

**Universidad de Nariño**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Departamento de Física**



**APLICACIÓN DEL MÉTODO SOMPI EN LA EVALUACIÓN  
TEMPORAL DE LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE  
SISMOS TIPO TORNILLO EN EL VOLCÁN GALERAS**

**TRABAJO DE GRADO**

Para optar al título profesional de:

Físico

**MARÍA FERNANDA ACOSTA MORA**

San Juan de Pasto, Colombia

SEPTIEMBRE 2013

**Universidad de Nariño**  
**Facultad de Ciencias Exactas y Naturales**  
**Departamento de Física**

**APLICACIÓN DEL MÉTODO SOMPI EN LA EVALUACIÓN  
TEMPORAL DE LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE  
SISMOS TIPO TORNILLO EN EL VOLCÁN GALERAS**

**MARÍA FERNANDA ACOSTA MORA**

**TRABAJO DE GRADO**

Director:

**OSCAR CADENA IBARRA**

MSc. en Geofísica

Codirector:

**ROBERTO TORRES CORREDOR**

MSc. en Geofísica

San Juan de Pasto, Colombia

SEPTIEMBRE 2013

©2013 - MARÍA FERNANDA ACOSTA MORA

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1. del acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado por el Honorable  
Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Todos los derechos reservados.

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

---

MSc. Oscar Ernesto Cadena Ibarra

Director

Dr. Alvaro Rugeles Perez

Jurado

MSc. Mauricio Bacca Rosero

Jurado

San Juan de Pasto, SEPTIEMBRE 2013

## **Agradecimientos**

A mis Padres, por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado y por haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación. A mi mamá Piedad Mora por sus consejos, por la motivación constante, por su incalculable coraje y valentía. A mi papá Efraín Acosta por los ejemplos de responsabilidad y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre.

A mi hermana Piedad Andrea por su apoyo, su cariño y ternura y por creer tanto en mí; y a mi hermano Esteban por su ejemplo a seguir: un excelente profesional y una admirable persona.

A mis compañeras y amigas Leidy Eraso y Johanna Espinoza por su incondicionalidad, gracias por todos los momentos vividos, por la confianza y lealtad, por las alegrías, por las tristezas y los triunfos alcanzados juntas en estos años universitarios.

Al MSc. Oscar Cadena director del trabajo, por su motivación para la elaboración de esta tesis, su dedicación, tiempo y asesoría. A todo el personal del OVSP por los años compartidos, por impulsar el desarrollo de mi formación profesional y por el conocimiento adquirido.

A la Universidad de Nariño por darme la oportunidad de estudiar y ser profesional, así mismo a todos los profesores que fueron parte de mi experiencia académica, aquellos que marcaron cada etapa de mi camino universitario y contribuyeron a mi formación.

Al Servicio Geológico Colombiano por brindarme las facilidades de acceso a sus bases de datos y haberme brindado la oportunidad de desarrollar mi tesis.

Por último a las demás personas que están presentes en mi vida y que comparten conmigo la culminación de mi trabajo de grado, mis compañeros: Daniel Revelo y Luis Bravo, mi familia: Amparo Mora, Javier y Valentina Acosta.

*A todos, sinceramente... Muchas Gracias!!!*

*A mis padres:*

*Piedad Mora de Acosta*

*Efraín Acosta Huertas*

# APLICACIÓN DEL MÉTODO SOMPI EN LA EVALUACIÓN TEMPORAL DE LAS PROPIEDADES CARACTERÍSTICAS DE SISMOS TIPO TORNILLO EN EL VOLCÁN GALERAS

## Resumen

*En este trabajo se hizo una evaluación temporal de las propiedades características de la fuente que origina eventos tipo Tornillo (TO) en etapas pre-eruptivas y no pre-eruptivas del Volcán Galeras (VG). Se utilizó el método de análisis espectral Sompi que se basa en una ecuación autorregresiva homogénea y usa espectros en el espacio de la frecuencia compleja para proveer las características del decaimiento y los periodos de oscilación de una señal, brindando una estimación espectral de gran resolución y confiabilidad. El método se aplicó a los eventos tipo TO del registro sísmico histórico del VG y se realizó un análisis de los resultados teniendo en cuenta valores de frecuencia y del factor de calidad ( $Q$ ) obtenidos. Se encontró promedios más bajos de  $Q$  para etapas pre-eruptivas que para etapas no pre-eruptivas, sin embargo en las dos etapas se encontró descensos en la frecuencia. Las variaciones temporales son el resultado de los cambios en la fracción de gas de la mezcla y aunque este cambio se ve como una constante en la gran mayoría de etapas pre-eruptivas, no es el único que determina si el periodo culmina o no en erupción.*

**Palabras claves:** Tornillo, Sompi, Factor de Calidad, Modelamiento AR.

# APPLICATION OF SOMPI METHOD IN THE TEMPORAL EVALUATION OF THE CHARACTERISTIC PROPERTIES OF EARTHQUAKES TYPE TORNILLO IN GALERAS VOLCANO

## Abstract

*This work makes a temporal evaluation of the characteristic properties of the source originating Tornillo (TO) type events in pre-eruptive and no pre-eruptive stages in the Galeras Volcano (VG). We used Sompi spectral analysis method which is based on an autorregressive homogeneous equation using the spectrum in the complex frequency space shows the decaying characteristics and the oscillation periods of a signal, providing a high-resolution and reliable spectral estimation. The method was applied to TO type events of the VG historic record and the results were analyzed taking into account the obtained values of frequency and quality factor ( $Q$ ). It was found average  $Q$  lower for pre-eruptive stages than for pre-eruptive stages although in both stages was found frequency decreasing. Temporal variations are the result of changes in the gas fraction of the mixture and while this change is seen as a constant in the great majority of pre-eruptive stages, is not the only thing that determines whether or not the period culminates in eruption.*

**Keywords:** *Tornillo, Sompi, Quality Factor, Modeling AR.*

# Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Red de Vigilancia Sísmica del Volcán Galeras (RVSG)	2
1.2. Clasificación de sismos en el VG	4
1.2.1. Sismos tipo Tornillo (TO)	5
1.3. Antecedentes	6
<b>2. Definición del Problema</b>	<b>9</b>
2.1. Planteamiento del Problema	9
2.2. Formulación del Problema	9
2.3. Objetivos	10
2.3.1. Objetivo General	10
2.3.2. Objetivos Específicos	10
2.4. Justificación	10
<b>3. Marco teórico</b>	<b>12</b>
3.1. Series de Tiempo	12
3.2. Sistema Dinámico Lineal	13
3.3. Modelos Autorregresivos	15
3.4. Factor de Calidad Q	15
3.5. Método Sompi	17
3.5.1. Modelamiento de series de tiempo basado en las propiedades características de un sistema dinámico lineal	19
3.5.2. Representación espectral de frecuencias complejas	22
<b>4. Metodología</b>	<b>24</b>
4.1. Recolección y clasificación de los datos	24
4.2. Creación del algoritmo en MATLAB e implementación del programa <i>qsompi</i>	26
4.3. Extracción de las propiedades características	33
4.4. Clasificación y selección de periodos de registro de Tornillos. Gráficas de Q, Frecuencia y Duración.	35
<b>5. Resultados</b>	<b>42</b>
5.1. Gráficas de Q, Frecuencia y Duración con el tiempo	42
5.2. Gráficas de Q vs Frecuencia	50
5.3. Síntesis de resultados	61

---

<b>6. Análisis de Resultados y Discusión</b>	<b>63</b>
6.1. Análisis de un periodo no pre-eruptivo en el marco de una mezcla líquido-gas	64
6.2. Análisis de un periodo no pre-eruptivo en el marco de una mezcla ceniza-gas	68
6.3. Análisis de periodos pre-eruptivos . . . . .	70
6.4. Otros aspectos . . . . .	73
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>74</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>76</b>
<b>ANEXOS</b> . . . . .	79
<b>A. Código del programa</b>	<b>79</b>

# Índice de Figuras

1.1.	Red de vigilancia sísmica del Volcán Galeras. (Fuente: OVSP) . . . . .	3
1.2.	Sismograma (arriba), espectrograma (medio) y espectro (abajo) de un evento tipo Tornillo registrado el 10 de septiembre de 2004 en la estación Anganoy. Obsérvese el lento decaimiento de la señal y sus pocos picos espectrales. El espectrograma muestra como se mantiene la frecuencia dominante durante todo el tiempo de registro. (Fuente: OVSP) . . . . .	6
4.1.	Estructura de archivos TO. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	25
4.2.	Formato de los archivos ASCII que contienen las trazas de los eventos registrados antes del 2002 (izquierda) y después del 2003 (derecha). (Fuente: Esta investigación) . . . . .	26
4.3.	Primera ventana del programa <i>qsompi</i> al ejecutarlo en MATLAB. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	27
4.4.	Variables generadas por MATLAB al importar los datos de un archivo ASCII de un evento tipo TO. En el recuadro se ha ampliado el contenido generado en el <i>Workspace</i> de MATLAB. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	27
4.5.	Cuadro de configuración del método Sompi. (Fuente: Esta investigación) . . .	28
4.6.	Primera gráfica de <i>qsompi</i> en la que se muestra la traza del evento TO graficado con un filtro pasa-alto. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	29
4.7.	Segunda gráfica del evento después de seleccionar su comienzo y fin. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	30
4.8.	Tercera gráfica del evento mostrando la selección del decaimiento que se analizará. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	30
4.9.	Espectro de Fourier de los datos seleccionados. (Fuente: Esta investigación) .	31
4.10.	Diagrama <i>f-g</i> con los resultados, se observa la concentración de namisos en el círculo rojo. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	32
4.11.	Resultados finales en la ventana <i>Command Windows</i> . En el recuadro se ha ampliado los datos generados: Frecuencia: $f$ , Error en $f$ : $Err-f(\%)$ , Gradiente: $G$ , Error en $G$ : $Err-G(\%)$ , $Q$ radiativo: $Q_r$ , Error en $Q_r$ : $Err-Q_r(\%)$ . (Fuente: Esta investigación) . . . . .	32
4.12.	Archivo Resultados_Sompi.txt con los resultados del proceso. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	33
4.13.	Traza (arriba), diagrama <i>f-g</i> (centro) y espectro (abajo) para el evento TO registrado el 20 de abril 2005. Obsérvese la presencia de dos armónicos en su espectro. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	34

4.14. Cuento diario de Tornillos con las erupciones registradas en el mismo intervalo de tiempo (a) 1992 a 1996, (b) 1998 a 2002, (c) 2004 a 2008 y (d) 2009 a 2012. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	37
4.15. Ejemplo de los gráficos construidos para uno de los periodos seleccionados. (a) $Q$ vs Fecha, (b) $f$ vs Fecha, (c) Duración vs Fecha y (d) $Q$ vs $f$ . (Fuente: Esta investigación) . . . . .	40
4.16. Diagrama de flujo con el tratamiento de la información. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	41
5.1. Gráficas de $Q$ (arriba), $f$ (medio) y Duración (abajo) vs tiempo del periodo comprendido entre el 27/12/92 hasta el 13/01/93 utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Cráter. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	42
5.2. Gráficas de $Q$ (arriba), $f$ (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 27/12/92 hasta el 23/03/93 (Superior) y el 24/05/93 hasta el 05/06/93 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Cráter. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	43
5.3. Gráficas de $Q$ (arriba), $f$ (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 09/08/94 hasta el 26/08/94 (Superior) y 02/09/95 hasta el 09/01/95 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Olga y Cráter respectivamente. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	44
5.4. Gráficas de $Q$ (arriba), $f$ (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 24/03/95 hasta el 28/04/95 (Superior) y 17/01/98 hasta el 08/10/98 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Cráter. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	45
5.5. Gráficas de $Q$ (arriba), $f$ (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 06/01/00 hasta el 21/03/00 (Superior) y 08/09/04 hasta el 15/09/04 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	46
5.6. Gráficas de $Q$ (arriba), $f$ (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 18/04/05 hasta el 29/07/05 (Superior) y 28/09/05 hasta el 24/11/05 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	47
5.7. Gráficas de $Q$ (arriba), $f$ (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 19/11/06 hasta el 31/07/07 (Superior) y 16/01/08 hasta el 17/01/08 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	48

5.8. Gráficas de $Q$ (arriba), $f$ (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendido entre el 16/01/10 hasta el 19/01/10 (Superior) y 26/01/11 hasta el 08/04/11 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	49
5.9. Gráficas de $Q$ (arriba), $f$ (medio) y Duración (abajo) vs tiempo del periodo comprendido entre el 08/11/11 hasta el 11/12/11 utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)	50
5.10. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 27/12/92 hasta el 13/01/93 utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Cráter. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	50
5.11. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 27/02/93 hasta el 23/03/93 utilizando los datos obtenidos de la estación Cráter. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	51
5.12. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 24/05/93 hasta el 28/04/95 utilizando los datos obtenidos de la estación Urcunina. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	51
5.13. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 09/08/94 hasta el 26/08/94 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	51
5.14. Gráficas de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 02/09/94 hasta el 09/01/95 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	52
5.15. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 24/03/95 hasta el 28/04/95 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	52
5.16. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 17/01/98 hasta el 08/10/98 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	52
5.17. Gráficas de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 06/01/00 hasta el 21/03/00 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	53
5.18. Gráficas de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 08/09/04 hasta el 15/09/04 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	53
5.19. Gráficas de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 18/04/05 hasta el 29/07/05 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	53
5.20. Gráficas de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 28/09/05 hasta el 20/11/05 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	54

5.21. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 19/11/06 hasta el 31/07/07 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	54
5.22. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 16/01/08 hasta el 17/01/08 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	54
5.23. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 16/01/10 hasta el 19/01/11 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	55
5.24. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 26/01/11 hasta el 08/04/11 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	55
5.25. Gráfica de $Q$ vs $f$ del periodo comprendido entre el 08/11/11 hasta el 11/12/11 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	55
5.26. Gráfica de $Q$ vs $f$ de todos los datos obtenidos. (Fuente: Esta investigación) .	56
6.1. Localizaciones de eventos tipo TO entre el 19/11/06 y el 19/04/07. Los círculos blancos representan el hipocentro de los sismos (Fuente OVSP). . . . .	65
6.2. Imágenes térmicas registradas el 22/01/2007 (izquierda) y el 03/02/2007 (derecha). En los círculos se resalta algunos cráteres del VG con sus respectivos nombres y temperaturas en $^{\circ}C$ . (Fuente OVSP). . . . .	65
6.3. Actividad superficial presentada el 18 de septiembre de 2006 (izquierda) y el 15 de marzo de 2007 (derecha) (Fuente OVSP). . . . .	66
6.4. Tendencias de $f$ y $Q$ para el periodo comprendido entre 19/11/06 hasta el 19/04/07. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	66
6.5. (a) $f$ vs $H$ , (b) $Q$ vs $H$ para una mezcla líquido-gas. $H$ es la profundidad medida en metros (Tomado de Torres et al., (en desarrollo)). . . . .	67
6.6. Gráfica de $Q$ y $f$ vs tiempo presentados en el trabajo de Molina et al., 2004 (Modificada). . . . .	68
6.7. (a) $f$ vs $H$ , (b) $Q$ vs $H$ para una mezcla ceniza-gas. $H$ es la profundidad medida en metros (Tomado de Torres et al., (en desarrollo)). . . . .	69
6.8. Ejemplo de las tendencias de $f$ y $Q$ para un periodo no eruptivo entre el 14/08/94 hasta el 21/01/95. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	70
6.9. Ejemplo de las tendencias de $f$ y $Q$ para el periodo pre-eruptivo entre 23/05/93 y el 06/06/93. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	71
6.10. Tendencias de $f$ y $Q$ para el periodo pre-eruptivo entre el 28/09/05 hasta el 24/11/05. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	71

---

6.11. Localización de eventos tipo TO del periodo pre-eruptivo entre el 28/09/05 hasta el 24/11/05. Los círculos representan el hipocentro de los sismos que alcanzan profundidades de hasta 3 km (Fuente OVSP). . . . .	72
6.12. Actividad superficial registrada el 26 de noviembre de 2005 posteriores a la erupción (Fuente OVSP). . . . .	73

# Índice de Tablas

- 4.1. Erupciones registradas entre 1992 y 2012. Las erupciones marcadas con \* estuvieron precedidas por eventos TO. (Fuente: Esta investigación) . . . . . 35
- 4.2. Clasificación de los periodos de registro de Tornillos. El \* en la columna de consecutivo indica que el periodo fue pre-eruptivo. (Fuente: Esta investigación) 38

# Glosario

- **Acimut:** Ángulo medido en sentido horario entre  $0^\circ$  y  $360^\circ$ .
- **Coda:** Ondas sísmicas que constituyen la parte final del registro de un sismo.
- **Distancia epicentral:** Distancia medida o calculada sobre la superficie de la Tierra entre un punto de observación y el epicentro de un sismo.
- **Distancia hipocentral:** Distancia calculada entre el hipocentro sísmico y un punto sobre la superficie de la Tierra.
- **Domo de lava:** Es un montículo aproximadamente circular que se origina en una erupción lenta de lava viscosa.
- **Epicentro:** El punto en la superficie de la Tierra ubicado en la proyección vertical del hipocentro. Usualmente se le ubica mediante la latitud y longitud geográfica.
- **Espectro:** Gráfica de amplitud de energía vs frecuencia.
- **Espectrograma:** Gráfica de frecuencia vs tiempo que representa (en colores) la energía del contenido frecuencial de una señal según va variando ésta a lo largo del tiempo.
- **Estrato Volcán:** Tipo de volcán cónico y de gran altura, compuesto por múltiples capas de lava endurecida.
- **Factor de calidad:** Parámetro utilizado para medir la atenuación de la energía de las ondas sísmicas.
- **Frecuencia de muestreo:** Es el número de muestras por unidad de tiempo que se toman de una señal continua para producir una serie de tiempo discreta.
- **Fuente:** Lugar donde se generan sismos.

- **Hipocentro:** Un punto en el interior de la Tierra donde se inicia la ruptura que causa el sismo. Se le localiza mediante la latitud y longitud geográficas, y la profundidad.
- **Magnitud:** Parámetro que clasifica los sismos por la amplitud de las ondas sísmicas registradas en los sismógrafos. Da una idea del tamaño del sismo y la cantidad de energía liberada en el hipocentro. La más conocida es la magnitud de Richter.
- **MATLAB:** Abreviatura de MATrix LABoratory, es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).
- **Namiso:** Es una unidad elemental que genera una serie de trenes de onda coherentes elevados a una potencia que depende del tiempo.
- **Premonitores:** Sismos de magnitudes pequeñas a moderadas que anteceden a un sismo más energético.
- **Sismo / Seísmo:** Movimiento de la Tierra producido por el paso de las ondas generadas por el desplazamiento repentino del suelo por debajo de la superficie de la Tierra.
- **Sismógrafo:** Instrumento que registra las ondas sísmicas.
- **Sismograma:** Registro hecho por un sismógrafo.
- **Sismómetro de Corto Periodo:** Sismómetro con una respuesta en velocidad normalmente plana en el rango de frecuencia mayor a 1 Hz.
- **Sismómetros de Banda Ancha:** Sismómetro de respuesta en velocidad con un rango de frecuencia más amplio, incluyendo frecuencias desde los 0,008 Hz.
- **Sismómetros Triaxiales:** Sismómetros que pueden registrar la velocidad del suelo en sus tres dimensiones.
- **Sompi:** Método de análisis espectral (Kumazawa et al., 1989). La idea básica de este método se origina en el concepto físico de las propiedades características de un

sistema dinámico lineal y se basa en una ecuación autorregresiva homogénea, la cual es equivalente a una ecuación diferencial lineal.

- **Tornillo:** Sismos de largo periodo, monocromático, con lento decaimiento de sus ondas de coda y cuya fuente está asociada con procesos de resonancia.
- **Traza:** Representación gráfica de un sismo.
- **Volcán andesítico:** Tipo de volcán que contiene lava de composición intermedia, es decir, entre el 55 % y el 65 % en sílice.
- **Volcán caldérico:** Tipo de volcán con una gran depresión, distinta de un cráter, causada por diferentes factores, como pueden ser el hundimiento de una cámara magmática o por deslizamiento, se originan cuando un edificio volcánico aumenta mucho su altura respecto a su base.

# Capítulo 1

## Introducción

El Volcán Galeras (VG) está localizado en el Departamento de Nariño, aproximadamente a 9 km al occidente de la ciudad de San Juan Pasto, con una altura de 4.276 m.s.n.m. y con coordenadas  $1^{\circ}13'44''$  de latitud Norte y  $77^{\circ}21'33''$  de longitud Occidente. Perteneció al tipo de estrato volcán, andesítico, caldérico y su antigüedad es mayor a 4.500 años (Calvache et al., 1998). Hoy en día, lo conocido como Galeras es el centro eruptivo más reciente y activo del denominado Complejo Volcánico Galeras (CVG) que posee una forma cónica con su edificio destruido en la parte occidental. Galeras no pertenece a la categoría de los volcanes más destructivos, pero su importancia está dada por su recurrencia eruptiva, la mayor en Colombia. En su zona de influencia se encuentran establecidos nueve municipios y más de siete corregimientos, que en total albergan cerca de 500.000 habitantes, por lo anterior posee una gran documentación de su actividad y una permanente vigilancia.

El VG ha registrado una variedad de señales sísmicas, algunas asociadas con fracturamientos de material cortical y otras vinculadas con procesos de dinámica de fluidos en el sistema magma-gas. Adicionalmente, se han observado señales ligadas con procesos superficiales que actúan directamente en el edificio volcánico tales como: flujos piroclásticos, flujos de lodo, avalanchas de escombros volcánicos y caída de rocas (Gómez et al., 2004).

Las observaciones sísmicas también han mostrado una clase particular de eventos llamados Tornillos (TO) (Gómez et al., 1997, 1999), encontrados en varios volcanes andesíticos. Los Tornillos muestran formas de onda particulares aproximadamente sinusoidales, con lento decaimiento de sus ondas de coda y en su contenido espectral se resaltan pocos picos (Torres et al., 2002).

En el VG después del emplazamiento del domo de lava en 1991, pasando por los domos

de 2006 y 2008 han ocurrido 29 erupciones entre julio de 1992 y agosto del 2010, 14 de las cuales fueron precedidas por Tornillos, es decir, estos eventos se han registrado como precursores de casi el 50 % de las erupciones. Por otro lado, también se han presentado periodos de registro de Tornillos que no terminaron con erupción, de ahí que estas señales sísmicas tengan un gran interés en el monitoreo de la actividad de Galeras y se hace importante estudiar la evolución temporal de las propiedades características de la fuente que las genera en busca de diferencias entre los periodos que terminaron con erupción y aquellos que no.

Con esta finalidad se hace uso de un método de análisis espectral llamado Sompi (Kumazawa, Imanishi, Fukao & Furumoto, 1989) cuya idea básica se origina en el concepto físico del estudio de las propiedades características de un sistema dinámico lineal y se basa en una ecuación autorregresiva (AR) homogénea, la cual es equivalente a una ecuación diferencial lineal. Esta técnica usa espectros de línea en el espacio de la frecuencia compleja para proveer información sobre el decaimiento y los periodos de oscilación de una señal, brindando una estimación espectral de gran resolución y confiabilidad (Kumazawa et al., 1990).

## **1.1. Red de Vigilancia Sísmica del Volcán Galeras (RVSG)**

La red de vigilancia sísmica del VG se estableció en el año de 1989 por el Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS, hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC). La RVSG está conformada por doce estaciones sismológicas de permanente radiotelemetría que permiten el registro continuo de la actividad sísmica del volcán, siete de las cuales son de corto periodo (4 triaxiales y 3 de componente vertical) y cinco de banda ancha triaxiales (Figura 1.1). Los sensores son transductores de velocidad y están ubicadas entre 1 y 14 km de distancia al cráter activo. La información de las trazas sísmicas se adquiere en tiempo real en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSP).

Los sismómetros de corto periodo poseen una respuesta en velocidad normalmente plana en el rango de frecuencia mayor a 1 Hz, mientras que los de banda ancha tienen una respuesta

en velocidad con rangos de frecuencia mucho más amplios, incluyendo frecuencias desde los 0,008 Hz. La forma como se transmiten los datos en la RSVG puede ser analógica o digital, la primera es aquella donde el sensor convierte la velocidad del terreno en una señal continua de voltaje que pasa a un Oscilador controlado por voltaje (VCO), este se encarga de codificar la señal que posteriormente se envía a sede con transmisión FM (Frecuencia Modulada); donde a través de un discriminador se decodifica y digitaliza con una frecuencia de muestreo de 100 Hz. En la segunda, el sensor convierte la velocidad del terreno en una señal continua de voltaje y a diferencia de la anterior, la señal es digitalizada en el lugar donde se encuentra el sismómetro utilizando transmisión FSK (Modulación por desplazamiento de frecuencia); posteriormente la información ya digitalizada es enviada por medio de un radio transmisor hacia la sede. En ambos casos la adquisición de la información se hace a través de programas específicos para tal fin y se almacena ordenadamente en bases de datos.

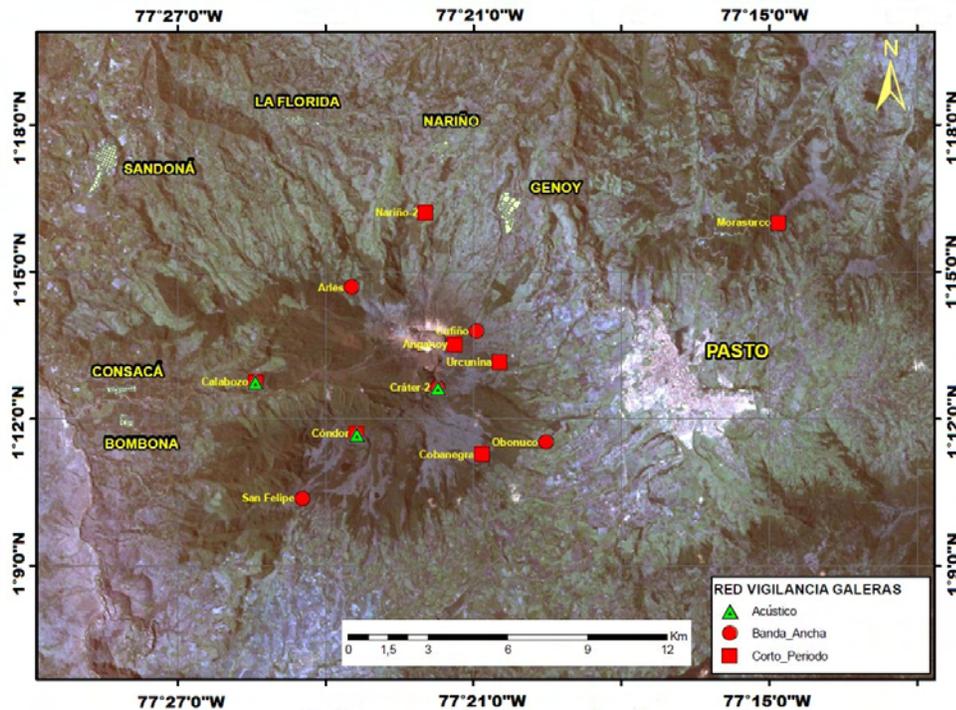


Figura 1.1: Red de vigilancia sísmica del Volcán Galeras. (Fuente: OVSP)

## **1.2. Clasificación de sismos en el VG**

La siguiente clasificación es tomada del Catálogo de señales sísmicas volcánicas de Colombia (Gómez et al., 2004).

En los volcanes del mundo se presentan sismos que tienen firmas semejantes y que se han asociado con el tipo de fuente que los origina. Por ejemplo, la fractura de material cortical en el edificio volcánico, sin que importe la causa que la produjo, genera eventos sísmicos que tienen arribos impulsivos y sus fases P y S son fácilmente reconocidas, estos sismos son llamados Volcano-Tectónicos (Latter, 1979; Lahr et al., 1994 y Chouet, 1996), se distinguen por las siglas VT. Puede suceder que los sismos VT sean producto de actividad volcánica o de acumulación de esfuerzos tectónicos que se transmiten hacia la región volcánica; el hecho de que su foco esté localizado en inmediaciones de la estructura volcánica es suficiente para clasificarlo como VT.

Se observan también eventos sísmicos volcánicos relacionados con la dinámica del sistema magma-gas e hidrotermal (Chouet, 1981, 1988, 1992 y 1996). Este tipo de sismos se divide en dos grupos diferenciados por el tiempo de excitación de la fuente generatriz. Se llaman sismos de Largo Periodo o LP aquellos en que su fuente es transitoria y Tremor o TRE cuando la fuente es persistente en el tiempo. Chouet considera que una concatenación de eventos LP puede ser tratada como un solo episodio de tremor. Otro tipo de sismos involucra tanto fractura de material sólido como movimiento de fluidos, estos son llamados Híbridos o HYB (Chouet, 1996).

En algunos volcanes se observan también tipos propios, que responden a particularidades en su estructura o dinámica, por ejemplo los Tornillos que se han registrado en los volcanes Galeras, Puracé y Ruiz en Colombia, y Meakan, Tarumai, Kusatsu-Shirane, Asama, Sakurajima, Kirishima, y Kushinocrabujima, en Japón (Gómez et al., 1999).

La clasificación de sismos en el VG ha sufrido modificaciones. Cuando se inició el monitoreo sismológico del volcán y teniendo en cuenta que no se contaba con una línea base de

información sobre la cual referir la sismicidad, se decidió adoptar la clasificación que hasta el momento se utilizaba en el volcán Nevado del Ruiz, basada en la de Minakami, (1960, 1974) y Latter, (1979), y modificada por Malone, (1983) y Newhall, (1984), que era similar a la que se utilizaba en el volcán Santa Helena (EUA). Luego, con los estudios de Lahr et al., (1994) y Chouet, (1981, 1988, 1992, 1996), se adoptó la clasificación de: Largo Periodo, Volcano-Tectónico, Tremor armónico y se incluyeron además el Tremor espasmódico, el Tornillo y el evento tipo Mariposa (Gómez et al., 2005).

