

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



**RE-EVALUACIÓN DEL MODELO UNIDIMENSIONAL DE  
VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS PARA  
EL VOLCÁN GALERAS**

**TRABAJO DE GRADO**

Para optar el título profesional de:

**Físico**

**JOHANNA PATRICIA ESPINOZA MERA**

San Juan de Pasto, Colombia

AGOSTO 2013

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

**RE-EVALUACIÓN DEL MODELO UNIDIMENSIONAL DE  
VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS PARA  
EL VOLCÁN GALERAS**

**JOHANNA PATRICIA ESPINOZA MERA**

**TRABAJO DE GRADO**

Director:  
MSc. en Geofísica  
**OSCAR ERNESTO CADENA IBARRA**

San Juan de Pasto, Colombia  
AGOSTO 2013

©2013 - JOHANNA PATRICIA ESPINOZA MERA

“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

MSc. Alberto Quijano Vodniza

Jurado

MSc. Mauricio Bacca Rosero

Jurado

San Juan de Pasto, AGOSTO 2013

## **Agradecimientos**

Este trabajo no habría sido posible sin la influencia de diversas personas que agradezco profundamente por estar presentes en las distintas etapas de la elaboración y a lo largo de la carrera.

En primer lugar agradecer a mi papá Luis Israel que es mi mayor ejemplo de vida, porque gracias a él sé que la responsabilidad se la debe vivir como un compromiso de dedicación y esfuerzo. A mi mamá Gladys por su amor y afecto, a mis hermanas y sobrina Carolina, Lorena y Luisa por su acompañamiento y cariño, a mi tía Rosa por ser incondicional, a mi abuelita por ser mi pilar, a mis primos (as) y tios (as) porque de una u otra manera aportaron con sus consejos, a Daniel por su comprensión y apoyo a lo largo de este proceso, y a toda mi familia en general.

A Mafe y Leidy por el gran equipo que formamos, por ser mis compañeras de estudio, mis cómplices, mis concejeras, por ser personas maravillosas de las que sólo aprendí cosas positivas. Gracias niñas porque juntas dimos un gran ejemplo de amistad, por brindarme su conocimiento y porque las mejores experiencias las viví con ustedes. A Luchito y Dany por su amistad.

A mi Director de trabajo de grado M.Sc. Oscar Cadena, por su dedicación, asesoramiento, sus ideas y recomendaciones respecto a esta investigación. Al OVSP por abrirme las puertas para realizar este proyecto.

A la Universidad de Nariño, al Departamento de Física, y a todos los profesores que me aportaron su conocimiento.

*MUCHAS GRACIAS*

*A mi Abuelo,  
Jose Alquimedes<sup>†</sup>  
Q.E.P.D*

# RE-EVALUACIÓN DEL MODELO UNIDIMENSIONAL DE VELOCIDADES DE PROPAGACIÓN DE ONDAS SÍSMICAS PARA EL VOLCÁN GALERAS

## Resumen

*En este trabajo, se realiza una re-evaluación del modelo unidimensional de velocidades Nariño-Modificado (NM) para la localización de sismos tipo Volcano-Tectónicos (VT) en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto (OVSP). Para esto se busca un nuevo modelo unidimensional basado en la técnica de Wadati y Riznichenco mediante el cual se limita la profundidad de las capas; y se utiliza la inversión de tiempos de arribo de 1382 eventos VT re-localizados con el programa Hypo71PC para estimar los valores de  $V_p$  y  $V_s$  en cada capa. Se utiliza el programa Velest para la solución del problema inverso acoplado de la estimación de localización y velocidad de onda P. Se usan también otros tres modelos iniciales ya existentes en el OVSP para obtener modelos finales mediante la inversión. Finalmente se re-localiza los hipocentros de los 1382 sismos con el modelo que presenta el menor RMS Residual,  $V_{Gal}$  Final. Como resultado se observa que el valor de la relación  $V_p/V_s$  equivale a 1.732 y es similar a  $\sqrt{3}$  estimado por muchos estudios en sismología, también se puede deducir que el modelo actualmente utilizado NM es de alta calidad y conduce a localizaciones más precisas que los nuevos modelos encontrados.*

**Palabras claves:** Solución del problema inverso, Volcano-Tectónicos (VT), Modelo Unidimensional de Velocidades, Velest, Wadati y Riznichenco.

## RE-EVALUATION OF ONE-DIMENSIONAL VELOCITY MODEL OF PROPAGATION OF SEISMIC WAVES FOR GALERAS VOLCANO

### Abstract

*In this work, is done a re-evaluation of one-dimensional velocity model Nariño-Modified (NM) for locating type Volcano-Tectonic earthquakes (VT) in the Volcanological and Seismological Observatory of Pasto (OVSP). This is search for a new unidimensional model based on Wadati technique and Ríznichenco technique where is limite the depth the layers and use the investment of arrival times of 1382 VT events re-located with the Hypo71PC program to estimate the values of  $V_p$  and  $V_s$  in each layer. Is used the Velest program to solved the coupled inverse problem of estimating location and velocity of P wave. Were also use three initial models existing in the OVSP for obtain the final models through investment. Finally is re-located hypocenters of 1382 events with the model that present the lowest RMS Residual, Final VGal. As a result is shows that the ratio value  $V_p/V_s$  equivalent to 1.732 and is similar to  $\sqrt{3}$  estimated by many studies in seismology, also can be inferred that the present model used NM is high quality and leads to more accurate locations that new models found.*



# Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Monitoreo Sísmico . . . . .	2
1.2. Clasificación de sismos en el VG . . . . .	3
1.2.1. Señales sísmicas transitorias . . . . .	3
1.2.2. Señales sísmicas continuas . . . . .	6
1.3. Estudios Anteriores . . . . .	7
<b>2. Definición del problema</b>	<b>10</b>
2.1. Descripción del Problema . . . . .	10
2.2. Objetivos . . . . .	10
2.2.1. Objetivo General . . . . .	10
2.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	11
2.3. Formulación del Problema . . . . .	11
2.4. Justificación . . . . .	11
<b>3. Marco teórico</b>	<b>13</b>
3.1. Propagación de ondas sísmicas . . . . .	13
3.1.1. Propagación de un medio elástico . . . . .	13
3.1.2. Ley de Snell . . . . .	17
3.1.3. Capas planas de velocidad constante . . . . .	19
3.2. Problema inverso . . . . .	20
<b>4. Metodología</b>	<b>24</b>
4.1. Selección de datos . . . . .	24
4.2. Aplicación del método de Wadati y Riznichenco para determinar la relación $V_p/V_s$ y modelo inicial . . . . .	29
4.3. Inversión de los tiempos de arribo y Modelos de Velocidad final . . . . .	33
4.3.1. Archivo de sismos de entrada (formato .cnv) . . . . .	36
4.3.2. Archivo de lista de estaciones (formato .sta) . . . . .	36
4.3.3. Archivo modelo inicial (formato .mod) . . . . .	37
4.3.4. Archivos Parámetros de Control (formato .cmn) . . . . .	38
<b>5. Resultados</b>	<b>40</b>
5.1. Relación $V_p/V_s$ . . . . .	40
5.2. Modelo inicial . . . . .	43
5.3. Modelos Finales . . . . .	46

<b>6. Análisis de Resultados y Discusión</b>	<b>52</b>
<b>Conclusiones y Recomendaciones</b>	<b>57</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>59</b>
<b>ANEXOS . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>A. Procedimientos</b>	<b>62</b>
A.1. Resultados obtenidos de la técnica de Wadati y Riznichenco . . . . .	62
A.2. Programa Velest . . . . .	72
A.2.1. Estructura de los archivos de entrada y salida de Velest . . . . .	72
A.2.2. Contenido del archivo galerasred-2-corr.sta . . . . .	73
A.2.3. Contenido del archivo Archvelest.cnv . . . . .	75
A.2.4. Contenido del Archivo Velest.cmn . . . . .	77
A.3. Rutina Localizaciones . . . . .	80
A.4. Histograma de Frecuencias (ROOT Cern versión v5-34-10) . . . . .	85

# Índice de Figuras

1.1. Red de Vigilancia Sísmica Galeras. (Tomada de <a href="http://www.ingeo Minas.gov.co">www.ingeo Minas.gov.co</a> , San Juan de Pasto) . . . . .	2
1.2. Sismo VT-A registrado el día 15 de Marzo de 2004 en estación Anganoy (ANGV) de la Red de Vigilancia Galeras. El eje ordenado tiene unidades de velocidad nm/s y el de las abscisas de tiempo. (Fuente OVSP) . . . . .	4
1.3. Sismo VT-B del VG registrado el 22 de Enero de 2002 en estación ANGV. El eje ordenado tiene unidades de velocidad nm/s y el de las abscisas de tiempo. (Fuente OVSP) . . . . .	4
1.4. Sismo LP del VG registrado el 11 de Noviembre 2007 en estación ANGV. El eje ordenado tiene unidades de velocidad nm/s y el de las abscisas de tiempo. (Fuente OVSP) . . . . .	5
1.5. Sismo TO del VG registrado el 23 de Abril de 2005 en estación ANGV. El eje ordenado tiene unidades de velocidad nm/s y el de las abscisas de tiempo. (Fuente OVSP) . . . . .	5
1.6. Sismo HYB del VG registrado el 24 de Junio de 2003 en estación ANGV. El eje ordenado tiene unidades de velocidad nm/s y el de las abscisas de tiempo. (Fuente OVSP) . . . . .	6
1.7. Sismos TRE del VG en estación ANGV: (a) Espasmódico registrado el día 12 de Diciembre de 2008, (b) Armónico registrado el día 11 de Febrero de 2007. (Fuente OVSP) . . . . .	7
1.8. Diferentes Modelos de Velocidad Unidimensionales para onda P ( $V_p$ ). (Fuente: Esta investigación) . . . . .	9
3.1. (a) Onda incidente P que genera una onda P reflejada y P transmitida . La onda P incidente y onda P reflejada tienen el mismo ángulo de incidencia $i_1$ . (b) Representa la propagación de la onda SH, cuando inciden sobre una interface sólida en el plano x-y. (Imagen tomada de libro de Stein, Cap. 2 Pag. 66, 2003)	17
3.2. 1 Rayo directo, 2 Rayo refractado, 3 Rayo refractado crítico. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	19

4.1. Pantallas del programa SAIIG, en las pequeñas ventanas (parte izquierda) se introducen los valores de los parámetros límites de selección, cuando se pulsa aceptar inmediatamente aparece información y la gráfica de la cantidad de sismos que cumplen las condiciones. Después en el botón Información se puede obtener información detallada acerca del proceso, y en Selecciona para análisis se obtiene el archivo final de salida de la totalidad de sismos para (a) Profundidad 0-10 km, y (b) Profundidad 10.1-30 km. (Fuente: Esta Investigación) . . . . .	28
4.2. Parte del archivo de entrada para la rutina en MatLab que contiene las fases de la onda P y S de 2 eventos sísmicos. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	30
4.3. Parte del archivo de salida de MatLab en el que se observa características de 10 eventos sísmicos. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	31
4.4. Segmento del archivo de entrada en el que se observa que hay características de 2 eventos sísmicos. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	32
4.5. Segmento del archivo resultado de MatLab, pertenece a los resultados de la onda P para el grupo de profundidad entre 0 - 10 km. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	32
4.6. Diagrama de flujo del proceso de Velest en modo simultáneo. (Fuente: Manual Velest Seismology) . . . . .	35
4.7. Segmento de archivo ArchVelest.cnv, utilizado para los 4 procedimientos. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	36
4.8. Segmento de archivo de entrada galerasred-2-corr.sta de las estaciones, utilizado para todos los 4 procedimientos. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	36
4.9. Archivo modelores.mod del modelo inicial VGAL. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	37
4.10. Segmento del archivo Velest.cmn de los parámetros de control para el modelo VGAL. Para los diferentes modelos se tiene la misma estructura. El único parámetro que cambia y diferencia los archivos parámetros de control es el valor de $V_p/V_s$ . (Fuente: Esta investigación) . . . . .	38
5.1. Diagrama de Wadati para el sismo tipo VT ocurrido el 25 de Marzo de 2002. Los círculos rojos corresponden a las lecturas de los tiempos de llegada de las fases P y S en las estaciones Nariño, Urcunina, Olga, Anganoy, Crater banda ancha componente vertical, Cráter corto periodo, Obonuco, Calabozo, Caba Negra, Loew arribando en ese orden. La línea negra corresponde al mejor ajuste con un coeficiente de correlación de 0.99 y un valor de la pendiente ( $V_p/V_s$ ) de 1.67. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	40
5.2. Histograma de frecuencias donde las columnas representan el valor de la frecuencia de eventos en cada intervalo y la curva azul es una representación de la distribución normal. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	41

5.3.	Corresponde a relación $V_p/V_s$ calculado con la técnica de Wadati con respecto a la profundidad (panel derecho). Los puntos rojos corresponden a 1336 eventos sísmicos de profundidad 0-30 km. Se toma de sistema de referencia la cima del VG con el valor de 0 en el eje vertical. Velocidad de onda P vs Velocidad de onda S estimadas a partir de la técnica de Riznichenco (panel izquierdo). Los puntos rojos representan cada uno de los sismos. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	42
5.4.	Tendencia de profundidades con $V_p$ (izquierda) y $V_s$ (derecha). La línea negra corresponde a las regresiones lineales realizadas a las 255 series para la onda P y 240 series para la onda S. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	44
5.5.	Modelos finales para la onda P obtenidos de la inversión de los tiempos de arribo mediante Velest con el modelo inicial de velocidades (a) Modelo WR, (b) Modelo G (c) Modelo NM y (d) Modelo VGal. La línea azul trazada verticalmente corresponde al modelo de velocidad correspondiente a la mínimo promedio de RMS residual. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	47
5.6.	Comparación de los modelos finales obtenidos con cada uno de los modelos iniciales (a) Modelo WR, (b) Modelo G, (c) Modelo NM y (d) Modelo VGal. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	50
5.7.	Re-localizaciones de los eventos sísmicos con el modelo VGal final mediante Hypo71PC (círculos rojos) y sismos localizados inicialmente con el modelo NM (círculos verdes) en los perfiles (a) Profundidad-Latitud, (b) Profundidad-Longitud y (c) Latitud-Longitud. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	51
A.1.	En la parte superior se encuentran los archivos de entrada Archvelest.cnv, galerasred-2-corr.sta, Velest.cmn, Modelores.mod. El archivo VELEST.EXE empieza a ejecutarse después de definir todos los archivos de entrada necesarios para el proceso. Finalizadas las 60 iteraciones se generan los archivos de salida Gsismosmodvel01.CNV, Gmodvel01.OUT, Gcorreccionsta.OUT . . . . .	72
A.2.	Archivo completo de información de las estaciones que conforman la Red de Vigilancia Sísmica Galeras . . . . .	74
A.3.	Eventos sísmicos tipo VT, donde se escogieron sismos de profundidad cercana al cráter, media y sismos profundos. La totalidad de eventos corresponde a 1382 . . . . .	76
A.4.	Archivo completo de los parámetros de control con sus respectivos valores asignados . . . . .	80
A.5.	Histograma de frecuencias y curva gaussiana obtenidos por procesamiento de datos mediante el programa ROOT Cern. En el recuadro en la parte superior derecha se encuentran las medidas de tendencia para el histograma y gaussiana . . . . .	85

# Índice de Tablas

4.1. Parámetros de selección para extraer los datos a partir de SAIIG. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	26
4.2. Modelo G (izquierda), Modelo NM (centro), Modelo WR (derecha). (Fuente: OVSP) . . . . .	37
5.1. Medidas de tendencia que se obtuvieron en el procedimiento para encontrar la relación $V_p/V_s$ mediante el método de Wadati. (Fuente: Esta investigación)	43
5.2. Información de los resultados obtenidos para obtener el modelo de velocidades VGal. Los valores de la altura fueron asignados tomando como punto de referencia el nivel del mar hasta la cima del volcán correspondiente a 4.2 km y se toma el valor positivo. Del nivel del mar hacia abajo se consideran valores negativos. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	45
5.3. Información de los Modelos de Velocidad finales para la onda P y S con su respectivo RMS residual para el modelo inicial (a) Modelo WR, (b) Modelo G, (c) Modelo NM y (d) Modelo VGal. (Fuente: Esta investigación) . . . . .	48
6.1. Parámetros de Lamé y coeficiente de Poisson para el modelo NM y modelo VGal Final. Para el modelo VGal final la profundidad del modelo varía entre 0-17km, para el modelo NM entre 0-40km . . . . .	53
A.1. Cálculo de la relación $V_p/V_s$ mediante la técnica de Wadati para 80 eventos sísmicos. Los primeros 40 eventos se encuentran a la zona profunda del volcán, y los últimos 40 se encuentran en zona cercana al cráter . . . . .	64
A.2. Cálculo de $V_p$ mediante la técnica de Riznichenco para 80 eventos sísmicos. Los primeros 40 eventos se encuentran a la zona profunda del volcán, y los últimos 40 se encuentran en zona cercana al cráter . . . . .	67
A.3. Cálculo de $V_s$ mediante la técnica de Riznichenco para 80 eventos sísmicos. Los primeros 40 eventos se encuentran a la zona profunda del volcán, y los últimos 40 se encuentran en zona cercana al cráter . . . . .	70
A.4. Definición de cada uno de los parámetros de control utilizados para el procedimiento . . . . .	77

# Glosario

- **Acelerómetro:** Mide las aceleraciones generadas por un sismo local sobre la superficie de la Tierra
- **Cluster:** Conglomeración de cierta cantidad de sismos
- **Coda:** Constituyen la parte final de los registros de los sismogramas
- **Discontinuidad de Mohorovicic:** Límite que separa la corteza del manto terrestre
- **Distancia Epicentral:** Longitud del círculo máximo entre el epicentro y una estación de registro
- **Distancia Hipocentral:** Distancia calculada entre el hipocentro sísmico y un punto sobre la superficie de la Tierra
- **Energía Sísmica:** Energía liberada durante el proceso de ruptura de roca en una falla, proyectada en forma de ondas elásticas u ondas sísmicas
- **Epicentro:** Proyección del sismo sobre la superficie de la Tierra
- **Estación sismológica:** Donde se registran los sismos. Existen de una componente que indica monitoreo de la onda sísmica sólo en su componente vertical. De tres componentes que indica monitoreo de la onda sísmica tanto en su componente vertical como en las dos horizontales (NS-EO)
- **Estrato-Volcán:** Tipo de volcán cónico de gran altura, caracterizados por un perfil escarpado y erupciones periódicas y explosivas
- **Falla:** Es donde se presenta la ruptura de roca que origina un movimiento interno terrestre
- **Fase:** Es el comienzo de un desplazamiento u oscilación en un sismograma indicando diferente tipo de onda

- **Fuentes Sísmicas:** Origen de un evento sísmico
- **Hipocentro:** Lugar donde la Tierra originó la falla y se produce la liberación de energía que genera un sismo
- **Lahares:** Flujo de sedimento y agua que se moviliza desde las laderas de un volcán.
- **Magnitud:** Valor a-dimensional que refleja la energía liberada en el foco o hipocentro del sismo
- **Piroclastos:** Fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva.
- **Profundidad:** Distancia vertical entre el hipocentro y el epicentro del evento sísmico
- **Sismicidad:** Expresa la actividad sísmica relativa de una zona, una región y para un periodo dado de tiempo
- **Sismo:** Movimiento en el interior de la Tierra que genera liberación de energía
- **Sismograma:** Registro hecho por un sismógrafo
- **Tiempo de origen:** Tiempo inicial donde se produce el sismo o se inicia la ruptura de la falla



# Capítulo 1

## Introducción

El Volcán Galeras (VG) es un volcán activo que se ubica en el departamento de Nariño en las coordenadas  $1^{\circ}13'44''$  de latitud Norte,  $77^{\circ}21'33''$  de longitud Oeste y con una altura de 4276 msnm. En la zona de influencia del VG se encuentran seis municipios y más de siete corregimientos con una población aproximada de 450.000 habitantes. El VG se considera un estrato-volcán debido a la presencia de piroclastos alternantes, depósitos de flujos de lava andesítica y se caracteriza por erupciones explosivas (OVSP, 2013).

La localización de fuentes sísmicas se ha convertido en una de las más importantes funciones en el monitoreo de volcanes activos. Esta función consiste en determinar las coordenadas espaciales y temporal del evento sísmico. Por otro lado, las ondas sísmicas y sus tiempos de llegada dan información acerca del interior de la Tierra. Una de sus aplicaciones es obtener un modelo de corteza que represente las velocidades de propagación de la onda respecto a la profundidad, sin descartar que para la corteza superficial se debe tener en cuenta las condiciones litológicas y de topografía del terreno (Palau T., 2005).

En el presente trabajo se busca un Modelo de Velocidades Unidimensional para el VG partiendo de la localización de eventos sísmicos tipo VT y se contrasta este nuevo modelo con el existente y otros encontrados en anteriores investigaciones. El nuevo aporte del modelo encontrado consiste en la utilización de un mayor número de sismos localizados, especialmente ampliando el rango de profundidad respecto a los sismos que fueron utilizados para inferir el modelo que se utiliza actualmente. Posteriormente se re-evalúa el modelo existente respecto al modelo estimado en este trabajo.

## 1.1. Monitoreo Sísmico

La Red de Vigilancia Sísmica Galeras consta de 12 estaciones (Figura 1.1); 7 de corto periodo lo que significa que su respuesta es plana para frecuencias mayores a 1 Hz, 4 son triaxiales y 3 verticales. Se cuenta con 5 sismómetros de banda ancha, lo que implica una respuesta plana para frecuencias mayores que 0.008 Hz. Estas estaciones son triaxiales. La información es telemétrica. La forma de transmisión de los datos puede ser análoga si el sensor convierte la velocidad del terreno en una señal continua de voltaje que pasa por un oscilador controlado por voltaje (VCO), codificando la señal que se envía a sede con transmisión FM (Frecuencia modulada); o digital, si el sensor convierte la velocidad del terreno en una señal continua de voltaje y la señal es digitalizada donde se encuentra el sismómetro utilizando transmisión FSK (Modulación por desplazamiento de frecuencia). La frecuencia de muestreo en ambos casos es de 100 Hz.

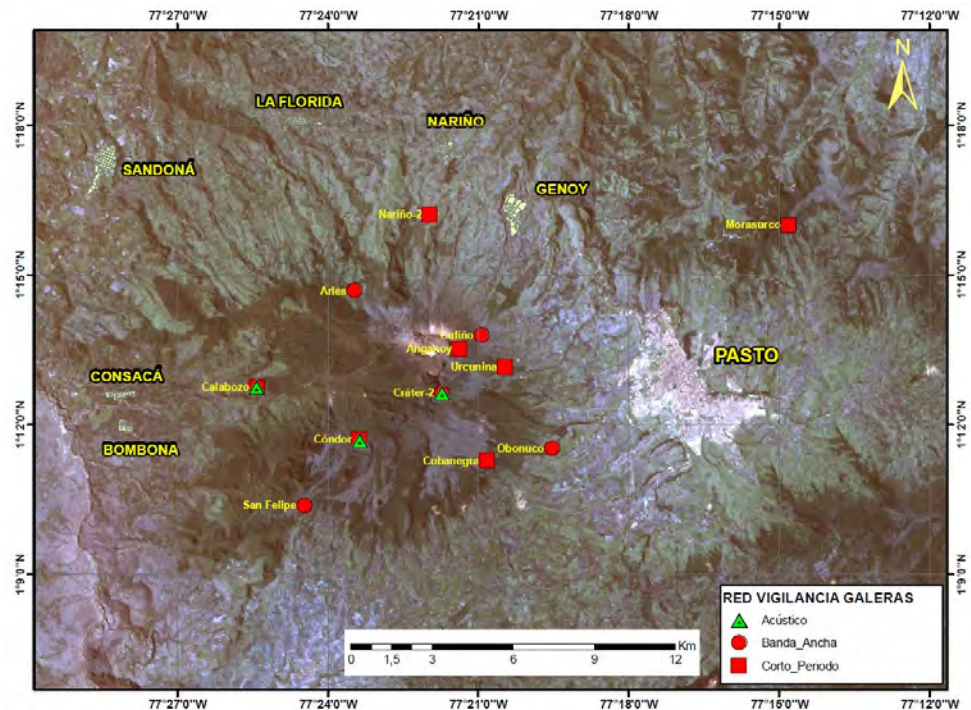


Figura 1.1: Red de Vigilancia Sísmica Galeras. (Tomada de [www.ingeominas.gov.co](http://www.ingeominas.gov.co), San Juan de Pasto)

## 1.2. Clasificación de sismos en el VG

Basado y tomando algunas definiciones del Catálogo de Señales Sísmicas, 2004

La sismicidad es una manifestación de un volcán activo. Las causas pueden ser diversas y pueden estar relacionadas con fases de las erupciones, con etapas póstumas o premonitorias evidenciando un proceso físico en el interior del sistema volcánico.

Los sismos en el volcán tienen una clasificación y estudios realizados siguen esquemas basados en las características de las rúbricas de los sismogramas o en el mecanismo de la fuente inferido, y en algunos observatorios vulcanológicos asumen algunas de ellas o suelen modificarlas y clasificar los sismos ajustándose a los instrumentos utilizados para la vigilancia sísmica. En el VG las señales sísmicas se clasifican en 2 tipos de acuerdo a la duración de la fuente:

### 1.2.1. Señales sísmicas transitorias

Hace referencia a señales cuya fuente actúa en un tiempo relativamente corto. Dentro de estas se encuentran los tipos Volcano-Tectónicos (VT), Largo Periodo (LP), Híbridos (HYB), y Tornillos (TO).

#### **Sismos Volcano-Tectónicos o VT:**

Tienen que ver con fracturamientos de extensión o de cizalla en la parte sólida del volcán debido a presiones inducidas por magma o cambios bruscos de temperaturas (Latter J. *et al.*, 1979) Este tipo de sismos se divide en dos clases:

#### ***VT profundos (VT-A):***

Tienen fases P y S notables (Figura 1.2). Ocurren a profundidades focales entre 2 y 10 km por debajo del volcán. Sus espectros muestran alta frecuencia generalmente mayores a 5 Hz con energías pico en las bandas de frecuencia entre 6 a 8 Hz. A estos también se los conoce como sismos de Alta Frecuencia (Minakami T., 1974). La forma de la onda depende de la

magnitud, profundidad y distancia entre la fuente y la estación. Los sismos VT-A implican un mecanismo de fuente bien conocido denominado falla de cizalla ocasionada por esfuerzos debidos al desplazamiento de un plano de falla o debilidad (Gomez D. *et al.*, 2004)

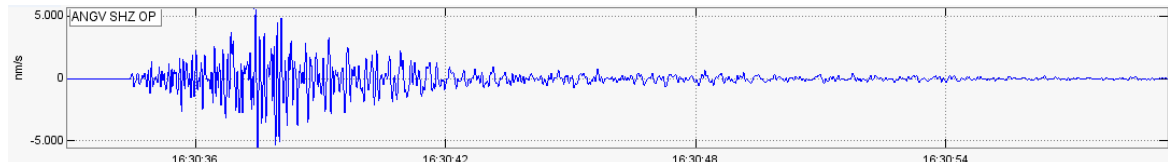


Figura 1.2: Sismo VT-A registrado el día 15 de Marzo de 2004 en estación Anganoy (ANGV) de la Red de Vigilancia Galeras. El eje ordenado tiene unidades de velocidad nm/s y el de las abscisas de tiempo. (Fuente OVSP)

### ***VT superficiales (VT-B):***

Con ocurrencia a profundidad focal menores de 2 km, muestran larga duración de coda definiendo una dispersión de tren de ondas superficiales. Los arribos de las ondas P son emergentes y resulta imposible detectar un arribo claro de fases de ondas S (Figura 1.3).

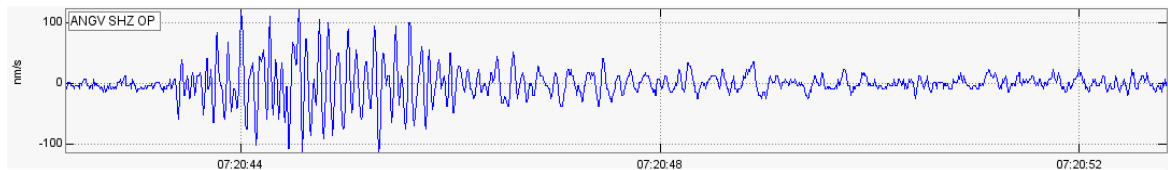


Figura 1.3: Sismo VT-B del VG registrado el 22 de Enero de 2002 en estación ANGV. El eje ordenado tiene unidades de velocidad nm/s y el de las abscisas de tiempo. (Fuente OVSP)

### **Sismos de Largo Periodo (LP) o Baja Frecuencia (LF):**

Se presentan como enjambres a una profundidad típica menor a 2 km (Latter J. *et al.*, 1979). Se caracterizan porque en su firma es posible distinguir la forma de onda de sus armónicos dominantes, que generalmente se encuentran por debajo de los 5 Hz, superpuestos a estos armónicos se encuentran componentes menos energéticas que alcanzan los 13 Hz (Figura 1.4).

