$$F(S) = \frac{S^2}{(S - S_0)(S - S_1)}$$

Que algebraicamente podemos llegar a la expresión de los polos del sistema  $(S_i)$  de la forma:

$$S_{i} = \omega_{n} \left( \beta \pm j \sqrt{\beta^{2} - 1} \right)$$

Por lo tanto, el sismómetro queda definido por dos ceros (raíces que hacen cero la función) y dos polos imaginarios (raíces que hacen indeterminada la función) y estos factores son necesarios para realizar la corrección instrumental de las señales registradas.

#### Sensibilidad

Debido al comportamiento frecuencia-dependiente del sismómetro, la respuesta es diferente para cada frecuencia y dependiente del amortiguamiento. Para conocer estas variaciones es posible calcular la "magnificación" que consiste en calcular la magnitud de la expresión de la función de transferencia del sensor.

Partiendo de la Ecuación de la Función de transferencia del sensor

$$F(s) = \frac{S^2}{S^2 + 2\beta\omega_n S + \omega_n^2}$$

es posible hacer un análisis en el dominio de la frecuencia si evaluamos la expresión en su equivalente (S = JW) (teniendo en cuenta que S es la variable compleja de Laplace, en el campo de los números imaginarios y función de la frecuencia), donde:

J = base de los números Imaginarios  $(t = \sqrt{-1})$ 

W = Frecuencia a la que se va a evaluar la función.

Si S = JW, tenemos:

$$F(JW) = \frac{(JW)^2}{(JW)^2 + 2\beta\omega_n(JW) + \omega_n^2}$$

Como  $\left(\sqrt{-1}\right)_{=-1}$  entonces:

$$F(JW) = \frac{-W^2}{-W^2 + 2\beta\omega_n(JW) + \omega_n^2}$$

si  $F_{(JW)}$  se encuentra dentro del dominio de los números imaginarios, se puede decir que  $F_{(JW)}$  tiene la forma general:



Expresando  $F_{(JW)}$  de esta forma, podremos calcular su Magnitud (que se notará como |F(JW)|) y el ángulo de fase ( $\theta$ ), ya que:

La magnitud estará dada por:  $\left|F_{(,nr)}\right| = \sqrt{a^2 + b^2}$ 

y el ángulo de fase, será:  $\theta = \tan^{-1} \left( \frac{b}{a} \right)$ 

Para la expresión

$$F(JW) = \frac{-W^2}{(\omega_n^2 - W^2) + (2\beta\omega_n(W))J}$$

El valor de magnificación está dado por

$$F(JW) = K * \frac{W^2}{\sqrt{(\omega_n^2 - W^2)} + (2\beta\omega_n(W))^2}$$

Expresión con la cual es posible obtener el valor de magnificación de la respuesta de la estación a una frecuencia W dada. Nótese que se incluye además el valor de la constante de normalización (factor de ganancia total) para realizar la normalización completa de la medida.

#### Sistema de amplificación

La señal enviada por el sismómetro (del orden de milivoltios) es amplificada para poder ser transmitida. Para tal fin, existe un amplificador de 90 dB y después de este, hay un atenuador variable en saltos de 6 dB de tal forma, que conectados en cascada, permiten tener una ganancia que varía de 90 dB (máximo) hasta 42 dB (mínumo). Los cálculos de ganancia pueden realizarse utilizando factores Logarítmicos (en dB) o factores lineales (G). La diferencia, es que en el primer caso (dB) tenemos factores cuya resultante final (ganancia total) corresponde a la suma de las ganancias de cada uno de los elementos, mientras que la resultante de los factores lineales, resulta de multiplicarlos. La equivalencia entre éstos está dada por la expresión

$$G_{(dB)} = 20 \ Log \ [G_L]$$

La tabla 2 resume los valores posibles resultantes, dada la configuración de los equipos utilizados.

#### Factor de ganancia o constante de normalización (k)

La ganancia total del sistema está dada por varios factores que pueden afectar la amplitud de la señal original desde que ésta es capturada por el sensor (movimiento) hasta que es registrada ya sea en un sistema analógico de registro o un computador. Los principales efectos a considerar son el factor de transducción del sensor, la resistencia interna de la bobina, la resistencia de amortiguamiento, la amplificación de la tarjeta de telemetría, el factor de atenuación de la telemetría, factor de los filtros

Atenuación en Decibeles	Ganancia en Decibeles	Ganancia "Lineal"
0	90	31622.78
6	84	15848.93
12	78	7943.28
18	72	3981.07
24	66	1995.26
30	60	1000.00
36	54	501.19
42	48	251.19
48	42	25.89

Tabla 2. Valores de ganancia (en decibeles y lineal) posibles de obtener en el sistema de amplificación utilizados en la red de estaciones sísmicas en el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional.

y la constante del sistema de registro (ya sea la relación voltios a cuentas del sistema digital o voltios a desplazamiento de la aguja del sistema analógico).

