

# INTERFEROMETRÍA SÍSMICA APLICADA EN EL ÁREA DE MANTARO-TABLACHACA

Bilha Herrera y Hernando Tavera

Instituto Geofísico del Perú-Dirección de Sismología  
Calle Badajoz 169, Mayorazgo, Ate-Perú  
bilha.herrera@igp.gob.pe

## INTRODUCCIÓN

Grandes y densas redes de estaciones sísmicas son comúnmente usadas para el monitoreo de terremotos en todo el mundo pero estas estaciones también registran ruido sísmico ambiental constantemente. Tradicionalmente, los sismólogos analizaban solamente las ondas de los terremotos o fuentes artificiales de energía que viajan a través de la Tierra, con el fin de hacer inferencias acerca de su estructura y propiedades físicas. Sin embargo, las ondas generadas por ruido ambiental (viento, olas del mar, actividad antropogénica, etc.), también viajan constantemente a través de la Tierra; por lo que muchos investigadores supusieron, que el ruido sísmico también debería contener información similar acerca del interior de la Tierra.

Antes del año 2003 no se sabía cómo extraer la información útil del subsuelo utilizando ruido ambiental. Hasta el surgimiento del método de interferometría sísmica (Campillo y Paul, 2003; Shapiro y Campillo, 2004, 2005; Wapenaar, 2004; Van-Manen et al., 2006; Wapenaar y Fokkema, 2006; Curtis et al., 2006; Nicolson et al., 2011).

Este método permite descifrar información contenida en las ondas del ruido ambiental para crear una señal útil, similar a la sísmica de reflexión, de hecho se obtiene un sismograma artificial de lo que solía ser llamado ruido. Este nuevo sismograma puede ser utilizado para obtener imágenes del subsuelo utilizando los métodos tradicionales como tomografía de imágenes. En la Figura 1 se muestra el ejemplo de la aplicación de este método utilizando datos de la red sísmica del sur de California.

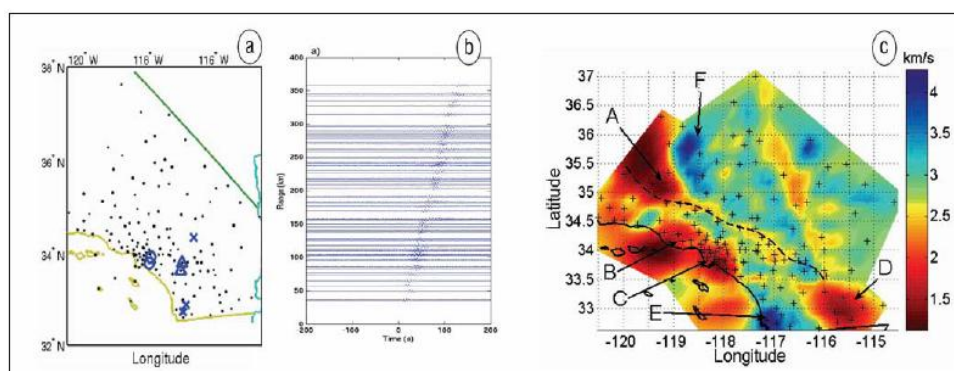


Figura 1. Aplicación de Interferometría sísmica en Baja California Sur. (a) Mapa con 150 estaciones de la red sísmica de California del Sur SCSN. (b) Registros generados por correlación cruzada de un mes de ruido ambiental. (c) Mapa de velocidad de grupo de ondas superficiales (Curtis et al. 2006).

En el presente estudio se aplica la técnica de Interferometría Sísmica en el área de Mantaro-Tablachaca usando seis meses de registro continuo de ruido sísmico ambiental registrado por 7 estaciones que integran la red sísmica local de Mantaro-Tablachaca (Enero-Junio del 2010).