### **1.2.1. Sismos tipo Tornillo (TO)**

Este nombre fue acuñado en Colombia por el personal del OVSP para distinguir un tipo especial de sismos de largo periodo cuya fuente está asociada con procesos de resonancia (Sakuraba et al., 2002) (Figura 1.2).

Los eventos TO también se asocian a la dinámica de movimiento de fluidos, se han registrado en volcanes de tipo andesítico cuyas erupciones son generalmente de tipo vulcaniano. Entre sus características resaltan:

Su forma de onda es similar a senosoides, las amplitudes muestran un lento decaimiento exponencial que se manifiesta en la duración de la señal, lo que implica que la tasa de pérdida de energía en la cavidad resonante es lenta también. Aunque el inicio de la señal puede mostrar un ancho de banda de altas frecuencias, su espectro modela entre uno y muy pocos picos en una banda pequeña. La mayoría muestra inicios emergentes pero se encuentran algunos con arribo impulsivo. Las frecuencias dominantes no están afectadas por la distancia epicentral, el acimut o tiempo de viaje indicando un efecto de la fuente (Torres et al., 2002).

Se han establecido una serie de parámetros para caracterizar este tipo de eventos, entre ellos: acimut, ángulo de incidencia, rectilinealidad, amplitud espectral, frecuencias dominantes y factor de calidad; aun así no se tiene un modelo de fuente único que explique varios de estos parámetros al tiempo (Torres et al., 2002).

En el VG generalmente se presentan en el contexto de un sistema cerrado. Un transitorio de presión dentro de una grieta, por ejemplo, podría ser el inicio de la resonancia, que dependiendo de la composición y propiedades físicas de los fluidos involucrados, determinarían los armónicos dominantes en su espectro y la duración del evento.

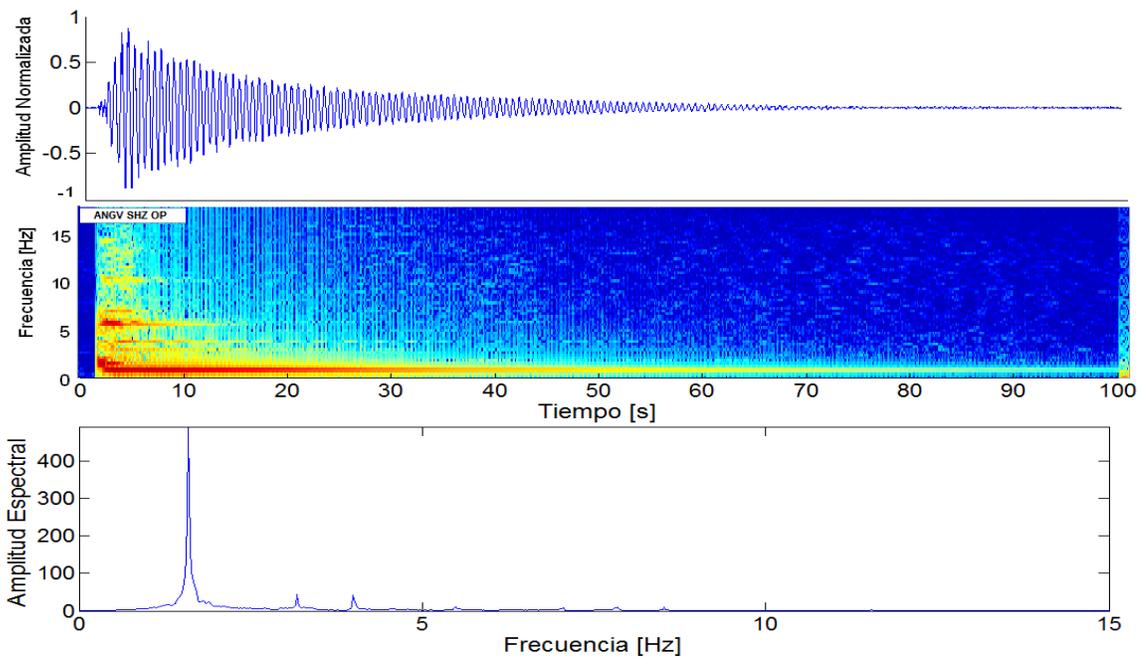


Figura 1.2: Sismograma (arriba), espectrograma (medio) y espectro (abajo) de un evento tipo Tornillo registrado el 10 de septiembre de 2004 en la estación Anganoy. Obsérvese el lento decaimiento de la señal y sus pocos picos espectrales. El espectrograma muestra como se mantiene la frecuencia dominante durante todo el tiempo de registro. (Fuente: OVSP)

### 1.3. Antecedentes

A continuación se mencionan algunos artículos en los que se ha aplicado el método Sompi.

*A NEW METHOD OF SPECTRAL ANALYSIS AND IT'S APPLICATION TO EARTH'S FREE OSCILLATIONS: THE "SOMPI" METHOD (Hori et al., 1989).*

En este artículo Kumasawa propone el método Sompi para descomponer los modos normales en parámetros espectrales tales como las amplitudes complejas (i.e., amplitudes y fases) y frecuencias complejas (i.e., frecuencias y tasa de decaimiento) con alta y notable precisión y resolución. Por una parte introduce la teoría del método y el algoritmo particular que es adecuado para sismos de baja frecuencia; también demuestra la efectividad del método a través de su aplicación en sismogramas observados y sintéticos.

*MAGMATIC DIKE RESONANCES INFERRED FROM VERY-LONG-PERIOD SEISMIC SIGNALS (Kumagai et al., 1989).*

Aquí se usa el método Sompi para determinar la frecuencia compleja y el factor de calidad del decaimiento armónico en las ondas de coda de los eventos de muy largo periodo (VLP), observados en la isla de Hachijo en Japón.

*AUTOREGRESSIVE MODELING OF TRANSFER FUNCTIONS IN FREQUENCY DOMAIN TO DETERMINE COMPLEX TRAVEL TIMES (Hasada et al., 2011).*

Se presenta un método para determinar los tiempos de viaje complejos de señales de impulso en el dominio del tiempo, esto se basa en un modelamiento autorregresivo de superposición de senosoides en una serie compleja finita en el dominio de la frecuencia compleja. Se asume que las series de frecuencia compleja consisten en señales representadas por una ecuación compleja AR con ruido adicional. Se compara los resultados con los suministrados por el método Sompi.

*SOMPI SPECTRAL ANALYSIS AND DEEP GEOMAGNETIC SOUNDING (Chen, 1993).*

En este documento se utiliza el método Sompi para el análisis de datos de los observatorios de Lanzhou, Chengdu y Wuhan. Estos sitios representan un área en el interior de la parte continental de la China. Basados en este análisis de datos, se calculó la conductividad eléctrica del manto superior, y se compararon con los resultados obtenidos con la curva

de resistividad obtenida por los datos globales GDS (Geomagnetic deep sounding) por Rokityansky (1982).

*THE PRELIMINARY APPLICATION OF SOMPI SPECTRAL ANALYSIS METHOD IN PROCESSING DIGITAL SEISMIC WAVE RECORDS (Huaran, 1995).*

Mediante el uso de los registros sísmicos digitales y el método Sompi, se analizaron y calcularon los espectros de un enjambre de 20 sismos que se produjeron en la zona de Tangshan en enero 1989 a julio 1990, y 10 terremotos que se produjeron en el área alrededor de Datong en julio 1988 a octubre 1989. A continuación, se estudiaron las variaciones anómalas de las características de los espectros de las ondas P, y los espectros de las ondas S antes del terremoto de Tangshan (ML 4,9), 23 de julio de 1990, y el terremoto de Datong (ML 6,1), 19 de octubre de 1989. Los resultados obtenidos muestran que antes de los terremotos fuertes hay variaciones de tipo reducción-anómalos en la frecuencia dominante del espectro de las ondas P y S. Por lo tanto, puede convertirse en un índice útil para la predicción de terremotos.

# Capítulo 2

## Definición del Problema

### 2.1. Planteamiento del Problema

En Galeras se han registrado más de 1000 eventos tipo Tornillo desde el 11 de julio de 1992, estos eventos tiene un carácter particular, no sólo por su forma de onda cuasi-sinusoidal o su contenido espectral, sino porque han precedido gran parte de las erupciones registradas en los últimos 20 años.

Actualmente los observatorios vulcanológicos y sismológicos colombianos poseen una caracterización de los eventos tipo Tornillo en cuanto a sus parámetros básicos: formas de onda, tasa de decaimiento de las amplitudes en la señal y contenido espectral. También se han realizado estudios que formulan una hipótesis para explicar el posible origen de estas señales y su relación con la actividad eruptiva. Sin embargo, no hay estudios que asocien las propiedades características de la fuente que origina los Tornillos con los periodos de registro culminados en erupción y mucho menos con aquellos donde el registro de estos sismos no terminó en un evento eruptivo.

Podemos presumir que existen diferencias entre los Tornillos ocurridos en periodos pre-eruptivos y los que aparecieron en periodos no pre-eruptivos. Estas diferencias deberían ser visibles en las propiedades características de las fuentes que los producen, si es así, es fundamental determinar dichas diferencias.

### 2.2. Formulación del Problema

¿Es posible encontrar diferencias en las propiedades características de las fuentes que originan eventos tipo Tornillo, entre los periodos que culminan con erupción y aquellos que

no, mediante la aplicación del método Sompi?

## **2.3. Objetivos**

### **2.3.1. Objetivo General**

Determinar y contrastar las propiedades características de la fuente que origina eventos tipo Tornillo en etapas pre-eruptivas y no pre-eruptivas utilizando el método Sompi.

### **2.3.2. Objetivos Específicos**

- Crear un programa para la aplicación del método Sompi utilizando MATLAB.
- Aplicar el método Sompi a los periodos en los que se haya registrado eventos tipo Tornillo y hayan terminado o no con erupción.
- Estudiar las propiedades características obtenidas, en busca de diferencias entre Tornillos que se registraron en etapas pre-eruptivas y los registrados en etapas no pre-eruptivas.

## **2.4. Justificación**

Se deben desarrollar métodos para parametrizar y clasificar periodos de registro de Tornillos, determinando las diferencias que existen en las propiedades características de las etapas pre-eruptivas y no pre-eruptivas. Esta clasificación es importante dentro de la vigilancia del VG, puesto que la diferenciación entre estos periodos lleva a un acercamiento al pronóstico de erupciones.

Si este estudio determina diferencias entre los Tornillos registrados en periodos pre-eruptivos y aquellos no pre-eruptivos, el método puede utilizarse como una herramienta más para caracterizar el nivel de actividad volcánica, teniendo en cuenta la correlación observada entre los Tornillos y las erupciones.

El poder evaluar estos eventos de una manera más profunda permite entender mejor el comportamiento del volcán lo cual es útil en el análisis e interpretación del fenómeno, información que finalmente se transmite a las autoridades que son las encargadas de tomar decisiones frente a la prevención de desastres.

Los resultados que se obtengan en este trabajo le serán útiles también a estudios posteriores que se puedan realizar en otros volcanes de Nariño como Cumbal y aquellos a cargo de los observatorios vulcanológicos de Manizales y Popayán.

# Capítulo 3

## Marco teórico

### 3.1. Series de Tiempo

Una serie de tiempo es una sucesión cronológica de observaciones de una variable particular (Bowerman et al., 2007). Una serie de tiempo es un conjunto de observaciones  $x_t$ , cada una de estas se guarda en un tiempo determinado  $t$ . Una serie de tiempo discreta es aquella en la que el conjunto de tiempos  $T_0$  en los que se realizan las observaciones es discreto, como por ejemplo, cuando se hacen observaciones a intervalos de tiempo fijos. Series de tiempo continuas se obtienen cuando las observaciones se registran continuamente durante algún intervalo de tiempo, por ejemplo cuando  $T_0 = [0, 1]$  (Brockwell et al., 2002).

Hay muchas razones para registrar y analizar los datos de series de tiempo. Entre ellos el obtener una mejor comprensión del mecanismo que genera los datos, la predicción de futuros valores o el control óptimo de un sistema. La propiedad característica de una serie de tiempo es el hecho de que los datos no se generan independientemente, su dispersión varía en el tiempo y a menudo se rigen por una tendencia.

Una parte importante del análisis de una serie de tiempo es la selección de un modelo de probabilidad adecuado (o clase de modelos) para los datos. Para permitir la naturaleza impredecible de las observaciones futuras, es natural suponer que cada observación  $x_t$  es un valor que se desarrolla de una determinada variable aleatoria  $X_t$  (Brockwell et al., 2002).

Un modelo de serie temporal para los datos observados  $\{x_t\}$  es una especificación de la unión de varias distribuciones (o posiblemente sólo las medias y covarianzas) de una secuencia al azar de las variables  $\{X_t\}$ , de esta forma  $\{x_t\}$  se define como una realización (Brockwell et al., 2002).

Las partes de una serie de tiempo son: la tendencia, el ciclo, las variaciones estacionales y las fluctuaciones irregulares. La tendencia es la que se refiere al movimiento hacia arriba o hacia abajo que caracteriza a las series de tiempo con respecto a un periodo de tiempo, esta tendencia refleja el crecimiento o declinación de larga duración en las series de tiempo. El ciclo se refiere a los movimientos hacia arriba y hacia abajo alrededor de los niveles de la tendencia. Las variaciones estacionales son patrones periódicos en una serie de tiempo que se completan dentro de un periodo específico, por ejemplo las variaciones producidas por el clima. Las fluctuaciones irregulares son movimientos erráticos en una serie de tiempo que siguen un patrón indefinido o irregular (Bowerman et al., 2007).

Una serie de tiempo bastante común en problemas aplicados se define de la siguiente manera: Si  $\{X_t\}$  es una secuencia de variables aleatorias que no están correlacionadas, que tiene media cero y varianza  $\sigma^2$ , entonces  $\{X_t\}$  es una serie de tiempo estacionaria y tiene la misma función de covarianza. Tal secuencia se conoce como *ruido blanco* (Hamilton, 1994).

## 3.2. Sistema Dinámico Lineal

Son sistemas cuyos parámetros internos siguen una serie de reglas temporales. Se llaman sistemas porque están descritos por un conjunto de ecuaciones y dinámicos porque sus parámetros varían con respecto a alguna variable que generalmente es el tiempo.

Los sistemas dinámicos pueden ser discretos o continuos dependiendo si el tiempo varía discreta o continuamente respectivamente. Los sistemas dinámicos de tiempo continuo se expresan con ecuaciones diferenciales; éstas pueden ser ecuaciones diferenciales ordinarias o ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Por otro lado si el tiempo es discreto los sistemas se escriben por medio de ecuaciones en diferencias.

Los sistemas lineales son sencillos de analizar y de trabajar, ya que la solución del sistema sujeto a condiciones complejas se puede lograr simplificando el problema a una suma de respuestas del sistema a condiciones más sencillas.

Un sistema dinámico es, según Kuznetsov, la representación matemática de un proceso determinístico (Kuznetsov, 1995). Un proceso determinístico, son procesos en los que conociendo las condiciones iniciales siempre siguen el mismo curso y producen el mismo resultado final, o sea que elementos aleatorios no están presentes; podemos predecir en el tiempo todos los posibles estados y el estado final siempre será el mismo dado unas mismas condiciones iniciales. Si se conoce la ley que gobierna su evolución y su estado inicial, se puede predecir cualquier estado futuro del sistema. Todos los posibles estados del sistema se pueden representar por puntos en algún conjunto  $x$  llamado:

$$X = \{x : x \text{ es un estado del sistema dinámico}\} \quad (3.1)$$

Los sistemas dinámicos también presentan cambios o evolución de su estado en un tiempo, el comportamiento en dicho estado se puede caracterizar determinando los límites del sistema, los elementos y sus relaciones; de esta forma se puede elaborar modelos que buscan representar la estructura del mismo sistema.

A diferencia de los procesos determinísticos los procesos estocásticos se definen como los procesos dependientes de leyes causales y probabilísticas, por lo que están sometidos al azar y son objeto de análisis estadístico.

Para elaborar un modelo, se debe tener en cuenta que un sistema está formado por un conjunto de elementos en interacción, que el comportamiento del sistema se puede mostrar a través de diagramas causales, y que hay varios tipos de variables.

La evolución del sistema dinámico supone un cambio de estado en un tiempo  $t \in T$  donde  $T$  es un conjunto ordenado. Dependiendo de la naturaleza de  $T$ , se pueden clasificar los sistemas dinámicos en dos grupos: de tiempo continuo, si  $T = R$  y de tiempo discreto, si  $T = Z$  (Brockwell et al., 2002).

Los sistemas dinámicos discretos son modelados como relaciones recursivas, tal como la ecuación:

$$x_{t+1} = ax_t(1 - x_t) \quad (3.2)$$

donde  $t$  denota los pasos discretos del tiempo y  $x$  es la variable que cambia con éste.

Entre los sistemas dinámicos se distinguen los lineales y no lineales, si su dependencia con  $x$  es lineal o de grado mayor respectivamente. Los segundos son más difíciles de analizar y a menudo tienen comportamientos totalmente impredecibles. Los sistemas dinámicos sirven para entender cómo evolucionan los procesos de la naturaleza. Modernamente han dado lugar a importantes descubrimientos, como la existencia de caos.

### 3.3. Modelos Autorregresivos

Son modelos estadísticos llamados también Modelos Box-Jenkins que se aplican a series temporales de datos. Se utilizan como una herramienta para entender y predecir futuros valores de la serie. Los modelos auto-regresivos (AR) pueden describirse, de una forma general, como aquéllos en los que una variable se explica, al menos en parte, en función de sus valores pasados.

Se denota un modelo auto-regresivo de orden  $p$  como  $AR(p)$  y se escribe como:

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p \phi_i X_{t-i} + \epsilon_t \quad (3.3)$$

donde  $\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_i$  son los parámetros del modelo,  $c$  es una constante y  $\epsilon_t$  es un término de error (Brockwell et al., 2002).

### 3.4. Factor de Calidad Q

Las ondas sísmicas al propagarse por el interior de la Tierra, experimentan una atenuación de la amplitud que obedece a pérdidas de energía, esta es consecuencia de los mecanismos de la fuente sísmica, el camino o ruta de viaje y las condiciones locales.

Para medir la atenuación de las ondas sísmicas se utiliza un parámetro adimensional de medida de la pérdida de energía que se denomina factor de calidad  $Q$ , o su inverso, el factor específico de atenuación  $Q^{-1}$ .

El factor de calidad se puede expresar como:

$$Q = -\frac{2\pi E}{\Delta E} \quad (3.4)$$

donde  $E$  es la energía elástica y  $\Delta E$  es la pérdida de energía por ciclo de una excitación armónica.

El factor de calidad  $Q$ , o más concretamente el valor de su inverso  $Q^{-1}$  da una idea de cuan cercano está el medio a la elasticidad perfecta. De esta manera,  $Q$  nos permite estimar, en promedio, las características anelásticas del medio.

En el caso específico de sismos tipo LP, los factores  $Q$  aparentes representan la suma de la pérdida de energía por ciclo de vibración debida a la radiación sísmica  $Q_r$  y pérdida de energía por ciclo debida al amortiguamiento viscoso en el fluido resonador  $Q_i$  (Aki,1984).

Para pérdidas pequeñas de energía, el  $Q$  aparente puede ser escrito como:

$$Q^{-1} = Q_r^{-1} + Q_i^{-1} \quad (3.5)$$

donde  $Q_r$  es el factor de calidad debido a radiación y  $Q_i$  es el  $Q$  intrínseco del fluido (Aki, 1984).  $Q_r$  puede ser relacionado con el contraste de impedancias  $Z$  como:

$$Q_r^{-1} = S \ln \left( \frac{Z+1}{Z-1} \right) \quad (3.6)$$

donde

$$Z = \frac{\rho_s \alpha_s}{\rho_f \alpha_f} \quad (3.7)$$

En esta ecuación  $\rho$  es la densidad,  $\alpha$  es la velocidad acústica, y los subíndices  $s$  y  $f$  denotan sólido y fluido respectivamente.  $S$  es un coeficiente que depende principalmente del modo de oscilación. Para el modo fundamental del resonador,  $S \sim 1/\phi$  (Aki and Richards, 1980).

### 3.5. Método Sompi

El siguiente texto se basa en el artículo “Una teoría de análisis espectral basada en las propiedades características de un sistema dinámico lineal” (Kumazawa et al., 1990).

Es un método de análisis espectral que se ha desarrollado encaminado a encontrar la periodicidad de una serie de tiempo. Hacer un análisis espectral es descomponer una función en una combinación lineal de funciones en una base ortogonal.

La transformada discreta de Fourier (DFT) se define como:

$$x(l\Delta w) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t) \exp\left(\frac{2\pi ikl}{N}\right) \Delta t, \quad (l = 0, 1, \dots, N - 1) \quad (3.8)$$

Dado una serie de datos  $\{x(k\Delta t)\}$  ( $k = 0, 1, \dots, N - 1$ ) y un intervalo de frecuencia de:

$$\Delta w = \frac{2\pi}{N\Delta t} \quad (3.9)$$

Las funciones de la base son ortogonales en el espacio finito de tiempo discreto, y los componentes armónicos dan las amplitudes y las fases de las frecuencias discretas con un igual espaciamiento. La función de entrada debe ser discreta y finita.

Este es el método con mayor aceptación dentro del análisis espectral, ya que es útil para describir oscilaciones armónicas que se observa en fenómenos físicos y su algoritmo (Cooley y Tukey 1965) se maneja de una manera eficiente.

Sin embargo el carácter de la transformada como la conversión matemática de datos en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia está limitado por la longitud, que hace que se obtenga espectros pobres y se utilice especialmente en series de tiempo cortas.

Para obtener una mayor resolución espectral que la obtenida por la DFT se ha utilizado el concepto de modelamiento estadístico, ya que se tiene en cuenta que los procesos son

estocásticos y que las señales analizadas siempre están contaminadas por ruido aleatorio. Varias de estas teorías de estimación espectral también llamadas teorías no lineales están basadas en modelos paramétricos tales como el modelo Autorregresivo (AR), el modelo de Media Móvil (MA) o el modelo mixto (ARMA), entre otros. En estas teorías a diferencia de la DFT no es fundamental que las funciones de la base sean ortogonales. Estos métodos pueden ser útiles para la descomposición de una serie de tiempo que contenga decaimiento exponencial en sus oscilaciones, este decaimiento en la energía puede estar asociado a mecanismos de disipación, por tanto, su estructura espectral estaría mejor representada en el espacio de la frecuencia compleja que en el espacio de la frecuencia real.

Además métodos como la DFT proporcionan una información teórica más que una física y el propósito final de un análisis espectral de una serie de tiempo debe ser encontrar características físicas del sistema que este proporcionando la serie de tiempo.

En 1983 se creó un método de análisis espectral que intenta determinar información del modelo físico que genera los datos observados y su nombre es “Sompi” (Kumazawa et al., 1983a, b).

Este método está basado en un modelo AR y describe las propiedades características de un sistema dinámico lineal. El modelamiento AR en el método Sompi no consiste en predecir futuros valores de una serie de tiempo, si no, en encontrar un conjunto de datos de longitud finita que sean muestras de un sistema dinámico lineal hipotético.

Este método descompone una serie de  $x(t)$  en una combinación lineal de senosoides con decaimiento exponencial en el tiempo (Kumazawa et al., 1983a, b).

$$x(t) = \sum_{v=1}^m A_v \exp(\gamma_v t) \cos(\omega_v t + \theta_v) \quad (3.10)$$

donde  $\omega_v$ ,  $\gamma_v$ ,  $A_v$  y  $\theta_v$  son constantes reales.

### 3.5.1. Modelamiento de series de tiempo basado en las propiedades características de un sistema dinámico lineal

Considerando un sistema dinámico lineal descrito por una ecuación lineal diferencial de orden  $m$ .

$$\tilde{b}(p)y(t) = g(t) \quad (3.11)$$

donde  $p$  es un operador diferencial ( $= d/dt$ )

$$\tilde{b}(p) = \sum_{k=0}^m b(k)p^k \quad (3.12)$$

Los  $b(k)$  son constantes reales, y  $g(t)$  es la fuerza que excita el sistema para producir una salida  $y(t)$  no nula. Cuando  $g(t) = 0$ , se tiene una ecuación diferencial homogénea.

$$\tilde{b}(p)y(t) = 0 \quad (3.13)$$

el sistema está sometido a oscilaciones libres con  $m$  modos de vibración:

$$y(t) = \sum_{v=1}^m \beta_v \exp(i\omega_v t) \quad (3.14)$$

donde  $\omega_v$  son las frecuencias características (generalmente complejas) dadas por las  $m$  raíces de la ecuación característica del sistema:

$$\tilde{b}(i\omega) = 0 \quad (3.15)$$

y los  $\beta_v$  son constantes complejas que representan las amplitudes y fases de  $m$  modos característicos (se asume que no hay múltiples raíces entre las frecuencias características).

De esta forma los coeficientes de la ecuación diferencial determinan las frecuencias de los modos característicos de oscilación del sistema. Si se conocen los coeficientes consecuentemente se conocen las frecuencias características del sistema. Sin embargo, los coeficientes no tienen información de las amplitudes y las fases de los modos de oscilación,

ya que a diferencia de las frecuencias características, las amplitudes y las fases dependen de la fuerza que ha excitado el sistema y no se consideran como propiedades dinámicas del sistema hipotético.

En este análisis espectral se asume que la señal que se observa, obedece a un sistema dinámico lineal hipotético, durante un intervalo de tiempo, donde no actúa una fuerza externa. Se pretende estimar las frecuencias características determinando las ecuaciones diferenciales que mejor describan el sistema.

Los datos numéricos que se someten al análisis espectral, son muestreados de una señal continua con una frecuencia de muestreo constante durante un periodo de tiempo finito. También se hace uso de una ecuación en diferencias para una solución numérica de la ecuación diferencial con ayuda de un esquema de discretización aproximado. Por lo tanto, al ajustar la ecuación diferencial a los datos discretos esta puede ser sustituida adecuadamente por una ecuación en diferencias del tipo AR. Esto hace parte de las bases teóricas más importantes del método ya que el problema se reduce a la solución de un modelo AR.

Sea  $x(t)$  una serie de tiempo muestreada de una señal continua  $y(t)$  con un intervalo uniforme de tiempo  $\Delta t$ . Por simplicidad se fija  $\Delta t = 1$  así que  $t$  toma enteros sucesivos, se asume que la parte real de alguna de las frecuencias características complejas de interés es más pequeña que  $\frac{1}{2}$ . Entonces se tiene la equivalencia de soluciones entre la ecuación diferencial (3.13) y la ecuación en diferencias lineal homogénea, o ecuación AR:

$$\tilde{a}(z)x(t) = \sum_{k=0}^m a(k)x(t-k) = 0 \quad (3.16)$$

donde  $z$  es el operador retardo en el tiempo [ $zx(t) = x(t+1)$ ] y

$$\tilde{a}(z) = \sum_{k=0}^m a(k)z^{-k} \quad (3.17)$$

La ecuación característica de (3.16) está definido como:

$$\tilde{a}(z) = 0 \quad (3.18)$$

Los dos operadores  $z$  y  $p$  tienen auto-funciones comunes de  $\exp(i\omega t)$  para algún  $\omega$  aunque con diferentes auto-valores  $\exp(i\omega)$  para  $z$  y  $i\omega$  para  $p$ , hay una relación no lineal entre ellos:

$$p = \log z \quad \text{ó} \quad z = e^p \quad (3.19)$$

Por lo tanto los auto-valores del operador  $z$  corresponden a aquellos de  $p$ :

$$z_v = \exp(i\omega_v), \quad (v = 1, 2, \dots, m) \quad (3.20)$$

Dadas las raíces características (generalmente complejas) para  $z$  en (3.18). Los coeficientes  $a(k)$  y  $b(k)$  están relacionados unos con otros, no linealmente excepto por un factor constante.

La ecuación dinámica discretizada correspondiente a (3.11) puede ser escrita en general como:

$$\tilde{a}(z)x(t) = f(t) \quad (3.21)$$

donde  $f(t)$  puede ser considerada como una fuerza externa trabajando en el sistema dinámico lineal, se obtiene la ecuación homogénea (3.16) si se fija  $f(t) = 0$  en (3.21), el presente método se ocupa de este caso particular.

Ajustando (3.16) a una serie de datos de tiempo toma la forma similar a un modelamiento AR. Esto resulta en la deconvolución de  $x(t)$

$$x(t) = \sum_{v=1}^m \alpha_v \phi_v(t) + x^{(N)}(t) \quad (3.22)$$

donde

$$\phi_v(t) = z_v^t, \quad (v = 1, 2, \dots, m) \quad (3.23)$$

los  $\alpha_v$  son constantes complejas, y  $x^{(N)}(t)$  es una secuencia estadística incoherente con media cero y espectro continuo (ruido blanco). En otras palabras  $x(t)$ , está representada por un

conjunto de  $m$  líneas espectrales en el plano de la frecuencia compleja, y ruido adicional.  $\{\phi_v(t)\}$  en (3.23) no constituye un conjunto de funciones que formen una base orto-normal completa.

Los valores que pueda tomar  $z_v$  son llamados *namisos* (nami=onda, so=unidad elemental en Japonés). Un namiso es una unidad elemental que genera una serie de trenes de onda coherentes elevados a una potencia que depende del tiempo. El namiso se deriva de (3.18) y son sólo candidatos de elementos existentes de onda; ellos podrían o no existir en la serie de tiempo. Esta es la razón por la cual el análisis espectral fue llamado Método Sompi (son=existencia, pi=no Sompi=existencia o no-existencia en Japonés).