La constante de normalización total del sistema (K) está dada por la multiplicación de los factores de ganancia de cada elemento del sistema (en caso de ganancias lineales) o en su defecto, la suma de los mismos (para el caso de ganancias expresadas en escala logarítmica (dB)) y se expresa como:

$$K = G_0 * C_{fillro} * C_{reg} * \frac{R_X}{R_X + R_C} * 10^{\frac{90 - A}{20}}$$

Donde Go corresponde a la transducción del sismómetro,  $C_{filtro}$  corresponde a la constante del filtro Butterworth,  $C_{Reg}$  corresponde a la constante del sistema de registro (analógico o digital),  $R_x$  la resistencia de amortiguamiento ( $\Omega$ ),  $R_c$  es la resistencia de la bobina del sensor y A factor del atenuador (90 corresponde a la amplificación de la señal).



Figura 6. Configuración de un filtro activo generalizado.

$$\frac{\frac{V_1(s) - V_A(s)}{Z1} + \frac{V_2(s) - V_A(s)}{Z2} + \frac{V_2(s) - V_A(s)}{Z3} = 0}{\frac{V_2(s)}{Z4} + \frac{V_2(s) - V_A(s)}{Z3} = 0}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones formado podemos tener una expresión general para la función de transferencia (FT) del filtro G(s) en función de las impedancias Z1, Z2, Z3 y Z4, siendo:

$$G(s) = \frac{Salida}{Entrada} = \frac{V_2(s)}{V_1(s)} = \frac{1}{Z1 * \left(1 + \frac{Z2}{Z4}\right) * \left(\frac{1}{Z1} + \frac{1}{Z2} + \frac{1}{Z3}\right) - \left(\frac{1}{Z3} + \frac{1}{Z2}\right)}$$

#### Filtros

En las tarjetas utilizadas en la red de estaciones del Instituto Geofísico existen filtros tanto pasa altos como pasa bajos. La configuración general que se adapta a un filtro activo se encuentra en la figura 6.

Para el cálculo de la función de transferencia G(s) del filtro indicado en la figura 6 podemos suponer que V<sub>1</sub>(S) y V<sub>2</sub>(S) son las transformadas de Laplace de los voltajes de entrada y salida V<sub>1</sub>(t) y V<sub>2</sub>(t) así como V<sub>A</sub>(S) y V<sub>B</sub>(S) son las correspondientes transformadas de los voltajes V<sub>A</sub>(t) y V<sub>B</sub>(t) en los puntos A y B del circuito. Por otra parte, dada la configuración del amplificador operacional (seguidor de emisor) podemos asumir que el voltaje en el nodo B es V<sub>2</sub>(t). Con esta aproximación y estableciendo que la suma de las corrientes en los nodos A y B son nulas, se obtiene: Con esta expresión general de la función de transferencia de los filtros es posible construir pasa-bajos o pasa-altos dependiendo de la configuración de las impedancias.

#### Filtro pasa altos

Para los filtros pasa altos utilizados, los valores de las impedancias están relacionados como:

$$Z1 = Z2 = \frac{1}{SC}; \quad Z3 = R1; \quad Z4 = R2$$

Siendo R1 y R2 los valores de dos resistencias en Ohmios y C el valor de los condensadores en faradios. Sustituyendo estos valores en la ecuación general de la función de transferencia del sistema ( $G_{(S)}$ ) se tiene:

$$G(s) = \frac{(R_1 R_2 C^2) S^2}{1 + S(2R_1 C) + S^2(R_1 R_2 C^2)} = \frac{S^2}{W_0^2 + S \frac{W_0}{Q} + S^2}$$