## TEORÍA Y METODOLOGÍA

Interferometría sísmica es un método que permite caracterizar la propagación de ondas entre dos receptores, siendo posible extraer funciones de Green a partir del ruido sísmico ambiental, lo cual proporcionará información acerca del subsuelo. Una forma simple de explicar la interferometría

sísmica es considerando un análisis 1-D. En la Figura 2 se considera dos estaciones con vectores de coordenadas  $X_A$  y  $X_B$  separados por una distancia  $D$ . Estas estaciones registran señales  $X_A(t)$  y  $X_B(t)$  debido a fuentes de ruido existentes en el medio. Se denota  $X_S$  y  $t_B$  a la señal registrada y procedente de una fuente puntual  $X_S$ . La correlación cruzada entre  $t_A$ - $t_B$  puede escribirse como:

$$G(X_B, X_A, t) = G(X_B, X_S, t) * G(X_A, X_S, -t)$$

Donde  $G(X_B, X_A, t)$  es la respuesta (función de Green) que se propaga de  $X_A$  hacia  $X_B$ .  $G(X_B, X_S, t)$  es la respuesta observada en  $X_B$ ; el asterisco indica convolución temporal y  $G(X_A, X_S, -t)$  representa a la función de Green con inversión de tiempo en  $X_A$  que convierte la convolución en una correlación.

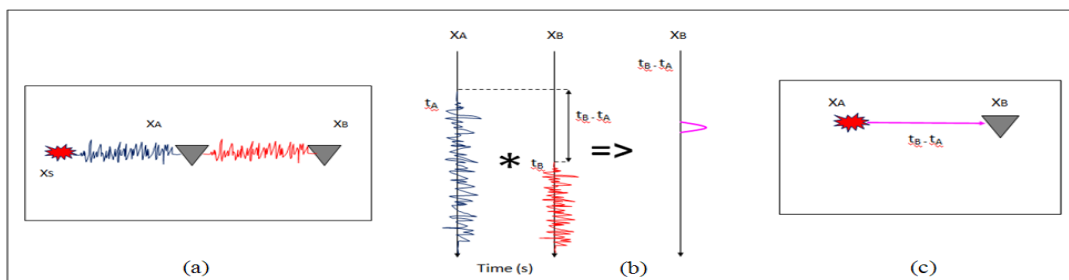


Figura 2. Esquema del principio de la correlación cruzada. (a) Propagación de una señal originada en la fuente  $X_S$  y registrada en dos receptores  $X_A$  y  $X_B$ . (b) Tiempo de arribo directo en  $X_A$ , y llegada dispersa en  $X_B$ ; la correlación cruzada simula una respuesta de reflexión en  $X_B$ . (c) La fase común de la trayectoria de rayo  $t_B - t_A$  será cancelada, entonces no es necesario conocer el tiempo de excitación o la localización de la fuente.

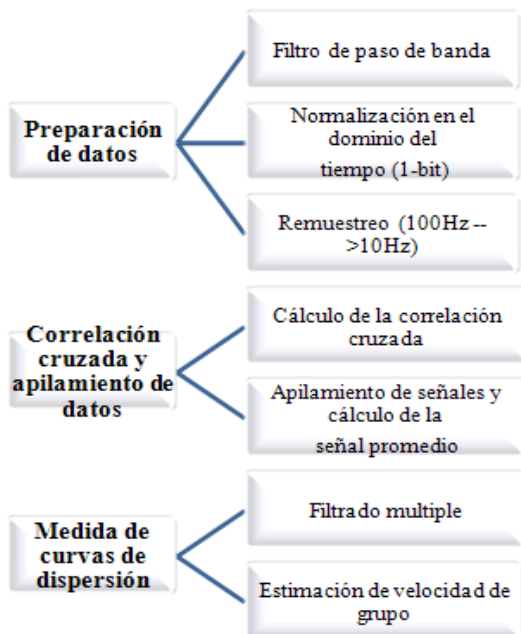


Figura 3. Esquema que resume la metodología de Interferometría sísmica.