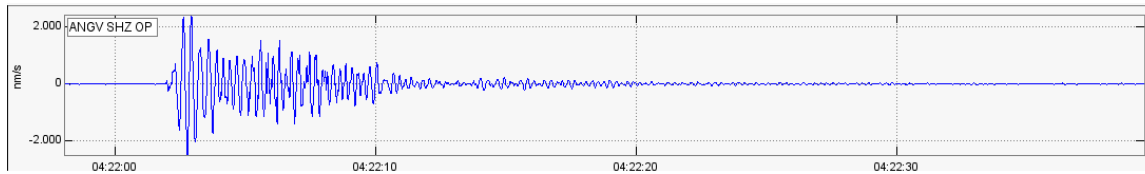


Figura 1.4: Sismo LP del VG registrado el 11 de Noviembre 2007 en estación ANGV. El eje ordenado tiene unidades de velocidad nm/s y el de las abscisas de tiempo. (Fuente OVSP)

### **Sismo Tipo Tornillo (TO):**

Nombre acuñado por el personal del OVSP, estos sismos están asociados con procesos de resonancia. Su firma muestra un inicio impulsivo tras el cual se observa que uno o varios armónicos alargan su coda por tiempos relativamente largos. La manera en que decae la amplitud del sismograma a lo largo del tiempo es lenta, lo que implica que la tasa de pérdida de energía en la cavidad resonante es también lenta (Torres R., 1992).

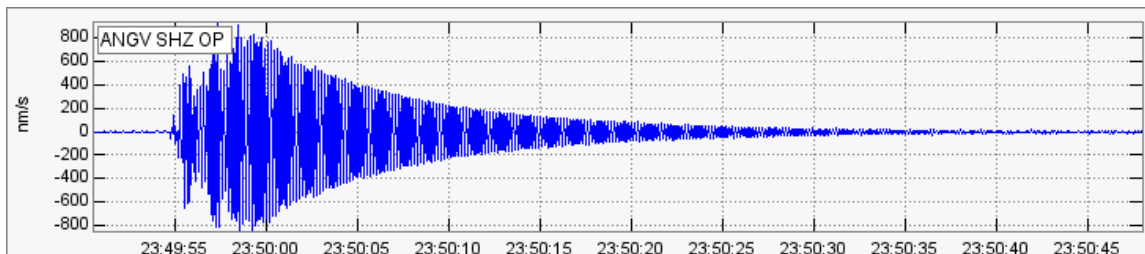


Figura 1.5: Sismo TO del VG registrado el 23 de Abril de 2005 en estación ANGV. El eje ordenado tiene unidades de velocidad nm/s y el de las abscisas de tiempo. (Fuente OVSP)

### **Sismos Híbridos (HYB), sismos multifase:**

Señales que comparten las características de frecuencia y señal de eventos LP y VT. Pueden reflejar una posible mezcla de mecanismos de fuente de ambos tipos de eventos. Las altas frecuencias en el inicio de los híbridos es más pronunciada que los LP pero su coda es

dominada mediante trenes de onda armónica no dispersivos que es característico de los eventos LP (Chouet B., 1996).

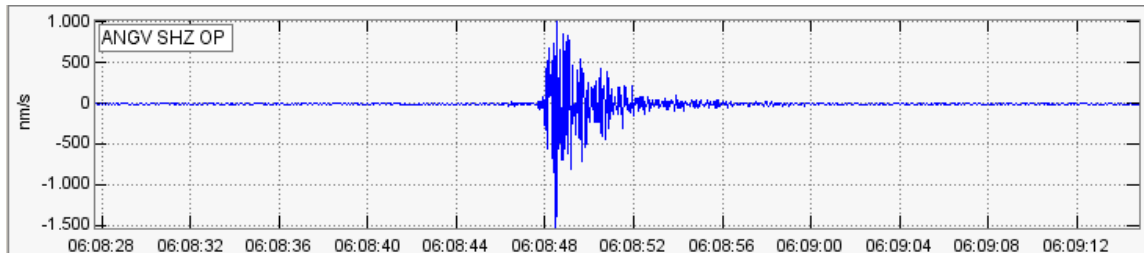


Figura 1.6: Sismo HYB del VG registrado el 24 de Junio de 2003 en estación ANGV. El eje ordenado tiene unidades de velocidad nm/s y el de las abscisas de tiempo. (Fuente OVSP)

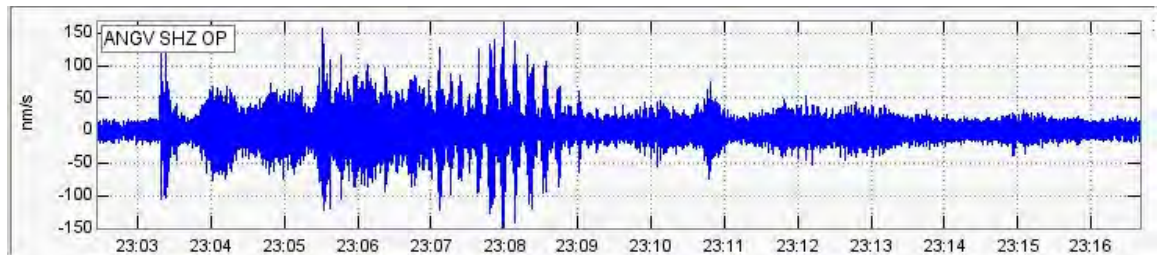
### 1.2.2. Señales sísmicas continuas

Los sismogramas pueden estar asociados con una fuente persistente en el tiempo relacionada con dinámica de fluidos o con procesos de deslizamiento de roca o lahares. Dentro de estas señales el más importante es el tremor o TRE.

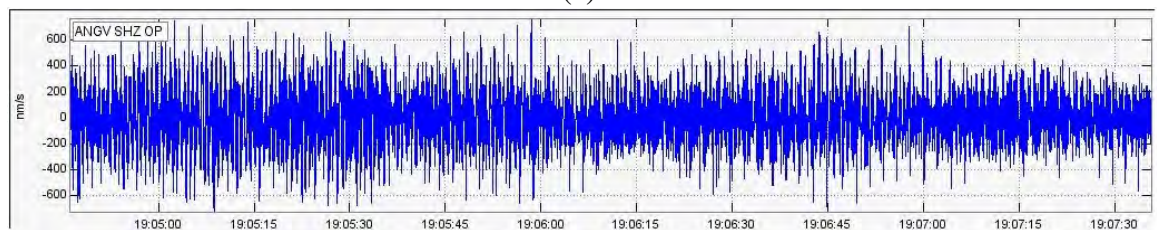
#### **Tremor Volcánico (TRE):**

Los TRE se caracterizan por un trazo continuo en el sismograma en contraste con los anteriores eventos de carácter discreto. Refleja una vibración continua del suelo o pequeños sismos muy frecuentes, cuyas ondas se traslapan. Las duraciones de tremores pueden ser de minutos a meses y algunos de sus espectros muestran su principal aporte de energía en una banda muy angosta 1-5 Hz. En general no se pueden identificar con claridad las fases P debido a su emergencia y no se distinguen fases S (Minakami T., 1974).

Según Ryall, (1993) se reconocen dos tipos de TRE: Armónico el cuál se caracteriza por sucesiones de onda monocromáticas (una misma frecuencia) o cuasi-monocromáticas en una banda frecuencial muy angosta, muestran una modulación regular de la envolvente (Figura 1.7 (a)) y Espasmódico en donde su longitud y frecuencia varían significativamente, su banda de contenido espectral es más amplia que los Armónicos (Figura 1.7 (b)).



(a)



(b)

Figura 1.7: Sismos TRE del VG en estación ANGV: (a) Espasmódico registrado el día 12 de Diciembre de 2008, (b) Armónico registrado el día 11 de Febrero de 2007. (Fuente OVSP)

### 1.3. Estudios Anteriores

#### Modelo Unidimensional de Velocidades Nariño Modificado (NM) por OVSP, 1998

Utilizado actualmente en el Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Pasto. Se realizó teniendo en cuenta los resultados del proyecto Nariño (Meissner R., *et al.*, 1977) basado en los estudios de refracción sísmica profunda y datos gravimétricos de un perfil trazado entre Malpelo-Tumaco-La Cocha, desde el nivel del mar hasta la discontinuidad de Mohorovicic.

Este perfil no atraviesa la zona del complejo volcánico Galeras pese a su relativa proximidad. Los cuatro kilómetros por encima del nivel del mar fueron inferidos mediante inspección visual de la geología superficial con ayuda de la plancha 429 (Murcia A., 1991).

Este modelo consiste de 5 capas planas y un semi-espacio (Figura 1.8). El datum de referencia se ubicó en 4200 msnm y se asumió un valor para la relación  $V_p/V_s$  de 1.78.

Con respecto a la validez de este modelo para las localizaciones de sismos, se han confrontado los resultados obtenidos con explosiones de cantera en lugares conocidos y algunos eventos asociados con erupciones explosivas en el cráter activo de Galeras mostrando buenos resultados epicentrales y cierta desviación en la profundidad.

### **Modelo Unidimensional de Velocidades de Propagación de Ondas Sísmicas para el VG, Modelo Galeras (G) por Torres R., et al, 2010**

Modelo resultado de la inversión de tiempos de arribo de 1112 eventos tipo VT, con modelo inicial de velocidades WR encontrado mediante técnicas de Wadati y Ríznichenco utilizando 1112 eventos sísmicos tipo VT en un rango de profundidad de 0-10km . Consta de 6 capas que se reducen a 5 dadas las similitudes de las dos primeras capas y un semi-espacio (Figura 1.8), con un valor de la relación  $V_p/V_s$  de 1.74. En general el modelo no muestra una marcada capa de baja velocidad pese a que la segunda capa que mide entre 2 a 4 km muestra valores ligeramente más bajos respecto a la primera.

Los 4 km que incluyen el edificio volcánico, están compuestos de materiales de más baja velocidad asociados con depósitos de piroclastos juveniles poco consolidados y lavas más antiguas altamente alteradas o fracturadas. La re-localización de eventos sísmicos se hizo mediante el programa Velest, sin considerar el programa de localización utilizado en el OVSP con su respectivo procedimiento.

### **Estructura Tridimensional de Velocidad de onda P para el Volcán Galeras por Londoño, 2008**

Utilizaron el método de Kissling et al., (1994) determinando un modelo mínimo 1-D de velocidades apoyados en la geología superficial, velocidades sísmicas nominales de rocas en laboratorio y estudios geofísicos regionales (Instituto Geofísico Pontificia Universidad Javeriana). Para obtener el modelo ellos consideraron varios modelos de prueba y escogieron el que menor RMS presente. Este consiste de tres capas y un semi-espacio (Figura 1.8).



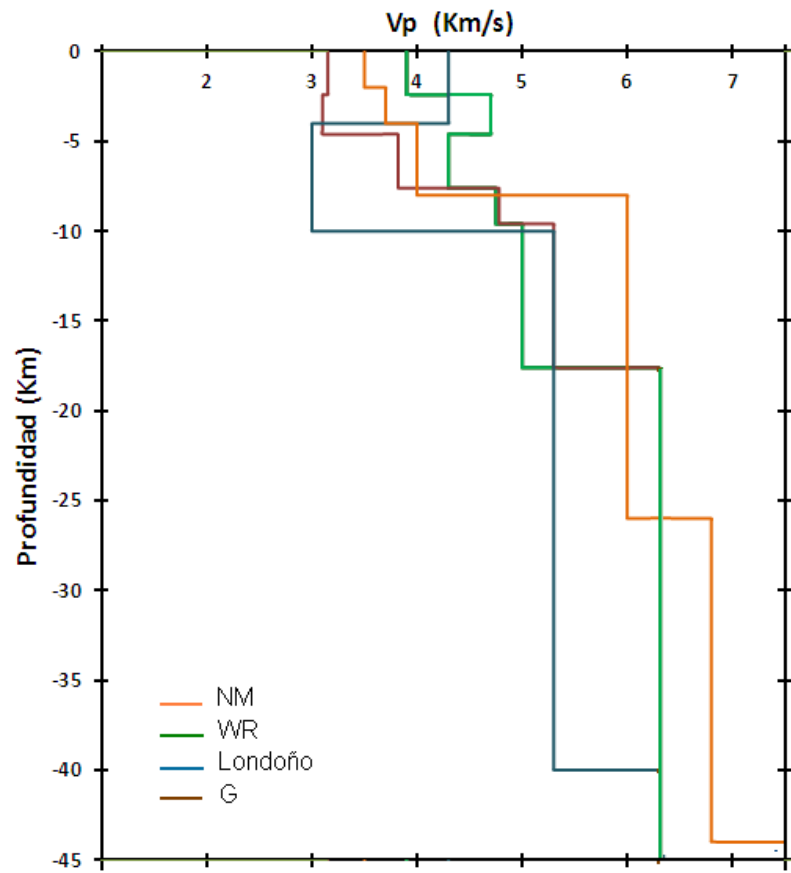


Figura 1.8: Diferentes Modelos de Velocidad Unidimensionales para onda P ( $V_p$ ). (Fuente: Esta investigación)

# Capítulo 2

## Definición del problema

### 2.1. Descripción del Problema

El VG es uno de los volcanes más activos de Colombia, por lo que su vigilancia continua se hace necesaria. Es importante que la localización de eventos sísmicos se realice con suficiente precisión.

Para el proceso de localización se emplean programas los cuales requieren un modelo de velocidades predeterminado. Actualmente el OVSP trabaja con el programa Hypo71PC (Lee and Lahr, 1975) y el modelo unidimensional de velocidades que ese utiliza es el NM. Es necesaria la re-evaluación de este modelo ya que los valores de velocidad de las capas superiores (4 primeros kilómetros) fueron inferidos por inspección visual de la geología de la zona. El problema que se ataca en este trabajo consiste en confirmar o refutar el uso del modelo NM basados en la generación de un nuevo modelo utilizando la sismicidad registrada en la zona.

### 2.2. Objetivos

#### 2.2.1. Objetivo General

Re-evaluar el modelo unidimensional de velocidades NM del VG para la localización de sismos en el OVSP.

### **2.2.2. Objetivos Específicos**

- Seleccionar sismos VT localizados y sus respectivos tiempos de arribo de ondas P y S.
- Determinar un modelo inicial mediante la técnica de Wadati y Riznichenco y proponer otros modelos iniciales como entrada al programa Velest.
- Solucionar el problema inverso ejecutando programa Velest.
- Realizar la re-localización de hipocentros con los modelos finales y el modelo existente para determinar finalmente el que presente menores incertidumbres.

## **2.3. Formulación del Problema**

¿Es el Modelo Unidimensional de Velocidades NM la mejor opción para la localización de sismos tipo VT en el OVSP?

## **2.4. Justificación**

Para una adecuada interpretación de la actividad volcánica, el proceso de localización de la sismicidad es de suma importancia. Las fuentes sísmicas generalmente se agrupan formando clusters en determinadas regiones del edificio volcánico. Localizaciones de precisión confiable; mostrarían estos agrupamientos de manera más constreñida, mejorando la ubicación espacio-temporal de dichas fuentes sismogénicas. La reactivación en el tiempo de ciertas fuentes de sismos es un insumo clave dentro del pronóstico de erupciones ya que históricamente episodios pre-eruptivos se han caracterizado por la actividad de estas fuentes.

Entre los factores que intervienen durante la localización se encuentra el modelo unidimensional de velocidades de ondas P. En el OVSP se ha utilizado un sólo modelo de velocidades desde el año 1989. Este modelo basado en uno similar utilizado en el volcán Nevado del Ruiz, no ha tenido modificaciones.

En este trabajo se obtiene un nuevo modelo basado en la inversión de tiempos de arribo y localización de sismos ocurridos en la historia del OVSP. A diferencia del modelo NM, para el cual se infirió el valor de las velocidades de los 4 kilómetros más superficiales a partir de inspección visual de la geología de la zona. Finalmente se contrastan los resultados de este nuevo modelo respecto al modelo NM, re-evaluando el modelo actualmente utilizado. Por otro lado cabe destacar que un modelo unidimensional inicial confiable sirve como punto de partida para realizar un modelo tridimensional que nos ayudaría a entender de mejor manera la estructura del volcán.

# Capítulo 3

## Marco teórico

### 3.1. Propagación de ondas sísmicas

#### 3.1.1. Propagación de un medio elástico

Al propagarse una onda transporta energía y cantidad de movimiento desde un punto del espacio a otro, sin transportar materia. Los sismos generan dos tipos de ondas elásticas que se propagan a través del medio: las ondas de cuerpo o de volumen y las ondas superficiales.

En sismología se conocen como ondas de volumen a las ondas P primarias o de compresión y las ondas S secundarias o de cortante; las primeras son las que se propagan a mayor velocidad, por lo que a cualquier distancia del foco son registradas primero. Al hacer vibrar las partículas en el mismo sentido del tren de ondas producen compresión y dilatación a su paso. Son ondas longitudinales. Las ondas S son ondas transversales y se propagan a menor velocidad que las ondas P. La velocidad de propagación depende de la densidad del medio y de sus propiedades elásticas, las cuales están caracterizadas por módulos elásticos como son los coeficientes de Lamé  $\lambda$  ( $dn/cm^2$ ),  $\mu$  ( $dn/cm^2$ ) (Rosales C., 2001). Las ondas S son normalmente divididas según su polarización en ondas SH (polarizadas en el plano horizontal) y ondas SV (polarizadas en el plano vertical). Ambas contenidas en el plano perpendicular a la dirección de propagación del frente de ondas.

Las perturbaciones sobre un medio elástico producen cambios locales de esfuerzo y deformación. El esfuerzo es la relación de la fuerza en el área sobre la cual es aplicada. Si la fuerza es perpendicular al área se llama esfuerzo normal o de compresión, y si la fuerza es tangencial al área es esfuerzo cortante o de cizalla (Stein S., 2003). Los esfuerzos aplicados sobre un elemento de volumen se representan mediante el tensor de esfuerzos

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Las deformaciones resultan de los esfuerzos aplicados a un cuerpo elástico y son los cambios relativos en la dimensión o forma de un cuerpo. Se representa por el tensor de deformación  $e_{ij}$  el cual resulta del movimiento diferencial de las partículas que componen el cuerpo (Stein S., 2003).

$$e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_x}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) & \frac{\partial u_y}{\partial y} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_y}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial y} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) & \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$u(x, t)$  corresponde al campo de desplazamientos. La traza del tensor de deformación es denominada dilatación  $\theta$ , y representa el cambio de volumen por unidad de volumen (Rosales C., 2001)

$$\theta = e_{ii} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} \quad (3.3)$$

La relación entre el tensor de esfuerzos y el tensor de deformaciones para un medio isotrópico se da mediante la ley de Hooke o ecuación constitutiva (Stein S., 2003), que se expresa como:

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (3.4)$$

El comportamiento elástico se puede representar por 3 módulos adicionales que permiten expresarse en términos de los módulos de Lamé y rigidez, estos son: el *Módulo de elasticidad o de Young*  $E$  ( $dn/cm^2$ ) definida como la cantidad de esfuerzo por unidad de deformación así:

$$E = \frac{\sigma_{ij}}{e_{ij}} \quad (3.5)$$

Considerando sólo esfuerzo normal el módulo elástico queda definido como  $E = \sigma_{ii}/e_{ii}$  y aplicando en la Ecuación 3.4 el módulo de elasticidad  $E$  queda definido así:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (3.6)$$

El *Módulo de incompresibilidad*  $K$  ( $dn/cm^2$ ) mide la resistencia de los materiales elásticos a la compresión, es decir, el cambio de volumen sin que varíe su forma. Es la relación entre el esfuerzo y el cambio unitario de volumen. Para definir  $K$ , se supone que el cuerpo está sujeto a la presión litostática (Stein C., 2003), es decir  $\sigma_{ii} = -P$  y  $\sigma_{ij} = 0$ . De acuerdo a lo anterior

$$K = \frac{-P}{\theta} \quad (3.7)$$

Relacionando la Ecuación 3.7 con la ley de Hooke (Ecuación 3.4), el módulo de incompresibilidad para un medio isotrópico queda en términos de los coeficientes de Lamé de la siguiente manera:

$$K = \lambda + \frac{2}{3}\mu \quad (3.8)$$

El *Coefficiente de Poisson*  $\nu$  el cuál relaciona las deformaciones unitarias transversales y longitudinales tal que:

$$\nu = \frac{-e_{yy}}{e_{ii}} = \frac{-e_{zz}}{e_{ii}} \quad (3.9)$$

Si la tensión es aplicada a lo largo del eje  $x$ , todos los esfuerzos se hacen cero a excepción de  $\sigma_{xx}$ . Relacionando con la Ecuación 3.4, el coeficiente de Poisson para un medio elástico isotrópico en términos de los módulos de Lamé se expresa como:

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (3.10)$$

Cuando las ondas se propagan lejos de la fuente, la relación entre esfuerzos y desplazamientos está dada por la ecuación de movimiento para un medio homogéneo, la cual no incluye efectos de fuente. Se define así:

$$\frac{\partial^2 \sigma_{ij}(x, t)}{\partial x_j^2} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}_i(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.11)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del medio de propagación. Utilizando la ecuación constitutiva, se puede obtener los esfuerzos en términos del vector desplazamiento. Esto se hace tomando las derivadas espaciales de sus componentes del vector desplazamiento, reemplazando estos valores dentro de la ecuación de movimiento (Ecuación 3.11) y teniendo en cuenta definiciones de dilatación  $\theta$  (Ecuación 3.3) y Laplaciano

$$\nabla^2(u_x) = \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \quad (3.12)$$

Se reemplaza los anteriores valores en la Ecuación 3.11. Para la componente  $x$  se obtiene

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2(u_x) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}_i(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.13)$$

Realizando el mismo procedimiento se obtienen ecuaciones similares para las componentes  $y$  y  $z$ , teniendo 3 ecuaciones, siendo estas combinadas en una ecuación singular, obteniendo finalmente:

$$(\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}(x, t)) + \mu \nabla^2 \mathbf{u}(x, t) = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (3.14)$$

El campo de desplazamientos  $\mathbf{u}(x, t)$  se puede expresar mediante el teorema de Helmholtz (Stein C., 2003) en términos de dos funciones, una escalar  $\phi$  y una vectorial  $\Upsilon$

$$\mathbf{u}(x, t) = \nabla \phi(x, t) + \nabla \times \Upsilon(x, t) \quad (3.15)$$

Utilizando algunas identidades y sustituyendo la descomposición del campo de desplazamientos (Ecuación 3.15) en la Ecuación 3.14 se pueden obtener dos soluciones por separado para cada función así:

Para el potencial  $\phi$

$$\nabla^2 \phi(x, t) = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \phi(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.16)$$

Siendo una ecuación de onda escalar y se deduce a  $\alpha(cm/s)$  como la velocidad para la onda P (Stein C., 2003) definida como:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3.17)$$

Para el potencial  $\Upsilon$

$$\nabla^2 \Upsilon(x, t) = \frac{1}{\beta^2} \frac{\partial^2 \Upsilon(x, t)}{\partial t^2} \quad (3.18)$$

Siendo la ecuación anterior vectorial y  $\beta(cm/s)$  la velocidad de propagación para la onda S definida como

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.19)$$



### 3.1.2. Ley de Snell

La ley de Snell describe el comportamiento de frentes de onda que van de un medio a otro. Considerando la relación entre los ángulos de incidencia para ondas P-SV planas a la interface  $z=0$ , la cual separa al medio 1 con velocidades para onda P y S de  $\alpha_1$  y  $\beta_1$  y el medio 2 con velocidades  $\alpha_2$  y  $\beta_2$ , y asumiendo  $\alpha_1 < \alpha_2$  y  $\beta_1 < \beta_2$  (Figura 3.1(a)) se tiene que una onda P incidente en el medio 1 genera ondas P reflejadas y transmitidas. Parte de la onda P se convierte en onda reflejada SV y onda transmitida SV (Stein C., 2003).

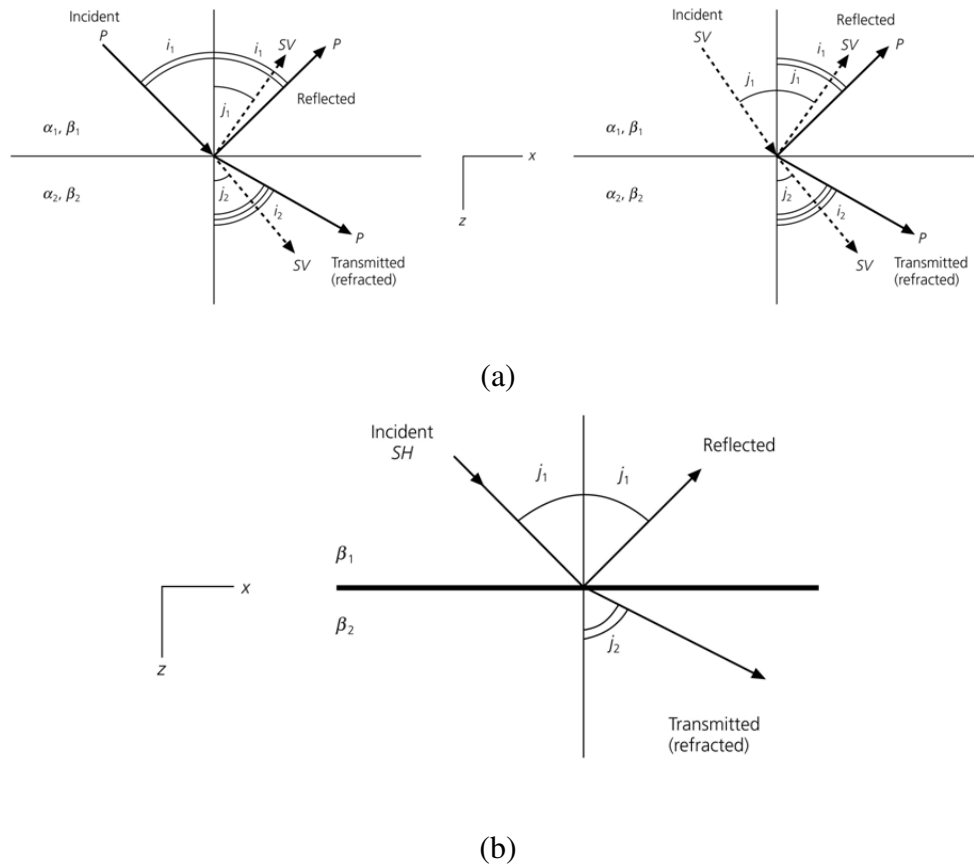


Figura 3.1: (a) Onda incidente P que genera una onda P reflejada y P transmitida. La onda P incidente y onda P reflejada tienen el mismo ángulo de incidencia  $i_1$ . (b) Representa la propagación de la onda SH, cuando inciden sobre una interface sólida en el plano x-y. (Imagen tomada de libro de Stein, Cap. 2 Pag. 66, 2003)

En general los potenciales para las ondas P y SV que describen la onda en el medio 1 son:

$$\begin{aligned}\phi(x, z, t) &= \text{Incidente } P + \text{Reflejada } P \\ &= A_1 \exp(i(\omega t - k_x x - k_x r_{\alpha_1} z)) \\ &\quad + A_2 \exp(i(\omega t - k_x x + k_x r_{\alpha_1} z))\end{aligned}\tag{3.20}$$

$$\Upsilon(x, z, t) = \text{Reflejada } SV = B_2 \exp(i(\omega t - k_x x + k_x r_{\beta_1} z))$$

Los términos  $k_x r_{\alpha_1}$  y la componente  $z$  de los números de onda indican cual medio y que tipo de onda (P o S) describe el potencial.  $A_1$ ,  $A_2$  y  $B_2$  son las amplitudes de las ondas incidente P, reflejada P y reflejada SV. La dirección de onda esta dado mediante el vector de onda  $\mathbf{k}$ .

