

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE ESTUDIOS DE RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL Y GRAVIMÉTRICOS DEL MUNICIPIO ZAMORA (GUATIRE), ESTADO MIRANDA

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Michael Schmitz

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Javier Sánchez

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al título de
Ingeniero Geofísico
por el Br. Jozsef Hecht Méndez

Caracas, marzo de 2005

Caracas, 11 de marzo de 2005

Los abajo firmantes, miembros del jurado designados por el Consejo de la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Br. Jozsef Hecht Méndez, titulado:

“CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE ESTUDIOS DE RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL Y GRAVIMÉTRICOS DEL MUNICIPIO ZAMORA (GUATIRE), ESTADO MIRANDA”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Jurado

Jurado

Dr. Michael Schmitz
Tutor Académico

Ing. Javier Sánchez
Tutor Industrial

*A mi fiel compañero,
que luchó desde mi espalda
año tras año soportando la carga,
hoy, ya no estás conmigo..*

A mis padres, hermanos y abuela...

y a los que siempre creyeron...

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Central de Venezuela, mi hogar de verdad!, gracias por permitirme entrar en tus aulas, conocer tus encantos y entrar en mi corazón. Un día regresaré a ti.

A mis Padres por haber creído en mi, por su apoyo incondicional y porque esto, es mi mayor regalo para ustedes. Los amo...

A mis hermanos, por siempre confiar en mi. Ustedes saben lo que ha sido esta lucha, no dejemos de hacerlo!

A mi tutor Michael por su guía y apoyo durante la realización de esta tesis (en Venezuela y en Alemania) y por hacerme ver que la geofísica es mucho más divertida con risas. A mi tutor Javier, ¿qué hubiese hecho si no estuvieses aquí?, Mil Gracias. A Víctor mi cotutor designado, gracias por el ruido que causaste en mi tesis.

A Franco Urbani por su apoyo en la geología y por ser un excelente profesor y persona.

A Funvisis y su personal por su ayuda y apoyo, y en especial al señor Quintana por ser como es con los tesistas. Siempre quise trabajar con ustedes.

A Lola y al Mickey, mi segunda mamá y mi hermano del alma, gracias por tenerme en su hogar y soportar mis locuras en esta etapa tan difícil.

A Wilman, la señora Julieta y Kati, quienes me dieron el entusiasmo para entrar en la Universidad, gracias por el impulso.

A David, Ricki y Roberto grandes amigos dentro de la universidad. A Henry por su apoyo en la adquisición, aunque escapó a la sísmica de refracción.

A mi carrito que soportó la adquisición de los datos en medio de tanto calor.

A Dyron que me acompañaba todas las noches de escritura, procesamiento y análisis echado a mi lado o encima de mi.

A todos aquellos que de una u otra manera me apoyaron en esta etapa de mi vida que siempre recordaré.

A Nicole por darme una luz en medio de tanta oscuridad, por cederme su mano y sacarme del pozo, por aparecer en mi vida y devolverme a ella. Sin ti nunca hubiese alcanzado esta meta. Infinitas Gracias, mi Reina!!!.

Hecht M., Jozsef

CARACTERIZACIÓN GEOFÍSICA MEDIANTE ESTUDIOS DE RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL Y GRAVIMÉTRICOS DEL MUNICIPIO ZAMORA (GUATIRE), ESTADO MIRANDA

**Tutor Académico: Dr. Michael Schmitz. Tutor Industrial: Ing. Javier Sánchez.
Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y
Geofísica. Año 2005.**

Palabras Claves: Microzonificación, Métodos Sísmicos, Métodos Gravimétricos.

Resumen.

El presente trabajo forma parte de los estudios de microzonificación sísmica realizados en distintas ciudades en el norte de Venezuela bajo el respaldo de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (Funvisis). El objetivo principal del estudio es caracterizar la cuenca de Guatire mediante la aplicación de métodos sísmicos (sísmica de refracción somera y ruido sísmico ambiental) y métodos gravimétricos.

La cuenca está conformada por las siguientes unidades geológicas: Aluviones del Cuaternario, la Formación Guatire (cementada y no cementada) del Pleistoceno y Los Esquistos de Las Mercedes del Cretácico (Picard, 1976)

Mediante modelos 2D elaborados a partir de mediciones sísmicas de refracción se determinaron tres capas: la capa superficial (espesor hasta 14 m) asociada a sedimentos poco consolidados y aluviones con velocidades promedio de ondas P y S de 900 m/s y 400 m/s, respectivamente. La capa intermedia (profundidad hasta los 39 m) de sedimentos consolidados con velocidades P y S promedio de 1200 m/s y 550 m/s, respectivamente. La tercera capa (profundidad entre 40 y 60 m) asociada a rocas metamórficas meteorizadas con velocidad de ondas P superiores a los 2200 m/s. Esta capa no fue observada en los modelos de ondas S. El mapa inicial propuesto Vs30, indica velocidades promedio entre 550 m/s y 650 dentro de la ventana de estudio.

A partir del estudio de ruido sísmico ambiental se elaboró un mapa de períodos fundamentales de la cuenca. En la zona central del mapa, extendiéndose hacia el este, se obtuvieron valores de períodos entre 0,9 y 2,2 s asociados al mayor espesor sedimentario en el área. Para el resto de la región los valores oscilaron entre 0,6 y 0,9 s, disminuyendo gradualmente hacia el sur y el norte (0,1-0,3 s).

Con la información gravimétrica se elaboró un mapa de anomalías de Bouguer para $\rho_B = 2,5 \text{ gr/cm}^3$, donde se observa una tendencia general de las curvas de isoanomalías este-oeste. El rango de variación de los valores de anomalías se encuentra entre 15,5 y 28,5 mGals. Los valores menores a 19 mGals predominan en la mayor parte del área, cubriendo la zona central de la región y extendiéndose hacia

el este. Estos mínimos se asocian a las zonas de mayor espesor de sedimentos. Se elaboró un modelo 3D de la cuenca a partir de las anomalías de Bouguer residuales. La profundidad de la cuenca se determinó en 370 m aproximadamente para la zona central manteniendo este espesor hacia el este y disminuyendo hasta 200 metros al oeste. La cuenca es un sinforme con alineamiento este-oeste y no se observaron mayores estructuras. Los resultados obtenidos concuerdan con el estudio gravimétrico realizado por Graterol (1970).

La integración de los datos gravimétricos y de ruido sísmico se realizó mediante la elaboración de perfiles período-profundidad, a partir de los cuales se determinaron 4 rangos aparentes para la relación período-profundidad: períodos entre 0,2 y 0,4 s se correlacionan con un espesor de sedimentos entre 10-60 m, períodos entre 0,6 y 1 s asociados a 100 y 200 m, períodos entre 1 y 1,5 s se corresponden a profundidades entre 200 y 250 m y para períodos entre 1,5 y 2,2 s se determinó un rango de espesor de sedimentos entre 250-350 m.

El análisis integrado del mapa de anomalías de Bouguer con el mapa de períodos fundamentales indica una relación inversa aparente en los resultados de ambos métodos. Para el área con las anomalías gravimétricas mínimas, se obtuvieron valores de períodos fundamentales máximos.

A los datos de gravimetría y ruido sísmico ambiental se les aplicó un análisis estadístico estándar. Asimismo, toda la información obtenida se ubicó en un Sistema de Información Geográfico (SIG).

ÍNDICE

	Pág.
CONSTANCIA DE APROBACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
RESUMEN.....	v
LISTA DE FIGURA.....	xii
LISTA DE TABLAS.....	xvii
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2 OBJETIVOS	4
1.2.1 Objetivo General	4
1.2.2 Objetivos específicos	4
1.3 JUSTIFICACIÓN	5
1.4 UBICACIÓN	6
1.5 ANTECEDENTES.....	9
CAPÍTULO II	
ASPECTOS GEOLÓGICOS	13
2.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	13
2.1.1 Origen y evolución tectónica del Caribe.....	14
2.2 ESTRATIGRAFÍA DE LA CUENCA DE GUARENAS -GUATIRE	15
2.2.1 Aluvión (Qal):	16
2.2.2 Terrazas aluvionales (Qtz):	16
2.2.3 Asociación Metasedimentaria Caracas:	17
2.3 TECTONISMO Y SEDIMENTACIÓN DE LA CUENCA GUARENAS-GUATIRE	19

2.4 CONSIDERACIONES PALEOGEOGRÁFICAS	22
2.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	24
2.5.1 Generalidades.....	24
2.5.2 Fallas.....	24
2.6 GEOLOGÍA LOCAL.....	25
2.6.1 Consideración Fisiográficas	25
2.6.2 Generalidades.....	25
2.6.3 Formación Guatire	28
 CAPÍTULO III	
SÍSMICA DE REFRACCIÓN.....	31
3.1 GENERALIDADES	31
3.2 PRINCIPIO EN QUE SE BASA EL MÉTODO DE SÍSMICA DE REFRACCIÓN	32
3.2.1 Refracción de ondas sísmicas, caso sencillo.....	33
3.2.2 Refracción de ondas sísmicas en capas buzantes.....	36
3.2.3 Tipos de tendidos para la sísmica de refracción.....	38
3.3 METODOLOGÍA DE LA ADQUISICIÓN	38
3.3.1 Ubicación de las estaciones.....	38
3.3.2 Geometría y parámetros de la adquisición.....	39
3.4 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	42
3.4.1 Primera fase (Programa Reflex).....	42
3.4.2 Segunda fase (Programa Rayinvr)	45
3.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	47
 CAPÍTULO IV	
RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL	87
4.1 MICROTREMORES	87
4.1.1 Relación espectral H/V	87
4.1.2 Fundamento teórico de la relación H/V	88

4.2 METODOLOGÍA DE LA ADQUISICIÓN	90
4.2.1 Ubicación de las mediciones.....	91
4.2.2 Equipos.....	91
4.2.3 Metodología	93
4.3 PROCESAMIENTO DE DATOS	94
4.3.1 Procesamiento de los datos	94
4.3.1.1 Programa SESAME	94
4.3.2 Descarga y conversión de los datos	94
4.3.3 Análisis de los datos.....	97
4.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	101
4.4.1 Mapa de períodos fundamentales.....	102
4.4.2 Relación entre períodos fundamentales y espesores sedimentarios	104
4.4.3 Análisis estadístico de los datos.....	105

CAPÍTULO V

GRAVIMETRÍA.....	109
5.1 PRINCIPIOS DE LA GRAVIMETRÍA	109
5.2 GRAVEDAD DE LA TIERRA	110
5.2.1 General	110
5.2.2 El esferoide de referencia y el geoide	110
5.3 MÉTODO GRAVIMÉTRICO	112
5.3.1 Definición.....	112
5.3.2 Ajustes y correcciones	113
5.3.2.1 Deriva instrumental.....	113
5.3.2.2 Corrección por latitud	113
5.3.2.3 Corrección de altura	114
5.3.2.4 Corrección por mareas	114
5.3.2.5 Corrección de Bouguer	114
5.3.2.6 Corrección topográfica.....	115

5.3.3 Anomalía de Bouguer	115
5.3.4 Separación regional - residual.....	116
5.3.5 Modelo gravimétrico.....	116
5.4 METODOLOGÍA DE LA ADQUISICIÓN	117
5.4.1 Preparación del equipo y ubicación de las estaciones.....	117
5.4.2 Levantamiento de la estación base y estaciones ordinarias	119
5.5 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....	121
5.5.1 Descarga de los datos del gravímetro.....	121
5.5.2 Determinación de las cotas de las estaciones.....	121
5.5.3 Cálculo de la corrección topográfica.....	121
5.5.4 Cálculo de la anomalía de Bouguer.....	122
5.5.5 Elaboración de los mapas de anomalía de Bouguer.....	123
5.5.6 Modelo gravimétrico 2D (perfils) y 3D	124
5.5.5.1 Sistema interactivo gravimétrico y magnético IGMAS.....	125
5.5.5.2 Manejo del programa e ingreso de los datos.....	126
5.6 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	127
5.6.1 Mapa de Anomalías de Bouguer	127
5.6.2 Separación Regional – Residual.....	129
5.6.3 Análisis estadístico de los datos.....	132
5.8 MODELADO GRAVIMÉTRICO	136
5.8.1 Modelos 2D.....	137
5.8.2 Secciones horizontales	143
5.8.3 Mapas isópicos.....	144
5.8.4 Modelos 3D	146
 CAPÍTULO VI	
INTEGRACION DE LOS RESULTADOS	149
6.1 RELACIÓN PERÍODO – PROFUNDIDAD	149
6.2 INTEGRACIÓN DE LOS TRES MÉTODOS	156

6.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	158
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	163
Apéndice A. Datos empleados en la sísmica de refracción.....	172
Apéndice B. Tablas de datos de ruido sísmico ambiental.....	182
Apéndice C. Parámetros de ajuste del gravímetro Scintrex CG-3 y datos empleados en el procesamiento gravimétrico.....	190
Apéndice D. Fotos del área de estudio.....	206

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1.1 Mapa político del estado Miranda. Ventana de estudio digitalizada.....	7
1.2 Vista 3D de la cuenca de Guatire.....	8
1.3 Mapa de anomalías de Bouguer de la cuenca de Guarenas – Guatire.....	11
1.4 Modelos gravimétricos de la cuenca de Guarenas – Guatire.....	12
2.1 Mapa de fallas Cuaternarias de Venezuela, área nor-central.....	13
2.2 Mapa estructural del área limítrofe de la Placa Tectónica del Caribe y la Suramericana.....	14
2.3 Mapa geológico de la Cuenca de Guatire.....	18
2.4 Mapa geológico del flanco sur del Macizo del Ávila.....	19
2.5 Corte transversal sintético de la Cordillera de la Costa.....	20
2.6 Distribución geográfica de los sedimentos de la Formación Guatire.....	22
2.7 Modelo de Basculamiento para la cuenca de Guatire.....	23
2.8 Mapa geológico de la cuenca de Guatire.....	27
2.9 Perfil de la cuenca de Guatire basado en métodos gravimétricos.....	29
2.10 Mapa geológico del área de estudio en SIG.....	30
3.1 Ondas generadas por la incidencia de un rayo en un medio plano.....	32
3.2 Representación de los rayos sísmicos generados por una fuente en superficie....	34
3.3 Dromocrónicas para las ondas directas, reflejadas y refractadas.....	35
3.4 Representación de los rayos sísmicos con una capa buzante.....	36

3.5 Dromocrónica de doble disparo.....	37
3.6 Ubicación de los perfiles sísmicos realizados en Guatire.....	39
3.7 Modelo de la geometría de adquisición empleada.....	40
3.8 Fuente sísmica empleada durante la adquisición para generar las ondas S.....	40
3.9 Realización de perfil sísmico F01. Golpes de mandarria (Fuente).....	41
3.10 Selección de primeras llegadas. Análisis de tiempos de viaje (REFLEX).....	43
3.11 Modelo 1D, disparo en 0 metros del perfil A01 (REFLEX).....	44
3.12 Traza sísmica de la onda S del perfil A01 (REFLEX).....	45
3.13 Ejemplo de un modelo 2D realizado con el programa RAYINVR.....	46
3.14 Ubicación del perfil A01.....	48
3.15 Modelos 1D de ondas P del perfil A01.....	49
3.16 Modelo 2D de ondas P del perfil A01.....	50
3.17 Modelos 1D de ondas S del perfil A01.....	51
3.18 Modelo 2D de ondas S del perfil A01.....	52
3.19 Ubicación del perfil B01.....	53
3.20 Modelos 1D de ondas P del perfil B01.....	54
3.21 Modelo 2D de ondas P del perfil B01.....	55
3.22 Modelos 1D de ondas S del perfil B01.....	56
3.23 Modelo 2D de ondas S del perfil B01.....	57
3.24 Ubicación del perfil C01.....	58
3.25 Modelos 1D de ondas P del perfil C01.....	59
3.26 Modelo 2D de ondas P del perfil C01.....	60
3.27 Modelos 1D de ondas S del perfil C01.....	61

3.28 Modelo 2D de ondas S del perfil C01.....	62
3.29 Ubicación del perfil D01.....	63
3.30 Modelos 1D de ondas P del perfil D01.....	64
3.31 Modelo 2D de ondas P del perfil D01.....	65
3.32 Modelos 1D de ondas S del perfil D01.....	66
3.33 Modelo 2D de ondas S del perfil D01.....	67
3.34 Ubicación del perfil E01.....	68
3.35 Modelos 1D de ondas P del perfil E01.....	69
3.36 Modelo 2D de ondas P del perfil E01.....	70
3.37 Modelos 1D de ondas S del perfil E01.....	71
3.38 Modelo 2D de ondas S del perfil E01.....	72
3.39 Ubicación del perfil F01.....	73
3.40 Modelos 1D de ondas P del perfil F01.....	74
3.41 Modelo 2D de ondas P del perfil F01.....	75
3.42 Modelos 1D de ondas S del perfil F01.....	76
3.43 Modelo 2D de ondas S del perfil F01.....	77
3.44 Ubicación del perfil G01.....	78
3.45 Modelos 1D de ondas P del perfil G01.....	79
3.46 Modelo 2D de ondas P del perfil G01.....	80
3.47 Modelos 1D de ondas S del perfil G01.....	81
3.48 Modelo 2D de ondas S del perfil G01.....	82
3.49 Mapa Vs30.....	86

4.1 Modelos sencillo de la relación H/V asumido por Nakamura (1989) para interpretar microtremores.....	90
4.2 Ubicación de las mediciones de ruido sísmico ambiental	91
4.3 Sismógrafo y sus componentes. Medición de ruido sísmico en la Urbanización Los Naranjos.....	92
4.4 Esquema de procesamiento de los datos de ruido sísmico.....	96
4.5 Gráfico de la señal grabada para la estación 1173 con sus componentes.....	97
4.6 Selección automática de ventanas de análisis para la estación 1173.....	98
4.7 Relación H/V para la estación 1173 con la frecuencia seleccionada.....	100
4.8 Mapa de períodos fundamentales para el municipio Zamora (Guatire).....	103
4.9 Histograma de frecuencia de los valores de período fundamental.....	106
4.10 Gráfico de probabilidad Q-Q. Prueba normal. Prueba uniforme.....	107
4.11 Diagrama de caja para los valores de período fundamental.....	108
5.1 Comparación del esferoide de referencia con el geoide.....	112
5.2 Mapa del área de estudio con el diseño de medición inicial de las estaciones gravimétricas.....	118
5.3 Ventana de estudio con las estaciones gravimétricas levantadas y la ubicación de la estación base.....	120
5.4 Esquema del procesamiento de los datos gravimétricos.....	123
5.5 Ejemplo del método de interpolación Natural Neighbour empleado para la elaboración del mapa de anomalías de Bouguer.....	124
5.6 Definición de los planos 2D de ingreso en el programa IGMAS.....	126
5.7 Mapa de anomalías de Bouguer de Guatire.....	128
5.8 Mapa de anomalía residual calculado con el polinomio de primer grado.....	130
5.9 Mapa de anomalía residual, calculado con el polinomio de primer grado.....	131

5.10 Histograma de frecuencia de los datos de anomalías de Bouguer.....	133
5.11 Gráfico Q-Q normal de los datos de anomalías de Bouguer.....	134
5.12 Diagrama de caja de los dato de anomalías de Bouguer.....	135
5.13 Mapas de anomalías de Bouguer residuales. Izquierda: datos medidos, derecha: mapa modelado con los perfiles trazados.....	137
5.14 Perfil 8, dirección norte-sur, coordenada UTM E-O = 765000 m.....	138
5.15 Perfil 6, dirección norte-sur, coordenada UTM E-O = 767000 m.....	139
5.16 Perfil 3, dirección norte-sur, coordenada UTM E-O = 770000 m.....	140
5.17 Perfil 2, dirección norte-sur, coordenada UTM E-O = 771000 m.....	141
5.18 Diversos perfiles elaborados con el programa IGMAS , con su ubicación en el mapa de anomalías residuales.....	142
5.19 Secciones horizontales generadas con el programa IGMAS cada 50 metros en profundidad.....	143
5.20 Mapa de espesores de la unidad Aluviones (Qal).....	144
5.21 Mapa de espesores de la Formación Guatire (QG2).....	145
5.22 Mapa de espesores de los Esquistos Las Mercedes (CaM).....	146
5.23 Vista 3D general de la cuenca de Guatire modelada en IGMAS.....	147
5.24 Vistas 3D de la cuenca de Guatire. Arriba: vista desde el este, abajo: vista desde el oeste.....	148
6.1 Mapa de espesor de sedimentos (Formación Guatire), con los perfiles definidos para los modelos período-profundidad.....	150
6.2 Relación período-profundidad para el perfil 1.....	151
6.3 Relación período-profundidad para el perfil 2.....	152
6.4 Relación período-profundidad para el perfil 3.....	153
6.5 Relación período-profundidad de los perfiles 1,2 y 3, mediante la regresión lineal.....	155

LISTA DE TABLAS

	Pág.
1.1 Vértices de la ventana de estudio.....	8
3.1 Parámetros de adquisición para cada perfil sísmico.....	41
3.2 Resumen de los resultados obtenidos a partir de los modelos 2D	83
3.3 Valores de densidad calculados para cada formación geológica a partir de la curva de relación densidad-velocidad.....	85
4.1 Equipos empleados en la adquisición de ruido sísmico.....	92
4.2 Campos de la tabla de datos del análisis de ruido sísmico ambiental.....	99
4.3 Resultados de las 10 primeras estaciones del análisis de ruido símico.....	101
4.4 Tabla de parámetros estadísticos para los datos de períodos fundamental.....	105
5.1 Equipos y parámetros de la adquisición gravimétrica.....	118
5.2 Estaciones bases empleadas.....	119
5.3 Campos de la primera hoja de cálculo empleada en el procesamiento de los datos gravimétricos.....	122
5.4 Campos de la segunda hoja de cálculo empleada en el procesamiento de los datos gravimétricos.....	122
5.5 Densidades empleadas en los modelos.....	125
5.6 Valores estadísticos de tendencia central para los valores de anomalías de Bouguer.....	132
6.1 Clasificación de la relación período-profundidad determinada a partir de los perfiles.....	155

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

El valle conformado por los pueblos de Guarenas y Guatire (25 km al este de la ciudad de Caracas) constituye una cuenca con formación post-orogénica rellenada principalmente por sedimentos clásticos que van desde consolidados a no consolidados, y acumulación de aluviones a lo largo de los tres ríos principales presentes en el área (Guarenas, Guatire y Pacairigua). Dicha cuenca se encuentra emplazada en una depresión limitada al norte por el Macizo del Ávila y al sur por el cerro Colorado, en la Cordillera de la Costa.

El pueblo de Guatire de gran expansión demográfica actualmente, se encuentra al sur de la falla del Ávila, la cual es longitudinal de rumbo E-W, siendo ésta la falla más antigua de la zona (Barboza y Rodríguez, 2001). Al norte de la Napa del Ávila, en el flanco norte del sistema montañoso del mismo nombre, se encuentra definiendo la línea de costa, la Falla de San Sebastián (Beltrán, 1993)

Debido a los aspectos antes mencionados, el estudio de las condiciones locales tales como: efectos de sitio, geología local, el perfil superficial de los suelos, el espesor de sedimentos y el relieve topográfico, se vuelven de gran importancia debido a que al conocer estas propiedades se pueden determinar las zonas en las cuales se puede esperar mayor daño ante la ocurrencia de un evento sísmico. Dentro de este marco la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) desarrolla desde finales de la década pasada, estudios de microzonificación sísmica en distintas ciudades en el área nor-central de Venezuela con la finalidad de generar modelos de los espesores sedimentarios de dichas áreas debido a que estos podrían estar asociados con las zonas que sufren mayor daño durante un fenómeno sísmico. Asimismo se obtiene información acerca de los factores de amplificación de los suelos y las velocidades sísmicas de las capas más someras.

En la presente investigación se emplearon tres herramientas geofísicas con la finalidad de evaluar el área de la población de Guatire y sus alrededores (municipio Zamora) del estado Miranda. Se empleó el método sísmico de refracción con la

finalidad de caracterizar las velocidades de las ondas sísmicas P y S de las capas más someras y elaborar modelos 2D de las mismas. El estudio de ruido sísmico ambiental permitió conocer los valores de período fundamental de vibración de los suelos y con el estudio gravimétrico se elaboró un modelo de cuenca (espesor de sedimentos) a partir de los mapas de anomalías gravimétricas. El modelo obtenido con el método gravimétrico junto con el mapa de períodos fundamentales elaborado a partir del estudio de ruido sísmico ambiental, permitió establecer una relación aparente período-profundidad para la ventana de estudio mediante la elaboración de perfiles. Los datos gravimétricos y de ruido sísmico recibieron un tratamiento estadístico estándar y toda la información, inclusive la geológica, se trasfirió a un Sistema de Información Geográfico (SIG) que pasará a formar parte de la base de datos geográfica que elabora la sección de Geofísica Aplicada de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el transcurso de los últimos años la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) junto con otras instituciones nacionales e internacionales académicas y de investigación, viene desarrollando diferentes estudios en la zona norcentral del país, específicamente en el valle de Caracas (Abeki et al., 1995; Abeki et al, 1998; Duval, et al., 1998; Rocabado, 2000; Enomoto et al., 2001) con la finalidad de caracterizar las zonas de mayor riesgo sísmico, mediante el modelado de los espesores de la capa sedimentaria de dichas zonas. Para ello se emplea un método que relaciona los períodos fundamentales de los suelos al espesor de las capas sedimentarias conocido como el método de Nakamura, a partir de mediciones de ruido ambiental (Nakamura, 1989).

Los resultados de estos estudios han arrojado una relación entre los espesores de sedimentos con los períodos fundamentales, calculados por medio de este método para distintas áreas dentro del valle de Caracas, así como la relación de éstos con posibles daños que puedan generarse a estructuras en caso de la ocurrencia de un

sismo de gran magnitud; ejemplo de ello es el sismo de Caracas de 1967 (Funvisis, 1978).

En busca de extender el desarrollo de estos estudios a localidades que se encuentren en áreas de alta amenaza sísmica, se emprende la aplicación del método de mediciones de ruido ambiental, incluyendo otros métodos geofísicos a distintas áreas, principalmente en el norte de Venezuela, por ser en este sector donde se concentra la mayor actividad sísmica del país.

Aproximadamente a 25 kilómetros al este del valle de Caracas, se encuentran las ciudades de Guarenas y Guatire, que han tenido un crecimiento demográfico bastante acelerado en los últimos 15 años como ciudades dormitorio de la capital. Las mismas se han convertido en ciudades “satélites” de la capital con una gran expansión urbanística por toda el área que conforman. Con su consecuente crecimiento poblacional, también se ha desarrollado su expansión en cuanto a servicios, establecimientos recreacionales, urbanizaciones, entre otros. Ambas ciudades forman parte de un gran valle enclavado en la cadena montañosa al norte del país.

El objetivo de este trabajo es realizar una evaluación geofísica mediante las mediciones de ruido ambiental, un estudio gravimétrico y la realización de perfiles sísmicos, en el área de Guatire, Municipio Zamora, Estado Miranda, con la finalidad de caracterizar los sedimentos de la zona y su espesor, así como un modelado 3D del subsuelo mediante el método gravimétrico, para finalmente integrar los resultados para una interpretación física del subsuelo del área

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Caracterizar geofísicamente la capa sedimentaria del valle de Guatire mediante mediciones de ruido ambiental y un estudio gravimétrico para realizar un modelo del subsuelo dentro de la ventana de estudio.

1.2.2 Objetivos específicos

- Elaborar mapas digitales del área de estudio en Sistema de Información Geográfico (SIG)
- Levantar estaciones gravimétricas en la ventana de estudio a lo largo de carreteras y vías principales cada 500 metros.
- Realizar mediciones sísmicas para controlar los valores de velocidad de las ondas S en la capa superficial
- Realizar mediciones de ruido ambiental en una malla de 500 metros
- Obtener los valores de período fundamental de vibración del suelo y las amplitudes de la relación H/V.
- Obtener una relación período contra espesor de sedimentos presentes en el área.
- Elaborar un mapa de anomalías de Bouguer y perfiles tipo de la cuenca.

- Integrar ambos resultados, análisis de ruido sísmico, el estudio gravimétrico y la información obtenida de los perfiles sísmicos, junto con la geología local para realizar una interpretación completa del subsuelo en el área.
- Ubicar toda la información en un Sistema de Información Geográfico (SIG)

1.3 JUSTIFICACIÓN

Los estudios de ruido sísmico ambiental desarrollados en los últimos años en la ciudad de Caracas (Abeki et al., 1995; Abeki et al., 1998; Duval et al., 1998; Rocabado, 2000; Enomoto et al., 2001) han llegado a resultados significativos en cuanto a la relación espesor de la capa sedimentaria y el período fundamental calculado por la relación H/V. Asimismo la aplicación de este método en labores de microzonificación se ha vuelto más común debido a la facilidad, economía y rapidez del mismo (e.g.: Lermo et al., 1993; Bard, 1999; Nakamura, 2000; Huang, 2002).

Todo el norte de Venezuela se encuentra en una zona de alta amenaza sísmica, debido a la presencia de las principales fallas que se encuentran entre los límites de la placa tectónica del Caribe y la Suramericana (Audemard et al., 1997), y a su vez, en esta zona se concentra la mayor cantidad de población del país. Por ello es importante conocer y analizar el comportamiento de los suelos ante un evento sísmico con la finalidad de prevenir o trabajar con miras a crear mecanismos de evaluación y control de las distintas estructuras que se construyan en estas áreas.

Ejemplo de esto se conoce claramente del terremoto de Caracas del año 1967 (Funvisis, 1978), que ocasionó un gran daño en la ciudad y sobre todo en el área de Los Palos Grandes, donde el 75% de los edificios con 10 pisos o más sufrieron daños (Seed et al., 1972). Los períodos naturales de estos edificios fueron estimados en 1.3 s. En el área de Los Palos Grandes, la profundidad de la capa sedimentaria es de 250 m y el período predominante fue evaluado en 1.4 s por el método de cálculo analítico. De acuerdo a la coincidencia del período natural de los edificios que sufrieron daños (cerca de 1.3 s.) y del período predominante del suelo (1.4 s.), se determinó que la

razón principal de la concentración de los daños en Los Palos Grandes, fue la resonancia entre las características periódicas del movimiento del suelo y la vibración del edificio (Enomoto, 2001). Por ello se vuelve importante caracterizar tanto los suelos como su movimiento, sobre todo en zonas donde existe mayor amenaza sísmica.

1.4 UBICACIÓN

El área de estudio se encuentra en Guatire, Municipio Zamora, Estado Miranda, en la parte nor-central de Venezuela. Esta zona constituye un valle enclavado en el sistema montañoso norte costero del país (Figura 1.1).

Lo relativamente plano del paisaje influyó en el desarrollo urbano de la zona que se ha convertido en un sector industrial y ciudad satélite del Área Metropolitana de la ciudad de Caracas.

El área de estudio se limitó a partir de los mapas obtenidos del Instituto Venezolano de Geografía Simón Bolívar, cartas números: G-52, G-53, H-52 y H-53, todas en escala 1:5000 m.

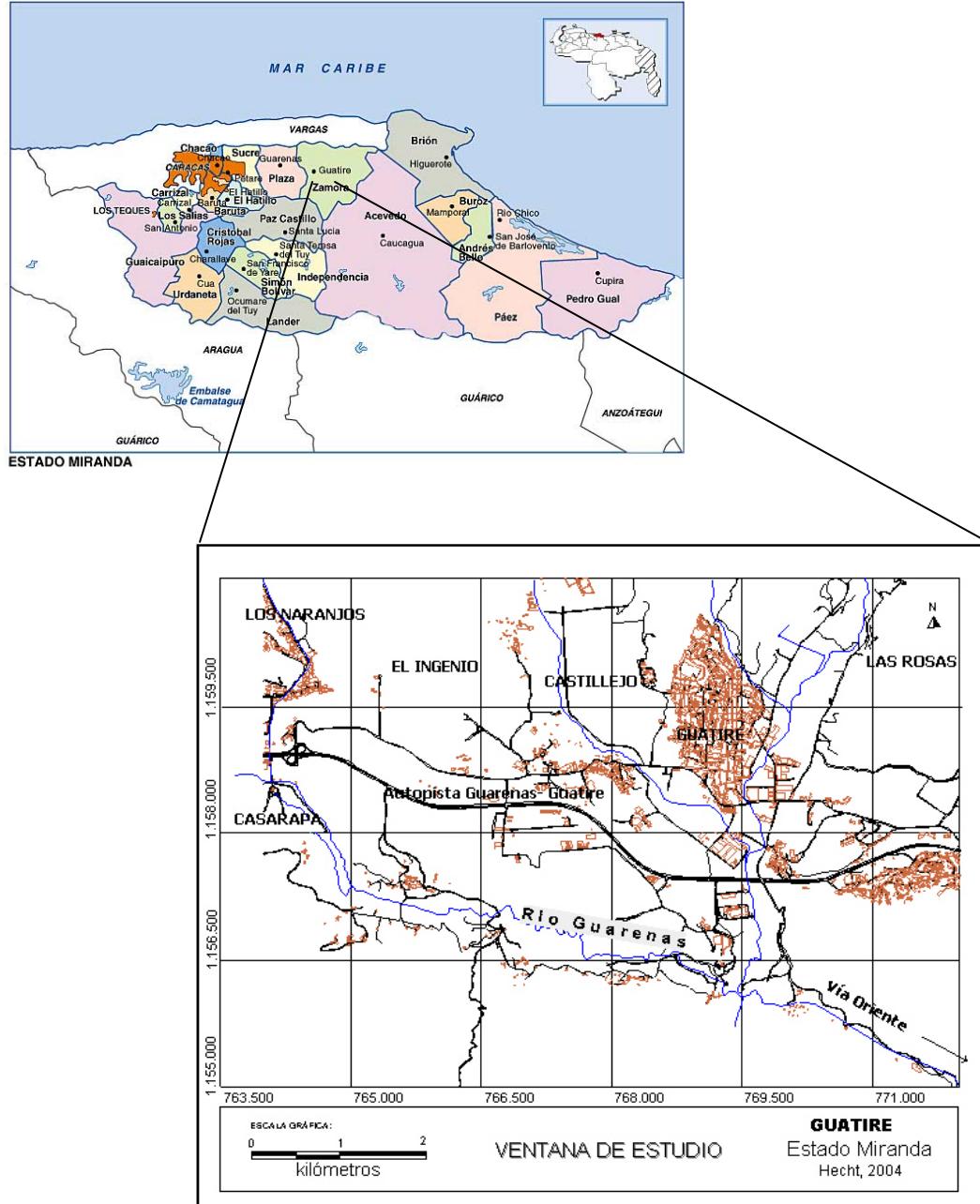


Figura 1.1. Arriba: Mapa político del Estado Miranda, con el municipio Zamora en color verde. Tomado de (www.a-venezuela.com, 2004). Abajo: Mapa digitalizado de la ventana de estudio. Modificado de las Cartas del IGVSB, G2, G3, H2 y H3.

Tabla 1.1. Vértices de la ventana de estudio

Vértice	UTM (E-W)	UTM (N-S)	hh:mm:ss	hh:mm:ss
1	763.500	1.161.000	10°29'36.7''	66°35'33.9''
2	771.000	1.161.000	10°29'34.8''	66°31'27.4''
3	771.000	1.155.000	10°26'19.6''	66°31'28.9''
4	763.500	1.155.000	10°26'21.5''	66°35'35.4''

En la figura 1.2, se observa el mapa topográfico 3D de la Cuenca de Guatire con la hidrografía principal del área, el recuadro rojo indica el área de estudio. Este mapa fue realizado en un Sistema de Información Geográfico (Mapinfo Profesional, versión 7.0, programa comercial), así como el mapa de la ventana de estudio en la figura 1.1, lo que permitirá ubicar las mediciones en un sistema referenciado espacialmente.

