

## **Evaluación de la Respuesta del Suelo en Camaná, Atico y Chala a partir de las Réplicas del Terremoto del 23 de Junio de 2001**

*Luis Vilcapoma, Henry Salas y Hernando Tavera  
Centro Nacional de Datos Geofísicos*

### **Resumen**

*En este trabajo se presenta los resultados obtenidos del análisis realizado sobre el contenido de frecuencias observadas en las estaciones acelerográficas instaladas en Chala, Atico y Camaná (Departamento de Arequipa), a partir del registro de 13 réplicas del terremoto del 23 de Junio de 2001. Los resultados sugieren que para las componentes horizontales, el suelo de Atico es mas consolidado que el de Camaná; mientras que, para la componente vertical el de Camaná es más estable. Asimismo, el suelo en la estación de Chala muestra mayor rigidez que el de Atico. La mayor aceleración registrada corresponde a una réplica de magnitud ML=4.9, siendo esta de 232 gals en la estación de Camaná.*

### **Abstract**

*In this paper we present the results of the analysis of the frequency content observed in the strong-motion stations installed in Chala, Atico and Camana city (Arequipa), based on the records corresponding to 13 aftershocks of the June 23, 2001 earthquake. The results suggest that for the horizontal components, the ground in Atico is more stable than that in Camana, while, for the vertical components, the ground in Camana is more stable. Also, the ground in Chala station shows more consolidated than that in Atico. The largest recorded acceleration corresponds to an aftershock of ML magnitude 4.9, is of 232 gals in Camana station.*

### **Introducción**

El 23 de Junio del 2001 a las 20:33 (GMT), ocurrió un fuerte terremoto de magnitud 6.9 en la escala de Richter y epicentro localizado en las coordenadas 16.20° S y 73.75° W; es decir, a 82 km al NW de la localidad de Ocoña (Tavera et al, 2001). Este terremoto se sintió fuertemente en la región Sur del país y causó daños graves en los departamentos de Ayacucho, Arequipa, Moquegua y Tacna produciendo la muerte de 77 personas y 2713 heridos según informe de Defensa Civil. En general, el tipo de daño causado por este terremoto en las distintas localidades y ciudades se debió básicamente al tipo de suelo y a la calidad de las construcciones predominantes en toda la región Sur de Perú.

Posterior al terremoto del 23 de Junio, se realizó la instalación de siete acelerógrafos en la región Sur de Perú a fin de monitorear las réplicas de este terremoto. Las señales correspondientes a ocho y cinco replicas registradas en las estaciones de Camaná, Atico y Chala son utilizados para analizar y evaluar el contenido frecuencial característico del tipo de suelo de cada estación. Estos parámetros son de importancia para los estudios de ingeniería orientados a la construcción de viviendas y otras obras de

gran envergadura. En la Tabla 1 se presenta las características de las estaciones y en la Figura 1 su ubicación geográfica. Las réplicas utilizadas tienen sus epicentros en el Océano Pacífico frente a la ubicación de las estaciones de Camaná, Chala y Atico; por lo tanto, el análisis del contenido frecuencial que se realiza en este estudio es válido al considerarse el registro de sismos netamente locales, ya que de esta manera se evitaría la influencia del medio, tal como sugiere Seed et al, (1969).

**Tabla 1**  
*Parámetros y características de los acelerógrafos utilizados en este estudio*

Estación	Latitud Sur	Longitud Oeste	Altitud msnm	Tipo de Sensor	Sensibilidad	Tipo de Suelo
Atico	16.22°	73.61°	64	Altus	0.25 g	Grava
Camaná	16.62°	72.71°	66	Altus	0.25 g	Aluvial
Chala	15.86°	74.24°	52	Altus	0.25 g	Roca

### **Ubicación de las Estaciones Acelerográficas**

Las estaciones acelerográficas instaladas en las localidades de Chala, Atico y Camaná son digitales de tres componentes (N-S, E-W, Z) y sensor del tipo Altus con una sensibilidad de registro de 0.25 g (Tabla 1). Para la instalación de estos acelerógrafos se tuvo en cuenta principalmente el tipo de suelo y la seguridad de los equipos. Los puntos seleccionados fueron:

**Estación de Chala.** Esta estación se instaló sobre una losa de concreto en el interior del Hotel "Evertyh" ubicado a 1 km al norte de la Municipalidad de Chala. El hotel se encuentra construido sobre suelo rocoso a orillas del mar. En general, el suelo de la localidad de Chala pertenece al Jurásico Inferior (Mesozoico) y muestra afloramientos que descansan de manera discordantemente sobre rocas del grupo Tarma, además de estar constituido por arenisca, conglomerados y brechas andesíticas. La base de estas estructuras no es visible debido a que se pierde en el mar e infrayacen concordantemente a los volcánicos del miembro Lucmilla (Olchauski 1980).