En el medio 2 las ondas transmitidas para la onda P y SV son:

$$\begin{aligned}\phi(x, z, t) &= \text{Trasmitida } P = A' \exp(i(\omega t - k_x x - k_x r_{\alpha_2} z)) \\ \Upsilon(x, z, t) &= \text{Trasmitida } SV = B' \exp(i(\omega t - k_x x - k_x r_{\beta_2} z))\end{aligned}\tag{3.21}$$

Donde  $A'$  y  $B'$  describen las amplitudes de las ondas P y SV transmitidas. De la Figura 3.1(a) la ley de reflexión y refracción de Snell (Stein C., 2003) se deduce:

$$\frac{\alpha_1}{\sin i_1} = \frac{\beta_1}{\sin j_1} = \frac{\alpha_2}{\sin \alpha_2} = \frac{\beta_2}{\sin j_2}\tag{3.22}$$

La ley de Snell también se aplica para ondas SH, porque este tipo de ondas satisfacen las ecuaciones de onda, por tanto el desplazamiento para la onda SH en el medio 1 está descrito por:

$$u_y(x, z, t) = B_1 \exp(i(\omega t - k_x x - k_x r_{\beta_1} z)) + B_2 \exp(i(\omega t - k_x x + k_x r_{\beta_1} z))\tag{3.23}$$

Donde  $B_1$  y  $B_2$  son las amplitudes de las ondas SH. Para la onda transmitida SH en el medio 2 se cumple que:

$$u_y(x, z, t) = B' \exp(i(\omega t - k_x x - k_x r_{\beta_2} z))\tag{3.24}$$

Obedeciendo a la ley de Snell para una onda incidente SH (Figura 3.1(b))

$$\frac{\beta_1}{\sin j_1} = \frac{\beta_2}{\sin j_2}\tag{3.25}$$

### 3.1.3. Capas planas de velocidad constante

Las ondas sísmicas penetran en la corteza y la parte superior del manto si las distancias epicentrales son menores de 500 km. La corteza se puede considerar que está formada por capas planas de velocidad de propagación constante. Si se considera el caso de una capa de velocidad  $v_1$  sobre un medio de velocidad  $v_2$  donde  $v_2 > v_1$  se pueden observar tres rayos posibles que van desde F y llegan a E (Figura 3.2).

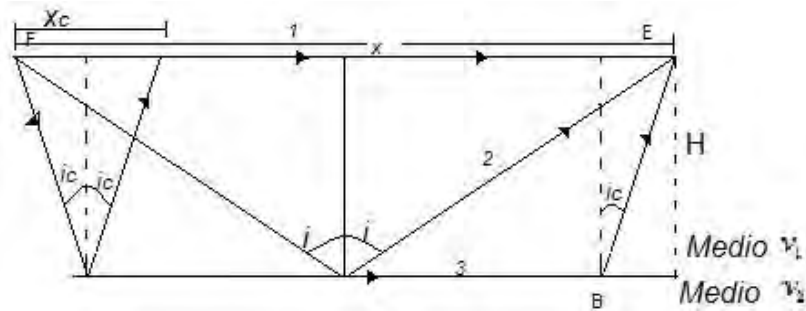


Figura 3.2: 1 Rayo directo, 2 Rayo refractado, 3 Rayo refractado crítico. (Fuente: Esta investigación)

De tal manera que el tiempo de recorrido para los 3 posibles recorridos de los rayos es:

1. Rayo directo, con tiempo de recorrido a una distancia  $x$

$$t_1 = \frac{x}{v_1} \quad (3.26)$$

2. Rayo reflejado en la base de la capa, con tiempo de recorrido a una distancia  $x$

$$t_2 = \frac{2}{v_1} \sqrt{H^2 + \frac{x^2}{4}} \quad (3.27)$$

3. Rayo refractado crítico a lo largo de la superficie superior del medio 2. El rayo se refracta a lo largo del medio de separación y vuelve a refractarse con el mismo ángulo crítico. El tiempo de recorrido del rayo sísmico a una distancia  $x$  es

$$t_3 = \frac{2H}{v_1 \cos i_c} + \frac{x - 2H \tan i_c}{v_2} \quad (3.28)$$

Ahora  $\sin i_c = \frac{v_1}{v_2}$  y si se reemplaza  $\cos i_c$  en la Ecuación 3.28 se obtiene:

$$t_3 = \frac{x}{v_2} + \frac{2H\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{v_1 v_2} \quad (3.29)$$

y de esta manera queda expresada la ecuación en términos de velocidades de la capa 1 y 2. A partir de los tiempos de llegada de las ondas reflejadas, se puede obtener parámetros como  $H$  y  $v_1$ . Elevando al cuadrado la ecuación de tiempo de arribo de el rayo reflejado (Ecuación 3.27):

$$t^2 = \frac{x^2}{v_1^2} + \frac{4H^2}{v_1^2} \quad (3.30)$$

## 3.2. Problema inverso

Teoría basada en el libro de Vargas et al., 2003 (Vargas J., 2003).

Un problema inverso es el conjunto de métodos usados para extraer información útil de nuestro entorno a partir de medidas físicas o datos. Contrasta con el problema directo, donde se predicen los datos a partir de los parámetros y un modelo.

La localización sísmica únicamente tiene cuatro parámetros y muchas más observaciones con imprecisiones propias de las variables físicas, de este modo una solución exacta sería imposible y se reconoce el problema como no lineal (Vargas J., 1994). Por esta razón se busca llegar a soluciones cercanas a las verdaderas mediante procesos iterativos. De manera general un problema inverso se puede expresar mediante la ecuación de condición

$$g(m) = d \quad (3.31)$$

Donde  $d$  representa los datos (tiempos de viaje),  $m$  son los parámetros (parámetros hipocentrales) y  $g(m)$  contiene información acerca del modelo (relación modelo y datos).

Al ser un proceso iterativo se propone un modelo inicial  $m_0^{est}$ , de tal manera que

$$m = m_0^{est} + \Delta m \quad (3.32)$$

Si el problema es no lineal entonces se hace la expansión en serie de Taylor despreciando términos de segundo orden y de orden superior

$$g(m) \simeq g(m_0^{est}) + G_0 \Delta m \quad (3.33)$$

$G_0$  es la matriz Jacobiana de derivadas parciales  $\frac{\partial g_i}{\partial m_j}$  evaluada en  $m_0^{est}$ . En esta ecuación los datos observados los contiene  $g(m)$  y los datos calculados  $g(m_0^{est})$ . Uno de los principales objetivos en el desarrollo del problema inverso es alcanzar las correcciones del modelo  $\Delta m$  el cual permita llegar a un ajuste adecuado de los datos observados, con un mínimo error. La Ecuación 3.33 se la puede escribir de la siguiente manera

$$E(m) = g(m) - g(m_0^{est}) - G_0 \Delta m \quad (3.34)$$

$E(m)$  representa el error y se realiza con el fin de minimizar. La solución se alcanza aplicando correcciones iterativas al modelo y lo que se busca es que después de las iteraciones el error sea el más pequeño.

$$m_i^{est} = m_{i-1}^{est} + \Delta m_{i-1} \quad (3.35)$$

Para la localización de un sismo con muchas observaciones y buen cubrimiento azimutal, una ubicación inicial del evento nos llevan a resultados bastante confiables. Las observaciones suelen no ser siempre suficientes o el modelo inicial puede tener importantes incertidumbres, es por eso que Kissling, (1994) [14] introdujo el modelo de velocidad mínimo modelo 1D, que es un modelo con correcciones por estación que conllevan al más pequeño error de localización posible.

Este modelo 1D es el resultado de una inversión simultanea iterativa de los parámetros hipocentrales, correcciones de las estaciones y las capas de velocidades.

Un típico problema inverso es la inversión de los tiempos de arribo de las ondas P y S. El residual de los arribos de las fases de las ondas se denota así:

$$\Delta T_{ij} = T_{ij}^{obs} - T_{ij}^{cal} \quad (3.36)$$

Donde  $i$  es la  $i$  –ésima observación en la estación  $i$  de un sismo  $j$  y  $T$  es el tiempo de arribo de las ondas que se expresa:

$$T_{ij} = t_j^0 + t_{ij}(x_j^0, y_j^0, z_j^0; v(s_i); x_i, y_i, z_i) \quad (3.37)$$

Llamando a  $t_j^0$  tiempo de origen del sismo  $j$ , desde la fuente  $(x_j^0, y_j^0, z_j^0)$  hasta la estación  $(x_i, y_i, z_i)$  y  $v(s_i)$  la velocidad a lo largo del camino  $s_i$  que es el resultado del trazado de rayos a través de un modelo de velocidad.

El problema es no lineal, y una manera de linealizarlo es realizar una aproximación en serie de Taylor de primer orden a los residuos relacionados con el tiempo de viaje entre la fuente y el receptor obteniendo:

$$\Delta T_{ij} \simeq \Delta T_{ij}^0 + \sum_{k=1}^3 \frac{\partial t_{ij}^s}{\partial x_{kj}^0} \Delta x_{kj}^0 + \sum_{l=1}^L \frac{\partial t_{ij}}{\partial v_l^0} \Delta v_l^0 \quad (3.38)$$

Donde la Ecuación 3.38 representa los incrementos en el tiempo de origen, parámetros hipocentrales y de velocidad. Linealizando las Ecuaciones 3.31 y 3.33 se puede obtener una relación que indica una parametrización discreta del modelo de velocidad con  $L$  parámetros.  $\Delta m$  contiene los incrementos hipocentrales y de velocidad

$$\Delta d \simeq G \Delta m \quad (3.39)$$

La ecuación anterior puede ser resuelta para  $\Delta m$  minimizando  $\Delta T$  por mínimos cuadrados. Por tanto la inversión directa de la Ecuación 3.39 requiere una solución numérica estable por lo que se busca una solución basada en el método de Lavenberg-Marquardt (Crosson, 1976) [22], que es una solución por Mínimos Cuadrados Amortiguados. Multiplicando ambos lados de la Ecuación 3.31 por  $(G^T G + e^2 I)^{-1} G^T$  denominada matriz generalizada de Lavenberg-Marquardt y  $e$  representa un parámetro de amortiguamiento, el lado derecho se hace la unidad y se tiene que

$$\Delta m \simeq (G^T G + e^2 I)^{-1} G^T \Delta d \quad (3.40)$$

Para interés computacional, se hace más cómodo separar los parámetros (Thurber C., 1992), en parámetro de velocidad y parámetros hipocentrales, obteniendo

$$\Delta d = H\Delta h + V\Delta v \quad (3.41)$$

Este procedimiento se lo realiza para cada evento sísmico. El modelo 1D que se deriva del programa Velest se fundamenta por capa de velocidades que representan el mejor promedio de pesos acumulados por rayos que atraviesan cada capa, y correcciones por estación que conducen al más pequeño error de localización posible dentro de un conjunto de eventos.

# Capítulo 4

## Metodología

Para realizar este proyecto se realizaron tres pasos: El primero corresponde a la selección de información a partir de bases del OVSP, el segundo consiste en la aplicación del método de Wadati para determinar la relación  $V_p/V_s$  y del método de Riznichenco para determinar el modelo inicial y tercero se realiza la inversión de los tiempos de arribo mediante Velest, y a partir de los resultados se realiza la re-localización de eventos.

### 4.1. Selección de datos

Los sismos con los que se inició el proceso de selección correspondieron a una gama de señales sísmicas ocasionadas por fracturamiento de material cortical (VT) en un periodo de 20 años (Febrero de 1989 a enero de 2009) para un total de 13010 eventos. Todos estos sismos fueron re-localizados mediante el programa Hypo71PC (Lee and Larh, 1993) y el modelo de velocidades utilizado para este proceso fue el NM (Figura 1.8). Para cada uno de estos sismos se obtuvo 39 soluciones de localización cuya diferencia fue la profundidad de ensayo que varió entre 0.2 y 19.7 km, con un paso de 0.5 km. De esta manera se obtuvo un total de 507.400 soluciones.

Se establecieron criterios para escoger de entre las 39 soluciones de localización de cada sismo, la mejor localización hipocentral. Con la colaboración de MSc Oscar Cadena Ibarra e Ing. Jhon Meneses se hizo necesario recurrir al diseño y codificación de algoritmos en los lenguajes de programación JAVA (Versión jre 7, Versión jdk 1.7 ), MatLab (Versión 2009) y el uso de una base de datos en el gestor PostgreSQL (Gestor de base de datos, Versión 8.4) para facilitar el trabajo de selección y recolección debido a la cantidad de información y la alta complejidad que representa la extracción de los datos de la bases existentes en el OVSP.



Se tuvo en cuenta los siguientes criterios para seleccionar las mejores localizaciones de entre las 39 posibilidades para cada sismo:

- Mayor número de fases P y S, que corresponden a los tiempos de arribo de las ondas P y S.
- Menor error cuadrático medio de los residuales de tiempo (RMS) que corresponde a la diferencia entre los tiempos observados y los tiempos calculados.
- Menores Errores Estándar en Profundidad y Epicentro (ERZ, ERH).
- Menor GAP, que corresponde al ángulo formado entre dos estaciones teniendo como vértice el epicentro del sismo.
- Mayor factor de correlación  $r$  al realizar regresión lineal mediante la técnica de Wadati.

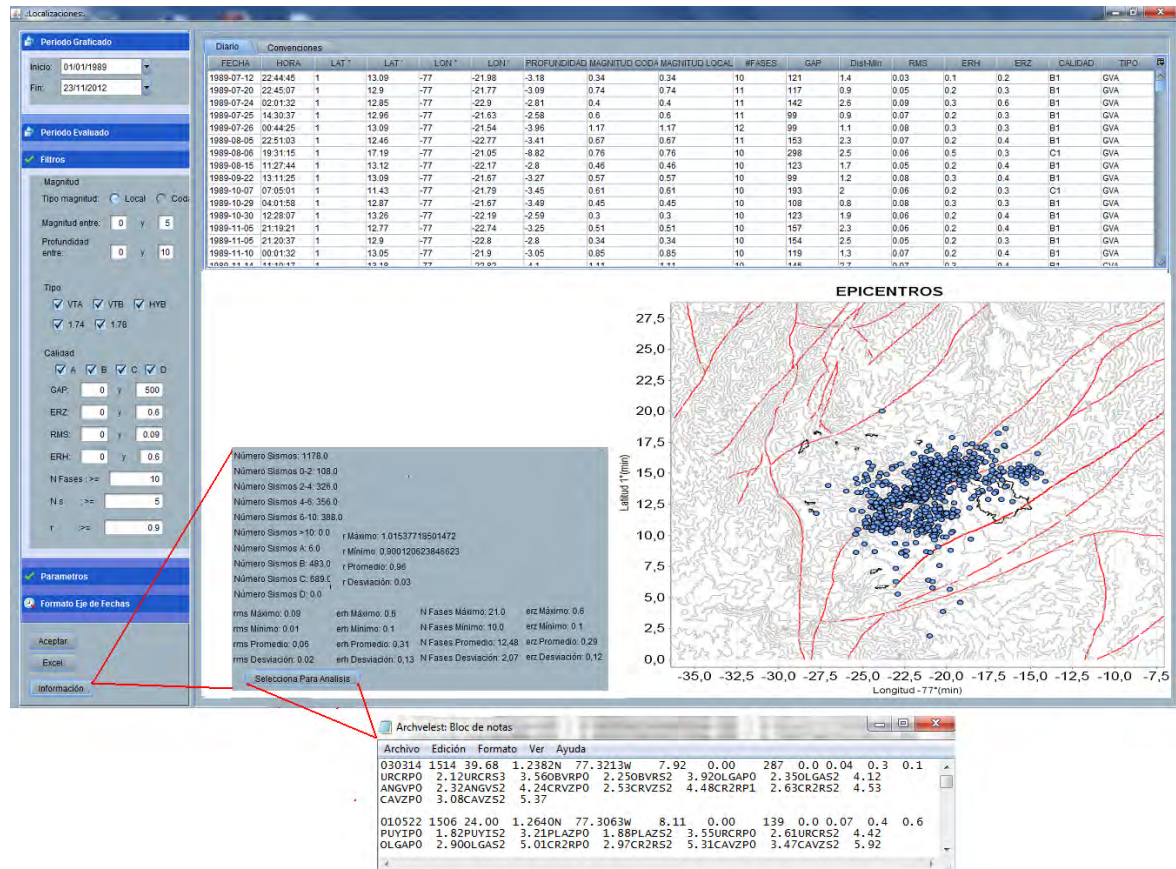
Con las condiciones anteriores la base de soluciones de localizaciones seleccionados correspondió a 12842 eventos; estos se ingresaron al sistema SAIIG (Sistema para la Integración Análisis e Interpretación de la información Generada por el Proceso de Vigilancia y Monitoreo del VG), programa que facilitó extraer una selección de las fases de los sismos que servirán de entrada al programa de inversión Velest. SAIIG permitió restringir y asignar valores límites a RMS, ERZ, ERH, N° Total de Fases, N° Fases S, GAP y  $r$  (Tabla 4.1). Por otro lado; teniendo en cuenta que después de los 10 km de profundidad, la cantidad de sismos tipo VT se hace escasa, se optó por escoger dos conjuntos de sismos: El primer conjunto conformado por sismos con profundidades entre 0 km y 10 km (Figura 4.1 (a)) y el segundo conjunto con sismos entre 10.1 km y 30 km (Figura 4.1 (b)). Lo anterior se hizo para garantizar una mayor cobertura en las zonas profundas del volcán.

Tabla 4.1: Parámetros de selección para extraer los datos a partir de SAIIG. (Fuente: Esta investigación)

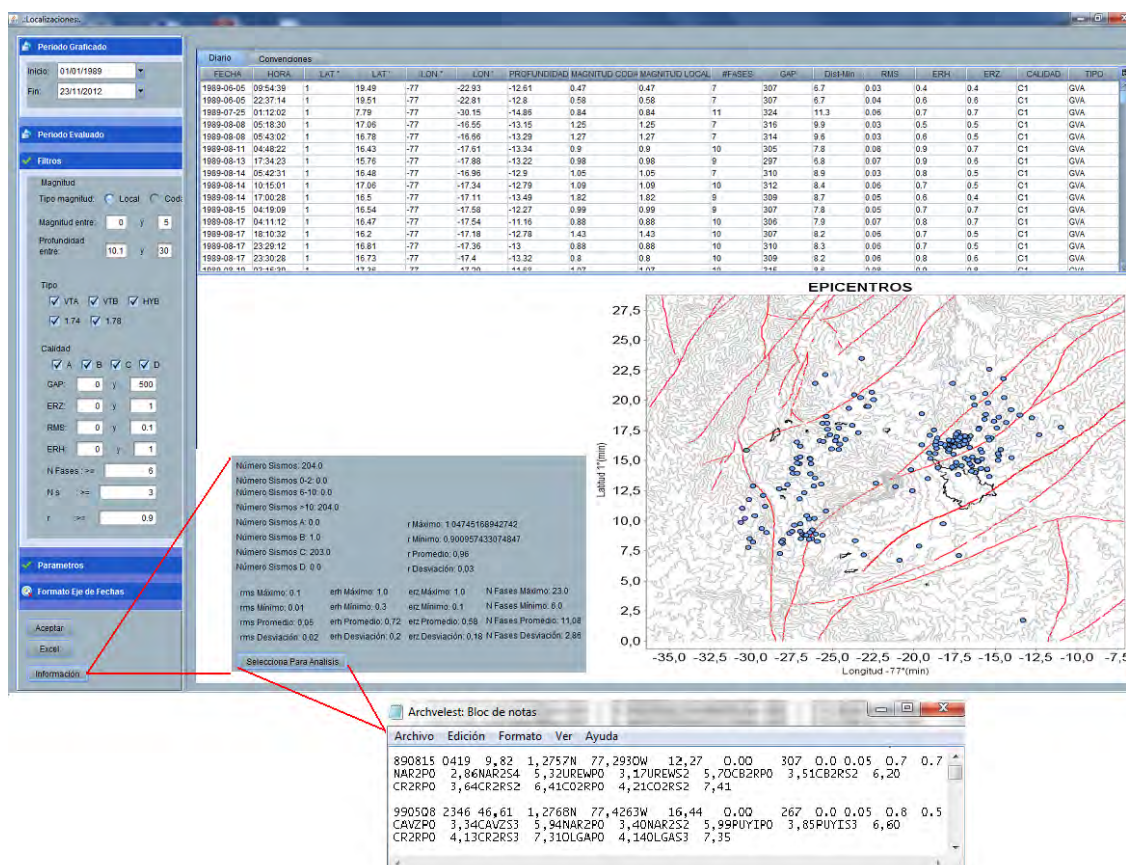
<b>Profundidad</b> (Km)	<b><math>N^o</math> Fases P</b> ( $\geq$ )	<b><math>N^o</math> Fases S</b> ( $\geq$ )	<b>RMS</b> (s)	<b>ERH-ERZ</b> (Km)	<b>GAP</b> ( $^{\circ}$ )	<b>r (Wadati)</b> ( $\geq$ )
0-10	10	5	0-0.09	0-0.6	0-360	0.9
10.1-30	6	3	0-0.10	0-1.0	0-360	0.9

El primer grupo tiene parámetros más restringidos porque hay gran cantidad de eventos sísmicos en profundidad menor de 10 km y es donde se presentan con mayor frecuencia. La totalidad es de 1078 sismos.

En el segundo grupo de sismos los parámetros fueron menos rigurosos debido a que a profundidades mayores de 10 km los sismos VT se hacen escasos. La totalidad de sismos extraídos corresponde a 204.



(a)



(b)

Figura 4.1: Pantallas del programa SAIIG, en las pequeñas ventanas (parte izquierda) se introducen los valores de los parámetros límites de selección, cuando se pulsa aceptar inmediatamente aparece información y la gráfica de la cantidad de sismos que cumplen las condiciones. Después en el botón Información se puede obtener información detallada acerca del proceso, y en Selecciona para análisis se obtiene el archivo final de salida de la totalidad de sismos para (a) Profundidad 0-10 km, y (b) Profundidad 10.1-30 km. (Fuente: Esta Investigación)

## 4.2. Aplicación del método de Wadati y Ryznichenko para determinar la relación $V_p/V_s$ y modelo inicial

Para cada cada región de interés es importante determinar un valor promedio de la relación  $V_p/V_s$  que representa la proporcionalidad que hay entre las velocidades de las ondas P y S. Esta relación no cambia con el paso de la profundidad y es fundamental para el cálculo del modelo unidimensional de velocidades y para calcular parámetros elásticos del medio. De acuerdo a (Molina C., 2001), para una determinada estructura de velocidades en la que la relación  $V_p/V_s$  es constante existen dos métodos para determinar la relación y una tendencia aproximada de capas con velocidades:

La técnica de Wadati expresada por la siguiente ecuación:

$$T_s - T_p = \left(\frac{V_p}{V_s} - 1\right)(T_p - T_o) \quad (4.1)$$

Siendo  $T_o$  el tiempo de origen,  $V_p$  y  $V_s$  son las velocidades de las ondas P y S respectivamente. Graficando  $(T_s - T_p)$  vs  $T_p$  de un evento sísmico para cada una de las estaciones dará una nube de puntos que pueden ser ajustados a una línea recta mediante mínimos cuadrados. La intersección de dicha recta con el eje  $T_p$  dará el  $T_o$  y la pendiente obtenida en función de la relación  $V_p/V_s$ .

La técnica de Ryznichenko se realiza por separado para las ondas P y S y relaciona los tiempos de arribo con la distancia epicentral, encontrando valores promedios de las velocidades de la onda P y S y la profundidad focal.

Para la onda P

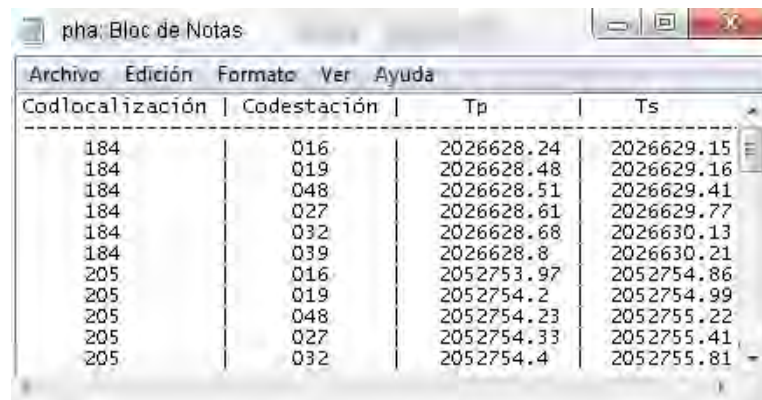
$$(T_p - T_o)^2 = \frac{Z^2}{V_p^2} + \frac{X^2}{V_p^2} \quad (4.2)$$

Para la onda S

$$(T_s - T_o)^2 = \frac{Z^2}{V_s^2} + \frac{X^2}{V_s^2} \quad (4.3)$$

Graficando  $(T_p - T_o)$  vs  $X$  para cada sismo en cada una de las estaciones y haciendo los ajustes de la curva por regresión se puede obtener de la pendiente un valor estimativo promedio de la velocidad  $V_p$  y del intercepto un valor estimativo de la profundidad focal  $Z$ . Lo mismo para la onda S.

Para aplicar la técnica de Wadati (Ecuación 4.1) se utilizó los tiempos de arribo  $T_p$  y  $T_s$  para cada uno de los sismos en todas las estaciones. El procedimiento se realizó mediante una rutina en MatLab (Apéndice A.1) diseñada para calcular la pendiente  $m$  e intercepto  $b$  al realizar la regresión lineal y el archivo de entrada (Figura 4.2) corresponde a las fases de la totalidad de eventos extraído inicialmente de la base de datos.

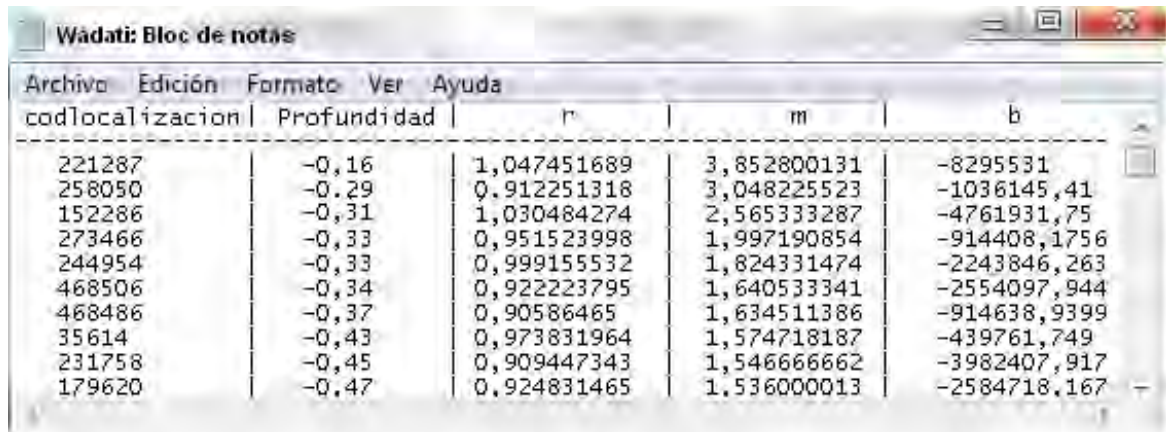


Codlocalización	Codestación	Tp	Ts
184	016	2026628.24	2026629.15
184	019	2026628.48	2026629.16
184	048	2026628.51	2026629.41
184	027	2026628.61	2026629.77
184	032	2026628.68	2026630.13
184	039	2026628.8	2026630.21
205	016	2052753.97	2052754.86
205	019	2052754.2	2052754.99
205	048	2052754.23	2052755.22
205	027	2052754.33	2052755.41
205	032	2052754.4	2052755.81

Figura 4.2: Parte del archivo de entrada para la rutina en MatLab que contiene las fases de la onda P y S de 2 eventos sísmicos. (Fuente: Esta investigación)

Teniendo ya una selección de sismos de 1382 de muy buena calidad se procedió a calcular el valor de la relación  $V_p/V_s$ . Para esta cantidad se extrajeron dos archivos (formato de texto plano) de los resultados al aplicar la rutina, uno para 0-10 km y otro para 10.1-30 km que contienen la siguiente información: el código de localización, profundidad  $Z$ ,  $m$ ,  $b$  y  $r$  (Figura 4.3), todos estos parámetros cumpliendo las características expuestas en la Tabla 4.1. Posteriormente se realiza el cálculo de la relación  $V_p/V_s$  a partir de la pendiente y  $T_o$  del intercepto de acuerdo a la Ecuación 4.1 (Algunos resultados en Apéndice A.1; Tabla A.1).





codlocalizacion	Profundidad	r	m	b
221287	-0,16	1,047451689	3,852800131	-8295531
258050	-0,29	0,912251318	3,048225523	-1036145,41
152286	-0,31	1,030484274	2,565333287	-4761931,75
273466	-0,33	0,951523998	1,997190854	-914408,1756
244954	-0,33	0,999155532	1,824331474	-2243846,263
468506	-0,34	0,922223795	1,640533341	-2554097,944
468486	-0,37	0,90586465	1,634511386	-914638,9399
35614	-0,43	0,973831964	1,574718187	-439761,749
231758	-0,45	0,909447343	1,546666662	-3982407,917
179620	-0,47	0,924831465	1,536000013	-2584718,167

Figura 4.3: Parte del archivo de salida de MatLab en el que se observa características de 10 eventos sísmicos. (Fuente: Esta investigación)

Para aplicar el método de Riznichenco se utilizaron los mismos eventos. Para este proceso también se utilizó MatLab (Apéndice A.1). Se realizó por separado para onda S y onda P y se corrió cada una de las rutinas para los dos grupos de sismos. Mediante el algoritmo se calculó la pendiente  $m$ , intercepto  $b$  y factor de correlación realizando regresión lineal por método de mínimos cuadrados de acuerdo a la Ecuación 4.2 para onda P y Ecuación 4.3 para onda S.