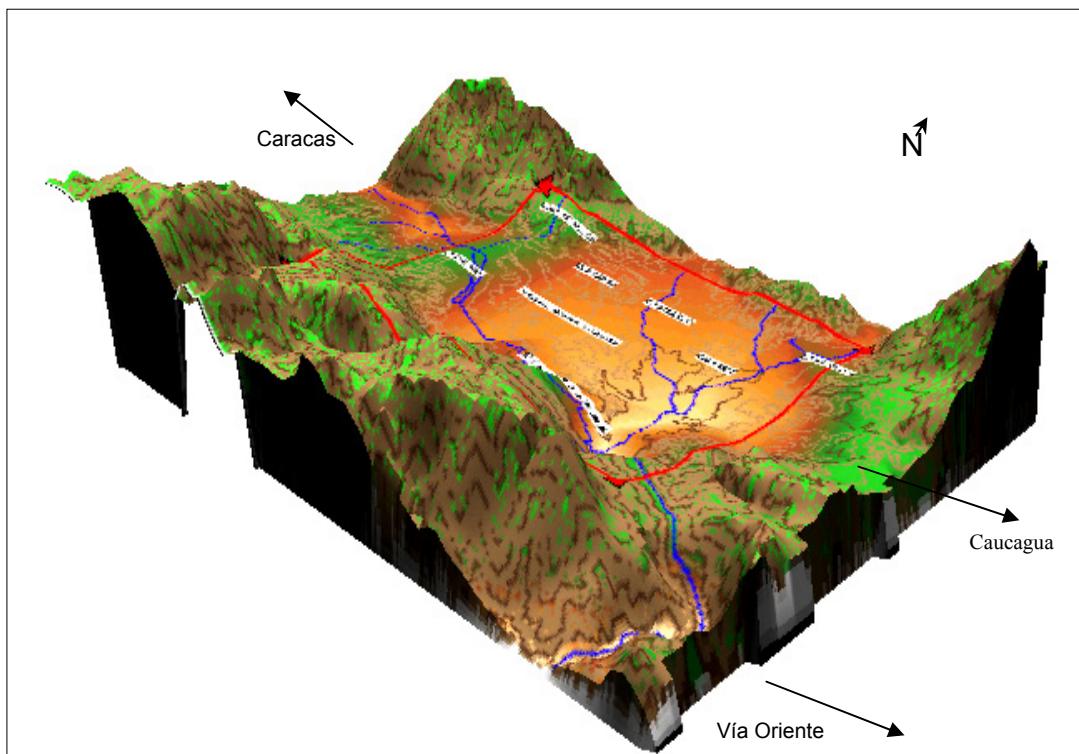


Figura 1.2. Vista 3D de la Cuenca Guatire con los ríos principales (Guarenas, Guatire y Pacairigua). El recuadro rojo constituye el área de estudio.

1.5 ANTECEDENTES

Los estudios de ruido sísmico han cobrado bastante validez en los últimos años debido a que los mismos son una herramienta idónea para estimar los efectos geológicos de superficie en un movimiento sísmico sin necesitar otra información geológica. Asimismo la relación H/V se ajusta muy bien a la descripción antes hecha y ha sido recibida con gran atención por su simplicidad junto con la rápida información acerca de las características dinámicas de los suelos y las estructuras (Nakamura, 2000).

En Venezuela, específicamente en el valle de Caracas se han realizado diversas mediciones de ruido sísmico aplicando el método de Nakamura para obtener los períodos fundamentales del suelo y poder determinar el espesor de sedimentos (Abeki et al., 1995; Duval et al., 1998; Rocabado, 2000). Abeki et al., (2000) realizaron un compendio de las distintas mediciones de ruido ambiental en el valle de Caracas. En dicho trabajo presentan un resumen de las distintas fases de medición de ruido llevadas a cabo entre los años 1994 a 1999 por distintos grupos de investigación conjuntamente con FUNVISIS. Abeki et al. (1995) desarrollaron trabajos de observación de microtremores, realizando mediciones en 17 puntos en Los Palos Grandes, una de las zonas más afectadas por el terremoto de 1967. Ellos enfocaron los resultados en la estabilidad de los microtremores en los distintos puntos de medición la cual fue muy significativa a pesar de que sus datos originales fueron muy ruidosos. De este trabajo se obtuvo una relación significativa entre los períodos fundamentales de vibración del suelo con el espesor de la capa sedimentaria.

Duval et al. (1998) realizaron un estudio más denso en la cuenca aluvional de Los Palos Grandes. Realizaron 184 mediciones, con tiempos de grabación de 10 a 15 minutos. A partir de la relación H/V mantuvieron los valores más altos de amplificación y su frecuencia asociada. Con sus análisis Duval et al. (1998) llegaron a resultados muy concordantes con la teoría. Los valores máximos de la amplitud y su frecuencia asociada siguieron claramente la tendencia de la geometría de la cuenca (Semblat et al., 2000). Asimismo estos valores máximos se ubicaron en las zonas

donde se presentó el mayor daño para el terremoto de 1967. Esto permitió afirmar que la máxima amplitud en la relación H/V puede ser una indicación de la amplificación de la señal relativa en el momento de la ocurrencia de un sismo.

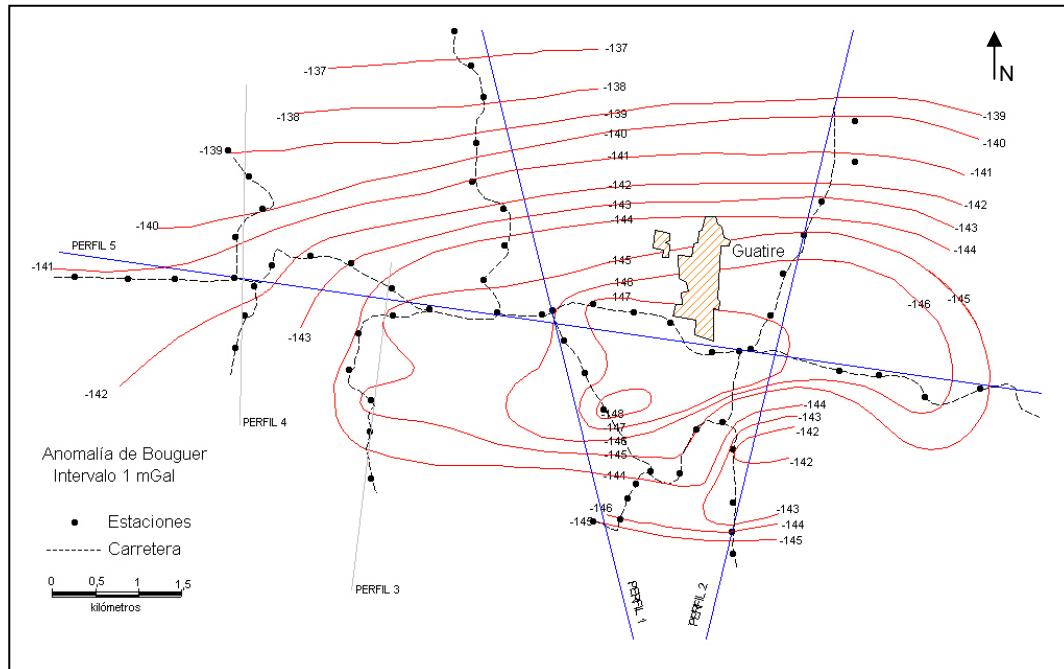
Rocabado et al. (2000) realizaron mediciones de ruido ambiental por un tiempo de 5 minutos sobre toda la ciudad de Caracas en una malla de 500 metros. En total fueron 451 mediciones, 331 entre los años 1997 a 1999 y posteriormente 120, con la finalidad de densificar las mismas áreas (Santa Eduvingis y Sebucán) trabajadas por Duval et al. (1998). Con este estudio obtuvieron variaciones de períodos que oscilan entre 0.1 s y 2.1 s, obteniendo una clara relación entre la profundidad o el espesor de los sedimentos y el período fundamental del suelo. Las zonas con los períodos fundamentales más elevados son las zonas que presentan los mayores espesores sedimentarios, como lo son Los Palos Grandes y San Bernardino con 300 m y períodos de 0.8 a 2.1 s y 150 m con períodos de 0.8 a 1.1 s, respectivamente. Sin embargo, los valores de amplificación obtenidos en este estudio no se correspondieron con los valores de período, sino que se encontraron los mayores factores de amplificación en el sur del eje central de la cuenca sedimentaria.

Los Palos Grandes y San Bernardino, zonas en las cuales se obtuvieron los mayores espesores sedimentarios relacionados a los períodos fundamentales por medio de la relación H/V en los trabajos mencionados, ya habían sido indicadas como las zonas con mayores espesores sedimentarios en los estudios geofísicos desarrollados por la compañía “Weston Geophysical Engineers Internacional, Inc.” (1969) mediante sísmica de refracción.

Conociendo entonces las ventajas del método, se aplica dicha metodología a distintas zonas en el norte de Venezuela, con la finalidad de caracterizar el comportamiento del suelo ante un evento sísmico y por tanto analizar la amenaza sísmica de la zona en estudio.

Según la investigación bibliográfica realizada para este trabajo, en el valle comprendido por Guarenas y Guatire sólo se ha realizado un estudio gravimétrico llevado a cabo por Graterol (1970), en el cual se levantaron 65 estaciones ordinarias y se determinó un espesor de 200 y 270 m para las zonas más profundas, ubicadas al

sur y sureste de la población de Guatire, respectivamente. Indica que la forma del contacto entre el basamento y los sedimentos es bastante regular y no aparecieron fallas u otras estructuras geológicas de interés.



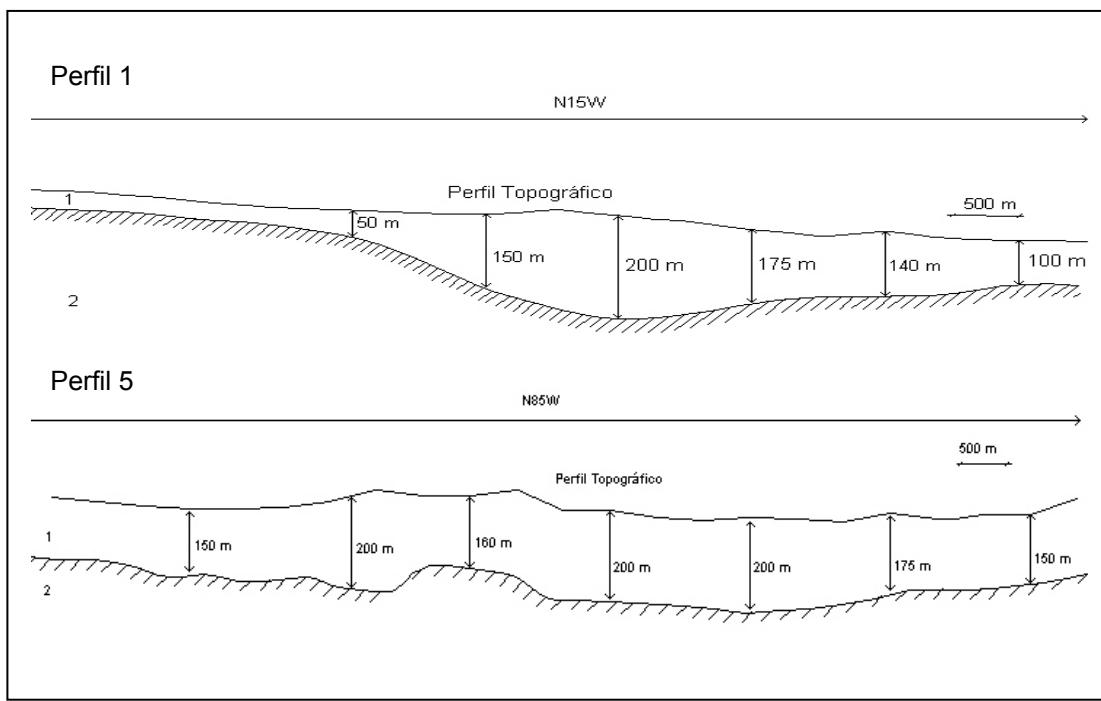


Figura 1.4. Perfiles 5 y 1 elaborados por Graterol, 1970; en la figura 1.3 se observa la ubicación de los perfiles en el mapa de anomalías de Bouguer.

Otros estudios gravimétricos cercanos al área lo constituyen a nivel regional, dos trabajos especiales de grado (Orihuela, 1990; Ruiz, 1989). Ruiz (1989) trabajó el área comprendida entre Altagracia de Orituco y el Distrito Federal, en su ventana de estudio incluye la población de Guatire en el extremo este de la misma pero no da valores específicos del área de Guatire, sin embargo, por su escala se puede utilizar como referencia para comparar los resultados del presente trabajo. Asimismo se tiene un mapa de anomalías de Bouguer de la zona nor-central de Venezuela elaborado por Graterol (1978) como marco de referencia para el mapa a elaborar en el desarrollo de este trabajo.

Para la sísmica de refracción no existen estudios previos en la zona de estudio. Este método geofísico se aplicará con la intención de obtener un control de las velocidades de las ondas S de las capas más someras donde se lleven a cabo los estudios.

CAPITULO II

ASPECTOS GEOLÓGICOS

2.1 GEOLOGÍA REGIONAL

La Cuenca de Guatire pertenece geológicamente a la Cordillera de la Costa, la cual constituye la cadena montañosa ubicada en el norte de Venezuela en la zona costera del país. Este sistema forma parte de la amplia zona de interacción entre la placa tectónica del Caribe y la placa tectónica Suramericana, mediante un conjunto de fallas tipo transcurrente dextrales, la mayoría con orientación este-oeste y sísmicamente activas. Este sistema está limitado en su extremo occidental, en la región de Barquisimeto por una depresión topográfica y estructural de los Andes de Venezuela y en su parte oriental por el Golfo de Barcelona. Más hacia el este se extiende hasta la Península de Araya y Paria. Hacia el norte limita con el Mar Caribe por medio del sistema de fallas transcurrente dextral de San Sebastián y en el sur por una depresión axial perteneciente a la Serranía del Interior (Figura 2.1).

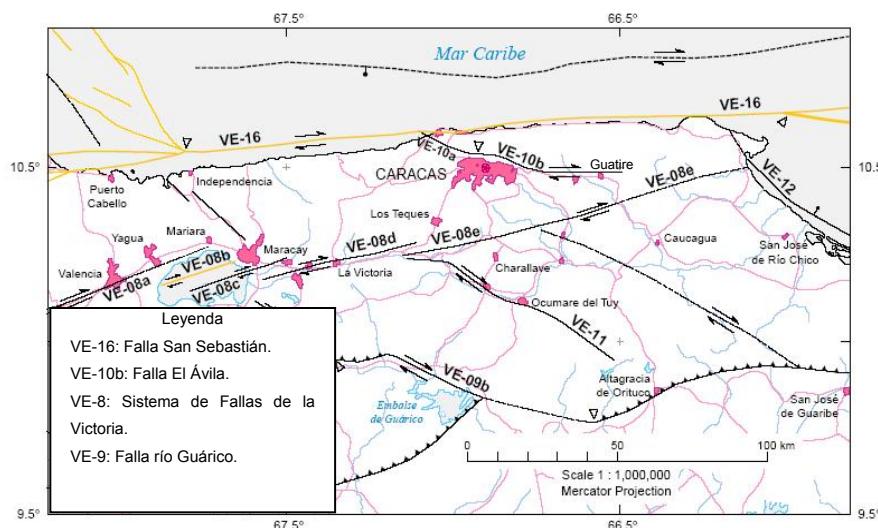


Figura 2.1. Mapa de fallas Cuaternarias de Venezuela, área nor-central. Modificado del mapa de fallas cuaternarias de Venezuela, Audemard et al. (2000).

2.1.1 Origen y Evolución Tectónica del Caribe

El origen y la evolución del Caribe (Figura 2.2) han sido objeto de diversos estudios y tema de amplio debate en los últimos años (e.g.: Navarro et al., 1988; Ostos, 1990; Pindell y Barret, 1990; Pindell, 1993). Muchos modelos han sido propuestos hasta ahora sin llegar a una solución o un modelo único aceptado, sin embargo, como consecuencia de dichos estudios actualmente se cuenta con una gran variedad de datos, en su mayoría evidencias netamente geológicas, sobre dicha área de estudio. Actualmente la Fundación Nacional para las Ciencias de Estados Unidos de Norte América (NSF, por sus siglas en inglés) por medio de la Universidad de Rice junto con el grupo de investigación GEODINOS, conformado este último por investigadores de instituciones de venezolanas, están desarrollando el Proyecto SE-Caribe, estudio multidisciplinario que busca determinar un modelo para la zona limítrofe entre la placa del Caribe y la placa Suramericana; en este estudio el método geofísico de sísmica de refracción profunda constituye la herramienta principal, y con los resultados del mismo se aumentarán los conocimientos de esta polémica área.

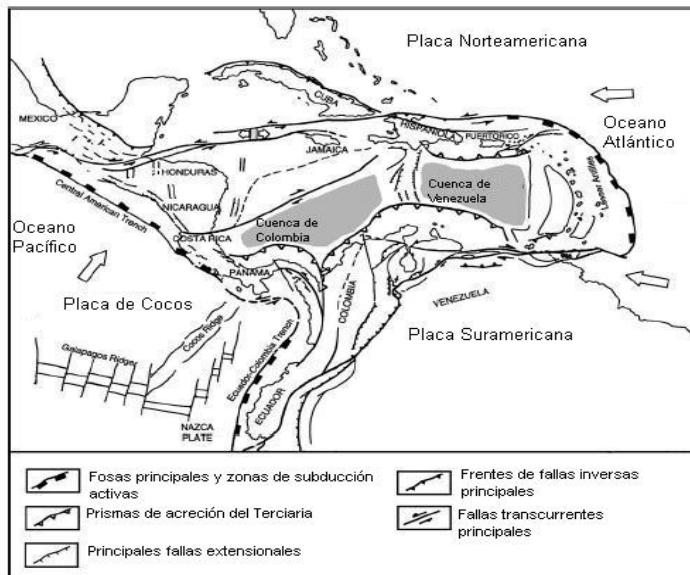


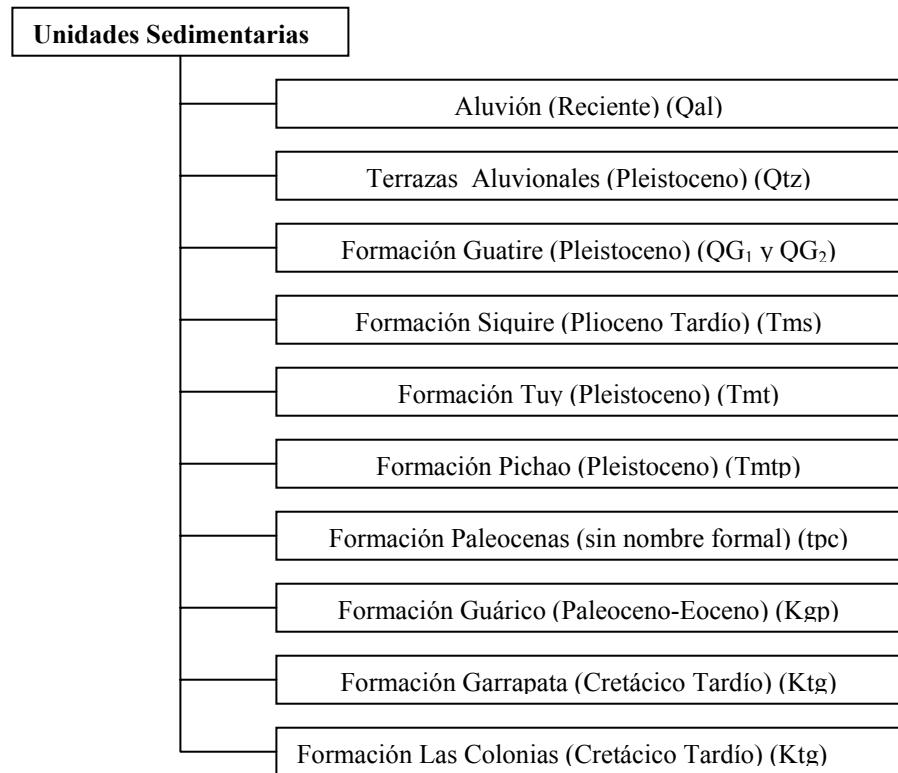
Figura 2.2. Mapa estructural de la configuración actual del área limítrofe de la placa tectónica del Caribe y la Suramericana (Giunta et al, 2002)

2.2 ESTRATIGRAFÍA DE LA CUENCA DE GUARENAS-GUATIRE

Las unidades geológicas, fallas y demás estructuras geológicas descritas en la presente sección se pueden observar en las figuras 2.3 y 2.4 para lograr una mejor comprensión.

Las rocas presentes se pueden dividir en tres grupos: rocas sedimentarias de edad Pleistocena, terrazas aluvionales de edad Pleistocena y aluviones de edad Cuaternaria, suprayacentes sobre el Esquisto de Las Mercedes y en algunas zonas con el Esquisto de Las Brisas de la Asociación Metasedimentaria de Caracas.

Orta (2003) en su Trabajo Especial de Grado presenta la secuencia de las unidades sedimentarias de las Cuencas Tuy, Guarenas-Guatire y de la Faja Piemontina de la Serranía del Interior Central.

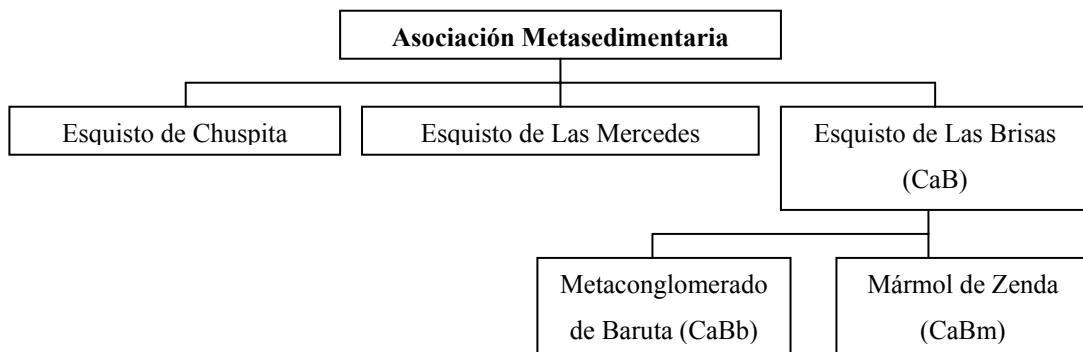


2.2.1 Aluvión (Qal):

Se encuentra en los cauces de los drenajes aflorando de manera discontinua y está presente en el curso del río Guarenas. Se encuentra discordante sobre la Formación Guatire y sobre los Esquistas de Las Mercedes y Las Brisas. Edad Reciente.

2.2.2 Terrazas aluvionales (Qtz):

Picard (1976) describe esta unidad constituida principalmente por sedimentos con alto contenido de óxidos y granos teñidos de óxido. Sus contactos, al igual que el aluvión, son discordantes sobre las unidades adyacentes y concordantes con el aluvión. Picard y Pimentel (1968) refieren que esta unidad se encuentra en los cauces de los ríos que atraviesan la cuenca. Audemard (1984) realiza una descripción de las terrazas aluvionales en la quebrada Soapire y las menciona como secuencias con un alto contenido conglomerático de tonos pardo rojizos y matriz arenosa, que en ocasiones presenta intercalaciones de limolita y lutita; indica que estas secuencias varían de espesor y proporción. También destaca que esta unidad es la más elevada, antigua y alejada del curso de los ríos. Orta (2003) realiza una clasificación esquemática bien concisa de las rocas metasedimentarias y metaígneas presentes en la Napa Caracas basada en el trabajo de Urbani (2002), que se muestra a continuación:



2.2.3 Asociación Metasedimentaria Caracas:

Esta asociación hoy día esta constituida por los esquistos de Las Brisas, Las Mercedes y Chuspita, ocupando la franja septentrional de la Serranía Costera de la Cordillera de la Costa, inmediatamente al sur de las franjas que ocupan las asociaciones La Costa y Ávila.

Urbani (2000) propone cambiar el nombre de Grupo Caracas a Asociación Metasedimentaria Caracas, para adaptar la nomenclatura a las normas de unidades litodémicas.

Litología tipo: La litología típica del Esquisto de Las Brisas es el esquisto (o filita) cuarzo - muscovítico - feldespático±clorítico, así como metarenisca y metaconglomerado también cuarzo - feldespático - micáceo. En el Esquisto de Las Mercedes predomina el esquisto cuarzo - calcáreo - muscovítico - grafitoso, de color gris oscuro, e igualmente en el Esquisto de Chuspita, si bien en ella hay mayor abundancia de metarenisca. Para mayores detalles véase las unidades citadas.

Extensión geográfica: La Asociación aflora típicamente en la región de Caracas - Los Teques y sus alrededores, y se ha cartografiado como una franja casi continua en sentido este - oeste que se extiende desde el estado Yaracuy, hasta la zona de Barlovento en el estado Miranda. Sus unidades constituyen una franja predominante de la Cordillera de La Costa. Barboza y Rodríguez (2002) muestran la distribución de esta Unidad en el estado Vargas.

Contactos: Los contactos entre las rocas de esta Asociación con la Asociación Metamórfica Ávila hacia el norte (Urbani y Ostos, 1989) y con las rocas de la faja Caucagua - El Tinaco al sur son tectónicos (Beck, 1986). El contacto entre los esquistos de Las Brisas y Las Mercedes es tectónico (Urbani *et al*, 1989), mientras que entre los esquistos de Las Mercedes y Chuspita parece ser concordante y transicional (Seiders, 1965).

Edad: Las determinaciones paleontológicas de los hallazgos de Wolcott (1943) y Urbani (1969, 1973) permiten asignarle al Esquisto de Las Brisas una edad Jurásico Tardío - Cretácico, mientras que los esquistos de Las Mercedes y Chuspita generalmente se han considerado como de edad Cretácico, por lo tanto la Asociación en su totalidad puede considerarse como Jurásico - Cretácico.

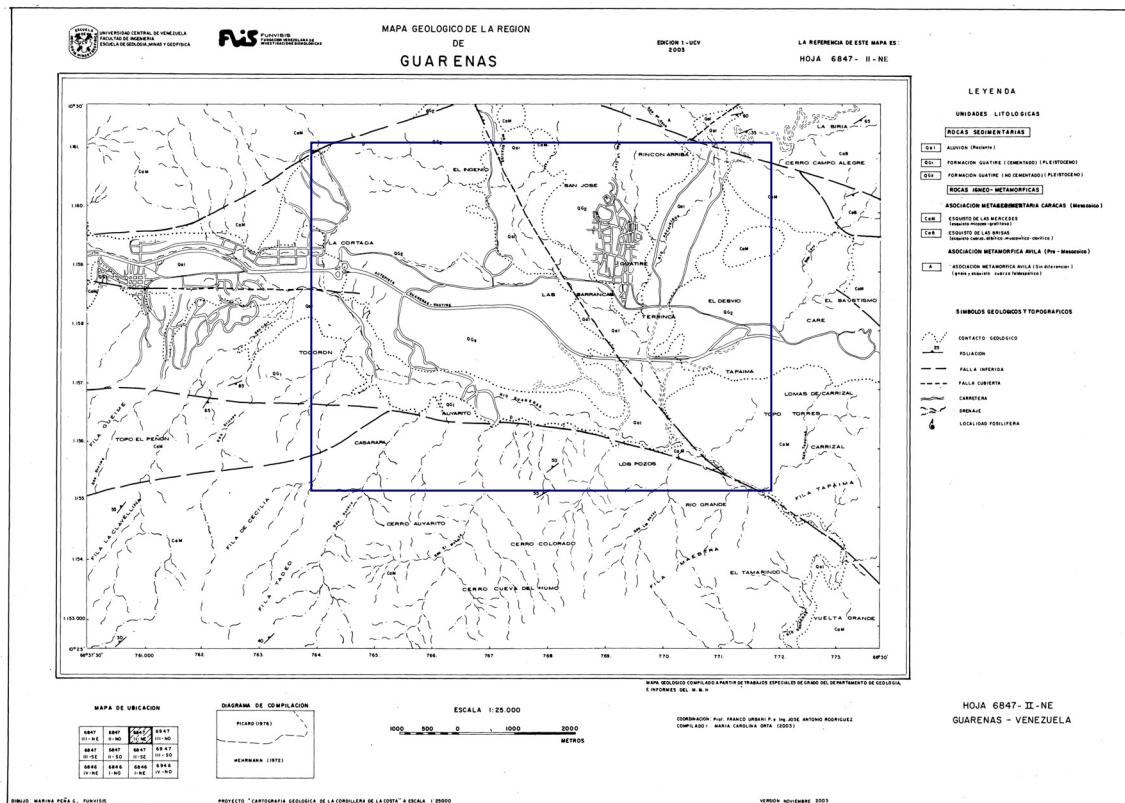


Figura 2.3. Mapa Geológico de la Cuenca Guarenas-Guatire. El área dentro del recuadro azul representa la zona de estudio. Tomado del Atlas de la Cordillera de la Costa, Urbani y Rodríguez (2004).

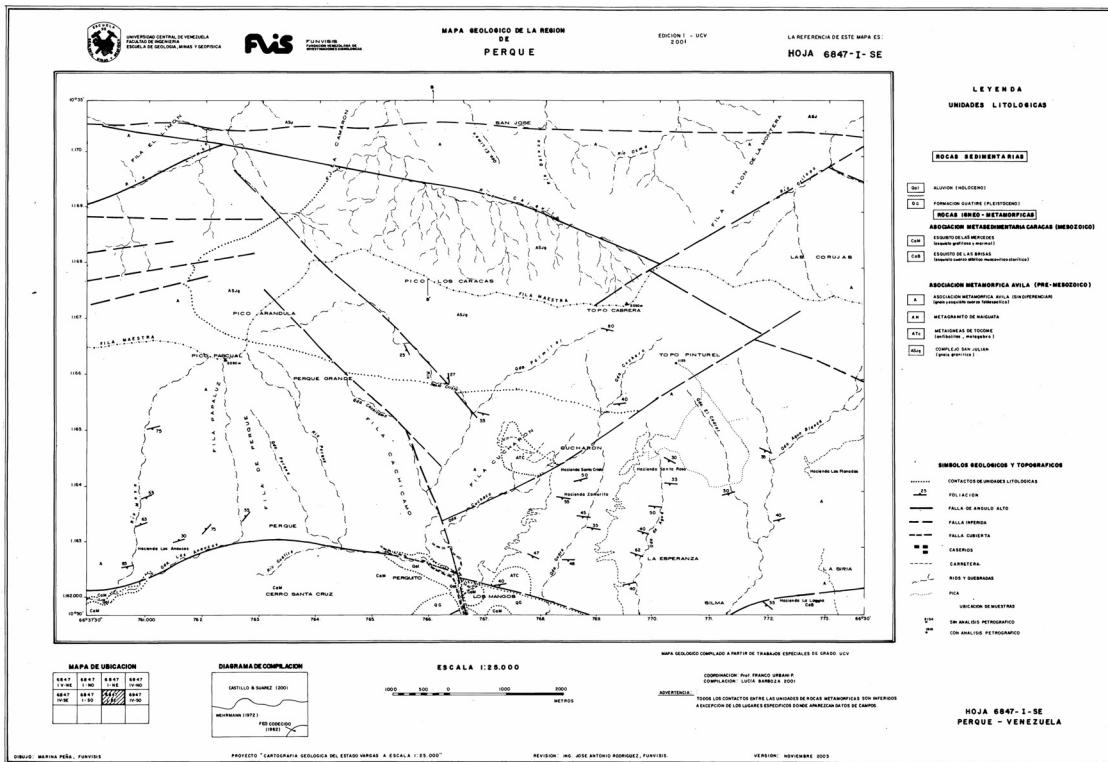


Figura 2.4. Mapa geológico del flanco sur del Macizo Ávila. Prolongación hacia el norte del área de estudio. Tomado del Atlas de la Cordillera de la Costa, Urbani y Rodríguez (2004).

2.3 TECTONISMO Y SEDIMENTACIÓN DE LA CUENCA GUARENAS-GUATIRE

La cuenca de Guarenas y Guatire fue formada bajo la influencia tectónica del levantamiento de la Cordillera de la Costa. Actualmente no existe aún una teoría definitiva de la orogénesis de esta Cordillera, y se han propuesto modelos tanto, autóctonos (Navarro et al., 1988) como alóctonos (Ostos, 1990; Pindell y Barret, 1990; Pindell, 1993) para explicar este levantamiento, pero ninguno ha sido determinante, aunque los modelos alóctonos actualmente están cobrando mayor credibilidad por muchos geólogos y geofísicos. Todo el norte de Venezuela constituye el margen límite de la placa tectónica Suramericana y la placa tectónica del

Caribe siendo éste un cinturón hecho de varias unidades tectónicas imbrincadas tanto oceánicas como continentales, acretadas con una vergencia hacia el sur desde el Cretáceo Tardío (Beck, 1986; Bellizia, 1986; Ostos, 1990). Giunta et al. (2002) indican que este cinturón ha sido afectado y desmembrado progresivamente por una deformación que va desde muy frágil a dúctil, relacionadas al gran sistema de fallas dextrales E-O conformado por: la Falla del Pilar, la Falla de San Sebastián y la Falla de Oca-Ancón, y aunados a éstas los sistemas de fallas conjugados (La Victoria, Tacata, Charallave)

Según el modelo alóctono se establece el emplazamiento de napas (Beck, 1986), entendiendo por éstas como un manto rocoso que se traslada como una sola unidad, siendo el traslado tectónico por gravedad o por compresión cortical. Así en el norte de la región central del país encontramos la configuración de un conjunto de napas como se observa en la figura 2.5.

Las unidades sedimentarias presentes en la Cuenca de Guarenas-Guatire representan los depósitos más recientes sobre la napa de Caracas depositados en un sinclinal de edad Plio-pleistoceno, estando éstos en casi toda su extensión en discordancia erosional sobre los Esquistos de Las Mercedes y al oeste sobre una pequeña porción de los Esquistos de Las Brisas.

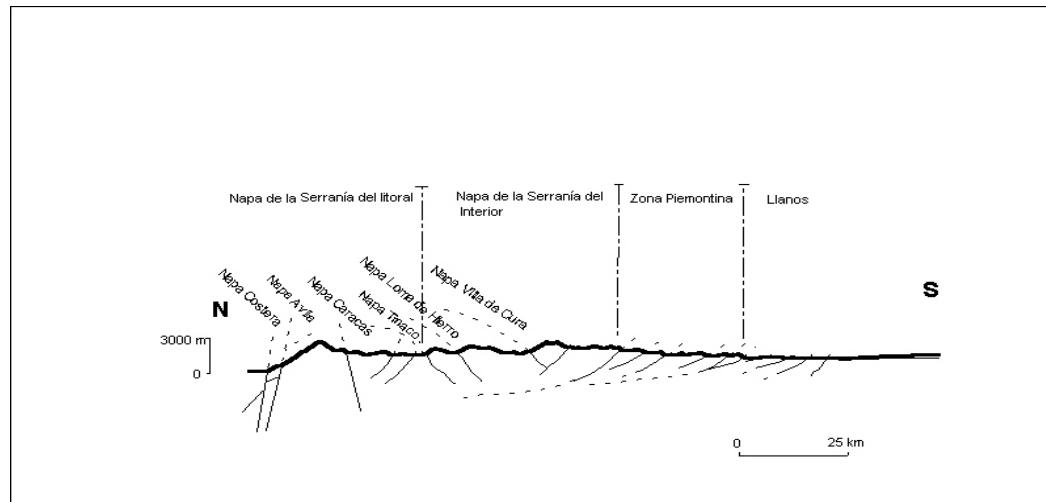


Figura 2.5. Corte transversal sintético de la Cordillera de la Costa. Modificado de Orta (2003).

La cuenca de Guarenas-Guatire es una cuenca cerrada que representa un lago formado tectónicamente y cortado hoy en día por el río Guarenas. Afloran la Formación Guatire, terrazas aluvionales levantadas y aluviones recientes.

La Formación Guatire constituye la unidad geológica representativa de la cuenca, siendo ésta erosionalmente discordante sobre las rocas metamórficas de la Asociación Metasedimentaria Caracas (Picard, 1976), en mayor área sobre el Esquisto de Las Mercedes y en su parte oeste sobre el Esquisto de Las Brisas, en una cuenca sinclinal recubierta por aluviones.

En la figura 2.6 se puede observar la distribución estratigráfica de los sedimentos de la Formación Guatire la cual se relaciona con la fisiografía y geología de la fuente de sedimentos. Hacia el norte abundan conglomerados, areniscas y limos raramente cementados provenientes del Macizo del Ávila-Cabo Codera, acumulados como conos aluviales piemontinos que cubren gran parte de la cuenca. Hacia el suroeste hay una franja de rocas clásticas cementadas por calcita, arcilla y limos calcáreos, calizas fosilíferas y limos con vegetales fósiles; esta asociación puede representar el borde sur de la cuenca lacustre, influenciada por la fuente de sedimentos de los Esquistos de Las Mercedes expuesta en la Fila de Mariches. Hacia el centro de la cuenca, coincidiendo con la zona más profunda, hay acumulación de arcillas recubiertas por secuencia fluvial (Picard, 1976).

