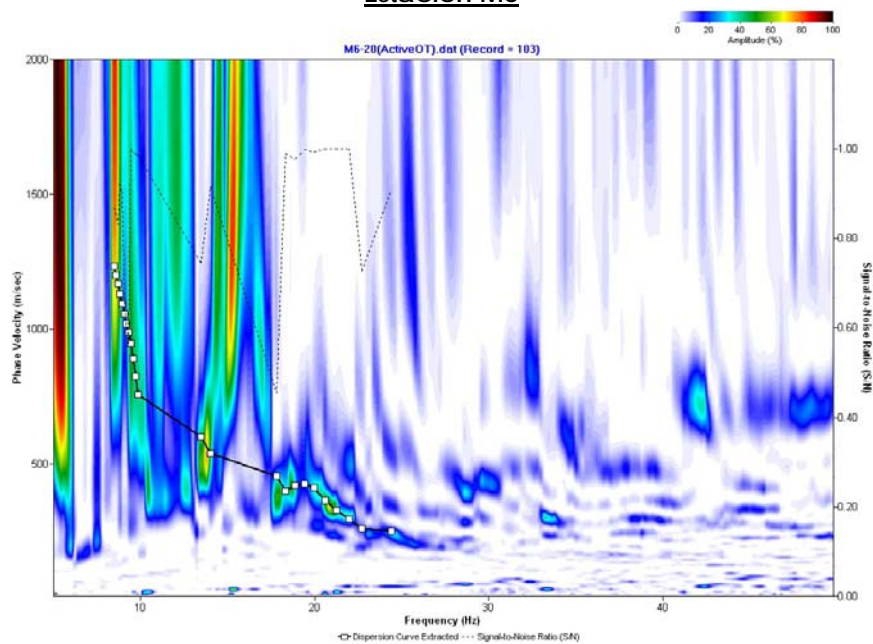


Análisis Overtone

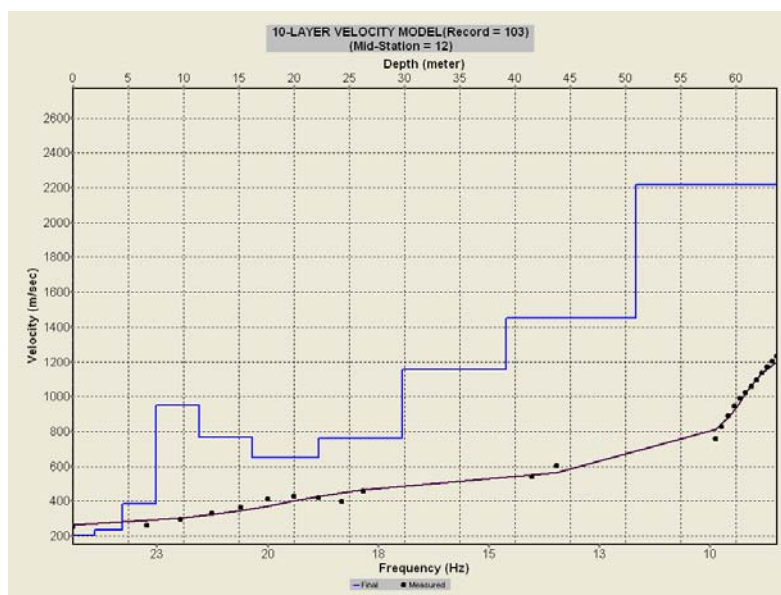


Columna de velocidades "S"

Estación M6

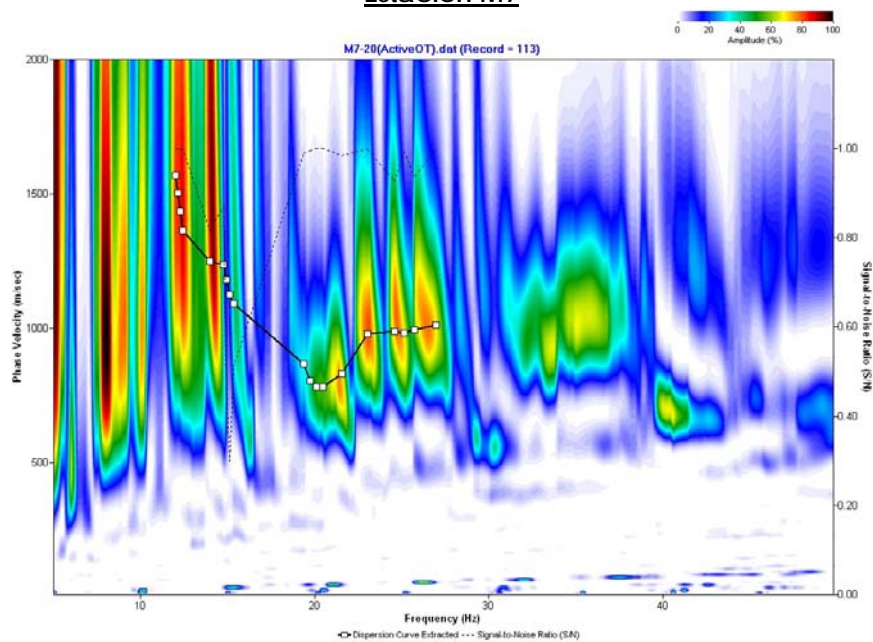


Análisis Overtone

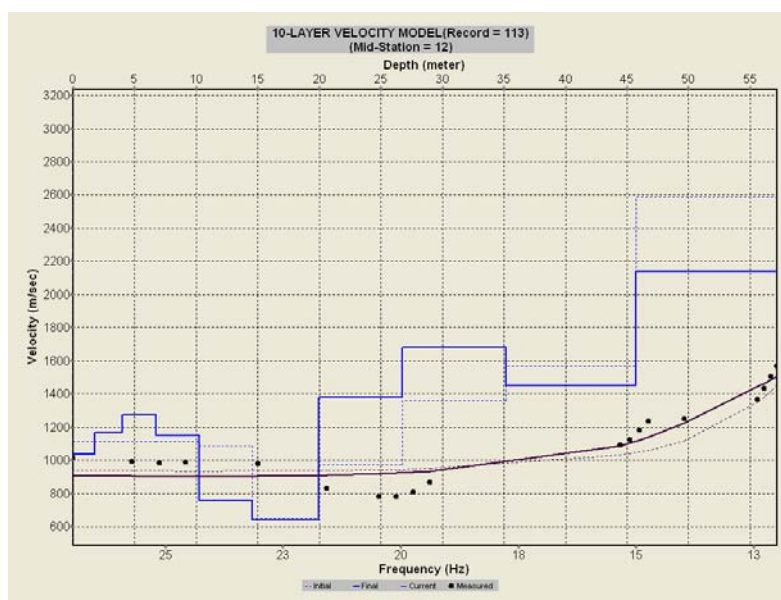


Columna de velocidades "S"

Estación M7



Análisis Overtone



Columna de velocidades "S"

Lima, 27 mayo 2008

José R. Arce Alleva

José E. Arce Helberg