Los archivos de entrada extraídos contienen 6 columnas: Código de localización, código de la estación (asignada por el OVSP a cada una de las estaciones), profundidad  $Z$  (km),  $T_{so}$  (diferencia entre  $T_s$  y  $T_o$  este último tomado del registro de Hypo71PC),  $T_{po}$  (diferencia entre  $T_p$  y  $T_o$ ), distancia epicentral  $X$  de la fuente a la estación.

Para el grupo de sismos de 0-10 km, el archivo de entrada tiene 1078 sismos, el número de líneas de cada uno ellos se repite de acuerdo al número de estaciones donde se registró el evento sísmico, teniendo un total de 7787 filas (Figura 4.4).

codlocalización	codestación	profundidadneg	tpo	tso	distepi
1430	CB2R	-4.07	0.909999999999997	1.7	0.78610977969651
1430	CO2R	-4.07	2.92	4.99	11.7884326010766
1430	CR2R	-4.07	1.52	2.77	3.65241911115428
1430	OLGA	-4.07	1.75	2.8	4.94554909834209
1430	URCR	-4.07	1.38	2.45	4.13920580773776
2078	CB2R	-5.37	2.4	4.12	8.2107988468288
2078	CON4	-5.37	2.76	4.8	11.1413058256566
2078	CR2R	-5.37	2.1	3.74	5.88191988728096
2078	NAR2	-5.37	1.13	1.93	1.65841413249074
2078	URCR	-5.37	1.83	3.29	5.01386463829412

Figura 4.4: Segmento del archivo de entrada en el que se observa que hay características de 2 eventos sísmicos. (Fuente: Esta investigación)

El grupo de 10.1 km-30 km tiene una cantidad de 204 eventos y el archivo de entrada tiene estructura similar al archivo del grupo anterior y un total de 1139 filas. Después de correr la rutina se obtuvieron 4 archivos de salida con los respectivos resultados (Figura 4.5). Dos para cada grupo de sismos.

codlocalización	m	b	r	r2
1430	5.2808600143642102e-002	1.2719284638297559e+000	9.9077254073483134e-001	9.8163022747415307e-001
2078	4.9016312665062026e-002	1.9923369180421511e+000	9.6272500714534703e-001	9.2683943938300850e-001
2157	4.1958491375972996e-002	6.9528977146854409e-001	9.9110615840913441e-001	9.8229141723651225e-001
2682	-2.4685327921721476e+000	3.5108933621807319e+003	-9.7905821349787836e-001	9.5855498541765716e-001
3378	9.5833928883225394e-002	1.1707093076275117e+000	7.1856440851653436e-001	5.1633480918671693e-001
4790	7.2659166383110541e-002	1.0034362973358051e+000	9.0909557132356100e-001	8.2645475780011179e-001
5247	6.1183368918025977e-002	1.4564267206990682e+000	9.4928582244900916e-001	9.0114357270269174e-001
5946	5.3620747722158565e-002	2.0023591349396490e+000	9.8493520939321599e-001	9.7009736670245827e-001
6556	2.2968219134801952e-002	1.1886533072540733e+000	3.7853123016177942e-001	1.4328589220779003e-001
7281	3.6497732306702370e-002	5.5280746624902042e+000	9.7662151417483734e-001	9.5378958194915198e-001

Figura 4.5: Segmento del archivo resultado de MatLab, pertenece a los resultados de la onda P para el grupo de profundidad entre 0 - 10 km. (Fuente: Esta investigación)

De los 4 archivos se calcula el estimativo de las  $V_p$ ,  $V_s$ , y  $Z$  a partir de los valores de  $m$  y  $b$  (Algunos de los valores en Apendice A.1; Tabla A.2, Tabla A.3). Para obtener un modelo de capas y velocidades se utilizaron los resultados anteriores. Se generaron dos diagramas, uno de  $V_p$  vs  $Z$  y otro  $V_s$  vs  $Z$  con el fin determinar si existe o no una tendencia de las velocidades respecto a la profundidad. Se aplicó regresión lineal para cada 40 eventos con un paso de 5; es decir, se seleccionaron los primeros 40 datos del primero hasta el evento 40 y a este grupo



se le agregó línea de tendencia. Luego se seleccionó un segundo grupo pero a partir del evento 5 hasta 45 y se realizó el mismo proceso; así sucesivamente llevando el orden consecutivo hasta llegar al final de la cantidad de sismos, obteniendo finalmente 255 series para onda P y 240 para onda S (Figura 5.4).

### **4.3. Inversión de los tiempos de arribo y Modelos de Velocidad final**

La herramienta usada en este estudio fue el programa Velest (Versión 3.1, by Kissling et al., 1995). Programa que trabaja realizando trazado de rayos para determinar el problema hacia delante de la fuente al receptor. Calcula tiempos de ondas directas, refractadas y reflejadas que pasan por un modelo unidimensional. Después; tanto para las localizaciones como para un nuevo modelo ajustado, calcula el problema inverso mediante la solución amortiguada de mínimos cuadrados. Debido a que el problema inverso es no-lineal se haya por iteraciones del problema directo y el inverso hasta converger en un error deseado (Kissling E., 1994).

El programa VELEST está codificado en FORTRAN 77. Escrito inicialmente por Ellsworth W., (1977) y Roecker S., (1981) para estudios de tomografía sísmica y modificado por Thurber, (1981) quien implementó modelo de trazado de rayos. Velest no calcula ni diseña la geometría de las capas, sólo cambia el valor de la velocidad para las capas introducidas en el modelo inicial. Para el cálculo de un modelo ID requiere de múltiples corridas de Velest para seleccionar y evaluar los parámetros de control para el problema. Velest como programa aplicado a un problema no lineal puede ser resuelto en dos modos: simultaneo (Figura 4.6) el cual resuelve el problema del acople hipocentros-modelo de velocidades para eventos sísmicos y explosiones y modo simple que sólo realiza la localización de sismos (Kissling E., 1994). Para realizar la inversión; Velest depende principalmente de archivos de entrada que correspondieron a las fases de los sismos, coordenadas de las estaciones que conforman la Red de Vigilancia del VG, modelo inicial y un gran número de parámetros de

control que fueron modificados a lo largo del proceso. El procedimiento se realizó para el modelo inicial obtenido mediante las técnicas de Wadati y Riznichenco, también se aplicó a otros tres modelos iniciales ya existentes en el OVSP.

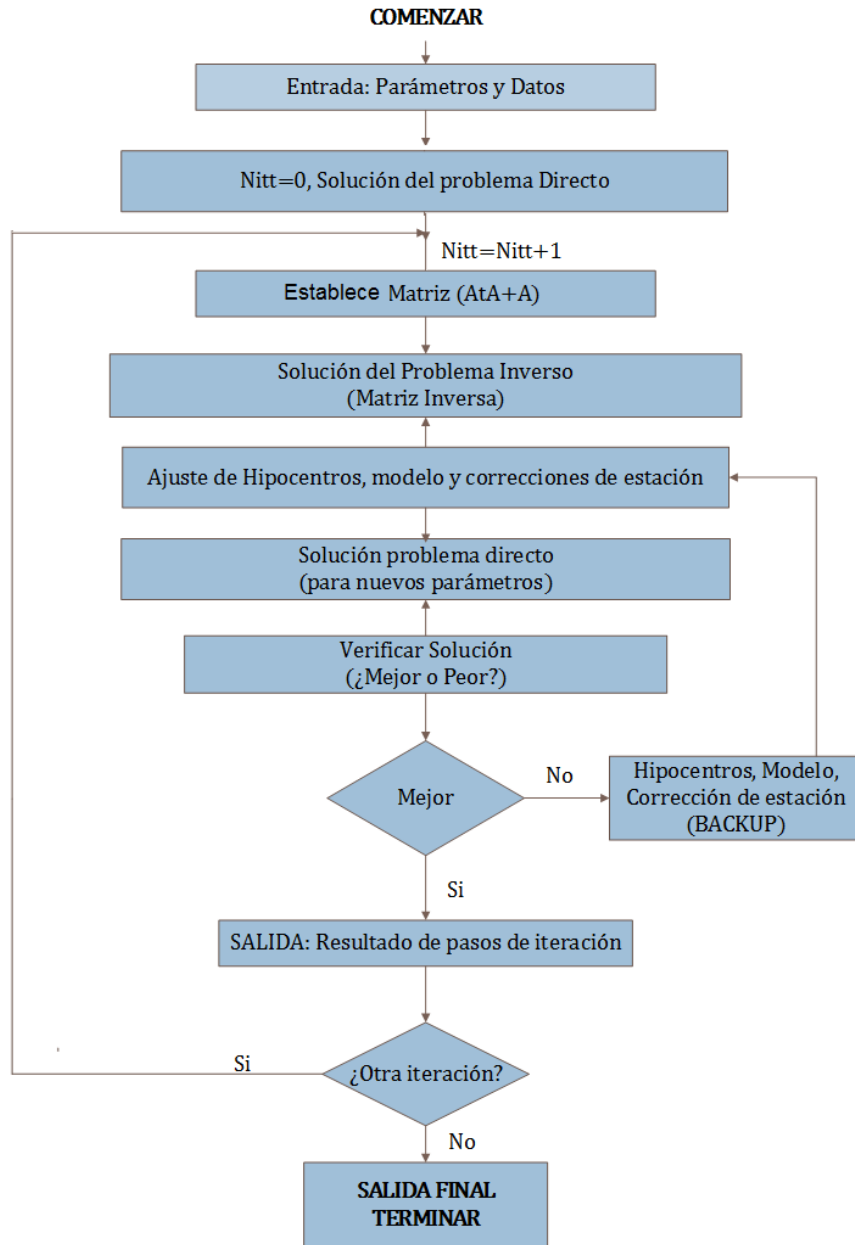
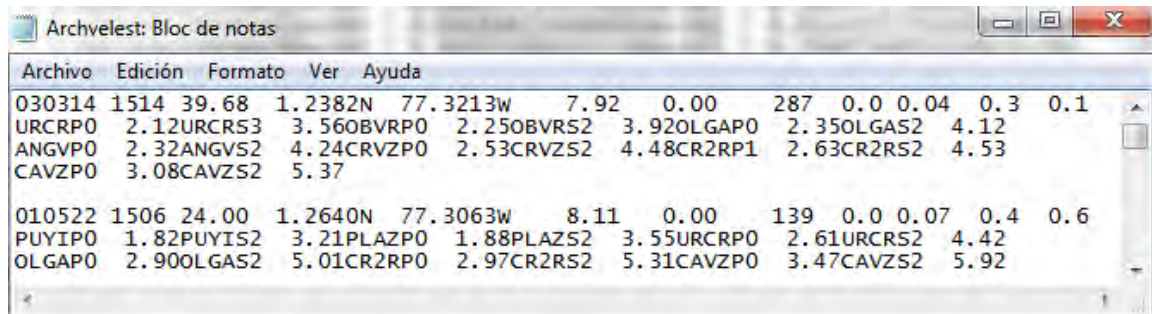


Figura 4.6: Diagrama de flujo del proceso de Velest en modo simultáneo. (Fuente: Manual Velest Seismology)

### 4.3.1. Archivo de sismos de entrada (formato .cnv)

Contiene los 1382 eventos sísmicos extraídos a partir de Hypo71PC. Cada sismo se separa con un espacio en blanco. Para cada fase está el nombre de la estación, el tipo de fase, el peso de observación y el tiempo de observación (seg) (Figura 4.7).

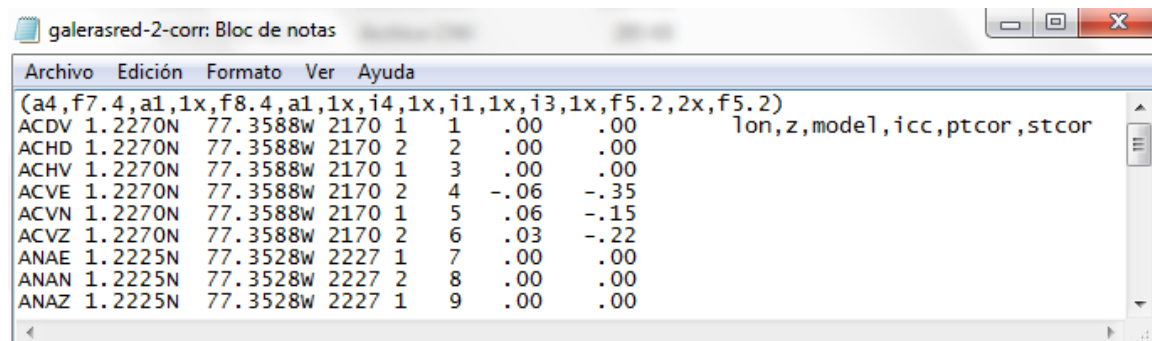


Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
030314	1514	39.68	1.2382N	77.3213W
URCRP0	2.12	URCRS3	3.56	OBVRP0
ANGVP0	2.32	ANGVS2	4.24	CRVZP0
CAVZP0	3.08	CAVZS2	5.37	
010522	1506	24.00	1.2640N	77.3063W
PUYIP0	1.82	PUYIS2	3.21	PLAZP0
OLGAP0	2.90	OLGAS2	5.01	CR2RP0

Figura 4.7: Segmento de archivo ArchVelest.cnv, utilizado para los 4 procedimientos. (Fuente: Esta investigación)

### 4.3.2. Archivo de lista de estaciones (formato .sta)

Contiene el nombre de las estaciones que conforma la Red de Vigilancia Sísmica del VG, delays (retardo de llegada de las ondas a un mismo nivel de referencia, teniendo en cuenta que las estaciones no están a la misma altura) en la estación para la onda S y la onda P, número definido de modelos de velocidad (P y S) correspondiente con cada estación (Figura 4.8).



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
(a4,f7.4,a1,1x,f8.4,a1,1x,i4,1x,i1,1x,i3,1x,f5.2,2x,f5.2)				
ACDV	1.2270N	77.3588W	2170	1
ACHD	1.2270N	77.3588W	2170	2
ACHV	1.2270N	77.3588W	2170	3
ACVE	1.2270N	77.3588W	2170	4
ACVN	1.2270N	77.3588W	2170	5
ACVZ	1.2270N	77.3588W	2170	6
ANAE	1.2225N	77.3528W	2227	7
ANAN	1.2225N	77.3528W	2227	8
ANAZ	1.2225N	77.3528W	2227	9

Figura 4.8: Segmento de archivo de entrada galerasred-2-corr.sta de las estaciones, utilizado para todos los 4 procedimientos. (Fuente: Esta investigación)

### 4.3.3. Archivo modelo inicial (formato .mod)

Contiene el modelo inicial de velocidades para la onda S y P por separado, a cada velocidad le corresponde un vdamp (parámetro de amortiguamiento de la velocidad), número determinado de capas, estación de referencia ANGV (Figura 4.9).

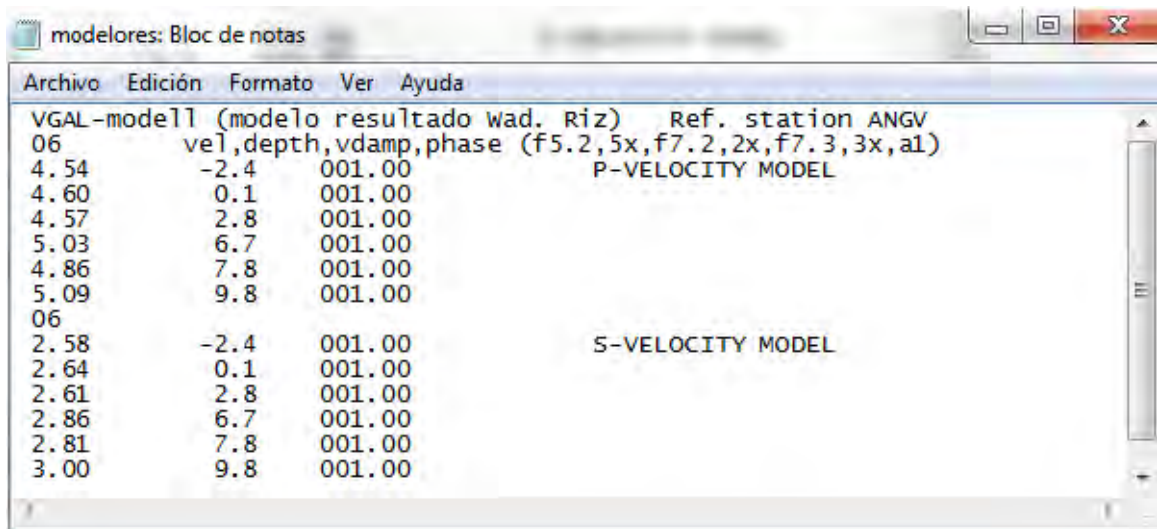


Figura 4.9: Archivo modelores.mod del modelo inicial VGAL. (Fuente: Esta investigación)

La Tabla 4.2 describe los valores de los otros tres modelos iniciales utilizados para el proceso de inversión:

Tabla 4.2: Modelo G (izquierda), Modelo NM (centro), Modelo WR (derecha). (Fuente: OVSP)

Modelo G $V_p/V_s=1.74$			Modelo NM $V_p/V_s=1.78$			Modelo WR $V_p/V_s=1.74$		
Altura (Km)	$V_p$ (Km/s)	$V_s$ (Km/s)	Altura (Km)	$V_p$ (Km/s)	$V_s$ (Km/s)	Altura (Km)	$V_p$ (Km/s)	$V_s$ (Km/s)
4.2	3.15	1.81	4.2	3.5	1.97	4.2	3.9	2.24
1.8	3.1	1.78	2.2	3.7	2.07	1.8	4.7	2.7
-0.4	3.82	2.20	0.2	4	2.25	-0.4	4.3	2.47
-3.4	4.8	2.75	-3.8	6	3.37	-3.4	4.75	2.73
-5.4	5.3	3.05	-21.8	6.8	3.82	-5.4	5	2.87
-13.4	6.3	3.62	-39.8	8	4.49	-13.4	6.3	3.62

#### 4.3.4. Archivos Parámetros de Control (formato .cmn)

Este archivo recopila toda la información requerida para el proceso. Todos los parámetros de control fueron asignados y ajustados teniendo en cuenta la ubicación del VG, características de los eventos sísmicos, parámetros de amortiguamiento, archivos de entrada nombrados anteriormente (Figura 4.10). Explicación de cada parámetro en Apéndice A.1, Tabla A.4.

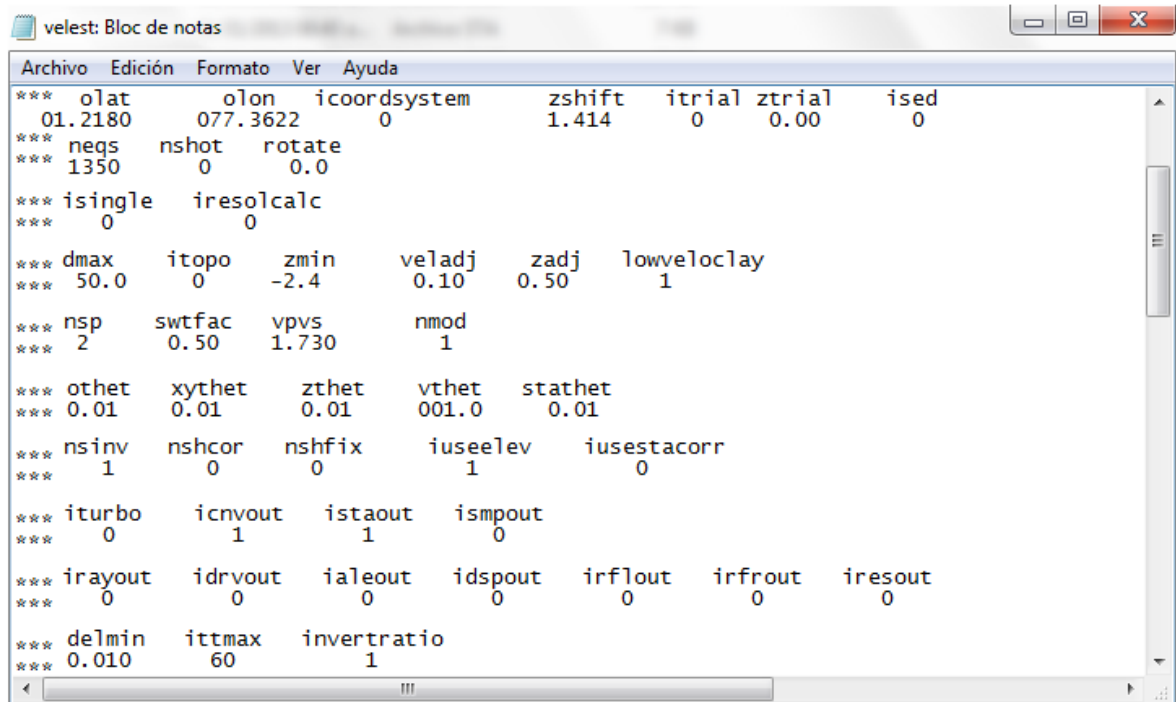


Figura 4.10: Segmento del archivo Velest.cmn de los parámetros de control para el modelo VGal. Para los diferentes modelos se tiene la misma estructura. El único parámetro que cambia y diferencia los archivos parámetros de control es el valor de  $V_p/V_s$ . (Fuente: Esta investigación)

Teniendo todos los archivos de entrada con la información requerida, se ejecutó Velest.exe. El proceso se realizó para cada modelo por separado. Cada ejecución de Velest tardó aproximadamente de 6 a 8 horas en realizar la inversión, este tiempo dependió del

modelo inicial, número de iteraciones, cantidad de sismos, en algunas iteraciones se ajustó nuevamente los hipocentros y modelo porque los resultados son erróneos y también influyó la capacidad de la máquina donde se realizó. En el proyecto se trabajó con modo simultáneo (Figura 4.6).

Finalizada la ejecución del programa Velest, para cada modelo inicial se obtuvo como salida el archivo Gmodelv.OUT en el que se recopilan todos los resultados. Este archivo muestra una lista con información de los parámetros de control. Posteriormente enumera el modelo inicial, lista de estaciones y los eventos sísmicos. Seguido de esto empieza la iteración 0, que es un breve proceso donde sólo se obtienen los residuos de las observaciones iniciales y el RMS residual. Cada iteración comenzó con un resumen de los parámetros de control. Antes de que los valores resultantes de RMS y otros estimadores estadísticos se den; Velest analiza si la varianza de los datos reduce, si en la nueva iteración no mejora la solución anterior, vuelve a realizar el proceso hasta que los errores disminuyan con respecto al anterior. Enseguida se ajustan las localizaciones y el modelo de velocidad para onda P y S.

Del archivo Gmodelv.OUT que se obtiene para cada ejecución de Velest, se extrajo la información de RMS residual y modelo de onda P para cada iteración. Se elaboraron las gráficas de RMS residual vs Número de iteraciones (Figura 5.5) para detectar visualmente la tendencia del modelo y el valor de los menores RMS con respecto a las iteraciones (Información de valores de modelos de velocidad y RMS residual en la Tabla 5.3).

Se escoge el mejor modelo final entre los cuatro obtenidos utilizando el criterio del menor RMS residual o cuando su curva se torna asintótica a medida que transcurren las iteraciones. Finalmente con este modelo se re-localizó los 1382 eventos sísmicos usando el procedimiento descrito en la Sección 4.1. Se realizaron gráficas mediante rutinas generadas en MatLab (Apendice A.3) para comparar los resultados del nuevo modelo respecto al modelo NM (Figura 5.7). El archivo de entrada contiene información de las coordenadas de las localizaciones con los dos modelos, RMS, Error estándar en el epicentro (ERH) y Error estándar en la profundidad (ERZ).

# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Relación $V_p/V_s$

Graficando  $T_s$  vs  $T_p$  de acuerdo a la Ecuación 4.1 para uno de los eventos en cada una de las estaciones se obtiene la siguiente correspondencia lineal.

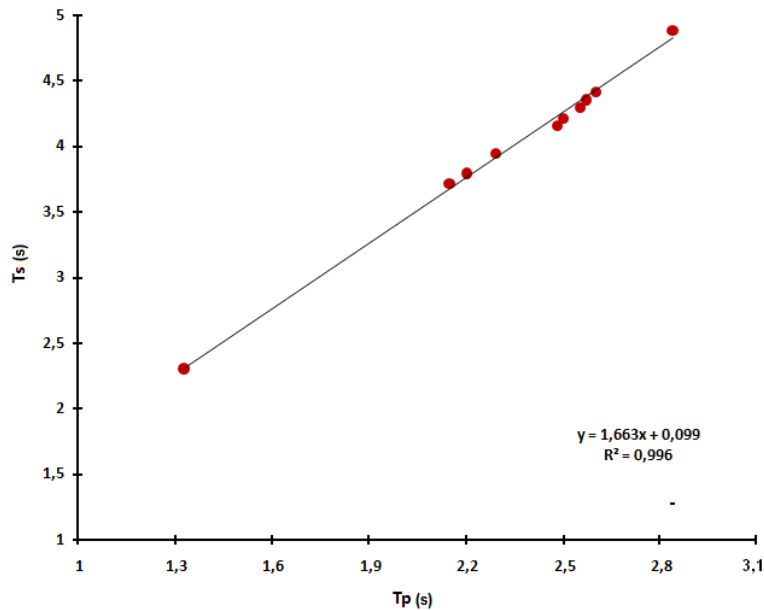


Figura 5.1: Diagrama de Wadati para el sismo tipo VT ocurrido el 25 de Marzo de 2002. Los círculos rojos corresponden a las lecturas de los tiempos de llegada de las fases P y S en las estaciones Nariño, Urcunina, Olga, Anganoy, Cráter banda ancha componente vertical, Cráter corto periodo, Obonuco, Calabozo, Coba Negra, Loew arribando en ese orden. La línea negra corresponde al mejor ajuste con un coeficiente de correlación de 0.99 y un valor de la pendiente ( $V_p/V_s$ ) de 1.67. (Fuente: Esta investigación)



Se construyó un diagrama de frecuencias de  $V_p/V_s$  (Figura 5.2) y como se puede observar hay una distribución de carácter multimodal presentando 3 picos máximos; uno alrededor de  $V_p/V_s$  de 1.75, el que sigue de 2.5 y otro de 2.65. Debido a que el número de eventos alrededor del segundo y tercer máximo se alejan del valor central y no están por debajo de la curva gaussiana, dichos datos se descartan para hallar la media aritmética correspondiente. De manera más precisa, no se encuentran en el intervalo de dos veces la desviación estándar (1.26-2.25) respecto a la media 1.75.

El pico principal corresponde a 154 eventos sísmicos y coincide con  $V_p/V_s$  de 1.75. Para calcular el valor promedio final, se tomaron los eventos que se encontraban dentro del intervalo de dos desviaciones estándar alrededor de la media. Lo anterior conduce a un intervalo de confianza del 95 %. Así, la cantidad de sismos se redujo a 1336. Finalmente el valor de la relación de velocidades de ondas S y ondas P es de 1.73.