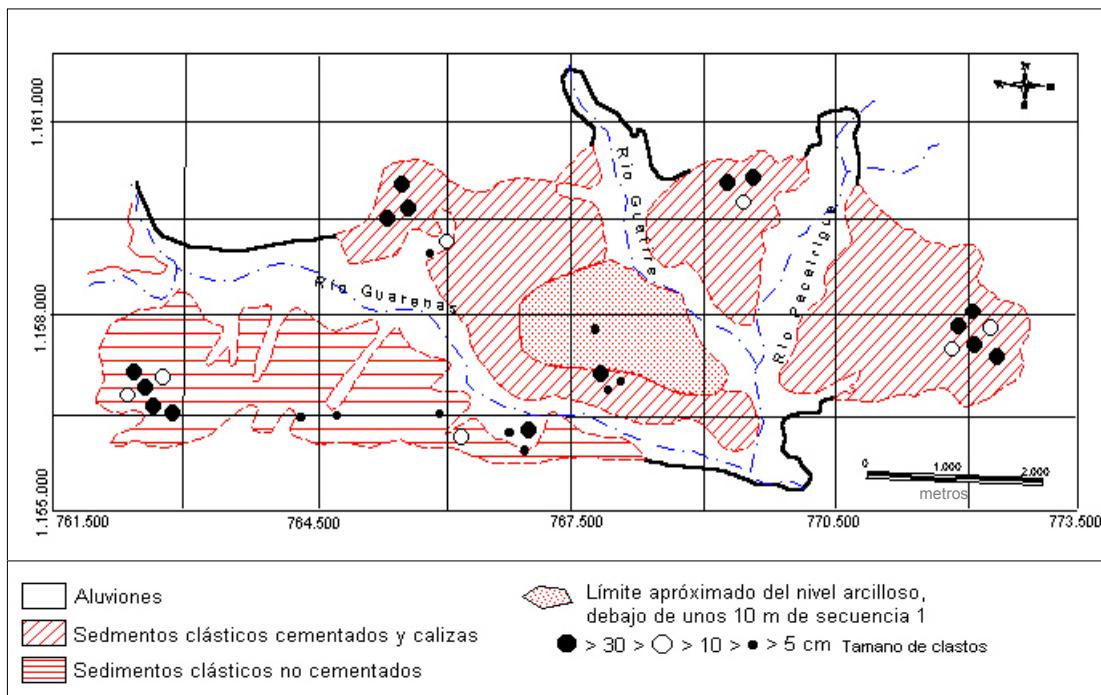


Figura 2.6. Distribución geográfica de los sedimentos de la Formación Guatire (SIG). Modificado de Picard 1976.

2.4 CONSIDERACIONES PALEOGEOGRÁFICAS

Picard (1976) realiza un importante análisis de las paleocorrientes para determinar la forma de la cuenca y la distribución de los sedimentos dentro de la misma. Menciona que la cuenca fue un lago Plio-Pleistoceno, enclavado en la Cordillera de la Costa, y controlado por fallas y movimientos basculantes. Asimismo propone un modelo en el cual la forma de la hoyuela de drenaje se asemeja a una elipse con el lago en el foco oriental (figura 2.7). En la figura del lado izquierdo se observa una cuenca en forma de hoyuela hidrográfica elíptica, en esta cuenca todo el drenaje es hacia la elipse señalada. En la figura de la derecha se observa la misma cuenca después de sufrir un basculamiento debido a movimientos tectónicos diferenciales, que en este caso lo simula la cuña que se observa en el lado superior. Como

consecuencia de este movimiento el cuerpo de agua se coloca ahora tangente a la elipse exterior (divisoria de aguas) por cuyo punto de tangencia comienza el desagüe; el drenaje que se observa es parecido al drenaje actual del área. La paleopendiente más pronunciada es la que proviene del Ávila, la cual es la que aporta la mayor cantidad de volúmenes de material derivado de las unidades geológicas del Complejo San Julián y Metagranito de Naiguatá de la Asociación Metamórfica. La acumulación de este material se produjo en forma de conos aluviales piemontinos. Por su parte, la pendiente del lado sur y oeste era menos pronunciada y por lo tanto menor el volumen de material transportado por los ríos, que probablemente tendieron a formar meandros (Picard, 1976).

El estudio de paleopendientes hecho por Picard (1976) también indica que la distribución de las mismas dentro de la cuenca formó un lago asimétrico con una costa sin bajos fondos y una pendiente pronunciada del fondo hacia el norte, con variabilidad gradual hacia los extremos este y oeste, para dar lugar en el borde sur a una costa baja con playas y aguas poco profundas. Hacia el centro del lago hubo acumulación de arcillas.

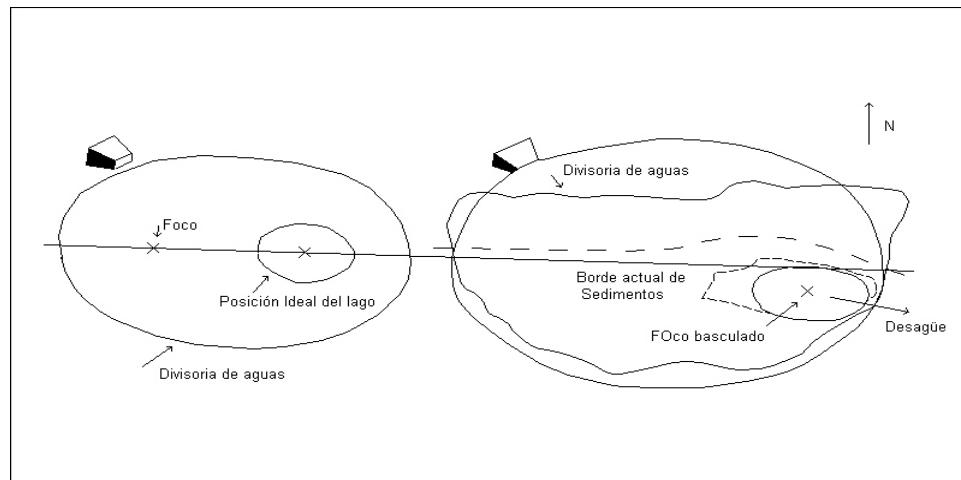


Figura 2.7. Modelo de basculamiento para la cuenca de Guatire. En la figura de la derecha se muestra la forma actual de la cuenca. Modificado de Picard (1976).

La asimetría del lago y de las paleopendientes condicionaron un suministro de sedimentos continuo del norte y el oeste, y menos presente en el sureste del mismo. Hacia el norte se intercalaron sedimentos de talud piemontino y conos de deyección fluviales; este relleno gradual construyó dentro de la cuenca una paleopendiente al sureste. Finalmente el lago se llenó con relativa rapidez y los ríos comenzaron a erosionar y modelar la cuenca hasta su configuración actual (Picard, 1976).

2.5 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

2.5.1 Generalidades

La Cuenca Guarenas-Guatire constituye un sinclinal controlado por tectonismo. Al norte del mismo se encuentra el antiforme del Ávila el cual constituye junto con el antiforme de El Junquito estructuras plegadas mayores de la Serranía del Litoral (Barboza y Rodríguez, 2001).

2.5.2 Fallas

Las fallas presentes en el área coinciden con las direcciones dadas por Wehrmann (1972) para esta zona. Por la cuenca Guarenas-Guatire pasa una gran falla regional, la Falla del Ávila, la cual es longitudinal de rumbo E-W, siendo ésta la falla más antigua de la zona (Barboza y Rodríguez, 2001, figuras 2.1 y 2.11). Al norte de la Napa del Ávila, en el flanco norte del sistema montañoso del mismo nombre, se encuentra definiendo la línea de costa, la Falla de San Sebastián (Beltrán, 1993), la cual es tectónicamente activa. Barboza y Rodríguez (2001) indican que en fotografías aéreas se observa claramente como la Falla del Ávila coloca en contacto a unidades de la Asociación Metasedimentaria de Caracas con la Asociación Metamórfica del Ávila. Asociada a esta falla se encuentran otras fallas secundarias con orientaciones similares.

2.6 GEOLOGÍA LOCAL

2.6.1 Consideraciones Fisiográficas

Al igual que el Valle de Caracas, el Valle de Guarenas – Guatire está situado al sur del macizo del Ávila, en la Serranía del Litoral de la Cordillera de la Costa (Picard, 1976); tiene una longitud de unos 100 km y una anchura promedio de 8 km (El pico más elevado de la Cordillera, el Naiguatá, de 2.765 m. s.n.m., se encuentra en esta cadena). La mayor elevación frente al Valle de Guarenas-Guatire es el pico Amate o Zamurito de 2.016 m. La cuenca de drenaje del río Guarenas en la cadena abarca desde el pico Naiguatá hasta Topo El Oso bajando por la Fila Santa Rosa en el lado occidental y por la Fila Bautismo en el lado oriental. El Valle de Guarenas-Guatire está situado en una depresión de la Serranía del Litoral (Figura 2.2), a una altura media de 330 m. La Fila de Mariches es su divisoria de aguas meridionales, alcanza 1000 m en el Topo Güeime y 1200 m en el Topo Guanasnita cerca de Petare. Geomorfológicamente la Serranía del Litoral en su tramo Ávila-Cabo Codera está en etapa de juventud, la Fila de Mariches en etapa de juventud avanzada y el Valle de Guarenas-Guatire en etapa de madurez temprana a media. El río Guarenas se encaja a la salida del valle en las inmediaciones de Los Pozos, en un angosto valle joven que continúa hasta Caucagua en la depresión de Barlovento (Picard, 1976).

2.6.2 Generalidades

La figura 2.8 representa el mapa geológico para la cuenca de Guarenas-Guatire elaborado por Wehrmann (1972). Este trabajo constituye uno de los primeros estudios desarrollados en el área. Al final de este capítulo se muestra el mapa del área de estudio tomado del Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa elaborado por Urbani y Rodríguez (2004) el cual representa el mapa geológico principal para los análisis del presente trabajo y para explicar la geología del área.

La Cuenca de Guarenas-Guatire está situada en la Faja Tectónica de la Cordillera de la Costa (Menéndez, 1966) al sur de la zona de fallas del Ávila

(Wehrmann, 1972; Figura 2.1). Esta zona es denominada según Urbani et al. (2000) como la Franja meridional de la Súper Asociación Ígneo Metamórfica de la Cordillera de la Costa. Al norte de la zona de fallas está el Macizo del Ávila-Cabo Codera, donde aflora la Asociación Metamórfica Ávila y más al norte el Complejo San Julián (Urbani et al., 2000). Al sur de la falla en la unidad fisiográfica Fila de Mariches, afloran los Esquistos de Las Mercedes y Las Brisas. Wehrmann (1972) trabaja la zona de Guatire-Colonia Tovar establece que la Cordillera de la Costa fue afectada y modificada por tres procesos orogénicos que no necesariamente están relacionados entre si.

En este mismo trabajo Wehrmann (1972) define tres tipos de fallas:

- 1) Fallas oblicuas de rumbo aproximado N50°-80°E.
- 2) Fallas longitudinales de rumbo este-oeste con una componente longitudinal dextral, incluyendo al sistema de fallas del Ávila, con buzamiento casi vertical norte o sur.
- 3) Fallas transversales de rumbo N60°O, incluyendo a la falla de Chacaíto.

En la figura 2.8, se observa la geología para la cuenca de Guarenas y Guatire descrita por Wehrmann (1972) en la cual se basaron los trabajos de Picard (1976) y el estudio gravimétrico llevado a cabo por Graterol (1970). En éste se muestran al norte de la falla del Ávila los Esquistos de las Brisas, sin embargo en el Atlas de la Cordillera de la Costa elaborado por Urbani y Rodríguez (2004) aparece al norte de esta falla lo que denominó Urbani (2000) como la Asociación Metamórfica Ávila y al norte de ésta el Complejo San Julián. Las demás formaciones geológicas presentes en la figura 6, Esquisto de las Mercedes y la Formación Guatire, se conservan igual aunque con mayor detalle en el Atlas de la Cordillera de la Costa.

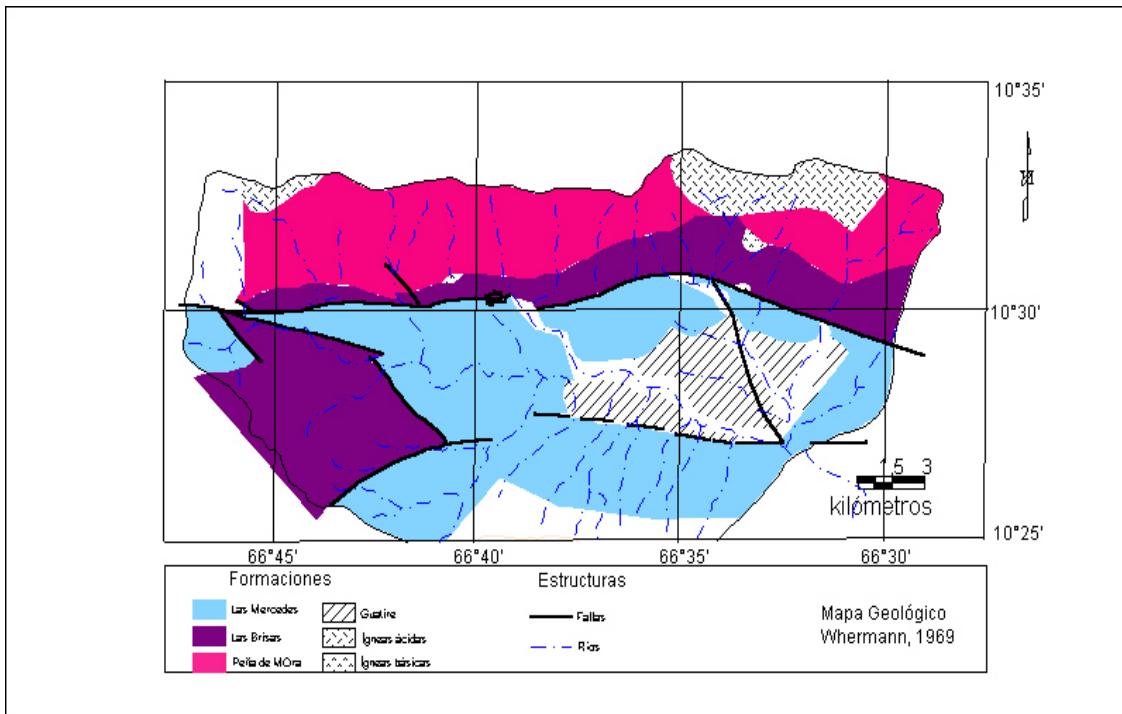


Figura 2.8. Mapa geológico de la cuenca Guarenas-Guatire. Modificado de Picard 1976.

Picard (1976) realiza un estudio muy completo de la geología de la Cuenca Guarenas-Guatire. En éste señala que la cuenca es cerrada, con área de drenaje que incluye rocas metamórficas en zona de las facies de esquistos verdes de la Cordillera de la Costa. Distribuye los sedimentos dentro de la Cuenca en dos zonas (figura 2.6): una de influencia norte con conos aluviales piemontinos, que interdigitan hacia el sur con la segunda zona, de sedimentos fluviales y lacustres con cierta porción de carbonatos. La cuenca lacustre que dominó la sedimentación de la Formación Guatire se formó en el Plioceno y fue rellenándose de norte a sur y de oeste a este, dejando una paleopendiente sureste para el régimen fluvial que continuó después del relleno del lago.

En sus conclusiones destaca que la Cuenca Guarenas-Guatire representa una sedimentación intramontana post-orogénica en una cuenca controlada por tectonismo, donde se acumularon principalmente sedimentos de conos aluviales piemontinos. La acumulación de estos aluviones fue en detrimento de un pequeño lago profundo,

pudiendo tener éstos un espesor de unos 200 m, bordeado hacia el sur por una zona pantanosa con cauces que probablemente formaban meandros y lagunas, y con una costa amplia de aguas poco profundas. Hacia el centro del lago se acumuló gran cantidad de clásticos finos (arcillas).

2.6.3 Formación Guatire

Formación Guatire (QG_1 , QG_2): Este nombre designa los sedimentos poco consolidados de suave buzamiento expuestos en la Cuenca Guarenas-Guatire (figura 2.10). La unidad consiste en una porción de sedimentos clásticos cementados (QG_1), gravas y conglomerados (32 % del total de sedimentos) mal consolidados en capas de más de 1 metro de espesor que pasan progresivamente a sedimentos clásticos no consolidados (QG_2), arenas y limos laminados (26 %), un 40 % arcillas hacia el centro de la cuenca y un 2 % de calizas fosilíferas (Orta, 2003).

Localidad tipo y extensión geográfica: la localidad tipo de la formación se puede observar en la carretera actual Guatire-Caucagua, se extiende por unos 4 km desde el contacto con las rocas metamórficas del Esquisto de Las Mercedes en el sitio llamado El Rodeo, cerca de Araira, hasta unos 500 m antes de Guatire, en el contacto con el aluvión del Río del Norte; afloran alrededor de 350 m de sedimentos. La sección se caracteriza por seis secuencias de conglomerados seguidos por intercalaciones de arenas y limos. El primer conglomerado, con un espesor de unos 15 m, comienza con grandes bloques angulares seguidos por una capa con bloques angulares de unos 30 cm que pasa a una capa con cantos redondeados, a la cual siguen arenas, gravas y limos laminados intercalados. Las secuencias se iniciaron con un conglomerado grueso polimixto, mal escogido, de unos 5 a 10 mm de espesor; siguen generalmente gravas y arenas progresivamente más finas hasta limos laminados. Se pueden encontrar delgados lechos cementados con calcita y concreciones calcáreas, así como lechos de 2 a 3 cm de óxido de hierro. En la secuencia pueden haber capas de 2 a 3 m de

conglomerados, a veces cementados con cantos de unos 2 cm de diámetro. Las secuencias alcanzan 45 a 70 m de espesor (Picard, 1976).

Espesor: En la sección tipo el espesor es de aproximadamente 350 m. Bermúdez (1966) estimó 400 m de espesor para los sedimentos en la cuenca Guarenas-Guatire. Graterol (1970) indica que el espesor de la unidad, obtenido por mediciones gravimétricas, es de 200 m en el centro de la cuenca con un máximo de 270 m al suroeste de Guatire.

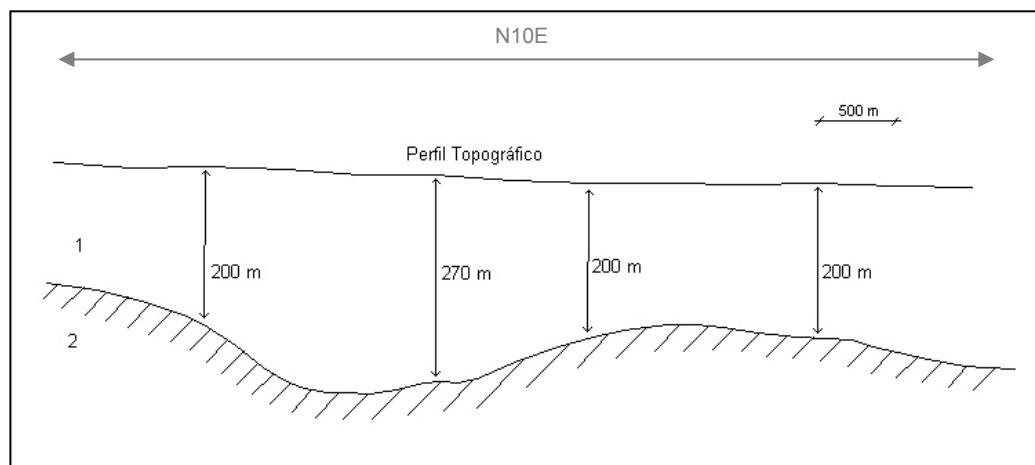


Figura 2.9. Perfil transversal de la cuenca de Guatire mostrando los espesores, basado en métodos gravimétricos. Aproximadamente a 1 km al oeste del pueblo de Guatire, Graterol (1978).

Contactos: La Formación Guatire es discordante sobre las rocas metamórficas del Grupo Caracas (Esquistos Las Mercedes), e infrayace localmente a terrazas aluvionales y aluviones recientes, en una cuenca sinclinal (Picard, 1976).

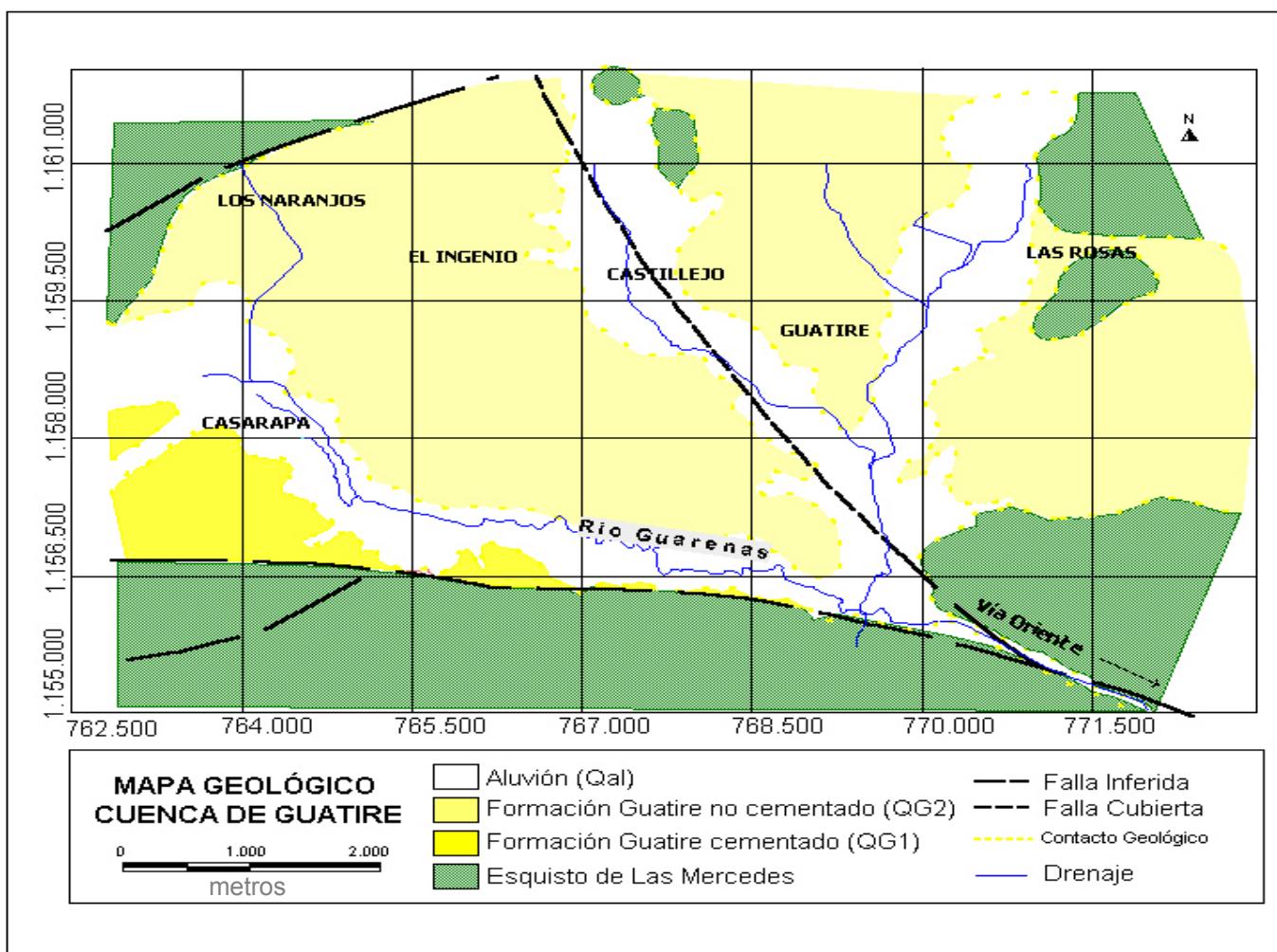


Figura 2.10. Mapa geológico del área de estudio digitalizado en el programa Mapinfo (SIG). Modificado del Atlas de la Cordillera de la Costa, Urbani y Rodríguez (2004).

CAPÍTULO III

SÍSMICA DE REFRACCIÓN

3.1 GENERALIDADES

Los métodos sísmicos de exploración geofísica se basan en el hecho de que las ondas elásticas viajan con velocidades diferentes en rocas diferentes. El principio es iniciar tales ondas en un punto, y determinar en un cierto número de otros puntos el tiempo de llegada de la energía que ha sido refractada o reflejada por las discontinuidades entre diferentes formaciones rocosas. Esto permite deducir la posición de las discontinuidades. (Parasnis, 1970)

Existen dos grandes campos dentro de los métodos sísmicos: Sísmica de refracción y sísmica de reflexión. Como lo indican sus nombres, el primero se encarga de analizar las señales que son refractadas mientras que el segundo estudia y analiza las ondas que son reflejadas.

Son varias las diferencias entre el método de sísmica de refracción y el método de sísmica de reflexión, entre las que se pueden mencionar: el tipo de carga empleada como fuente, los rangos de frecuencia en los cuales se trabaja en cada método, las distancias fuente-receptor empleadas. Estas últimas son mayores en el método de refracción debido a que las trayectorias que siguen los rayos refractados son mayores a las trayectorias que siguen los rayos reflejados.

La diferencia más relevante es que en la sísmica de refracción el parámetro más importante es la velocidad con la cual una onda viaja por una capa litológica. Este parámetro está asociado a la densidad de las rocas presentes en dicha capa y no cambia a lo largo de ésta hasta encontrar otro contraste de densidad. Entonces mediante el método de sísmica de refracción se obtienen las velocidades asociadas a las distintas capas que se encuentran en el subsuelo. La capacidad de alcanzar una profundidad determinada en un estudio de sísmica de refracción depende de la fuente empleada en el estudio y de la separación fuente receptor.

Para el presente estudio se aplicó el método de sísmica de refracción debido a que uno de los objetivos de la investigación consiste en obtener valores de velocidad de las ondas P y S para las capas más someras que conforman el subsuelo del área.

3.2 PRINCIPIO EN QUE SE BASA EL MÉTODO DE SÍSMICA DE REFRACCIÓN

La base del método de refracción sísmica proviene de la extensión en el estudio de las ondas sísmicas de la Ley de Snell de la óptica. Si una capa en la cual las ondas sísmicas tienen una velocidad V_1 tiene debajo otra capa con velocidad V_2 entonces por la ley de Snell o de la refracción. (figura 3.1)

$$\frac{\sin(i_1)}{V_1} = \frac{\sin(i_2)}{V_2} = p \quad (\text{ec. 3.1})$$

donde p es el parámetro de rayo y es constante para un medio lateralmente homogéneo.

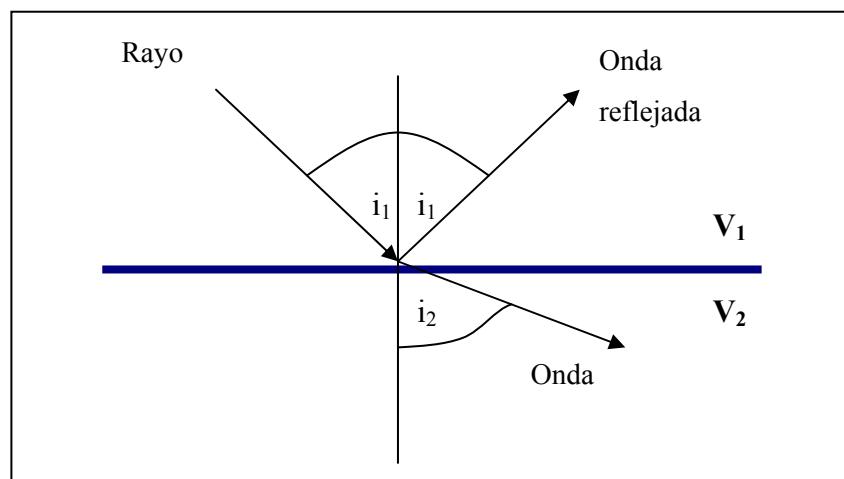


Figura 3.1. Onda refractada y reflejada generadas por la incidencia de un rayo sobre un medio plano, donde $V_1 < V_2$.

En la figura 3.1 se observan las ondas refractada y reflejada en una interfase, con la condición de que la velocidad del medio superior es menor que la del medio inferior. Los ángulos i_1 e i_2 son los ángulos de incidencia y refracción del rayo sísmico.

3.2.1 Refracción de ondas sísmicas, caso sencillo.

Ahora consideraremos el caso idealizado en la cual la tierra está conformada por capas horizontales homogéneas lateralmente de igual velocidad dentro de cada capa. Para este análisis se tomará el caso más sencillo de una capa con la velocidad de la primera menor que la velocidad de la segunda capa. (Figura 3.2).

Ahora definimos el ángulo crítico: existe un punto en el cual incide un rayo sísmico (punto B, figura 3.2) que genera una onda refractada con un ángulo de 90° con la vertical. Recordando la ley de Snell se tiene:

$$\frac{\sin(i_c)}{V_1} = \frac{\sin(90)}{V_2} = \frac{1}{V_2} \quad (\text{ec. 3.2})$$

por lo tanto el rayo empieza a desplazarse por la superficie de separación de ambos medios con la velocidad del medio inferior (Dobrin, 1961). Entonces el ángulo crítico es aquel ángulo del rayo incidente con la vertical que genera el rayo refractado que viaja en la superficie de separación de ambos medios (segmento BC en la figura 3.2).

Entonces el rayo AB cuyo ángulo de incidencia es el ángulo crítico se refracta de modo que $i_2 = 90^\circ$ y viaja a lo largo del límite entre los dos medios. Esto es posible solo si $V_1 < V_2$. Debido a este rayo, la interfaz o superficie límite está sometida a un esfuerzo oscilante y cada punto de ella emite otras ondas secundarias y los rayos tales como CD emergen a la capa superior alcanzando al geófono con un ángulo i_c (ángulo crítico).

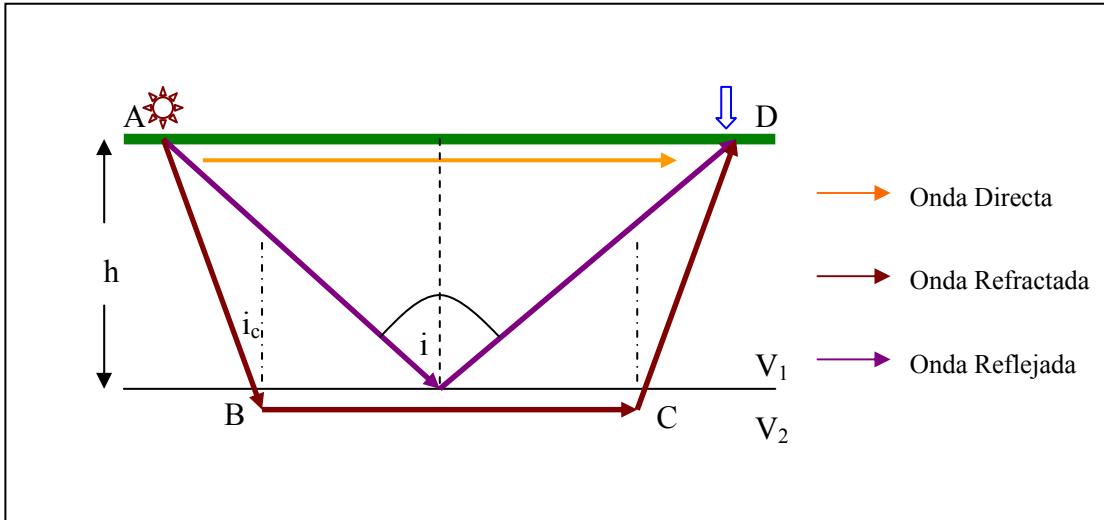


Figura 3.2. Representación de los distintos rayos sísmicos generados por una fuente ubicada en superficie.

Si el punto de registro (D en la figura 3.2) está próximo al punto de tiro, el primer impulso del sismómetro será debido a la llegada de la onda directa (AD). Después de algún tiempo se observará un segundo impulso que corresponderá a la onda refractada. Sin embargo, si la distancia entre la fuente y el receptor es suficientemente grande la primera llegada corresponderá a la onda refractada con el ángulo crítico que sigue la trayectoria ABCD, la cual habrá adelantado a la onda directa a causa de la mayor velocidad a lo largo del segmento BC.

El tiempo de llegada de la onda directa, entonces será:

$$t = x / V_1 \quad (\text{ec. 3.3})$$

donde x , es la distancia desde la fuente hasta el primer receptor en superficie. La representación gráfica de esta onda en un gráfico de distancia contra tiempo, será una línea recta que pasa por el origen con la pendiente de $1 / V_1$ (Figura 3.3). Recordando que $\sin i_c = V_1 / V_2$ se prueba que la ecuación para la onda refractada es:

$$t = \frac{x}{V_1} + 2 \times h(V_2^2 - V_1^2)^{1/2} \quad (\text{ec. 3.4})$$

que es también una línea recta, pero con pendiente $1/V_2$ y cuya ordenada en el origen es el tiempo de intercepto y viene dado por el segundo término de la ecuación 3.4.

Igualando 3.4 con x/V_1 se obtiene la distancia o abscisa de la intersección de las dos rectas. Más allá de esta distancia crítica (x_c) la onda refractada es la que primero llega al receptor. Se demuestra fácilmente que:

$$X_c = 2h ((V_2 + V_1)/(V_2 - V_1))^{1/2} \quad (\text{ec. 3.5})$$

De este modo, el gráfico tiempo contra distancia o dromocrónica (Figura 3.3) de las primeras llegadas a los receptores colocados a distintas distancias de la fuente, presentará dos tramos rectos con un punto en común y cuyas pendientes nos dan $1/V_1$ y $1/V_2$. El punto de intercepción x_c suministra el valor de espesor de la capa h o capa superior (ec. 3.5). Alternativamente h puede determinarse también a partir del tiempo interceptado sobre el eje t .

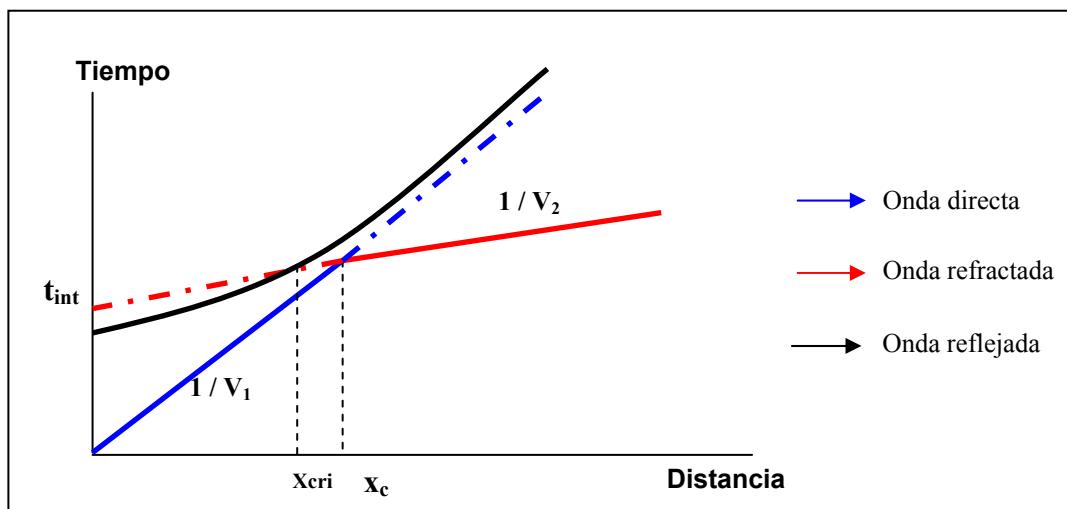


Figura 3.3. Dromocrónica para las ondas directas, reflejadas y refractada, nótese el x_c , x_{cri} y las velocidades para cada tipo de onda.

3.2.2 Refracción de ondas sísmicas en capas buzantes

Como los estratos en el subsuelo no son siempre planos ahora consideraremos el caso en el cual el estrato tiene cierta inclinación a lo largo del perfil como se muestra en la figura 3.4.