Los parámetros  $W_0$  y Q, ya definidos anteriormente, son función de los elementos pasivos del filtro C,  $R_1$  y  $R_2$ , relacionados por la expresión:

$$W_0^2 = \frac{1}{C^2 R_1 R_2}; \quad Q^2 = \frac{1}{4} \frac{R_2}{R_1}$$

### Filtro pasa bajos

Para los filtros pasa-bajos utilizados en nuestro caso, la relación de impedancias estaría dada por:

$$Z1 = Z2 = R; \quad Z3 = \frac{1}{SC_1}; \quad Z4 = \frac{1}{SC_2}$$

Siendo R el valor de una resistencia en Ohmios y  $C_1$ ,  $C_2$  los valores de dos condensadores en Faradios. Sustituyendo estos valores en la ecuación de la función de transferencia del filtro ( $G_{(s)}$ ), se tiene:

$$G(s) = \frac{1}{1 + S^*(2RC_2) + S^2^*(R^2C_1C_2)} = \frac{W_0^2}{W_0^2 + S\frac{W_0}{Q} + S^2}$$

Los parámetros  $W_0$  y Q corresponden a la frecuencia de corte (-3 dB) y al coeficiente de sobretensión del filtro, y son función de los elementos pasivos R, C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub>, relacionados por la expresión:

$$W_0^2 = \frac{1}{R^2 C_1 C_2}; \quad Q^2 = \frac{1}{4} \frac{C_1}{C_2}$$

Los filtros utilizados son tipo Butterworth de orden 5, que funcionan por el acoplamiento en cascada de 2 filtros de orden 2 más un quinto de orden 1.

Utilizando los valores estándar de las resistencias y condensadores es posible tener los valores experimentales de los polos y ceros de los filtros utilizados (tablas 3 y 4) (J.M. Tejedor, *et al.*, 1993):

Fabla 3 POLOS DE LA FUNCIÓN AM2 (C	N FILTRO PASA ALTAS $te = 1$ )		
Frecuencia de Corte = 0.0 Hz			
R	J		
0.0	0.0		
0.0	0.0		
-0.13333	0.0		
-4.44288	4.44288		
-4.44288	-4.44288		
Frecuencia de C	orte = $0.03$ Hz		
R	J		
-0.03904	0.0		
-0.22753	0.0		
-0.13333	0.0		
-4.44288	4.44288		
-4.44288	-4.44288		
Frecuencia de C	Corte = 0.3 Hz		
R	J		
-0.33053	0.0		
-1.92646	0.0		
-0.13333	0.0		
-4.44288	4.44288		
-4.44288	-4.44288		

### Tabia 4 POLOS DE LA FUNCIÓN FILTRO PASA BAJOS

AM2			
Frecuencia de Corte = 2	2.5  Hz (Cte = $8.5944$ )		
R	J		
-10.52963	10.52963		
-10.52963	-10.52963		
-157.07963	0.0		
-78.53982	136.03495		
-78.53982	-136.03495		
Frecuencia de Corte =	5 Hz (Cte = 43.9591)		
R	J		
-23.81385	23.81385		
-23.81385	-23.81385		
-157.0796	0.0		
-78.53982	136.03495		
-78.53982	-136.03495		
Frecuencia de Corte = 12	.5 Hz (Cte = 246.7896)		
R	J		
-56.42461	56.42461		
-56.42461	-56,42461		
-157.07963	0.0		
-78.53982	136.03495		
-78.53982	-136.03495		

Frecuencia de Corte = $25$ Hz (Cte = $1042.318$ )		
R	J	
-115.95924	115,95924	
-115.95924	115.95924	
-157.07963	0.0	
-78.53982	136.03495	
-78.53982	-136.03495	
Frecuencia de Corte = 50	Hz (Cte = 4201.283)	
R	J	
-232.80707	232,80707	
-232.80707	-232.80707	
-157.07963	0.0	
-78.53982	136.03495	
-78.53982	-136.03495	
Frecuencia de Corte = C	Out (Cte = 16933.66)	
R	J	
-467.39129	467.39129	
-467.39129	-467.39129	
-157.07963	0.0	
-78.53982	136.03495	
-78.53982	-136.03495	

Los Polos son complejos, **R** se refiere a la parte real, **J** a la parte imaginaria, y **Cte** es la constante del filtro.

#### Sistema de registro

La señal sísmica, una vez detectada por el sensor y enviada hasta la central de registro, es grabada en formato digital por medio de un computador y/o registrada analógicamente en registros de tambores de papel.

Para conocer la respuesta de estos equipos de regis-

tro, es necesario determinar el factor que afecta la amplitud de la señal respecto al voltaje de la señal de entrada.

En ambos casos, el procedimiento utilizado ha sido introducir una señal sinusoidal de amplitud pico a pico conocida (en voltios) mediante un generador de se-

Figura 7. Respuesta de los registradores helicoidales PS2 utilizados en el Instituto Geofísico.