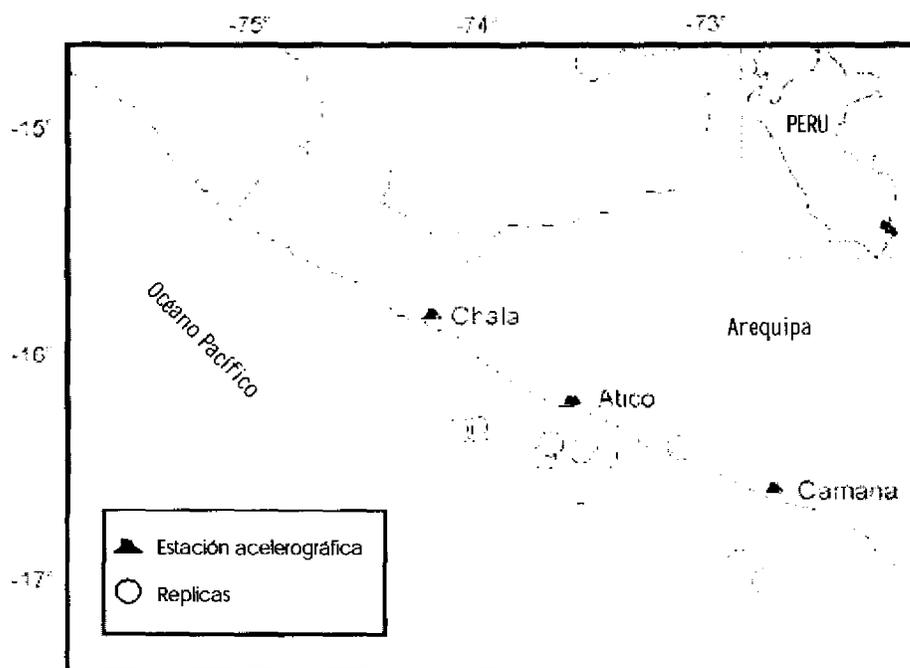


Figura 1. Ubicación de las estaciones acelerográficas y distribución de las replicas del terremoto del 23 de Junio de 2001 utilizadas en este estudio según Antayhua et al. (En este informe).

**Estación de Atico.-** La estación fue instalada en una losa en el interior de la Municipalidad de Atico, la misma que se encuentra construida sobre un material compuesto por grava. La ciudad de Atico se encuentra ubicada sobre material formado por terrazas aluviales, depósitos eólicos y de talud de la era Cuaternaria reciente (Bellido et al., 1960). En general, estos depósitos no tienen mucho espesor y descansan directamente sobre rocas gnéissicas.

**Estación de Camaná.-** Esta estación fue instalada en el interior de la Municipalidad de Camaná y encima de una losa construida sobre depósitos aluviales. El suelo de la localidad de Camaná pertenece al Cuaternario reciente y esta compuesto por depósitos fluviales formados por conglomerados y gravas de textura y composición variable mezclado con arenas y arcillas (Pecho et al., 1969). En general, se observa la presencia de depósitos aluviales muy extensos que forman planicies a manera de terrazas en algunos valles o abanicos deyectivos compuesto por arcillas, arenas, cenizas, conglomerado y gravas en matriz arenosa.