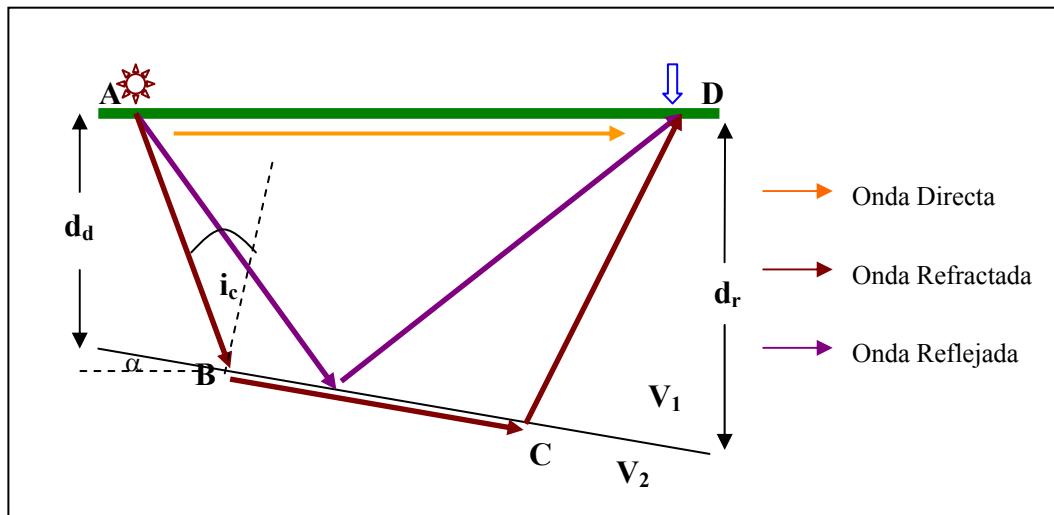


Figura 3.4. Representación de los distintos rayos sísmicos generados por una fuente ubicada en superficie con una capa buzante.

En los modelos con capas buzantes, así como en los de capas planas, se cumple la condición de reciprocidad, afirmando que los tiempos de viaje de las ondas son los mismos al intercambiar la posición de las fuentes y los receptores. En la figura 3.5 se muestra la condición de reciprocidad, ilustrando que el tiempo directo t_d es igual al tiempo reverso t_r .

La expresión del tiempo de viaje en una trayectoria buzamiento abajo es la siguiente:

$$t_{id} = \frac{x \times \cos(\alpha)}{V_2} + (2d_{ba} + x \times \operatorname{sen}(\alpha)) \cos\left(\frac{i}{V_1}\right) \quad (\text{ec. 3.6})$$

La expresión de tiempo de viaje para una trayectoria buzamiento arriba es la siguiente:

$$t_{id} = \frac{x \times \cos(\alpha)}{V_2} + (2d_{barr} + x \times \operatorname{sen}(\alpha)) \cos\left(\frac{i}{V_1}\right) \quad (\text{ec. 3.7})$$

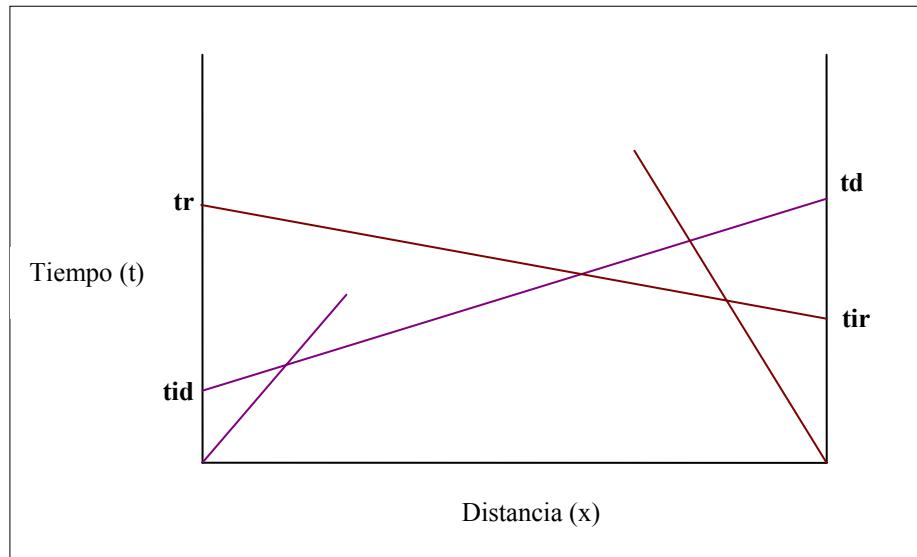


Figura 3.5. Dromocrónica de doble disparo.

En las dos expresiones i representa el ángulo de incidencia (medido respecto a la vertical) y α el ángulo de buzamiento.

Como se mencionó anteriormente se cumple la condición de reciprocidad de forma tal que $t_d = t_r$ pero, de las expresiones de tiempo de viaje se observa que, $t_{ir} = t_{id}$ debido a que $d_r > d_d$. En la figura 3.5 se observa que la línea de tiempo de viaje que se extiende desde t_{id} hasta t_d , representa el tiempo de viaje para ondas refractadas buzamiento abajo, cuya pendiente determina el inverso de la velocidad aparente $1/V_1$. El mismo argumento se maneja para las ondas refractadas buzamiento arriba. De acuerdo con las observaciones anteriores, se debe cumplir que las velocidades aparentes de las ondas que se propagan buzamiento arriba es mayor que las homólogas opuestas.

Si se calcula el tiempo de llegada con el receptor ubicado a una distancia media entre las dos fuentes, podrá notarse que $t_{ir} > t_{id}$, debido a que la trayectoria de los rayos que se desplazan buzamiento abajo, a pesar de tener un camino de bajada por la capa mucho menor, la trayectoria seguida por el refractor es mucho más larga que los rayos que se desplazan en dirección contraria.

3.2.3 Tipos de tendidos para la sísmica de refracción

La geometría básica para realizar sísmica de refracción se denomina tendido “en línea” (in-line), el cual consiste en un arreglo de receptores a lo largo de una línea recta y una fuente ubicada en uno de los extremos del tendido. Una variación de este arreglo consiste en realizar disparos en ambos extremos del tendido, a esta modalidad se le llama tendido de disparos reversos.

La segunda geometría comúnmente usada para la realización de sísmica de refracción se denomina “propagación dividida” (Split-Spread), la cual consiste en una fuente ubicada en el medio de un tendido de receptores. En este tipo de tendidos la longitud del perfil debe ser lo suficientemente grande para que se garantice el registro completo de las ondas refractadas en una discontinuidad o una interfase de interés.

3.3 METODOLOGÍA DE LA ADQUISICIÓN

3.3.1 Ubicación de las estaciones

Los perfiles sísmicos de refracción se llevaron a cabo en el mes de julio de 2004. En total se realizaron 7 perfiles en tres jornadas de trabajo (figura 3.6). Los criterios para la selección de los sitios en los cuales se realizaron los perfiles sísmicos fueron: 1) contar con lugares en los cuales se tuviera una distancia libre no menor de 150 metros de longitud y una topografía regular a lo largo de ésta; 2) los perfiles sísmicos se distribuyeron dentro de la ventana de estudio con la finalidad de cubrir

áreas con distintas características geológicas, para así obtener un estimado de las velocidades de las ondas sísmicas de las capas sedimentarias someras en el área.

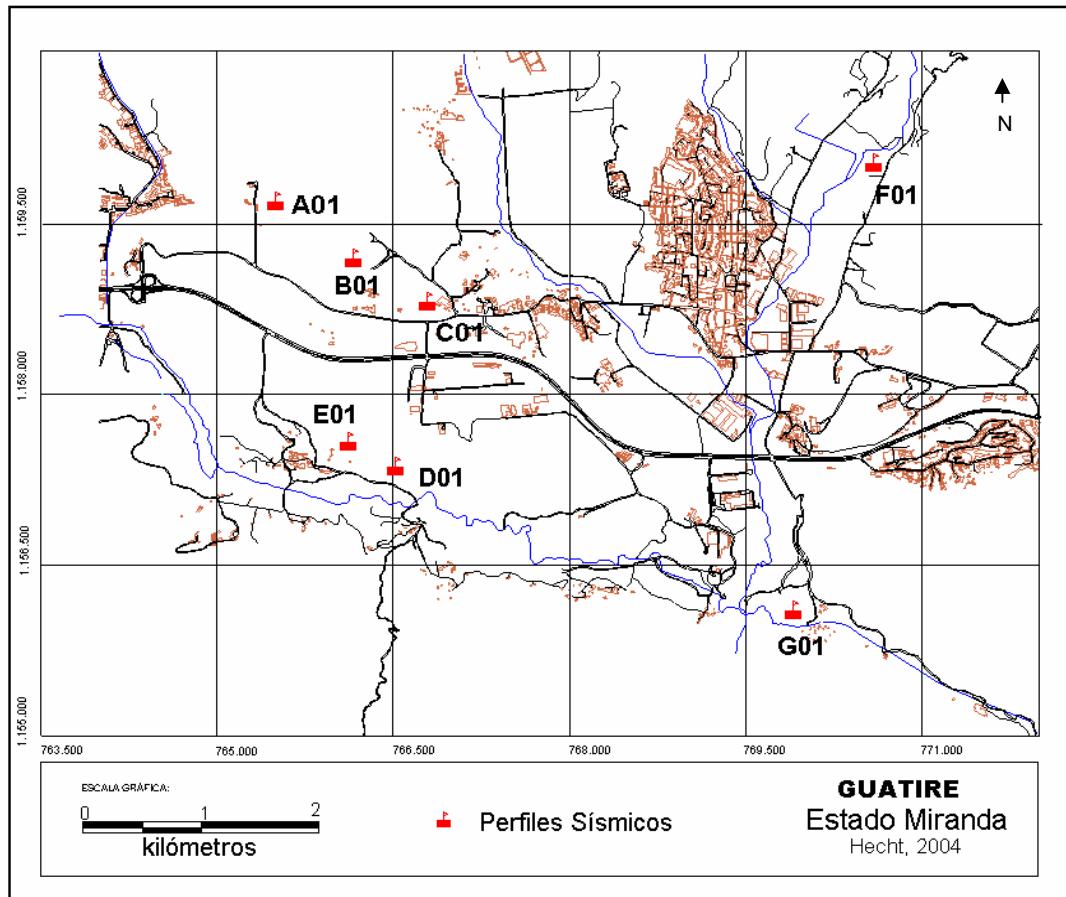


Figura 3.6. Ubicación de los perfiles sísmicos realizados en Guatire.

3.3.2 Geometría y parámetros de la adquisición.

La geometría de adquisición empleada consistió en disparos inversos y fue aplicada para todos los perfiles. Se realizaba un disparo en uno de los extremos, al que se le asignaba distancia cero (A), luego un disparo en el extremo contrario, a 144 metros (C), y finalmente un disparo de control en el punto intermedio del perfil (72 metros), denominado punto B. En la figura 3.7 se ejemplifica la metodología de

adquisición empleada. La fuente empleada consistió en golpes de mandarria sobre una plancha metálica.

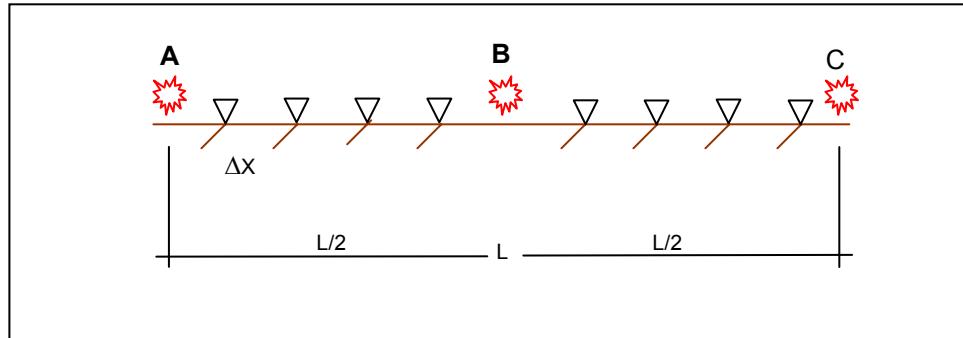


Figura 3.7. Modelo de la geometría de adquisición empleada.

Primero se realizaron golpes verticales sobre una plancha metálica para obtener los perfiles correspondientes a las ondas P, posteriormente se hicieron golpes laterales en planchas metálicas verticales colocadas en una base que se fija a tierra mediante cabillas que permiten obtener el campo de ondas S. En esta base se realizaron golpes laterales en dos direcciones (Figura 3.8).



Figura 3.8. fuente sísmica empleada para generar el campo de ondas S.

Para cada disparo se realizaron entre 30 y 40 golpes de mandarria para obtener una mayor amplitud en la respuesta sísmica (figura 3.9) y una mejor tasa señal-ruido. La distancia del punto de disparo al primer receptor (offset) para cada disparo fue 2,5 metros, a excepción del perfil B01 que fue de 2 metros. La distancia entre geófonos fue de 5 metros y la longitud total del tendido fue de 144 metros. Los parámetros de la adquisición se presentan en la tabla 3.1. Se emplearon los mismos parámetros para todos los perfiles exceptuando los perfiles A01 y B01.

Tabla 3.1. Parámetros de adquisición para cada perfil.

Perfil	Nro. de geófonos	Longitud (m)	Δx (m)	Distancia al primer geófono (m)	Intervalo de muestreo (ms)
A01	36	180	5	2,5	0,100
B01	34	134	4	2	0,100
C01	36	144	4	2,5	0,100
D01	36	144	4	2,5	0,100
E01	36	144	4	2,5	0,100
F01	36	144	4	2,5	0,100
G01	36	144	4	2,5	0,100



Figura 3.9. Izquierda: realización del perfil sísmico F01. Derecha: Golpes de mandarria empleados como fuente.

Se empleó un sismógrafo marca Geometrics, modelo Strataview de 48 canales, pero para el presente estudio se emplearon sólo 36 canales debido a una falla en una de las tarjetas del equipo. Se emplearon geófonos para ondas P de componente vertical y frecuencia de 30 Hz, mientras que para las ondas S se usaron receptores de componente horizontal y frecuencia de 28 Hz.

3.4 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.

El procesamiento de los datos consistió en 4 pasos: descarga y cambio de formato de los datos, selección de primeras llegadas, elaboración de los modelos 1D, y finalmente, elaboración de los modelos 2D.

Finalizada la etapa de adquisición de los perfiles sísmicos se procedió a descargar los datos del sismógrafo. La información quedó guardada en el disco duro del equipo en formato SEG2 y fue pasada a un computador personal. Para el cambio de formato se empleó el programa REFLEX versión 3.0 (Sandmeier Software, 1998), pasando la información de formato SEG2 a código ASCII.

3.4.1 Primera fase (Programa REFLEX)

El programa REFLEX es un paquete de procesamiento de datos sísmicos de refracción y reflexión que permite realizar diversos análisis de los datos sísmicos en todas sus etapas, tales como: cambio de formato, selección de primeras llegadas, modelos 1D, trazado de rayos (modelos 2D). Además, permite aplicar diversos filtros y funciones necesarias para mejorar la relación señal-ruido. El programa trabaja con 4 módulos distintos: análisis de datos, análisis de velocidad, modelado y análisis de tiempos de viajes. El primero de estos módulos, correspondiente al análisis de datos, se empleó para la selección de primeras llegadas de los perfiles sísmicos. En la figura 3.10 (arriba) se muestra la selección de las primeras llegadas para el perfil A01; la imagen mostrada es un acercamiento (zoom).

El segundo paso del procesamiento consistió en el control de los tiempos de viaje de los perfiles a partir de las primeras llegadas seleccionadas. Esto fue realizado con el módulo correspondiente a análisis de tiempos de viaje. En la figura 3.10 (abajo), se observa el control de los tiempos de viaje para el perfil A01, se procuró que no hubiese una diferencia mayor a 5 milisegundos entre las llegadas seleccionadas.

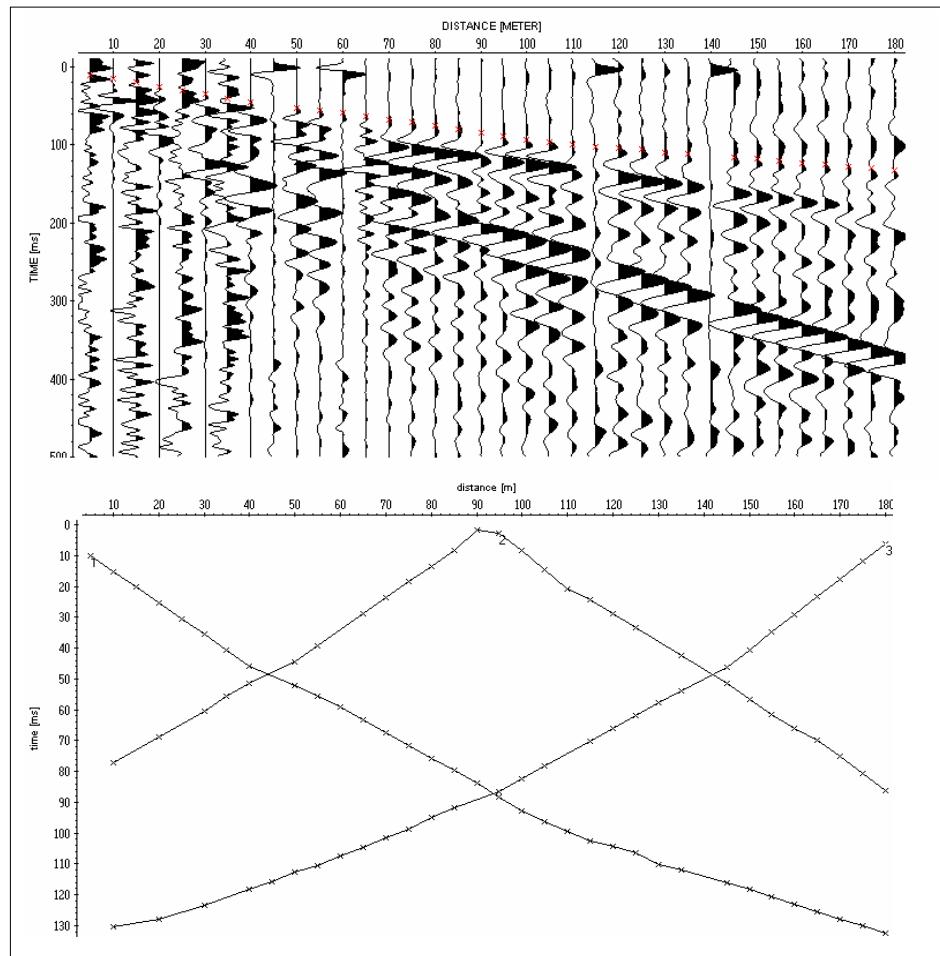


Figura 3.10. Arriba: selección de las primeras llegadas (cruces rojas) del perfil A01. Abajo: Análisis de tiempo de viaje de las ondas para los tres disparos del perfil A01.

Posteriormente se elaboraron los modelos 1D para todos los perfiles con el módulo de análisis de velocidad. En la figura 3.11 se puede observar el modelo 1D de

ondas P correspondiente al disparo en punta del perfil A01. Se elaboraron 6 modelos 1D para cada perfil, tres de ondas P con disparos a 0, 72 y 144 metros, o sea, puntos A, B y C, respectivamente, y tres para las ondas S con la misma ubicación para las fuentes. En el lado derecho de la figura 3.11 se observan las curvas de velocidad trazadas a partir de las primeras llegadas seleccionadas (líneas rojas) y en el lado izquierdo se observa el modelo de velocidad contra profundidad (modelo 1D), definiendo el número de capas presentes y la velocidad correspondiente a cada capa de sedimentos.

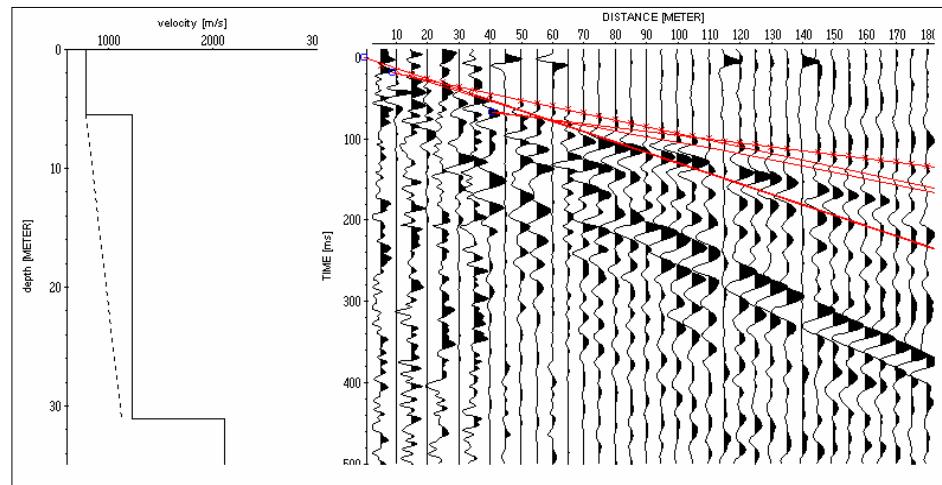


Figura 3.11. Modelo 1D de ondas P del disparo en 0 m del perfil A01.

Para las ondas S se solaparon en una misma traza las polarizaciones obtenidas en los perfiles debido a los golpes realizados en direcciones contrarias lo que permitió obtener trazas sísmicas de onda SH con polarizaciones distintas (figura 3.12), y por lo tanto, facilitó la selección de las primeras llegadas en esta fase del procesamiento.

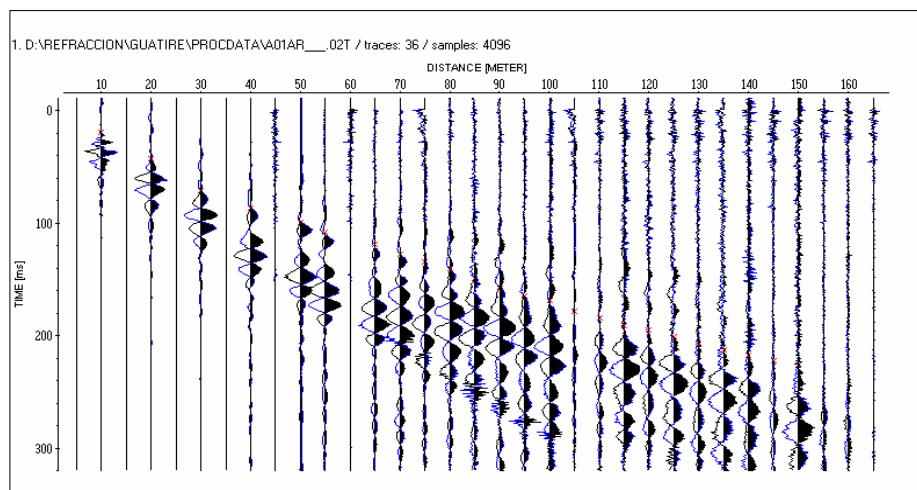


Figura 3.12. Traza sísmica de las ondas S correspondiente al perfil A01 con las llegadas seleccionadas. Obsérvense las dos polarizaciones presentes.

3.4.2 Segunda fase (Programa RAYINVR)

El paquete RAYINVR es un programa computacional desarrollado en la plataforma UNIX que emplea un algoritmo para el trazado de rayos y cálculo de amplitudes en un medio bidimensional basándose en un modelo de velocidad parametrizado (Zelt y Smith, 1992). El usuario debe suministrar al programa dos archivos de entrada, uno que contiene las primeras llegadas seleccionadas de la traza sísmica y un segundo archivo que posee un modelo de velocidad inicial. La interacción con el programa y los cambios en los espesores de las capas y las velocidades en cada nodo, permite ajustar las llegadas seleccionadas al resultado calculado por el programa (figura 3.13).

En la figura 3.13 se muestra el modelo 2D del perfil A01 a partir de ondas P. Los valores internos que se observan dentro del modelo corresponden a las velocidades en metros por segundo de la capa, la cual es un promedio entre la velocidad en el tope de la capa y la velocidad en la base de la capa. En la parte inferior se observa la curva de ajuste, donde cada punto corresponde a las primeras llegadas seleccionadas en la fase anterior con el programa REFLEX. La importancia

de un modelo 1D bien elaborado es muy relevante para la realización del modelo 2D, debido a que las velocidades y profundidades iniciales de cada capa se obtienen a partir de los modelos 1D.

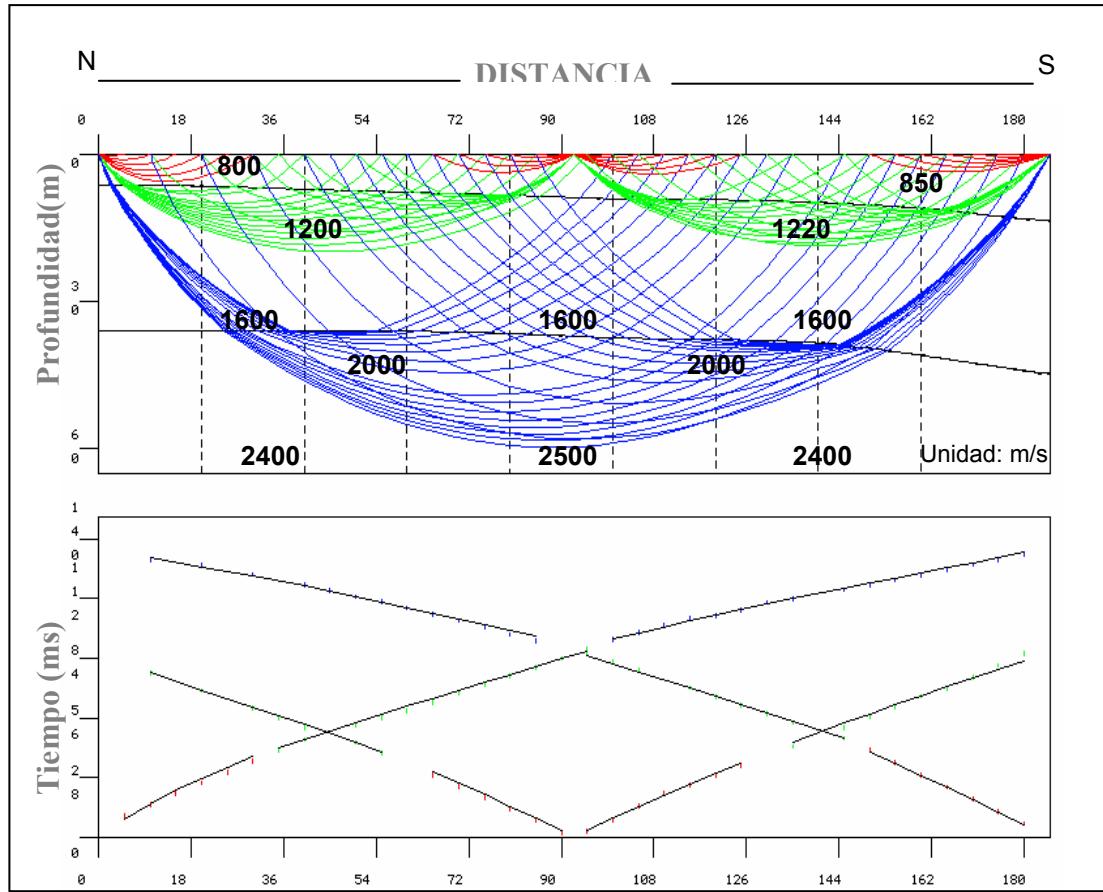


Figura 3.13. Ejemplo de un Modelo 2D realizado con el programa RAYINVR.

3.5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En total se obtuvieron 56 modelos 1D para los disparos individuales, y 14 modelos 2D, de ondas P y S, respectivamente. Se presentan las trazas con las selecciones de los primeros quiebres junto con el modelo 1D para los disparos en los extremos, luego se tienen los modelos 2D para cada perfil.

La información geológica presente en el área permite diferenciar tres litologías principales: la primera correspondiente a una capa de sedimentos aluvionales, luego una capa de sedimentos clásticos no consolidados (arenas y arcillas) y luego una capa correspondiente a rocas metamórficas, en este caso Esquisto de Las Mercedes, las cuales en algunos casos aparecen diferenciadas en capas meteorizadas y capas más competentes. En algunos perfiles se encuentra una capa de arcilla.

Los modelos de los estratos que conforman el subsuelo son planos a lo largo de la mayoría de los perfiles, salvo ciertas excepciones en las cuales se introdujo un leve buzamiento. Los resultados obtenidos no permiten realizar una interpretación y clasificación de los sedimentos en detalle del área, ya que los perfiles fueron planteados para obtener información puntual de diferentes unidades geológicas.

La respuesta para ambos campos de ondas, tanto de ondas P como S fue muy similar, en ambos modelos se observa una configuración del subsuelo similar. En algunos de los modelos de ondas S no se observa uno de los estratos presentes en los modelos de ondas P debido a una relación señal-ruido menor.

Los datos y modelos 2D se pueden encontrar en el disco compacto adjunto a este trabajo.

PERFIL A01

Este perfil (N-S) es el de mayor longitud realizado en el área de estudio (180 m), además presentó la mejor tasa señal-ruido y el modelo con el mejor ajuste realizado.

De acuerdo al modelo 2D de ondas P se observan tres capas

(figura 3.16). La primera capa con profundidad de 6 m al norte aumentando hasta 12 m al sur. La velocidad promedio de ondas P para esta capa es de 800 m/s. La segunda capa tiene un leve buzamiento al sur con profundidades de 32 y 39 m. En el tope y base de esta capa la velocidad fue de 1200 m/s y 1600 m/s, respectivamente. Hay información de la tercera capa hasta una profundidad de 60 m aproximadamente. Su velocidad de ondas P es superior a 2000 m/s. En el modelo 2D de ondas S (figura 3.18), se representan solo las 2 primeras capas. El espesor de la primera capa alcanza 7 m con velocidad de ondas de corte de 500 m/s, mientras que para la segunda capa velocidad promedio es de 690 m/s con información hasta 10 m de profundidad. La información obtenida de los registros de ondas S no permitió modelar con exactitud la base de la segunda capa.

La primera capa corresponde a sedimentos clásticos no consolidados (arenas secas) con un espesor de 6 a 12 metros de profundidad. Por debajo de este estrato se encuentra una capa interpretada como arcillas de 37 metros de espesor aproximadamente, observable solo en el modelo de ondas P. La tercera capa corresponde a la capa meteorizada de los Esquistos de Las Mercedes ($V_p > 2000$ m/s).

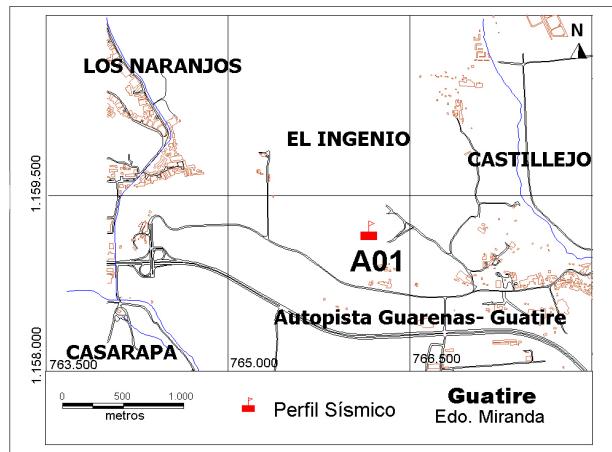


Figura 3.14. Ubicación del perfil A01.

Ondas P

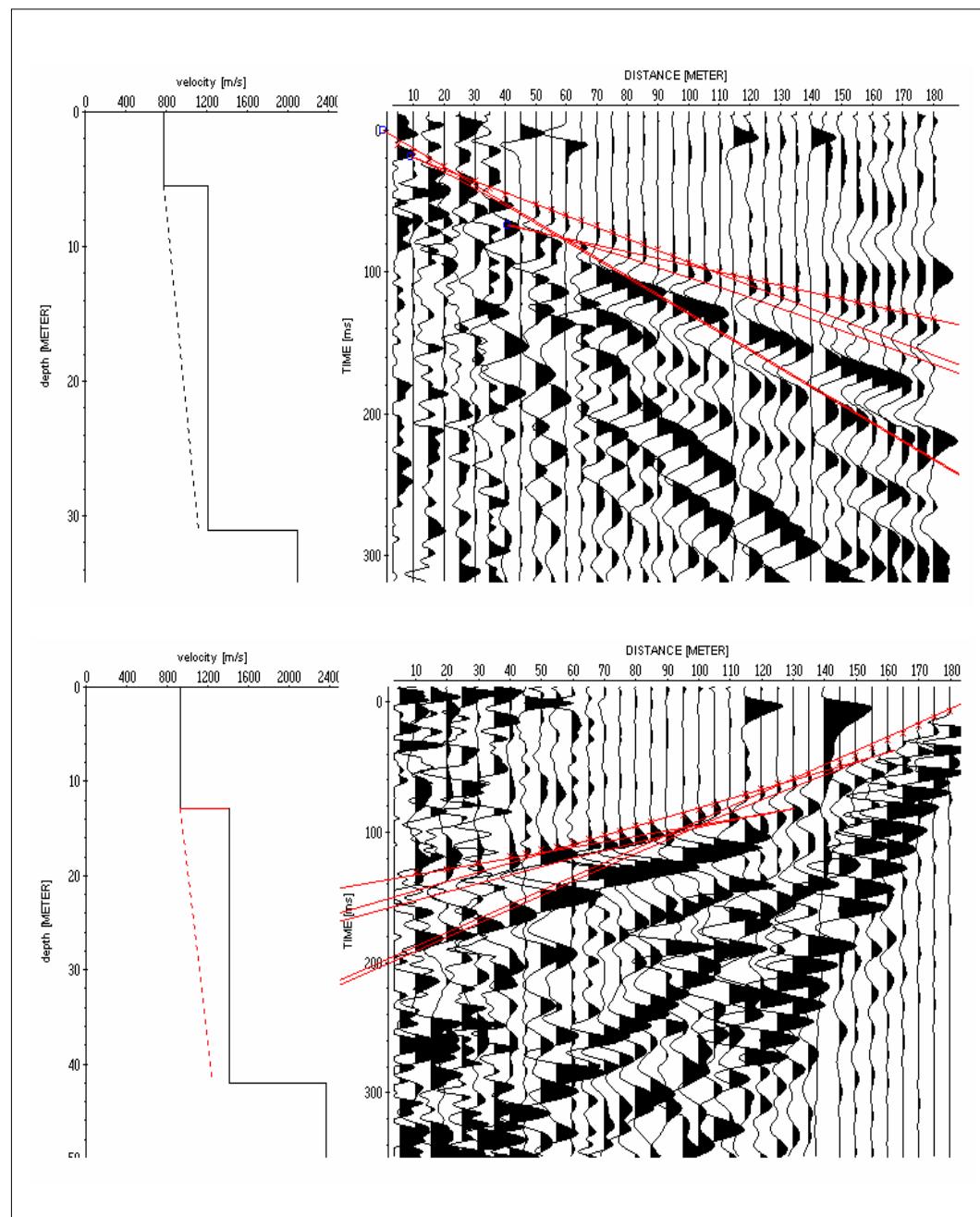


Figura 3.15. Modelos 1D de ondas P del perfil A01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 185 m.