Ahora, si se asume una superficie arbitraria cerrada  $\partial D$  que encierra a dos puntos de recepción  $X_A$  y  $X_B$  en un medio arbitrario e inhomogéneo, la representación de la teoría de la interferometría sísmica por correlación cruzada será:

$$2\Re\{G(\mathbf{x}_B, \mathbf{x}_A, \omega)\}S(\omega) \approx \frac{2}{\rho C p} \left\{ v_i^{obs}(\mathbf{x}_B, \omega) v_j^{obs*}(\mathbf{x}_A, \omega) \right\}$$

Donde  $\rho$  y  $C$  son la densidad de masa y la velocidad de propagación dentro y fuera del medio  $\partial D$ ,  $v_i^{obs}$  es la velocidad de la partícula, observado en uno de los puntos de recepción (Wapenaar et al. 2004; Van Manen et al. 2006).

Dentro de las características más importantes de este método es que puede ser aplicado en áreas asísmicas que cuenten con una densa cobertura de estaciones y usualmente puede resolver, con alta precisión, estructuras poco profundas, obteniéndose mejores resultados que con tomografía tradicional (Shapiro y Campillo, 2004).

La metodología seguida para el procesamiento de datos y obtención de las curvas de dispersión de velocidad de grupo, es el descrito por Bensen et al. (2007). En la Figura 3 se presenta el esquema que resume los principales pasos a seguir para la aplicación del método de Interferometría sísmica.

## ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

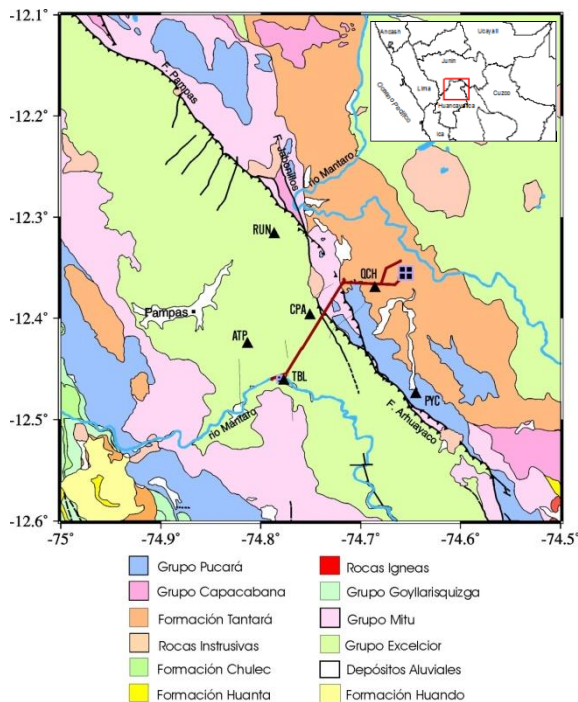


Figura 4. Mapa geológico y ubicación de la Red sísmica de Mantaro-Tablachaca

inverso como las fallas de Pampas y Arhuayaco; además de otra de tipo normal llamada Jabonillos, todas con orientación NO-SE.

La red sísmica de Mantaro-Tablachaca está compuesta de 7 estaciones (ver Tabla 1 y Figura 4), cada una equipada por un sensor Kinematic SS-I, de componente vertical y periodo corto con una respuesta máxima de 1Hz y un digitalizador ADQ de 16-bit. Los datos utilizados en el presente estudio, son registros de ruido sísmico ambiental obtenidos durante un período continuo de 6 meses (Enero - Junio del 2010) a una frecuencia de muestreo de 100Hz.

## PROCESAMIENTO DE DATOS

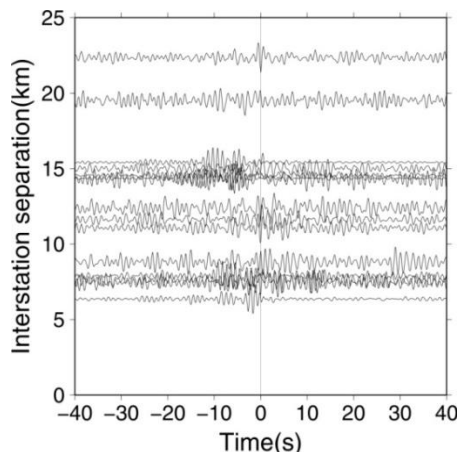


Figura 5. Seis meses de correlación cruzada calculada para 21 pares de estaciones. Las señales obtenidas se presentan como función de distancias entre las estaciones.