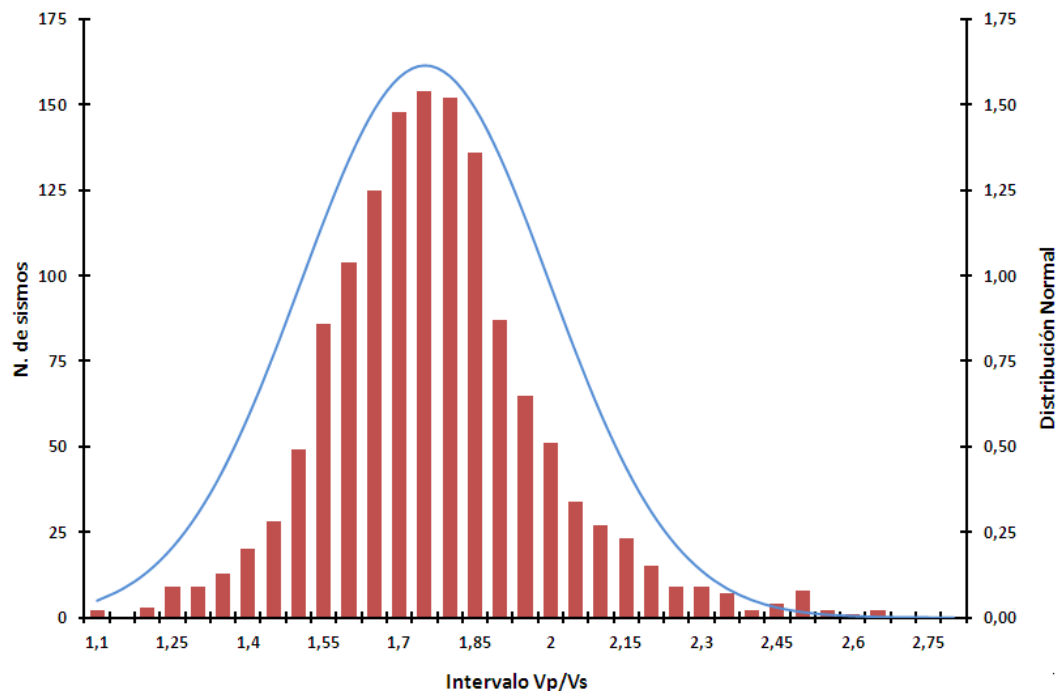


Figura 5.2: Histograma de frecuencias donde las columnas representan el valor de la frecuencia de eventos en cada intervalo y la curva azul es una representación de la distribución normal. (Fuente: Esta investigación)

La relación  $V_p/V_s$  tiene un comportamiento relativamente estable a lo largo de la profundidad (Figura 5.3, panel izquierdo). La mayor concentración de datos se hace alrededor de 1.73. Realizando un diagrama de  $V_p$  vs  $V_s$  obtenidos de la técnica de Riznichenco (Figura 5.3, panel derecho), se obtiene también un estimado de la relación  $V_p/V_s$  a partir de la pendiente. Su comportamiento es aproximadamente lineal, con un factor de correlación de 0.787, no muy confiable por lo que este valor se lo descarta para valor de referencia. En la Tabla 5.1 se consignan algunos valores de las medidas de tendencia central calculados para determinar el valor de la relación  $V_p/V_s$  mediante la técnica de Wadati.

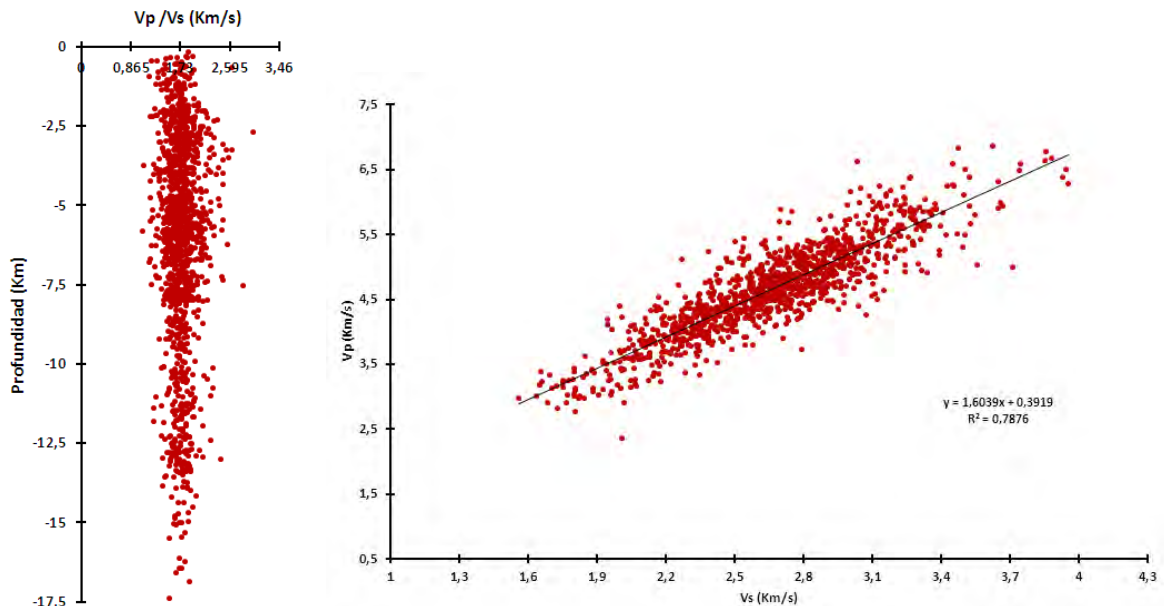


Figura 5.3: Corresponde a relación  $V_p/V_s$  calculado con la técnica de Wadati con respecto a la profundidad (panel derecho). Los puntos rojos corresponden a 1336 eventos sísmicos de profundidad 0-30 km. Se toma de sistema de referencia la cima del VG con el valor de 0 en el eje vertical. Velocidad de onda P vs Velocidad de onda S estimadas a partir de la técnica de Riznichenco (panel izquierdo). Los puntos rojos representan cada uno de los sismos. (Fuente: Esta investigación)

Tabla 5.1: Medidas de tendencia que se obtuvieron en el procedimiento para encontrar la relación  $V_p/V_s$  mediante el método de Wadati. (Fuente: Esta investigación)

<b>Medidas de Tendencia Central</b>	
<b>Número inicial de eventos</b>	1382
<b>Número final de eventos</b>	1336
<b>Valor promedio inicial (1388)</b>	1.75
<b>Valor promedio final (1336)</b>	1.73
<b>Desviación Estandar</b>	0.19
<b>Intervalo de Confianza 95 %</b>	0.01
<b>Varianza</b>	0.03
$V_p/V_s$ min	1.07
$V_p/V_s$ max	4.04
<b>Rango</b>	2.97
$N^\circ$ de intervalos	36
<b>Amplitud intervalo</b>	0.05

## 5.2. Modelo inicial

Los valores de  $V_p$  y  $V_s$  calculados mediante la técnica de Riznichenco permiten distinguir un modelo de velocidades unidimensional denominado VGal compuesto fundamentalmente por 6 capas.

En la Figura 5.4 se observa que en el intervalo de profundidad entre 0-2.1km la curva se torna ascendente en las velocidades. A partir de 2.1 km hasta 5 km la velocidad disminuye. En adelante hasta los 8.9 km la forma de la curva se inclina nuevamente hacia la derecha y nuevamente se observa hasta los 10 km que bajan los valores de velocidad. En adelante hasta los 12 km vuelve a aumentar y posteriormente la tendencia se torna similar.

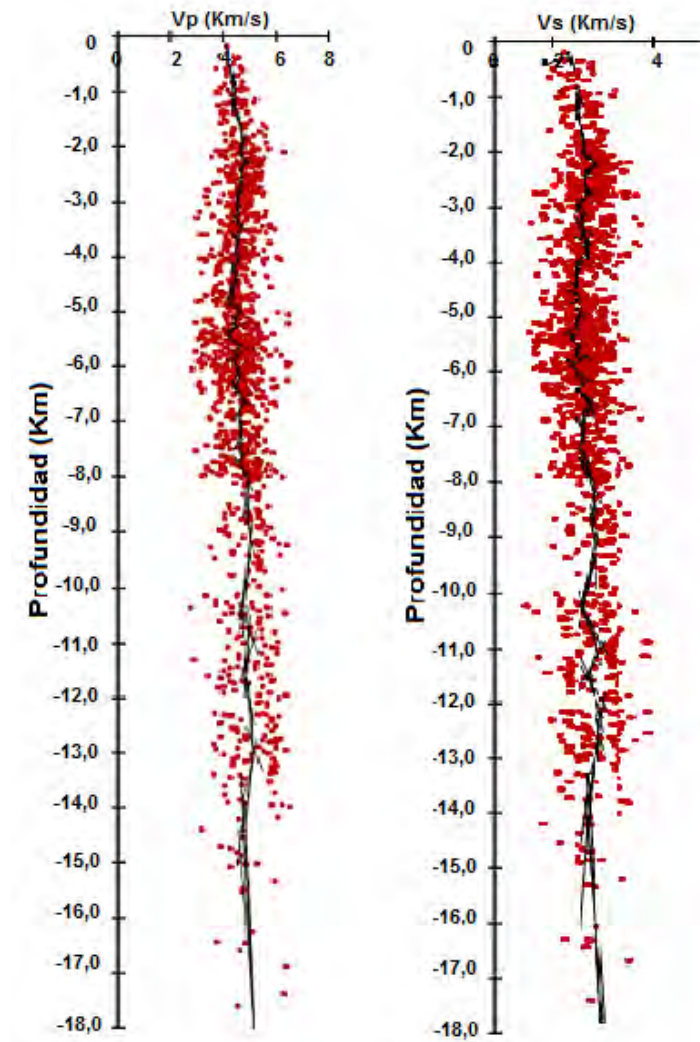


Figura 5.4: Tendencia de profundidades con  $V_p$  (izquierda) y  $V_s$  (derecha). La línea negra corresponde a las regresiones lineales realizadas a las 255 series para la onda P y 240 series para la onda S. (Fuente: Esta investigación)

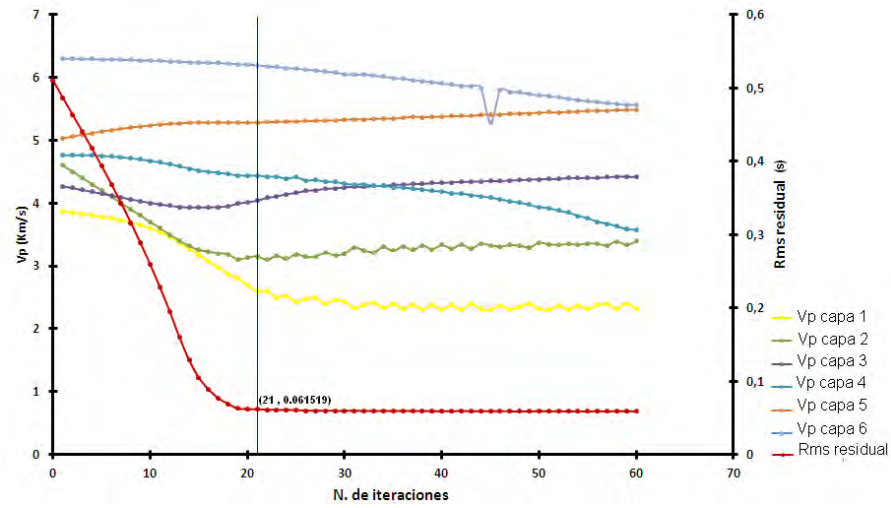
Para determinar el valor de las velocidades se tomó los valores existentes en cada cambio, estos valores se seleccionan depurando los datos que no se encuentran en el intervalo que resulta al sumar y restar dos desviaciones estándar con respecto a la media aritmética. La Tabla 5.2 muestra detalles de este comportamiento.

Tabla 5.2: Información de los resultados obtenidos para obtener el modelo de velocidades VGal. Los valores de la altura fueron asignados tomando como punto de referencia el nivel del mar hasta la cima del volcán correspondiente a 4.2 km y se toma el valor positivo. Del nivel del mar hacia abajo se consideran valores negativos. (Fuente: Esta investigación)

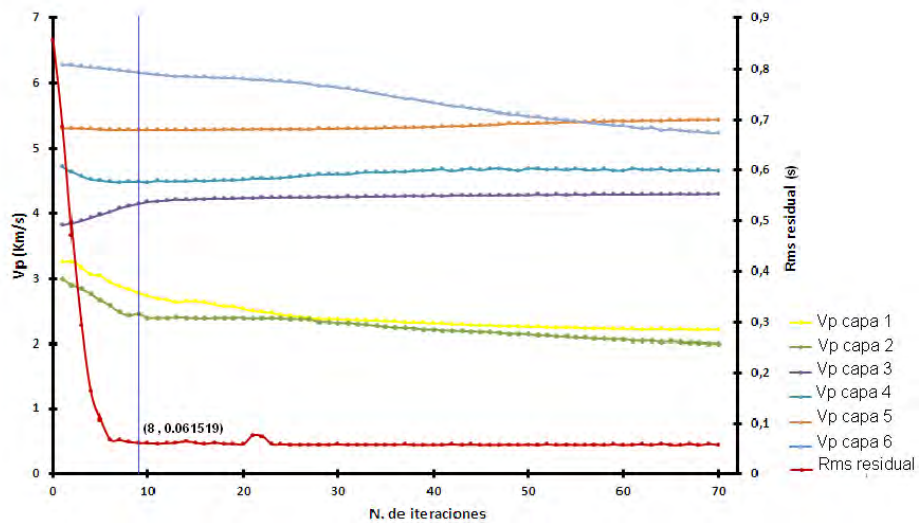
<b>Prof</b> (km)	<b>Alt</b> (km)	$V_p$ (km/s)	<b>Desv.Est</b> $V_p$ (km/s)	$N^\circ$ de <b>Sismos</b>	$V_s$ (km/s)	<b>Desv.Est</b> $V_s$ (km/s)	$N^\circ$ de <b>Sismos</b>
0	4.2	4.54	0.90	106	2.58	0.33	112
-2.1	2.1	4.60	0.88	393	2.64	0.48	393
-5	-0.8	4.57	1.09	517	2.61	0.61	523
-8.9	-4.7	5.04	1.03	38	2.86	0.90	38
-10	-5.8	4.86	1.49	82	2.81	0.81	85
-12	-7.8	5.09	1.36	107	3.00	0.54	108
<b>Totalidad sismos para onda P</b>				<b>1243</b>	<b>Totalidad sismos para onda S</b>		<b>1259</b>

### 5.3. Modelos Finales

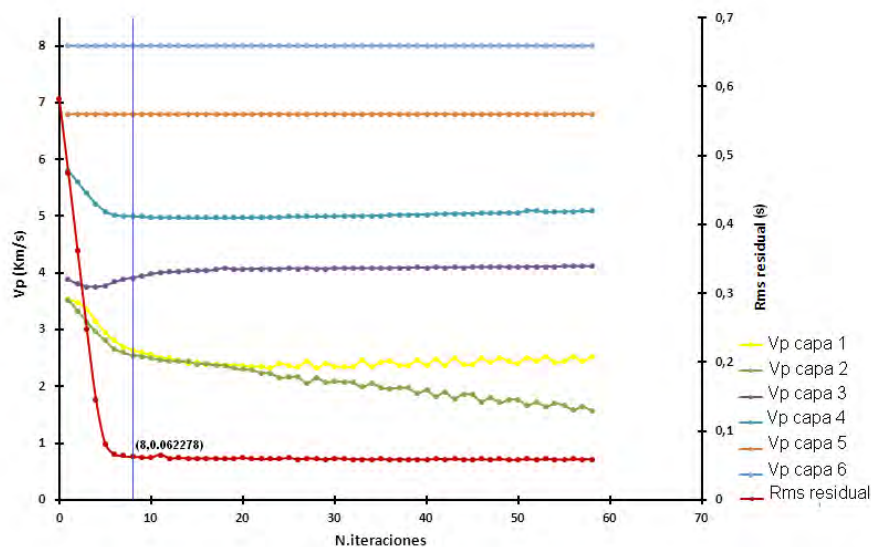
Luego de ejecutar Velest con los 4 modelos iniciales y todos los archivos de entrada los resultados se presentan en la Figura 5.5 y en la Tabla 5.3.



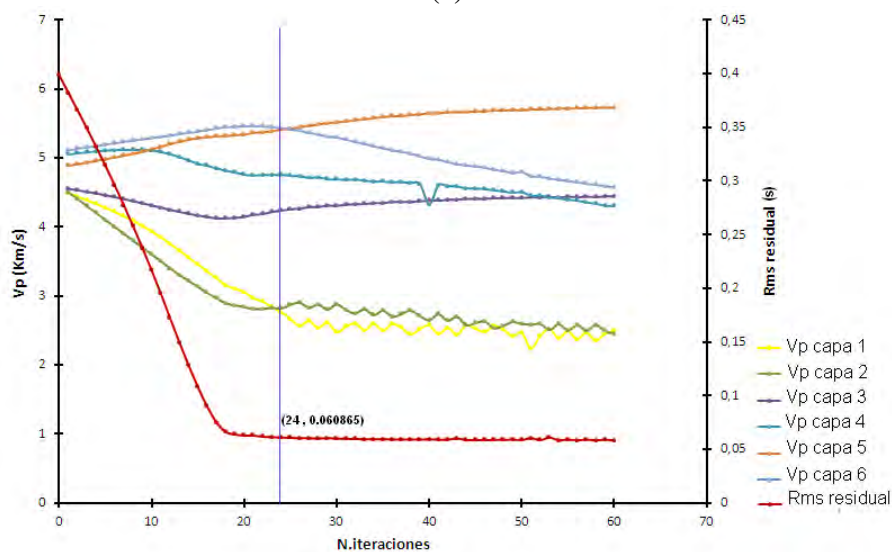
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.5: Modelos finales para la onda P obtenidos de la inversión de los tiempos de arribo mediante Velest con el modelo inicial de velocidades (a) Modelo WR, (b) Modelo G (c) Modelo NM y (d) Modelo VGal. La línea azul trazada verticalmente corresponde al modelo de velocidad correspondiente a la mínimo promedio de RMS residual. (Fuente: Esta investigación)

Tabla 5.3: Información de los Modelos de Velocidad finales para la onda P y S con su respectivo RMS residual para el modelo inicial (a) Modelo WR, (b) Modelo G, (c) Modelo NM y (d) Modelo VGal. (Fuente: Esta investigación)

N. de iteraciones = 21 RMS residual=0.061519		
Profundidad (km)	$V_p$ (km/s)	$V_s$ (km/s)
4.2	2.6	1.13
1.8	3.15	1.9
-0.4	4.04	2.35
-3.4	4.44	2.65
-5.4	5.28	2.98
-13.4	6.19	3.54

(a)

N. de iteraciones=8 RMS residual=0.063952		
Profundidad (km)	$V_p$ (km/s)	$V_s$ (km/s)
4.2	2.84	1.29
1.8	2.44	1.66
-0.4	4.13	2.32
-3.4	4.48	2.66
-5.4	5.29	2.96
-13.4	6.13	3.54

(b)

N. de iteraciones=8 RMS residual=0.062278		
Profundidad (km)	$V_p$ (km/s)	$V_s$ (km/s)
4.2	2.64	1.23
2.2	2.55	1.59
0.2	3.92	2.3
-3.8	5	2.89
-21.8	6.8	3.82
-39.8	8	4.49

(c)

N. de iteraciones=24 RMS residual=0.060865		
Profundidad (km)	$V_p$ (km/s)	$V_s$ (km/s)
4.2	2.77	1.23
2.1	2.82	1.76
-0.8	4.24	2.46
-4.7	4.75	2.83
-5.8	5.41	3.03
-7.8	5.43	3.04

(d)



Para los resultados de la inversión con el modelo inicial WR (Figura 5.5 (b)), el RMS residual desciende ligeramente hasta la iteración 21, de ahí en adelante no se muestran cambios. La  $V_p$  para la capa 1 si muestra un descenso notorio hasta la iteración 21 aproximadamente y en adelante los cambios se hacen pequeños hasta la iteración 60. La  $V_p$  para la capa 2, también disminuye hasta cierto punto y en adelante empieza a subir. Las velocidades en la capa 3 y 5 ascienden a lo largo del proceso iterativo.

Para el modelo inicial G (Figura 5.5 (a)), el RMS residual no varia a partir de la iteración No 8. El valor de las  $V_p$  para las capas 1 y 2 descienden levemente al paso de las iteraciones. En cambio las velocidades para las capas 3, 4 y 5 no muestran un cambio significativo a diferencia de la capa 6 que baja notoriamente.

En el modelo inicial NM (Figura 5.5 (c)), se observa que el RMS residual tiene un rápido descenso hasta la iteración 8. Las velocidades de la onda P solo muestran cambios en la capa 1 y 2 teniendo una ascenso en los valores de velocidad. Las capas restantes no muestran cambios visibles y se tornan constantes, aunque las capas 3 y 4 presentan un pequeño descenso hasta la iteración 8.

Los resultados para el modelo VGal (Figura 5.5 (d)), presentan cambios en todas sus capas. El RMS se hace mínimo hasta la iteración 24. En adelante no se observan variaciones importantes. Las capas 1, 2 y 4 presentan un descenso en todo el proceso; la capa 3 desciende hasta la iteración 23, y luego asciende. Para la capa 6 la velocidad sube hasta la iteración 23 y posteriormente desciende hasta finalizar las iteraciones. La capa 5 asciende durante todo el procedimiento.

En la Figura 5.6 se hace una comparación del modelo de velocidades final para la onda P obtenido mediante Velest con respecto a cada modelo inicial.

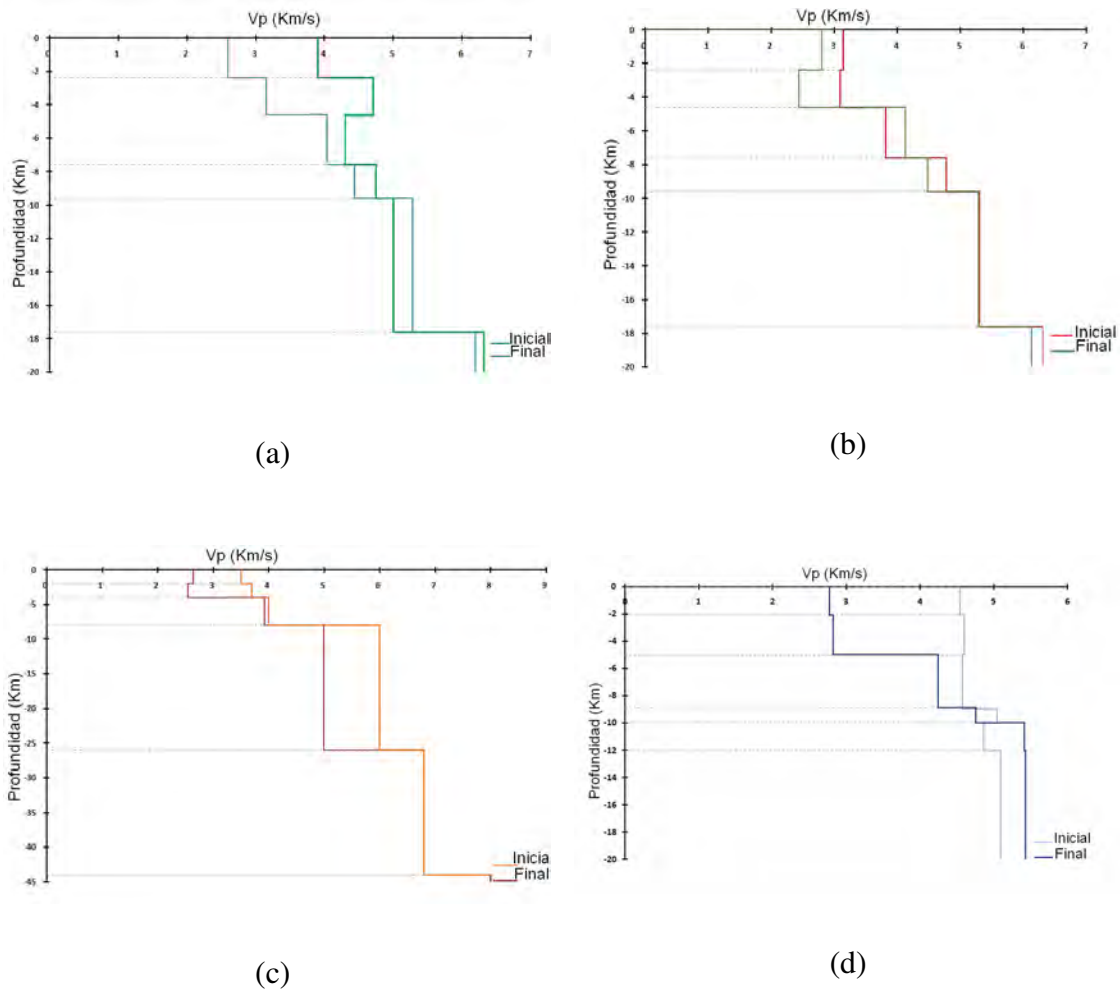


Figura 5.6: Comparación de los modelos finales obtenidos con cada uno de los modelos iniciales (a) Modelo WR, (b) Modelo G, (c) Modelo NM y (d) Modelo VGal. (Fuente: Esta investigación)

Para los 4 modelos la estructura posee 6 capas. Con respecto a los desplazamientos con el modelo inicial las velocidades si presentan cambios considerables. Para determinar el mejor de los 4 modelos finales se seleccionó el que tiene el mejor RMS residual, en este caso corresponde al obtenido mediante la inversión del modelo inicial VGal denominado VGal Final. Para este modelo se realizó la re-localización de los 1382 eventos obteniendo los siguientes perfiles:

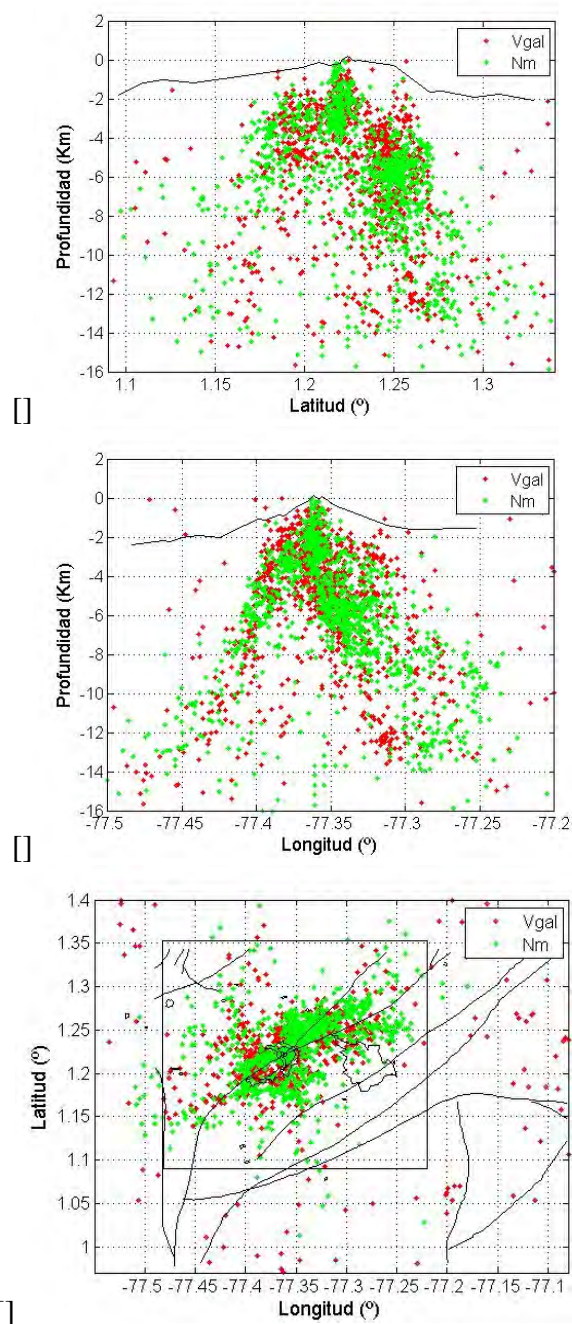


Figura 5.7: Re-localizaciones de los eventos sísmicos con el modelo VGal final mediante Hypo71PC (círculos rojos) y sismos localizados inicialmente con el modelo NM (círculos verdes) en los perfiles (a) Profundidad-Latitud, (b) Profundidad-Longitud y (c) Latitud-Longitud. (Fuente: Esta investigación)

# Capítulo 6

## Análisis de Resultados y Discusión

La totalidad de sismos utilizados para determinar el nuevo modelo VGal mediante las técnicas de Wadati, Riznichenco y la inversión con Velest; contó con un estricto proceso de selección de datos, restringiendo considerablemente los criterios para escoger las mejores fases y soluciones de localizaciones. El proceso implicó recurrir a las bases de datos del OVSP para extraer gran parte de la información. Uno de los aspectos fundamentales y que diferencian este trabajo de otros realizados anteriormente, es el hecho de incluir sismicidad hasta una profundidad de 30 km. Con lo anterior se garantiza una mayor cobertura, especialmente en las capas profundas del edificio del VG. Aunque después de los 12 km no son tan frecuentes, se pudo obtener un importante conjunto de 204 eventos entre los 10 y 30 km.

Es de tener en cuenta que los sismos seleccionados inicialmente fueron localizados con el programa Hypo71PC y el modelo de velocidades NM. Sin embargo una ventaja del método de Wadati es que sólo depende de los tiempos de arribo y es independiente tanto del modelo inicial como del algoritmo utilizado para realizar la localización. El método de Riznichenco también tiene la ventaja de trabajar con los tiempos de arribo, pero se presenta una debilidad al utilizar la distancia epicentral que arroja el programa Hypo71PC haciendo uso del modelo NM. De esta manera, las técnicas de Wadati y Riznichenco nos ofrecen criterios de selección que desvinculan las fases seleccionadas del modelo utilizado para localizar y del algoritmo de localización.

Por otro lado; el método utilizado para hallar un valor estimado de la relación  $V_p/V_s$ , contó con análisis estadístico suficiente para garantizar la calidad del resultado encontrado. El valor de 1.7325 obtenido en este trabajo se acerca al de 1.74 encontrado en el trabajo de Torres et al., 2010 y se aleja del valor de 1.78 adoptado históricamente en el OVSP.