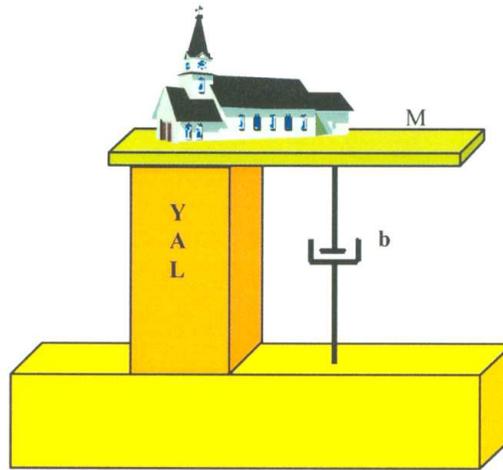


Figura 2. Sistema unidimensional de oscilación amortiguada de una masa  $M$  ligada a una barra con módulo de Young  $Y$ , área  $A$ , longitud  $L$ , y amortiguamiento  $b$ .

### Análisis Dinámico del Suelo

A fin de explicar el comportamiento del suelo ante un elemento perturbador como la ocurrencia de un terremoto es necesario considerar, de acuerdo a la Figura 2, la ecuación diferencial para un oscilador armónico compuesto por una barra cuyo material ( $M$ ) es definido por su módulo de Young ( $Y$ ), con una área transversal ( $A$ ) de longitud arbitraria ( $L$ ) y con una determinada constante de amortiguamiento ( $b$ ). La masa ( $M$ ) que oscila debido a una perturbación instantánea puede ser definida por la siguiente ecuación diferencial,

$$\ddot{x} + \frac{b}{M}\dot{x} + \frac{YA}{ML}x = 0$$

donde:

$$2\gamma = \frac{b}{M}, \quad w_o = \sqrt{\frac{YA}{ML}}, \quad \text{con } w^2 = w_o^2 - \gamma^2 \quad \text{y} \quad w = \frac{2\pi}{T}$$

De estas relaciones se deduce que,

$$T = \frac{8\pi M^2 L}{4MYA - b^2 L}$$

Esta relación muestra que el periodo de oscilación (T) de la masa (M) depende únicamente del módulo de Young (Y); es decir, de la elasticidad del terreno que es afectado por una perturbación, en este caso, por un terremoto.

### **Espectros de Respuesta**

Tal como se describió anteriormente, el periodo de oscilación de una determinada masa, en este caso una ciudad o localidad, va a depender de las propiedades físicas del suelo o material en la que descansan; por lo tanto, al disponerse de los registros de vibración del suelo de un determinado punto, es posible conocer la frecuencia máxima a la que ha sido sometido el terreno y calcular su periodo (T) de vibración. Este valor puede ser utilizado para compararse con los periodos de oscilación de otras ciudades afectadas por el mismo sismo.

La transformada de Fourier es aplicada a un total de 8 registros de aceleración correspondientes a las réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001 obtenidos de los acelerógrafos instalados en las localidades de Camaná, Chala y Atico (Tabla 1). Una vez obtenido el espectro amplitud-frecuencia, se procede a analizar el contenido frecuencial de la señal a fin de identificar el valor de la frecuencia equivalente a la máxima amplitud de la señal en aceleración. Los resultados son presentados en términos de periodos (T) de oscilación en la Tabla 2 para el binomio Camaná-Atico y en la Tabla 3 para Chala-Atico. Asimismo, algunos ejemplos de los espectros obtenidos se muestran en las Figuras 3 y 4.

### ***Estaciones de Camaná y Atico***

Para realizar la correlación de los periodos predominantes entre las estaciones de Camaná y Atico se utilizaron 8 réplicas del terremoto del 23 de Junio con magnitudes que oscilan entre 3.1 a 4.9  $M_L$ , todas con epicentros en el océano y ubicadas entre estas

dos localidades. La réplica de mayor magnitud (4.9  $M_L$ ), provocó una aceleración máxima de 84 gals en la estación de Camaná; mientras que, en la estación de Atico fue de 232 gals. Esta diferencia es debido a que el epicentro de la réplica estuvo mucho más cerca de la estación de Atico.