Posición de la aguja	Ganancia (cm/Voltio)
4	0.4
3	0.82
2	1.56

**Tabla 5.** Valores de ganancia de la aguja para las 3 posiciones en los registradores PS2.

ñales y, al ser grabada por el sistema de registro es posible obtener el factor de amplitud por voltio a la entrada del sistema.

Para el sistema de adquisición digital (Fréchet *et al.*, 1993) se determinó un factor de ganancia de 423.31 cuentas/mVoltio a la entrada para la posición a la que opera en el Instituto Geofísico. Este es el factor de conversión de análogo a digital.

Para el sistema analógico (registradores PS2) se determinaron los factores para cada posición de ganancia de la aguja (3 posiciones), obteniendo los valores de centímetros de movimiento de la aguja por Voltio a la entrada del sistema (ver tabla 5).

La figura 7 muestra las curvas de calibración para estos registradores, la pendiente de la línea corresponde al factor de relación de desplazamiento de la aguja por milivoltio a la entrada del equipo.

#### Función de transferencia total del sistema [h(s)]

La función está dada por la resultante de conectar en cascada las funciones de cada elemento del sistema.





### **Corrección instrumental**

Una vez calculadas las funciones de transferencia de los componentes de la estación sísmica, las constantes, etc., es posible calcular la velocidad de movimiento del suelo (recordar que se dispone de sensores de velocidad) utilizando los datos registrados por la estación sísmica.

El sismograma obtenido por la estación es el resultado de la superposición entre la señal sísmica original proveniente del evento sísmico y el efecto de los instrumentos. Matemáticamente, este proceso puede representarse como una operación de convolución, así:

$$C(S) = H(S) * X(S)$$

Donde C(S) corresponde al sismograma registrado, H(S) la función de transferencia total del sistema y X(S) es el movimiento propio del suelo (señal de velocidad del movimiento).

El proceso de corrección instrumental consiste en eliminar el efecto que sobre la señal registrada tienen los instrumentos y obtener un sismograma que represente el movimiento propio del suelo. Para realizar este proceso, se aplica una operación de deconvolución entre el sismograma registrado y la función que representa los instrumentos.

La función obtenida corresponde en nuestro caso a un registro de velocidad de movimiento del suelo, del cual, mediante procesos de derivación o integración, es posible obtener su equivalente en desplazamiento o aceleración. Otra forma de obtener estos valores (desplazamiento y aceleración) es agregar un cero o un polo (depende sea el caso) a la función de transferencia de los instrumentos antes de realizar el proceso de deconvolución (tal vez es la forma más recomendable de hacerlo, para evitar introducir ruido a la señal como resultado de integrar o derivar). Un caso particular de esto es el ruido de baja frecuencia que normalmente es generado en la señal al realizar un proceso de integración. Por lo tanto, antes de

**Figura 8.** Corrección instrumental de una señal sísmica. La traza corresponde a un sismo de largo período del 2 de abril de 1999 (23h30). La señal superior corresponde al registro original, mientras que la inferior es el resultado de la señal en desplazamiento (ver unidades a la izquierda).

tomar la traza de desplazamiento generada es necesario filtrar esas bajas frecuencias de ruido generadas.

La figura 8 muestra un ejemplo de una señal sísmica como fue registrada, el resultado en velocidad una vez hecha la corrección instrumental y la traza generada después de la integración.

Este proceso es posible hacerlo tanto en el dominio de la frecuencia como del tiempo.

# RESPUESTA INSTRUMENTAL DE LAS ESTACIONES INSTALADAS EN EL VOLCÁN GUAGUA PICHINCHA

**D** ara realizar la corrección de las trazas de tremor se calculó la función de transferencia de las estaciones instaladas en el volcán (de las que existe calibración). Debido a los cambios realizados en las estaciones, en algunas existen diferentes respuestas dependiendo del tiempo en el que operaron. Un problema importante en-



contrado al tratar de obtener tales respuestas, ha sido el uso que se ha dado a los filtros, a los cambios sin control que se han hecho de los mismos y de los cuales, en muchos casos, no existe ningún registro. Los parámetros de respuesta de las estaciones se encuentran resumidos en las tablas 6 a 13.