Es de resaltar que los teóricos generalizan con gran aceptación un valor de  $\sqrt{3}$  para la relación  $V_p/V_s$ , lo que coincide bastante con el valor hallado en esta investigación. De manera general, el valor de  $V_p/V_s$  determinado en este trabajo relativo al valor teórico propuesto es  $V_p/V_s = 1,7325 \pm 0,003$ . Este procedimiento también se realizó en el programa ROOT Cern versión v5-34-10, para referenciar los resultados obtenidos en este trabajo (Apéndice A.3, Figura A.5), obteniendo un valor estimativo de  $1,729 \pm 0,005$  a partir de la distribución gaussiana. La relación tiene un gran acercamiento y finalmente se aproximó a  $V_p/V_s = 1,73$ . Con este resultado se determinó el coeficiente de Poisson  $\nu$ , parámetros de Lamé  $\lambda$  y  $\mu$ , con el modelo de velocidades NM y modelo VGal. De acuerdo a las investigaciones en el proyecto Nariño (Meissner R., 1977), se obtuvo los materiales y composición del volcán por estructuras, sin embargo no son valores reales sino aproximaciones a la realidad. En la Tabla 6.1, se determinan estos parámetros. Los valores difieren para los dos modelos ya que las relaciones  $V_p/V_s$  para el modelo VGal Final y NM tienen cierto grado de diferencia.

Tabla 6.1: Parámetros de Lamé y coeficiente de Poisson para el modelo NM y modelo VGal Final. Para el modelo VGal final la profundidad del modelo varía entre 0-17km, para el modelo NM entre 0-40km

Materiales	$\rho$ $g/cm^3$	Modelo VGal Final			Modelo NM		
		$\nu$	$\lambda$ $dyn/cm^2$	$\mu$ $dyn/cm^2$	$\nu$	$\lambda$ $dyn/cm^2$	$\mu$ $dyn/cm^2$
Depositos volcanicos sin diferencial							
Lavas Masivas y algunas escoráceas	2,4	0,25	7,23E+10	5,71E+11	0,27	1,09E+11	1,04E+11
Rocas Graníticas metamórficas y sedimentos	2,5	0,25	1,70E+11	1,50E+11	0,27	1,33E+11	1,26E+11
Rocas graníticas	2,7	0,25	2,31E+11	2,04E+11	0,27	3,24E+11	3,07E+11
Grupo de Agua y Diabásico	3					4,62E+11	4,37E+11

De los resultados encontrados para las velocidades  $V_p$  y  $V_s$  mediante la técnica de Ryznichenco, se observaron variaciones con la profundidad. Los cambios en el valor de  $V_p$  y  $V_s$  siguen tendencias con puntos de inflexión que facilitaron determinar los límites de las capas, esto a su vez redunda en una propuesta confiable de modelo inicial. Recordemos que es necesario contar con un buen modelo inicial ya que el modelo final encontrado mediante la inversión depende fuertemente del modelo inicial. Mediante un análisis estadístico se

depuraron los datos con el fin de obtener un valor promedio de  $V_p$  y  $V_s$  representativo de cada capa. Un limitante de este método es que se debe seleccionar un sólo valor que represente la velocidad promedio de la capa, sin embargo, ésta cambia gradualmente con una tendencia cuasi-lineal a lo largo de la capa.

Como resultado de la inversión se observa que las velocidades de las tres primeras capas en general disminuyen respecto a los valores de velocidades del modelo inicial, en todos los casos la velocidad de las primeras capas inician sobre los 3 km/s y termina por debajo de este valor.

Una posible explicación a esto es que los valores de velocidad  $V_p$  y  $V_s$  están calculados mediante la técnica de Riznichenco que involucra el uso de la distancia epicentral calculada con el modelo NM, el cual tiene valores por encima de 3 km/s en sus primeras capas. Sin embargo, durante el proceso de inversión, Velest ajusta las velocidades de las capas minimizando los residuales de los tiempos de arribo para ajustar lo mejor posible los datos observados con el nuevo modelo estimado en la inversión. Así, de los resultados obtenidos en este estudio se infiere que los modelos iniciales poseen valores altos de velocidad que no se acercan lo suficiente a la realidad.

Respecto a las capas con profundidades mayores que 8 km se observa que los modelos finales WR y VGal muestran incremento en los valores de velocidad, este incremento es mayor en el modelo VGal que en el modelo WR, tendiendo el valor de la velocidad a 5.28 km/s y 4.75 km/s respectivamente. Por otro lado, el modelo NM Final disminuye la velocidad respecto a su modelo inicial. Esto es consistente con los valores finales de VGal y WR ya que en el modelo inicial de NM el valor de la capa es mayor que 6 km/s y la inversión ajusta este valor hasta aproximarlos a 5 km/s, que es casi un promedio de las velocidades encontradas en los dos modelos anteriormente mencionados. El modelo G prácticamente no sufrió cambios después de los 8 km de profundidad. Hay que tener en cuenta el hecho de que la información existente para profundidades mayores que 12 km es escasa pese al esfuerzo que se realizó para incluir esta información en el presente estudio, por tanto, la cobertura de rayos a estas profundidades es mínima dificultándole a Velest el ajuste durante la inversión.

El criterio para seleccionar el mejor modelo de los cuatro obtenidos en este proyecto, se fundamentó en los menores RMS de los residuales. De los cuatro modelos el que obtuvo el menor error fue el modelo VGal final (Figura 5.5 (d)), con un valor de 0.0609, aunque el número necesario de iteraciones para alcanzar el mínimo error fue mayor que para los otros tres modelos. Por otro lado se observa que las dos primeras y dos últimas capas del modelo VGal presentan gran similitud en sus valores de  $V_p$  y  $V_s$ . Es posible hacer mejoras al modelo reduciendo el número de capas a cuatro, sin embargo este estudio se deja para futuros trabajos.

Para confrontar de manera más detallada el modelo VGal final con el modelo NM (utilizado actualmente por el OVSP), se realizó el proceso de re-localización de los 1382 eventos sísmicos con el programa Hypo71PC, utilizando los modelos VGal final y NM. En primera instancia en las gráficas a, b y c de la Figura 5.7 se observa que aunque los hipocentros estimados mediante el modelo VGal ocupan regiones similares que los calculados mediante el modelo NM, se muestran un poco más dispersos, especialmente en la vista en planta Latitud-Longitud (Figura 5.7(c)). Se sabe que las localizaciones de sismos que corresponden a fuentes iguales se ubican con mayor grado de agrupamiento a medida que el modelo utilizado es mejor, por tanto, en este sentido el modelo VGal no es mejor opción que el modelo NM.

Por otro lado, una comparación de los RMS de las localizaciones generadas con ambos modelos muestra que en promedio los RMS correspondientes al modelo VGal está alrededor de 0,16, mientras que los del modelo NM son próximos a 0,07. Esta es una medida cuantitativa que también sugiere que el modelo NM es más apropiado que el VGal.

Dado que el resultado más importante que se obtuvo en este trabajo ratifica actualmente al modelo NM como la mejor opción, al respecto se puede plantear lo siguiente. El modelo NM fue obtenido con base en los resultados del Proyecto Nariño (Meissner R., 1977) en el que se utilizó sísmica de refracción y gravimetría para determinar la velocidad  $V_p$  en una región cercana a la ubicación de Galeras y cuyos valores de  $V_p$  se extrapolaron para las capas por debajo de los 4 primeros kilómetros desde la cima del volcán. Para los 4 km superficiales

del edificio volcánico se dedujo valores de  $V_p$  mediante la inspección de las características geológicas de la zona. En cambio el modelo VGal se obtuvo a través de la inversión de los tiempos de arribo de una cantidad considerable de sismos con ayuda de un programa para tal fin. Aunque los resultados con ambos modelos son similares, es claro que existe una ventaja en las técnicas utilizadas para obtener el modelo NM que redundan en la mejor calidad de sus localizaciones. Las limitaciones del programa de inversión utilizado y de la metodología aplicada en este trabajo son los factores determinantes en la búsqueda de un mejor modelo. Es de tener en cuenta que ya sea por una u otra metodología aplicada en la búsqueda de un modelo, este no deja de ser una aproximación a la realidad física. La idea es disminuir las incertidumbres lo máximo posible para obtener información de calidad suficiente como resultado de los procedimientos aplicados, proporcionando insumos de confianza para que acerque a una correcta interpretación.



# Conclusiones y Recomendaciones

- Mediante la relocalización de sismos y la aplicación de criterios rigurosos, se logró la selección de 1382 sismos tipo VT de una base de cerca de 13000 eventos. Las características de los sismos seleccionados hacen referencia especialmente a la solución de sus localizaciones y la cantidad y calidad de fases utilizadas durante el proceso de localización. Respecto a trabajos anteriores se destaca el hecho de haber incluido sismicidad ubicada en zonas más profundas.
- Mediante la técnica de Wadati se estimó un valor promedio de la relación  $V_p/V_s$ , la cual resultó en 1.73 y no varía significativamente con la profundidad. Este valor se aproxima fuertemente al valor teórico de  $\sqrt{3}$  aceptado ampliamente como un valor representativo de esta relación. El valor encontrado en este estudio difiere del utilizado actualmente en el OVSP en 0.05.
- La técnica de Riznichenko permitió limitar la profundidad de las capas del modelo VGal inicial, que sirvió de entrada al programa de inversión Velest. A cada capa se le asignó un valor promedio de  $V_p$  y de  $V_s$  teniendo en cuenta las tendencias de variación de estas velocidades con la profundidad. El modelo VGal inicial constó de 5 capas y un semiespacio. También se utilizaron los modelos NM, WR y G como otros modelos iniciales del proceso de inversión.
- Como resultado del proceso de inversión se obtuvo cuatro modelos finales y se aplicó el criterio de menor RMS residual para la selección del mejor modelo estimado por Velest, este correspondió al modelo VGal final.
- Mediante una nueva re-localización de los sismos con el modelo VGal final y el modelo NM utilizando el programa Hypo71PC se contrastaron las respectivas localizaciones mediante el criterio de RMS, resultando más precisas las localizaciones del modelo NM con un error promedio de 0.07 contra un error promedio de 0.16 para las del modelo VGal.

- De lo anterior se infiere que el modelo NM es mejor opción que el modelo VGal final debido a que permite realizar localizaciones de mayor precisión, pese a no haber alcanzado el menor RMS durante el proceso de inversión. Esto también sugiere que la mejor opción de evaluar un modelo es a través de la re-localización de sismos y no utilizando el RMS que arroja el proceso de inversión.
- Se recomienda considerar el modelo VGal reducido a cuatro capas, ya sea como modelo inicial para un nuevo proceso de inversión o considerarlo como modelo final y realizar la re-localización de los eventos sísmicos para analizar los resultados. .

# Bibliografía

OVSP, *Servicio Geológico Colombiano Pasto* Recuperado el 22 de Enero de 2013, de [www.ingegominas.gov.co](http://www.ingegominas.gov.co)

PALAU T. (2005). *Modelo de Velocidades Sísmicas de la Cuba Oriental* Revista Geológica Colombiana.

GOMEZ D., LAVERDE C., NARVÁEZ L., MUÑOZ A. , BETTY S, TORRES J., TORRES R.. (2004). *Catálogo de Señales Sísmicas de Colombia, Capítulo Galeras*. San Juan de Pasto: OVSP. pag. 16-33

LATTER, J. H, ET AL. (1979). *Volcanological Observations at Tongariro National Park* Department of Scientific and Industrial Research. pag. 150-160

MINAKAMI T.. (1974). *Seismology of Volcanoes in Japan* Physical Volcanology, Elsevier Scientific Publishing Company. pag. 1-27

TORRES R.. (1992). *Unusual Seismic Signals Associated with the Activity at Galeras Volcano* Annali di Geofisica. pag. 299-310

CHOUET B. (1996). *Long Period Volcano Seismicity: Its Source and use in Eruption Forecasting*. Nature. pag. 309-3016

MEISSNER R, ET AL.. (1977). *Dinámica del Límite de Placas Activo en el SW de Colombia, de acuerdo a recientes Mediciones Geofísicas* Proyecto Corporativo Internacional Nariño.

MURCIA A, C.H. (1991). *Memoria Explicativa Plancha 429-Pasto* Departamento de Nariño, Colombia.

TORRES R., ET AL. (2010). *Modelo de Velocidades de Propagación de Ondas Sísmicas para el Volcán Galeras* OVSP.

WADATI K.. (1933) *Introduction of Seismology* Birkhauser Verlag, pag. 391.

RIZNICHENCO V. (1958). *Methods for Large-Scale Determination of Focus Coordinates of Nearby Earthquakes and Velocities of Seismic Waves in the Focal Region* Akad. Nauk.

- LONDOÑO J, O.L.. (2008). *Estructura Tri-dimensional de Velocidad de onda P para el Volcán Galeras* Boletín Geológico del Instituto de Geológico y Minería,
- KISSLING E, E.A. (1994). *Inicial Reference Models in Seismic Tomography* Revista de Geofísica, pag. 635-646
- ROSALES C. (2001). *Sobre el Comportamiento Sísmico de los Depósitos de Suelos del Area de Cañaveralejo*. Cali Colombia: Universidad del Valle. pag. 21-23
- STEIN S. (2003). *An introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure: Basic Seismological Theory* pag. 29-62
- STEIN S. (2003). *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure: Basic Seismological Theory* pag. 66-69
- UDIAS A. (1997). *Fundamentos de Geofísica: Capas Planas de Velocidad Constante* pag. 85-87
- MOLINA C.. (2001). *Actividad Pre-eruptiva del Volcán Tungurahua* Trabajo de Tesis para optar título de Geóloga. pag. 63-65
- LEE L. (1975). *Computer Program for Determining Hypocenter, Magnitude and First Motion Pattern of Local Earthquakes* U.S Geological Survey.
- VARGAS J. C.. (2003). *Propagación de Ondas Sísmicas y Atenuación de Ondas de Coda* Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña. pag. 29-33
- CROSSON R. (1976). *Simultaneous Least Estimation of Hypocenter and Velocity Parameters* Crustal Structure Modeling of Earthquake Data. pag. 36-46
- KISSLING E, K.U. (1994). *Program Velest a Short Introduction* user of guide, Zurich, Switzerland.
- ELLSWORTH W. (1997) *Three-Dimensional Structure of the Crust and Mantle Beneath the Island of Hawai* Hawai.
- THURBER C. (1992). *Hypocenter-Velocity Structure Coupling in Local Earthquake Tomography* Phys. Earth Planet. pag. 55-62

ROECKER S. (1981). *Seismicity and Tectonics of the Pamir-Hindu Kush Region of Central Asia* PhD thesis.

# Apéndice A

## Procedimientos

### A.1. Resultados obtenidos de la técnica de Wadati y Riznichenco

Para encontrar la relación  $V_p/V_s$ , y el modelo de velocidades  $V_{Gal}$  mediante la técnica de Wadati y técnica de Riznichenco se realizaron 3 rutinas en MatLab, formadas de acuerdo a las Ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 mediante el método de mínimos cuadrados mediante regresión lineal. A continuación se presenta el código y las Tablas A.1, A.2, A.3 con los respectivos resultados.

La totalidad de eventos corresponde a 1382, pero debido al gran tamaño de información se toman sólo 80 sismos tipo VT con los respectivos valores de los cálculos realizados obtenidos mediante la técnica.

## Técnica de Wadati

```

1  sumlTp=0;
2  parreg=[];
3  [m,n]=size(pha);
4  for i=1:m-1
5      if pha(i,1)==pha(i+1,1)
6          Tp(i-sumlTp)=pha(i,3);
7          Tp_Ts(i-sumlTp)=pha_Tp_Ts(i,1);
8      else
9          lTp(i)=length(Tp)+1;
10         sumlTp=sum(lTp);
11         id=pha(sumlTp,1);
12         Tp=[Tp pha(i,3)];
13         Tp_Ts=[Tp_Ts pha_Tp_Ts(i,1)];
14         [m b R R2]=reglin(Tp,Tp_Ts);
15         parreg=[parreg;id m b R R2];
16         Tp_Ts=[];
17     end
18     %pause
19 end
20 Vps=parreg(:,2)+1;
21 promVps=mean(Vps)
22 \end{scriptsize}

```

*pha* corresponde al archivo de entrada el cual contiene información de los arribos de las fases de los sismos en todos los registros de las estaciones (Figura 4.2).

Tabla A.1: Cálculo de la relación  $V_p/V_s$  mediante la técnica de Wadati para 80 eventos sísmicos. Los primeros 40 eventos se encuentran a la zona profunda del volcán, y los últimos 40 se encuentran en zona cercana al cráter

Codlocalizacion	Profundidad (km)	r	m	b	$V_p/V_s$
216562	-21,79	0,956996761	0,078661345	-10441,97467	1,078661345
201573	-18,55	0,964052592	0,094933336	-152937,2955	1,094933336
344726	-18,31	0,997939115	0,193326152	-125729,4537	1,193326152
461738	-18,31	0,969034033	0,181901141	-368319,5817	1,181901141
337986	-17,6	0,966847822	0,198218437	-200409,9645	1,198218437
308738	-17,38	0,979502345	0,204084039	-130692,6651	1,204084039
99901	-16,86	0,908825603	0,205614546	-407565,6273	1,205614546
346333	-16,58	0,905397304	0,214005387	-253505,4321	1,214005387
442332	-16,45	0,96046971	0,216602225	-317866,3452	1,216602225
422982	-16,44	0,969229097	0,228266656	-338832,1458	1,228266656
6546	-16,24	0,901435681	0,229974314	-390156,7729	1,229974314
386365	-16,13	0,972862876	0,230399997	-385111,1953	1,230399997
33307	-15,5	0,912930113	0,239373192	-583815,9794	1,239373192
436468	-15,46	0,924716203	0,244869564	-341632,8261	1,244869564
282302	-15,33	0,920204527	0,251408699	-498437,0217	1,251408699
14341	-15,06	0,975562679	0,26462822	-695726,4049	1,26462822
167892	-15,04	0,948644647	0,269644794	-505146,776	1,269644794
425884	-15,01	0,939015979	0,27155609	-33871,13951	1,27155609
111766	-15,01	0,91912144	0,270839996	-704943,06	1,270839996
307582	-14,97	0,940961327	0,2773717	-189048,7601	1,2773717
221	-14,86	0,937800215	0,291260377	-475888,0189	1,291260377
136290	-14,8	0,916842324	0,298697714	-542748,5676	1,298697714
308841	-14,72	0,906312411	0,299037748	-242189,528	1,299037748
240631	-14,68	0,924884553	0,300327864	-572623,5656	1,300327864
126108	-14,51	0,953678655	0,305768943	-642386,6087	1,305768943
204881	-14,38	0,932556501	0,306105378	-221380,2271	1,306105378
474755	-14,37	0,979627802	0,308661414	-636137,8071	1,308661414
18787	-14,21	0,936606922	0,31086699	-789998,7177	1,31086699
404012	-14,16	0,908941182	0,322642113	-840029,0066	1,322642113
234901	-13,98	0,952946576	0,325195875	-798985,3969	1,325195875
78540	-13,93	0,924204314	0,326313975	-901671,5161	1,326313975
333	-13,93	0,954411823	0,326018808	-654300,4483	1,326018808
399217	-13,89	0,903935343	0,328899047	-408052,6476	1,328899047
282092	-13,88	0,936050733	0,337049641	-340428,4026	1,337049641
103199	-13,84	0,975020449	0,343448511	-772102,1617	1,343448511
123611	-13,74	0,982445852	0,343529412	-443014,9759	1,343529412
129498	-13,7	0,986772836	0,351507693	-741667,7802	1,351507693



20120	-13,57	0,92156711	0,352933333	-686018,125	1,352933333
74335	-13,56	0,925600163	0,35892492	-502282,8549	1,35892492
389291	-1	0,959358651	1,249639299	-521417,9404	2,249639299
25938	-0,97	0,933619494	1,261832206	-1073254,323	2,261832206
127565	-0,96	0,93138423	1,263490907	-2340677,688	2,263490907
255132	-0,96	0,953697649	1,262200013	-2147494,922	2,262200013
207035	-0,94	0,97392104	1,265530462	-1457983,304	2,265530462
126275	-0,93	1,001181953	1,266464354	-1991232,931	2,266464354
127797	-0,92	0,92994807	1,277781511	-2833302,58	2,277781511
193705	-0,92	0,971381523	1,268869566	-2921613,478	2,268869566
166456	-0,88	0,954280917	1,307483379	-1340684,237	2,307483379
101435	-0,86	0,9812179	1,310303969	-1110700,166	2,310303969
141013	-0,84	0,991076676	1,312800001	-2713390,239	2,312800001
207071	-0,82	0,922193901	1,321866196	-679787,9912	2,321866196
179452	-0,81	0,970396762	1,324153117	-553365,5154	2,324153117
246564	-0,8	0,975010256	1,326940398	-1846278,55	2,326940398
231696	-0,8	0,960063311	1,326252001	-648348,5946	2,326252001
285364	-0,74	0,991441191	1,369066649	-3332061,556	2,369066649
337282	-0,73	0,987859908	1,382019334	-1164342,693	2,382019334
151576	-0,68	0,990284998	1,404910334	-1988874,138	2,404910334
159195	-0,68	0,907858441	1,400990463	-3054371,714	2,400990463
113844	-0,67	0,951474916	1,410108945	-3246852,763	2,410108945
62723	-0,66	0,922830565	1,447704461	-3121222,395	2,447704461
166574	-0,61	0,995971516	1,472000018	-2788132,13	2,472000018
11669	-0,61	0,936981506	1,464219355	-3903198,339	2,464219355
386630	-0,61	0,980487943	1,457127749	-343683,1248	2,457127749
258048	-0,57	0,954738471	1,472402414	-640397,4179	2,472402414
429520	-0,56	0,991247448	1,477234363	-723169,3864	2,477234363
218454	-0,56	0,985231545	1,47372973	-1499409,537	2,47372973
104153	-0,55	0,982969122	1,482491253	-1454381,809	2,482491253
299632	-0,52	0,966116475	1,486458909	-961334,5655	2,486458909
179620	-0,47	0,924831465	1,536000013	-2584718,167	2,536000013
231758	-0,45	0,909447343	1,546666662	-3982407,917	2,546666662
35614	-0,43	0,973831964	1,574718187	-439761,749	2,574718187
468486	-0,37	0,90586465	1,634511386	-914638,9399	2,634511386
468506	-0,34	0,922223795	1,640533341	-2554097,944	2,640533341
273466	-0,33	0,951523998	1,997190854	-914408,1756	2,997190854
244954	-0,33	0,999155532	1,824331474	-2243846,263	2,824331474
152286	-0,31	1,030484274	2,565333287	-4761931,75	3,565333287
258050	-0,29	0,912251318	3,048225523	-1036145,41	4,048225523
221287	-0,16	1,047451689	3,852800131	-8295531	4,852800131

## Técnica de Riznichenco Onda P

```

1  sumlx2=0;
2  parreg=[];
3  [m,n]=size(pha_rizn_Tpo);
4  for i=1:m-1
5      if pha_rizn_Tpo(i,1)==pha_rizn_Tpo(i+1,1)
6          x2(i-sumlx2)=(pha_rizn_Tpo(i,4))^2;
7          Tpo(i-sumlx2)=pha_rizn_Tpo(i,3);
8      else
9          lx2(i)=length(x2)+1;
10         sumlx2=sum(lx2);
11         id=pha_rizn_Tpo(sumlx2,1);
12         x2=[x2 (pha_rizn_Tpo(i,4))^2];
13         Tpo=[Tpo pha_rizn_Tpo(i,3)];
14         [m b R R2]=reglin(x2,Tpo);
15         parreg=[parreg; id m b R R2];
16         x2=[];
17         Tpo=[];
18     end
19     %pause
20 end

```

El archivo de entrada contiene la diferencia de las fases  $T_p$ , y  $T_s$  (Figura 4.4) con respecto a  $T_0$  para los 1382 eventos sísmicos con registro en todas las estaciones.

Tabla A.2: Cálculo de  $V_p$  mediante la técnica de Riznichenco para 80 eventos sísmicos. Los primeros 40 eventos se encuentran a la zona profunda del volcán, y los últimos 40 se encuentran en zona cercana al cráter

Codlocalización	m	b	r	$r^2$	$V_p$ (km/s)	Profundidad (km)
2,17E+05	3,20E-02	1,80E+01	9,47E-01	8,98E-01	5,592106358	-21,790
2,02E+05	3,91E-02	1,25E+01	9,53E-01	9,08E-01	5,058921172	-18,550
3,45E+05	2,30E-02	1,59E+01	8,82E-01	7,79E-01	6,595631875	-18,310
4,62E+05	3,64E-02	1,27E+01	7,95E-01	6,31E-01	5,245018391	-18,310
3,38E+05	4,99E-02	9,74E+00	9,25E-01	8,55E-01	4,478826775	-17,600
3,09E+05	2,53E-02	1,55E+01	6,49E-01	4,22E-01	6,284857921	-17,380
9,99E+04	2,46E-02	1,72E+01	8,69E-01	7,54E-01	6,377298648	-16,860
3,46E+05	4,72E-02	8,44E+00	9,47E-01	8,97E-01	4,603927783	-16,580
4,42E+05	4,33E-02	8,12E+00	9,70E-01	9,41E-01	4,804354195	-16,450
4,23E+05	7,13E-02	7,68E+00	8,61E-01	7,41E-01	3,745007757	-16,440
6,55E+03	3,85E-02	1,05E+01	9,71E-01	9,43E-01	5,095890984	-16,240
3,86E+05	8,31E-03	1,80E+01	1,12E-01	1,26E-02	10,97078967	-16,130
3,33E+04	4,55E-02	8,09E+00	9,54E-01	9,10E-01	4,688249464	-15,500
4,36E+05	4,46E-02	7,50E+00	9,68E-01	9,37E-01	4,73615482	-15,460
2,82E+05	2,88E-02	1,48E+01	8,63E-01	7,44E-01	5,888284877	-15,330
1,43E+04	5,57E-02	5,37E+00	9,60E-01	9,22E-01	4,237345142	-15,060
1,68E+05	9,01E-03	2,51E+01	2,82E-02	7,96E-04	10,53463953	-15,040
1,12E+05	3,66E-02	9,92E+00	9,18E-01	8,42E-01	5,22494653	-15,010
4,26E+05	4,33E-02	8,69E+00	9,37E-01	8,79E-01	4,806125739	-15,010
2,35E+05	2,37E-02	1,00E+01	9,56E-01	9,14E-01	6,499137717	-13,980
3,33E+02	2,57E-02	1,01E+01	9,73E-01	9,47E-01	6,242029649	-13,930
7,85E+04	2,97E-02	9,64E+00	8,99E-01	8,09E-01	5,807438913	-13,930
3,99E+05	4,36E-02	7,94E+00	9,15E-01	8,37E-01	4,789709213	-13,890
2,82E+05	5,79E-02	6,88E+00	7,73E-01	5,98E-01	4,156944673	-13,880
1,03E+05	4,71E-02	7,09E+00	8,76E-01	7,68E-01	4,606588618	-13,840
1,24E+05	6,20E-02	5,39E+00	9,45E-01	8,92E-01	4,016084913	-13,740
1,29E+05	2,85E-02	9,48E+00	9,76E-01	9,53E-01	5,924390498	-13,700
2,59E+04	4,65E-02	1,56E-01	9,69E-01	9,39E-01	4,637917639	-0,9700
1,28E+05	5,88E-02	1,08E-01	9,97E-01	9,95E-01	4,125314543	-0,9600
2,55E+05	4,92E-02	7,49E-02	9,99E-01	9,98E-01	4,507044018	-0,9600
3,43E+05	5,28E-02	1,94E+00	9,08E-01	8,24E-01	4,350573981	-5,3900
1,69E+05	6,95E-02	1,81E+00	8,84E-01	7,81E-01	3,792033982	-5,3800
2,17E+05	4,00E-02	2,11E+00	8,97E-01	8,05E-01	5,002534942	-5,3800
3,74E+05	2,89E-02	1,97E+00	9,83E-01	9,67E-01	5,879783815	-5,3800
4,75E+05	4,10E+01	1,24E+03	6,63E-01	4,40E-01	0,15615519	-5,3800
2,08E+03	4,90E-02	1,99E+00	9,63E-01	9,27E-01	4,516787732	-5,3700
1,99E+05	1,00E-01	1,02E+00	8,54E-01	7,30E-01	3,154475145	-5,3700