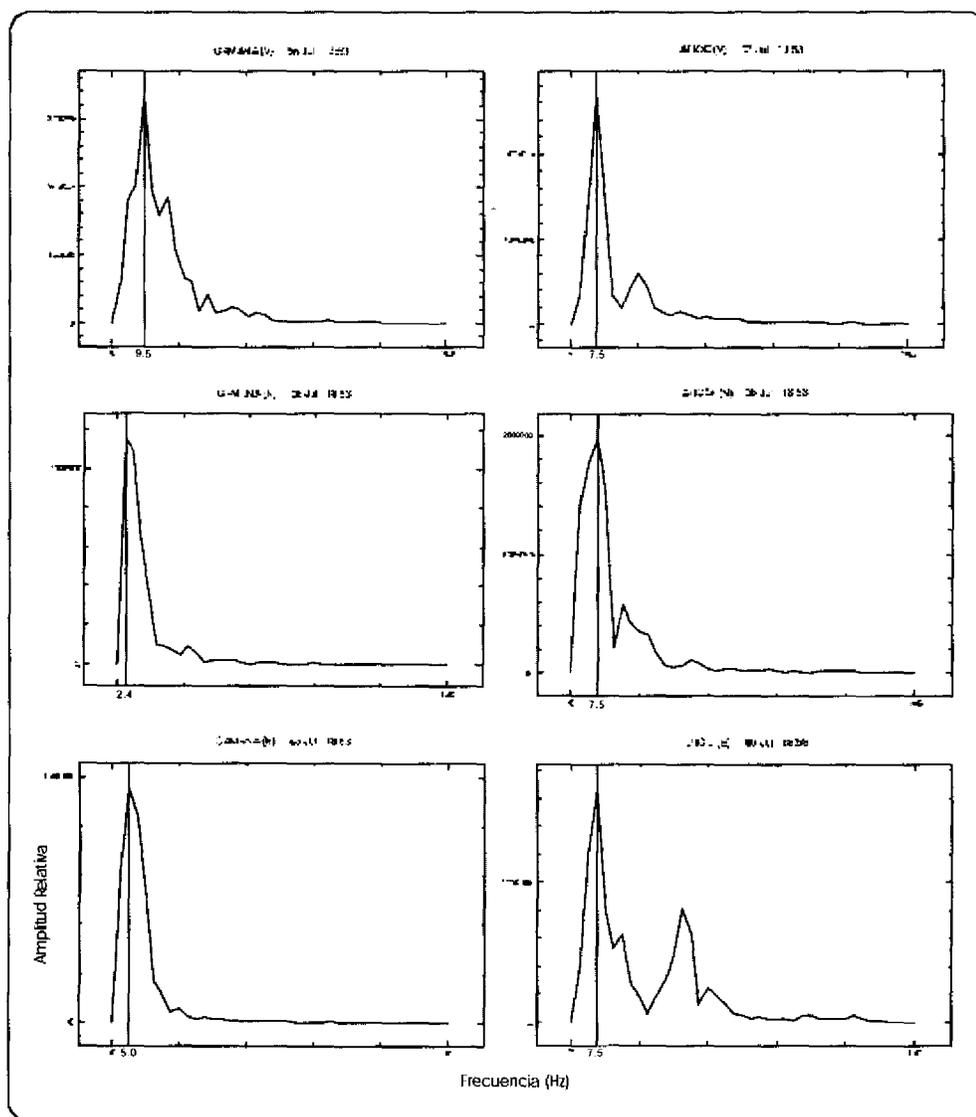


Figura 3. Espectros de amplitud-frecuencia para las estaciones Camaná y Chala.

En la Figura 3 se presenta el espectro correspondiente a la réplica de mayor magnitud ( $M_L=4.9$ ) y en ella se observa que la frecuencia correspondiente al pico máximo de amplitud, medida en las componentes horizontales (N-S, E-W) de la estación de Atico, es mayor a las obtenidas para la estación de Camaná; sin embargo, para la componente vertical la frecuencia en la estación de Camaná supera a la registrada en la estación de Atico. Este mismo patrón se repite en los registros correspondientes al resto de las réplicas analizadas. Estos valores sugieren que en las componentes horizontales (N-S, E-W), los periodos de oscilación que soportó el suelo de la estación de Atico fueron menores al de Camaná; mientras que, en la componente vertical (Z), los periodos de oscilación en Atico superan a los de Camaná, tal como se observa en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Periodos (T) predominantes en las tres componentes de registro de las estaciones acelográficas de Camaná y Atico correspondientes a ocho réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.*