### 3.5.2. Representación espectral de frecuencias complejas

La teoría del método Sompi es diferente de teorías ordinarias no sólo en el concepto básico de estimación espectral sino también en su representación espectral. El Método Sompi puede determinar la frecuencia y  $Q$  de un pico espectral simultáneamente, esta es una gran ventaja sobre el clásico método de Fourier (Nakano et al., 1998). Cuando la amplitud espectral está caracterizada por frecuencias complejas, tenemos un ancho espectral pico en el eje de las frecuencias. La amplitud representada por la altura del pico es una cantidad difícil de interpretar, ya que la amplitud instantánea depende del tiempo.

En el presente análisis espectral, la señal en la serie de datos de tiempo está representada por “elementos de onda”. Cada uno de ellos está especificado por dos parámetros complejos  $z$  y  $\alpha$ , o cuatro parámetros reales. Entonces se define  $\gamma$  y se re-define  $\omega$  como:

$$z = \exp(\gamma + i\omega) \quad (3.24)$$

donde  $\omega$  y  $(-\gamma)$  corresponden a las partes real e imaginaria de la frecuencia angular compleja.  $\gamma$  positiva o negativa indica que la amplitud instantánea del elemento de onda relevante crece o decrece exponencialmente con el tiempo, respectivamente. La frecuencia ordinaria (real)  $f$  está definida por:

$$f = \omega/2\pi \quad (3.25)$$

Y  $g$ , se define como:

$$g = \gamma/2\pi \quad (3.26)$$

Esta cantidad es llamada gradiente en Yamamoto et al., (1986) y “tasa de crecimiento” en Hori et al., (1989).

El factor de atenuación  $Q^{-1}$  está dado por:

$$Q^{-1} \cong -\frac{2\gamma}{\omega} = -\frac{2g}{f} \quad (3.27)$$

para pequeños  $Q^{-1}$  (e.g. O’Connell & Budiansky 1978). Seguido, se representa la amplitud compleja  $\alpha$  en forma polar como:

$$\alpha = Ae^{i\theta} \quad (3.28)$$

Después los parámetros  $A$  y  $\theta$  corresponden a la amplitud real y la fase de los elementos de onda relevantes referidos en algún tiempo de origen. Entonces un elemento de onda está especificado por cuatro parámetros reales,  $\omega$ ,  $\gamma$ ,  $A$  y  $\theta$ .

Para representar gráficamente un conjunto de frecuencias complejas, se localiza en un plano 2D correspondiendo sus ejes con  $f$  y  $g$ . Esta gráfica se denomina “diagrama  $f$ - $g$ ” en documentos previos (e.g. Yamamoto et al., 1986; Hori et al., 1989; Fukao & Suda 1989). Un diagrama  $f$ - $g$  describe puramente las propiedades características del sistema dinámico que ha generado la serie de datos. También se puede estimar la varianza de las frecuencias características (Imanishi & Kumazawa 1988; Imanishi 1988), la cual también se representa a través de una gráfica  $f$ - $g$  dibujando barras de error (o elipses).

Las amplitudes y fases de los elementos de onda pertenecientes a un segmento de la serie de tiempo no tienen importancia primaria para el análisis de las propiedades características del sistema dinámico, ya que dependen del tiempo.

# Capítulo 4

## Metodología

Para llevar a cabo la investigación se propuso cuatro pasos: en el primero se hizo la recolección, clasificación y organización de los datos necesarios para este trabajo; en el segundo se desarrolló el algoritmo pertinente para la aplicación del método Sompi, en el tercero se aplicó la rutina para la extracción de las propiedades características y, finalmente, en el cuarto se realizaron las gráficas de  $Q$ , Frecuencia y Duración para diferentes periodos de registro.

### 4.1. Recolección y clasificación de los datos

Los datos utilizados en la presente investigación fueron seleccionados de la base histórica del OVSP, se escogió todos los eventos tipo Tornillo entre 14/07/1992 hasta 08/02/2012. Los archivos desde el año 2003 fueron extraídos en formato ASCII (American Standard Code for Information Interchange) del programa *Revisor* (Álvaro Pablo Acevedo-SGC) utilizado en el OVSP para consulta de formas de onda de sismos, este programa genera un archivo por cada estación en que se haya registrado el evento.

Los archivos anteriores al 2003, que no pueden ser consultados mediante el programa *Revisor*, se adquirieron en formato SUDS (Seismic Unified Data System) y fueron convertidos ASCII a través del programa *Conversor\_SUDS\_Ascii\_Pasto* (OVSP). Estos a diferencia de los primeros generaron un sólo archivo que contenía todas las trazas de las estaciones donde se registró la señal sísmica, por ello se utilizó una rutina creada en Java de nombre *Arregla\_formato* (OVSP) con el fin de generar un archivo por cada una de las trazas.

Una vez realizado esto se procedió a organizar la información por fecha de ocurrencia, se guardó en diferentes directorios renombrados por año de la forma *TOaaaa*, dentro de ellos

otros con el formato *aaaammddhmm* y contenido ahí el total de archivos ASCII con el formato *mmddhmm\_Estación* (Figura:4.1).

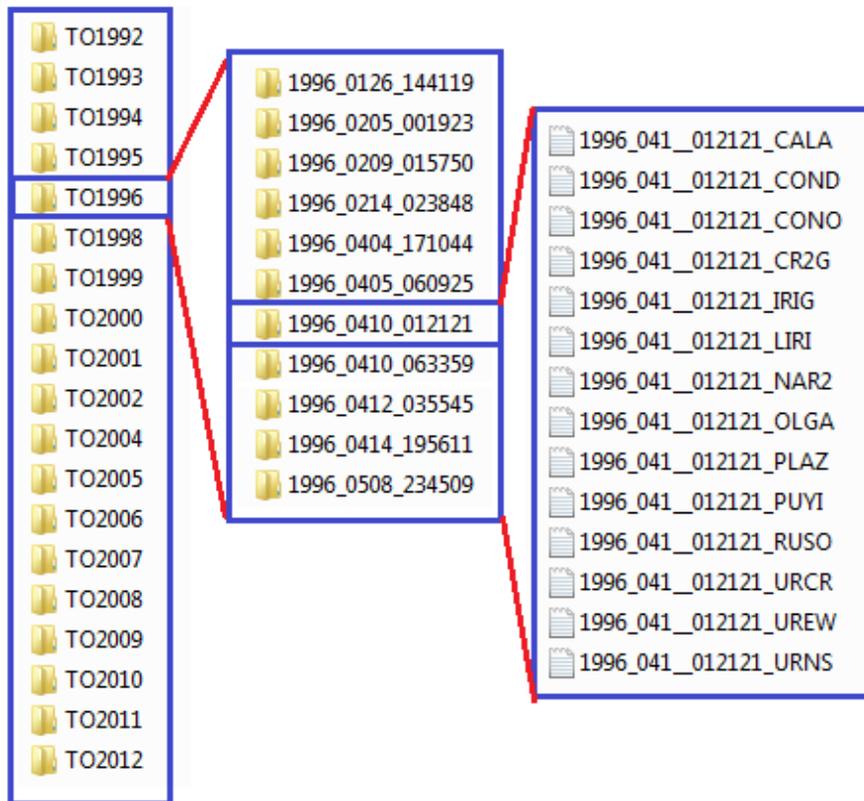


Figura 4.1: Estructura de archivos TO. (Fuente: Esta investigación)

De esa manera para la organización de la información de 20 años se obtuvo 19 directorios (en el 2003 no se registró ningún evento tipo TO), 946 eventos tipo Tornillo y un total de 16000 archivos ASCII.

Los archivos ASCII pertenecientes a los años entre 1992 y 2002 se diferencian en sus reglones de cabecera de aquellos que corresponden a los años 2004 - 2012, los primeros muestran la fecha y hora del evento, la estación del registro y la frecuencia de muestreo; los segundos, muestran además, el nombre del archivo con su respectiva extensión \*.GTO y el total de muestras que posee. Seguido a la identificación se expone los datos de amplitudes

que conforman el registro (Figura: 4.2).

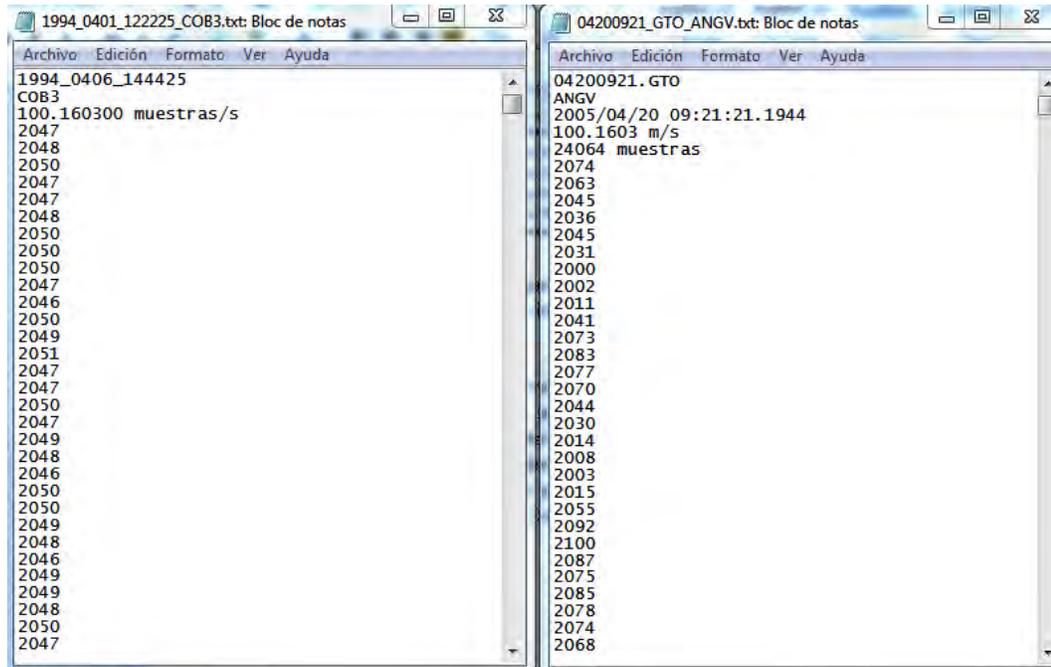


Figura 4.2: Formato de los archivos ASCII que contienen las trazas de los eventos registrados antes del 2002 (izquierda) y después del 2003 (derecha). (Fuente: Esta investigación)

Una vez se logró extraer y organizar toda la información, los archivos quedaron preparados para su procesamiento, por lo tanto se procedió a crear una rutina denominada *qsompi* en MATLAB.

## 4.2. Creación del algoritmo en MATLAB e implementación del programa *qsompi*

En el desarrollo del programa participaron el MSc. Oscar Cadena Ibarra (OVSP), el Phd. John Makario Londoño (OVSM), y la estudiante María Fernanda Acosta. El programa está creado en MATLAB y consta de seis archivos de extensión *\*.m*: *sompi\_calc*, *sompixsolo*, *qsompi*, *input\_params*, *substr* y *sompisolo*. Para ejecutarlo se utiliza el comando *qsompi* en

la ventana de comandos de MATLAB.

En primera instancia se genera un cuadro de texto que advierte que se debe importar una traza con su respectiva cabecera (Figura: 4.3).

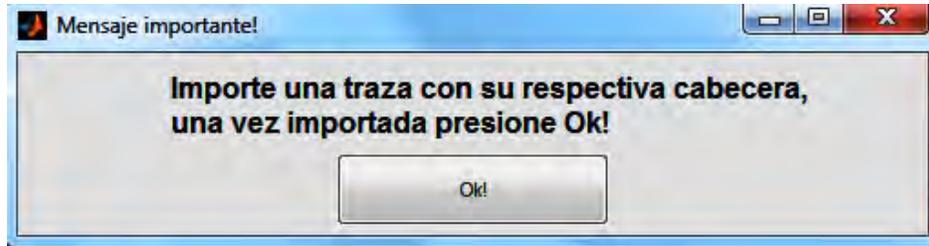


Figura 4.3: Primera ventana del programa *qsompi* al ejecutarlo en MATLAB. (Fuente: Esta investigación)

Ahora se debe importar un archivo ASCII que contenga la traza del TO seleccionado para el análisis. Al hacerlo se generan tres variables por defecto: *colheaders* que conserva información sobre el número de muestras total y se guarda como tipo cell; *data* que posee los datos tipo double que conforman la señal y *textdata*, de tipo cell, que guarda las cinco primeras líneas que formar la cabecera del archivo (Figura: 4.4).

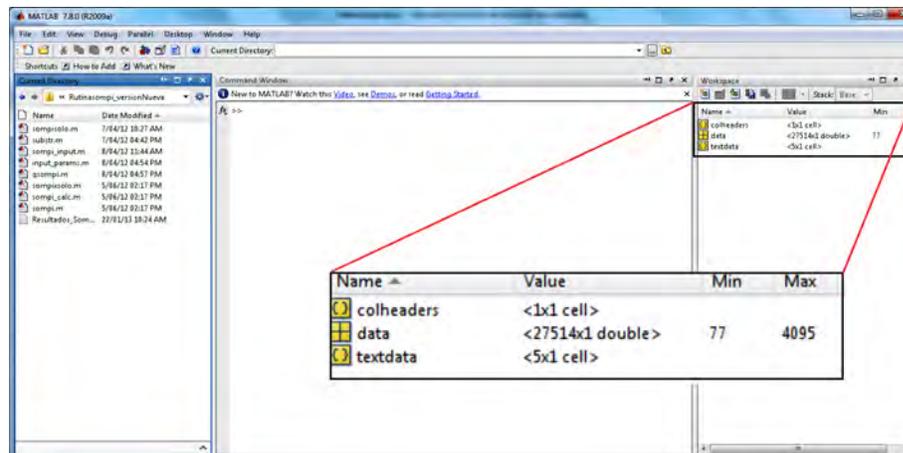


Figura 4.4: Variables generadas por MATLAB al importar los datos de un archivo ASCII de un evento tipo TO. En el recuadro se ha ampliado el contenido generado en el *Workspace* de MATLAB. (Fuente: Esta investigación)

Se presiona el botón *Ok* en el mensaje de cabecera (Figura: 4.3) y la rutina genera un cuadro de configuración de parámetros donde se proporcionan valores a algunas variables necesarias para el cálculo del modelo autorregresivo y criterios para la gráfica resultante (Figura:4.5). La opción *Orden inferior* y *Orden superior* determina el menor y mayor orden del modelo autorregresivo respectivamente. *Celda frecuencia* y *Celda G-rate* permite establecer el número de celdas utilizada en la grilla para el conteo de namisos en cada celda y seleccionar la celda con el mayor número de estos. Por último *Ancho banda fre* ajusta el ancho de banda alrededor del pico de frecuencia analizada.

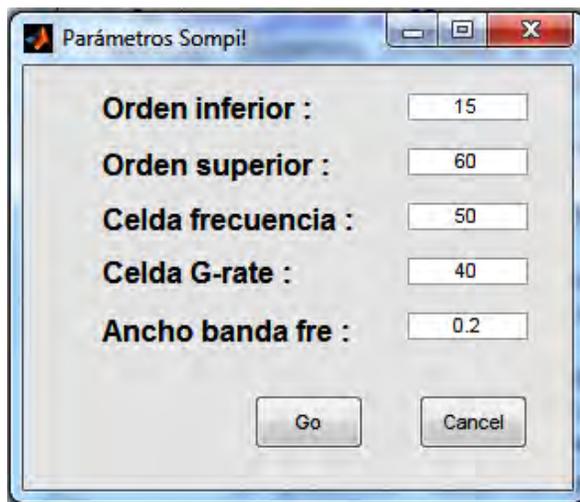


Figura 4.5: Cuadro de configuración del método Sompi. (Fuente: Esta investigación)

Los valores de los parámetros por defecto se escogieron como se muestran en la Figura: 4.5 teniendo en cuenta trabajos como los de Kumagai y Chuet donde se trabaja con órdenes que oscilan entre 2 y 60.

Se continúa pulsando el botón *Go* y el programa se encarga de substraer los datos de información de cada evento construyendo cuatro variables:

*Cabeza*: convierte la variable *textdata* a tipo caracter.

*Tipo*: Reconoce el tipo de evento, para este caso GTO.

*Estación:* Reconoce la estación donde se leyó el registro.

*Fecha:* Reconoce la fecha y hora del evento.

Se prepara la señal restándole la media a cada uno de los datos y dividiendo entre el máximo valor positivo con el fin de normalizarla. Después, se aplica un filtro pasa-alto que sólo afecta la visualización de la señal, esto se hace ya que las estaciones de banda ancha como Cufiño (CUVZ) muestran derivas de baja frecuencia en la traza del evento. Se realiza la primera gráfica de amplitud normalizada en el eje vertical y el tiempo en segundos en el eje horizontal, este último teniendo en cuenta la frecuencia de muestreo de 100 Hz y el número de muestras en el archivo (Figura: 4.6).

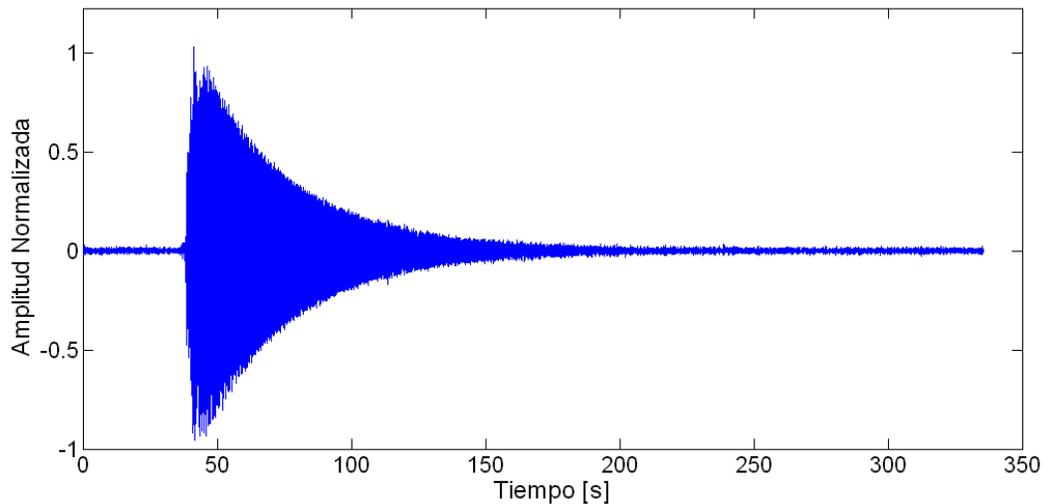


Figura 4.6: Primera gráfica de *qsompi* en la que se muestra la traza del evento TO graficado con un filtro pasa-alto. (Fuente: Esta investigación)

El algoritmo permite seleccionar el principio y fin de la señal a analizar de la primera gráfica, esto se incluyó teniendo en cuenta los archivos que muestran un largo tiempo de traza o varios eventos en la misma. Una vez delimitado el sismo, se obtiene una nueva gráfica con los mismos ejes que la anterior (Figura:4.7).

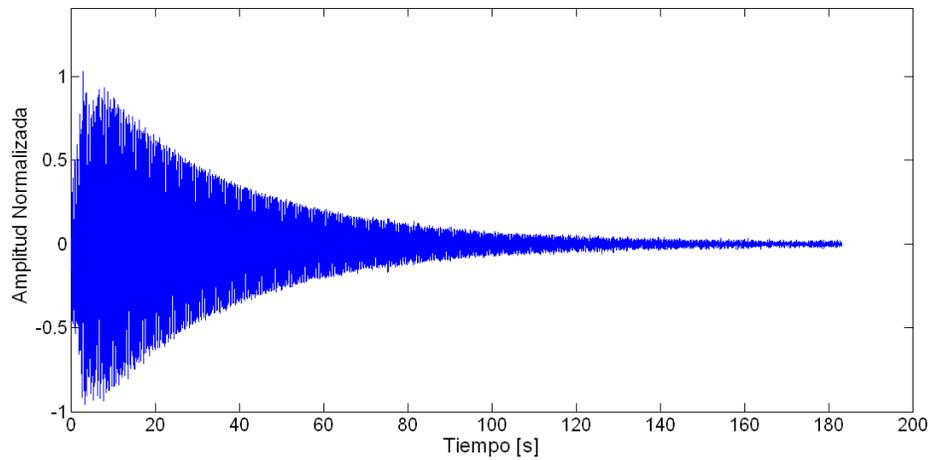


Figura 4.7: Segunda gráfica del evento después de seleccionar su comienzo y fin. (Fuente: Esta investigación)

Ahora similar al procedimiento anterior, se selecciona sólo un segmento del decaimiento del Tornillo, despreciando el inicio impulsivo del mismo y parte final de la coda, así se elimina la parte no homogénea de la ecuación, igualmente se genera una tercera gráfica que sólo muestra el segmento a analizar (Figura:4.8).

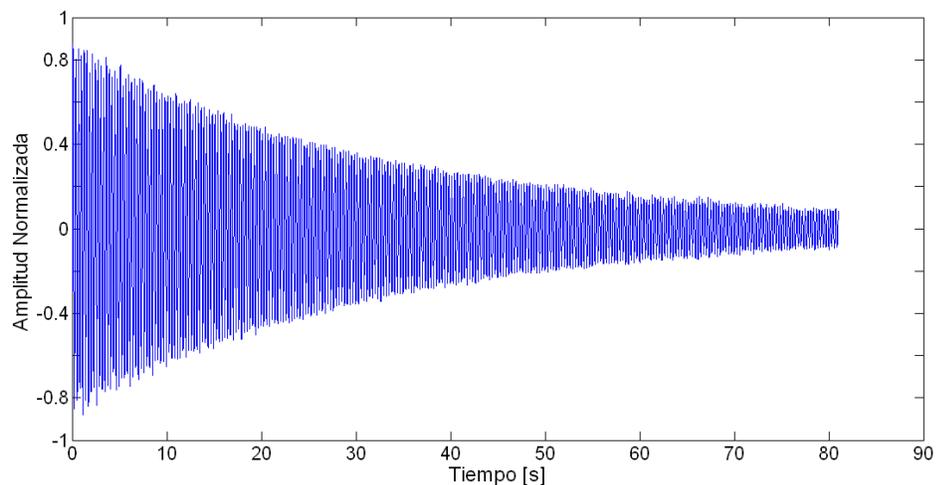


Figura 4.8: Tercera gráfica del evento mostrando la selección del decaimiento que se analizará. (Fuente: Esta investigación)

Terminada la selección, el programa aplica la función FFT de MATLAB para calcular la transformada de Fourier de los datos y con esta se realiza el gráfico del espectro de Fourier del segmento seleccionado (Figura:4.9).

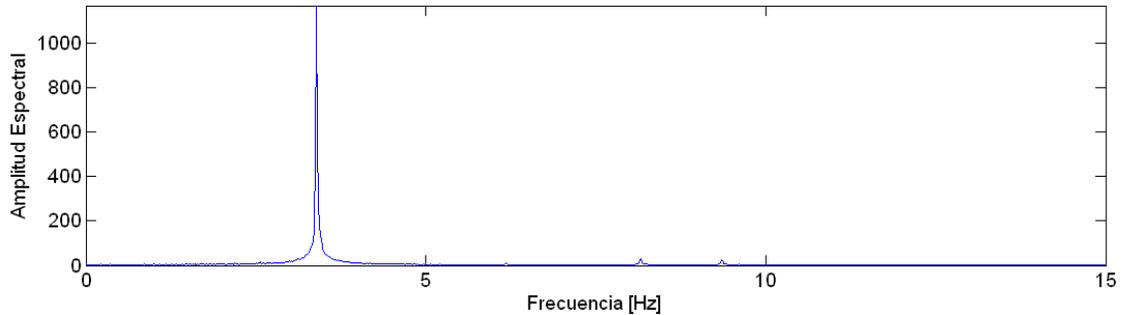


Figura 4.9: Espectro de Fourier de los datos seleccionados. (Fuente: Esta investigación)

En esta última gráfica se selecciona la o las frecuencias de interés, donde se aplicará el método Sompí. La rutina busca los valores de frecuencia máximos dentro de los intervalos elegidos, crea seis matrices donde se almacenarán los resultados finales, realiza un filtro sobre cada una de las frecuencias escogidas y llama la función *sompisolo.m*. Aquí se resuelve la ecuación del modelamiento autorregresivo, se calcula  $\omega$  y  $\gamma$  correspondientes a las partes real e imaginaria de la frecuencia angular compleja, también se calcula  $f$  la frecuencia ordinaria,  $g$  el gradiente de decaimiento y el factor de calidad  $Q$ .

Estos resultados se grafican en un diagrama  $f$ - $g$  (Figura: 4.10) y se realiza una búsqueda de la celda con la mayor cantidad de namisos, finalmente se conforman los vectores de  $\gamma$  y  $f$ . Se calculan los valores finales con el promedio de  $f$ ,  $\gamma$  y  $Q$ , de la misma forma se procede con las desviaciones estándares relacionadas.

Posteriormente se realizan las gráficas de las líneas iso- $Q$ , desde un mínimo de 0 hasta 900 con pasos de 50. En el eje de las abscisas de la gráfica con los resultados, se muestra la frecuencia en unidades normalizadas y en el eje de las ordenadas la tasa de decaimiento o gradiente en *segundos*<sup>-1</sup> ( $s^{-1}$ ) donde las rectas representan un mismo valor de  $Q$ , cada círculo azul es un namiso y es posible distinguir su concentración (encerrada en círculo rojo).

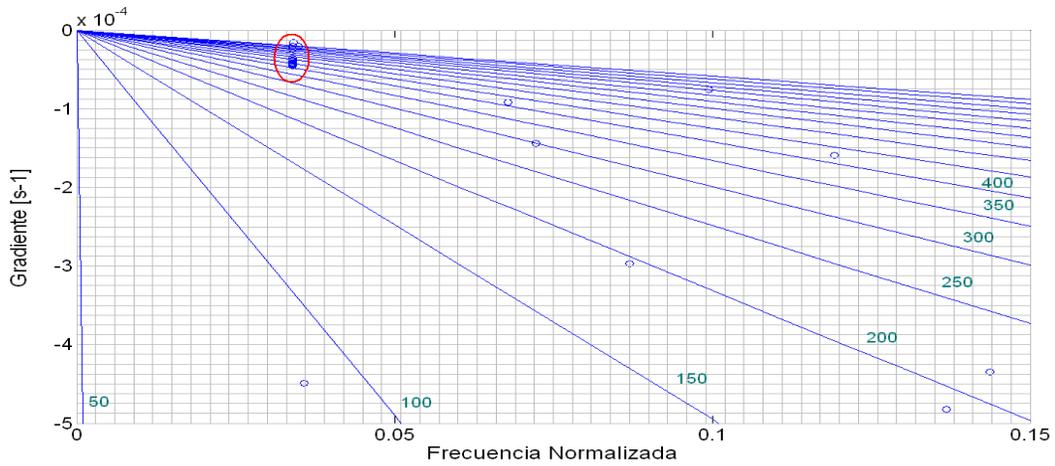


Figura 4.10: Diagrama  $f-g$  con los resultados, se observa la concentración de namisos en el círculo rojo. (Fuente: Esta investigación)

Se almacenan los resultados finales en sus respectivas matrices y se procede a mostrar en la pantalla la frecuencia, la tasa de decaimiento y  $Q$  con sus respectivos errores porcentuales (Figura: 4.11). Para el análisis de resultados se tuvo en cuenta que el error porcentual de  $Q$  no superara el 10 %.

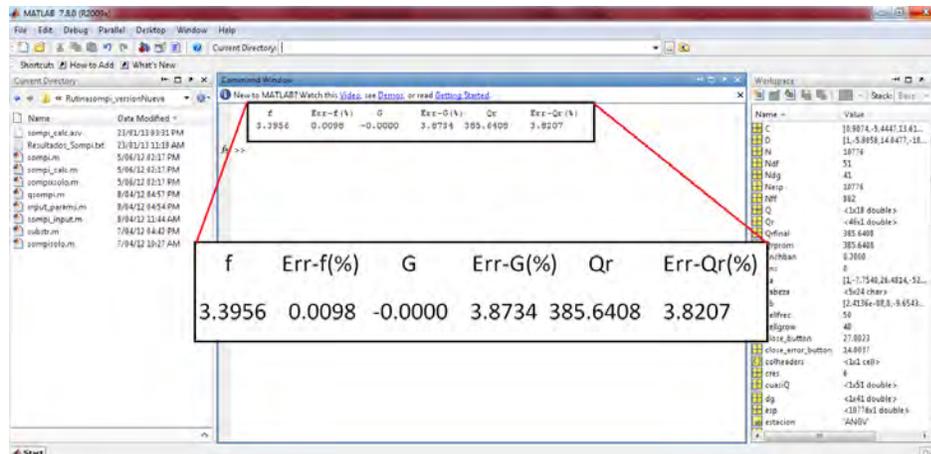
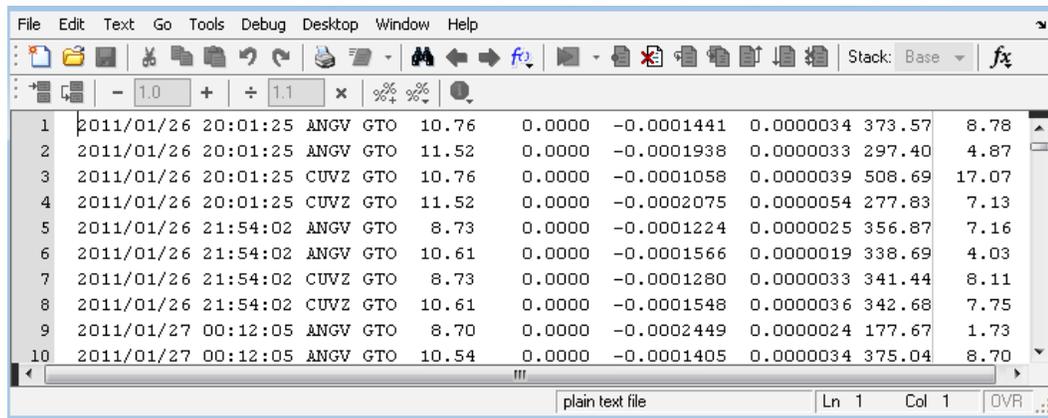


Figura 4.11: Resultados finales en la ventana *Command Windows*. En el recuadro se ha ampliado los datos generados: Frecuencia:  $f$ , Error en  $f$ :  $Err-f(\%)$ , Gradiente:  $G$ , Error en  $G$ :  $Err-G(\%)$ ,  $Q$  radiativo:  $Q_r$ , Error en  $Q_r$ :  $Err-Q_r(\%)$ . (Fuente: Esta investigación)

El programa crea automáticamente un archivo de nombre *Resultados\_Sompi.txt* donde se guardan en su respectivo orden, la fecha, estación, tipo,  $f$ , desviación estándar de  $f$ ,  $g$ , desviación estándar de  $g$ ,  $Q$  y su desviación estándar, de todos los TO procesados (Figura: 4.12).