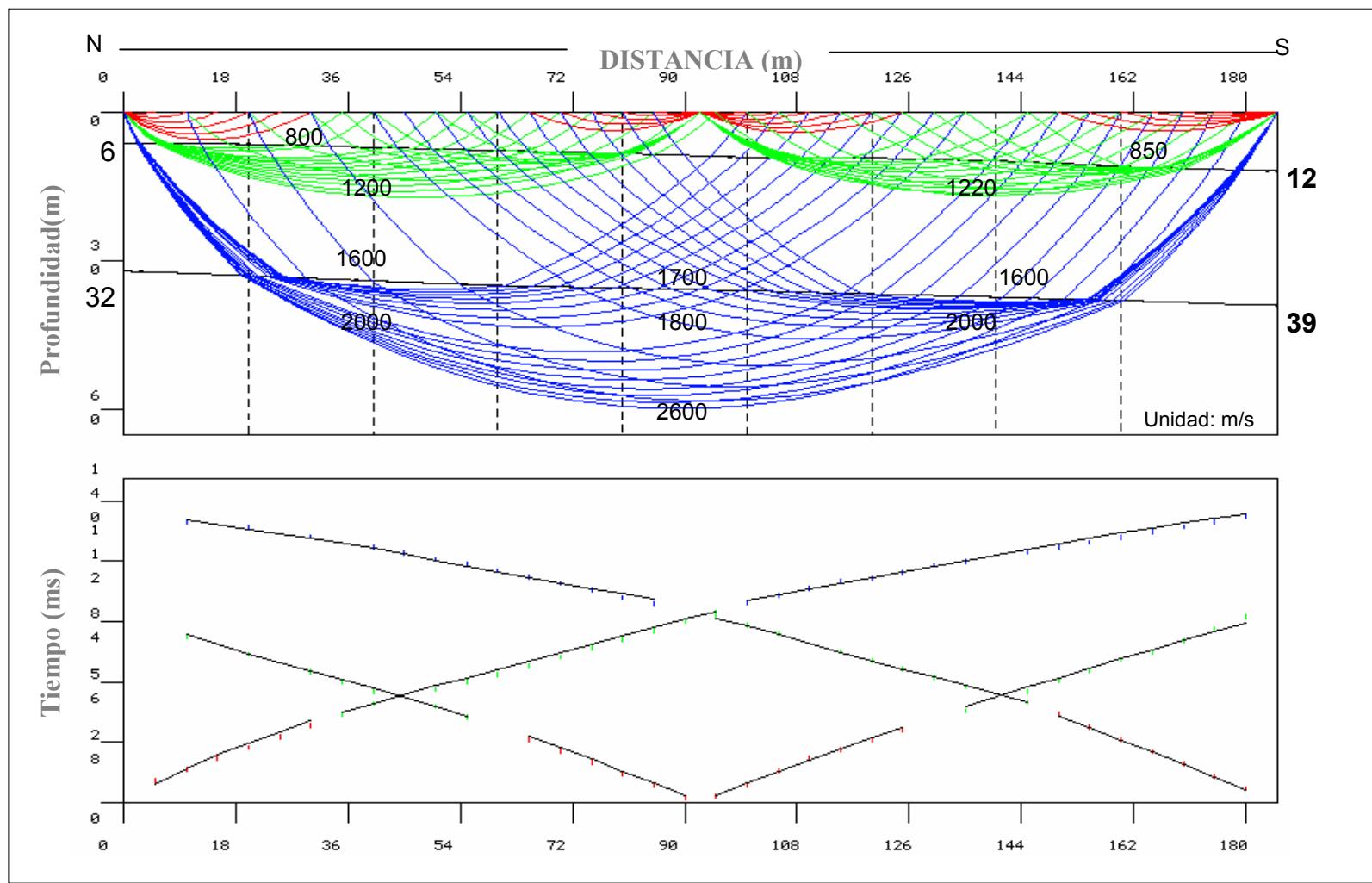


Figura 3.16. Modelo 2D para el perfil A01 a partir de las ondas P.

Perfil A01

Ondas S

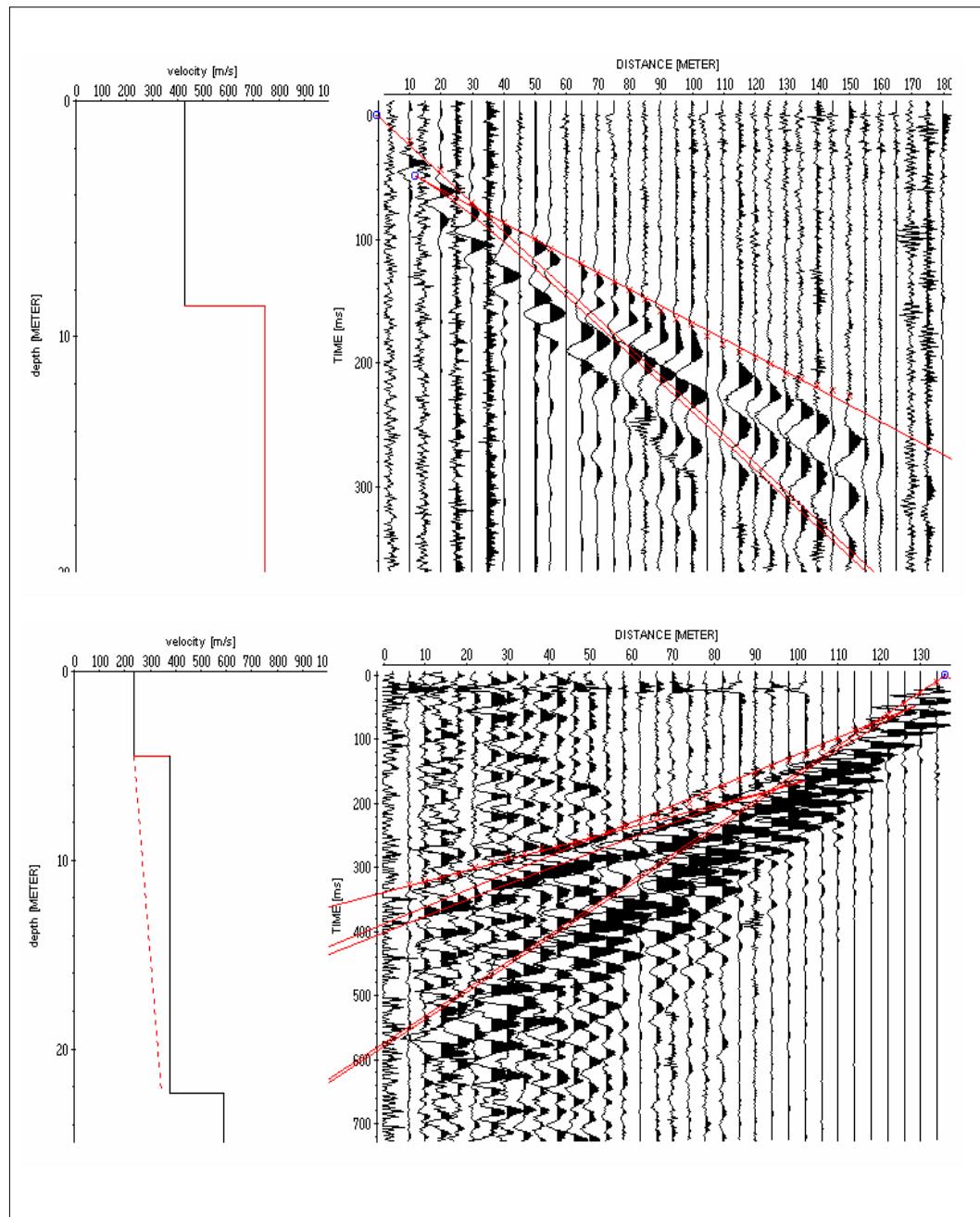


Figura 3.17. Modelos 1D de ondas S del perfil A01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 185 m.

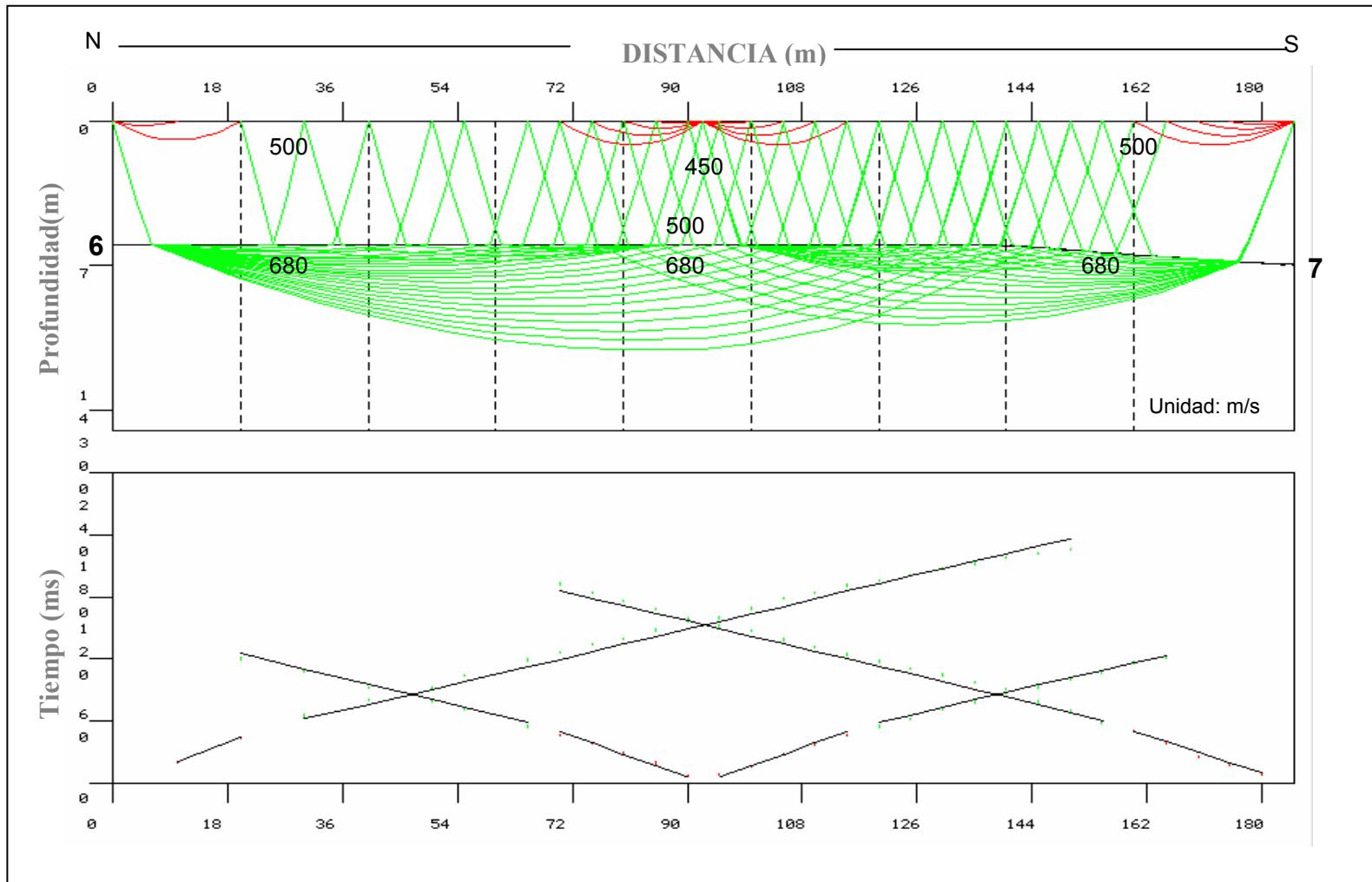


Figura 3.18. Modelo 2D para el perfil A01 a partir de las ondas S.

PERFIL B01

El perfil B01 (N-S) fue realizado en un alto topográfico dentro del centro recreacional Polar, ubicado en la carretera vieja que comunica Guarenas y Guatire. El terreno parece ser un relleno creado con la finalidad de obtener zonas planas para la elaboración de jardines.

En los modelos 2D obtenidos (figuras 3,21 y 3,23) se observan dos capas. La primera con profundidad entre 10 y 14 metros y la segunda con información hasta 30 metros. En el extremo norte del perfil se observa una depresión y un aumento en la velocidad de las ondas sísmicas considerable, disminuyendo notablemente el tiempo de arribo de las llegadas de las ondas P y S a los receptores. Las velocidades de las ondas P en el primer estrato se encuentran en el rango de 350 a 450 m/s, a excepción del extremo norte donde las velocidades presentan valores en el orden de 600 m/s. Por debajo de esta capa las velocidades de ondas P están en un rango de 1000 a 1300 m/s. La velocidad de las ondas S de la primera capa está en el rango de 220 m/s y 280 m/s, aumentando en el norte hasta los 320 m/s. Para la segunda capa la velocidad varía entre 450 m/s en el tope y 600 m/s en la base.

Se interpreta la primera capa como a una zona de relleno creada en el área con la presencia de algún tipo de material denso en el norte (cemento), por ello las velocidades de ondas P y S son bajas al sur con aumento al norte. El estrato subyacente a esta zona de relleno se interpreta como arenas secas correspondientes a la Formación Guatire de sedimentos clásticos no cementados (QG2).

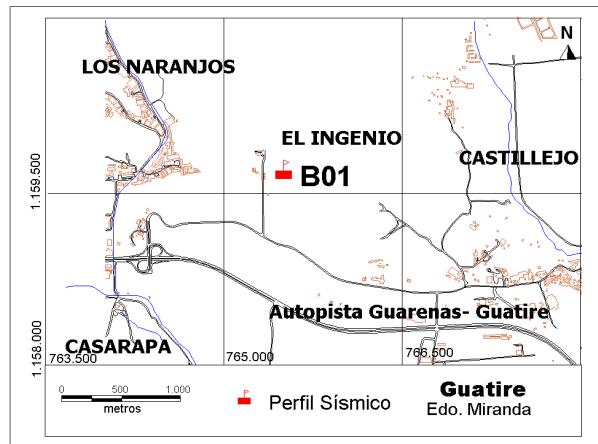


Figura 3.19. Ubicación del perfil B01.

Ondas P

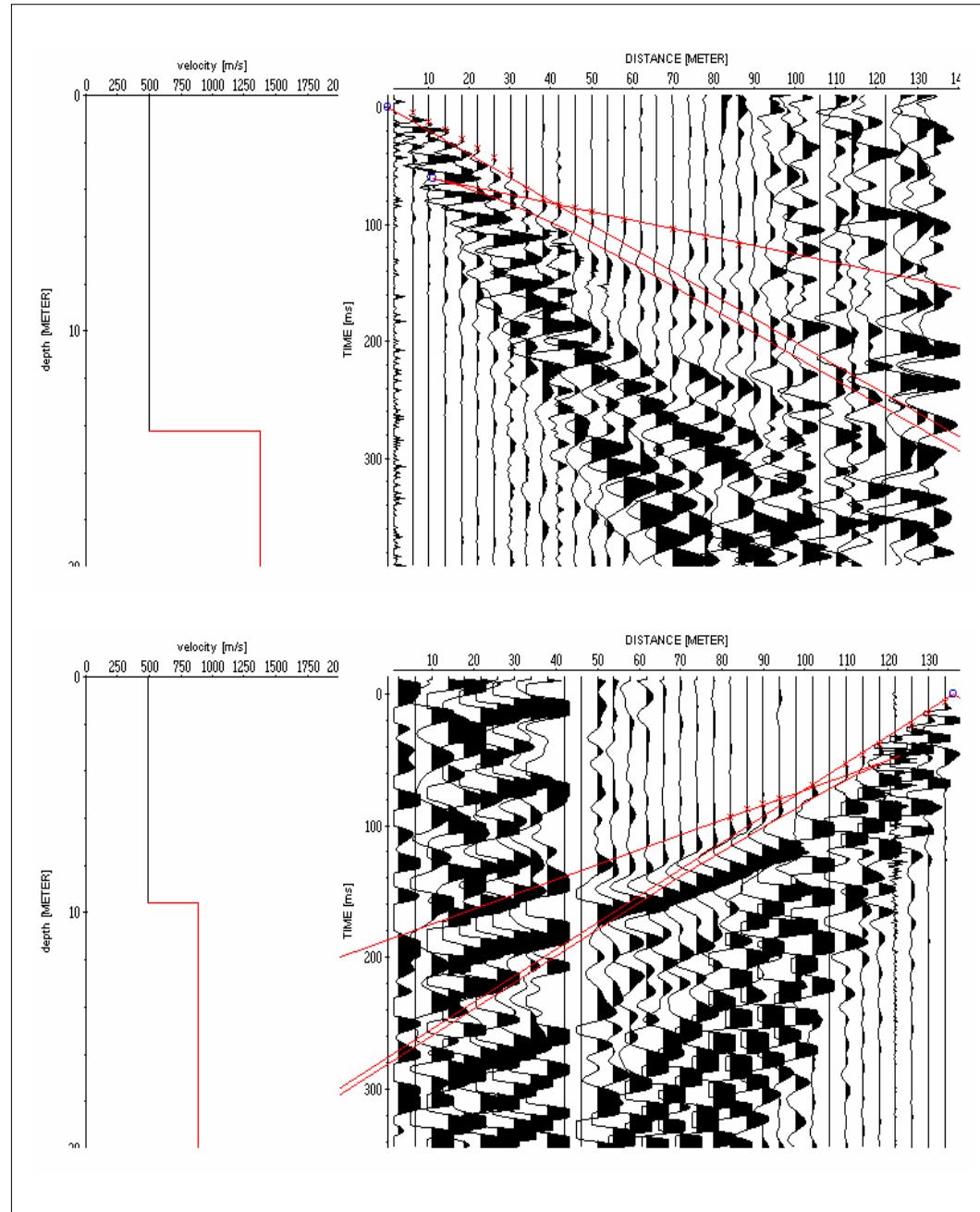


Figura 3.20. Modelos 1D de ondas P del perfil B01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 136 m.

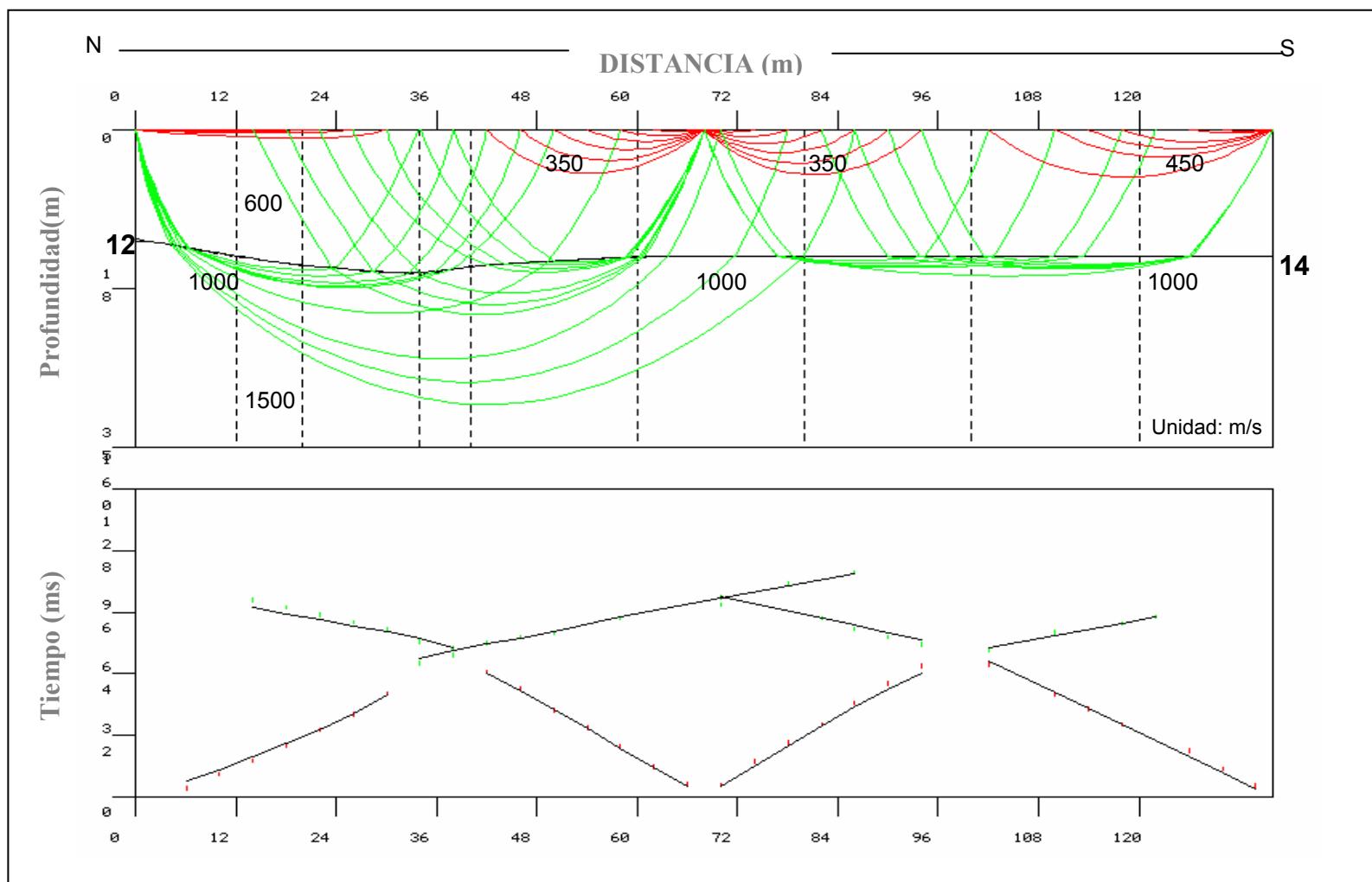


Figura 3.21. Modelo 2D para el perfil B01 a partir de las ondas P.

Ondas S

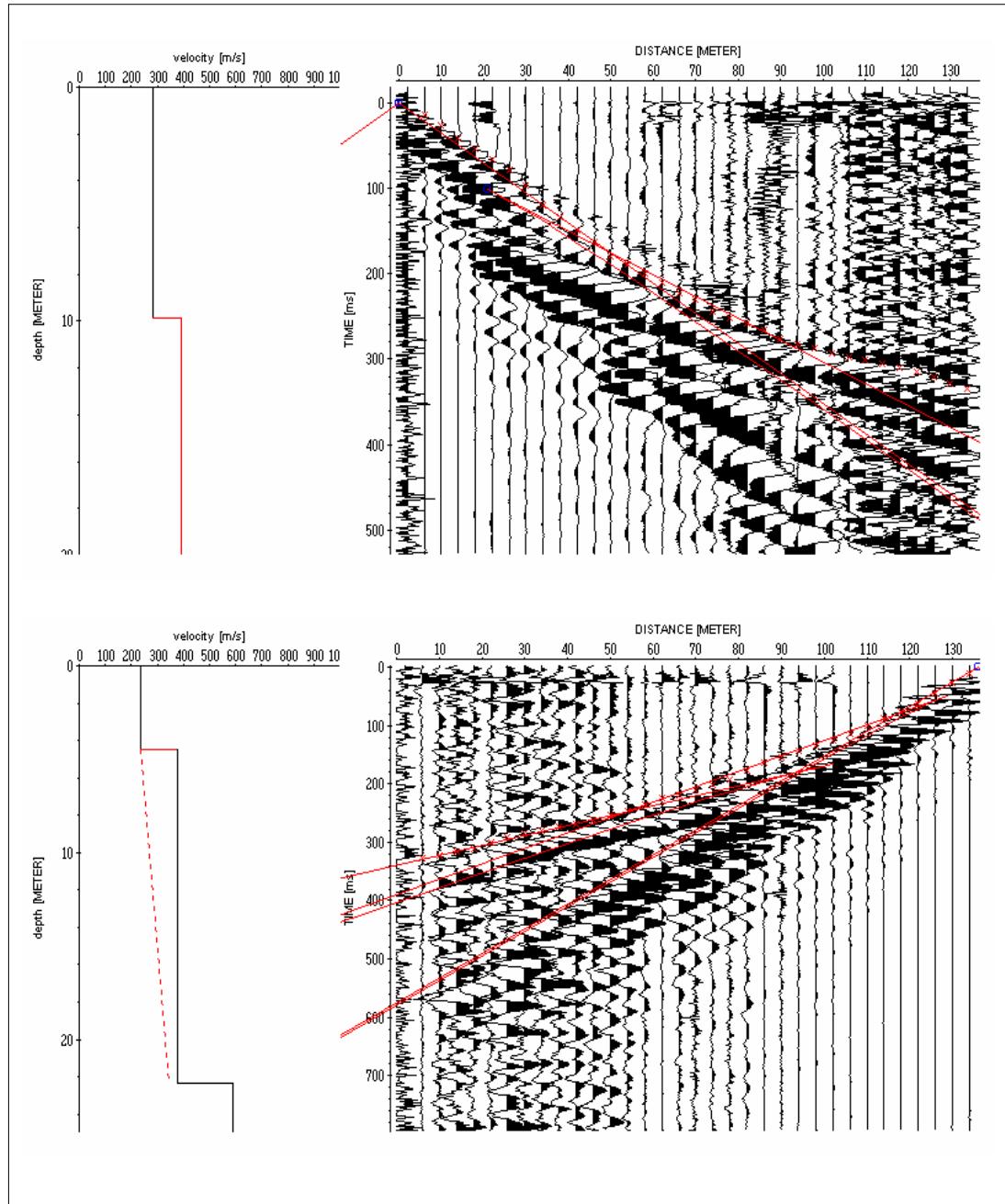


Figura 3.22. Modelos 1D de ondas S del perfil B01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 136 m.

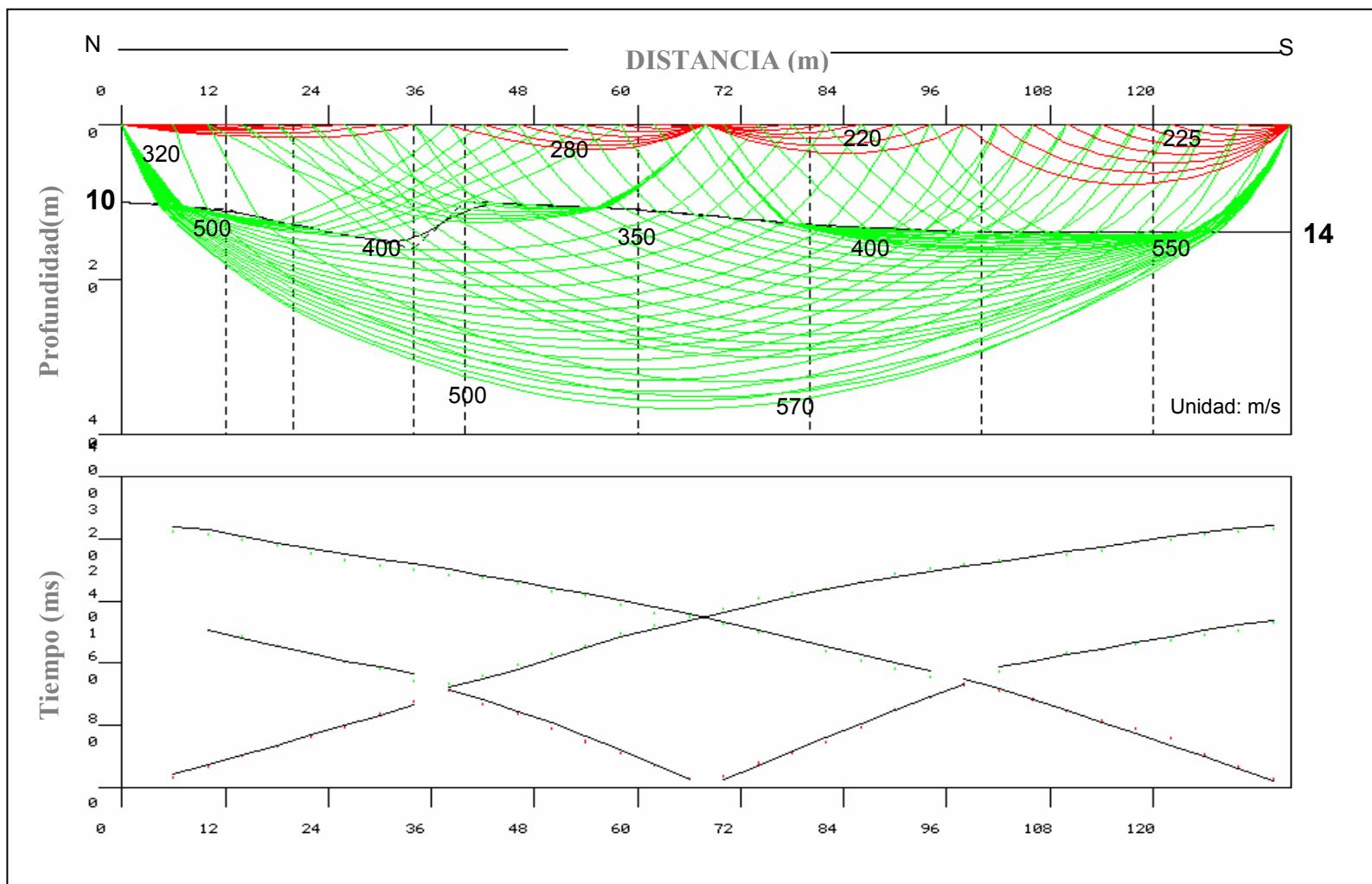


Figura 3.23. Modelo 2D para el perfil B01 a partir de las ondas S.

Perfil C01

El perfil C01 (orientación E-W), realizado paralelo a la vía que comunica el sector El Ingenio con Las Barrancas, tiene una configuración de estratos planos sin presentar buzamientos ni variaciones considerables a lo largo del perfil. La relación señal-ruido es muy baja en este perfil.

En los modelos 2D (figuras 3.26, 3.28) se pueden apreciar tres capas, la primera con un espesor de 4 a 7 metros y velocidades promedios de ondas P y S de 400 m/s y 250 m/s respectivamente. Por debajo de esta capa se encuentra un estrato con espesor de 6 a 15 metros y velocidades de ondas P de 500 m/s aumentando hasta 700 m/s en dirección oeste-este. La velocidad de las ondas de corte es de 350 m/s y aumenta igualmente al este a 400 m/s. La tercera capa tiene un espesor de 15 metros aproximadamente y con información hasta 25 metros de profundidad. Las velocidades de las ondas P para esta capa aumentan a más de 1200 m/s. Las ondas de corte tienen una velocidad superior a 600 m/s en esta capa.

Las primeras dos capas presentes en ambos modelos corresponden a sedimentos clásticos no cementados (arenas secas), la primera de estas capa está muy poco consolidada como se evidencia en los bajos valores de velocidad obtenidos. Por debajo de estas dos capas se encuentra el estrato asociado a las arcillas de la Formación Guatire (QG2).

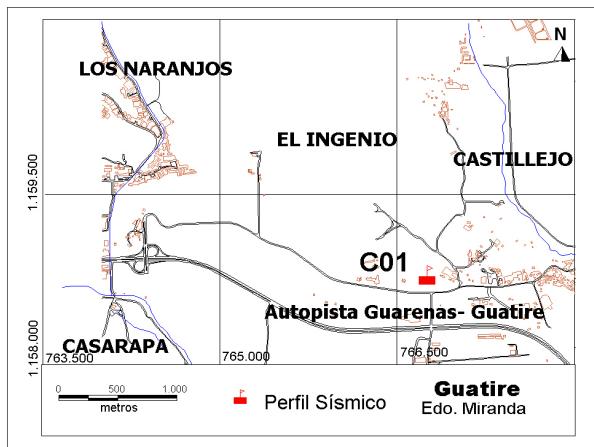


Figura 3.24. Ubicación del perfil C01.

Ondas P

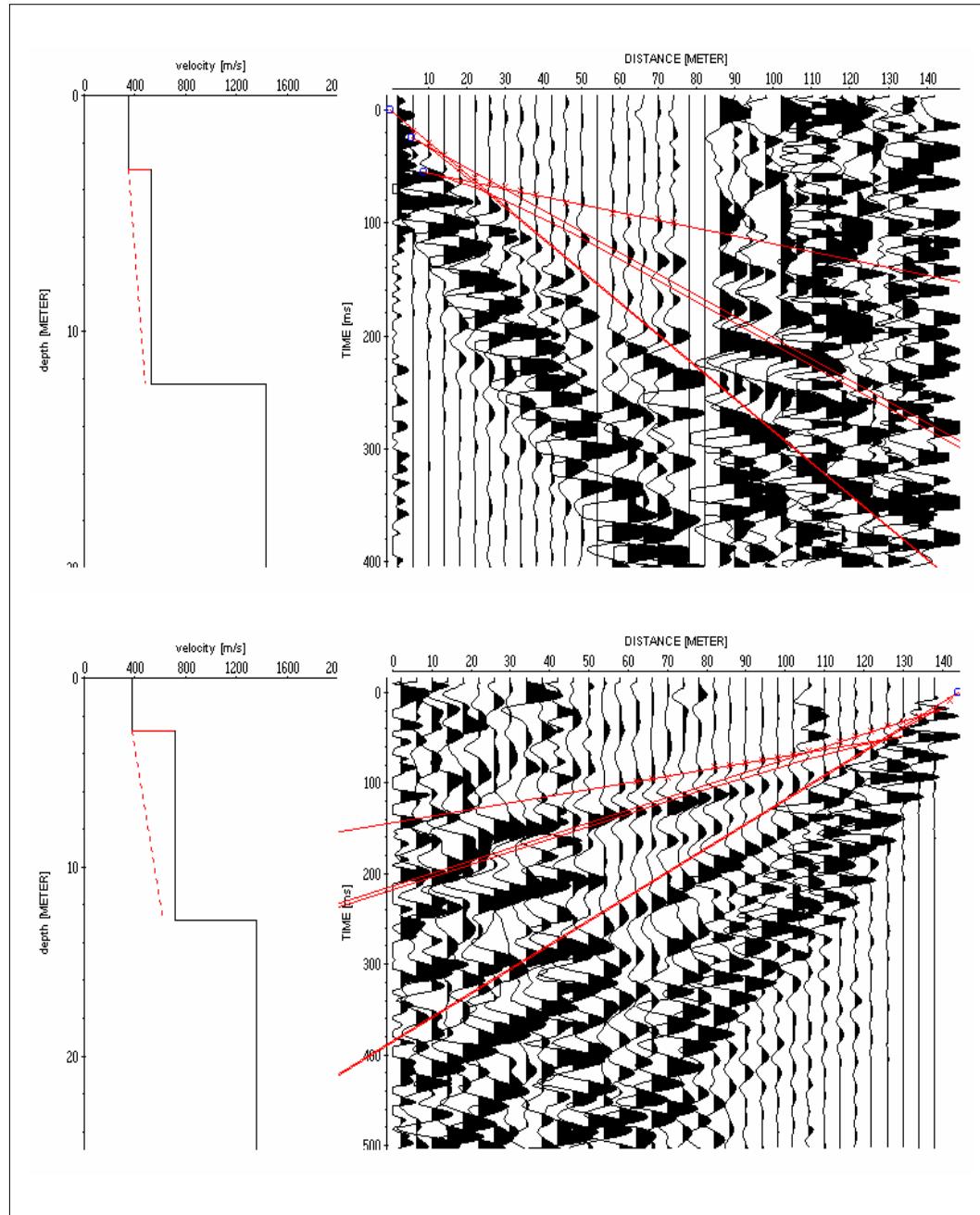


Figura 3.25. Modelos 1D de ondas P del perfil C01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 144 m.

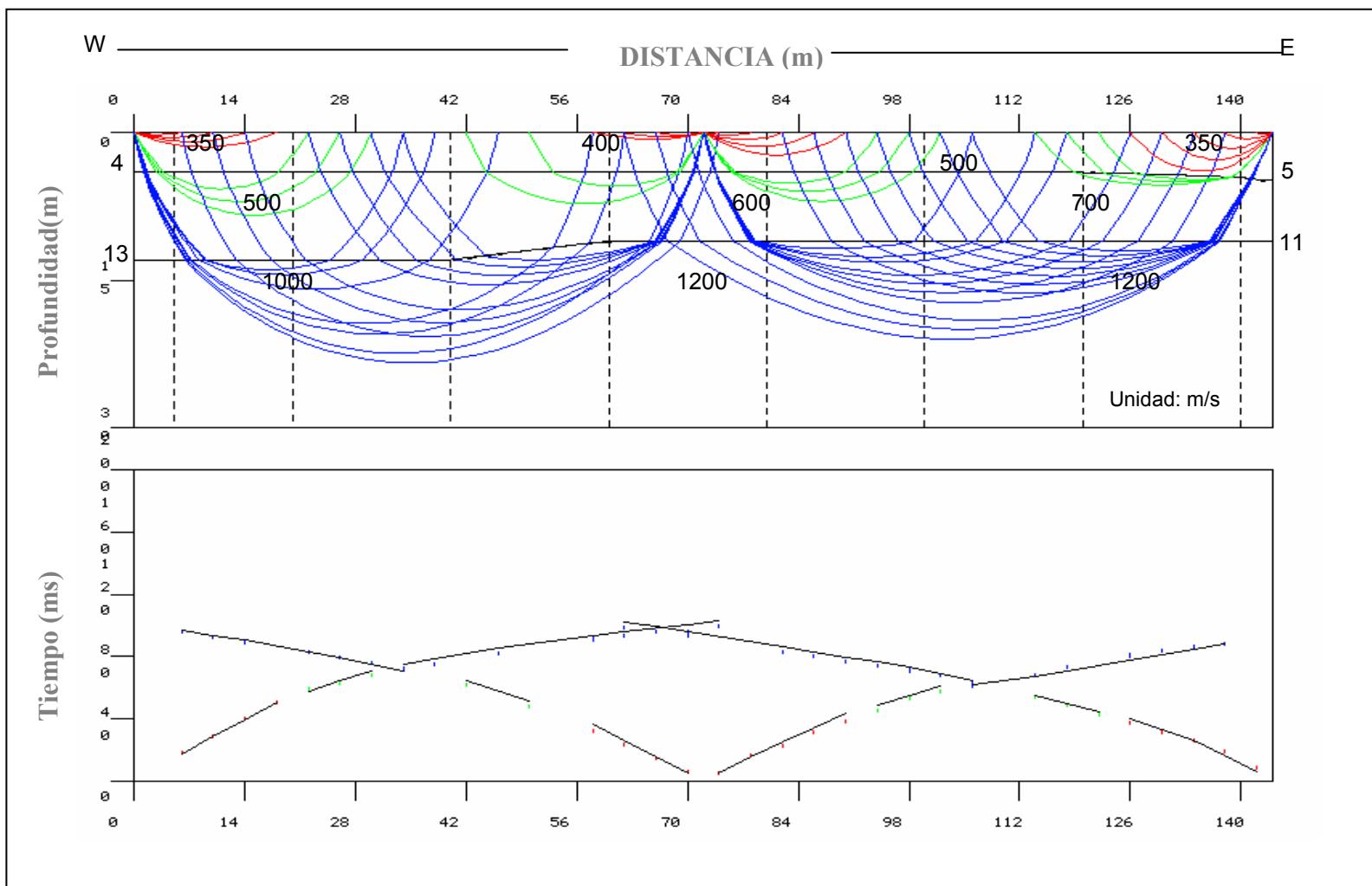


Figura 3.26. Modelo 2D para el perfil C01 a partir de las ondas P.