## PARTE II

# Localización de sismos de largo período y eventos tremóricos en el volcán Guagua Pichincha

T remor volcánico, es un término referido a movimientos sostenidos del suelo observados en muchos volcanes, incluso aquellos en un estado no-eruptivo. Por definición, el origen del tremor ha sido asociado a fluctuaciones de presión en el (los) sistema(s) de fluidos del volcán, aunque el mecanismo de su fuente aún es un tema muy controversial (Strigl, 1991). El volcán Guagua Pichincha ha sido fuente de importantes eventos tremóricos durante el último período eruptivo iniciado en 1998, de la misma for-

Tabla 6 ESTACIÓN CRÁTER GUAGUA PICHINCHA (CGGP)				
Código	CGGP	CGGP		
Latitud	0° 10.73'	0° 10.73'		
Longitud	78° 35.81'	78° 35.81*		
Elevación (msnm)	4420	4420		
Fecha validez	sep 18/98 – abr 22/99	abr 22/99 - actual		
Filtro (Hz)	25	25		
Transducción Senso	r 184	124		
	(V/m/seg)			
Amortiguamiento	0.834	0.701		
Frecuencia Natural	3.467	4.481		
	(Rad)			
Resistencia	3.24	5.9		
	Amortiguamiento (KΩ)			
Atenuación (dB)	24	24		
K (cuentas / m/seg)	1.61986 E+11	1.09076 E+11		
Ceros	0 Oi	0 Oi		
		0 Oi		
	<u>0 0i</u>			
Polos (Sensor)	-2.8915 + 1.9126 i	-3.141 + 3.1958 i		
		-2.8915 - 1.9126 i		
-3.141 - 3.1958 1				
(Filtros Pasa-Bajas)	-78,53982+136,034951	-78.53982 + 136.03495 1		
(Filtra nosa altas		-70.33902 - 130.03493 1		
(rmro pasa anos	-115.95924 + 115.95924 1	-115.95924 + 115.95924		
-> Uui	-115.95924 - 115.95924 1	-115,55524 - 115,55524 1 -157 07963 0 0 i		
	-157.07905 0.01	-157.67965 0.01		

Tabla 7 ESTACIÓN YANA			
Código	YANA	YANA	YANA
Latitud	0° 7.09'	0° 7.09'	0° 7.09'
Longitud	78° 34.27'	78° 34.27'	78° 34.27'
Elevación (msnm)	3730	3730	3730
Fecha validez dic 1	2/97 - ene 05/99 e	ne 05/99 – oct 27/99	oct 27/99 - actual
Filtro (Hz)	Out	Out	Out
Transducción Sensor	75	65	65
(V/m/seg)			
Amortiguamiento	0.7	0.69	0.69
Frecuencia Natural	4.487	4.548	4.548
(Rad)			······
Resistencia	3	3.1	3.1
Amortiguamiento (KΩ)			
Atenuación (dB)	12	12	36
K (cuentas / m/seg)	4.2704 E+12	3.701 E +12	2.3352 E+11
Ceros	0 Oi	0 0i	0 Oi
	0 0i	0 0i	<u> </u>
Polos (Sensor)	-3.1410 + 3.2044 i	-3.138 + 3.2918 i	-3.138 + 3.2918 i
·	-3.1410 - 3.2044 i	-3.138 - 3.2918 i	-3.138 - 3.2918 i
(Filtros Pasa-Bajas) -78.5	3982 + 136.03495 i	-78.53982 + 136.03495 i	-78.53982 + 136.03495 i
-78.	53982 - 136.03495 i	-78.53982 - 136.03495 i	-78.53982 - 136.03495 i
(Filtro pasa altos	-157.07963 0.0 i	-157.07963 0.0 i	-157.07963 0.0 i
-> Out -467.3	9129 + 467.39129 i	-467.39129 + 467.39129 i	-467.39129 + 467.39129 i
-407.	39129 - 407.39129 1	-407.39129 - 407.39129 1	-407.39129 - 407.39129 1

Tabla 8		
ESTACIÓN PINO		
Código	PINO	PINO
Latitud	0° 9.48'	0° 9 48'
Longitud	78° 36.46'	78° 36.46'
Elevación (msnm)	4600	4600
Fecha validez oct	17/98 - may 14/99	may 14/99 – actual
Filtro (Hz)	USGS - 20	USGS -20
Transducción Sensor	235.1	222.02
(V/m/seg)	-	
Amortiguamiento	0.567	0.699
Frecuencia Natural	5.176	4.493
(Rad)		
Resistencia	12.02	7,4
Amortiguamiento (KΩ	)	
Atenuación (dB)	18	6
K (cuentas / m/seg)	2.6002 E+11	9.7987 E+11
Ceros	0 0i	0 Oi
	0 0i	0 0i
Polos (Sensor)	-2.9345 + 4.2598 i	-3.141 + 3.2130 i
	-2 9345 - 4.2598 i	-3.141 - 3.2130 i
(Filtros Pasa-Bajas)		
(Filtro pasa altos->		

ma que de importantes enjambres de sismos de largo período, los cuales han sido registrados por una red de 12 estaciones sísmicas que el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional mantiene para su continuo monitoreo.