1	2011/01/26	20:01:25	ANGV	GTO	10.76	0.0000	-0.0001441	0.0000034	373.57	8.78
2	2011/01/26	20:01:25	ANGV	GTO	11.52	0.0000	-0.0001938	0.0000033	297.40	4.87
3	2011/01/26	20:01:25	CUVZ	GTO	10.76	0.0000	-0.0001058	0.0000039	508.69	17.07
4	2011/01/26	20:01:25	CUVZ	GTO	11.52	0.0000	-0.0002075	0.0000054	277.83	7.13
5	2011/01/26	21:54:02	ANGV	GTO	8.73	0.0000	-0.0001224	0.0000025	356.87	7.16
6	2011/01/26	21:54:02	ANGV	GTO	10.61	0.0000	-0.0001566	0.0000019	338.69	4.03
7	2011/01/26	21:54:02	CUVZ	GTO	8.73	0.0000	-0.0001280	0.0000033	341.44	8.11
8	2011/01/26	21:54:02	CUVZ	GTO	10.61	0.0000	-0.0001548	0.0000036	342.68	7.75
9	2011/01/27	00:12:05	ANGV	GTO	8.70	0.0000	-0.0002449	0.0000024	177.67	1.73
10	2011/01/27	00:12:05	ANGV	GTO	10.54	0.0000	-0.0001405	0.0000034	375.04	8.70

Figura 4.12: Archivo Resultados\_Sompi.txt con los resultados del proceso. (Fuente: Esta investigación)

Finalizado este desarrollo y teniendo en cuenta que la duración de los eventos TO es un parámetro importante para el análisis de los mismos, se creó una rutina llamada *duración.m* en MATLAB, con el fin de leer la duración de cada uno de los eventos. Esta rutina posee una cabecera para el reconocimiento de la información de la traza y la creación de un eje de tiempo en segundos deducido con la frecuencia de muestreo. Se ejecuta con la instrucción *duración* en la ventana de comandos de MATLAB después de la importación de los datos desde el archivo ASCII. La rutina grafica la señal y se selecciona el comienzo y fin del evento, el programa se encarga de calcular la duración total y de guardar esta información en un archivo de texto de nombre *Duraciones.txt*.

### 4.3. Extracción de las propiedades características

Se procedió a ejecutar el programa *qsompi* y la rutina *duración* para todos los Tornillos seleccionados, el método se aplicó a los datos registrados en dos estaciones sísmicas para

cada evento teniendo en cuenta que estas no presentaran irregularidades como por ejemplo picos asociados a pulsos de voltaje no deseados, huecos u otro sismo dentro del TO. Así, para cada TO se obtuvo un diagrama  $f-g$ , su espectro y su traza con los respectivos resultados (Figura:4.13).

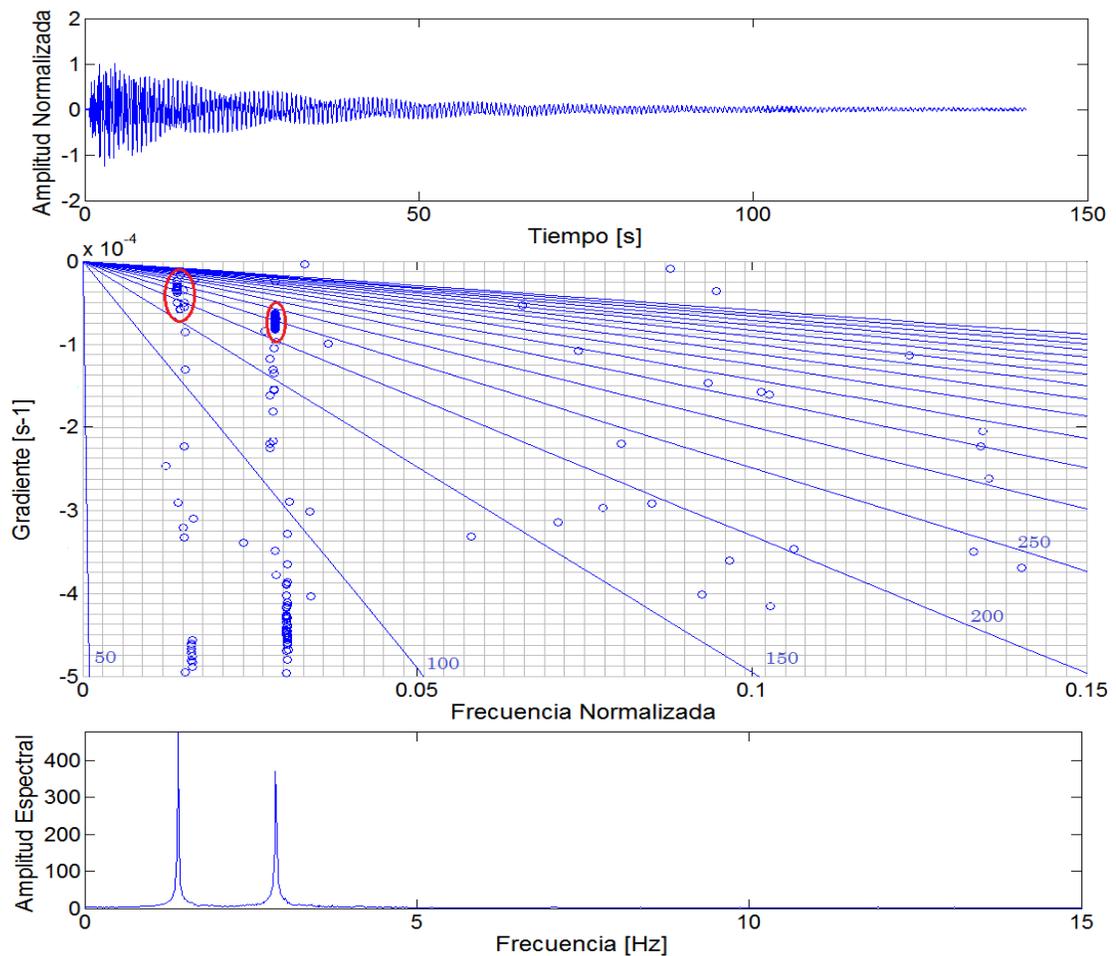


Figura 4.13: Traza (arriba), diagrama  $f-g$  (centro) y espectro (abajo) para el evento TO registrado el 20 de abril 2005. Obsérvese la presencia de dos armónicos en su espectro. (Fuente: Esta investigación)

Una vez procesada la totalidad de la información se guardó un archivo por cada año con el formato *Resultados\_Sompi\_aaaa* y los archivos de duración con el formato *Duración\_aaaa*.

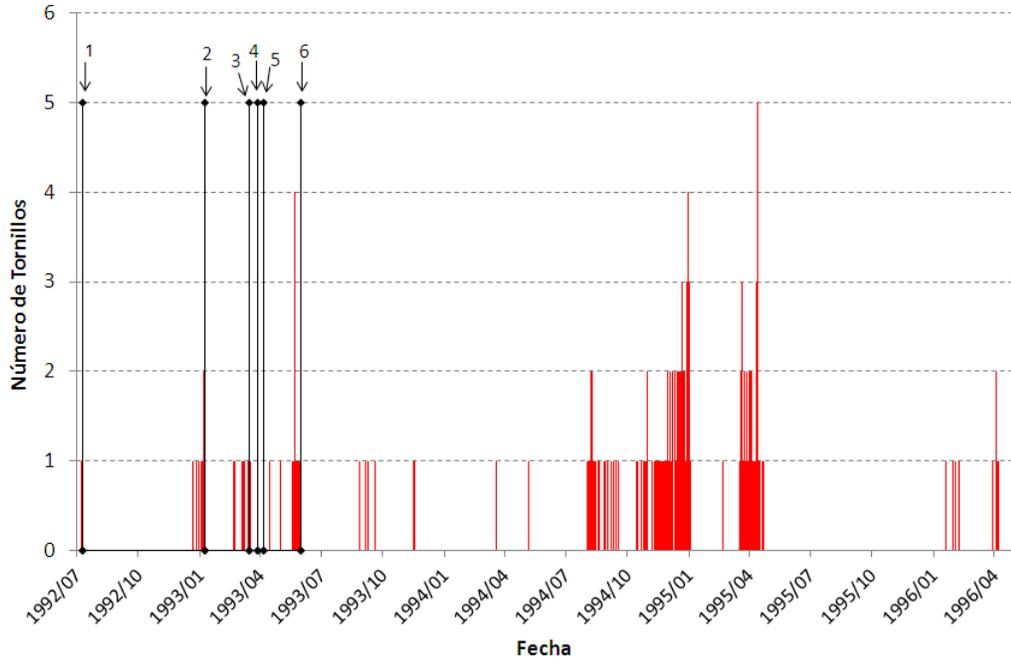
De la misma forma se guardó los diagramas *f-g* en directorios clasificados por año y renombrados con el formato *aaaammddhmm\_Estación*.

#### 4.4. Clasificación y selección de periodos de registro de Tornillos. Gráficas de Q, Frecuencia y Duración.

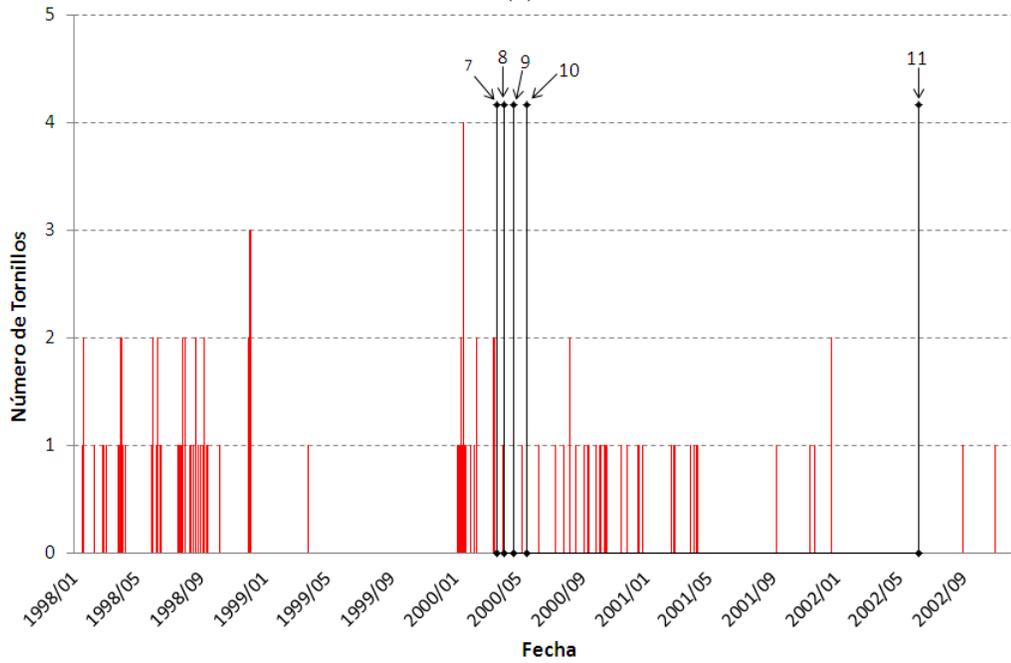
Los primeros gráficos realizados muestran la relación entre el número de eventos tipo TO, su fecha de ocurrencia y las erupciones registradas por el volcán Galeras en los últimos 20 años. Se realizaron cuatro gráficas en intervalos de cinco años (Figura: 4.14a, 4.14b, 4.14c y 4.14d) donde se muestra en rojo el conteo diario de sismos TO y con líneas de color negro las erupciones que se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Erupciones registradas entre 1992 y 2012. Las erupciones marcadas con \* estuvieron precedidas por eventos TO. (Fuente: Esta investigación)

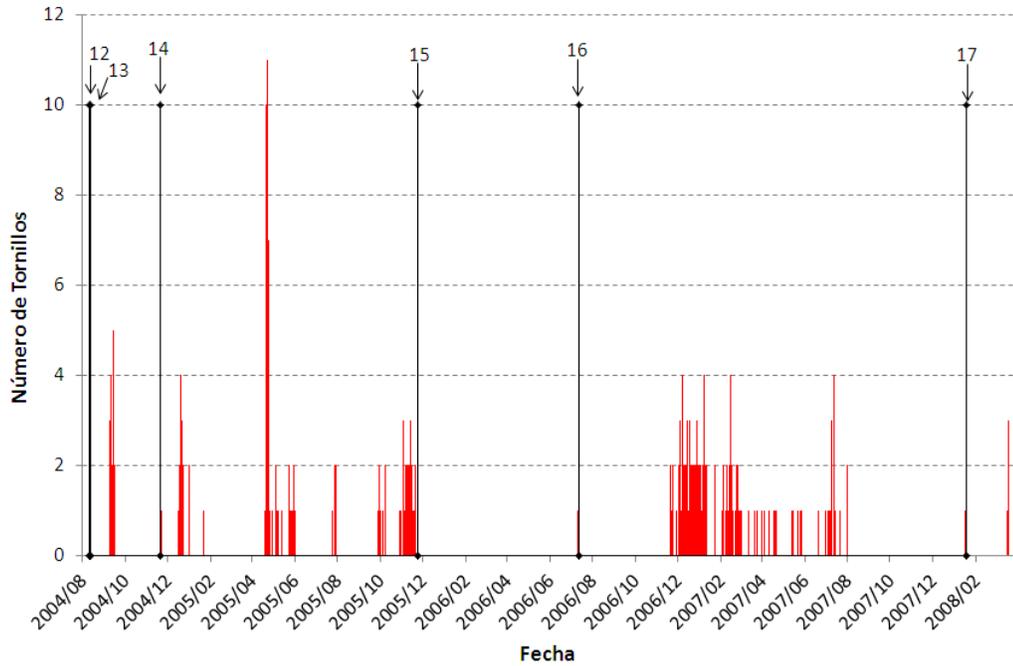
No.	Fecha de erupción	No.	Fecha de erupción	No.	Fecha de erupción
1*	16/07/1992	11	07/06/2002	21	24/04/2009
2*	14/01/1993	12	11/08/2004	22*	24/04/2009
3*	23/03/1993	13	12/08/2004	23*	29/04/2009
4	04/04/1993	14	21/11/2004	24	07/06/2009
5	13/04/1993	15*	24/11/2005	25	08/06/2009
6*	07/06/1993	16*	12/07/2006	26*	30/09/2009
7*	21/03/2000	17*	17/01/2008	27*	20/11/2009
8*	05/04/2000	18	14/02/2009	28*	02/01/2010
9	22/04/2000	19	20/02/2009	29	25/08/2010
10*	18/05/2000	20	13/03/2009		



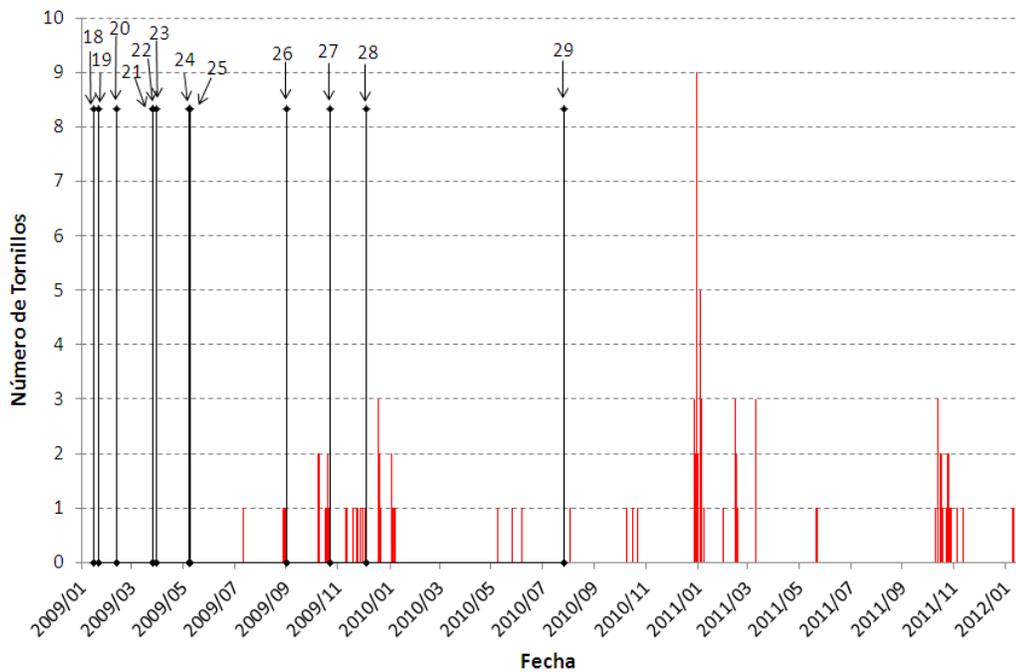
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 4.14: Conteo diario de Tornillos con las erupciones registradas en el mismo intervalo de tiempo (a) 1992 a 1996, (b) 1998 a 2002, (c) 2004 a 2008 y (d) 2009 a 2012. (Fuente: Esta investigación)

Teniendo en cuenta las gráficas anteriores se organizaron 42 periodos y se clasificaron como pre-eruptivo o no pre-eruptivo (Tabla 4.2).

Tabla 4.2: Clasificación de los periodos de registro de Tornillos. El \* en la columna de consecutivo indica que el periodo fue pre-eruptivo. (Fuente: Esta investigación)

Consecutivo	Fecha de inicio	Fecha de terminación	No. de Tornillos
1*	14/07/1992	16/07/1992	4
2*	27/12/1992	13/01/1993	8
3*	27/02/1993	23/03/1993	6
4	21/04/1993	21/04/1993	1
5	07/05/1993	07/05/1993	1
6*	24/05/1993	05/06/1993	12
7	02/09/1993	26/09/1993	9
8	22/11/1993	24/11/1993	3
9	25/03/1994	25/03/1994	1
10	12/05/1994	12/05/1994	1
11	09/08/1994	26/08/1994	18
12	02/09/1994	09/01/1995	98
13	27/02/1995	27/02/1995	1
14	24/03/1995	28/04/1995	44
15	26/01/1996	08/05/1996	11
16	17/01/1998	08/10/1998	60
17	01/12/1998	06/12/1998	6
18	26/03/1999	26/03/1999	1
19*	06/01/2000	21/03/2000	16
20	18/02/2001	10/04/2001	7
21	08/09/2001	08/09/2001	1
22	11/11/2001	22/12/2001	4

Continúa en la siguiente página

Consecutivo	Fecha de inicio	Fecha de terminación	No. de Tornillos
23	31/08/2002	31/08/2002	1
24	31/10/2002	31/10/2002	1
25	04/12/2002	04/12/2002	1
26	08/09/2004	15/09/2004	20
27*	21/11/2004	21/01/2005	18
28	18/04/2005	29/07/2005	66
29*	28/09/2005	20/11/2005	41
30*	10/07/2006	12/07/2006	2
31	19/11/2006	31/07/2007	145
32*	16/01/2008	17/01/2008	6
33*	16/03/2008	24/04/2009	7
34*	05/07/2009	28/09/2009	6
35	16/01/2010	19/01/2010	12
36	07/06/2010	05/07/2010	3
37	01/09/2010	01/09/2010	1
38	07/11/2010	20/11/2010	3
39	26/01/2011	08/04/2011	36
40	19/06/2011	21/06/2011	2
41	08/11/2011	11/12/2011	20
42	07/02/2012	08/02/2012	3

Una vez realizada esta clasificación, se procedió a separar las lecturas correspondientes a las diferentes estaciones. Se elaboró las gráficas de  $Q$  vs Fecha,  $f$  vs Fecha, Duración vs Fecha y  $Q$  vs  $f$  para los datos de cada estación (Figura: 4.15a, 4.15b, 4.15c y 4.15d). Las gráficas que contienen datos de  $Q$  y  $f$  presentan información de los armónicos dominantes del TO correspondiente. Por lo tanto, en estas gráficas se observa más de un conjunto de puntos con distintos colores, representando los parámetros de armónicos diferentes.

Cada magnitud fue graficada con su respectiva desviación estándar. Finalmente se seleccionaron 16 periodos para el análisis de las variaciones de las propiedades características. Esta selección se realizó basada en el número de TO registrados en cada periodo, excluyendo los periodos con un número de Tornillos insuficiente para observar tendencias y extraer conclusiones respecto a las variaciones de los parámetros en cuestión.

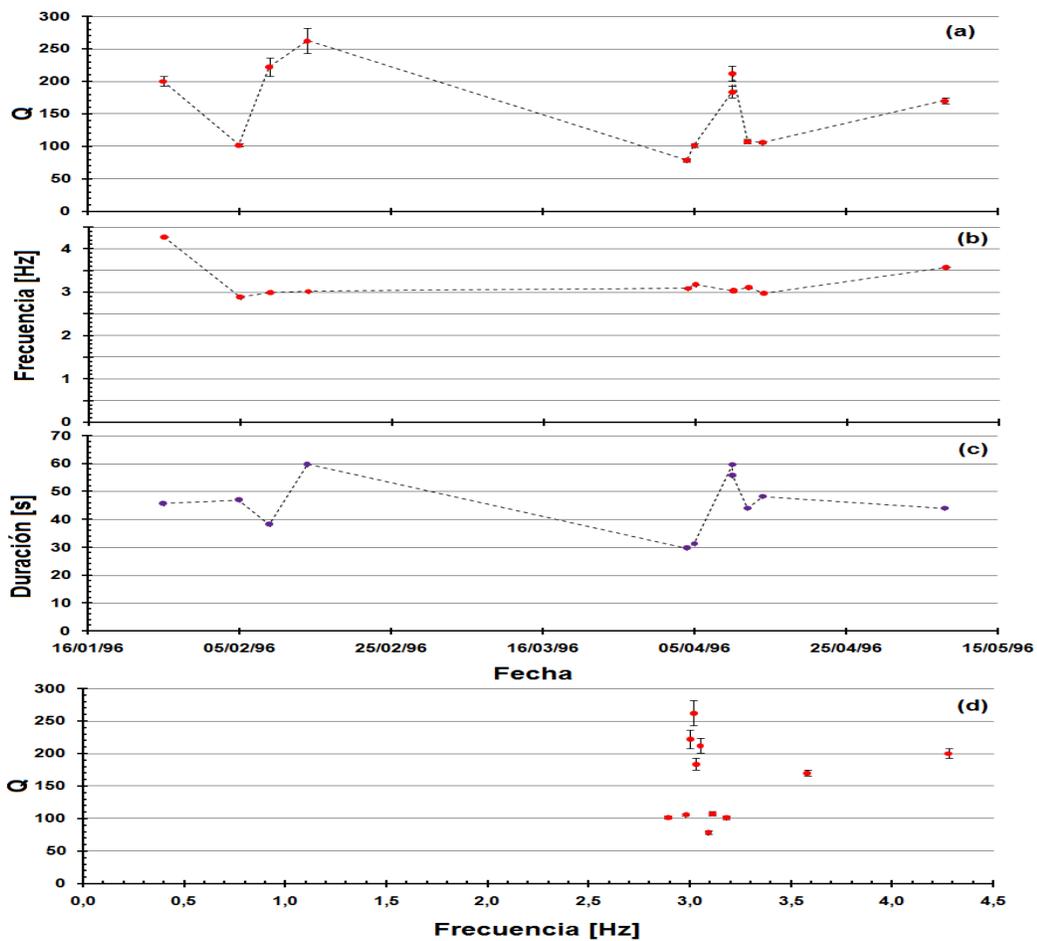


Figura 4.15: Ejemplo de los gráficos construidos para uno de los periodos seleccionados. (a)  $Q$  vs Fecha, (b)  $f$  vs Fecha, (c) Duración vs Fecha y (d)  $Q$  vs  $f$ . (Fuente: Esta investigación)

A continuación se muestra un diagrama de flujo que resume el tratamiento de la información y la aplicación de la metodología explicada (Figura 4.16).

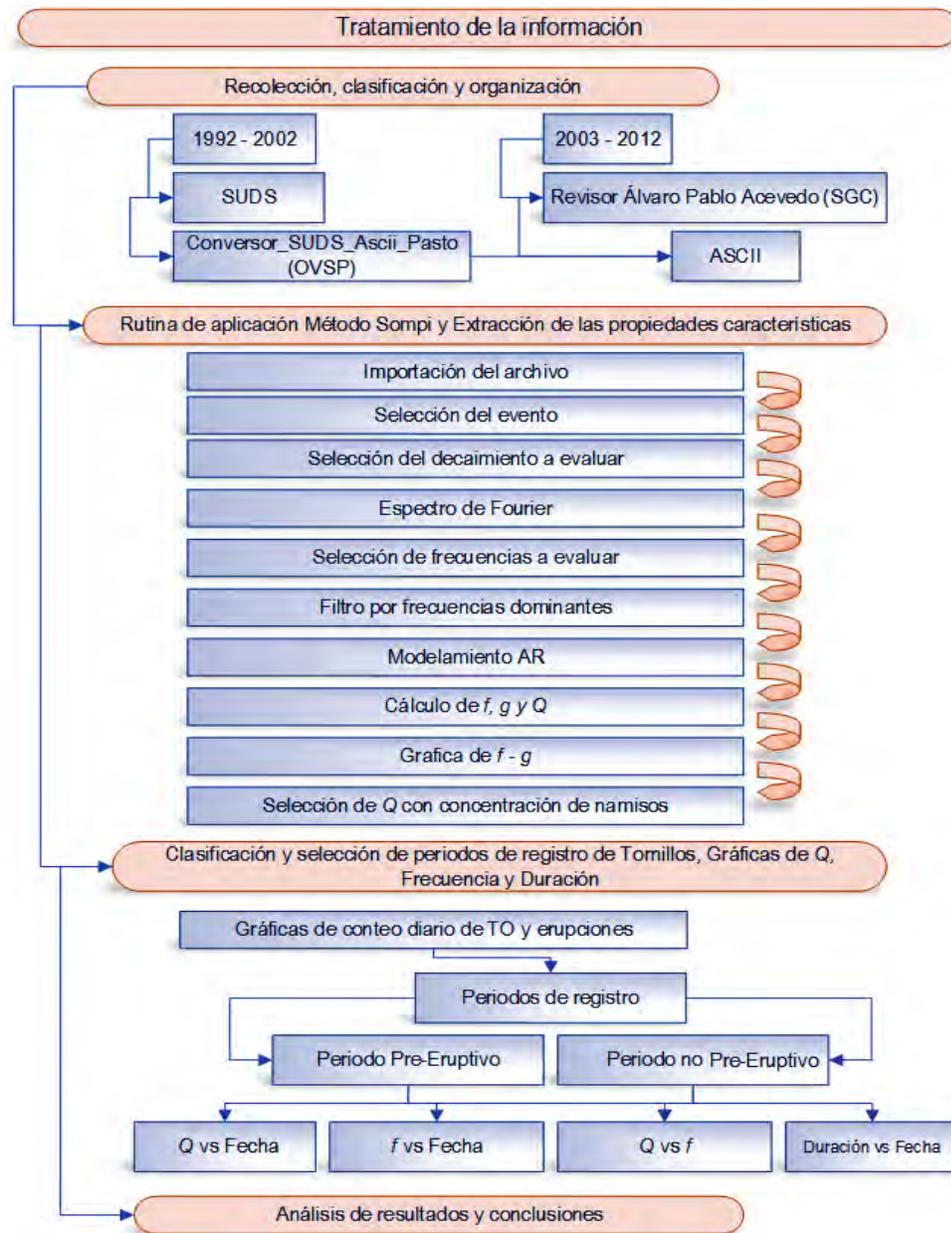


Figura 4.16: Diagrama de flujo con el tratamiento de la información. (Fuente: Esta investigación)

Una vez elaborados todos los diagramas posibles, se procedió con el análisis e interpretación de los resultados.

# Capítulo 5

## Resultados

De la aplicación de la metodología se obtuvo como resultados los diagramas  $Q$  vs Fecha,  $f$  vs Fecha y Duración vs Fecha (Figura 5.1 a Figura 5.9). Se obtuvo también las gráficas de  $Q$  vs  $f$  (Figura 5.10 a Figura 5.26). Se ha representado con color rojo y azul los datos asociados al armónico de menor y mayor frecuencia respectivamente, así mismo, se representan con barras de error, la desviación estándar relacionada a cada magnitud.