Fecha y Hora	CAMANA			ATICO		
	Norte T (s)	Vertical T (s)	Este T (s)	Norte T (s)	Vertical T (s)	Este T (s)
03 Jul 23:34	0.213	0.060	0.213	0.080	0.100	0.133
04 Jul 19:21	0.105	0.060	0.141	0.100	0.133	0.133
05 Jul 08:19	0.213	0.084	0.141	0.105	0.105	0.105
05 Jul 12:02	0.400	0.100	0.400	0.100	0.105	0.084
05 Jul 13:53	0.417	0.105	0.200	0.133	0.133	0.133
05 Jul 16:44	0.139	0.105	0.105	0.100	0.208	0.100
05 Jul 18:08	0.141	0.084	0.141	0.105	0.133	0.105
06 Jul 09:21	0.141	0.081	0.208	0.105	0.141	0.105

#### Estación de Chala y Atico

Para evaluar la respuesta del suelo en las estaciones de Chala y Atico se ha utilizado 5 réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio con magnitudes que oscilan entre 2.8 a 4.0  $M_L$ , todas distribuidas entre las dos estaciones y frente a la línea

de costa. El valor de aceleración máxima registrada en la estación de Chala fue de 4.5 gals; mientras que, en la estación de Atico fue de 7.3 gals.

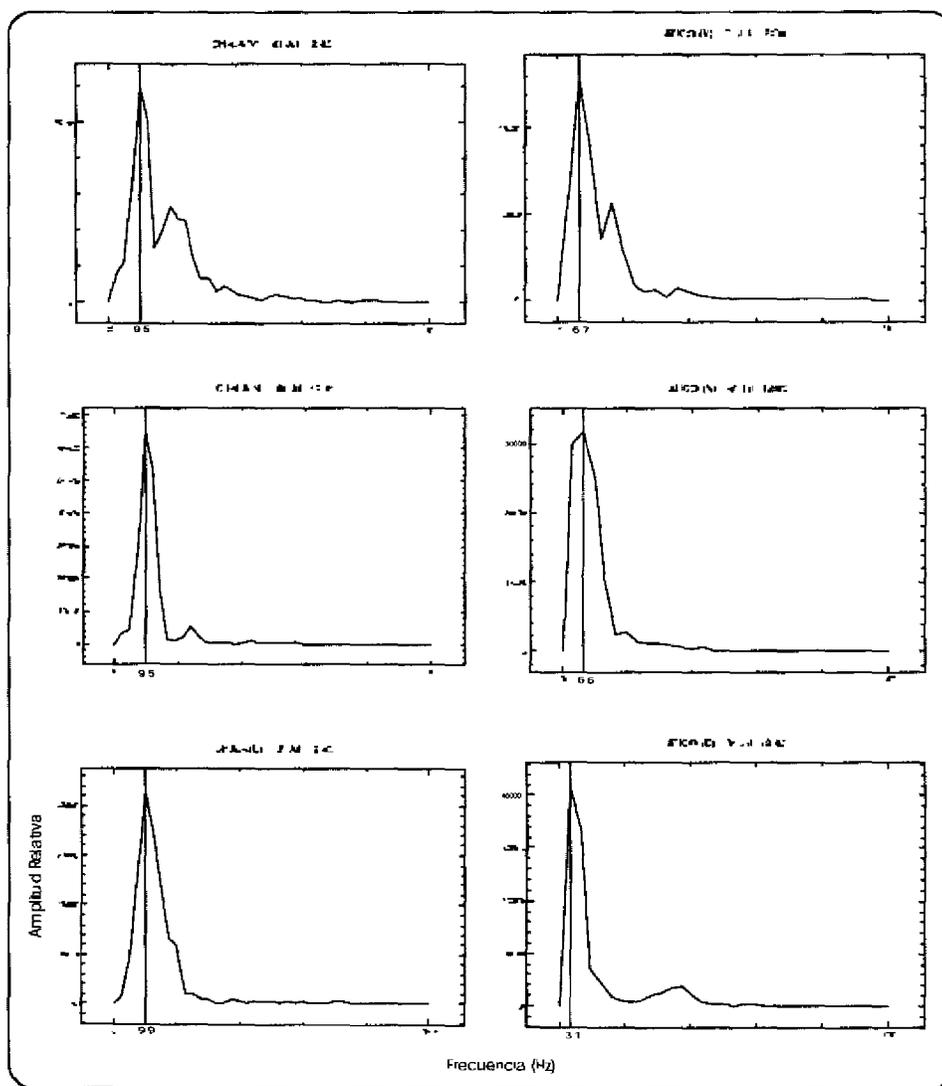


Figura 4. Espectros de amplitud-frecuencia para las estaciones Chala y Atico .