3,04E+04	7,93E-02	1,62E+00	9,10E-01	8,28E-01	3,552048235	-5,3500
4,27E+04	1,56E-01	-8,98E-01	9,31E-01	8,67E-01	2,534487054	-5,3400
1,65E+05	4,87E-02	1,97E+00	9,07E-01	8,23E-01	4,531909269	-5,3400
2,78E+05	9,45E-02	6,14E-01	9,75E-01	9,50E-01	3,253495682	-5,3200
2,07E+05	2,27E-02	7,53E-01	2,38E-01	5,65E-02	6,639698101	-0,9400
1,26E+05	4,34E-02	1,71E-01	8,63E-01	7,45E-01	4,800162447	-0,9300
1,28E+05	6,66E-02	2,02E-02	9,82E-01	9,64E-01	3,874813069	-0,9200
3,61E+05	4,70E-02	1,14E-01	9,99E-01	9,98E-01	4,61423111	-0,8900
1,66E+05	3,33E-02	5,62E-01	5,17E-01	2,68E-01	5,481467081	-0,8800
1,01E+05	6,28E-02	4,95E-02	9,93E-01	9,85E-01	3,99048107	-0,8600
1,41E+05	6,30E-02	4,34E-02	9,99E-01	9,98E-01	3,984023386	-0,8400
2,32E+05	5,39E-02	-5,08E-02	9,76E-01	9,52E-01	4,306135739	-0,8000
2,47E+05	4,55E-02	3,65E-02	9,80E-01	9,60E-01	4,690017522	-0,8000
3,37E+05	1,94E-03	1,35E+00	1,43E-02	2,04E-04	22,71140484	-0,7300
1,52E+05	6,01E-02	1,79E-02	9,95E-01	9,90E-01	4,078714593	-0,6800
1,59E+05	4,91E-02	4,60E-02	9,93E-01	9,87E-01	4,51449601	-0,6800
1,14E+05	2,73E-02	1,44E-01	9,23E-01	8,52E-01	6,049185187	-0,6700
1,17E+04	2,25E-03	1,49E+00	2,54E-02	6,46E-04	21,08567995	-0,6100
1,67E+05	5,93E-02	-3,14E-02	9,80E-01	9,60E-01	4,104941529	-0,6100
3,87E+05	4,54E-02	3,66E-02	9,84E-01	9,68E-01	4,694678924	-0,6100
2,58E+05	5,97E-02	3,26E-02	9,98E-01	9,96E-01	4,091883312	-0,5700
2,18E+05	4,53E-02	8,10E-02	9,85E-01	9,71E-01	4,697023333	-0,5600
4,30E+05	6,13E-02	-3,59E-02	9,95E-01	9,89E-01	4,039265201	-0,5600
1,04E+05	7,39E-02	-5,29E-02	9,91E-01	9,82E-01	3,679656284	-0,5500
3,00E+05	4,72E-02	1,27E-02	9,97E-01	9,95E-01	4,604352446	-0,5200
1,80E+05	5,59E-02	-4,30E-02	9,97E-01	9,94E-01	4,228116526	-0,4700
2,32E+05	5,37E-02	-2,63E-02	1,00E+00	1,00E+00	4,313518402	-0,4500
3,56E+04	1,38E+02	-2,05E+02	7,97E-01	6,36E-01	0,085164859	-0,4300
4,68E+05	5,22E-02	-3,46E-02	9,98E-01	9,96E-01	4,375337085	-0,3700
4,69E+05	4,85E-02	6,13E-02	9,75E-01	9,51E-01	4,542780976	-0,3400
2,45E+05	5,54E-02	5,49E-02	9,79E-01	9,59E-01	4,24781952	-0,3300
2,73E+05	6,66E-02	-2,94E-02	9,96E-01	9,91E-01	3,874333658	-0,3300
1,52E+05	5,55E-02	-1,09E-02	9,99E-01	9,98E-01	4,244888112	-0,3100
2,58E+05	5,86E-02	5,55E-02	9,97E-01	9,94E-01	4,129399369	-0,2900
2,21E+05	6,02E-02	-2,90E-04	9,97E-01	9,94E-01	4,074533507	-0,1600

## Técnica de Riznichenco Onda S

```
1 sumlx2=0;
2 parreg=[];
3 [m,n]=size(pha_rizn_Tso);
4 for i=1:m-1
5     if pha_rizn_Tso(i,1)==pha_rizn_Tso(i+1,1)
6         x2(i-sumlx2)=(pha_rizn_Tso(i,4))^2;
7         Tso(i-sumlx2)=pha_rizn_Tso(i,3);
8     else
9         lx2(i)=length(x2)+1;
10        sumlx2=sum(lx2);
11        id=pha_rizn_Tso(sumlx2,1);
12        x2=[x2 (pha_rizn_Tso(i,4))^2];
13        Tso=[Tso pha_rizn_Tso(i,3)];
14        [m b R R2]=reglin(x2,Tso);
15        parreg=[parreg;id m b R R2];
16        x2=[];
17        Tso=[];
18    end
19    %pause
20 end
```

Tabla A.3: Cálculo de  $V_s$  mediante la técnica de Riznichenco para 80 eventos sísmicos. Los primeros 40 eventos se encuentran a la zona profunda del volcán, y los últimos 40 se encuentran en zona cercana al cráter

Codlocalización	m	b	r	$r^2$	$V_s$ (km/s)	Profundidad (km)
2,17E+05	9,81E-02	5,82E+01	9,20E-01	8,46E-01	3,193558339	-21,790
2,02E+05	1,18E-01	4,06E+01	8,95E-01	8,01E-01	2,915276571	-18,550
3,45E+05	7,13E-02	5,09E+01	8,90E-01	7,92E-01	3,744445669	-18,310
4,62E+05	1,15E-01	4,06E+01	7,89E-01	6,22E-01	2,950830525	-18,310
3,38E+05	1,32E-01	3,56E+01	9,15E-01	8,37E-01	2,747857132	-17,600
3,09E+05	6,40E-02	5,21E+01	6,05E-01	3,66E-01	3,953757479	-17,380
9,99E+04	8,07E-02	5,39E+01	8,53E-01	7,28E-01	3,520993254	-16,860
3,46E+05	1,41E-01	2,96E+01	9,40E-01	8,83E-01	2,662137814	-16,580
4,42E+05	1,34E-01	2,74E+01	9,72E-01	9,45E-01	2,734016269	-16,450
4,23E+05	2,01E-01	2,69E+01	7,94E-01	6,31E-01	2,230632698	-16,440
6,55E+03	1,22E-01	3,26E+01	9,57E-01	9,15E-01	2,862246029	-16,240
3,86E+05	-3,34E-02	6,81E+01	-1,16E-01	1,34E-02	¡NUM!	-16,130
3,33E+04	1,26E-01	3,11E+01	9,50E-01	9,02E-01	2,813640735	-15,500
4,36E+05	1,39E-01	2,46E+01	9,60E-01	9,21E-01	2,677498409	-15,460
2,82E+05	8,78E-02	4,90E+01	8,10E-01	6,57E-01	3,374534281	-15,330
1,43E+04	1,54E-01	2,00E+01	9,57E-01	9,17E-01	2,548952996	-15,060
1,68E+05	1,08E-02	6,31E+01	1,93E-02	3,73E-04	9,638803193	-15,040
1,12E+05	1,13E-01	3,20E+01	9,13E-01	8,33E-01	2,968531199	-15,010
4,26E+05	1,32E-01	2,85E+01	9,37E-01	8,77E-01	2,755888371	-15,010
3,08E+05	1,61E-01	2,10E+01	9,63E-01	9,27E-01	2,49308871	-14,970
2,21E+02	1,32E-01	2,44E+01	9,72E-01	9,45E-01	2,756228885	-14,860
1,36E+05	1,48E-01	2,37E+01	9,56E-01	9,14E-01	2,595066962	-14,800
3,09E+05	1,66E-01	2,37E+01	9,71E-01	9,42E-01	2,458095146	-14,720
2,41E+05	2,18E-01	1,93E+01	9,25E-01	8,56E-01	2,141146048	-14,680
1,26E+05	1,52E-01	2,13E+01	8,65E-01	7,48E-01	2,562430733	-14,510
2,05E+05	1,36E-01	2,03E+01	1,00E+00	9,99E-01	2,716011792	-14,380
4,75E+05	3,08E-01	2,81E+01	8,67E-01	7,51E-01	1,800415825	-14,370
1,88E+04	1,37E-01	2,35E+01	9,64E-01	9,29E-01	2,704835196	-14,210
4,04E+05	9,02E-02	2,89E+01	8,71E-01	7,58E-01	3,328825753	-14,160
2,35E+05	8,17E-02	3,18E+01	9,48E-01	8,98E-01	3,498642298	-13,980
3,33E+02	8,38E-02	3,22E+01	9,58E-01	9,17E-01	3,454614627	-13,930
7,85E+04	8,86E-02	3,02E+01	9,04E-01	8,17E-01	3,35928324	-13,930
3,99E+05	1,39E-01	2,56E+01	9,17E-01	8,40E-01	2,682922372	-13,890
2,82E+05	1,89E-01	2,13E+01	7,60E-01	5,78E-01	2,301033426	-13,880
1,03E+05	1,19E-01	2,91E+01	8,77E-01	7,70E-01	2,897736659	-13,840
1,24E+05	2,14E-01	1,46E+01	9,69E-01	9,38E-01	2,162636896	-13,740
1,29E+05	9,17E-02	2,98E+01	9,78E-01	9,57E-01	3,302207014	-13,700

2,01E+04	1,90E-01	2,47E+01	8,80E-01	7,74E-01	2,291657912	-13,570
7,43E+04	1,23E-01	2,57E+01	9,44E-01	8,91E-01	2,856049682	-13,560
2,59E+04	1,01E-01	6,59E-01	9,59E-01	9,20E-01	3,146045864	-0,9700
2,55E+05	1,38E-01	4,10E-01	9,82E-01	9,65E-01	2,690991442	-0,9600
2,07E+05	1,46E-01	1,17E+00	7,90E-01	6,24E-01	2,61946732	-0,9400
1,26E+05	1,20E-01	5,79E-01	8,59E-01	7,38E-01	2,890244106	-0,9300
1,28E+05	2,17E-01	2,41E-02	9,94E-01	9,88E-01	2,147041558	-0,9200
1,94E+05	-2,00E-01	8,14E+00	-1,92E-01	3,67E-02	¡NUM!	-0,9200
3,61E+05	1,48E-01	2,85E-01	9,98E-01	9,95E-01	2,603322397	-0,8900
1,66E+05	9,65E-02	1,49E+00	6,42E-01	4,12E-01	3,218460382	-0,8800
1,01E+05	2,01E-01	1,37E-01	9,90E-01	9,80E-01	2,230806845	-0,8600
1,41E+05	1,96E-01	1,71E-01	9,92E-01	9,85E-01	2,259943174	-0,8400
2,07E+05	1,20E-01	1,91E+00	6,02E-01	3,63E-01	2,888253325	-0,8200
1,79E+05	-1,23E-02	3,99E+00	-3,27E-02	1,07E-03	¡NUM!	-0,8100
2,32E+05	1,66E-01	2,63E-01	9,62E-01	9,26E-01	2,456802404	-0,8000
2,47E+05	1,74E-01	1,19E-01	9,89E-01	9,79E-01	2,39796337	-0,8000
2,85E+05	7,01E-02	2,16E+00	3,58E-01	1,28E-01	3,777590472	-0,7400
3,37E+05	1,49E-01	1,69E+00	6,60E-01	4,36E-01	2,590625995	-0,7300
1,52E+05	1,87E-01	1,88E-01	9,98E-01	9,95E-01	2,312700542	-0,6800
1,59E+05	1,40E-01	3,94E-01	9,94E-01	9,89E-01	2,671159697	-0,6800
1,14E+05	1,47E-01	2,06E-01	9,89E-01	9,79E-01	2,610236598	-0,6700
6,27E+04	1,53E-01	1,53E+00	5,10E-01	2,60E-01	2,558689542	-0,6600
1,17E+04	7,94E-02	2,13E+00	5,61E-01	3,15E-01	3,549258293	-0,6100
1,67E+05	2,64E-01	-1,90E-02	9,88E-01	9,76E-01	1,945741602	-0,6100
3,87E+05	1,60E-01	3,93E-01	9,64E-01	9,29E-01	2,49930005	-0,6100
2,58E+05	1,96E-01	6,96E-02	9,95E-01	9,90E-01	2,261007351	-0,5700
2,18E+05	1,28E-01	1,96E-01	9,95E-01	9,89E-01	2,797985047	-0,5600
4,30E+05	2,18E-01	4,14E-02	9,95E-01	9,90E-01	2,143974649	-0,5600
1,04E+05	1,84E-01	4,44E-02	9,94E-01	9,88E-01	2,333011757	-0,5500
3,00E+05	1,56E-01	2,00E-01	9,96E-01	9,92E-01	2,532990772	-0,5200
1,80E+05	2,48E-01	-2,56E-02	9,96E-01	9,92E-01	2,009826142	-0,4700
2,32E+05	1,31E-01	2,29E-01	9,99E-01	9,99E-01	2,762784702	-0,4500
3,56E+04	1,42E-01	1,75E-01	9,71E-01	9,42E-01	2,652321797	-0,4300
4,68E+05	1,33E-01	2,82E-01	9,93E-01	9,86E-01	2,743289794	-0,3700
4,69E+05	1,55E-01	1,36E-01	9,36E-01	8,76E-01	2,536849374	-0,3400
2,45E+05	1,48E-01	3,00E-01	9,68E-01	9,36E-01	2,601372433	-0,3300
2,73E+05	1,99E-01	-6,48E-02	9,92E-01	9,84E-01	2,240493573	-0,3300
1,52E+05	2,09E-01	8,07E-02	9,99E-01	9,97E-01	2,187654938	-0,3100
2,58E+05	2,09E-01	-4,52E-02	9,93E-01	9,86E-01	2,188662674	-0,2900
2,21E+05	2,01E-01	-8,82E-02	9,95E-01	9,90E-01	2,228315112	-0,1600
5,25E+03	1,67E-01	5,69E+00	9,05E-01	8,19E-01	2,445178821	5,1400

## A.2. Programa Velest

### A.2.1. Estructura de los archivos de entrada y salida de Velest

Toda la información y archivos deben de estar en el mismo directorio

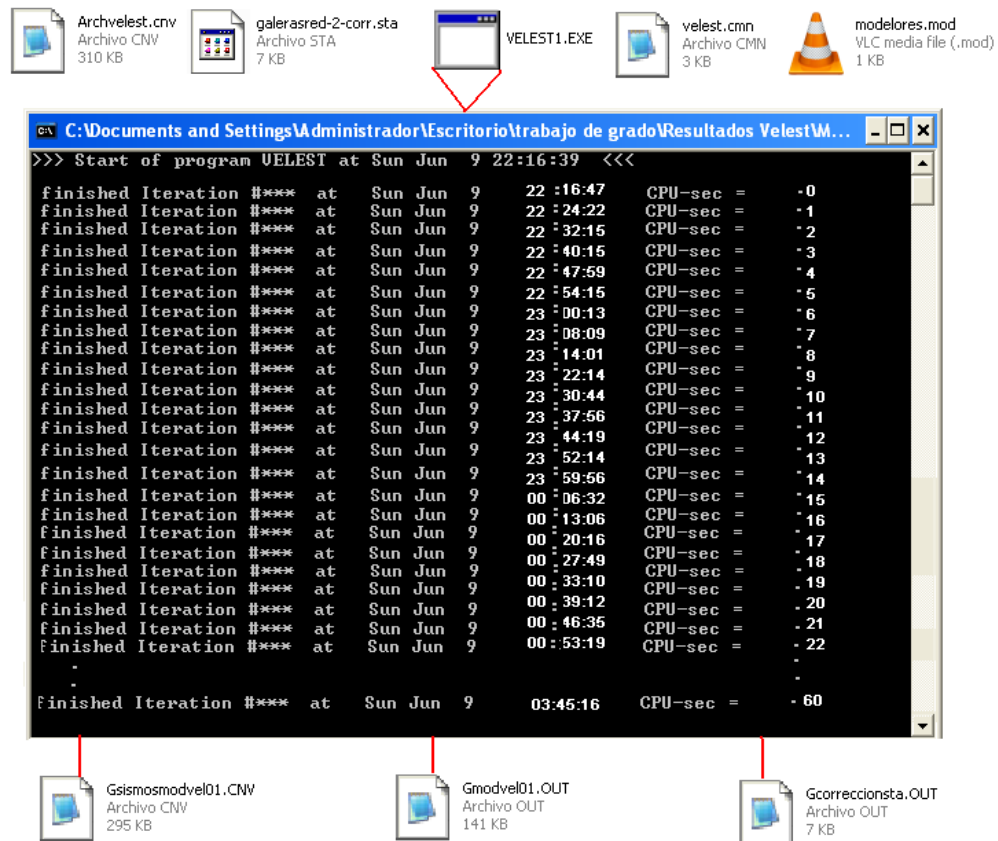
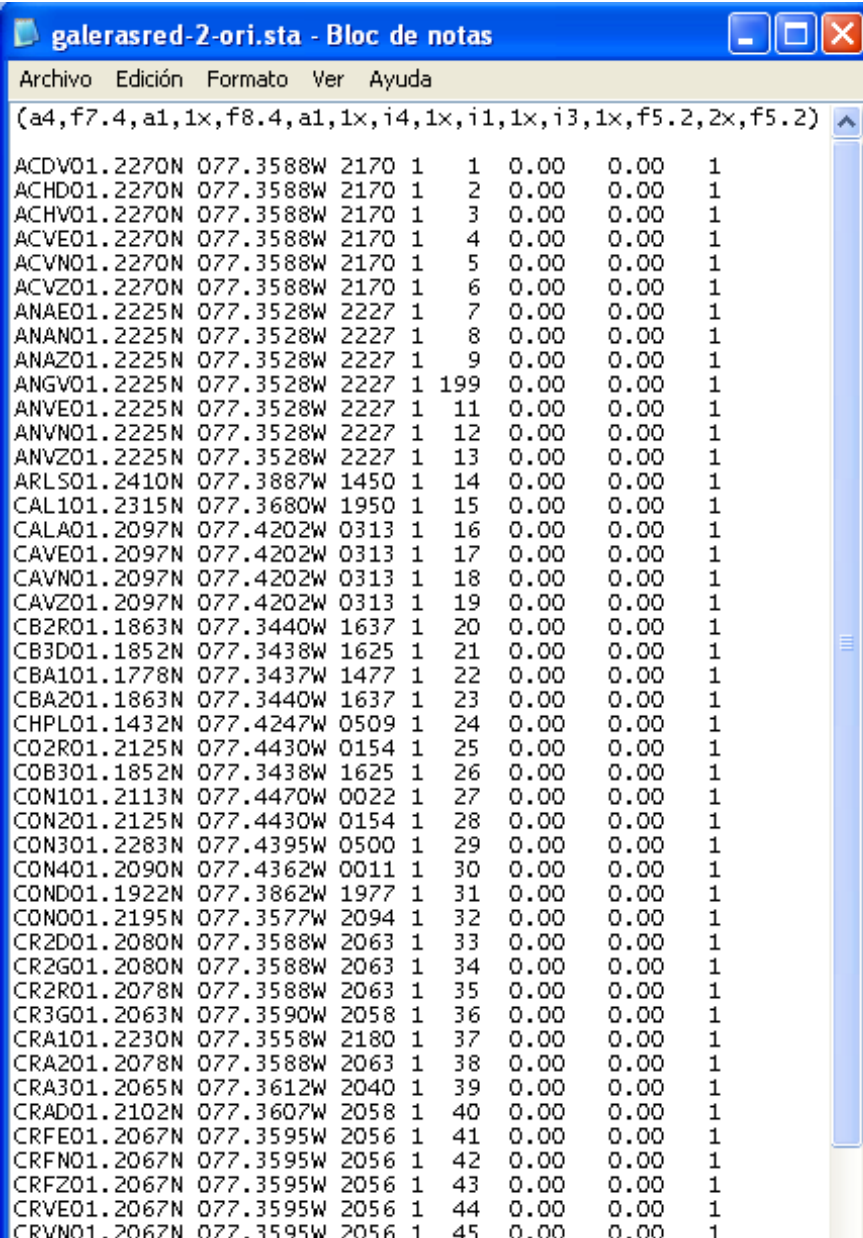


Figura A.1: En la parte superior se encuentran los archivos de entrada Archvelest.cnv, galerasred-2-corr.sta, Velest.cmn, Modelores.mod. El archivo VELEST.EXE empieza a ejecutarse después de definir todos los archivos de entrada necesarios para el proceso. Finalizadas las 60 iteraciones se generan los archivos de salida Gsismosmodvel01.CNV, Gmodvel01.OUT, Gcorreccionsta.OUT



### A.2.2. Contenido del archivo galerasred-2-corr.sta

Para los cuatro modelos iniciales se tiene el mismo archivo de entrada.



galerasred-2-ori.sta - Bloc de notas									
Archivo Edición Formato Ver Ayuda									
(a4,f7.4,a1,1x,f8.4,a1,1x,i4,1x,i1,1x,i3,1x,f5.2,2x,f5.2)									
ACDV01.2270N	077.3588W	2170	1	1	0.00	0.00	1		
ACHD01.2270N	077.3588W	2170	1	2	0.00	0.00	1		
ACHV01.2270N	077.3588W	2170	1	3	0.00	0.00	1		
ACVE01.2270N	077.3588W	2170	1	4	0.00	0.00	1		
ACVN01.2270N	077.3588W	2170	1	5	0.00	0.00	1		
ACVZ01.2270N	077.3588W	2170	1	6	0.00	0.00	1		
ANAE01.2225N	077.3528W	2227	1	7	0.00	0.00	1		
ANAN01.2225N	077.3528W	2227	1	8	0.00	0.00	1		
ANAZ01.2225N	077.3528W	2227	1	9	0.00	0.00	1		
ANGV01.2225N	077.3528W	2227	1	199	0.00	0.00	1		
ANVE01.2225N	077.3528W	2227	1	11	0.00	0.00	1		
ANVN01.2225N	077.3528W	2227	1	12	0.00	0.00	1		
ANVZ01.2225N	077.3528W	2227	1	13	0.00	0.00	1		
ARL501.2410N	077.3887W	1450	1	14	0.00	0.00	1		
CAL101.2315N	077.3680W	1950	1	15	0.00	0.00	1		
CALA01.2097N	077.4202W	0313	1	16	0.00	0.00	1		
CAVE01.2097N	077.4202W	0313	1	17	0.00	0.00	1		
CAVN01.2097N	077.4202W	0313	1	18	0.00	0.00	1		
CAVZ01.2097N	077.4202W	0313	1	19	0.00	0.00	1		
CB2R01.1863N	077.3440W	1637	1	20	0.00	0.00	1		
CB3D01.1852N	077.3438W	1625	1	21	0.00	0.00	1		
CBA101.1778N	077.3437W	1477	1	22	0.00	0.00	1		
CBA201.1863N	077.3440W	1637	1	23	0.00	0.00	1		
CHPL01.1432N	077.4247W	0509	1	24	0.00	0.00	1		
CO2R01.2125N	077.4430W	0154	1	25	0.00	0.00	1		
COB301.1852N	077.3438W	1625	1	26	0.00	0.00	1		
CON101.2113N	077.4470W	0022	1	27	0.00	0.00	1		
CON201.2125N	077.4430W	0154	1	28	0.00	0.00	1		
CON301.2283N	077.4395W	0500	1	29	0.00	0.00	1		
CON401.2090N	077.4362W	0011	1	30	0.00	0.00	1		
COND01.1922N	077.3862W	1977	1	31	0.00	0.00	1		
CONQ01.2195N	077.3577W	2094	1	32	0.00	0.00	1		
CR2D01.2080N	077.3588W	2063	1	33	0.00	0.00	1		
CR2G01.2080N	077.3588W	2063	1	34	0.00	0.00	1		
CR2R01.2078N	077.3588W	2063	1	35	0.00	0.00	1		
CR3G01.2063N	077.3590W	2058	1	36	0.00	0.00	1		
CRA101.2230N	077.3558W	2180	1	37	0.00	0.00	1		
CRA201.2078N	077.3588W	2063	1	38	0.00	0.00	1		
CRA301.2065N	077.3612W	2040	1	39	0.00	0.00	1		
CRAD01.2102N	077.3607W	2058	1	40	0.00	0.00	1		
CRFE01.2067N	077.3595W	2056	1	41	0.00	0.00	1		
CRFN01.2067N	077.3595W	2056	1	42	0.00	0.00	1		
CRFZ01.2067N	077.3595W	2056	1	43	0.00	0.00	1		
CRVE01.2067N	077.3595W	2056	1	44	0.00	0.00	1		
CRVN01.2067N	077.3595W	2056	1	45	0.00	0.00	1		

Parte del archivo continúa en la siguiente página

OBEO1.1892N	077.3222W	1021	1	56	0.00	0.00	1
OBEO1.1892N	077.3222W	1021	1	57	0.00	0.00	1
OBNO1.1892N	077.3222W	1021	1	58	0.00	0.00	1
OBNS01.1892N	077.3222W	1021	1	59	0.00	0.00	1
OBUS01.1892N	077.3222W	1021	1	60	0.00	0.00	1
OBVE01.1892N	077.3222W	1021	1	61	0.00	0.00	1
OBVN01.1892N	077.3222W	1021	1	62	0.00	0.00	1
OBVR01.1892N	077.3222W	1021	1	63	0.00	0.00	1
OBVZ01.1892N	077.3222W	1021	1	64	0.00	0.00	1
OLGA01.2228N	077.3523W	2199	1	65	0.00	0.00	1
OLGV01.2228N	077.3523W	2199	1	66	0.00	0.00	1
PLAZ01.2555N	077.2808W	1088	1	67	0.00	0.00	1
PNVE01.2128N	077.3313W	1346	1	68	0.00	0.00	1
PNVN01.2128N	077.3313W	1346	1	69	0.00	0.00	1
PNVZ01.2128N	077.3313W	1346	1	70	0.00	0.00	1
PUYI01.2923N	077.3228W	0342	1	71	0.00	0.00	1
TELZ01.2572N	077.2760W	1099	1	72	0.00	0.00	1
URCO01.2165N	077.3378W	1494	1	73	0.00	0.00	1
URCR01.2165N	077.3378W	1494	1	74	0.00	0.00	1
UREW01.2165N	077.3378W	1494	1	75	0.00	0.00	1
URNS01.2165N	077.3378W	1494	1	76	0.00	0.00	1

Figura A.2: Archivo completo de información de las estaciones que conforman la Red de Vigilancia Sísmica Galeras

### A.2.3. Contenido del archivo Archvelest.cnv

El archivo completo presenta 1382 sismos tipo VT. Tiene gran contenido y por lo tanto solo se anexa 27 eventos sísmicos. Utilizado para los cuatro modelos iniciales.