### 5.1. Gráficas de $Q$ , Frecuencia y Duración con el tiempo

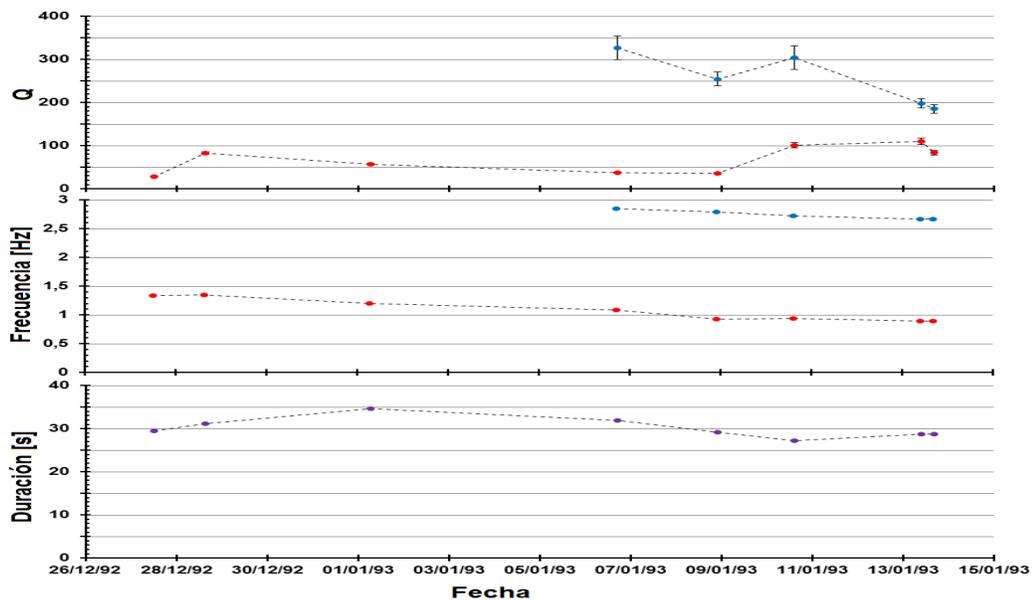


Figura 5.1: Gráficas de  $Q$  (arriba),  $f$  (medio) y Duración (abajo) vs tiempo del periodo comprendido entre el 27/12/92 hasta el 13/01/93 utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Cráter. (Fuente: Esta investigación)

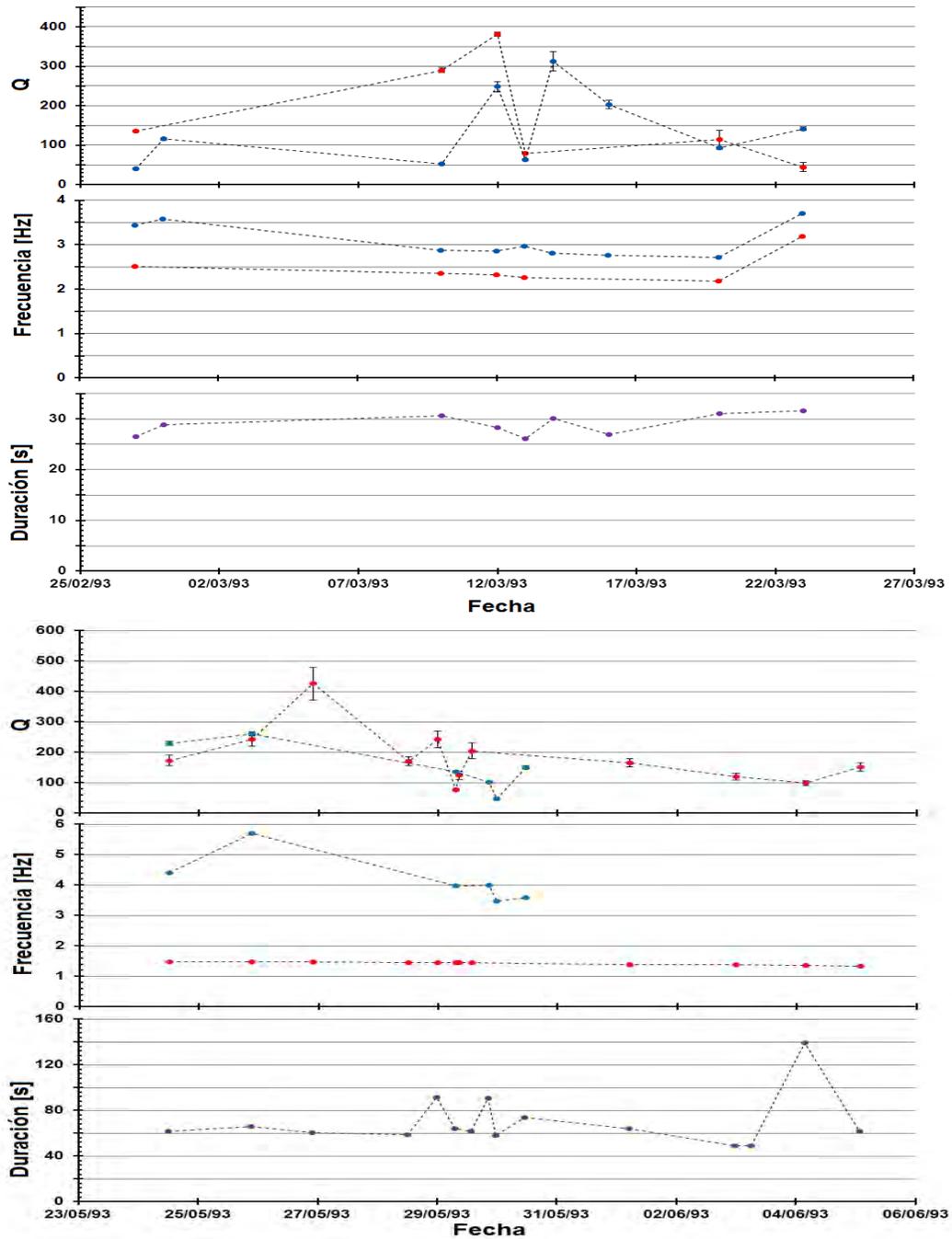


Figura 5.2: Gráficas de  $Q$  (arriba),  $f$  (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 27/12/92 hasta el 23/03/93 (Superior) y el 24/05/93 hasta el 05/06/93 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Cráter. (Fuente: Esta investigación)

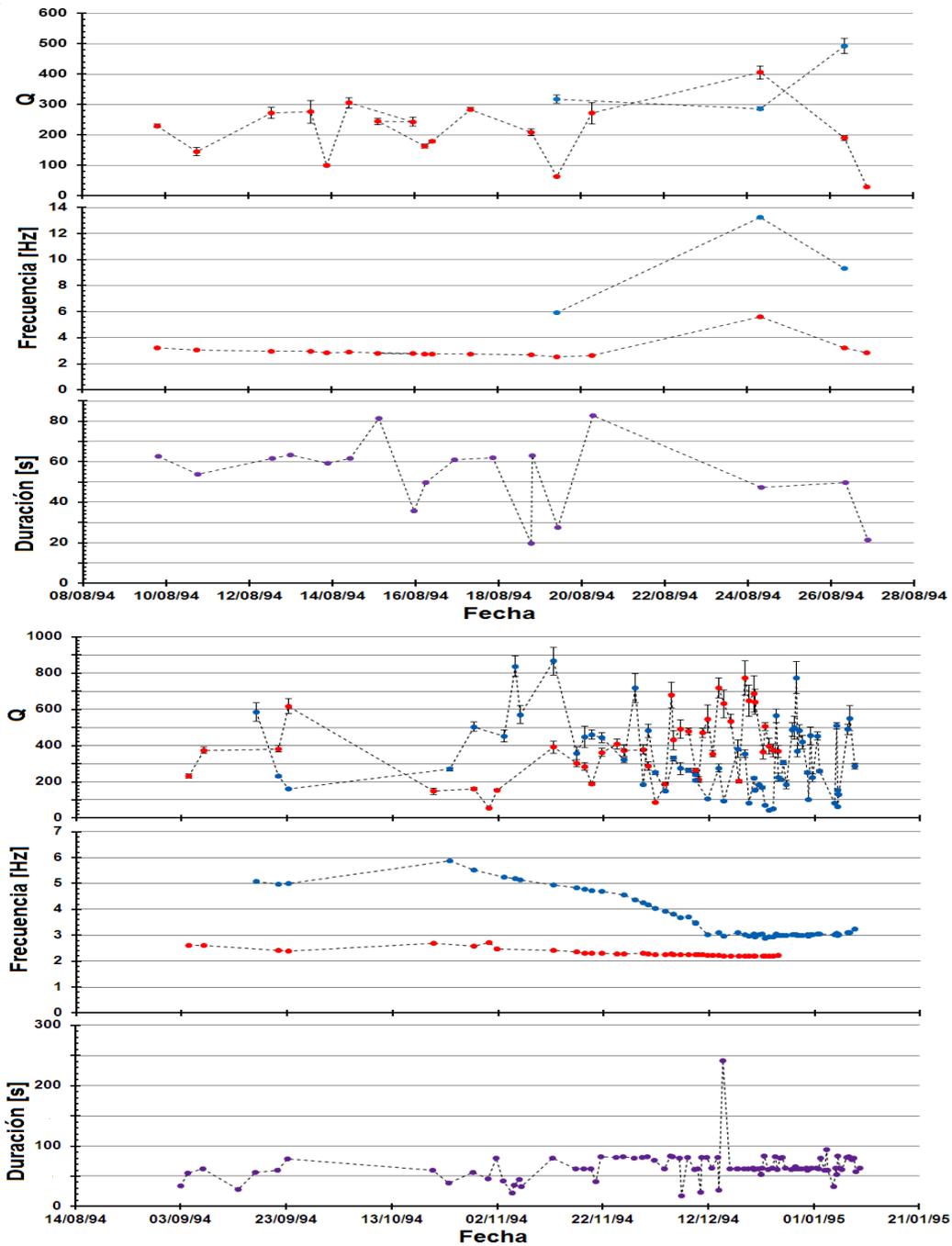


Figura 5.3: Gráficas de  $Q$  (arriba),  $f$  (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 09/08/94 hasta el 26/08/94 (Superior) y 02/09/95 hasta el 09/01/95 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Olga y Cráter respectivamente. (Fuente: Esta investigación)

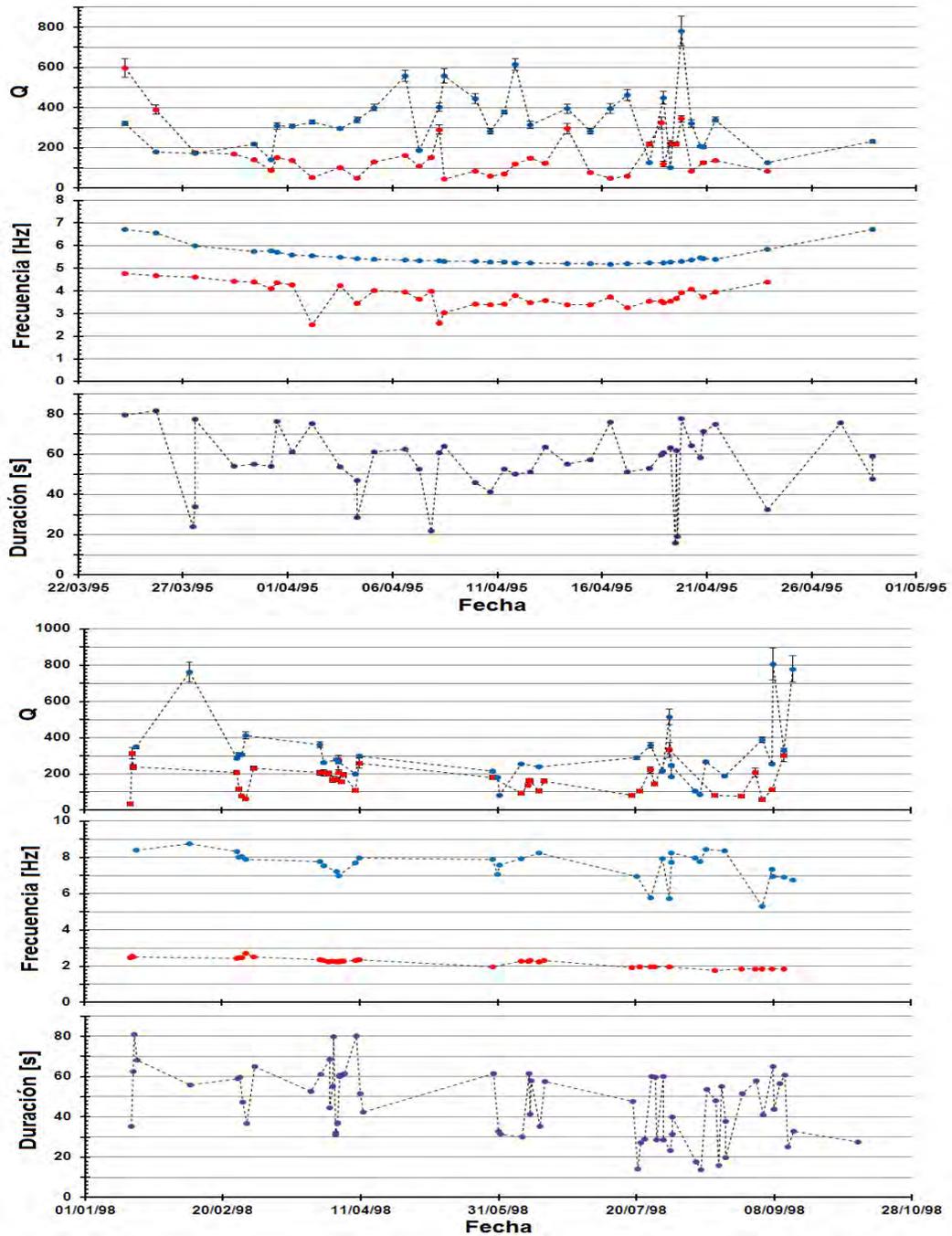


Figura 5.4: Gráficas de  $Q$  (arriba),  $f$  (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 24/03/95 hasta el 28/04/95 (Superior) y 17/01/98 hasta el 08/10/98 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Cráter. (Fuente: Esta investigación)

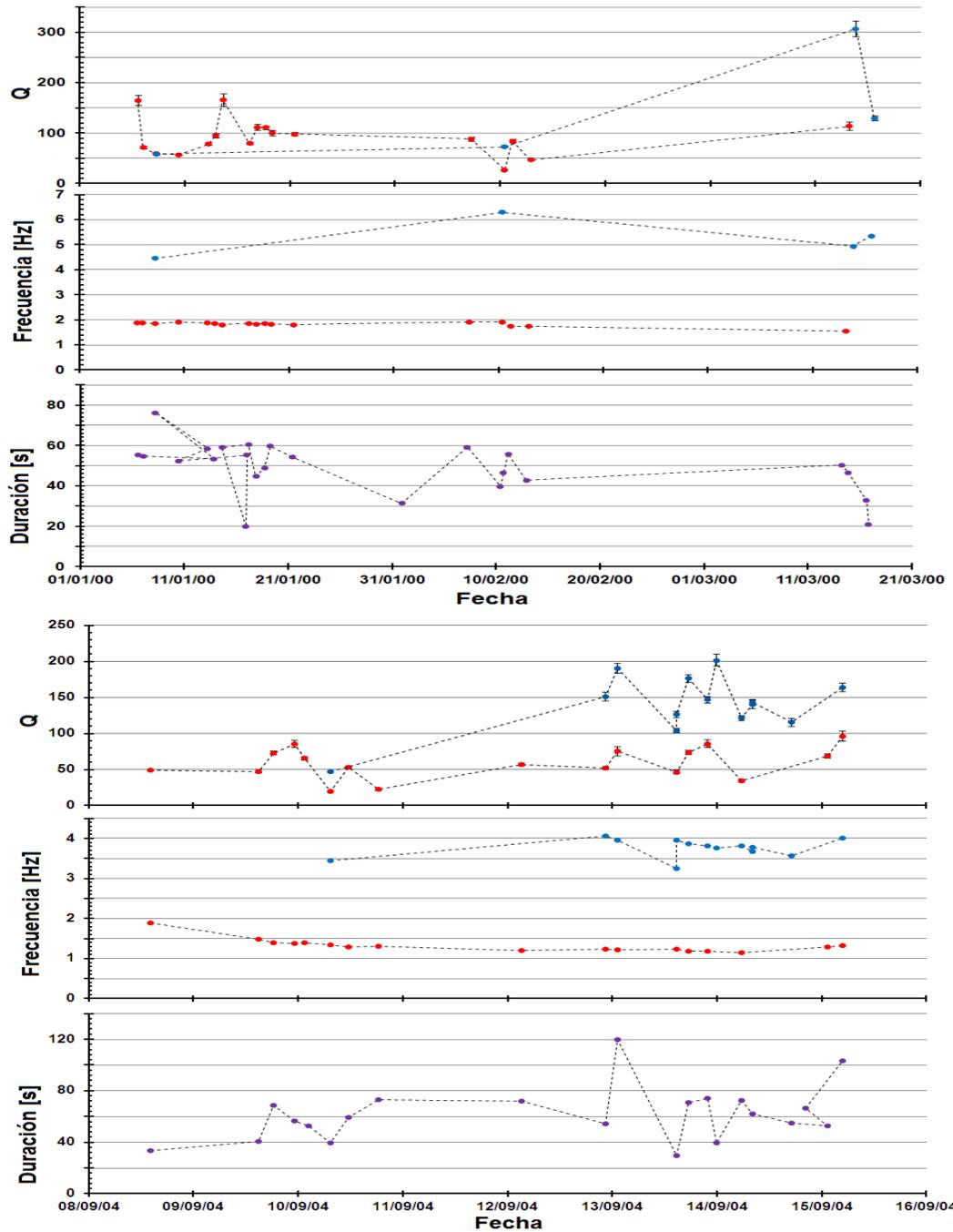


Figura 5.5: Gráficas de  $Q$  (arriba),  $f$  (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 06/01/00 hasta el 21/03/00 (Superior) y 08/09/04 hasta el 15/09/04 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación)

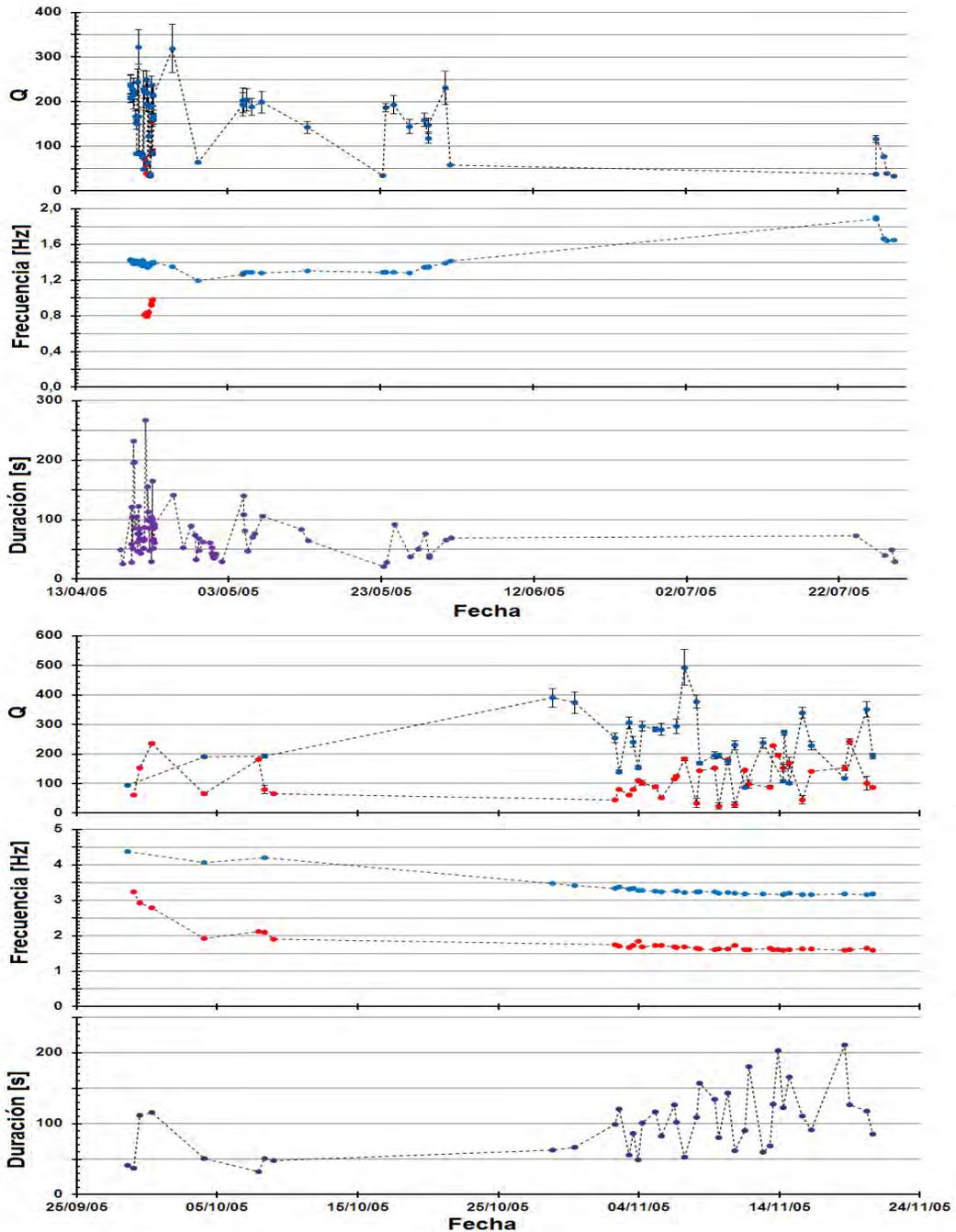


Figura 5.6: Gráficas de  $Q$  (arriba),  $f$  (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 18/04/05 hasta el 29/07/05 (Superior) y 28/09/05 hasta el 24/11/05 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

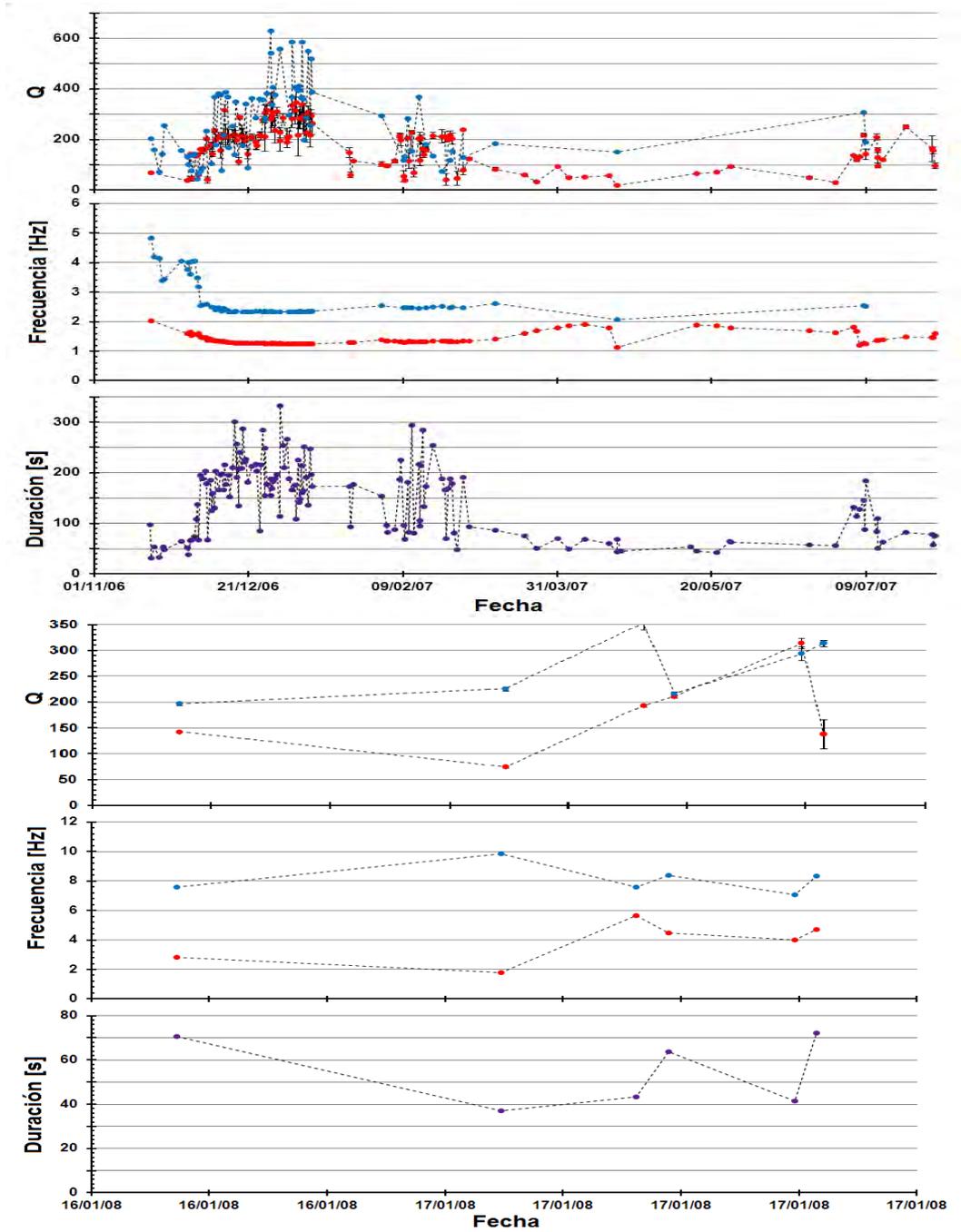


Figura 5.7: Gráficas de  $Q$  (arriba),  $f$  (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendidos entre el 19/11/06 hasta el 31/07/07 (Superior) y 16/01/08 hasta el 17/01/08 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

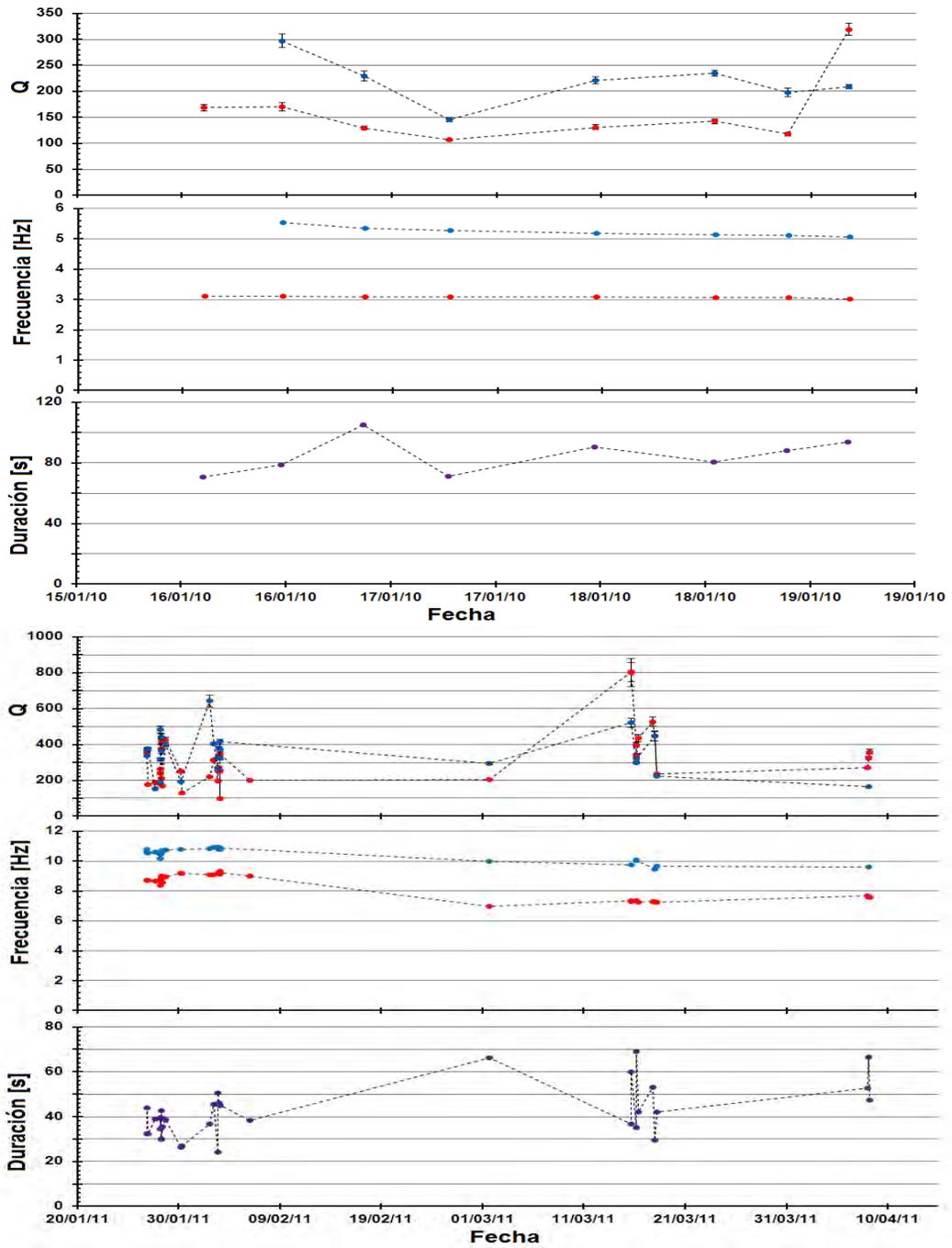


Figura 5.8: Gráficas de  $Q$  (arriba),  $f$  (medio) y Duración (abajo) vs tiempo de los periodos comprendido entre el 16/01/10 hasta el 19/01/10 (Superior) y 26/01/11 hasta el 08/04/11 (Inferior) utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