El área de Mantaro-Tablachaca, está ubicada en la provincia de Tayacaja, departamento de Huancavelica y aproximadamente a 100 km de la ciudad de Huancayo y 450 km de la ciudad de Lima. En esta área existe una red sísmica local, cuyo objetivo principal es vigilar la actividad sísmica que pueda afectar al complejo Mantaro-Tablachaca y su infraestructura; es decir, a la central hidroenergética del Mantaro que genera aproximadamente el 40% de la energía del Perú.

La topografía y morfología de la zona en estudio es accidentada con elevaciones entre 2,850 y 4,415 metros sobre el nivel del mar. Desde el punto de vista estratigráfico, las principales unidades presentes en la zona, en orden de antigüedad, son: depósitos detríticos recientes; el grupo Pucará; el grupo Mitu y Grupo Excelcior (ver Figura 4). También se identifican algunas rocas intrusivas, siendo la más importante el Granito Villa y el diorítico de Jabonillos.

Tabla 1. Estaciones de la red sísmica de Mantaro-Tablachaca

Código	Nombre de la estación
ATP	Atoccpunta
LLA	Llamahuaqui
TBL	Tablachaca
PYC	Poccyac
CPA	Carpapata
QCH	Quimsachumpi
RUN	Rundovilca

En el área de estudio se reconocen fallas de tipo

La correlación cruzada de ruido sísmico ambiental se calculó para 21 pares de estaciones que resultaron de la combinación de las 7 estaciones que conforman la red sísmica. Las distancias entre estaciones fluctúan entre 7 y 70 km. La corrección de la respuesta instrumental no fue necesaria porque se correlacionaron formas de onda con igual respuesta instrumental y este método permite eliminar la fase común entre ellas. Para evaluar la calidad de data y determinar la frecuencia dominante, se utilizó la descomposición espectral en el dominio de frecuencias haciendo uso de transformada de Fourier para cada estación.

A fin de eliminar la influencia de eventos de gran amplitud, como terremotos, irregularidades instrumentales, fuentes de ruido cerca de las estaciones, etc., se aplicó el método de normalización a 1 bit de la señal, es decir, retener

sólo el signo de la señal y reemplazar todas las amplitudes positivas con 1 y todas las negativas por -1.

Las señales obtenidas por correlación cruzada son adicionadas unas a otras, hasta lograr el apilamiento para cada par de estaciones como se muestra en la Figura 5.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

A las formas de onda obtenidas se les aplicó un filtro múltiple para el análisis de Tiempo-Frecuencia, con la finalidad de obtener la envolvente de la señal a un determinado período. En la Figura 6 se muestran ejemplos de resultados obtenidos para los pares de estaciones ATP-TBL y CPA-TBL, en las que se pueden observar en línea punteada la variación de la envolvente de la señal en función del período y tiempo.