Ondas S

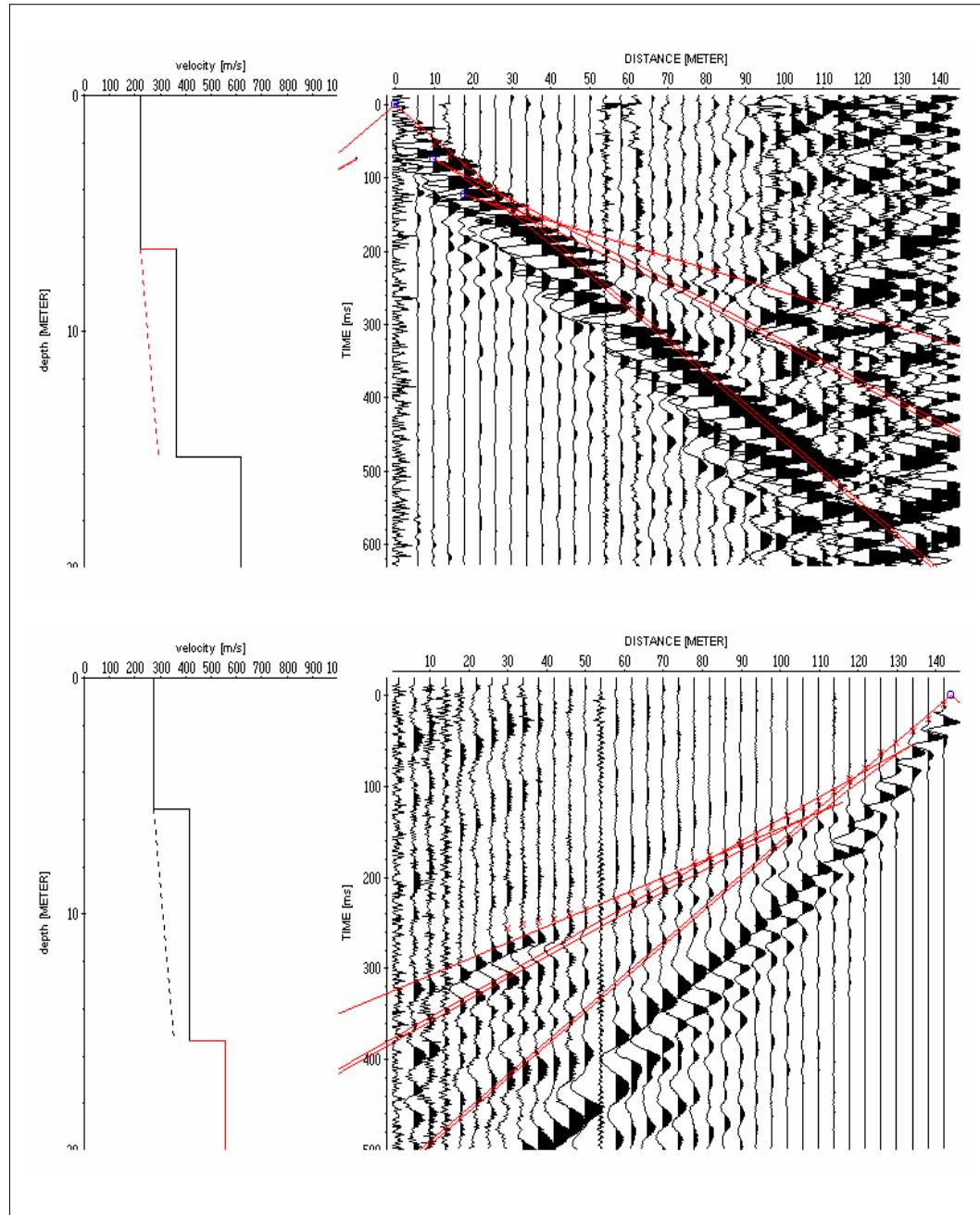


Figura 3.27. Modelos 1D de ondas S del perfil C01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 144 m.

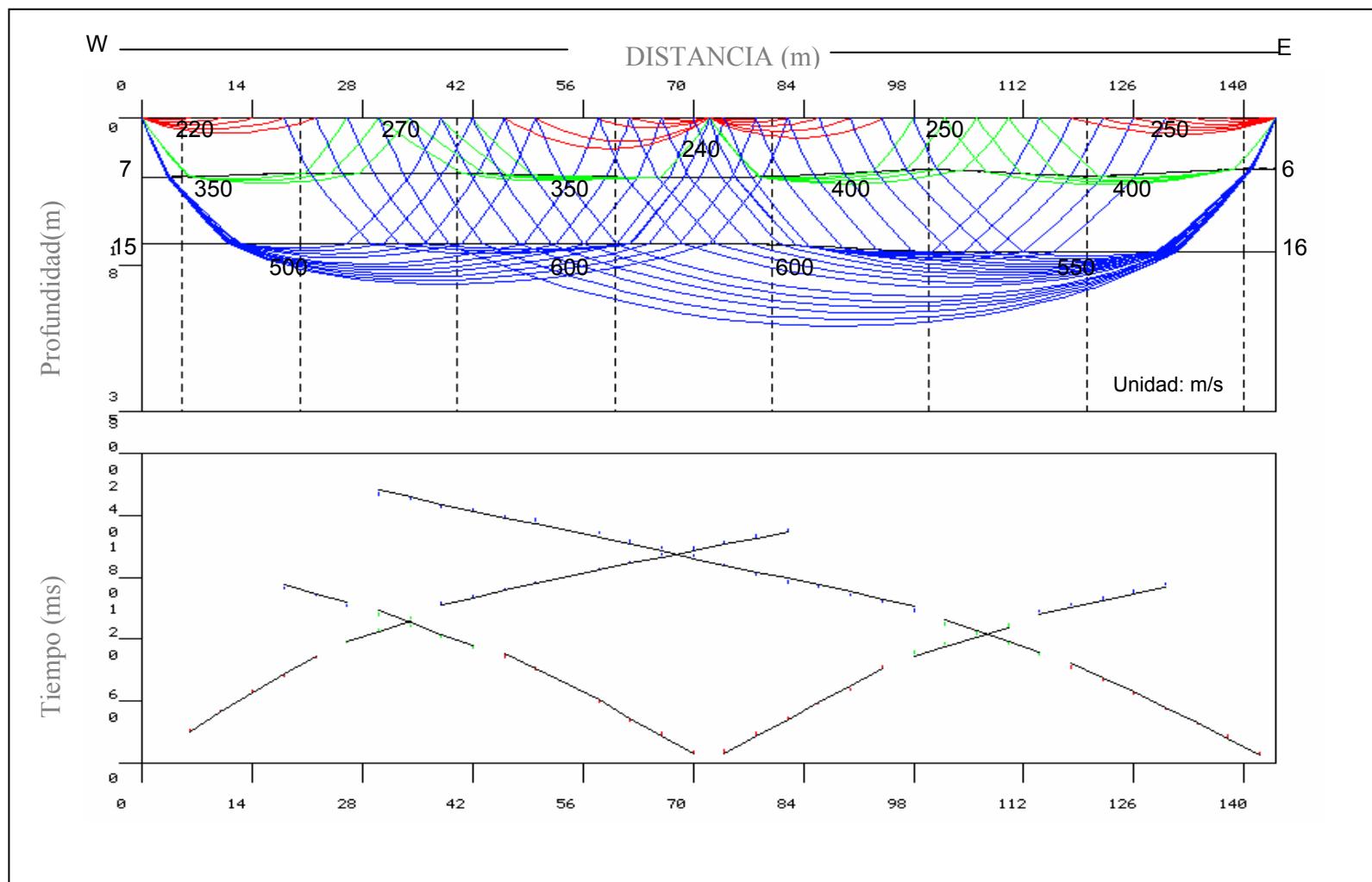


Figura 3.28. Modelo 2D para el perfil C01 a partir de las ondas S.

Perfil D01

El perfil D01 (orientación W-E) se realizó en una terraza aluvional al norte de la depresión ocasionada por el río Guarenas. En estos perfiles la relación señal ruido fue alta y se pudo realizar la selección de las primeras llegadas más allá de los 80 metros, como se puede apreciar en el gráfico derecho de los modelos 1D (figura 3,30).

En los modelos 2D (Figura 3.31 y 3.33) se observan tres capas, la primera con espesor de 6 a 8 metros y velocidad de ondas P de 500 m/s. La segunda capa con profundidad de 24 metros, velocidad en el tope de 900 m/s y velocidad en la base de 1200 m/s. Por debajo de esta capa se alcanzan velocidades entre 1800 a 2500 m/s y hay información hasta los 40 metros de profundidad.

En el modelo de ondas S se observan igualmente tres capas, el primer estrato posee un espesor de 3 a 5 metros. La velocidad de esta primera capa es de 200 m/s, diminuyendo a 130 m/s hacia el este. La segunda capa posee un espesor de 16 metros, la velocidad promedio de ondas S de esta capa es de 350 m/s. Por debajo de esta capa se alcanzan valores de velocidad de ondas S de 900 m/s con información hasta 30 metros de profundidad.

La primera capa observada en este perfil se interpreta como aluviones del Cuaternario, subyacente a esta capa se encuentra la Formación Guatire (QG2). Para la tercera capa comienzan a aumentar los valores de las velocidades de las ondas P y S con un alto gradiente, alcanzando los 2500 m/s y 900 m/s, respectivamente. Esta capa se interpreta como sedimentos mejor cementados pertenecientes a la Formación Guatire (QG1).

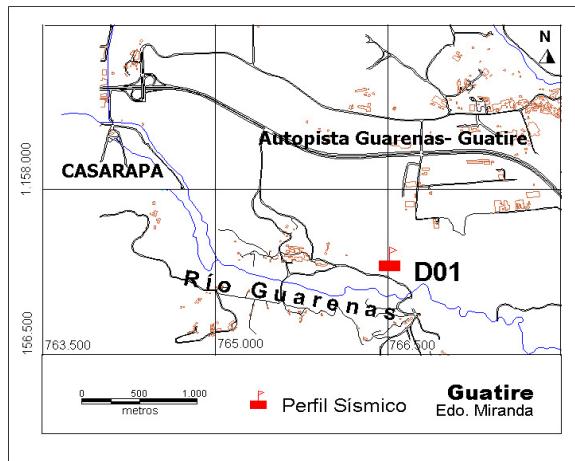


Figura 3.29. Ubicación del perfil D01.

Ondas P

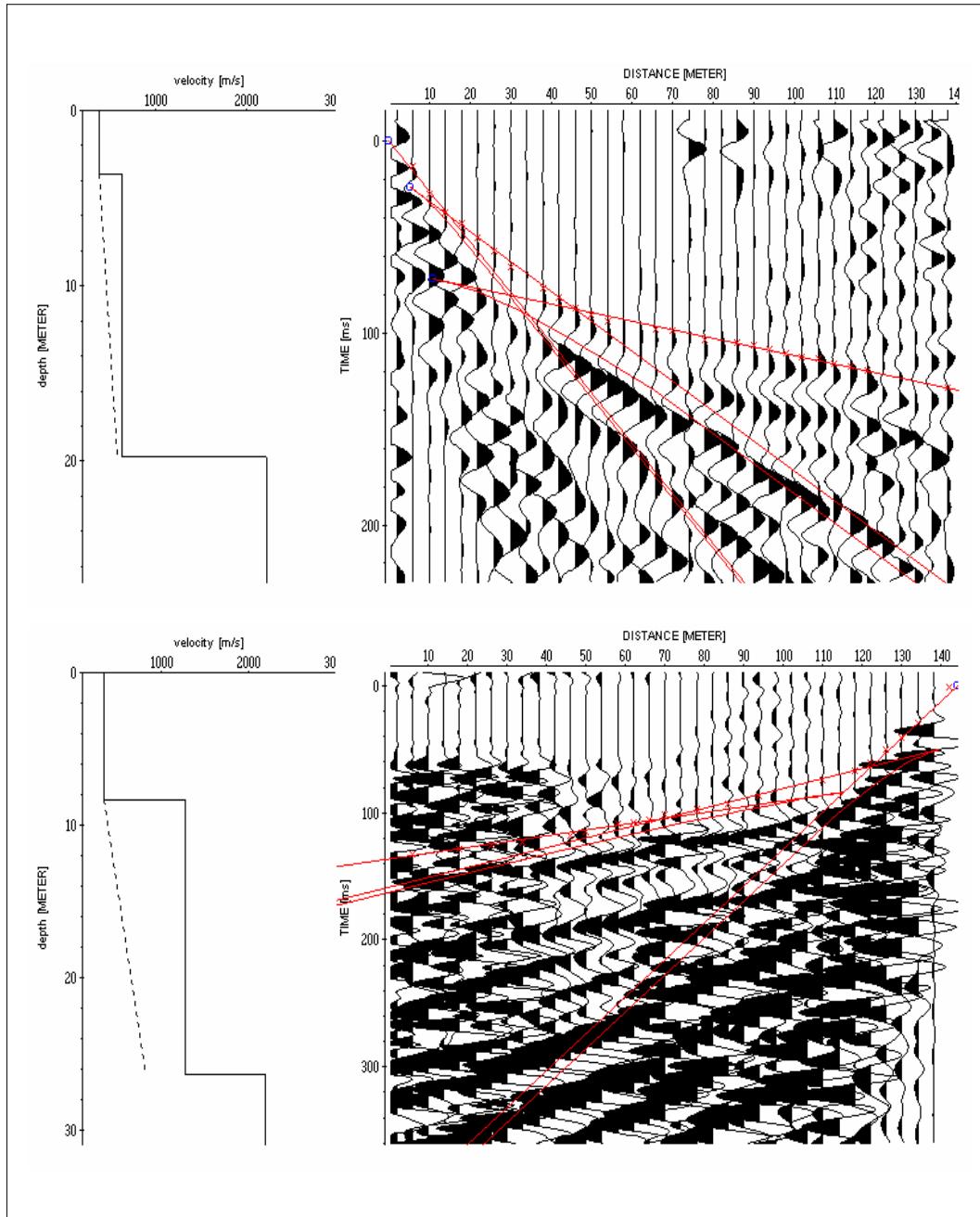


Figura 3.30. Modelos 1D de ondas P del perfil D01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 144 m.

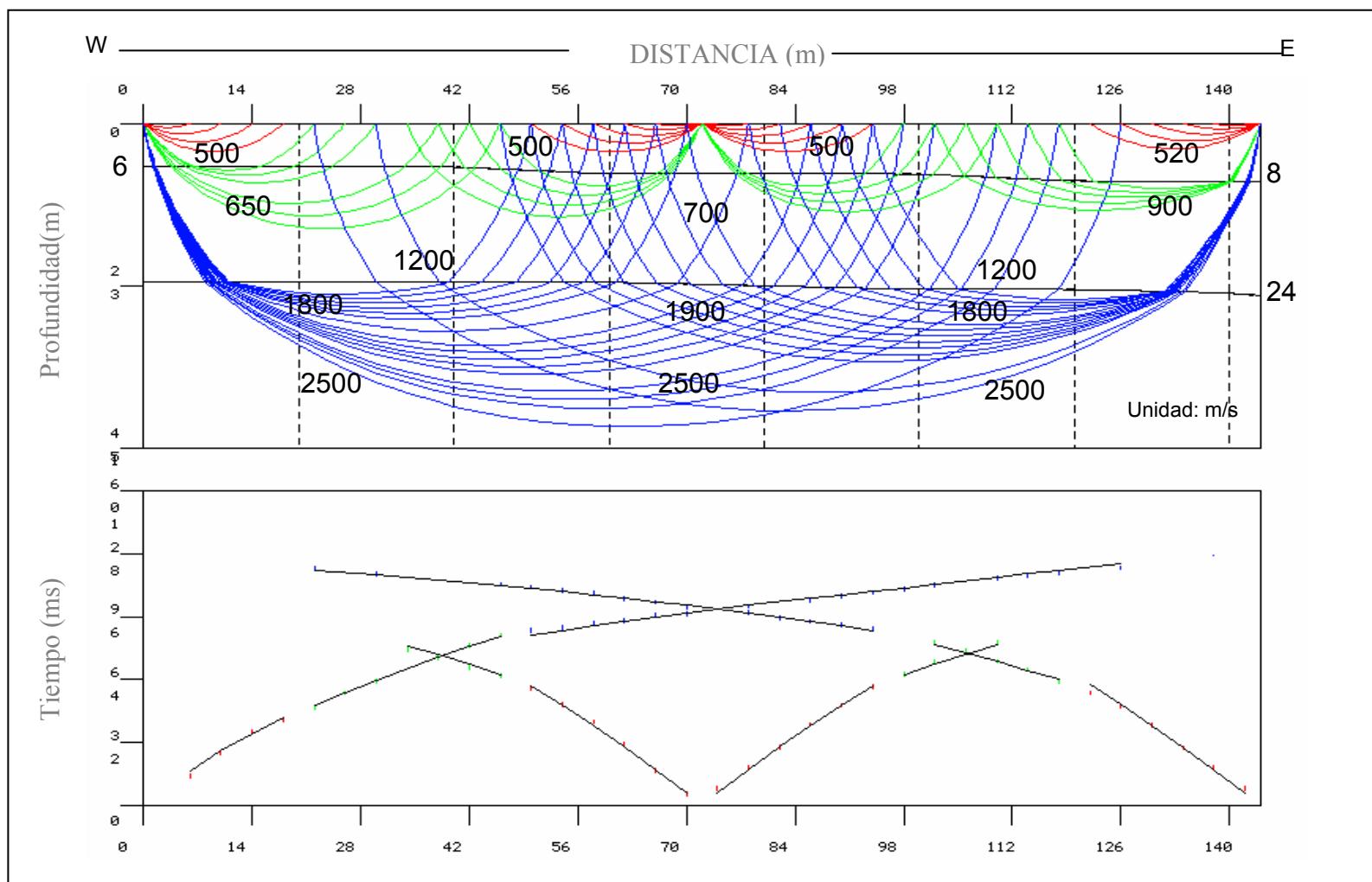


Figura 3.31. Modelo 2D para el perfil D01 a partir de las ondas P.

Ondas S

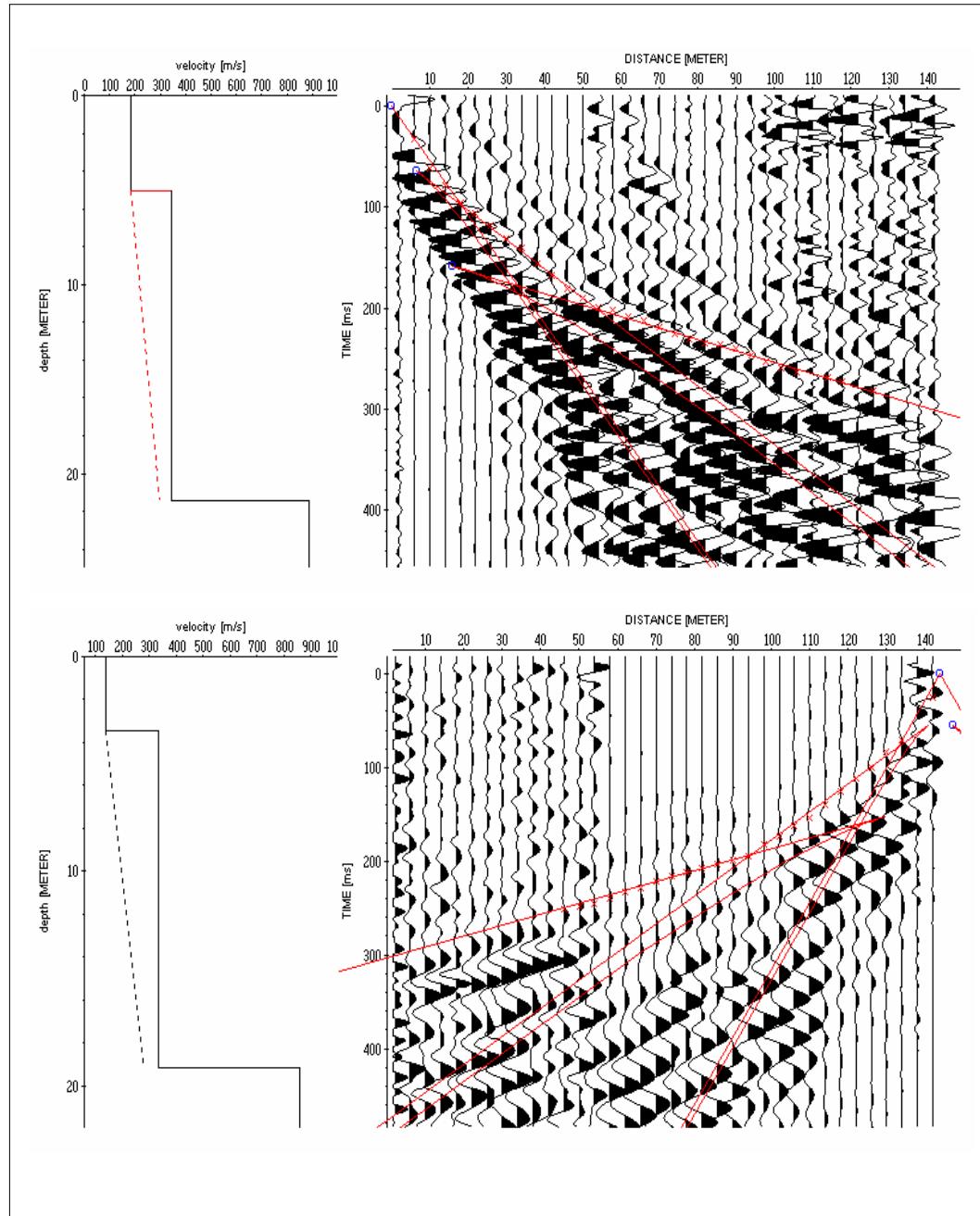


Figura 3.32. Modelos 1D de ondas S del perfil D01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 144 m.

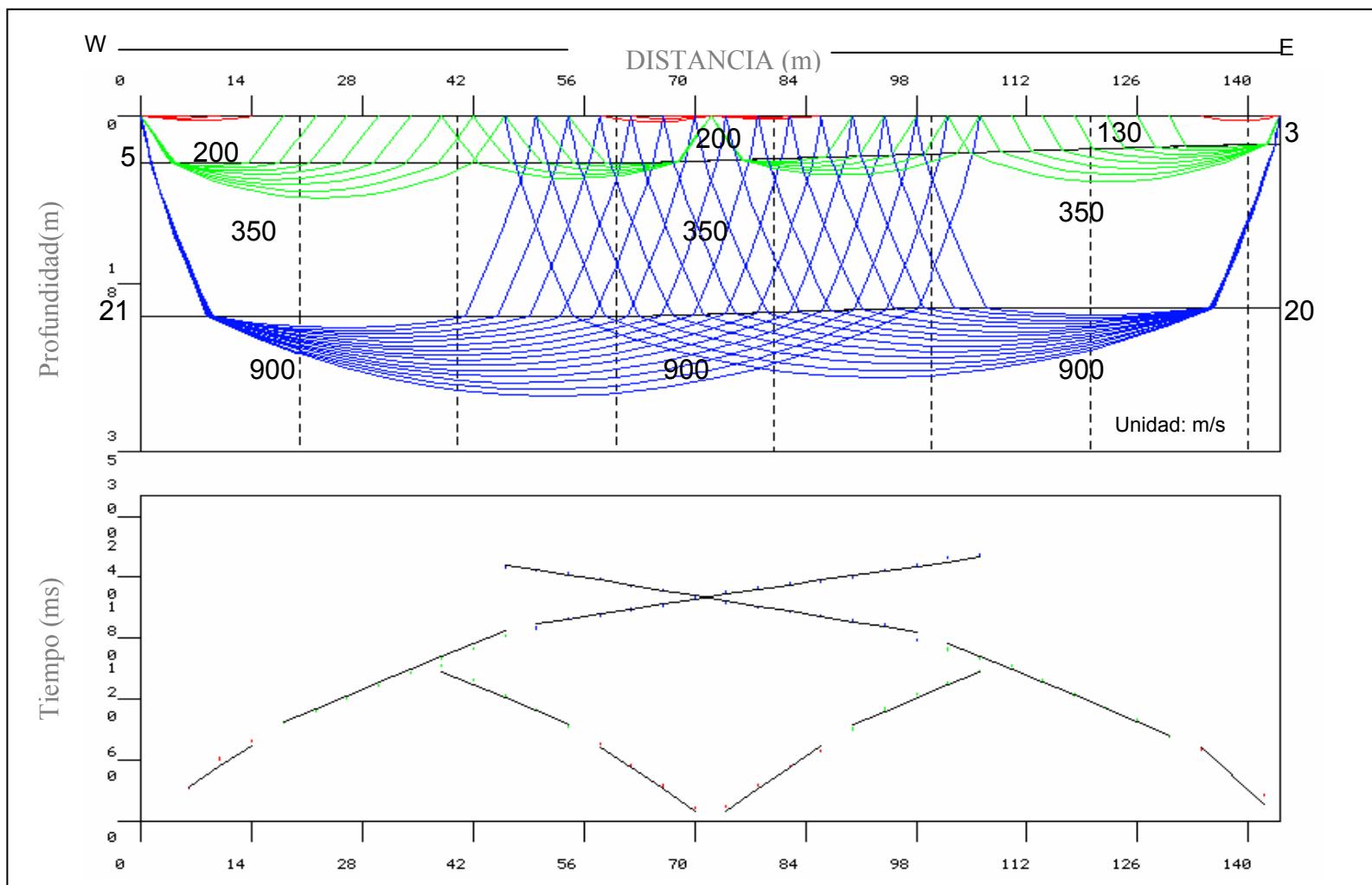


Figura 3.33. Modelo 2D para el perfil D01 a partir de las ondas S.

Perfil E01

El perfil E01 (N-S) está ubicado cerca al perfil D01, en un terreno que presenta las mismas características morfológicas.

En los modelos 2D (figuras 3.36 y 3.38) se observan tres capas, la primera capa con un espesor de 5 a 8 metros con un leve buzamiento al norte. La velocidad de ondas P de esta capa es de 550 m/s y la velocidad de ondas S de 300 m/s. La segunda capa con un espesor de 20 metros aproximadamente, presenta un leve buzamiento hacia el norte. La velocidad de ondas P de este estrato en el tope es de 800 m/s y en la base de 1200 m/s. La velocidad de las ondas S para la segunda capa es de 500 m/s en el tope y 750 m/s en la base. La tercera capa tiene información hasta los 40 metros aproximadamente. La velocidad de ondas P alcanza valores entre 1700 m/s y 2000 m/s , mientras que las S llegan a 1000 m/s..

Al igual que en el perfil anterior la primera capa se interpreta como aluviones recientes, mientras que la segunda capa se define como arenas secas de la Formación Guatire (QG2). La tercera capa se interpreta como sedimentos clásticos cementados de la Formación Guatire (QG1).

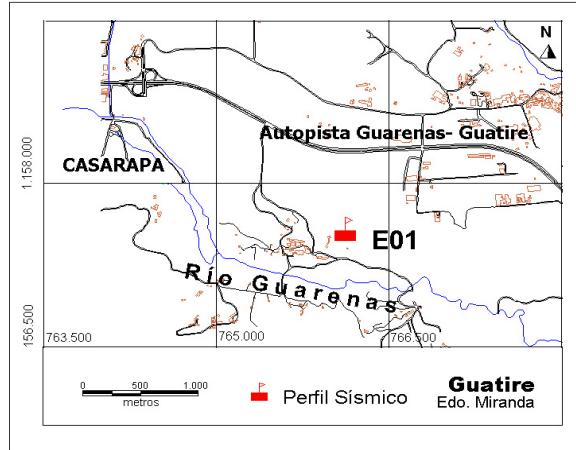


Figura 3.34. Ubicación del perfil E01.

Ondas P

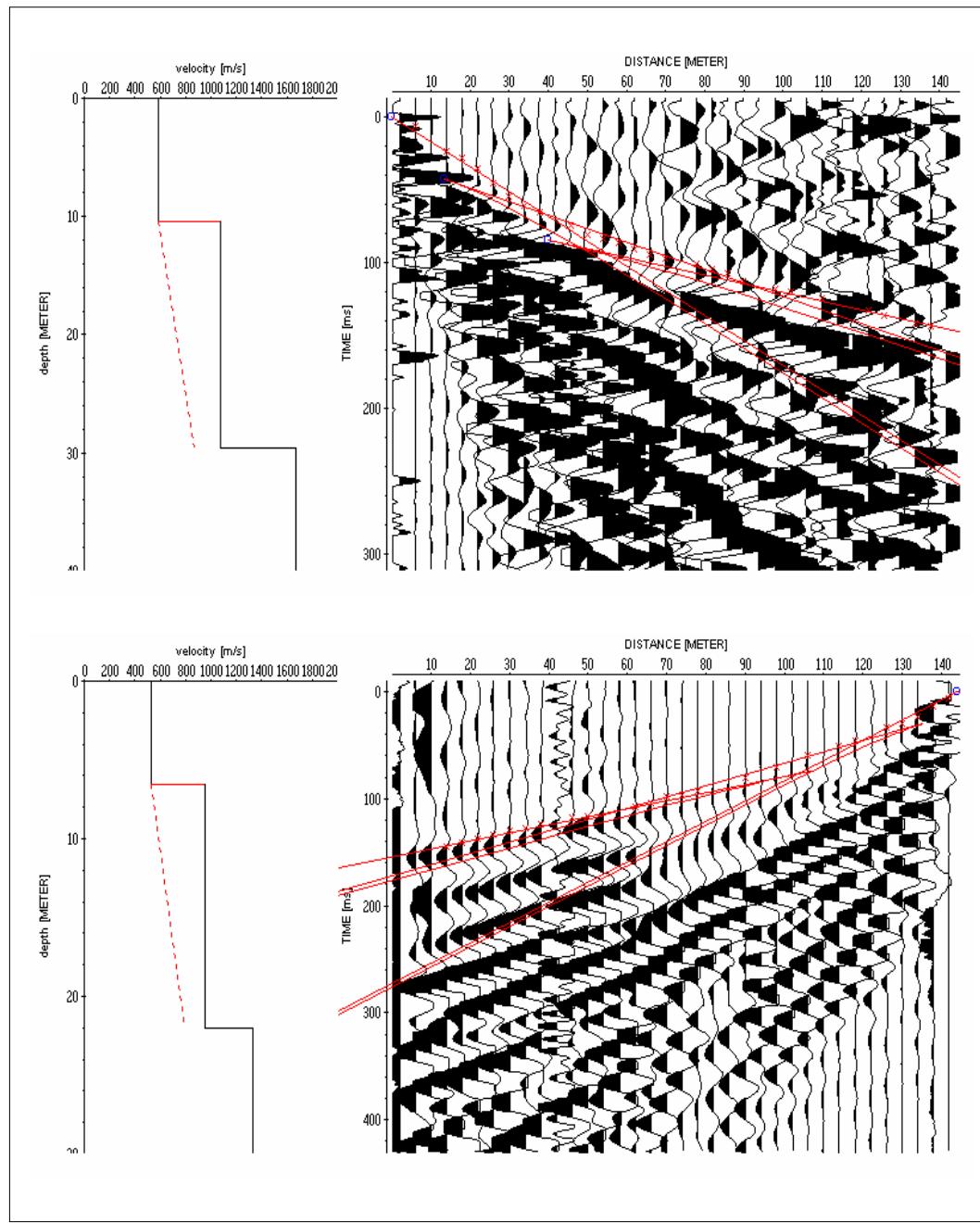


Figura 3.35. Modelos 1D de ondas P del perfil E01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 144 m.

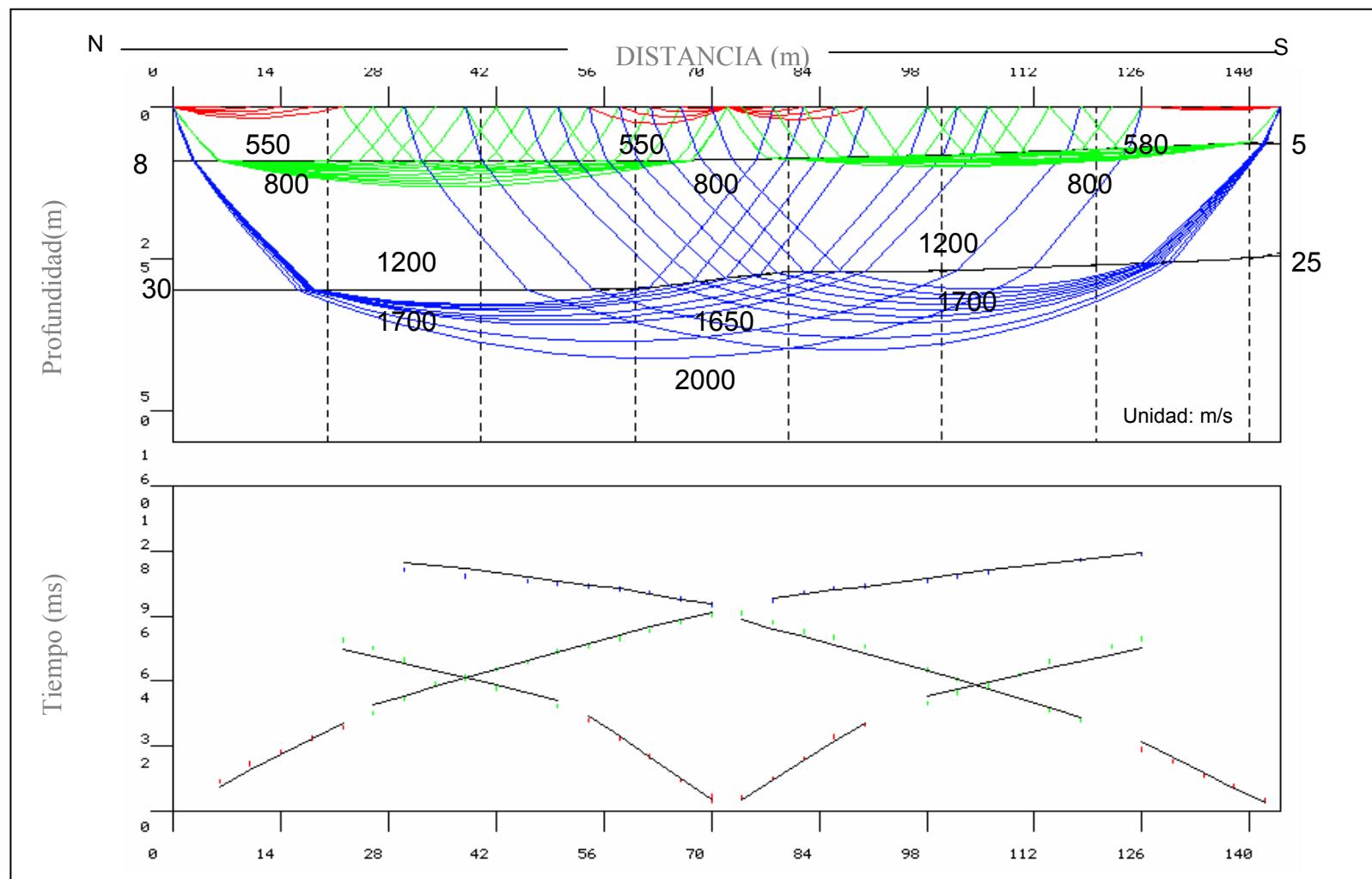


Figura 3.36. Modelo 2D para el perfil E01 a partir de las ondas P.