#### Metodología y Resultados Obtenidos

Cuando un evento sísmico ocurre, las ondas generadas viajan a través de la tierra perdiendo su energía exponencialmente en función de la distancia recorrida, generando un decaimiento de la amplitud de la onda que a grandes rasgos sigue el patrón descrito por la siguiente relación:

$$A(x) = \frac{1}{x} A o e^{-wx}$$

Donde:

x: Distancia recorrida
A(x): Amplitud a una distancia x
Ao: Amplitud en el origen
W. Frecuencia angular
V. Velocidad de la onda
Q. Factor de calidad del medio

Tabla 9 ESTACIÓN SAN JU	AN			
Código	JUAN	JUA2	JUA2	JUA2
Latitud	0° 12.83	0° 12.83	0° 12.83'	0° 12 83
Longitud	78° 36.31'	78° 36.31'	78° 36.31'	78° 36.31'
Elevación (msnm)	3670	3670	3670	3670
Fecha validez	ene 14/99-ene 20/99	ene 20/99-feb 04/99	feb 04/99-abr 25/00	abr 25/00 – actual
Filtro (Hz)	Out	Out	Out	Out
Transducción Sensor	180.34	65	65	65
	(V/m/seg)	<u>,</u>		
Amortiguamiento	0.7	0.69	0.69	0.69
Frecuencia Natural	4.487	4.548	4.548	4.548
	(Rad)			
Resistencia	2.28	3.1	3.1	3.1
Ar	nortiguamiento (KΩ)			
Atenuación (dB)	18	12	36	36
K (cuentas / m/seg)	<u>5 1465 E+12</u>	1.2799 E+12	6 4297 E+11	3.1903 E+11
Ceros	0 01	0 Oi	0 01	0 01
	0 0i	0 0i	<u> </u>	<u>0_0i</u>
Polos (Sensor)	-3.1410 + 3.2044 i	-3.1410 + 3.2044 i	-3.1410 + 3 2044 i	-3.1410 + 3 2044 i
100000 M	-3.1410 - 3.2044 i	-3.1410 - 3.2044 1	-3.1410 - 3 2044 i	-3.1410 - 3 2044 i
(Filtros Pasa-Bajas)	-78.53982 + 136.03495 i	-78.53982 + 136.03495 1	-78.53982 + 136.03495 t	-78.53982 + 136.03495 i
	-78.53982 - 136.034951	-78.53982 - 136 03495 i	-78.53982 - 136 03495 t	-78 53982 - 136.03495 i
(Filtur nage alter	-157.0/903.0.01	-157.07963-0.01	-157.07903 0.0 t	-157.07903 0.01
(Finro pasa anos -> Out	-467.39129 + 467.39129 t -467.39129 - 467.39129 t	-467.39129 + 467.39129 i -467.39129 - 467.39129 i	-467.39129 + 467.39129 i -467.39129 - 467.39129 i	-467.39129 + 467.39129 t -467.39129 - 467.39129 t

107

Código	QUR	QUR
Latitud	0° 10.3'	0° 10.3'
Longitud	78° 31.73'	78° 31.73'
Elevación (msnm)	3720	3720
Fecha validez	jun 22/98-abr 04/99	abr 04/99–actual
Filtro (Hz)	USGS - 20	USGS – 20
Transducción Sensor	225.18 (V/m/seg)	194.12
Amortiguamiento	0.294	0.704
Frecuencia Natural	6.006 ( <b>Rad</b> )	4.462
Resistencia Amortiguamiento (KΩ)	Cire. Abierto	4.64
Atenuación (dB)	30	24
K (cuentas / m/seg)	6.2558 E+10	1.0785 E+11
Ceros	0 Oi	0 0i 0 0i
	0 Oi	
Polos (Sensor)	-1.7655 + 5.7401 i -1.7655 - 5.7401 i	-3.1415 + 3.1691 i -3.1415 - 3.1691 i
(Filtros Pasa-Bajas)		