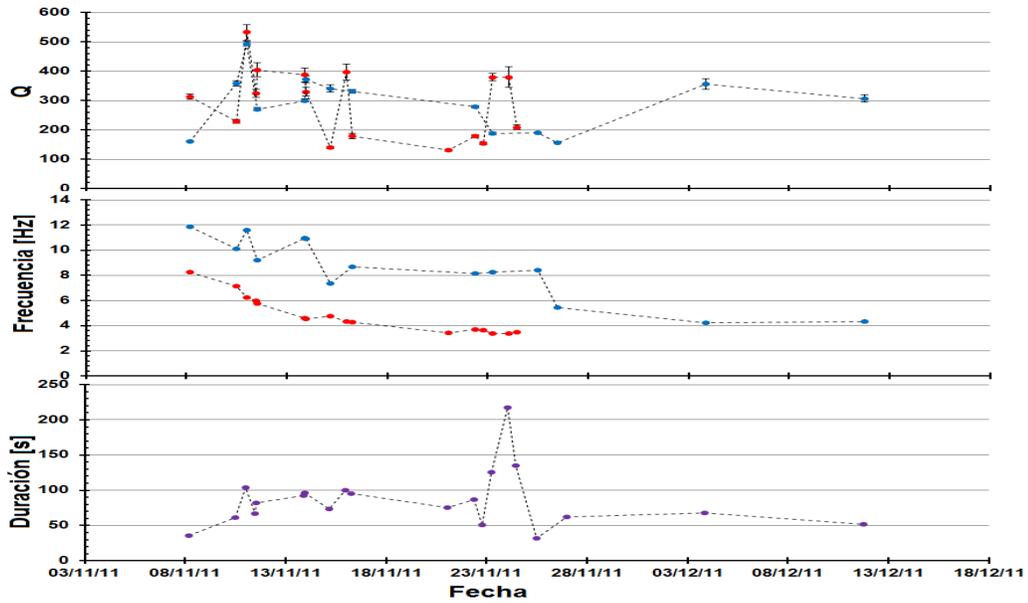


Figura 5.9: Gráficas de  $Q$  (arriba),  $f$  (medio) y Duración (abajo) vs tiempo del periodo comprendido entre el 08/11/11 hasta el 11/12/11 utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

## 5.2. Gráficas de $Q$ vs Frecuencia

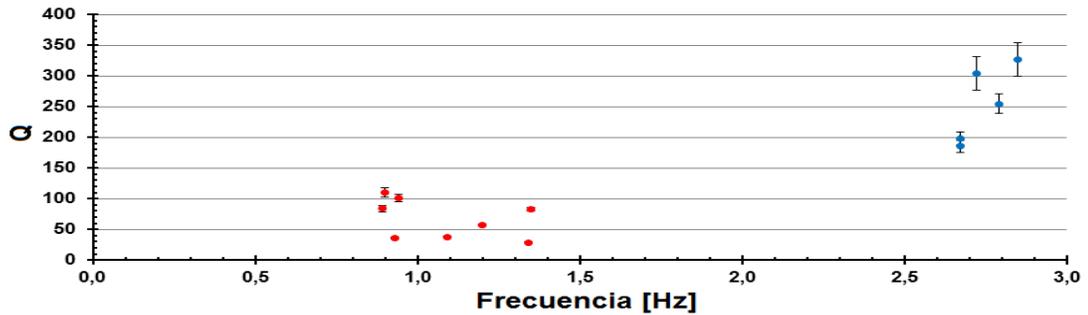


Figura 5.10: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 27/12/92 hasta el 13/01/93 utilizando los datos obtenidos de las lecturas de la estación Cráter. (Fuente: Esta investigación)

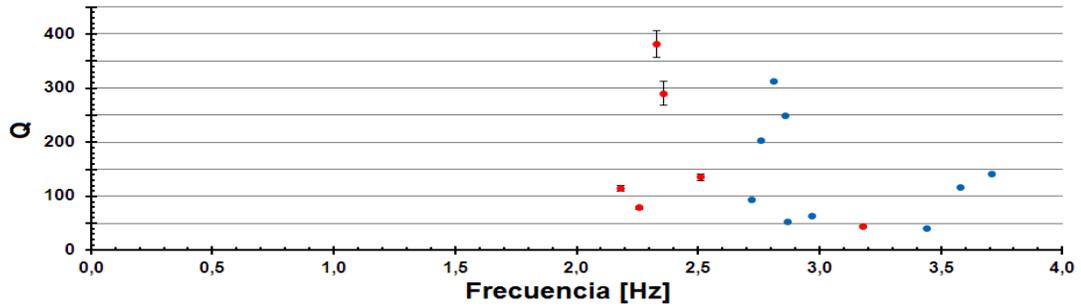


Figura 5.11: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 27/02/93 hasta el 23/03/93 utilizando los datos obtenidos de la estación Cráter. (Fuente: Esta investigación)

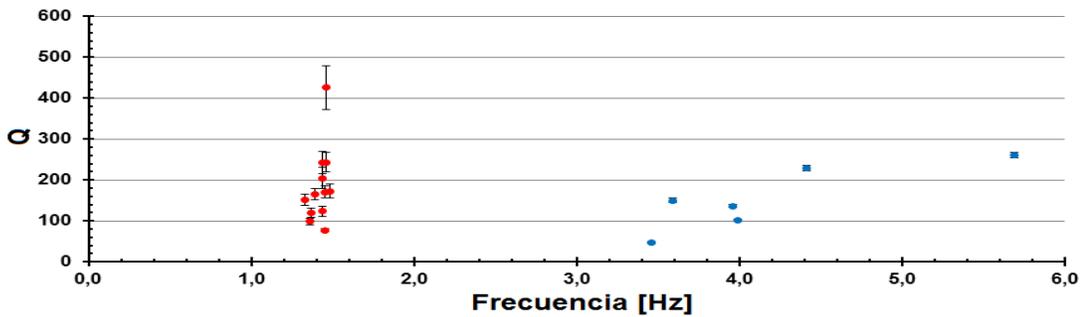


Figura 5.12: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 24/05/93 hasta el 28/04/95 utilizando los datos obtenidos de la estación Urcunina. (Fuente: Esta investigación)

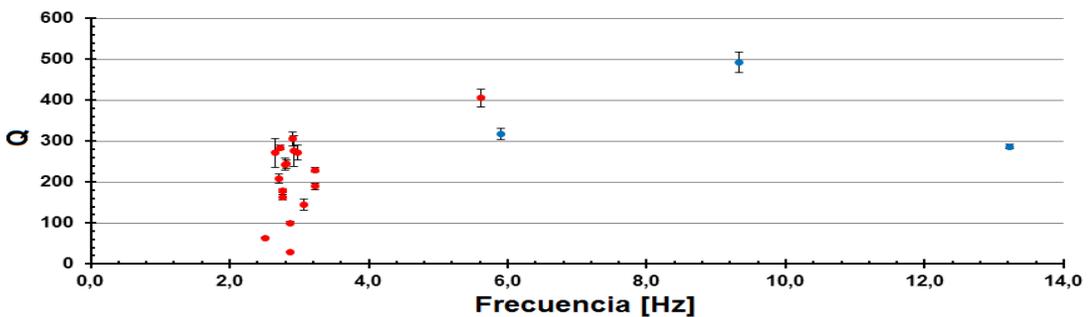


Figura 5.13: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 09/08/94 hasta el 26/08/94 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación)

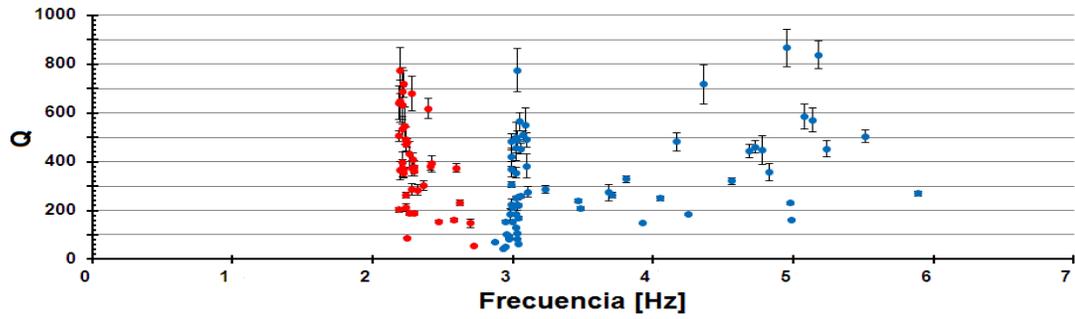


Figura 5.14: Gráficas de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 02/09/94 hasta el 09/01/95 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación)

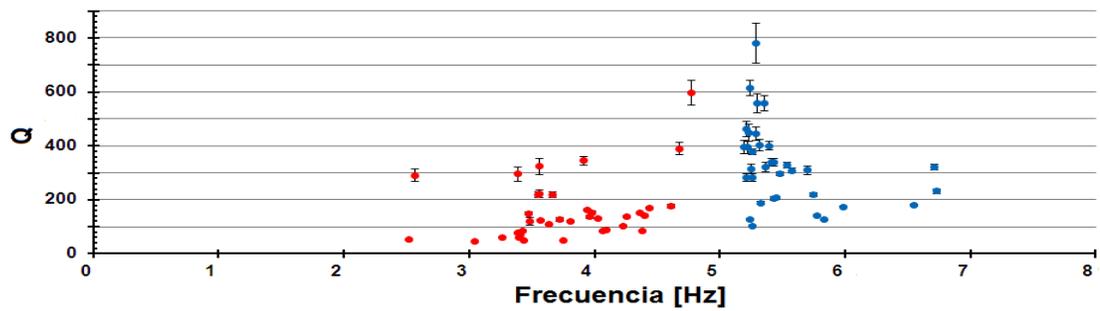


Figura 5.15: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 24/03/95 hasta el 28/04/95 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación)

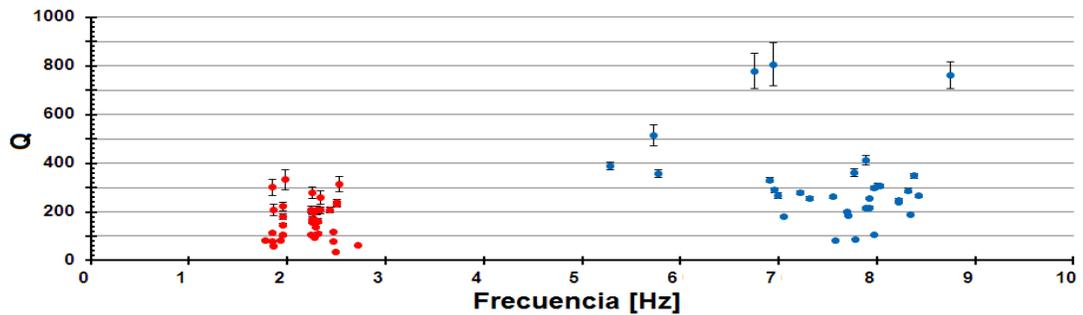


Figura 5.16: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 17/01/98 hasta el 08/10/98 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación)

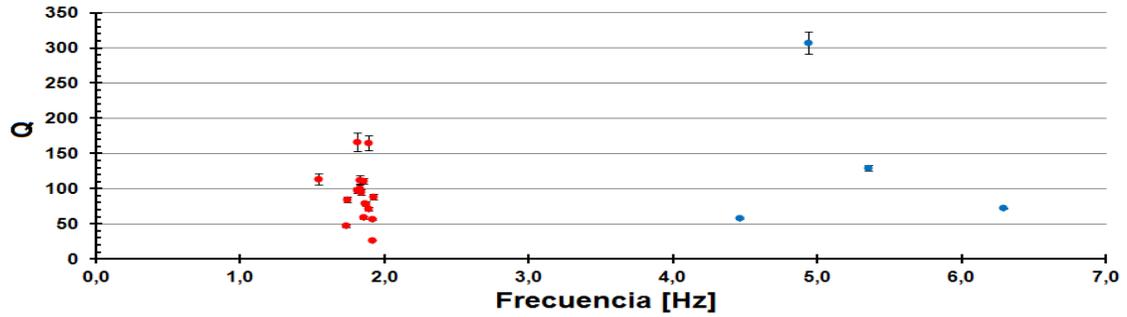


Figura 5.17: Gráficas de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 06/01/00 hasta el 21/03/00 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación)

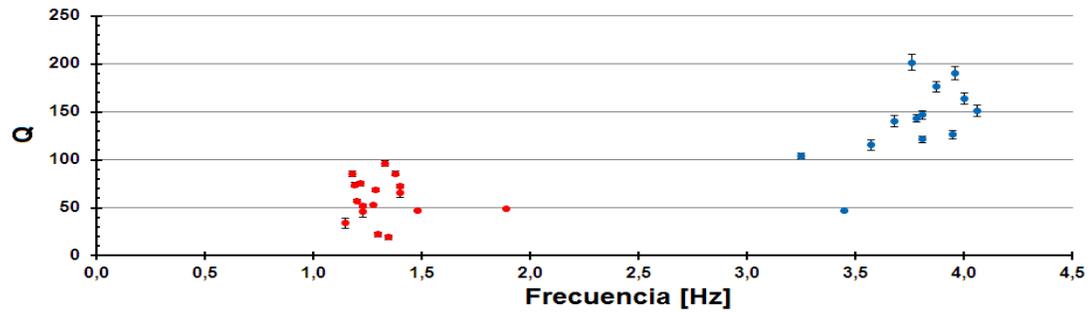


Figura 5.18: Gráficas de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 08/09/04 hasta el 15/09/04 utilizando los datos obtenidos de la estación Olga. (Fuente: Esta investigación)

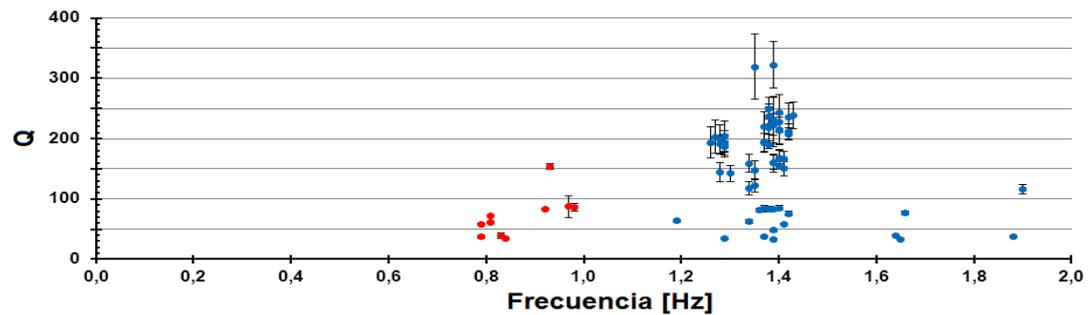


Figura 5.19: Gráficas de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 18/04/05 hasta el 29/07/05 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

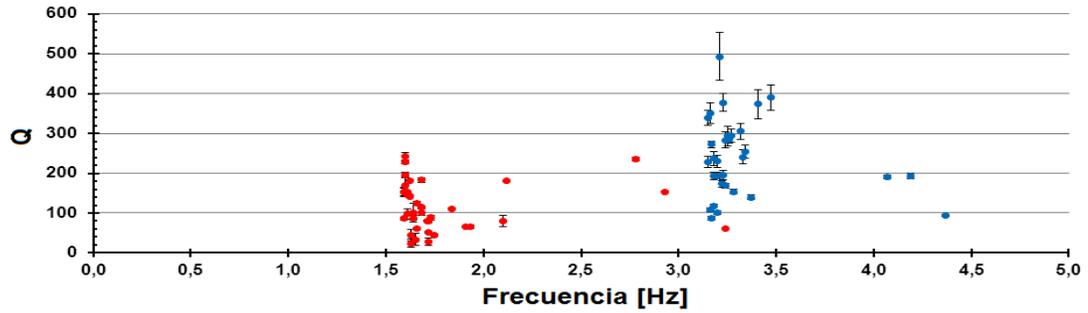


Figura 5.20: Gráficas de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 28/09/05 hasta el 20/11/05 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

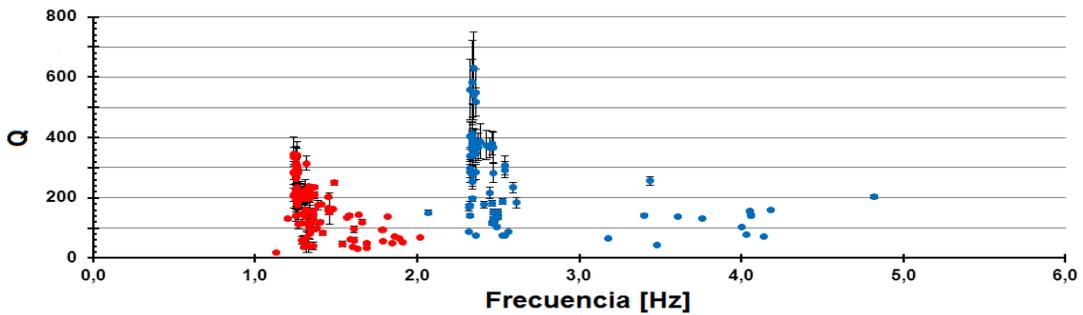


Figura 5.21: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 19/11/06 hasta el 31/07/07 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

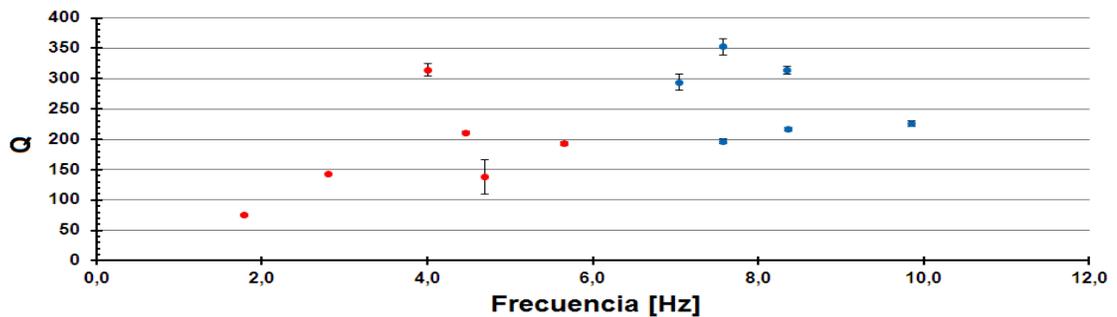


Figura 5.22: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 16/01/08 hasta el 17/01/08 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

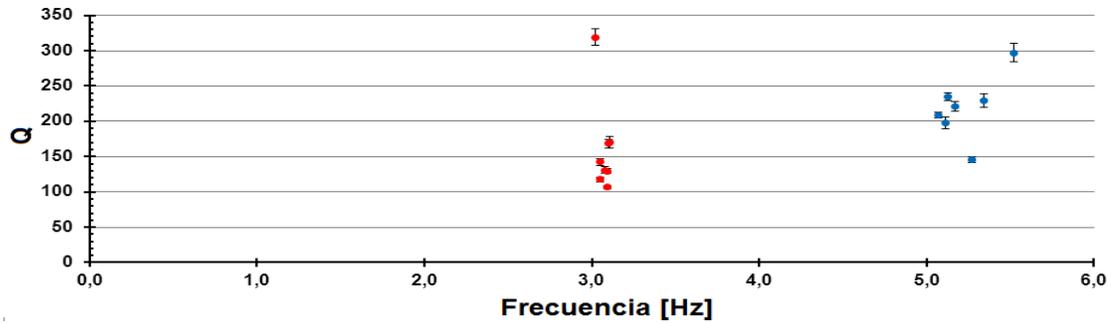


Figura 5.23: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 16/01/10 hasta el 19/01/11 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

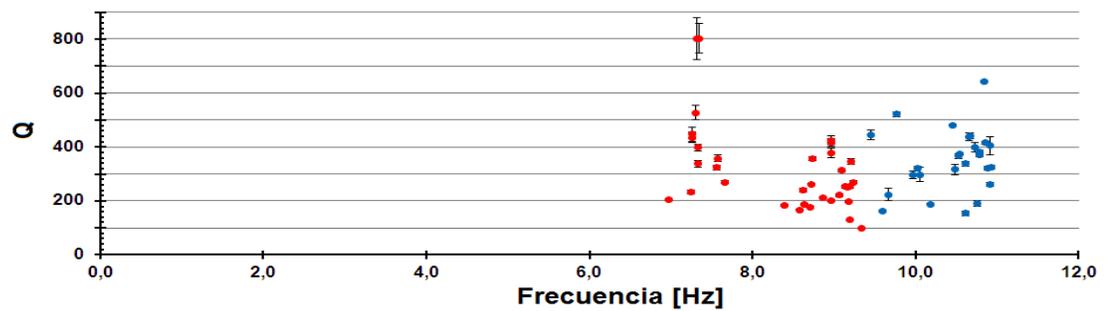


Figura 5.24: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 26/01/11 hasta el 08/04/11 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

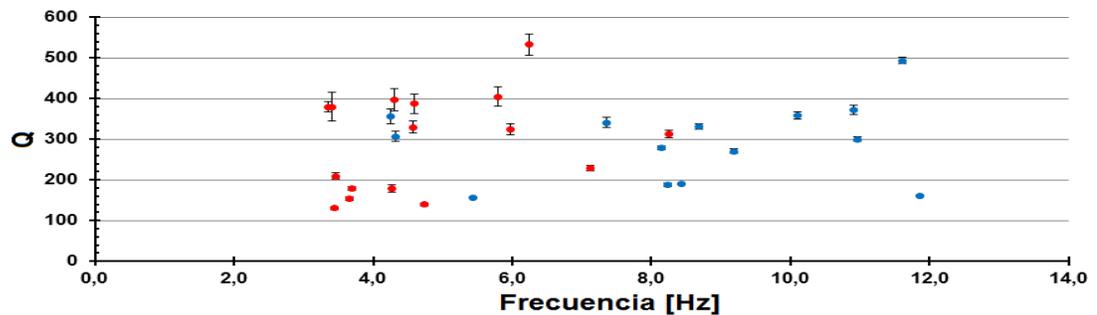


Figura 5.25: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  del periodo comprendido entre el 08/11/11 hasta el 11/12/11 utilizando los datos obtenidos de la estación Anganoy. (Fuente: Esta investigación)

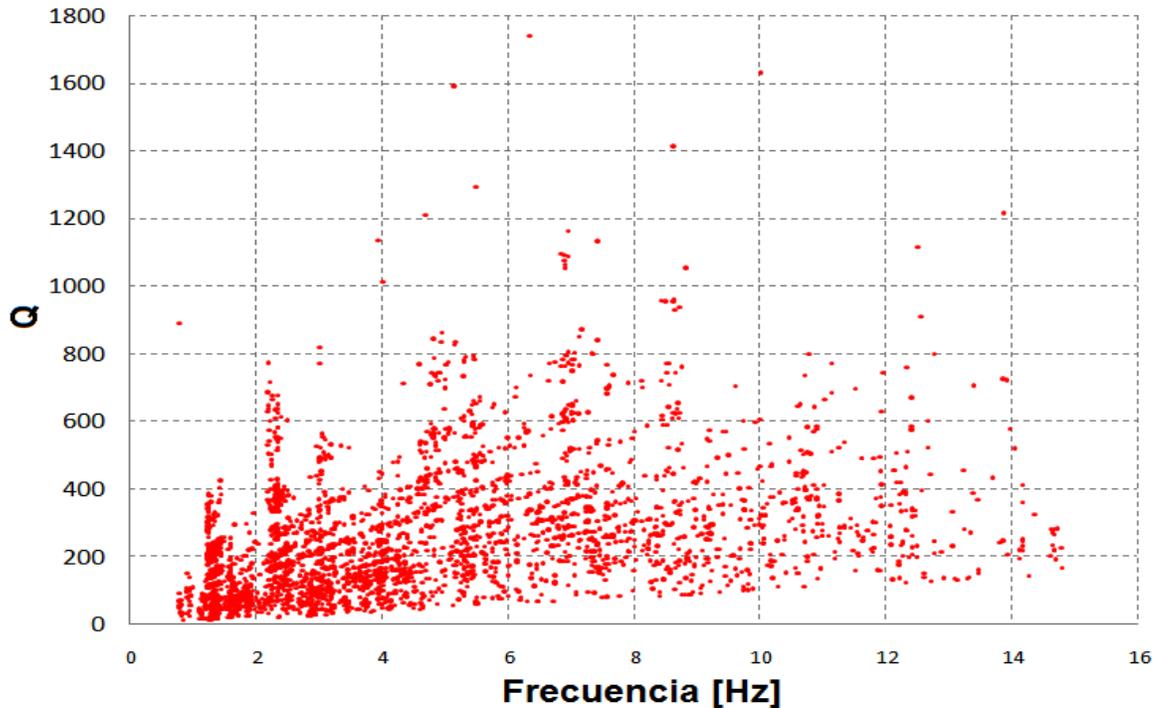


Figura 5.26: Gráfica de  $Q$  vs  $f$  de todos los datos obtenidos. (Fuente: Esta investigación)

De las anteriores gráficas se puede observar que:

La Figura 5.1 muestra que los valores de frecuencia de los dos armónicos disminuyen lentamente a lo largo del periodo tomando valores entre 0,89 y 1,35 Hz y entre 2,67 y 2,85 Hz respectivamente. Los valores de  $Q$  mantienen su tendencia hasta el final del periodo donde se nota un incremento y se encuentran en un rango entre 29 y 110 para el primer armónico y 185 y 326 para el segundo. Cabe resaltar que este es un periodo pre-eruptivo. Respecto a las duraciones, toman valores entre 70 y 110 segundos y siguen una tendencia ascendente.

La Figura 5.2 (superior) evidencia que los dos armónicos toman valores de frecuencia que disminuyen lentamente durante este periodo que pertenece a los pre-eruptivos, con un leve ascenso al final y con rangos entre 2,18 y 3,18 Hz y entre 2,72 y 3,71 Hz respectivamente. Por otro lado, los valores de  $Q$  aumentan hasta la mitad del periodo y desciende drásticamente después, tomando rangos entre 45 a 381 y entre 41 a 312 para cada uno de los armónicos.

Las duraciones toman valores entre 25 y 35 segundos, sin mostrar cambios significativos.

La Figura 5.2 (inferior) indica que para cada uno de los armónicos, los valores de frecuencia disminuyen lentamente a lo largo de todo el periodo, sin embargo el segundo armónico no presenta valores al final de este, el primer armónico toma valores entre 1,33 y 1,45 Hz, y el segundo entre 3,46 y 5,7 Hz. Los valores de  $Q$  se mantienen oscilantes con un descenso al final del periodo, presentando valores de 78 y 425 en su primer armónico y entre 47 y 259 para el segundo. Las duraciones están en el rango entre 50 y 140 segundos, manteniéndose la mayor parte de tiempo en los 60 segundos. Este periodo es pre-eruptivo.

La Figura 5.3 (superior) muestra que para el primer armónico los valores de frecuencia disminuyen lentamente hasta el 20 de agosto de 1994, después de esta fecha los dos armónicos incrementan su valor de frecuencia. Las frecuencias toman valores entre 2,51 y 5,61 Hz y entre 5,91 y 13,22 Hz correspondientemente. Por otro lado, los valores de  $Q$  del primer armónico son fluctuantes hasta el 20 de agosto y después se nota un descenso pronunciado, tomando valores entre 29 y 405; se observa también un aumento en los valores del segundo armónico que toma valores entre 286 y 496. Respecto a las duraciones, se hallan en el rango entre 20 y 85 segundos y siguen la misma tendencia que los valores de  $Q$  del primer armónico. Este periodo es no pre-eruptivo.

La Figura 5.3 (inferior) evidencia que los valores de frecuencia para los dos armónicos disminuyen a lo largo del tiempo, el primer armónico toma valores entre 2,23 y 2,6 Hz y el segundo entre 2,87 y 5,89 Hz. Los valores de  $Q$  del primer armónico se encuentran entre 55 y 770 y sigue líneas de tendencia ascendentes, contraria a la del segundo armónico que desciende y toma valores entre 42 y 865. Las duraciones también aumentan aunque no con mucho pronunciamiento y toman valores entre 20 y 240 segundos. Este periodo es no pre-eruptivo.

La Figura 5.4 (superior) indica un periodo no pre-eruptivo donde el valor de frecuencia de los dos armónicos disminuyen aproximadamente hasta la mitad del periodo y aumentan de forma similar para el resto de tiempo, toman valores de 2,5 a 4,8 Hz y de 5,2 a 6,7 Hz

respectivamente. La tendencia de los valores de  $Q$  de los dos armónicos es muy similar entre sí y con las tendencias de la frecuencia, toman valores de 20 a 600 y de 100 a 780 respectivamente. Las duraciones se mantienen oscilantes entre los 15 y 80 segundos.

La Figura 5.4 (inferior) muestra el lento decaimiento de los valores de frecuencia de cada uno de los armónicos durante este periodo no pre-eruptivo, se establecen en los rangos de 1,8 a 2,72 Hz y de 5,3 a 8,75 Hz respectivamente. Los valores de  $Q$  descienden, sin embargo se nota un leve incremento justo antes de terminarse el periodo y toman valores entre 36 y 331 para el armónico de frecuencias más bajas y de 82 a 804 para el de mayor frecuencia. Respecto a las duraciones, están en el rango entre 80 y 15 segundos, con un notable descenso.

La Figura 5.5 (superior) evidencia que para el primer armónico, los valores de frecuencia disminuyen lentamente desde 2 a 1,6 Hz. Por otro lado, se observa que los valores de  $Q$  del primer armónico presentan una oscilación y un descenso tomando valores entre 27 y 165. Las duraciones están en el rango entre 12 y 75 segundos y siguen una tendencia descendente. Este periodo pertenece a uno pre-eruptivo.