Ondas S

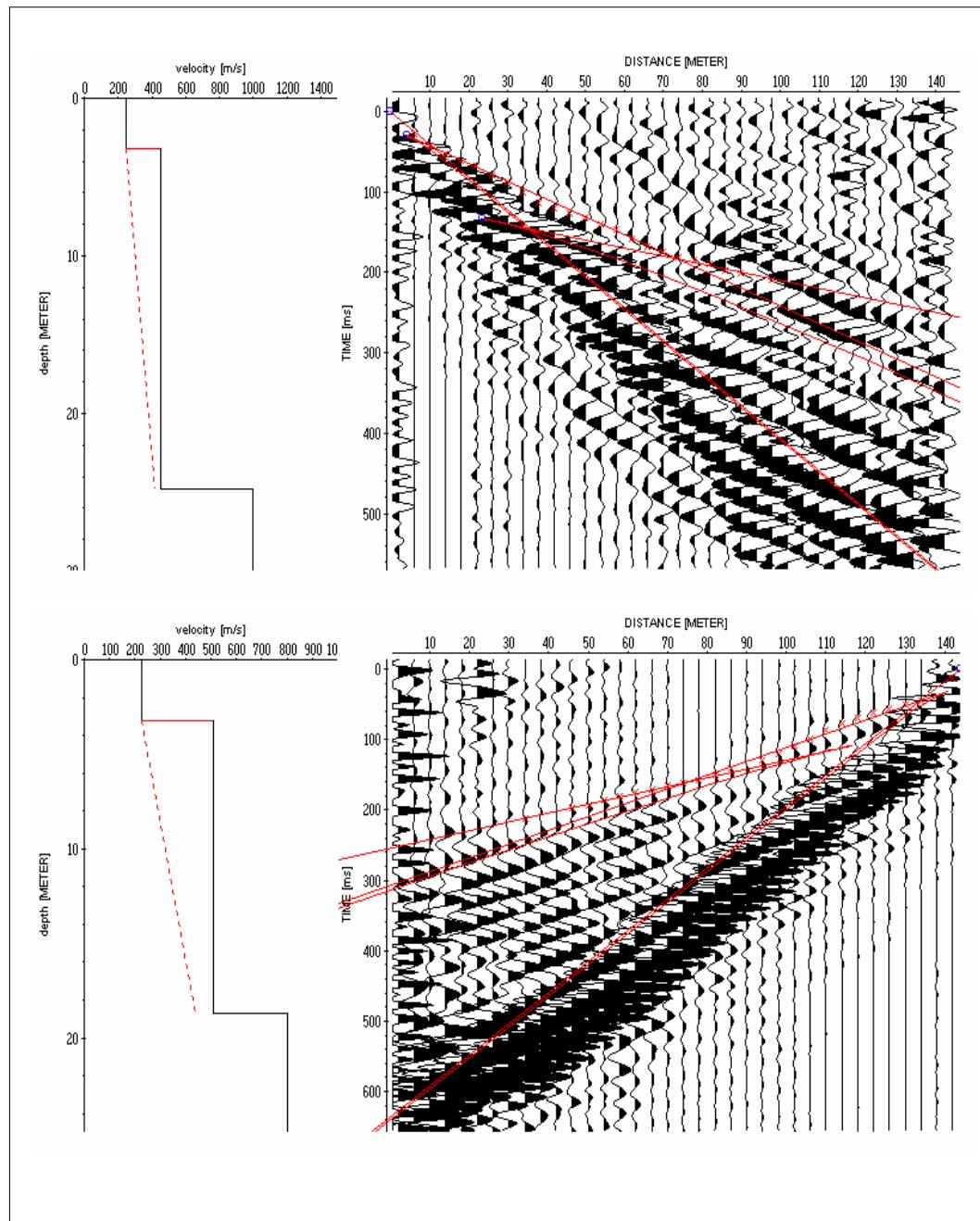


Figura 3.37. Modelos 1D de ondas S del perfil E01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 144 m.

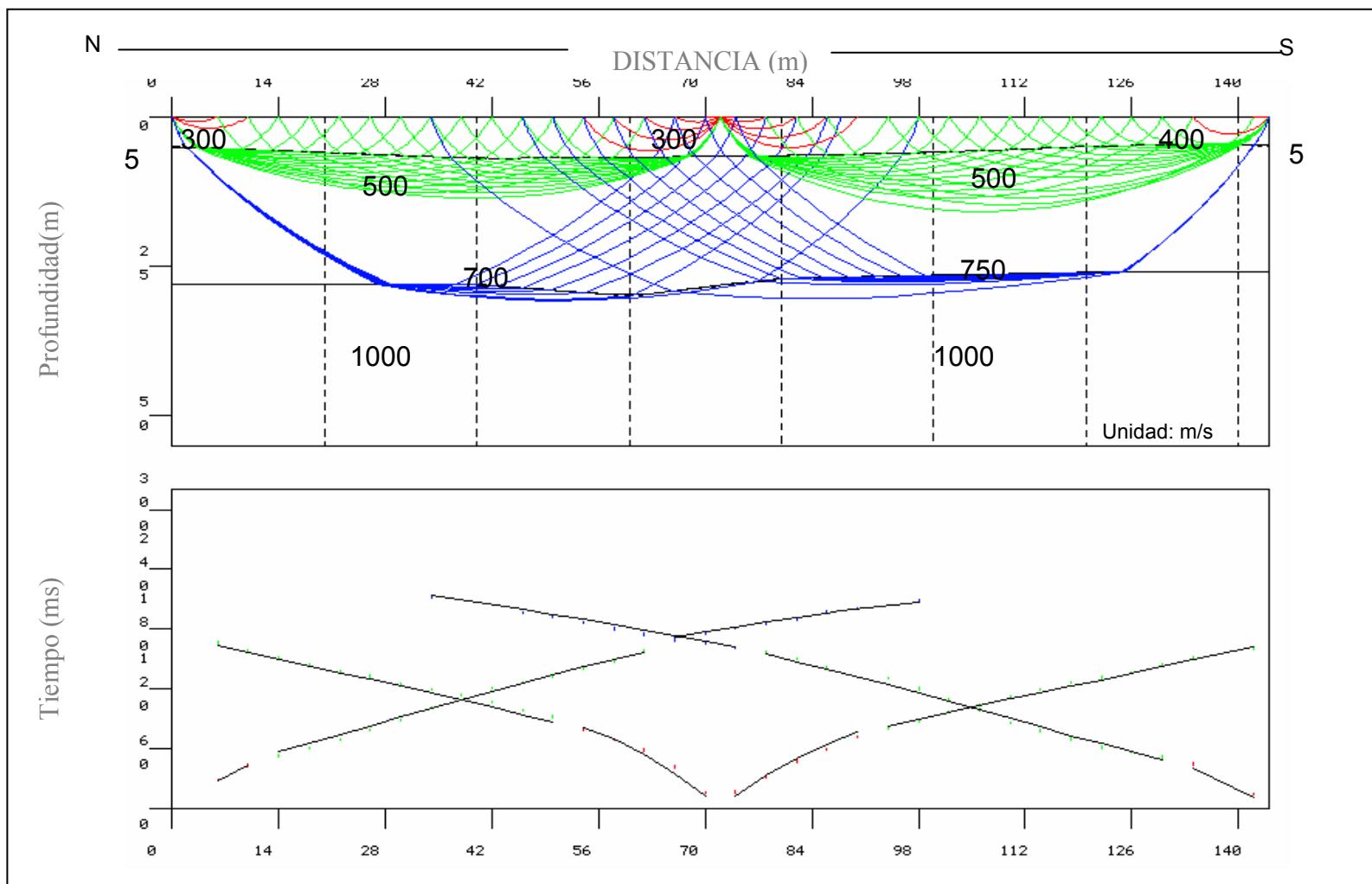


Figura 3.38. Modelo 2D para el perfil E01 a partir de las ondas S.

Perfil F01

El perfil F01 (N-S) se realizó en un campo de fútbol ubicado al este de la Urbanización Valle Arriba, cercano al cauce del río Pacairigua (extremo noreste de la ventana de estudio, figura 3.39).

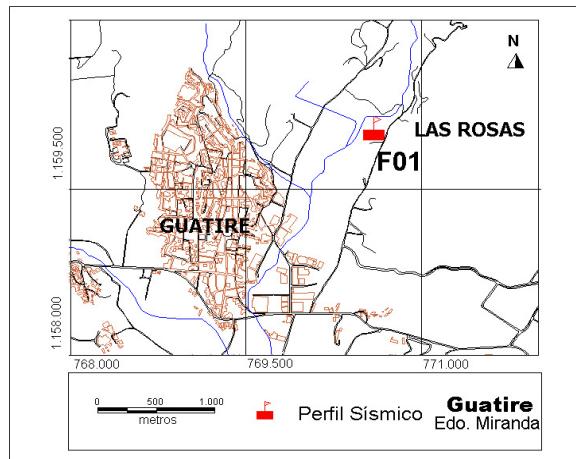


Figura 3.39. Ubicación del perfil F01.

En los modelos 2D (figuras 3.41 y 3.43), se observan dos capas. La primera capa con profundidad de 10 metros en su extremo norte y 8 metros en su extremo sur. La velocidad de ondas P en tope de la capa es 400 m/s en los extremos del perfil, y 600 m/s en el medio. En la base del primer estrato se calcularon valores de 900 m/s. En el modelo 2D para las ondas P (figura 3.41) la profundidad de la segunda capa alcanza 50 m. Esta profundidad no se observa en los modelos 2D de las ondas S, los cuales tienen información de la segunda capa hasta 18 metros. Las velocidades de ondas P y S en el tope de la segunda capa fueron de 1400 y 500 m/s, respectivamente.

La primera capa observada en ambos modelos (ondas P y S) se interpreta como aluviones del Cuaternario constituido principalmente por los sedimentos clásticos provenientes del Macizo del Ávila. Por debajo de esta capa se encuentran los Esquistos de Las Mercedes. El alto gradiente observado en esta segunda capa puede estar asociado a una diferenciación de los Esquistos de Las Mercedes en esta capa. La parte más somera corresponde a la zona meteorizada de estas rocas metamórficas y a medida que aumenta la profundidad hay un cambio gradual a rocas más competentes, en donde se alcanzan los valores de velocidad de ondas P superiores a los 2500 m/s.

Ondas P

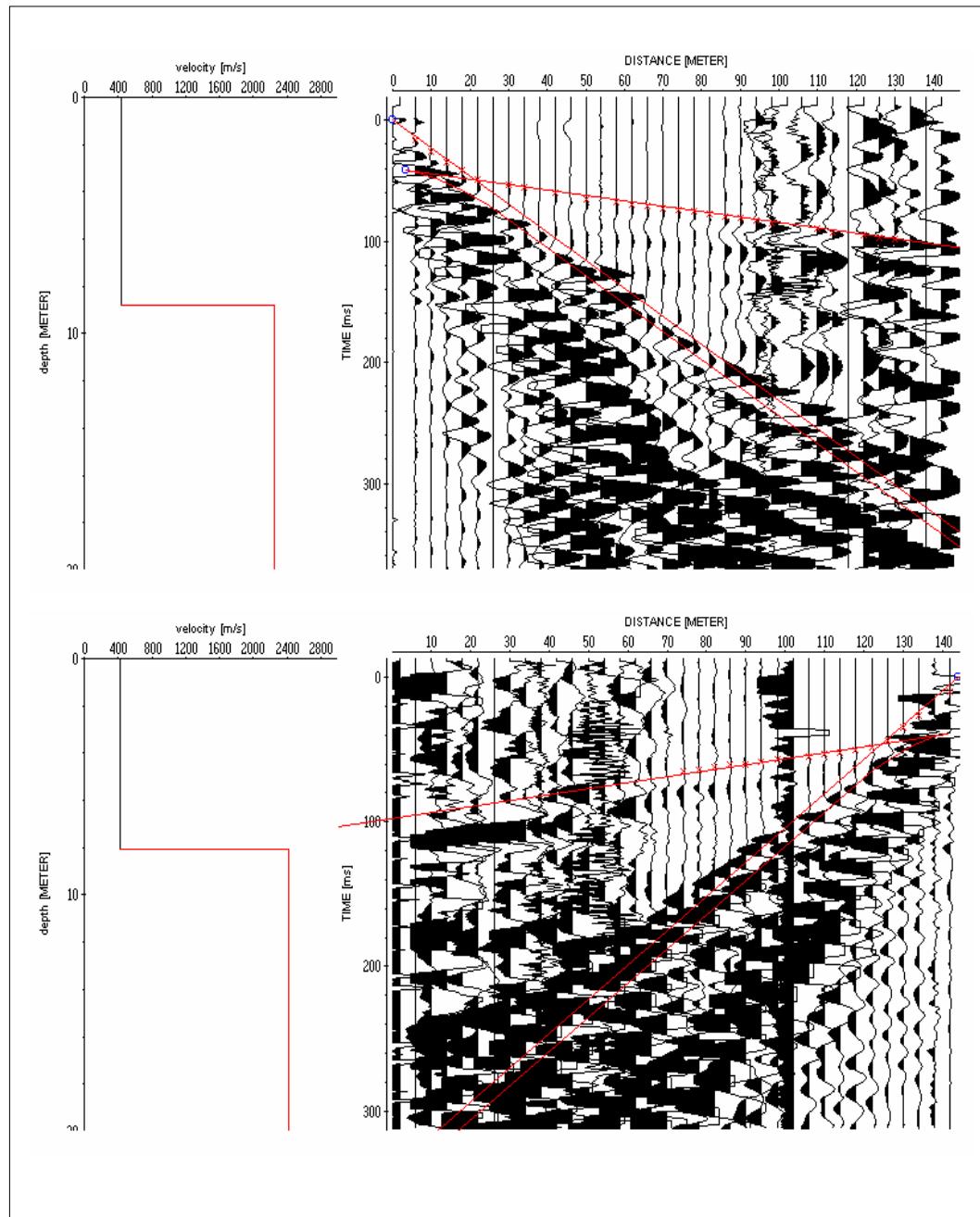


Figura 3.40. Modelos 1D de ondas P del perfil F01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 144 m.

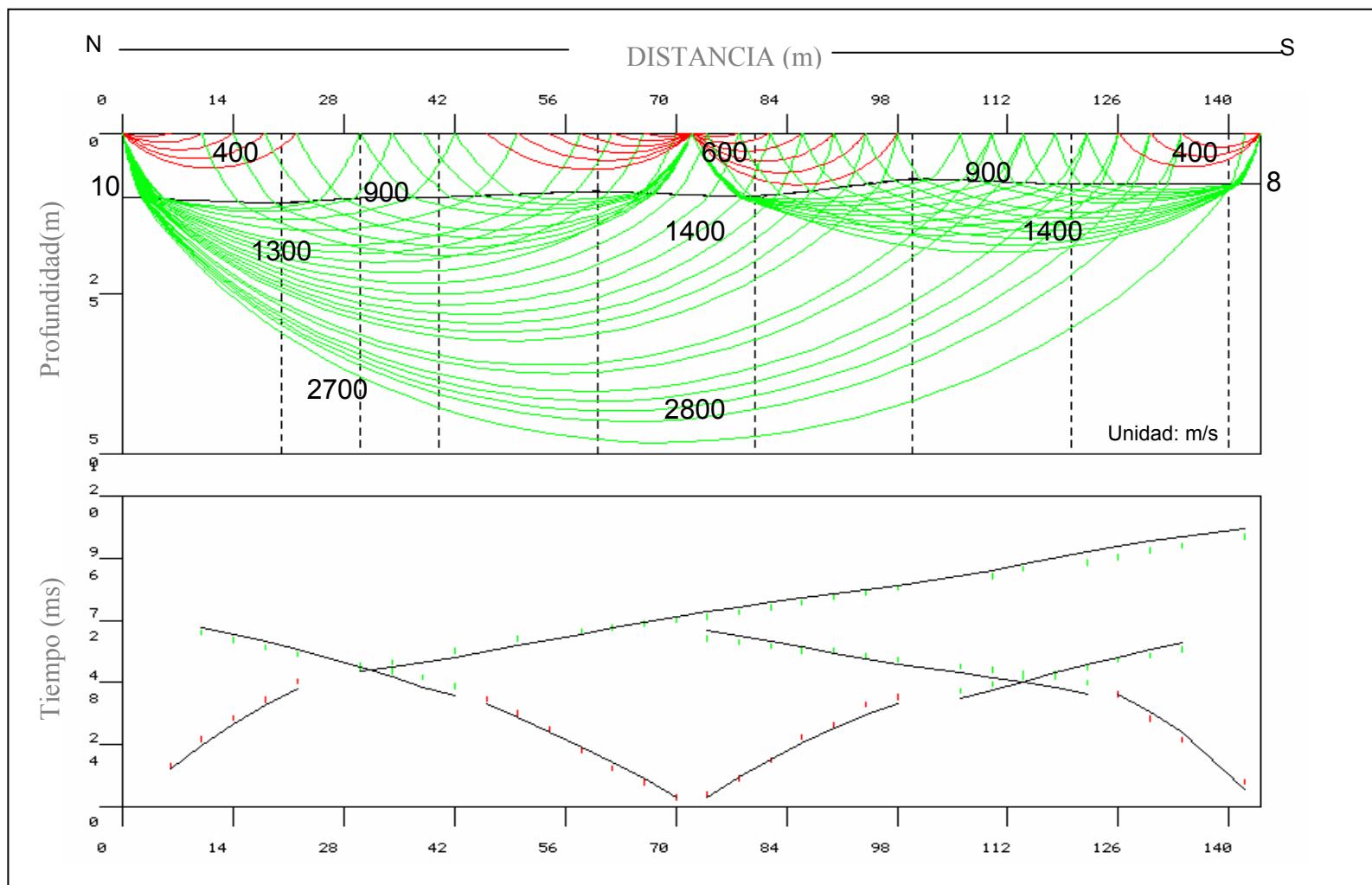


Figura 3.41. Modelo 2D para el perfil F01 a partir de las ondas P.

Ondas S

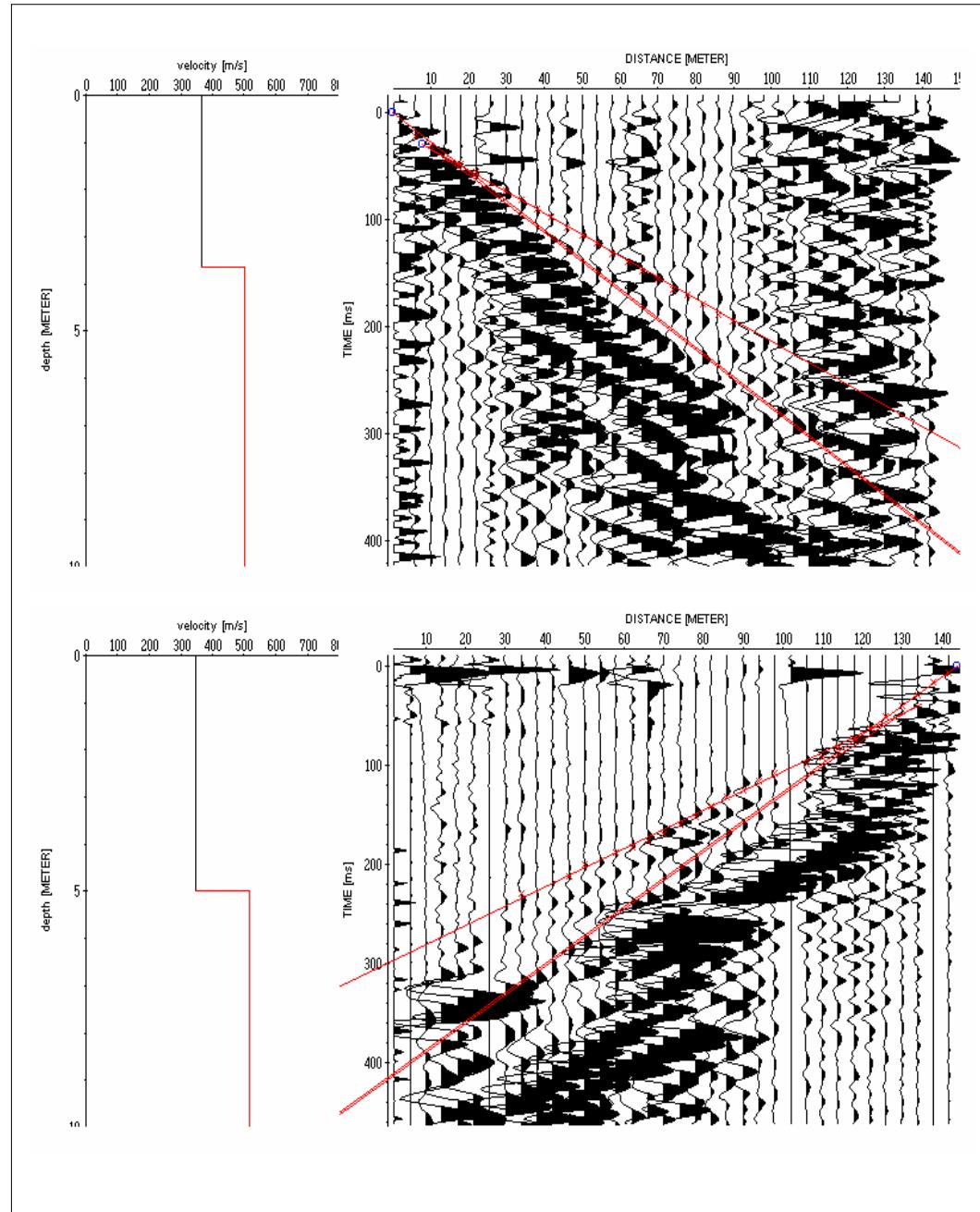


Figura 3.42. Modelos 1D de ondas S del perfil F01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 144 m.

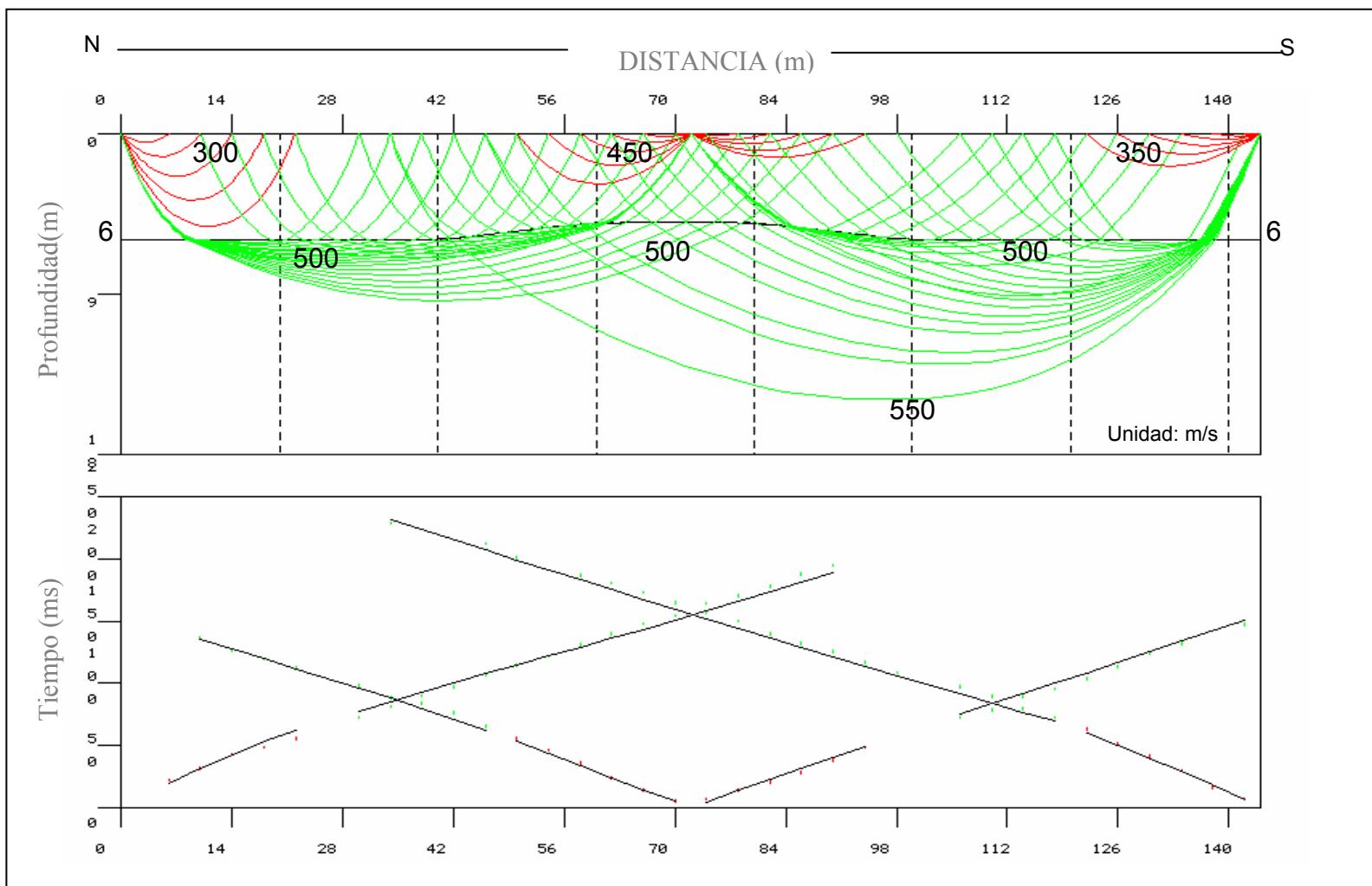


Figura 3.43. Modelo 2D para el perfil F01 a partir de las ondas S.

Perfil G01

El perfil G01 (orientación este-oeste), está ubicado en el extremo sureste de la ventana de estudio. La longitud del perfil es de 144 metros. Este perfil fue realizado muy cerca del cauce del río Guarenas, por debajo de la salida de la autopista vía Oriente.

En este perfil hubo una gran atenuación de la energía en los disparos realizados para las ondas S y no se pudo obtener el disparo en 0 metros para este campo de ondas debido a problemas con el disparador.

De acuerdo al modelo realizado para las ondas P se obtuvieron tres capas. El espesor de la primera capa es 8 metros a lo largo del perfil con una velocidad de 700 m/s. El segundo estrato con espesor de 20 metros y velocidad de ondas P de 1000 m/s en el tope de la secuencia y 1600 m/s en la base. Por debajo de esta capa las velocidades alcanzan valores de 2200 m/s. En el modelo elaborado para las ondas S se observa solo una capa con espesor de 5 a 6 metros. La velocidad de las ondas S en este estrato varía desde 350 m/s hasta 380 m/s, inmediatamente por debajo de esta capa se alcanzan valores de 500 m/s los cuales aumentan hasta 700 m/s.

Al igual que el perfil anterior la primera capa se interpreta como aluviones conglomeráticos acumulados por el cauce del río Guarenas; esta capa se aprecia en ambos modelos (ondas P y S). La segunda capa presente en el modelo de ondas P corresponde a una primera etapa de rocas meteorizadas de los Esquistos de las Mercedes, y por debajo de ésta, pero a mayor profundidad se encuentran rocas metamórficas más competentes de los Esquistos de Las Mercedes.

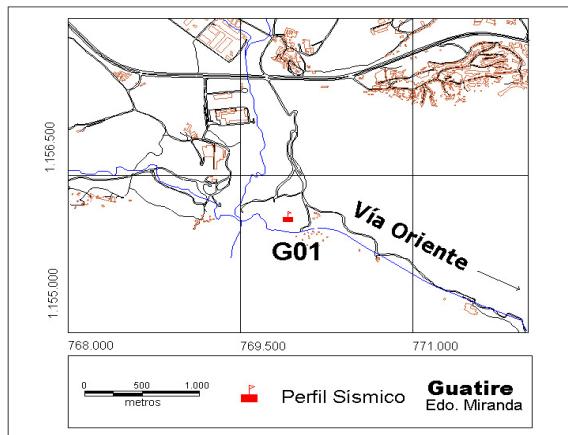


Figura 3.44. Ubicación del perfil G01.

Ondas P

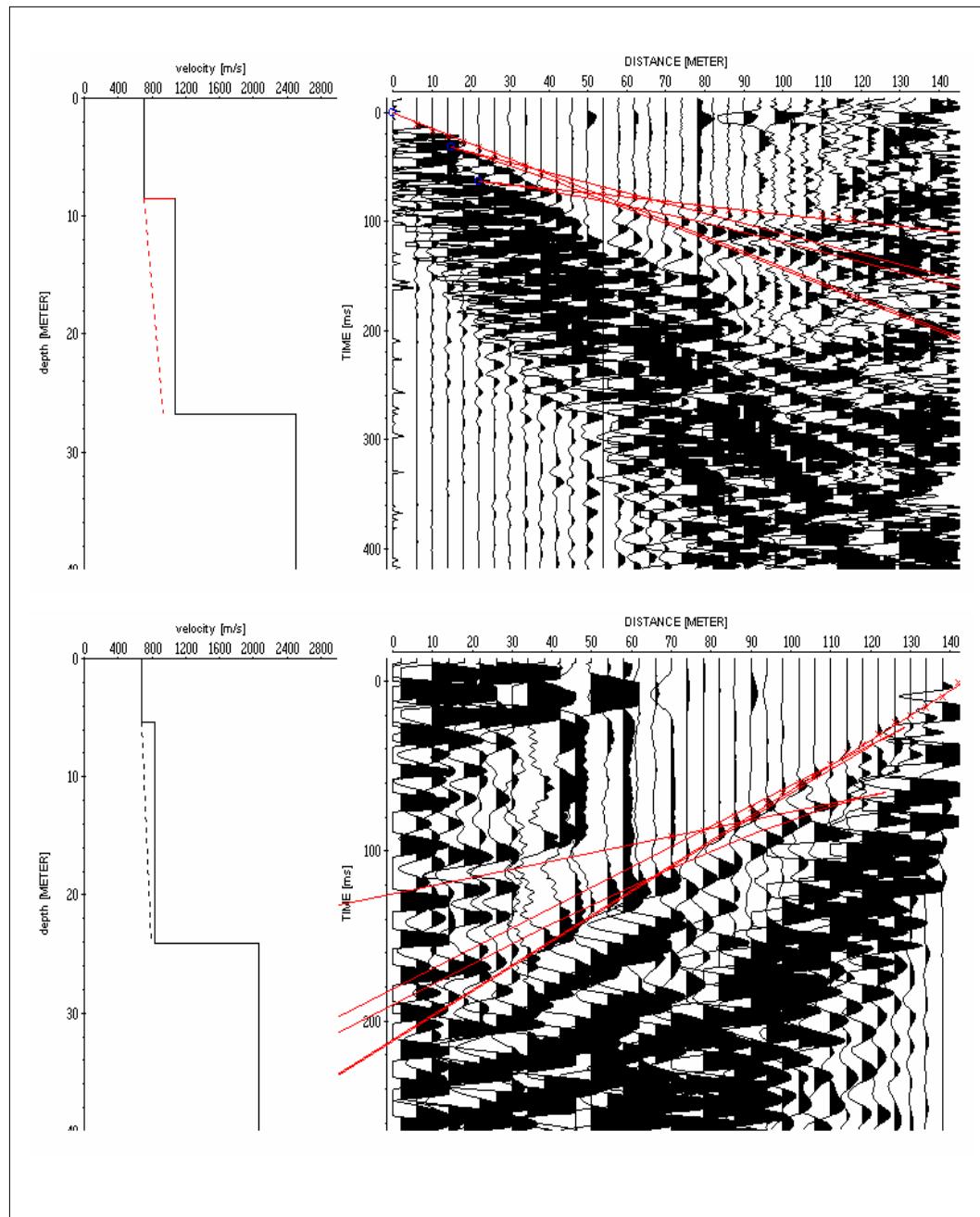


Figura 3.45. Modelos 1D de ondas P del perfil G01. Arriba: disparo en 0 m, abajo: disparo en 144 m.

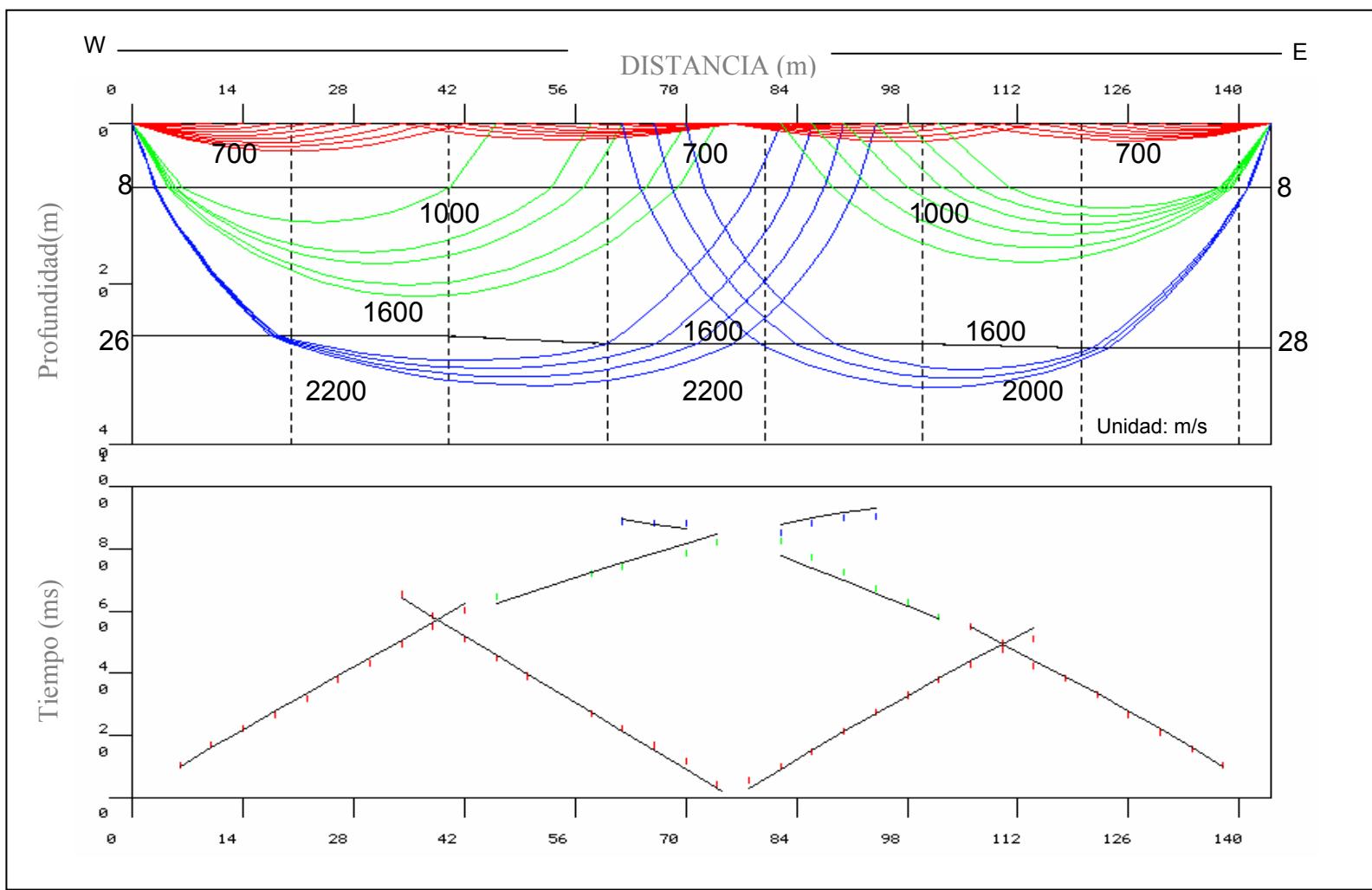


Figura 3.46. Modelo 2D para el perfil G01 a partir de las ondas P.