En la Figura 4 se puede observar que los valores de las frecuencias correspondientes a la máxima amplitud del registro de aceleración en la estación de Chala son preferentemente mayores a las registradas en la estación de Atico (componentes V, N-S, E-W). Los resultados obtenidos para las 5 réplicas muestran que los periodos de oscilación del suelo en la estación de Atico fueron mayores que los registrados en la estación de Chala (Tabla 3).

**Tabla 3**

*Periodos (T) predominantes en las tres componentes de registro de las estaciones acelerográficas de Chala y Atico correspondientes a cinco réplicas del terremoto de Arequipa del 23 de Junio de 2001.*

Fecha y Hora	CHALA			ATICO		
	Norte T (s)	Vertical T (s)	Este T (s)	Norte T (s)	Vertical T (s)	Este T (s)
28 Jun 08:24	0.077	0.070	0.070	0.080	0.080	0.081
29 Jun 00:07	0.100	0.080	0.101	0.133	0.133	0.133
29 Jun 18:26	0.133	0.133	0.133	0.084	0.208	0.141
01 Jul 12:40	0.105	0.105	0.101	0.151	0.149	0.322
01 Jul 15:28	0.080	0.067	0.080	0.200	0.182	0.200

### Resultados

La topografía del terreno y su constitución física influye significativamente en la intensidad del movimiento sísmico observado en superficie, pudiendo producir un efecto amplificador o atenuador de la energía irradiada por el sismo. En todo caso, son las constantes elásticas del medio las que controlan el comportamiento del suelo ante un elemento perturbador pudiendo observarse casos de anisotropía cuando la respuesta del terreno no es homogénea en sus tres direcciones como se observa en la estación de Camaná.

La frecuencia característica correspondiente a la máxima amplitud del registro de aceleración en las estaciones de Camaná y Atico indican que el suelo en la estación de Atico es relativamente más consolidado que el de Camaná, siendo esta apreciación

coherente con su composición litológica. Los valores para los periodos de oscilación en la estación de Camaná son mayores en su componente N-S (entre 0.105 a 0.417 segundos); mientras que en la estación de Atico, estos son mayores en la componente Vertical (entre 0.100 a 0.208 segundos).

Del mismo modo, los resultados obtenidos para las estaciones de Chala y Atico permiten suponer que la rigidez del suelo en la estación de Atico es relativamente menor en comparación con el de Chala. Los periodos en las tres componentes de la estación de Chala son similares y fluctúan entre 0.070 a 0.133 segundos; mientras que, en la estación de Atico el periodo varía entre 0.081 a 0.322 segundos.

Si el suelo de las estaciones representase el comportamiento dinámico de la ciudad, entonces los periodos predominantes identificados en este estudio (menor a 0.5 segundos) sugieren que las viviendas de 1 a 4 pisos recibieron la mayor cantidad de energía durante la ocurrencia de las réplicas del terremoto del 23 de Junio. Se ha encontrado concordancia entre los valores de periodo máximo identificado en cada estación con las características físicas de su suelo. Además, existe una relación de estos periodos predominantes en cada estación y los niveles de intensidad y daños producidos por el terremoto del 23 de Junio del 2001 en las localidades de Chala, Atico y Camaná.

### **Bibliografía**

Bellido et al., (1960). Geología del cuadrángulo de Atico (hoja 33-o), Carta Geológica Nacional del Perú.

Olchanski, (1980). Geología del cuadrángulo de Chala (hoja 32-ñ), Instituto Geológico Minero y Metalúrgico del Perú.

Pecho et al., (1969). Geología de los Cuadrángulos de Camaná y la Yesera, Bol. N° 21, Servicio de Geología y Minería del Perú.

Seed et al., (1969) Characteristics of rock motions during earthquakes, Journal Soil Mechanics and Foundations Division, Asce Vol. 95, No. SM5, September 1969.