Tabla 12 ESTACIÓN RÍO CRISTAL (XTAL)		
Código	XTAL	
Latitud	0° 12.12'	
Longitud	78° 40.13'	
Elevación (msnm)	2040	
Fecha validez	ene 26/99 - final	
Filtro (Hz)	USGS - 20	
Transducción Sensor	(V/m/seg) 79.45	
Amortiguamiento	0.716	
Frecuencia Natural (I	Rad) 4.386	
Resistencia Amortigu	amiento (KΩ) 3.09	
Atenuación (dB)	12	
K (cuentas / m/seg)	1.7532 E+11	
Ceros	0 Oi	
	<u>0 0i</u>	
Polos (Sensor)	-3,1405 + 3,0622 i	
	-3.1405 - 3.0622 i	
(Filtros Pasa-Bajas)		
(Filtro pasa altos->		

Tabla 11				
ESTACIÓN REFUG	IO DEL GUAGUA PIO	CHINCHA (GGP)		
Código	GGP	GGP	GGP	GGP
Latitud	0° 10.46'	0° 10.46'	0° 10.46'	0° 10.46'
Longitud	78° 35.68'	78° 35.68'	78° 35.68'	78° 35.68'
Elevación (msnm)	4600	4600	4600	4600
Fecha validez	abr 18/97-oct 20/98	oct 20/9 -nov 20/98	nov 20/98-abr 29/99	abr 29/99-actual
Filtro (Hz)	50 *	50 *	USGS - 20	USGS - 20
Transducción Sensor	170.7	-171	183.74	191.133
	(V/m/seg)			
Amortiguamiento	0.705	0.71	0.77	0.7045
Frecuencia Natural	4.456	4.425	4.009	4.459
	(Rad)			······································
Resistencia	3.2	3.28	3.48	4.87
Ai	nortiguamiento (KΩ)			
Atenuación (dB)	12	18	6	6
K (cuentas / m/seg)	2.4116 E+12	1.2136 E+12	8.1284 E+11	8.4754 E+11
Ceros	0 0i	0 0i	0 0i	0 Oi
		0 Oi	0 Oi	0 Oi
	0 0i			
Polos (Sensor)	-3.1415 + 3.1604 i	-3.1415 + 3.1158 i	-3.087 + 2.5578 i	-3.1415 + 3.1646 i
	-3.1415 - 3.1604 i	-3,1415 - 3.1158 i	-3.087 - 2.5578 i	-3.1415 - 3.1646 i
(Filtros Pasa-Bajas)	-78.53982 + 136.03495 i	-78.53982 + 136.03495 i		
	-78.53982 - 136.03495 i	-78.53982 - 136.03495 i		
(Filtro pasa altos	-157.07963 0.0 i	-157.07963 0.0 i		
-> Out*	-232.80707 + 232.80707 i	-232.80707 + 232.80707 i		
	-232.80707 - 232.80707 i	-232.80707 - 232.80707 i		

Tabla 13	
ESTACIÓN TOAZA	
Código	TOAZ
Latitud	0° 10.74'
Longitud	78° 36.93'
Elevación (msnm)	4200
Fecha validez	oct. 06/98 - actual
Filtro (Hz)	USGS - 20
Transducción Sensor (V/m/seg) 161.68	
Amortiguamiento	0.7
Frecuencia Natural (R	ad) 4.487
Resistencia Amortiguamiento (KΩ) 8.7	
Atenuación (dB)	24
K (cuentas / cm/seg)	8.9624 E+10
Ceros	0 Oi
	0 Oi
Polos (Sensor)	-3.1410 + 3.2044 i
	-3.1410 - 3.2044 i
(Filtros Pasa-Bajas)	
(Filtro pasa altos->	

Dado que la llegada de las ondas de eventos tremóricos a las estaciones no es clara y en la mayoría de los casos extremadamente emergentes, es difícil determinar un tiempo de arribo preciso de éstas y por ende, no es posible encontrar una localización espacial utilizando tales tiempos.

Sin embargo, conociendo la forma como las ondas pierden su amplitud a medida que se desplazan en un espacio determinado, es posible reconstruir de manera aproximada la curva de atenuación que las rige (Amplitud vs. Distancia recorrida), permitiendo de esta forma estimar un epicentro de la fuente.

Esta metodología ha sido utilizada por algunos autores en el mundo con el fin de localizar espacialmente eventos de tremor, como los trabajos de Gottschämmer, *et al.* (2000) en el volcán Bromo y Cosentino, M., *et al.* (1984) en el Mt. Etna.