La Figura 5.5 (inferior) indica que para el armónico de más baja frecuencia los valores disminuyen y toman valores entre 1,15 y 1,9 Hz, en cambio para el de mayor frecuencia los valores aumentan en el rango de 3,25 a 4,06 Hz. Las tendencias de  $Q$  son bastantes similares para los dos armónicos y muestran un aumento a lo largo del tiempo tomando valores de 20 a 96 para el primero y de 46 a 201 para el segundo. Respecto a las duraciones, están en el rango entre 30 y 120 segundos, con una tendencia constante. Este periodo es no pre-eruptivo.

La Figura 5.6 (superior) muestra el comportamiento de un periodo no pre-eruptivo. El armónico de baja frecuencia se sostiene la primera época con un notable ascenso, alcanzando valores entre 0,79 y 0,89 Hz, igualmente los valores de frecuencia del segundo armónico aumentan durante todo el periodo con un leve descenso al final de este y dentro de los 1,2 y 1,9 Hz. Los valores de  $Q$  del primer armónico asciende y los del segundo armónico, después de la primera parte de registro, desciende notablemente. El primer armónico alcanza valores de  $Q$  entre 35 y 153 y el segundo entre 33 y 322. Las duraciones, están en el rango entre 10 y 270 segundos, con un comportamiento similar al de  $Q$  del segundo armónico.

La Figura 5.6 (inferior) evidencia para los dos armónicos la disminución de los valores de frecuencia a lo largo de todo el periodo. Ocupa rangos entre 1,5 y 3,3 Hz y entre 3,7 y 4,5 Hz para el primer y segundo armónico respectivamente. Por otro lado, los valores de  $Q$  ascienden con un leve descenso al final del periodo, tomando valores entre 24 y 242 para el primer armónico y de 87 a 493 para el segundo. Las duraciones están en el rango entre 40 y 210 segundos y su tendencia sigue un notable ascenso, muy similar a la de  $Q$ . Este periodo si es pre-eruptivo.

La Figura 5.7 (superior) indica que los valores de frecuencia de este periodo no pre-eruptivo disminuyen lentamente hasta principios del mes de marzo, después siguen descendiendo con mayor pronunciamiento hasta el final del periodo. El primer armónico alcanza valores entre 1,13 y 2 Hz y el segundo entre 2,07 y 4,82 Hz. Los valores de  $Q$  ascienden hasta finales del mes de diciembre y desciende para el resto del periodo, se mantienen en el rango entre 19 y 435 y entre 44 y 630 respectivamente. Las duraciones muestran un comportamiento similar al de  $Q$  y se encuentran entre 20 y 340 segundos.

La Figura 5.7 (inferior) muestra que para los dos armónicos los valores de frecuencia aumentan a lo largo del periodo. El primer armónico toma valores entre 1,79 y 5,65 Hz y el segundo entre 7,58 y 9,86 Hz. Los valores de  $Q$  descienden para el segundo armónico y asciende para el primero que también presenta un descenso al final del periodo. Los valores de  $Q$  del primer y segundo armónico se encuentran entre 75 y 314 y entre 196 y 352 respectivamente. Las duraciones están en el rango entre 45 y 75 segundos con una tendencia oscilante. Este periodo sólo registró 6 Tornillos en dos días, con diferencia de horas pero terminó en una erupción.

La Figura 5.8 (superior) evidencia que para cada armónico los valores de frecuencia disminuyen lentamente a lo largo del periodo; el primero toma valores entre 3,02 y 3,09 Hz, y el segundo entre 5,07 y 5,52 Hz. Por otro lado, los valores de  $Q$  descienden claramente para el armónico de mayor frecuencia con valores entre 145 y 297, mientras que para el de menor frecuencia se nota un incremento justo antes de terminarse este periodo. Los valores de  $Q$  de este armónico se encuentran entre 107 y 319. Las duraciones, por su parte, están

en el rango entre 70 y 120 segundos, no muestran cambios significativos pero su curva de tendencia es similar a la de  $Q$ . Este periodo es no pre-eruptivo.

La Figura 5.8 (inferior) indica que los valores de frecuencia disminuyen lentamente hasta la mitad del periodo y aumentan nuevamente después de esta; las frecuencias toman valores entre 7 a 9,3 Hz para el primer armónico y de 9,67 a 10,93 Hz para el segundo. Los valores de  $Q$  presentan oscilación para la primera parte del periodo y un descenso para la segunda, los  $Q$  del primer y segundo armónico tienen valores entre 100 y 800 y entre 154 y 642 respectivamente. Las duraciones están en el rango entre 25 y 70 segundos, en general con una tendencia de ascenso. Este periodo no culminó en erupción.

La Figura 5.9 muestra el comportamiento de un periodo no pre-eruptivo donde los valores de frecuencia disminuyen lentamente durante todo el periodo y toman valores entre 3,3 y 8,2 Hz para el primer armónico y entre 4,2 y 12 Hz para el segundo. Por otro lado, los valores de  $Q$  son oscilantes y alcanzan valores entre 130 y 532 correspondientes para el primer armónico y valores de 156 y 493 para el segundo. Las duraciones, están en el rango entre 20 y 220 segundos y tienen un comportamiento oscilante semejante al de  $Q$ .

De las gráficas de  $Q$  vs  $f$  podemos observar que las Figuras 5.10 - 5.15 - 5.18 - 5.19 - 5.20 - 5.22 y 5.23 muestran un comportamiento directamente proporcional entre  $Q$  y  $f$ . También se observa otras como las Figuras 5.11 - 5.12 y 5.24 donde la proporcionalidad es inversa y los valores de  $Q$  disminuyen con aumentos de frecuencia. Así mismo se encuentran Figuras como las 5.13 - 5.14 - 5.16 - 5.17 - 5.21 y 5.25 donde no se observa una tendencia de proporcionalidad pero muestran que a pequeños cambios de frecuencia los valores de  $Q$  tienen aumentos o descensos significativos. Por otro lado, de la gráfica de todos los datos obtenidos (Figura 5.26), se tiene una idea más clara de la relación entre  $Q$  y  $f$ , se observa que los puntos se agrupan formando líneas con diferentes pendientes. Los valores máximos y mínimos de estas pendientes corresponden a  $g$  con valores 0,0003 y 0,008  $s^{-1}$  respectivamente.

### 5.3. Síntesis de resultados

Los resultados muestran algunos aspectos generales que sobresalen en los periodos analizados:

En la mayoría de periodos analizados el primer armónico muestra tendencias más claras, probablemente debido a que éste coincide con la frecuencia dominante en gran parte de los sismos TO procesados, es decir, con el armónico más energético.

En general se observa que las etapas pre-eruptivas están caracterizadas por el descenso en el tiempo, tanto de la frecuencia como de los valores de  $Q$ . La duración de los eventos no muestra un patrón dominante que distinga etapas pre-eruptivas de las no pre-eruptivas. Para las etapas que no terminaron con erupción se observa que en la mayor parte de casos la frecuencia también disminuye con el tiempo, mientras que los valores de  $Q$  ascienden o no muestran una tendencia clara.

Las tendencias que inician con descenso lento y luego ascenso lento de la frecuencia, no terminan en erupción como se ve en los casos de las Figura 5.4 (superior) y Figura 5.5 (inferior). Para estos casos los valores de  $Q$  se muestran oscilantes.

En general se observa que en las etapas pre-eruptivas los Tornillos tienen frecuencias menores que 3,3 Hz para el modo fundamental, mientras que en las etapas no pre-eruptivas las frecuencias del modo fundamental llegan hasta los 12 Hz.

Generalmente las etapas pre-eruptivas muestran valores de  $Q$  que no sobrepasan 420 con un promedio de 152 para el modo fundamental. En cambio, durante las etapas no pre-eruptivas se encuentran valores de  $Q$  que alcanzan los 802, con un promedio de 252.

En todos los periodos se puede observar que los valores de  $Q$  correspondientes al armónico de frecuencia más baja son menores que los valores de  $Q$  correspondientes a armónicos de frecuencia más alta, confirmando una proporción directa entre  $f$  y  $Q$  (Figura 5.26).

Se observa que en las etapas pre-eruptivas la cantidad registrada de eventos TO es mucho menor que en las etapas no pre-eruptivas. En etapas no pre-eruptivas se han registrado hasta 160 eventos, en cambio en etapas pre-eruptivas el número de eventos no sobrepasa los 16, a excepción del periodo que antecede la erupción del 24 de noviembre del 2005 donde se registraron 41 sismos.

En un estudio anterior (Gómez et al., 1999) se determinó que los coeficientes de amortiguamiento para eventos Tornillos ( $h$ ) se encuentra en el rango entre 0,002 y 0,016, similar al encontrado en el presente estudio, el cual está entre 0,002 y 0,047. Sin embargo cabe resaltar que los datos utilizados por Gómez et al., correspondieron a sismos registrados entre 1992 y 1995, mientras que en este estudio se utilizaron sismos entre 1992 y 2012. Esta comparación se hace mediante la relación  $h = \gamma/f$  asumiendo una frecuencia fundamental de 1 Hz.

# Capítulo 6

## Análisis de Resultados y Discusión

Para realizar una interpretación del fenómeno basada en las variaciones temporales de frecuencia y  $Q$  se debe tener en cuenta que una de las propuestas ampliamente aceptada para explicar el origen de los sismos TO se basa en la existencia de un magma intruyendo a niveles superficiales del volcán donde una condición de presurización es alcanzada mediante la descompresión de gas inmerso en el magma. Este gas que se mezcla con ceniza pre-existente o formada por la fragmentación magmática, es inyectado rápidamente a una grieta justo por encima del sistema magmático, induciendo la resonancia de la grieta o un sismo tipo Tornillo (Kumagai, Chouet, 2000). Este proceso, que es similar al propuesto para el volcán Galeras (Gil Cruz and Chouet, 1997), ocurre repetidamente y las variaciones en la relación de la mezcla (gases-ceniza-vapor de agua) resulta en variaciones temporales de frecuencia y  $Q$ . Morrissey (1996) sugiere que la desgasificación a nivel superficial de un magma con mezcla saturada de  $H_2O - CO_2 - SO_2$  es la fuente probable de vapor sobrecalentado (encima de su temperatura crítica pero por debajo de su presión crítica) relacionada con el origen de este tipo sismicidad (Morrissey, 1997).

Por otra parte Kumagai y Chouet (1999), encontraron una amplia variedad del factor  $Q_r$  existente en eventos de largo periodo observado en diferentes volcanes. Ellos explican que las variaciones de  $Q_r$  se deben a las diferencias en las mezclas que contienen líquido, gas y ceniza. También demuestran que para mezclas de gas-gas,  $Q_r$  esta generalmente alrededor de 20, para líquidos burbujeantes,  $Q_r$  está en el rango entre 20 y 50, y  $Q_r$  puede ser mayor que 100 para mezclas de ceniza y gas con un porcentaje menor de gas. Tal estudio subraya fuertemente la importancia de ceniza combinada con gases para dar explicación a la génesis de eventos TO con valores grandes de  $Q_r$  (>100) (Kumagai and Chouet, 1999). Este estudio tiene en cuenta que los  $Q$  observados pueden expresarse como se indica en la Ecuación 3.5,

siendo el  $Q$  por radiación el que se estima a través del método Sompi.

En el presente estudio no se ha separado  $Q_r$  de  $Q_i$ , debido a que la señal que se procesa contiene información tanto de las pérdidas radiativas como intrínsecas y hasta el momento no se conoce una forma para discriminar una de la otra dentro de la señal original. Por tanto, los valores obtenidos de  $Q$  son una aproximación al  $Q_r$ , sin embargo, se sabe que éste es el que domina durante el proceso (Kumagai, 2000).

En 2004 Molina, Kumagai y Yezpez analizan las variaciones temporales de  $f$  y  $Q$  para un enjambre de sismos tipo LP registrados en una etapa pre-eruptiva del volcán Tungurahua (Molina et al., 2004). Para la interpretación de la variaciones temporales de la frecuencia ellos utilizan las propiedades acústicas de una grieta que contiene varios tipos de fluidos magmáticos e hidrotermales (Kumagai and Chouet, 2000, 2001) en este sentido, para obtener oscilaciones de larga duración con  $Q$  significativamente más grandes que 100 (e.g., Chouet, 1986, 1988), se requiere un gran contraste de velocidades entre la roca circundante y el fluido. Tal contraste se alcanza en grietas con mezclas de ceniza-gas o pequeñas gotas de agua-gas. Basados en los resultados presentados por Kumagai y Chouet (2000, 2001) tan altos valores de  $Q$  pueden ser solamente alcanzados por mezclas de ceniza-gas, debido a que agua en forma de pequeñas gotas no puede existir a cierta profundidad, donde la temperatura y presión crítica del agua son de 22 MPa (aproximadamente 1 km de profundidad) y 646 K.

## **6.1. Análisis de un periodo no pre-eruptivo en el marco de una mezcla líquido-gas**

En Galeras se han observado periodos de registro de Tornillos como el primer semestre de 1995 y el comprendido entre noviembre de 2006 y abril de 2007 donde las profundidades de los sismos TO son menores que 1 km con un promedio de 0,6 km (Figura 6.1) y las temperaturas sobre la superficie del cráter principal no sobrepasan los 423 K (Figura 6.2) (OVSP, Octubre 2007); durante estos periodos la actividad superficial dominante estuvo marcada por emisiones de vapor de agua (Figura 6.3) (OVSP, Marzo 2007).

Estas evidencias sugieren una importante componente del sistema hidrotermal en la generación de sismos TO, para estos casos podría pensarse que el principal componente en la mezcla es el vapor de agua y no la ceniza aunque no se descarta la existencia de ésta en menor proporción.

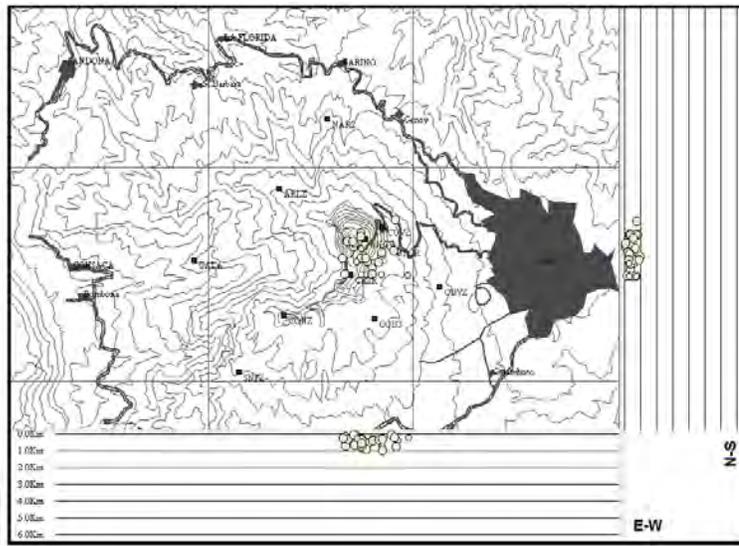


Figura 6.1: Localizaciones de eventos tipo TO entre el 19/11/06 y el 19/04/07. Los círculos blancos representan el hipocentro de los sismos (Fuente OVSP).

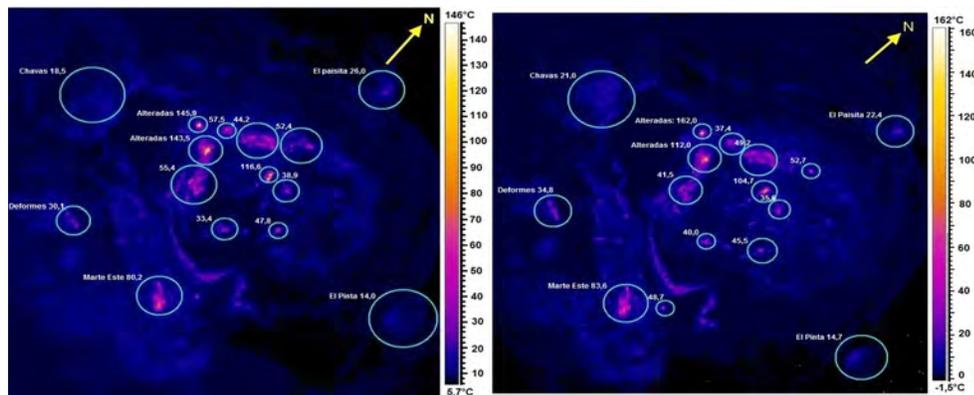


Figura 6.2: Imágenes térmicas registradas el 22/01/2007 (izquierda) y el 03/02/2007 (derecha). En los círculos se resalta algunos cráteres del VG con sus respectivos nombres y temperaturas en °C. (Fuente OVSP).



Figura 6.3: Actividad superficial presentada el 18 de septiembre de 2006 (izquierda) y el 15 de marzo de 2007 (derecha) (Fuente OVSP).

A modo de ejemplo se cita el periodo comprendido entre el 19/11/06 y el 19/04/07 cuyas tendencias se muestran en la Figura 6.4. Se observa que la frecuencia tiene un comportamiento descendente y luego ascendente y los valores de  $Q$  ascienden sin sobrepasar los 300, con un promedio de 187, valores que también sugieren un contenido menor de ceniza.

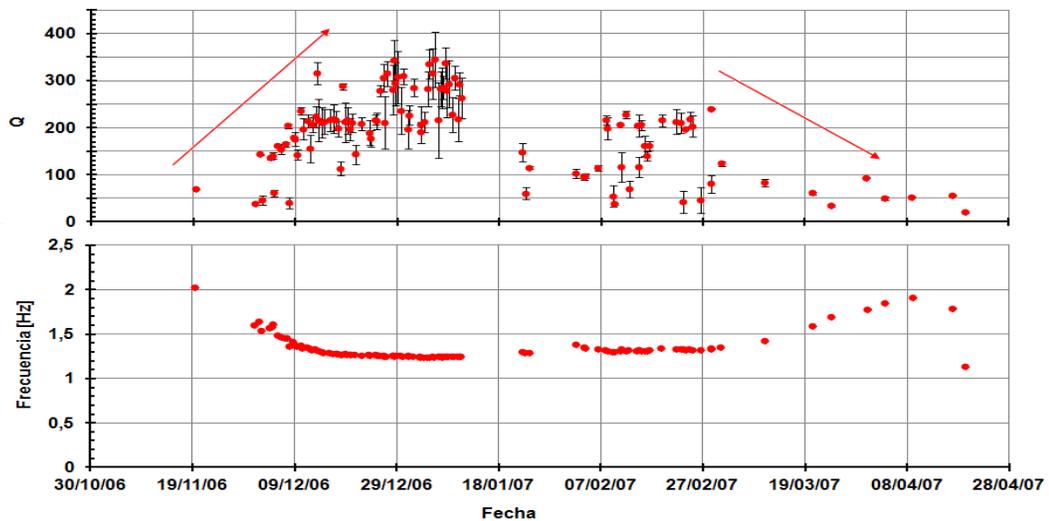


Figura 6.4: Tendencias de  $f$  y  $Q$  para el periodo comprendido entre 19/11/06 hasta el 19/04/07. (Fuente: Esta investigación)

Para dar una explicación a las tendencias de  $f$  y  $Q$  para estos periodos podemos remitirnos a las Figuras 6.5a y 6.5b en las que se observa la dependencia de  $f$  y  $Q$  respecto a la fracción de gas en el sistema. Torres, et al., (en desarrollo) presenta estas gráficas construidas teóricamente para una mezcla de líquido-gas donde se tiene en cuenta la profundidad de las fuentes de sismos TO y la longitud de la grieta. Se observa que a medida que la fracción de gas en volumen de la mezcla crece desde 0 hasta 0,5 la frecuencia disminuye y los valores de  $Q$  aumentan, coincidiendo con lo registrado en Galeras hasta los primeros días de enero de 2007. Por otro lado en las figuras de Torres et al. se observa que, tanto la frecuencia como los valores de  $Q$  crecen cuando la fracción de gas se incrementa entre 0,5 y 1, sin embargo en el caso Galeras este patrón no se observa. Así, para explicar el ascenso de la frecuencia a medida que  $Q$  disminuye se infiere que la mezcla perdió gas (desde 0,5 a 0), probablemente debido a que el sistema no se encontraba totalmente cerrado, dando pie a que el gas escape hacia la atmósfera, perdiendo potencial explosivo en el proceso y evitando que el periodo culmine con una erupción.

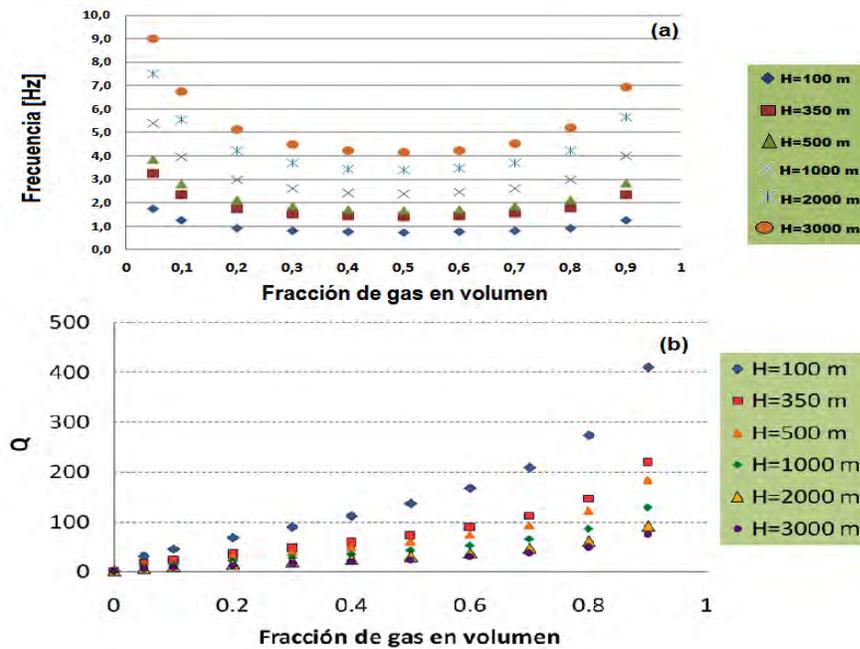


Figura 6.5: (a)  $f$  vs  $H$ , (b)  $Q$  vs  $H$  para una mezcla líquido-gas.  $H$  es la profundidad medida en metros (Tomado de Torres et al., (en desarrollo)).

## 6.2. Análisis de un periodo no pre-eruptivo en el marco de una mezcla ceniza-gas

Molina et al., 2004, posteriormente hacen un análisis temporal para una mezcla de gas con ceniza y encuentran que a medida que el porcentaje de volumen de gas disminuye, los valores de frecuencia descienden y los de  $Q$  aumentan. Ellos sugieren que esto se debe a un incremento de la fracción de ceniza en la mezcla (Figura 6.6). Los cálculos realizados por ellos asumen una presión litostática entre 25 y 75 MPa, lo que corresponde a profundidades entre 1 y 3 km, observando mayores desviaciones en los valores de  $Q$  que en los de frecuencia (Molina et al., 2004).

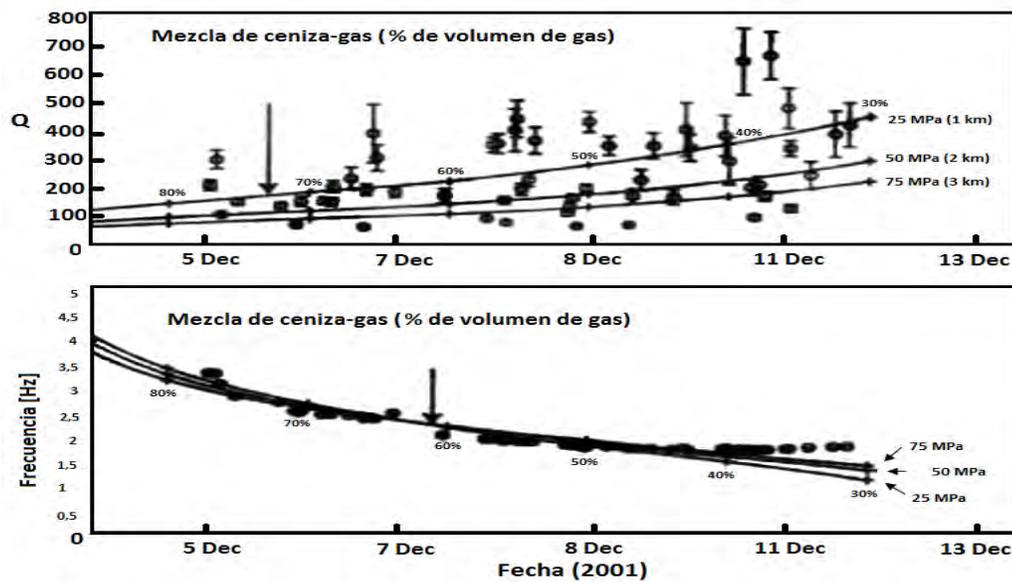


Figura 6.6: Gráfica de  $Q$  y  $f$  vs tiempo presentados en el trabajo de Molina et al., 2004 (Modificada).

Por otro lado en el trabajo de Torres, et al., (en desarrollo) se presenta gráficas teóricas de las variaciones de  $Q$  y  $f$  respecto a la fracción de gas en volumen, estas gráficas también tienen en cuenta la profundidad de las fuentes de sismos TO. La Figura 6.7a y 6.7b se realizan para una mezcla de ceniza-gas.

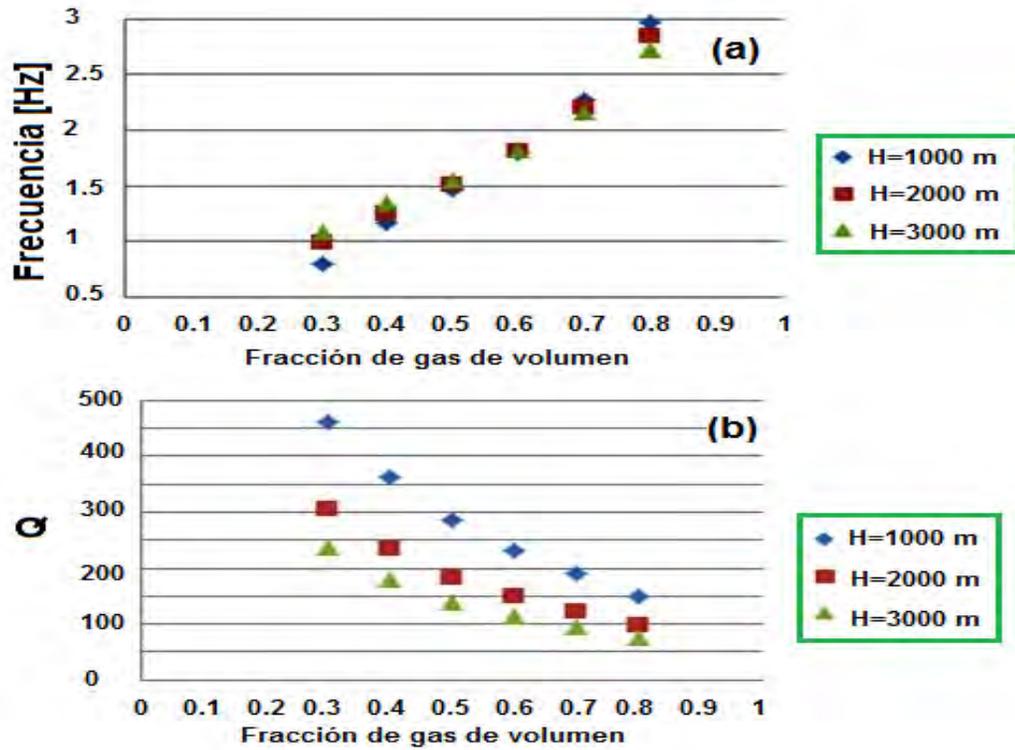


Figura 6.7: (a)  $f$  vs  $H$ , (b)  $Q$  vs  $H$  para una mezcla ceniza-gas.  $H$  es la profundidad medida en metros (Tomado de Torres et al., (en desarrollo)).

En la Figura 6.7a se observa que la frecuencia asciende cuando la fracción gaseosa de la mezcla aumenta, también se observa que su variación para diferentes profundidades no es significativa. Por otro lado, en la gráfica de  $Q$  vs fracción de gas (Figura 6.7b), se observa, en general, que los valores de  $Q$  siempre descienden a medida que la fracción de gas en volumen se incrementa.

En el caso de las etapas no pre-eruptivas de Galeras se observa que la frecuencia desciende mientras que los  $Q$  ascienden o se tornan oscilantes (Figura 6.8), comportamiento similar al caso Tungurahua, con la diferencia de que este último terminó en erupción. Esto concuerda con el modelo teórico (Figura 6.7) que se explica en el trabajo de Torres et al., (en desarrollo).