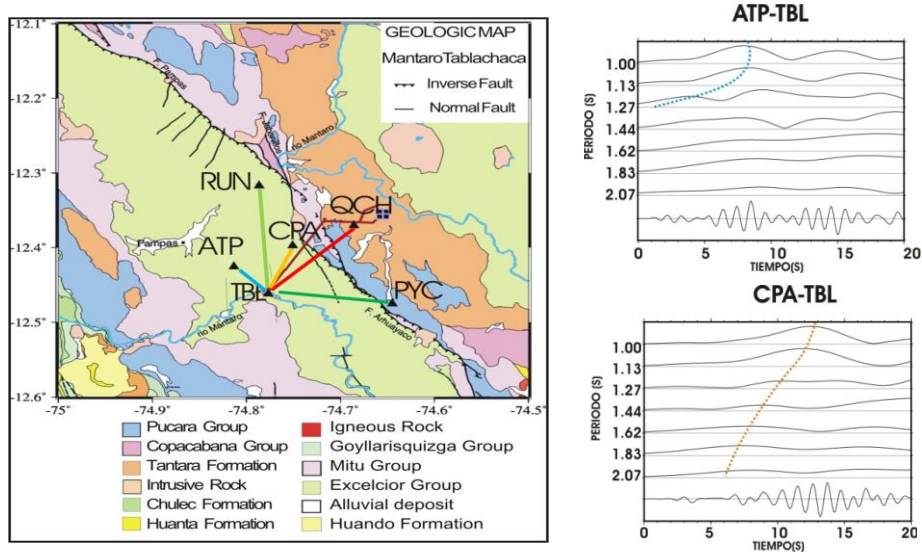


Figura 6. Resultados para el par de estaciones ATP-TBL y CPA-TBL. Las líneas punteadas indican la tendencia de la envolvente de la onda en función del período y tiempo.

Utilizando las figuras anteriores se obtienen curvas de dispersión para cada par de estaciones, las cuales se muestran en líneas sólidas en la Figura 7b. Las líneas punteadas representan curvas de dispersión de velocidad de grupo teóricas que fueron calculadas para zona del Mantaro utilizando el modelo 1D de velocidad de ondas P (Villegas et al., 2008) para la zona central de Perú y la razón de Poisson ( $V_p/V_s = 1.66$ ) calculado para la zona del Mantaro por Tavera y Pérez-Pacheco (1998); la línea punteada azul es la obtenida para el modelo de velocidad existente, mientras que las otras curvas teóricas fueron obtenidas considerando una capa de baja velocidad (1Km/s) y variando el espesor entre 100m y 500m.

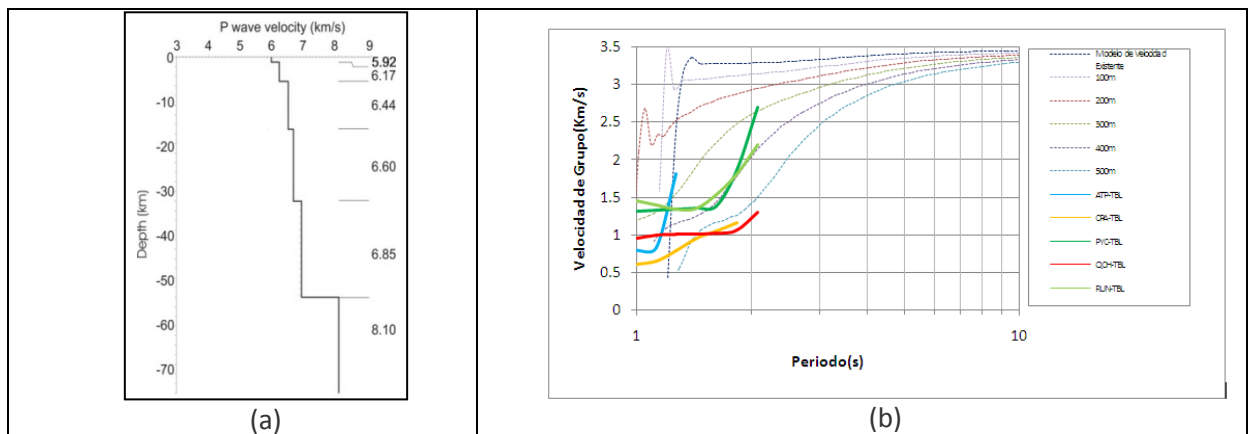


Figura 7. (a) Modelo de velocidad de onda P para el área central de Perú (Villegas, 2008). (b) Comparación entre las curvas de dispersión obtenidas aplicando interferometría sísmica a 6 meses de registros de ruido sísmico ambiental en las estaciones de la red sísmica del Mantaro (Líneas sólidas) y las curvas de dispersión teóricas generadas de un modelo preexistente para la zona (Líneas punteadas).