El proceso consiste en encontrar un punto en el espacio (bidimensional) que mejor ajuste una curva de tipo exponencial en un gráfico donde el eje de las ordenadas contiene los valores de amplitud (corregida) del tremor en varias estaciones y el eje de las abscisas contiene las distancias epicentrales (a las estaciones) calculadas desde el punto de prueba en cuestión. Utilizando esta metodología, ha sido posible determinar la loca-



lización de eventos tremóricos en el volcán Guagua Pichincha, diferenciándose dos familias principales de fuentes generadoras de tremor, como se aprecia en la figura 9.

## Fuente de tremor "DOMO 1660"

Esta fuente de eventos tremóricos se encuentra localizada bajo el domo de 1660 en el centro actual de actividad volcánica. Probablemente su actividad está relacionada con la interacción entre el sistema hidrotermal existente y la fuente de energía (térmica) interna del volcán. La mayoría de eventos tremóricos observados en el

Figura 9. Localización de las dos familias generadoras de eventos tremóricos identificadas en el volcán Guagua Pichincha. Guagua Pichincha han sido localizados en esta fuente, que ha mostrado actividad desde el inicio de la crisis (y probablemente mucho antes), presentando eventos aislados con duración variable desde minutos hasta semanas. La curva de atenuación característica para los eventos provenientes de esta fuente se muestra en la figura 10. La forma de la curva nos indica una localización muy superficial de la fuente.

## Tremor de la fuente SUR-SUROCCIDENTAL (S-SW)

Se encuentra localizada en el flanco S-SW de la caldera del volcán y su actividad es menos frecuente. Se ha presentado en paquetes de corta duración y poca amplitud, con una envolvente en forma de "gotas" y un contenido espectral muy monocromático (alrededor de 2.9 Hz). El principal evento identificado proveniente de esta fuente ocurrió el 8 de septiembre de 1999, sin embargo existen varios pulsos de menor importancia en amplitud, pero de mayor duración en julio del mismo año. La curva de atenuación característica para los eventos provenientes de esta fuente se muestra en la figura 11. La forma de la curva (más suavizada) nos indica una localización relativa más profunda que la fuente domo. 1660.

Figura 10. Curva de atenuación característica para eventos tremóricos provenientes de la fuente "Domo".





# DISCUSIÓN

a metodología descrita constituye una base general de referencia en la localización espacial de eventos en los que es difícil identificar el arribo de las ondas (i.e. tremor y sismos de largo período). Si bien es cierto que las localizaciones obtenidas mediante el uso de esta metodología son simples aproximaciones del epicentro de la fuente, parece ser que son lo suficientemente confiables para ser consideradas, ya que se ha podido comprobar su realidad mediante la localización con cierto grado de precisión de eventos superficiales observados como emisiones de gases y señales de caídas de rocas generadas por colapsos del domo. También se han comparado las localizaciones de eventos volcano-tectónicos generadas a partir de la lectura de tiempos de arribo de fases y de las atenuaciones, siendo éstas muy aproximadas. Tal vez el punto más débil de la metodología es la imprecisión que se tiene de la profundidad del evento, sin embargo, la misma forma de la curva de atenuación da una idea general de esta dimensión, ya que entre más fuerte sea la

> caída de amplitudes con la distancia, más probable es que el evento tenga una localización más superficial. Para el caso de las fuentes de tremor descritas en el Guagua Pichincha, la fuente S-SW parece ser más profunda que la fuente domo, aunque no se puede hacer una determinación cuantitativa (ver figuras 10 y 11).

# REFERENCIAS

Cosentino, M. et al., 1984. Features of volcanic tremors at Mt. Etna (Sicily) during the March-August 1983 eruption. Bull. Volcanol. 47, pp. 929-939.

Fréchet, J. & Thouvenot, F., 1993. *Bibliotheque Sismalp*. Université Joseph Fourier et Centre National de la Recherche Scientifique. Observatorie de Grenoble.

Gottschämmer E. & Surono I., 2000. Locating tremor and shock sources recorded at Bromo Volcano. J. Volcanol. Geotherm. Res., pp. 101, 199-209.

Strigl, J., 1991. *Dimensional Analysis of Volcanic tremor*. Scientific Series of the international Bureau, vol. 4, pp. 115-135.

Tejedor, J.M. & García, O., 1993. Funciones de transferencia de las estaciones de la Red Sísmica Nacional. Instituto Geográfico Nacional. Subdirección General de Astronomía y Geofísica. Madrid, España, p. 82.

Figura 11. Curva de atenuación característica para eventos tremóricos provenientes de la fuente SSW.