Archvelest.cnv - Bloc de notas												
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda								
230314	1514	39.68	1.2382N	77.3213W	7.92	0.00	287	0.0	0.04	0.3	0.1	
URCRPO	2.12	URCRS3	3.560BVRPO	2.250BVR52	3.920LGAP0	2.350LGAS2	4.12					
ANGVPO	2.32	ANGVS2	4.24CRVZPO	2.53CRVZ52	4.48CR2RP1	2.63CR2RS2	4.53					
CAVZPO	3.08	CAVZ52	5.37									
010522	1506	24.00	1.2640N	77.3063W	8.11	0.00	139	0.0	0.07	0.4	0.6	
PUYIPO	1.82	PUYIS2	3.21PLAZPO	1.88PLAZ52	3.55URCRPO	2.61URCRS2	4.42					
OLGAP0	2.90	OLGAS2	5.01CR2RPO	2.97CR2RS2	5.31CAVZPO	3.47CAVZ52	5.92					
000325	0052	48.32	1.2522N	77.3487W	5.27	0.00	206	0.0	0.05	0.3	0.2	
NAR2PO	1.24	NAR2S2	2.08URCRPO	1.75URCRS2	2.980LGAP0	1.800LGAS2	3.02					
CR2RPO	2.05	CR2RS2	4.00COB3PO	2.22COB3S2	4.12CAVZPO	2.38CAVZ52	4.28					
950613	1703	0.13	1.2580N	77.3577W	5.50	0.00	184	0.0	0.08	0.5	0.4	
NAR2PO	1.19	NAR2S2	2.57URCRPO	1.78URCRS2	3.290LGAP0	1.920LGAS2	3.37					
CONOPO	1.94	CONOS2	3.44CR2RPO	2.15CR2RS2	3.80CONOPO	2.73CONOS2	4.42					
960616	0443	31.46	1.2553N	77.3148W	6.03	0.00	166	0.0	0.07	0.3	0.3	
PLAZPO	1.56	PLAZS2	2.89NAR2PO	1.76NAR2S2	3.22URCRPO	1.92URCRS2	3.40					
OLGAP0	2.12	OLGAS2	3.77CONOPO	2.36CONOS2	3.92CR2RPO	2.67CR2RS2	4.45					
031025	1808	58.92	1.2497N	77.3302W	7.71	0.00	234	0.0	0.07	0.5	0.1	
OBVRPO	2.26	OLGAP0	2.34CR2RPO	2.62NAR2PO	1.89NAR2S2	3.49URCRPO	2.12					
URCRS2	3.75	ANGVPO	2.33ANGVS2	4.23CRVZPO	2.47CRVZ52	4.44CAVZPO	3.07					
CAVZ52	5.26											
050426	0642	21.85	1.2187N	77.3555W	3.00	0.00	153	0.0	0.06	0.2	0.2	
COB3PO	1.24	CR2RPO	0.86CR2RS2	1.51URCRPO	0.82URCRS2	1.46NAR2PO	1.36					
NAR2S2	2.50	OBVRPO	1.300BVR52	2.42CUVZPO	0.80CUVZ52	1.41						
041219	1550	39.85	1.1693N	77.3433W	6.11	0.00	250	0.0	0.07	0.3	0.3	
COB3PO	1.46	CR2RPO	2.04CR2RS2	3.62URCRPO	2.05URCRS2	3.51NAR2PO	3.03					
NAR2S2	5.26	OBVRPO	1.370BVR52	2.82CUVZPO	2.30CUVZ52	3.98CAVZPO	2.50					
CAVZ52	4.48											
080922	1021	9.33	1.2290N	77.3835W	3.38	0.00	146	0.0	0.05	0.1	0.2	
COB3PO	1.87	ANGVPO	1.43ANGVS2	2.520BVRPO	2.190BVR52	3.59URCRPO	1.67					
URCRS2	2.78	NAR2PO	1.24NAR2S2	2.21CONOPO	1.48CONOS2	2.55CUVZPO	1.43					
CUVZ52	2.48	CAVZPO	1.05CAVZ52	1.86								
950315	0633	0.06	1.2578N	77.3212W	3.58	0.00	168	0.0	0.06	0.2	0.4	
NAR2PO	1.26	NAR2S2	2.27TEL2PO	1.43TEL2S2	2.50URCRPO	1.61URCRS2	2.88					
OLGAP0	1.81	OLGAS2	3.23CONOPO	1.90CONOS2	3.37CR2RPO	2.09CR2RS2	3.61					
020325	0839	44.49	1.2695N	77.3492W	6.11	0.00	180	0.0	0.08	0.4	0.2	
NAR2PO	1.33	NAR2S2	2.30URCRPO	2.15URCRS2	3.720LGAP0	2.200LGAS2	3.79					
ANGVPO	2.29	ANGVS2	3.95CRVZP1	2.48CRVZ53	4.16CR2RPO	2.50CR2RS2	4.22					
OBVRPO	2.57	OBVR52	4.35CAVZP1	2.60CAVZ52	4.42COB3P1	2.84COB3S2	4.89					
LOEWP1	2.55	LOEWS3	4.30									
020419	0254	40.49	1.2272N	77.3540W	3.05	0.00	136	0.0	0.06	0.1	0.2	
OLGAP0	0.88	OLGAS2	1.53URCRPO	0.90URCRS2	1.55ANGVPO	0.97ANGVS2	1.63					
CR2RP1	1.06	CR2RS2	1.80CRVZP1	1.13CRVZ52	1.85NAR2PO	1.17NAR2S2	1.92					
OBVRPO	1.43	OBVR52	2.38CAVZPO	1.80CAVZ52	3.14							
960117	0035	10.09	1.2098N	77.3262W	3.27	0.00	209	0.0	0.07	0.2	0.3	
URCRPO	0.94	URCRS2	1.510LGAP0	1.330LGAS2	2.21CONOPO	1.38CONOS2	2.35					
CR2RPO	1.44	CR2RS2	2.38PLAZPO	1.84PLAZ52	3.40CONOPO	2.04CONOS2	3.57					
NAR2PO	2.04	NAR2S2	3.58PUYIPO	2.25PUYIS2	3.85							

Parte del archivo continúa en la siguiente página

030421	0738	14.45	1.2503N	77.2695W	11.94	0.00	325	0.0	0.05	1	1
URCRPO	3.25	OLGAPO	3.47	ACVZPO	3.48	CR2RPO	3.67	OBVRPO	3.11	OBVRS2	5.44
ANGVPO	3.48	ANGVS2	6.32	CRVZPO	3.66	CRVZS2	6.56	CAVZPO	4.04	CAVZS2	7.43
010421	2128	1.69	1.2868N	77.2900W	10.45	0.00	244	0.0	0.08	0.7	0.8
PUYIPO	2.17	PLAZPO	2.29	NAR2PO	2.88	CR2RPO	3.85	URCRPO	3.13	URCRS2	5.75
OLGAPO	3.41	OLGAS2	6.02	COB3PO	3.65	COB3S2	6.46	CAVZPO	3.92	CAVZS2	6.98
070226	1733	16.67	1.2455N	77.2762W	12.87	0.00	323	0.0	0.04	0.7	0.4
ANGVPO	3.49	ANGVS2	6.31	COB3PO	3.58	COB3S2	6.21	OBVRPO	3.05	OBVRS2	5.49
URCRPO	3.16	URCRS2	5.67	CAVZPO	4.06	CAVZS2	7.14				
020505	1503	50.59	1.1197N	77.3848W	13.88	0.00	296	0.0	0.05	0.8	0.8
CAVZPO	3.31	CAVZS2	5.90	COB3PO	3.38	COB3S2	5.93	OBVRPO	3.57	OBVRS3	6.30
CR2RPO	3.71	CR2RS2	6.67	CRVZPO	3.73	CRVZS2	6.71	URCRP1	3.87	URCRS2	6.86
ANGVPO	3.97	ANGVS2	7.11	OLGAPO	4.01	OLGAS2	7.12				
890817	1810	32.76	1.2700N	77.2863W	12.78	0.00	307	0.0	0.06	0.7	0.5
NAR2PO	3.00	NAR2S2	5.50	URCRPO	3.26	URCRS2	5.77	CB2RPO	3.69	CB2RS2	6.31
CR2RPO	3.72	CR2RS2	6.54	CO2RPO	4.29	CO2RS2	7.72				
890823	2022	20.72	1.2735N	77.2795W	12.31	0.00	311	0.0	0.06	0.6	0.6
NAR2PO	3.04	NAR2S2	5.45	URCRPO	3.26	URCRS2	5.73	CB2RPO	3.66	CB2RS2	6.50
CR2RPO	3.81	CR2RS2	6.51	CO2RPO	4.29	CO2RS2	7.86				
890824	1936	49.95	1.2798N	77.2827W	12.12	0.00	312	0.0	0.08	0.9	0.8
NAR2P2	3.02	NAR2S2	5.36	URCRPO	3.29	URCRS2	5.79	CB2RPO	3.61	CB2RS2	6.28
CR2RPO	3.79	CR2RS2	6.86	CO2RP1	4.41	CO2RS2	7.79				
010731	1503	7.92	1.3073N	77.2610W	11.68	0.00	312	0.0	0.07	0.8	0.9
PLAZPO	2.70	PLAZS2	4.57	NAR2PO	3.32	NAR2S2	6.24	URCRPO	3.74	URCRS2	6.78
OLGAPO	3.94	OLGAS2	7.16	CR2RPO	4.27	CR2RS2	7.70				
011004	0039	36.92	1.1352N	77.4673W	12.05	0.00	324	0.0	0.08	0.9	0.9
CAVZPO	3.05	CAVZS3	5.34	COB3PO	4.17	COB3S3	7.26	OLGAPO	4.31	OLGAS3	7.60
CR2RPO	4.33	CR2RS3	7.69	URCRPO	4.47	URCRS3	7.76	NAR2PO	4.52	NAR2S3	7.86
PUYIPO	5.28	PUYIS3	9.14								
890820	2005	35.54	1.2833N	77.2905W	11.37	0.00	311	0.0	0.06	0.7	0.6
NAR2PO	2.93	NAR2S2	5.06	URCRPO	3.23	URCRS2	5.65	CB2RPO	3.57	CB2RS2	6.18
CR2RPO	3.70	CR2RS2	6.61	CO2RPO	4.26	CO2RS2	7.64				
990407	1843	44.80	1.2732N	77.2825W	10.26	0.00	239	0.0	0.05	0.4	0.3
PLAZPO	2.16	PLAZS3	3.90	PUYIPO	2.30	PUYIS3	3.99	NAR2PO	2.83	NAR2S3	5.14
URCRPO	3.13	URCRS3	5.51	OLGAPO	3.32	OLGAS3	5.91	CR2RPO	3.59	CR2RS3	6.25
CAVZPO	3.95	CAVZS3	7.01								
040517	0208	4.03	1.2515N	77.2780W	11.49	0.00	322	0.0	0.01	0.4	0.4
URCRPO	3.02	URCRS0	5.37	ANGVPO	3.37	ANGVS0	5.98	CRVZPO	3.50	CRVZS0	6.26
OBVRPO	2.97	OLGAPO	3.35	ACVEPO	3.44	CR2RPO	3.54				
020907	0646	20.78	1.2783N	77.2977W	11.99	0.00	295	0.0	0.06	0.5	0.4
NAR2PO	2.86	NAR2S2	5.07	OBVRPO	3.14	OBVRS3	5.76	URCRPO	3.22	URCRS3	5.87
OLGAPO	3.42	OLGAS2	6.05	ANGVPO	3.45	ANGVS2	6.10	CRVZPO	3.69	CRVZS3	6.49
CAVZPO	3.86	CAVZS2	6.84								
030222	2024	12.80	1.2458N	77.4507W	10.52	0.00	322	0.0	0.04	0.8	0.4
CAVZPO	2.31	CAVZS2	4.02	ACVZPO	3.46	ACVZS2	6.26	CR2RPO	3.49	CR2RS2	6.35
CRVZP1	3.51	CRVZS2	6.40	OLGAPO	3.57	OLGAS2	6.46	ANGVPO	3.59	ANGVS2	6.48

Figura A.3: Eventos sísmicos tipo VT, donde se escogieron sismos de profundidad cercana al cráter, media y sismos profundos. La totalidad de eventos corresponde a 1382

### A.2.4. Contenido del Archivo Velest.cmn

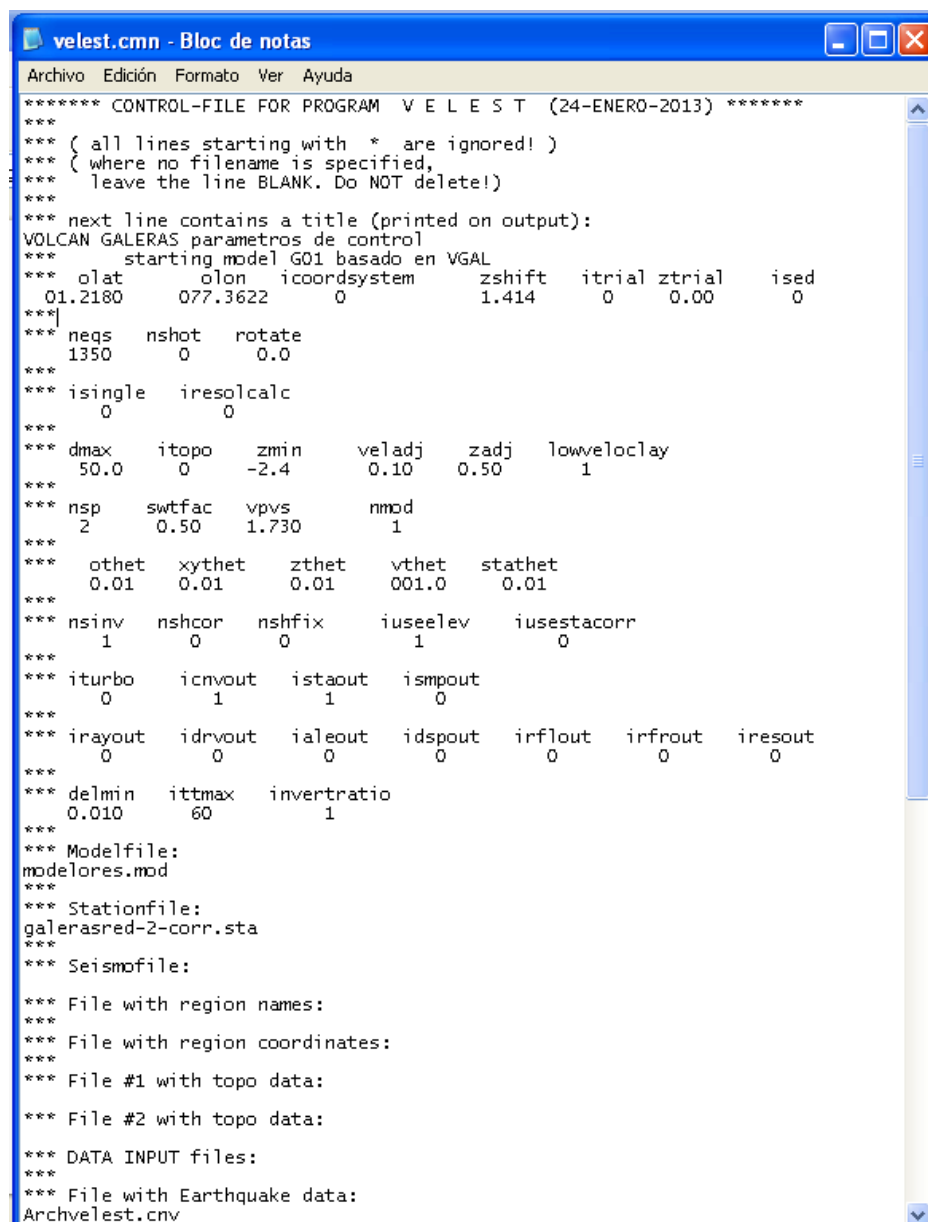
La Tabla A.4 presenta la explicación de cada uno de los parámetros de control, Valor Default significa el valor normal o de referencia que puede presentar cada uno.

Tabla A.4: Definición de cada uno de los parámetros de control utilizados para el procedimiento

Parámetro de Control	Definición	Default Valor
<b>OLON</b>	Longitud y latitud (en grados)	
<b>ROTATE</b>	Denota el angulo rotado el eje y con respecto al Norte	
<b>Icoordsystem</b>	=0 Conversión de corta distancia de sistema de coordenadas cartesianas todas sobre la tierra con valores positivos representando Longitud Este = 1 En este caso para Longitud Oeste =2 Latitudes y Longitudes en grados decimales	
<b>Zshift</b>	Promedio de altitudes de las estaciones	0.0
<b>Itrial</b>	Usa coordenadas hipocentrales y promedios de altitudes =0 Uso de coordenadas hipocentrales provenientes de mapas =1 Hipocentros de prueba iguales a las coordenadas de las estaciones de observaciones y ztrial para profundidad	0.0
<b>Ised</b>	Formato CNV para el archivo de sismos =0 En formato de archivo (.CNV) =1 Formato tipo VELEST =2 Formato SED	
<b>Neqs</b>	Número de sismos utilizados	1.0
<b>Nshot</b>	Número de explosiones	1.0
<b>Isingle</b>	Modo de Velest =0 Modo simultaneo =1 Modo evento singular	0.0
<b>Iresolcalc</b>	Cálculo de la matriz en modo evento singular	0.0
<b>Dmáx</b>	Máxima distancia epicentral para el uso de las fases	200.0
<b>Itopo</b>	Este modificador es útil para la localización exacta de los sismos de poca profundidad en las áreas de topografía muy aspera	0.0
<b>Zmin</b>	Mínima profundidad de los hipocentros	0.0
<b>Veladj</b>	Ajuste máximo de la velocidad de capa en cada paso de iteración	0.2
<b>Zadj</b>	Ajuste máximo de la profundidad hipocentral en cada paso de iteración	5.0
<b>Lowveloclay</b>	Puede provocar bajas velocidades	0.0

<b>Nsp</b>	=1 Solo fases P =2 Fases P y S =2 P-S tiempo de viaje relativo	1.0
<b>Swtfac</b>	Factor de ponderación general de datos de ondas S en relación con la onda P	0.5
<b>Vp/Vs</b>	Valor de la relación hallado mediante el método de Wadati	1.73
<b>Nmod</b>	Número de modelos de velocidad	1
<b>Othet</b>	Parámetro de amortiguamiento de tiempo de origen	0.01
<b>Xythet</b>	Parámetro de amortiguamiento en el epicentro	0.01
<b>Zthet</b>	Parámetro de amortiguamiento en la profundidad	0.01
<b>Vthet</b>	Amortiguamiento en el modelo de velocidad	1.0
<b>Stathet</b>	Amortiguamiento de correcciones de estación	0.1
<b>Nsinv</b>	= 0 No invierte para correcciones de estación =1 Invierte para correcciones por estación	0
<b>Nshcor</b>	= 0 No aplica explosiones =1 Aplica explosiones	0
<b>Nshfix</b>	No fija explosiones	
<b>Iuseelev</b>	=0 No usa elevaciones de estaciones	1.0
<b>Iusestacorr</b>	=0 Elevaciones de estaciones de el archivo de entrada son ignoradas	0.0
<b>Iturbo</b>	= 1 No se crean archivos adicionales =0 Archivos de salida son creados	1.0
<b>Icnvout</b>	Se crea archivo de salida de hipocentros finales	1.0
<b>Istaout</b>	Se crea archivo de salida de correcciones de estaciones finales	1.0
<b>Idrvout</b>	No se crea archivo de salida de derivadas parciales de todos los rayos	0.0
<b>Idspout</b>	No se crea archivo de salida de coordenadas y DSPR de todos los eventos localizados	0.0
<b>Irflout</b>	No se crea archivo de salida de coordenadas y residuales de rayos reflejados	0.0
<b>Irfrout</b>	No se crea archivo de salida de coordenadas y residuales de rayos refractados	0.0
<b>Delmin</b>	Solo utilizado en modo de evento singular	0.01
<b>Ittmax</b>	Número máximo de iteraciones	N
<b>Ivertratio</b>	En forma simultánea VELEST puede invertir para todos los hipocentros y modelos (correcciones por estación)	1.0

La siguiente gráfica corresponde al archivo completo de entrada de los parámetros de control Velest.cmn correspondiente al modelo de velocidad VGal



```

velest.cmn - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
***** CONTROL-FILE FOR PROGRAM V E L E S T (24-ENERO-2013) *****
***
*** ( all lines starting with * are ignored! )
*** ( where no filename is specified,
***   leave the line BLANK. Do NOT delete!)
***
*** next line contains a title (printed on output):
VOLCAN GALERAS parametros de control
***   starting model G01 basado en VGAL
***   olat      olon  icoordsystem  zshift  itrial  ztrial  ised
***   01.2180   077.3622   0          1.414   0       0.00    0
***
***   negs      nshot   rotate
***   1350      0       0.0
***
***   isingle   iresolcalc
***   0         0
***
***   dmax      itopo    zmin      veladj   zadj     lowveloclay
***   50.0      0        -2.4      0.10    0.50     1
***
***   nsp       swtfac   vpvs      nmod
***   2         0.50    1.730    1
***
***   othet     xythet   zthet    vthet    stathet
***   0.01      0.01    0.01     001.0    0.01
***
***   nsinv     nshcor   nshfix   iuseelev  iusestacorr
***   1         0       0         1         0
***
***   iturbo    icnvout  istaout  ismpout
***   0         1       1         0
***
***   irayout   idrvout  ialeout  idspout   irflout   irfrout   iresout
***   0         0       0         0         0         0         0
***
***   delmin    ittmax   invertratio
***   0.010     60      1
***
*** Modelfile:
modelores.mod
***
*** Stationfile:
galerasred-2-corr.sta
***
*** Seismofile:
***
*** File with region names:
***
*** File with region coordinates:
***
*** File #1 with topo data:
***
*** File #2 with topo data:
***
*** DATA INPUT files:
***
*** File with Earthquake data:
Archvelest.cnv

```

Parte del archivo continúa en la siguiente página

```

***
*** File with Shot data:
***
*** OUTPUT files:
***
*** Main print output file:
Gmodvel01.OUT
***
*** File with single event locations:
***
*** File with final hypocenters in *.cnv format:
Gsismosmodvel01.CNV
***
*** File with new station corrections:
Gcorreccionsta.OUT
***
*** File with summary cards (e.g. for plotting):
***
*** File with raypoints:
***
*** File with derivatives:
***
*** File with ALEs:
***
*** File with Dirichlet spreads:
CALDIRSPRED.DIS
***
*** File with reflection points:
***
*** File with refraction points:
***
*** File with residuals:
***
***** END OF THE CONTROL-FILE FOR PROGRAM V E L E S T *****

```

Figura A.4: Archivo completo de los parámetros de control con sus respectivos valores asignados

### A.3. Rutina Localizaciones

#### Localizaciones

```

1 [longfila longcol]=size(a2);
2 figure(1)
3 plot(a2(:,2),a2(:,1),'or','MarkerSize',3) hold on plot(a2(:,5),a2↵
    (:,4),'og','MarkerSize',3)
4 p1=[-77.483.....1.090];
5 p2=[-77.519.....1.268];
6 p3=[-77.423.....1.282];
7 p4=[-77.463.....1.198];

```



```
8  p5=[ -77.475.....1.206];
9  p6=[ -77.408.....1.301];
10 p7=[ -77.337.....1.273];
11 p8=[ -77.365..... 1.288];
12 p9=[ -77.500.....1.254];
13 p10=[ -77.479.....1.278];
14 p11=[ -77.322.....1.079];
15 p12=[ -77.304.....1.170];
16 p13=[ -77.397.....1.099];
17 p14=[ -77.204.....1.328];
18 p15=[ -77.406.....1.116];
19 p16=[ -77.368.....1.228];
20 p17=[ -77.364.....1.121];
21 p18=[ -77.400.....1.193];
22 p19=[ -77.462.....1.166];
23 p20=[ -77.472.....1.206];
24 p21=[ -77.116.....1.148];
25 p22=[ -77.190.....0.982];
26 p23=[ -77.198.....1.122];
27 p24=[ -77.217.....1.343];
28 p25=[ -77.397.....1.286];
29 p26=[ -77.457.....1.315];
30 p27=[ -77.462.....1.295];
31 p28=[ -77.462.....1.325];
32 p29=[ -77.476.....1.322];
33 p30=[ -77.445.....1.342];
34 p31=[ -77.388.....1.343];
35 p32=[ -77.471.....1.339];
36 p33=[ -77.366.....1.339];
37 p34=[ -77.312.....1.242];
38 plot(p1(:,1),p1(:,2) , 'k') hold on plot(p2(:,1),p2(:,2) , 'k')
```

```

39 hold on plot(p3(:,1),p3(:,2),'k') hold on plot(p4(:,1),p4(:,2),'k↔
    ')
40 hold on plot(p5(:,1),p5(:,2),'k') hold on plot(p6(:,1),p6(:,2),'k↔
    ')
41 hold on plot(p7(:,1),p7(:,2),'k') hold on plot(p8(:,1),p8(:,2),'k↔
    ')
42 hold on plot(p9(:,1),p9(:,2),'k') hold on plot(p10(:,1),p10(:,2),↔
    'k')
43 hold on plot(p11(:,1),p11(:,2),'k') hold on plot(p12(:,1),p12↔
    (:,2),'k')
44 hold on plot(p13(:,1),p13(:,2),'k') hold on plot(p14(:,1),p14↔
    (:,2),'k')
45 hold on plot(p15(:,1),p15(:,2),'k') hold on plot(p16(:,1),p16↔
    (:,2),'k')
46 hold on plot(p17(:,1),p17(:,2),'k') hold on plot(p18(:,1),p18↔
    (:,2),'k')
47 hold on plot(p19(:,1),p19(:,2),'k') hold on plot(p20(:,1),p20↔
    (:,2),'k')
48 hold on plot(p21(:,1),p21(:,2),'k') hold on plot(p22(:,1),p22↔
    (:,2),'k')
49 hold on plot(p23(:,1),p23(:,2),'k') hold on plot(p24(:,1),p24↔
    (:,2),'k')
50 hold on plot(p25(:,1),p25(:,2),'k') hold on plot(p26(:,1),p26↔
    (:,2),'k')
51 hold on plot(p27(:,1),p27(:,2),'k') hold on plot(p28(:,1),p28↔
    (:,2),'k')
52 hold on plot(p29(:,1),p29(:,2),'k') hold on plot(p30(:,1),p30↔
    (:,2),'k')
53 hold on plot(p31(:,1),p31(:,2),'k') hold on plot(p32(:,1),p32↔
    (:,2),'k')

```

```
54 hold on plot(p33(:,1),p33(:,2),'k') hold on plot(p34(:,1),p34(:,2),'k')
55 axis([-77.55 -77.08 0.97 1.40])
56 axis('square')
57 grid
58 %Gráfica Perfil Este-profundidad
59 figure(2)
60 plot(a2(:,2),a2(:,3),'or','MarkerSize',3) hold on plot(a2(:,5),a2(:,6),'og','MarkerSize',3)
61 peo=[-77.484 -2.4
62 -77.463 -2.19
63 -77.458 -2.22
64 -77.450 -2
65 -77.439 -1.92
66 -77.425 -2.02
67 -77.408 -1.4
68 -77.399 -1.1
69 -77.394 -1.12
70 -77.385 -0.89
71 -77.382 -0.9
72 -77.374 -0.5
73 -77.366 -0.2
74 -77.362 0.15
75 -77.358 -0.1
76 -77.356 0.1
77 -77.347 -0.4
78 -77.313 -1.4
79 -77.297 -1.6
80 -77.253 -1.56];
81 plot(peo(:,1),peo(:,2),'k')
82 axis([-77.50 -77.20 -16 2])
```

```
83 grid
84 %Perfil Norte—profundidad
85 figure(3)
86 plot(a2(:,1),a2(:,3),'or','MarkerSize',3) hold on plot(a2(:,4),a2(:,6),'og','MarkerSize',3)
87 pns=[1.096    -1.8
88      1.110    -1.2
89      1.121    -1
90      1.138    -1.2
91      1.167    -0.8
92      1.199    -0.4
93      1.208    -0.15
94      1.214    -0.3
95      1.220    -0.2
96      1.221     0
97      1.224     0.2
98      1.228    -0.1
99      1.230     0
100     1.250    -0.3
101     1.270    -1.65
102     1.277    -1.6
103     1.295    -1.9
104     1.309    -1.75
105     1.328    -2.1];
106 plot(pns(:,1),pns(:,2),'k')
107 axis([1.09 1.34 -16 2])
108 grid
```

#### A.4. Histograma de Frecuencias (ROOT Cern versión v5-34-10)

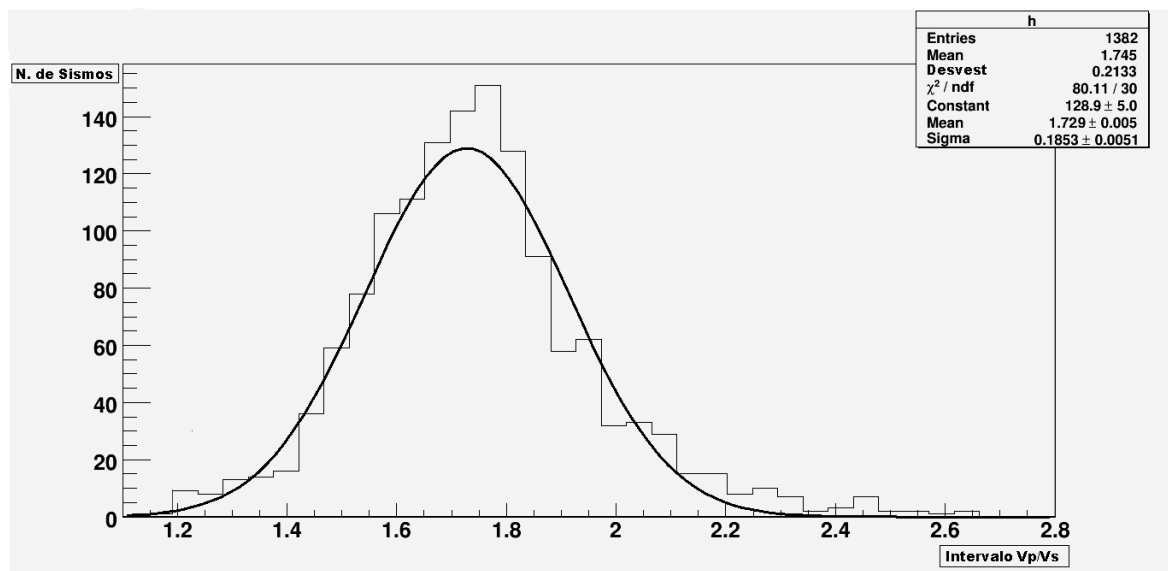


Figura A.5: Histograma de frecuencias y curva gaussiana obtenidos por procesamiento de datos mediante el programa ROOT Cern. En el recuadro en la parte superior derecha se encuentran las medidas de tendencia para el histograma y gaussiana