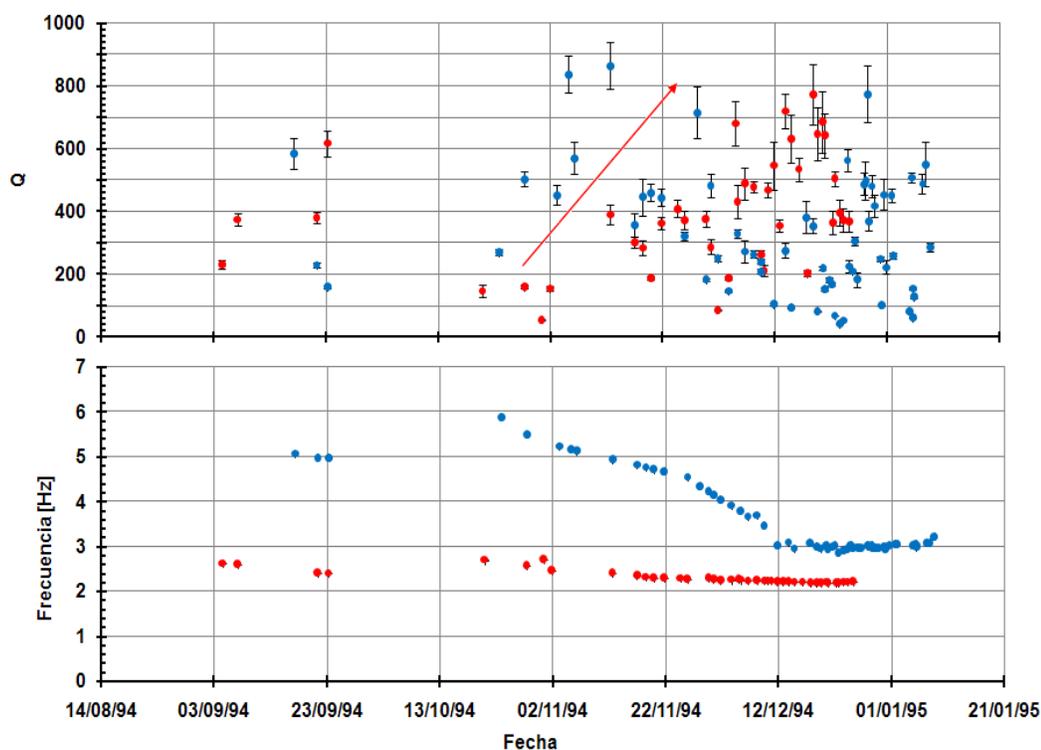


Figura 6.8: Ejemplo de las tendencias de  $f$  y  $Q$  para un periodo no pre-eruptivo entre el 14/08/94 hasta el 21/01/95. (Fuente: Esta investigación)

Estos sismos TO muestran valores de  $Q$  cercanos a los 900, esto permite asumir razonablemente que el fluido que los originan son una mezcla de ceniza-gas y no de pequeñas gotas de agua-gas, así como también que probablemente la fuente de estos TO tengan profundidades mayores que 1 km superando los 25 MPa de presión donde se sabe que no puede existir pequeñas gotas de agua.

### 6.3. Análisis de periodos pre-eruptivos

En etapas pre-eruptivas de Galeras se ha observado que varios periodos responde a descensos tanto en la frecuencia como en  $Q$  (Figura 6.9), esto no concuerda con los modelos teóricos analizados.

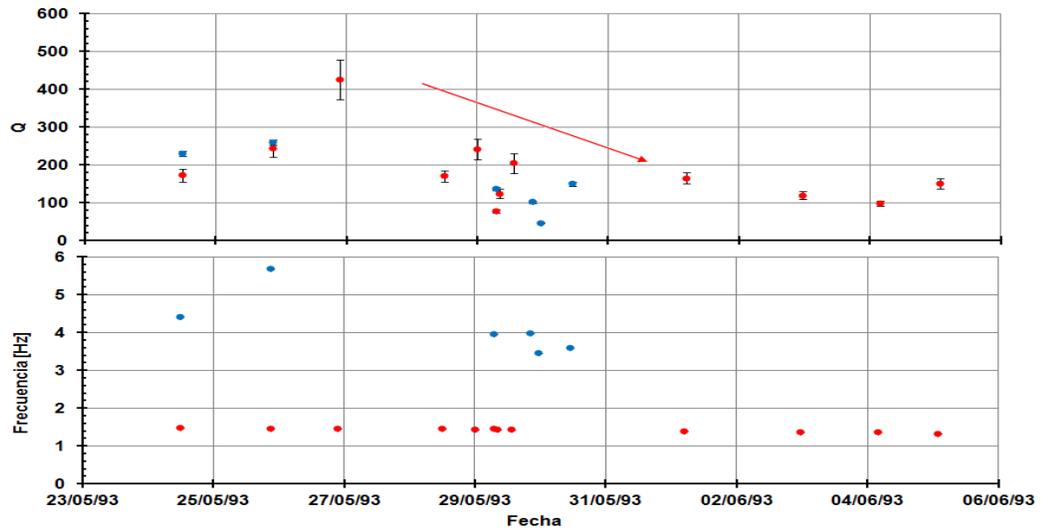


Figura 6.9: Ejemplo de las tendencias de  $f$  y  $Q$  para el periodo pre-eruptivo entre 23/05/93 y el 06/06/93. (Fuente: Esta investigación)

Sin embargo, el periodo comprendido entre el 28/09/05 hasta el 24/11/05, es el único periodo pre-eruptivo que sigue las tendencias mostradas en el caso teórico de Torres y en el caso Tungurahua (Figura 6.10).

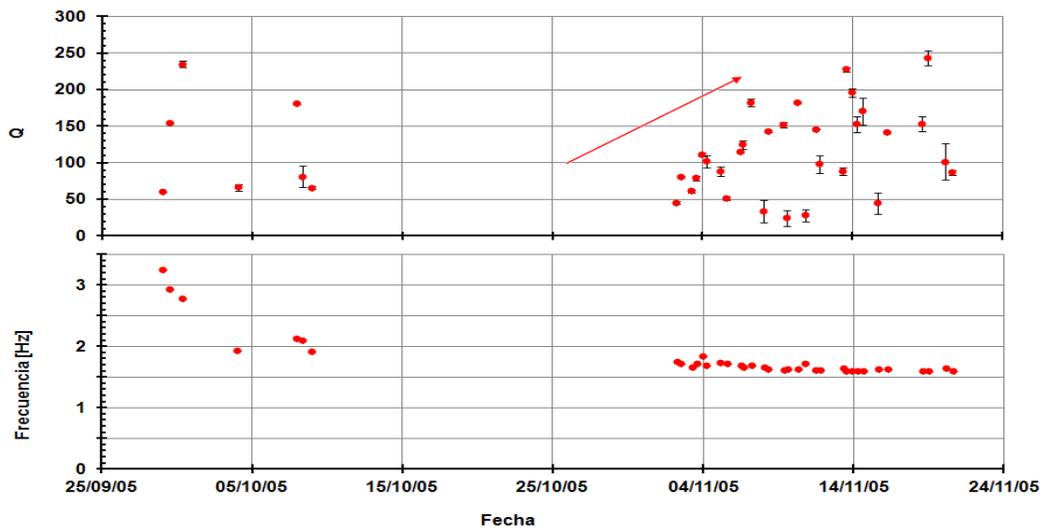


Figura 6.10: Tendencias de  $f$  y  $Q$  para el periodo pre-eruptivo entre el 28/09/05 hasta el 24/11/05. (Fuente: Esta investigación)

Las localizaciones de estos eventos se ubican entre los 0,5 y 3 km de profundidad elevando la presión por encima de los 25 MPa, debido a esto se infiere que el contenido que origina los sismos es ceniza-gas (Figura 6.11).

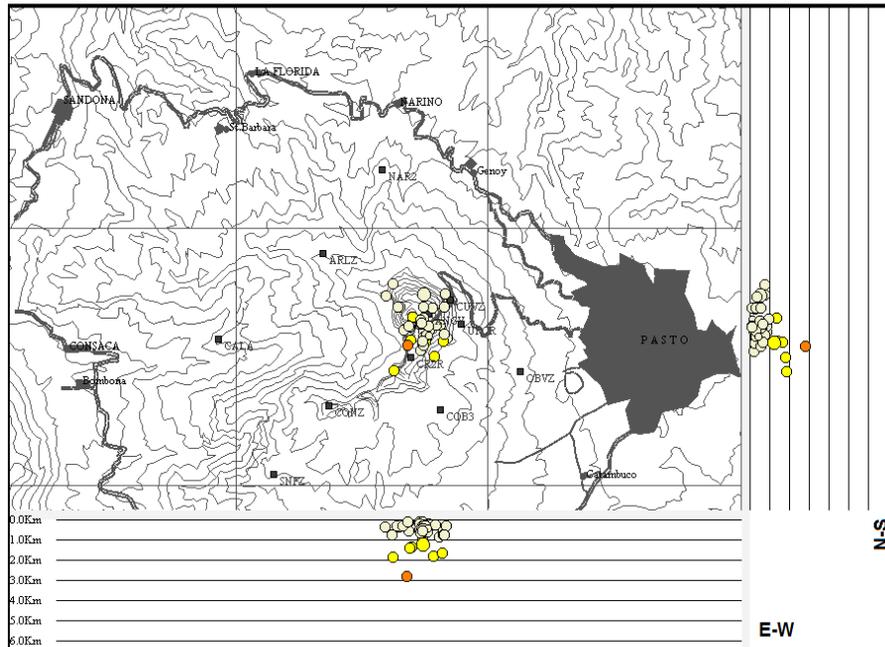


Figura 6.11: Localización de eventos tipo TO del periodo pre-eruptivo entre el 28/09/05 hasta el 24/11/05. Los círculos representan el hipocentro de los sismos que alcanzan profundidades de hasta 3 km (Fuente OVSP).

Así mismo podemos suponer que las temperaturas en el sistema alcanzan al menos los 770 K dado que es probable que en el último semestre de 2005 iniciara la intrusión y crecimiento del domo de lava que se observó en superficie en enero de 2006. En la Figura 6.12 se evidencia la ceniza expulsada después de la erupción del 24 de noviembre de 2011.



Figura 6.12: Actividad superficial registrada el 26 de noviembre de 2005 posteriores a la erupción (Fuente OVSP).

#### 6.4. Otros aspectos

Otra razón diferente a las expuestas anteriormente respecto a los periodos en los que no hubo erupción tiene que ver con la posibilidad de que la masa de la mezcla no alcanzara un valor crítico (dentro de un volumen confinado) para ejercer suficiente presión y provocar la ruptura de los sellos del sistema. En este sentido se sugiere que los cambios en la fracción de gas de la mezcla son un factor necesario pero no suficiente para propiciar una erupción, estos cambios deben estar acompañados de un incremento significativo de masa dentro del volumen del sistema.

De todo lo expuesto anteriormente se infiere que los modelos teóricos no pueden explicar por completo y con unicidad el comportamiento de  $f$  y  $Q$ , especialmente en las etapas pre-eruptivas. Para realizar una correcta interpretación es necesario analizar el contexto en el que se registran los sismos TO e incluir información que aportan otros parámetros de monitoreo volcánico.

# Conclusiones y Recomendaciones

El programa *qsompi* es una herramienta que aplica el método Sompi a señales sísmicas tipo LP para obtener características específicas como el valor de las frecuencias de sus armónicos y sus respectivas tasas de decaimiento (gradiente), también es posible estimar un valor de  $Q_r$ .

Se aplicó el método Sompi a los TO registrados en 20 años de historia sísmica del VG, haciendo una comparación de las variaciones temporales de la frecuencia y  $Q$  para diferentes periodos pre-eruptivos y no pre-eruptivos.

Los valores de  $Q$  y  $f$  para los TO registrados en etapas pre-eruptivas en promedio son significativamente más bajos que para los periodos que no culminaron con erupción. En ambos casos (etapas pre-eruptivas y no pre-eruptivas) se observa un descenso de la frecuencia con el tiempo.

De los valores de  $Q$  encontrados y teniendo en cuenta parámetros como la profundidad de las localizaciones de sismos TO y temperatura del sistema, se puede distinguir periodos donde el fluido que origina los sismos tipo TO es una mezcla de gas y ceniza y otros en los que domina el sistema hidrotermal.

Los cambios en la fracción de gas de la mezcla, que se ven reflejados en las variaciones temporales de frecuencia y  $Q$ , son un factor que está presente en todo periodo eruptivo, sin embargo al observarse también en etapas no pre-eruptivas se presume que no son condiciones suficientes para asegurar que el proceso culmine con una erupción. Es necesario por una parte, un incremento significativo de la fracción gaseosa en la mezcla y por otra, un incremento de masa en el volumen del sistema que causaría el exceso de presión en el mismo.

Los modelos teóricos existentes no pueden explicar completamente los comportamientos de  $f$  y  $Q$ , especialmente en las etapas pre-eruptivas. Además de esta caracterización es necesario

utilizar otros parámetros como las localizaciones de los sismos y la actividad superficial para contextualizar el periodo y realizar una adecuada interpretación.

Mediante la relación  $h = \gamma/f$  y asumiendo una frecuencia fundamental de 1 Hz se determinó que los coeficientes de amortiguamiento para eventos Tornillos ( $h$ ) se encuentran entre 0,002 y 0,047.

Se recomienda adelantar un estudio en el que se aplique el método Sompi con el fin de especificar el orden autorregresivo más adecuado de las ecuaciones que describen el sistema, para así generar modelos apropiados asociados con la génesis de los sismos tipo TO.

# Bibliografía

M. CALVACHE, R. CÁRDENAS, G. CORTÉS, A. HURTADO, C. LAVERDE, A. RUALES & O. SUAREZ. 1998. *Mapa de Amenaza Volcánica del Galeras*. Publicación especial de Ingeominas.

D. GÓMEZ, C. LAVERDE, L. NARVÁEZ, A. ORTEGA, B. SILVA, J. TORRES, R. TORRES. 2004 *Catálogo de señales sísmicas volcánicas de Colombia*. Ingeominas - Centro Operativo Regional Pasto.

R. TORRES, D. GÓMEZ, A. ORTEGA & D. SEIDL. 2002. *Señales sísmicas tipo Tornillo en Galeras y otros volcanes activos*. Ingeominas - Centro Operativo Regional Pasto.

M. KUMASAWA, Y. IMANISHI, Y. FUKAO, M. FURUMOTO & A. YAMAMOTO. 1990. *A theory of spectral analysis based on the characteristic property of a linear dynamic system*. Geophys J. Int. 101, Pag. 613-630.

D. GÓMEZ, R. TORRES, D. SEIDL, M. HELLWEG & H. RADEMACHER. 1999. *Tornillo seismic events at Galeras volcano, Colombia: a summary and new information from broadband three-component measurements*. Annali di Geofisica, vol. 42, N. 3, Pag. 365-378.

S. HORI, Y. FUKAO, M. KUMAZAWA, M. FURUMOTO & A. YAMAMOTO. 1989. *A New Method of Spectral Analysis and Its Application to the Earth's Free Oscillations: The "Sompi Method"*. Journal of Geophysical research, vol 94, No. B6, Pag. 7535-7553.

H. KUMAGAI, K. MIYAKAWA, H. NEGISHI, H. INOUE, K. OBARA & D. SUETSUGU. 2003. *Magmatic dike resonances inferred from very-long period seismic signals*. Geophys. J. vol. 299, Pag. 2058- 2061.

Y. HASADA, H. KUMAGAI & M. KUMAZAWA. 2001. *Autoregressive modeling of transfer functions in frequency domain to determine complex travel times*. Earth Planet Space, 53, 3-11.

P. CHEN. 1993 *Sompi spectral analysis and deep geomagnetic sounding*. Acta seismologica sínica. Vol. 6, No. 2, Pag. 535-539.

C. HUARAN. 1995. *The preliminary application of sompi spectral analysis method in processing digital seismic wave records*. Earthquake 1995-04-009.

B. BOWERMAN, R. CONNELL & A. KOEHLER. 2007. *Pronosticos, series de tiempo y regresión. Un enfoque aplicado*. Cengage Learning Editores S.A., 4ta Edición, Mexico.

P. BROCKWELL & R. DAVIS. 2002. *Introduction to Time Series and Forecasting*. Second Edition, Springer.

J. HAMILTON. 1994. *Time Series Analysis*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.

UPTC *Encuentro Nacional de Educación Matemática y Estadística*. 2011. ISSN: 2248-7727. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, vol. 10.

H. KUMAGAI & B. CHOUET. 2000. *Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids*. Journal of Geophysical research, vol 105, No. B11, Pag. 25,493-25,512.

M. NAKANO, H. KUMAGAI, M. KUMAZAWA, K. YAMAOKA & A. CHOUET. 1998. *The excitation and characteristic frequency of the long-period volcanic event: An approach based on an inhomogeneous autoregressive model of a linear dynamic system*. Journal of Geophysical research, vol 103, No. B5, Pag. 10,031-10,046.

M. MORRISSEY. 1997. *Acoustic properties of a crack containing magmatic or hydrothermal fluids*. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 75 Pag. 321-335.

H. KUMAGAI & B. CHOUET. 1999. *The complex frequency of the long-period seismic events as probes of fluid composition beneath volcanoes*. Geophys. J. vol 138, F7-F12.

I. MOLINA, H. KUMAGAI & H. YEPES. 2004. *Resonances of a volcanic conduit triggered by repetitive injections of an ash-laden gas*. Geophysical Research letters, vol 31, L03603, doi:10.1029/2003GLO18934.

GRUPO DE TRABAJO OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMÓLOGICO DE PASTO.  
Octubre de 2007. *Boletín semestral de actividad del Volcán Galeras Enero a Junio de 2007.*  
Ingeominas - Centro Operativo Regional Pasto.

GRUPO DE TRABAJO OBSERVATORIO VULCANOLÓGICO Y SISMÓLOGICO DE PASTO.  
Marzo de 2007. *Boletín semestral de actividad del Volcán Galeras Julio a Diciembre de 2006.*  
Ingeominas - Centro Operativo Regional Pasto.

# Apéndice A

## Código del programa

A continuación se muestra el código de tres de las rutinas del programa utilizado para el método Sompi y la rutina de cálculo de duración:

```
qsompi
1 figure ('Units', 'pixel', 'pos', [200 300 500 100 ], ...
2 'Name', 'Mensaje importante!', 'visible', 'off', ...
3 'NumberTitle', 'off', ...
4     'MenuBar', 'none', ...
5     'Color', [0.9 0.9 0.9], ...
6     'NextPlot', 'new');
7 axis off
8 txterr1 = text ('Color', [0 0 0], 'EraseMode', 'normal', ...
9     'Position', [0.05 0.85 0 ], 'Rotation', 0, ...
10    'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold', ...
11    'String', 'Importe una traza con su respectiva ↵
        cabecera, ');
12 txterr2 = text ('Color', [0 0 0], 'EraseMode', 'normal', 'Position' ↵
    , [0.05 0.6 0], 'Rotation', 0, 'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold' ↵
    , 'String', 'una vez importada presione Ok!');
13 close_error_button = uicontrol ('Style', 'Pushbutton', 'Position', [.35 ↵
    .05 .30 .40], 'Units', 'normalized', 'Callback', 'clc; close; ↵
    input_params', 'String', 'Ok!');
14 set(gcf, 'visible', 'on')
```

## sOMPI\_calc

```
1 %sOMPI(mmin,mmax,x) calcula el valor de Q radiativo para una o ←  
    varias frecuencias del vector x superponiendo soluciones (←  
    namisos) de ecuaciones entre los ordenes mmin y mmax. El ←  
    cálculo se realiza hallando las frecuencias complejas mediante←  
    el algoritmo de Kumazawa.  
2 close all  
3 cabeza=char(textdata);  
4 tipo=substr(cabeza(1,:),10,3);  
5 estacion=substr(cabeza(2,:),1,4);  
6 fecha=substr(cabeza(3,:),1,19);  
7 %Preparar y graficar la señal original  
8 x=data;  
9 x=x-mean(x);  
10 x=x/max(x);  
11 N=length(x);  
12 %para graficar con filtro  
13 fil=x;  
14 [C,D]=butter(6,0.016,'high');  
15 fil1=filter(C,D,fil);  
16 time1=0.0:0.01:(length(fil1)/100)-0.01;  
17 figure(1)  
18 plot(time1,fil1)  
19 xlabel('Tiempo [s]','FontName','Arial','FontSize',18);  
20 ylabel('Amplitud Normalizada','FontName','Arial','FontSize',18);  
21 set(gca,'fontsize',16);  
22 %para seleccionar comienzo y fin del evento  
23 [f11]=ginput(2);  
24 f1=f11*100;  
25 fil1=fil1(f1(1):f1(2));  
26 time2=0.0:0.01:(length(fil1)/100)-0.01;
```

```
27 plot(time2 , fill)
28 xlabel('Tiempo [s]', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18);
29 ylabel('Amplitud Normalizada', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18);
30 set(gca, 'fontsize', 16);
31 %Elegir el inicio y fin de la señal. Es importante evitar el ←
    onset del sismo para eliminar la parte no homogénea de la ←
    ecuación.
32 [x11]=ginput(2);
33 x1=x11*100;
34 x=x((f1(1)+x1(1)-1):(f1(1)+x1(2))-1);
35 time3=0.0:0.01:(length(x)/100)-0.01;
36 plot(time3 , x)
37 xlabel('Tiempo [s]', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18);
38 ylabel('Amplitud Normalizada', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18);
39 set(gca, 'fontsize', 16);
40 %Cálculo del espectro de Fourier
41 N=length(x);
42 esp=abs(fft(x));
43 Nesp=length(esp);
44 fs=100;
45 fre=0.0:fs/Nesp:(fs-fs/Nesp);
46 figure(2)
47 plot(fre , esp)
48 axis([0 15 0 max(esp)]);
49 xlabel('Frecuencia [Hz]', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18);
50 ylabel('Amplitud Espectral', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18);
51 set(gca, 'fontsize', 16);
52 %Elección de las frecuencias de interés
53 [xbi , ybi] = ginput;
54 ginf=[xbiybi]; %Se encierra la frecuencia de interés con dos ←
    clic y enter para continuar.
```

```
55 [numfrecnumfrecy]= size( ginf );
56 %Busca los valores de frecuencia máximos dentro de los intervalos↔
    elegidos
57 k=1;
58 for j=1:(numfrec/2)
59 for i=1:length( fre )
60 ifginf(k,1) >fre(i) &&ginf(k,1) <fre(i+1)
61 pos(k)=i;
62 break
63 end end
64 for i=1:length( fre )
65 ifginf(k+1,1) >fre(i) &&ginf(k+1,1) <fre(i+1)
66 pos(k+1)=i;
67 break
68 end end
69 k=k+2;
70 end
71 %Matrices para almacenar resultados finales
72 ffinal=[];
73 gfinal=[];
74 Qrfinal=[];
75 stffinal=[];
76 stgfinal=[];
77 stQfinal=[];
78 %Bucle para aplicar el método sompi sobre cada una de las ↔
    frecuencias escogidas
79 xx=x;
80 kk=1;
81 for ii=1:(numfrec/2)
82 %Proceso de filtrado alrededor de las frecuencias escogidas
```

```
83 posmaxesp=find(esp((pos(kk):pos(kk+1))) == max(esp(pos(kk):pos(kk←
    +1))));
84 mfrec=fre(pos(kk)+posmaxesp);
85 f1=mfrec-anchban;
86 f2=mfrec+anchban;
87 [cb,ca]=butter(4,[f1/50 f2/50]);
88 xfilter=filter(cb,ca,xx);
89 posxmax=find(abs(xfilter) == max(abs(xfilter)));
90 xcut=xfilter(posxmax : length(xfilter));
91 figure(3)
92 plot(xcut)
93 %Aplicación del método sompi
94 [ff,gg]=sompisolo(mmin,mmax,xcut);
95 plot(ff,gg,'o')
96 axis([0 0.15 -0.0005 0]);
97 hold on
98 %Se ordenan descendientemente las frecuencias y los ratas de ←
    decaimiento (para agilizar los cálculos)
99 for i=1:length(ff);
100 for j=1:length(ff);
101 ifff(i)>ff(j)
102         t=ff(i);
103 ff(i)=ff(j);
104 ff(j)=t;
105         t=gg(i);
106 gg(i)=gg(j);
107 gg(j)=t;
108 end end end
109 Nff=floor(length(ff)/2);
110 ff=ff(1:Nff);
111 gg=gg(1:Nff);
```

```
112 %Preparación de la grilla de búsqueda de concentración de namisos
113 ming=-0.0005;
114 maxg=0;
115 minf=0;
116 maxf=0.15;
117 deltag=(maxg-ming)/cellgrow;
118 deltaf=(maxf-minf)/cellfrec;
119 df=minf:deltaf:maxf;
120 dg=ming:deltag:maxg;
121 %Graficación de la grilla
122 if ii==1
123   fori=1:length(df)
124     xf=df(i)+zeros(1,length(dg));
125     yg=ming:deltag:maxg;
126     plot(xf,yg,'Color',[0.77 0.77 0.77])
127     hold on
128   end
129   fori=1:length(dg)
130     yg=dg(i)+zeros(1,length(df));
131     xf=minf:deltaf:maxf;
132     plot(xf,yg,'Color',[0.77 0.77 0.77])
133     hold on
134   end
135 end
136 Ndf=length(df);
137 Ndg=length(dg);
138 fcount=[];
139 gcount=[];
140 %Búsqueda de namisos dentro de cada celda de la grilla
141 fori=1:Ndf-1
142   for j=1:Ndg-1
```

```
143 for k=1:length(ff)
144     if ((ff(k) >= df(i)) && (ff(k) <df(i+1)) && (gg(k) >=<↔
        dg(j)) && (gg(k) < dg(j+1)))
145         l=l+1;
146 fcount=[fcount;lff(k)];
147 gcount=[gcount;lgg(k)];
148 end end
149 l=0;
150 end end
151 %Selección de la celda con mayor cantidad de namisos
152 maxlr=[];
153 numfg=[];
154 [maxlr,maxlc]=find(fcount(:,1) == max(fcount(:,1)));
155 numfg(1,1)=maxlr(1,1)-fcount(maxlr(1,1));
156 ifnumfg(1,1)==0
157 numfg(1,1)=1;
158 end
159 %Vectores con los valores de los namisos seleccionados
160 fff=fcount(numfg(1,1):maxlr(1,1),2);
161 ggg=gcount(numfg(1,1):maxlr(1,1),2);
162 %Valores finales promedio de frecuencia, tasa de decaimiento y Q ↔
    radiativo
163 fprom=mean(fff);
164 gprom=mean(ggg);
165 Qr=fff./(-2*ggg);
166 Qrprom=mean(Qr);
167 %Vectores con las respectivas desviaciones estandar
168 stf=[];
169 stg=[];
170 stq=[];
171 stf=[stf;std(fff,1)];
```

```
172 stg=[ stg ; std (ggg , 1) ];
173 stq=[ stq ; std (Qr , 1) ];
174 %Preparación de las gráficas con líneas de iso-Q
175 if ii==1
176 r=0:0.01:0.5;
177 Q=1:(50):900;
178 invQ=1./(2*Q);
179 fori=1:length(Q)
180 cuasiQ=-r*invQ(i);
181 plot(r , cuasiQ)
182 end
183 xlabel('Frecuencia Normalizada','FontSize',18);
184 ylabel('Gradiente [s-1]','FontSize',18);
185 grid off
186 set(gca,'fontsize',16);
187 end
188 %Vectores donde se almacenan los resultados finales
189 ffinal=[ ffinal , fprom ];
190 gfinal=[ gfinal , gprom ];
191 Qrfinal=[ Qrfinal , Qrprom ];
192 stffinal=[ stffinal , stf ];
193 stgfinal=[ stgfinal , stg ];
194 stQfinal=[ stQfinal , stq ];
195 hold on
196 kk=kk+2;
197 end
198 clc
199 %Mostrando los resultados en pantalla
200 stfporc=100*stffinal./ffinal;
201 stgporc=abs(100*stgfinal./gfinal);
202 stQporc=100*stQfinal./Qrfinal;
```

```

203 resultados=[100*ffinal ' stfporc ' gfinal ' stgporc ' Qrfinal ' ←
      stQporc '];
204 [rrescres]=size(resultados);
205 disp('      f      Err-f(\%)      G      Err-G(\%)      QrErr-Qr←
      (\%)')
206 disp(resultados)
207 %Escritura de los resultados finales en un archivo de texto con ←
      nombre
208 %Resultados_Sompi.txt. Este archivo se genera en el directorio de←
      trabajo
209 fid = fopen('Resultados_Sompi.txt','a+t');
210 fori=1:length(ffinal)
211 fprintf(fid,'%s %s %s %6.2f %8.4f %10.7f %10.7f %6.2f %6.2f \n'←
      ,fecha,estacion,tipo,100*ffinal(i),stffinal(i),gfinal(i),←
      stgfinal(i),Qrfinal(i),stQfinal(i));
212 end
213 fclose(fid);

```

### sompisolo

```

1 function [ff,gg]=sompisolo(mmin,mmax,x)
2 ff=[];
3 gg=[];
4 N=length(x);
5 for m=mmin:mmax
6 c=1/(N-m);
7 for k=0:m
8 for l=0:m
9 Po(k+1,l+1)=0;
10 for t=m:N-1
11 Po(k+1,l+1)=x(t-k+1)*x(t-l+1)+Po(k+1,l+1);

```

```
12 end end end
13 P=c*Po;
14 [evec ,eval]=eig(P);
15 veval=diag(eval);
16 [minevalindi]=min(veval);
17 a=evec(:,indi);
18 a=a';
19 z=roots(a);
20 zv=log(z);
21 gama=real(zv);
22 omega=imag(zv);
23 g=gama/(2*pi);
24 f=omega/(2*pi);
25 ff=[ff;f];
26 gg=[gg;g];
27 Q1=f./(-2*g);
28 end
```

#### duración

```
1 cabeza=char(textdata);
2 tipo=substr(cabeza(1,:),10,3);
3 estacion=substr(cabeza(2,:),1,4);
4 fecha=substr(cabeza(3,:),1,19);
5 %Preparar y graficar la señal original
6 x=data;
7 x=x-mean(x);
8 x=x/max(x);
9 N=length(x);
10 time=0.0:0.01:(length(x)/100)-0.01;
11 %para graficar con filtro
```

```
12 fil=x;
13 [C,D]=butter(6,0.016,'high');
14 fil1=filter(C,D,fil);
15 figure(1)
16 plot(time,fil1);
17 %Elección de la P y la coda
18 [xb,yb]=ginput(2);
19 dura=xb(2)-xb(1);
20 %Escritura de los resultados finales en un archivo de texto con ←
    nombre duracion.txt. Este archivo se genera en el directorio ←
    de trabajo
21 fid = fopen('duracion.txt','a+t');
22 fprintf(fid, '%s %s %.2f \n', fecha, estacion, dura);
23 fclose(fid);
24 close all
```