De la comparación de curvas calculadas y curvas teóricas, se puede observar que a periodos menores de 2s, la curva de dispersión teórica obtenida del modelo de velocidad propuesto por Villegas, 2008 no representa la estructura superficial de la zona de estudio. Los resultados obtenidos en este estudio sugiere la existencia de una capa sedimentaria de baja velocidad con un espesor variable entre 300m y 500m.

## CONCLUSIONES

Las funciones de Green en el dominio de tiempo fueron estimadas por correlación cruzada de 6 meses de registro continuo de ruido sísmico ambiental registrado por estaciones de período corto de la red sísmica del Mantaro de la zona central del Perú. La correlación cruzada se calculó para 21 pares de estaciones en una banda de frecuencias de 0.1-1Hz. Del apilamiento de señales obtenidas por correlación cruzada se adquirieron señales coherentes de ondas superficiales Rayleigh.

Las curvas de dispersión de la velocidad de grupo de las ondas Rayleigh se calcularon mediante un filtro múltiple para análisis de tiempo-frecuencia. Se calcularon curvas de dispersión teóricas a partir del modelo 1D de velocidad de ondas P existente para la zona centro del Perú, (Villegas, 2008), las cuales fueron comparadas con los resultados obtenidos en este estudio.

De la comparación de curvas calculadas y teóricas, se observa que para períodos menores a 2 segundos, la curva de dispersión teórica obtenida del modelo de velocidad propuesto por Villegas, 2008, no representa la estructura superficial en el área del Mantaro y este estudio sugiere la existencia de una capa sedimentaria de baja velocidad en la zona de estudio. Para lo cual se sugiere el análisis detallado de la estructura superficial de la zona, aplicando otros métodos geofísicos.

## REFERENCIAS

- Bensen, G.D., Ritzwoller M.H., Barmin, M.P., Levshin, A.L., Moschetti, M.P., Shapiro, N.M., and Yang, Y., 2007, Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophys.J.Int.*, 169, 1239–1260
- Campillo, M. and Paul, A., 2003, Long-range correlations in the diffuse seismic coda, *Science*, 299, 547–549
- Curtis, A., Gerstoft, P., Sato, H., Snieder, R. & Wapenaar, K., 2006, Seismic interferometry: turning noise into signal, *Leading Edge*, 25(9), 1082–1092
- Shapiro, N.M. and Campillo, M., 2004, Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L07614, doi:10.1029/2004GL019491
- Shapiro, N.M., Campillo, M., Stehly, L. and Ritzwoller, M.H., 2005, High resolution surface wave tomography from ambient seismic noise, *Science*, 307, 1615–1618
- Tavera, H. y Perez-Pacheco, Y., 1998, Actividad sísmica de la Cuenca del Mantaro. Informe Técnico – Trimestre I – 1998. Convenio Electroperú – IGP
- Wapenaar, K., 2004, Retrieving the elastodynamic Green's function of an arbitrary inhomogeneous medium by cross correlation, *Phys. Rev. Lett.*, 93, 254-301
- Wapenaar, K. & Fokkema, J., 2006. Green's function representations for seismic interferometry, *Geophysics*, 71(4), SI33–SI46.
- Van Manen, D.J., Curtis, A. and Robertsson, J.O.A., 2006, Interferometric modelling of wave propagation in inhomogeneous elastic media using time-reversal and reciprocity, *Geophysics*, 71(4), SI47–SI60.
- Villegas, J. C. y Tavera, H., 2008, Modelos de velocidad 1D para las regiones Norte, centro de Perú obtenidos a partir de datos de sismicidad local: Una contribución para mejorar la precisión en el cálculo de localización de sismos. XIII Congreso Latinoamericano de Geología. XIV Congreso Peruano de Geología, Lima – Perú (Octubre 2008).