Ondas S

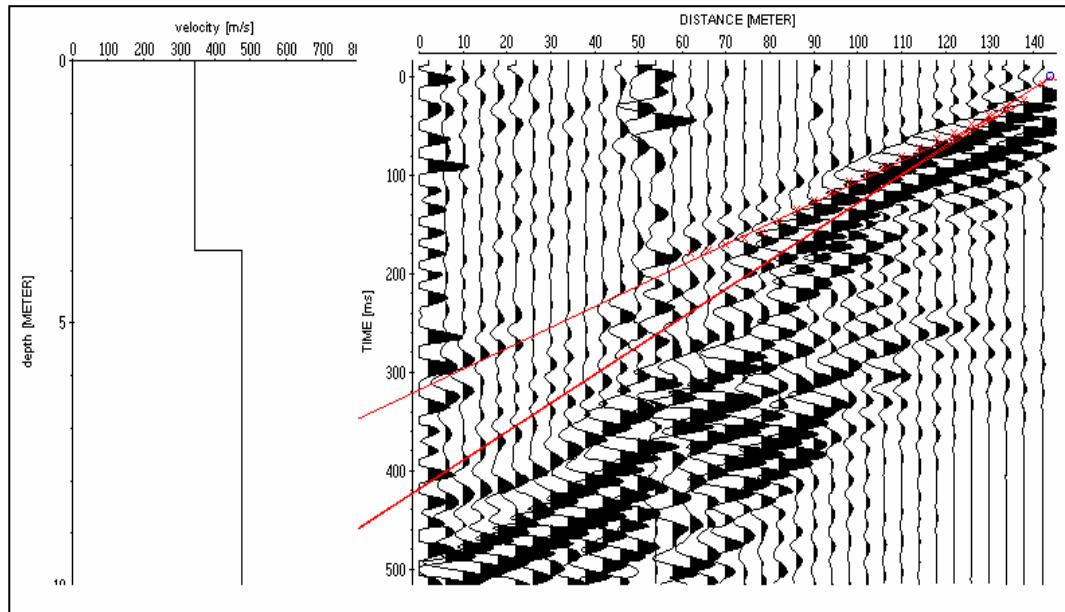


Figura 3.47. Modelo 1D de ondas S del perfil G01, disparo en 144 m.

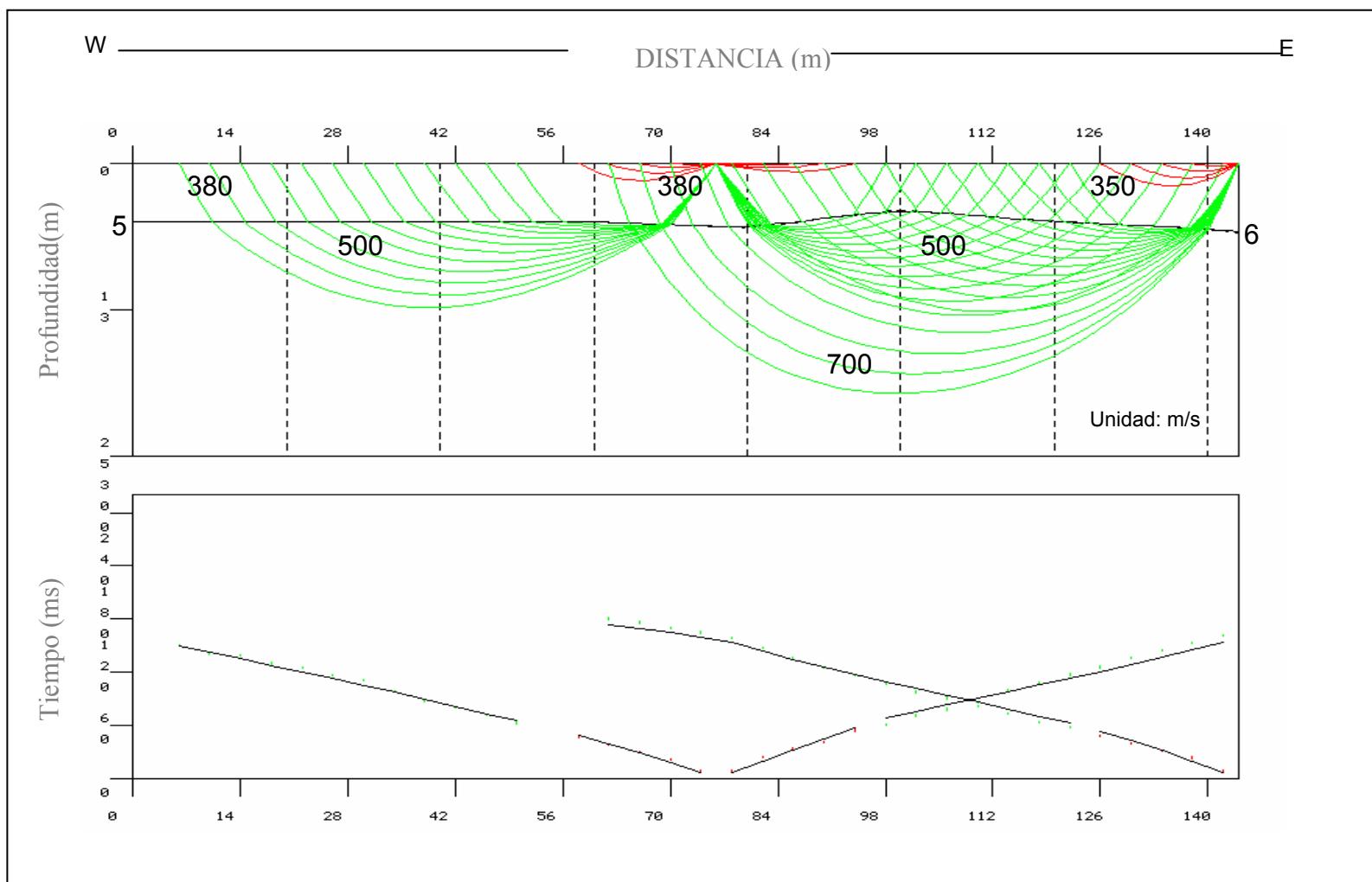


Figura 3.48. Modelo 2D para el perfil G01 a partir de las ondas S.

A continuación se realiza una clasificación de los perfiles a partir de los resultados obtenidos de los modelos 2D, la ubicación espacial de los perfiles y la geología del área en la que fueron realizados. Los perfiles A01, B01 y C01 se agrupan en una zona que se denominará zona 1. Los perfiles D01 y E01 corresponden a la zona 2, y los perfiles F01 y G01, aunque espacialmente están muy distantes, mas por los resultados obtenidos y la geología en la cual están ubicados permiten asumir cierta semejanza, corresponderán a la zona 3. Las profundidades que aparecen en la tabla se corresponden a las alcanzadas por las ondas P debido a que en la mayoría de los modelos de ondas S no se obtuvo suficiente información para modelar las capas más profundas.

Tabla 3.2. Tabla resumen de los resultados obtenidos a partir de los modelos 2D.

Zona	Perfil	Espesor (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Geología	Observaciones
1	A01	0 – 12	800-1000	400 -500	Arenas secas (QG2)	Buzamiento hacia el sur. Perfil ondas s, sólo 1 capa observada
		12 – 39	1200-1600	680 - 700	Arcillas (QG2)	
		39 – 60	> 2000	n/o	Roca metamórfica meteorizada (CaM)	
	B01	0 – 14	350-450	220-280	Relleno	Buzamiento hacia el sur. Zona de alta velocidad en la distancia 0 metros.
		14 – 30	>1000	> 400	Arenas secas (QG2)	
	C01	0 – 7	350-500	220-250	Arenas secas mal consolidadas (QG2)	Baja relación señal-ruido
		6-15	500-700	350-400	Arenas secas (QG2)	
		16 – 25	> 1000	> 600	Arcillas (QG2)	

Zona	Perfil	Espesor (m)	V_p (m/s)	V_s (m/s)	Geología	Observaciones
2	D01	0 - 8	500-550	130-220	Aluviones (Qal)	Ubicados en terraza al norte de los aluviones del río Guarenas. Las capas buzan al oeste
		8-24	900-1200	350-400	Arenas secas (QG2)	
		24-40	1800-2500	900	Sedimentos cementados (QG1)	
	E01	0 - 8	550-580	300-400	Aluviones (Qal)	Cercano al perfil D01, zona de terrazas aluvionales
		8 - 30	800-1200	500-750	Arenas secas (QG2)	
		30 - 40	1700 - 2000	1000	Sedimentos cementados (QG1)	
3	F01	0 - 10	400 - 900	350– 450	Aluviones (Qal)	Gradiente muy alto en la segunda capa para las ondas P.
		10 - 50	1400 - 2700	> 500	Metamórficas meteorizadas a competentes (CaM)	
	G01	0 - 8	700	350– 380	Aluviones (Qal)	Gradiente muy alto para las ondas P. En el perfil de ondas S sólo se observa 1 capa
		8 - 28	1000 -1600	> 500	Metamórficas meteorizadas (CaM)	
		28 – 35	> 2000		Metamórficas compactas (CaM)	

En la tabla 3.3 se encuentran los valores de densidad determinados para las formaciones geológicas presentes en el área a partir de la relación velocidad – densidad para rocas metamórficas y sedimentarias por Ludwig, Nafe y Drake, 1970, (figura A.1, apéndice A).

Tabla 3.3. Valores de densidad calculados para cada formación geológica a partir de la curva de relación densidad-velocidad de Ludwig, Nafe y Drake, 1970.

Formación	Vp (m/s)	Vs (m/s)	ρ_p (gr/cc)	ρ_s (gr/cc)
Aluvión (Qal)	500 - 700	300 - 400	-	1,6-1,7
Guatire (QG2)	900 - 1000	450 – 625	-	1,80-1,9
Esquistos de Las Mercedes (CaM)	2500	500 - 700	2,2	1,8

En la figura 3.49 se observa el mapa de velocidad promedio de ondas S para los primeros 30 metros de profundidad (Mapa Vs30) de los perfiles B01, C01, D01, E01 y F01, elaborado con el programa Mapinfo Profesional. Para las perfiles A01 y G01 no se obtuvo información de ondas S a los 30 metros por ello no se incluyen en el gráfico.

El rango de variación de velocidades de las ondas S para los primeros 30 metros de profundidad se encuentra entre 550 y 650 m/s. La velocidad más alta se obtuvo para el perfil D01 (615 m/s), asociado a sedimentos cementados de la Formación Guatire (QG1). Para los perfiles restantes se determinaron valores semejantes de velocidad en el rango de 550 y 600 m/s. Este mapa representa un modelo inicial propuesto para la elaboración de un mapa Vs30 más completo de Guatire.

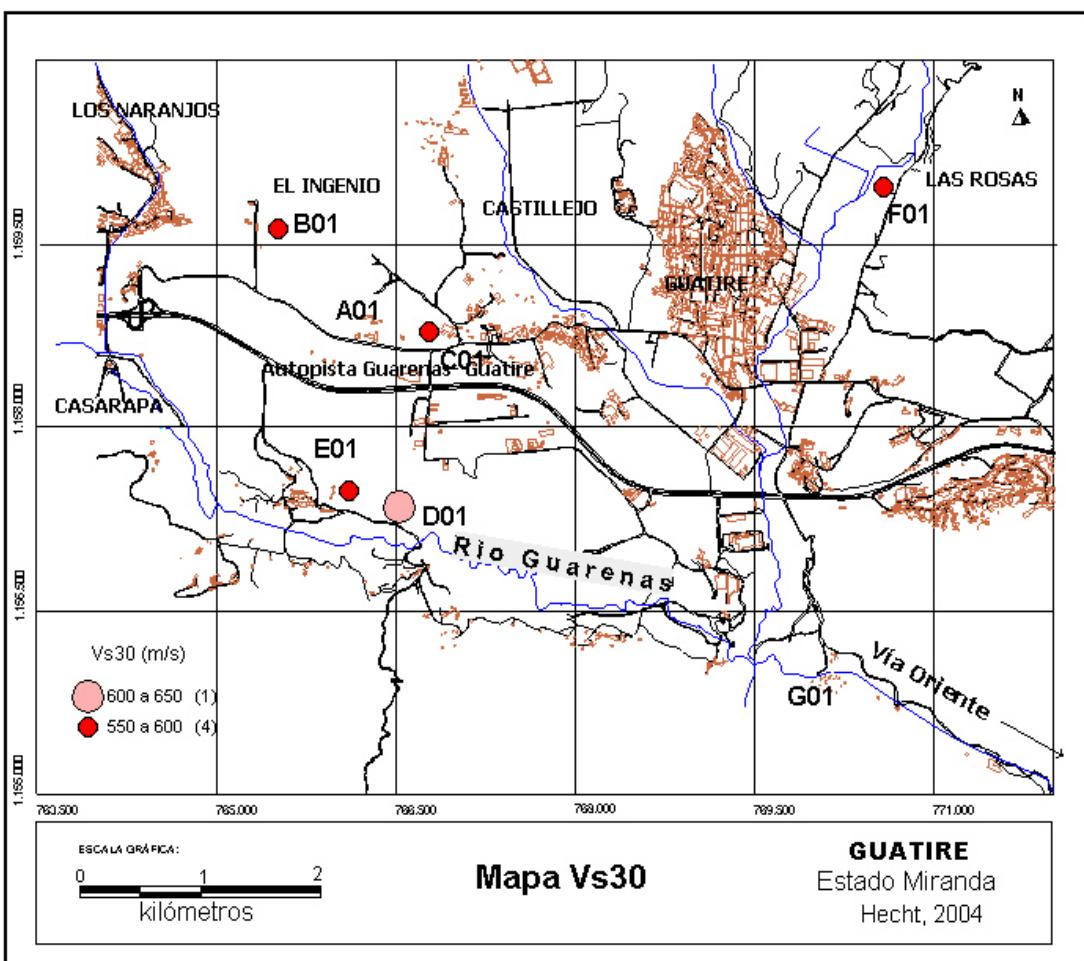


Figura 3.49. Mapa propuesto de velocidades promedios a 30 metros (V_s30) de Guatire.

CAPÍTULO IV

RUIDO SÍSMICO AMBIENTAL

4.1 MICROTREMORES

El uso de microtremores para estimar los efectos de sitio en ingeniería sísmica ha sido estudiado por muchos años, y a pesar de los problemas que se han presentado en su interpretación, han sido una contribución muy interesante para las evaluaciones de los efectos de sitio.

La técnica comúnmente usada para estimar los efectos de sitio a partir de la medición de microtremores puede ser dividida ampliamente en tres grupos: interpretación del espectro de amplitud de Fourier, cálculo de las tasas espectrales relativas a una estación en roca firme, y el cálculo de las relaciones espectrales entre las componentes horizontales y verticales del movimiento del suelo (Nakamura, 1989).

Kanai et al. (1961) demostró que los períodos predominantes y las amplitudes de los microtremores tenían una buena relación con la estructura del subsuelo y las características sísmicas de los suelos durante un terremoto; ellos explicaron que los microtremores responden a reflexiones múltiples de las ondas SH en capas paralelas en el subsuelo. Por ello, recientemente la observación de microtremores se está volviendo un método popular y práctico para estimar la estructura de los suelos y evaluar el riesgo sísmico de la superficie de los suelos (Masaki, 1998)

4.1.1 Relación Espectral H/V

La idea de observar en una sola estación la relación espectral de las componentes horizontales y verticales fue por primera vez introducida por Nogoshi e Igarashi (1971). Ellos demostraron su relación a la curva de elipticidad de las ondas Rayleigh, y tomaron ventaja de esta coincidencia entre la más baja frecuencia de la curva H/V con la frecuencia fundamental de resonancia, para usar ésta como un

indicador de la estructura del subsuelo. Esta técnica fue luego revisada por Nakamura (1989) quien expuso que esta relación entre las componentes horizontales y las verticales es una estimación confiable de la función de transferencia del sitio para las ondas de cizalla (S) o función de amplificación del sitio dependiente de la frecuencia (lo que lo condujo a denominarla “Quasi-Transfer Spectrum”, o QTS; Nakamura, 2002).

4.1.2 Fundamento Teórico de la relación H/V

Los efectos de sitio, usualmente considerados como funciones de transferencia empíricas de las capas superficiales, son comúnmente estudiados por dos técnicas: la tasa espectral estándar y los métodos de relación H/V. La relación espectral estándar, S_T , se calcula dividiendo la componente horizontal del espectro de movimiento, en el dominio de Fourier, en superficie, S_{HS} , por otro grabado en un sitio rocoso cercano, en la roca base, S_{HB} . La última estación es tomada como la estación de referencia. Entonces:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}}. \quad (\text{Ec. 4.1})$$

De acuerdo al trabajo de Nakamura (1989), Lemo y Chávez-García (1993), usaron una relación espectral E_S para estimar el efecto de amplitud de la fuente

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}}, \quad (\text{Ec. 4.2})$$

donde S_{VS} y S_{VB} son, respectivamente, el espectro de Fourier de la componente vertical de movimiento en la superficie y aquellas en la roca base a cierta profundidad. Nakamura (1989) asumió que la componente vertical del espectro del microtremores no era amplificada por capas superficiales de baja velocidad, y estimó el efecto de las ondas Rayleigh en la componente vertical de los tremores por medio de evaluaciones de E_S . Nakamura propuso que si el efecto de las ondas Rayleigh no

era el mismo en la componente vertical y la horizontal, entonces E_S podría ser empleado para eliminar los efectos de las ondas Rayleigh en la función de transferencia. Una aplicación para compensar el efecto de la fuente (E_S) fue introducida por Lemo y Chávez-García (1993), la cual incluía una función modificada para el efecto de sitio (S_{TT}), llamada:

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S}, \quad (\text{ec. 4.3})$$

la cual es equivalente a

$$S_{TT} = \left(\frac{S_{HS}}{S_{VS}} \right) \Bigg/ \left(\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \right). \quad (\text{ec. 4.4})$$

Nakamura (1989) también señaló que la tasa, S_{HB} / S_{VB} , era cercana a 1, lo cual obtuvo examinando medidas de microtremores en pozos. Recientemente, Huang y Teng (1999) estudiaron esta relación usando microtremores y grabaciones de eventos sísmicos en una capa sedimentaria en Chiawan, Taiwan. Con estos chequeos empíricos, fue asumido, para ese sitio, que un estimado razonable para la función de efecto de sitio modificado podría ser determinado a partir de:

$$S_{TT} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}}. \quad (\text{ec. 4.5})$$

Esto sugiere que la tasa H/V, definida por su función de transferencia, puede ser obtenida solamente a partir de movimientos en la superficie, los cuales obviamente hacen más fácil estimar las características del movimiento del suelo.

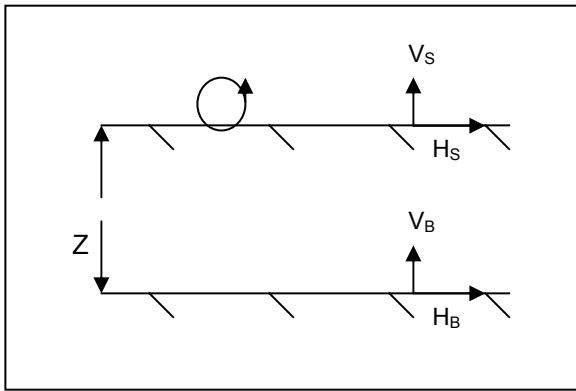


Figura 4.1. Modelo Sencillo de la relación H/V, asumido por Nakamura (1989) para interpretar medidas de microtremores.

4.2 METODOLOGÍA DE LA ADQUISICIÓN

La adquisición de los datos de ruido sísmico ambiental fue llevada a cabo entre los meses de mayo, junio y julio del año 2004, posterior a la adquisición gravimétrica. En un principio se llevarían a cabo las mediciones de ruido sísmico en el mismo punto geográfico en el cual se levantaron las estaciones gravimétricas, pero por razones de presencia de un excesivo ruido artificial (industria, autopistas) en algunos puntos, ciertas mediciones fueron distanciadas varios metros del lugar donde se levantó la medición gravimétrica; en la mayoría de los casos esta distancia no sobrepasa los 100 m.

En total se realizaron 167 mediciones de ruido sísmico ambiental en la ventana de estudio, cubriendo la misma área de las estaciones gravimétricas levantadas, colocadas en un SIG (Figura 4.2).

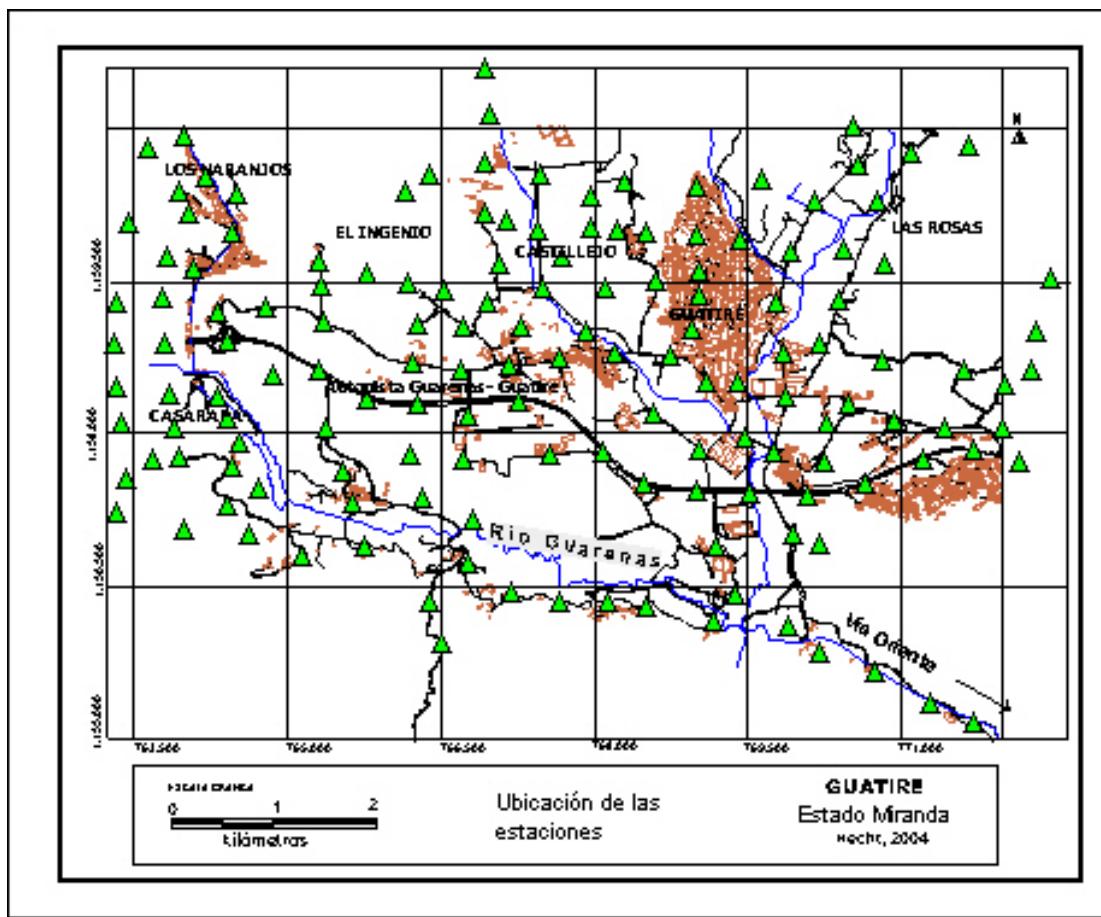


Figura 4.2. Ubicación de las mediciones de ruido sísmico ambiental.

4.2.1 Ubicación de las mediciones

Las mediciones fueron llevadas a cabo en el valle de Guatire en las zonas en las cuales se contaba con acceso vehicular (autopistas, calles, carreteras de tierra) como se observa en la figura 4.2.

4.2.2 Equipos

Para la adquisición de la información de ruido sísmico se empleó un sismógrafo portátil marca Nanometrics, modelo Orión, con un sensor de tres componentes (N-S, E-O, vertical) marca Guralp, modelo CMG-40T, que pertenece a la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (Figura 4.3), además se

empleó un GPS Garmin Plus III para realizar el posicionamiento espacial de las estaciones. Las características del equipo y los parámetros de adquisición se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Equipos empleados en la adquisición

Sismógrafo	Orión
Sensor	Guralp CMG-40T
Rango de operación del sensor	30-50 Hz
Longitud de la medición	10 min / 600 s
Intervalo de muestreo	100 mps
GPS	Garmin Plus III
Fuente de poder	Batería interna del sismógrafo, Batería externa
Vehículo	Toyota Macho, Chevrolet Swift



Figura 4.3. Foto izquierda: Sismógrafo Orión y sus componentes. Foto derecha: medición de ruido sísmico en la Urbanización Los Naranjos.

4.2.3 Metodología

Al arribar al punto de medición se observaba si había la presencia de cables de alta tensión, la cantidad de tráfico en el área, cercanía de industrias, estabilidad del suelo (evitar realizar la medición encima de algún vacío generado por alguna alcantarilla). El equipo se configuraba para realizar la medición y el sensor Guralp se colocaba a una distancia prudencial (15 m aproximadamente) orientado hacia el norte. El equipo posee un GPS interno. Luego de un lapso entre 3 y 5 minutos para que se estabilizara el equipo, se comenzaba la medición.

En los trabajos previos sobre microtremores realizados en Caracas y Barquisimeto (Abeki, et al., 1998; Rocabado, 2000) se realizaron mediciones con una duración de 5 minutos. Pero con la finalidad de obtener una ventana de datos mayor y por recomendaciones del grupo de trabajo SESAME, en este estudio se llevaron a cabo mediciones con duración de 10 minutos. Esto permitirá obtener un mayor número de ventanas para realizar el cálculo de la relación H/V. Estas ventanas deben representar en lo posible solamente el ruido natural del lugar donde se realizó la medición.

Mientras se llevaban a cabo las mediciones se procuraba que no hubiese ruido que perturbara la medición en las cercanías del sensor, como pasos de personas o miembros de la cuadrilla, tránsito de vehículos (siempre que lo permitiera la locación), para así garantizar un número suficiente de ventanas (>10) para el análisis sin ruido cercano.

La información quedó guardada en el disco duro del sismógrafo Orión en el formato interno de este equipo. Luego esta información es descargada y procesada en un computador personal. En éste queda guardada la grabación de cada componente junto con un archivo que posee la configuración, ubicación y parámetros del equipo en el momento de realizar la medición.

4.3 PROCESAMIENTO DE DATOS

4.3.1 Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos se divide en dos partes. La primera parte se inicia con la descarga de la información del sismógrafo y la preparación de los mismos para ser analizados en el programa SESAME. La segunda consiste en la selección de ventanas en dicho programa y la generación de las relaciones H/V y los espectros de cada componente.

4.3.1.1 Programa SESAME

El programa SESAME debe su nombre a la abreviación por sus siglas en inglés de Evaluación del Efecto de Sitio usando Excitaciones Ambientales (Site Effects Assessment Using Ambient Excitations), creado en el proyecto del mismo nombre que lleva a cabo una Comisión Europea conformada por universidades e institutos de varios países de Europa (más información en la página web de internet <http://sesame-fp5.obs.ujf-grenoble.fr/>).

El programa es una aplicación en la plataforma JAVA, el cual provee una interfase gráfica sencilla para aplicar el método de la relación H/V en estudios locales de microzonificación. Una de las ventajas de este programa es que permite una selección automática de ventanas y el cálculo de la relación H/V desde comandos externos. Ambos procesos son aplicaciones independientes desarrolladas en Fortran

4.3.2 Descarga y conversión de los datos

Cada medición de ruido ambiental queda guardada en el sismógrafo en cuatro archivos distintos de la siguiente manera:

- nombre de la estación.BHE: componente E-W
- nombre de la estación.BHN: componente N-S

- nombre de la estación.BHZ: componente vertical
- nombre de la estación.SOH: parámetros de la medición.

El sismógrafo funciona como un computador personal y los datos quedan guardados en un disco duro extraíble en el formato interno del equipo, en este caso el formato es Orión. Para realizar la descarga es necesario conectar este disco duro externo en otro computador mediante un puerto SCSI y bajar los datos a éste. Antes de descargar los datos al otro computador se aplica un comando (rbtrim *.*) para reducir el tamaño de cada archivo (cada archivo posee la información de una sola medición) eliminando el espacio sin grabación que queda en cada uno de éstos; esto se hace debido a que antes de realizar las mediciones se asigna un tamaño de memoria para cada uno de los archivos y no siempre se ocupa toda la cantidad asignada. Después de aplicar este comando se pueden copiar los archivos al otro computador y están listos para ser procesados.

Como se ha mencionado, los datos se encuentran en formato Orión y para poder ser usados por el programa SESAME se deben convertir los datos a código ASCII. Para ello se emplea una secuencia de procesamiento con varios comandos que vienen suministrados por los fabricantes del equipo. La secuencia de procesamiento se muestra en la figura 4.4. En este esquema se emplea como ejemplo la estación 1173, componente bhe. Esta secuencia se aplica a cada una de las componentes (bhe, bhn y bhz).

Cuando ya el archivo se encuentra en código ASCII, el mismo debe ser cambiado a un formato que pueda ser usado por el programa SESAME. Para ello se emplea una aplicación desarrollada en el programa Labview elaborada por Rocabado (comunicación personal). Dicho programa lee las tres componentes de la estación, indicándole la duración de la grabación en minutos (10 minutos para este estudio). Las componentes se ingresan en un orden específico, primero la componente vertical (bhz), luego la componente este-oeste (bhe) y finalmente la componente norte-sur (bhn). El programa internamente realiza el cambio de formato y prepara un único

archivo de salida que puede ser utilizado por el programa SESAME. Este archivo debe tener la extensión .saf

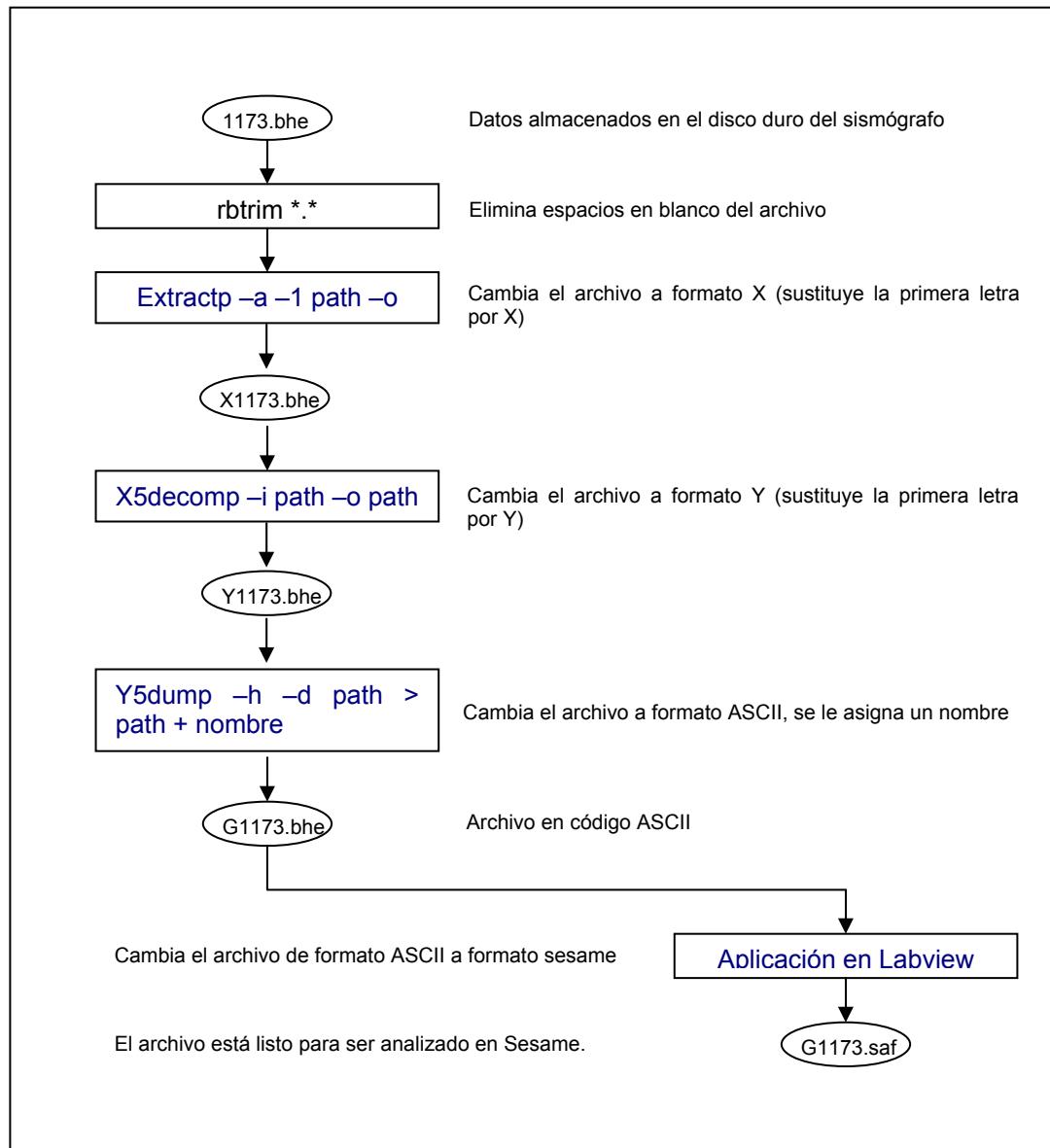


Figura 4.4. Esquema del procesamiento de los datos de ruido sísmico

4.3.3 Análisis de los datos

La primera etapa consiste en desplegar toda la información grabada en un gráfico de tiempo y seleccionar en ésta varias ventanas de un tiempo determinado que representen la señal más estable. Por recomendaciones del grupo de trabajo SESAME, la longitud de tamaño de la ventana debe superar 10 veces el período esperado del área. Luego con estas ventanas se determinan los espectros de cada componente y finalmente se calcula la relación H/V.

Con el programa SESAME este proceso se agiliza debido a que con el programa se pueden seleccionar las ventanas automáticamente e internamente se generan todos los cálculos necesarios para obtener los espectros de las componentes y la relación H/V. Como ejemplo se presentará a continuación la secuencia de comandos para el análisis de los datos con este programa, se empleará la misma estación que se usó en la sección de procesamiento (estación G1173):

1. Se insertan los datos en el programa (se abren los archivos) y se trazan los gráficos en pantalla con la opción “plot screen” (figura 4.5). En esta figura se observan las tres componentes de la señal grabada, en total se observan los 600 segundos de medición.

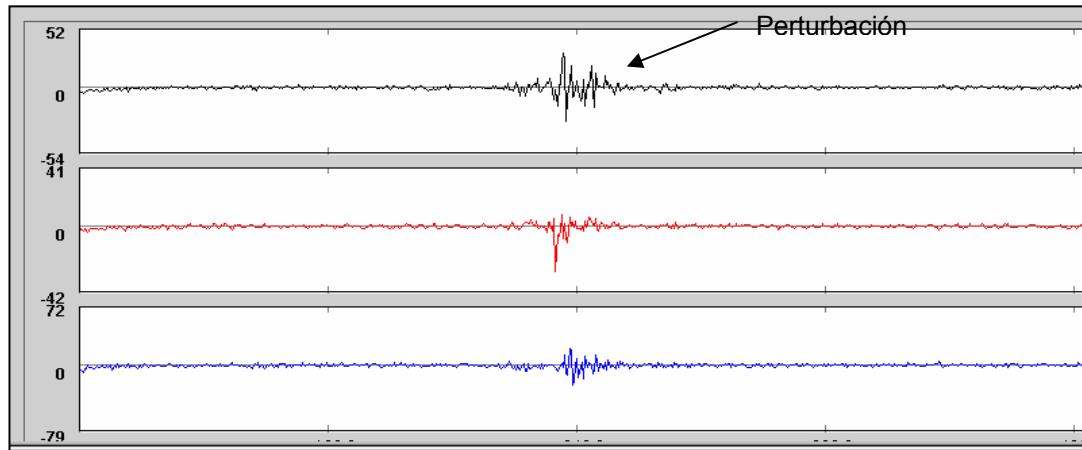


Figura 4.5. Gráfico de la señal grabada para la estación G1173. De arriba a abajo se muestra cada componente, vertical, E-W, N-S, respectivamente.

La estación mostrada fue grabada en una carretera de tierra al suroeste del área de estudio cerca del cauce del río Guarenas en un sector donde no hay tránsito vehicular ni urbanizaciones cerca ya que es un terreno baldío. En el gráfico se observa una señal muy buena del ruido ambiental a pesar de la presencia, a los 300 segundos, de una perturbación bastante clara señalada en el gráfico (posiblemente pasos de uno de los integrantes del equipo de adquisición).

2. Luego se seleccionan las ventanas donde se observe la señal más estable.

Esto se puede realizar automáticamente con el programa SESAME. Se configuró el mismo para realizar selecciones de ventana con 30 segundos de duración.

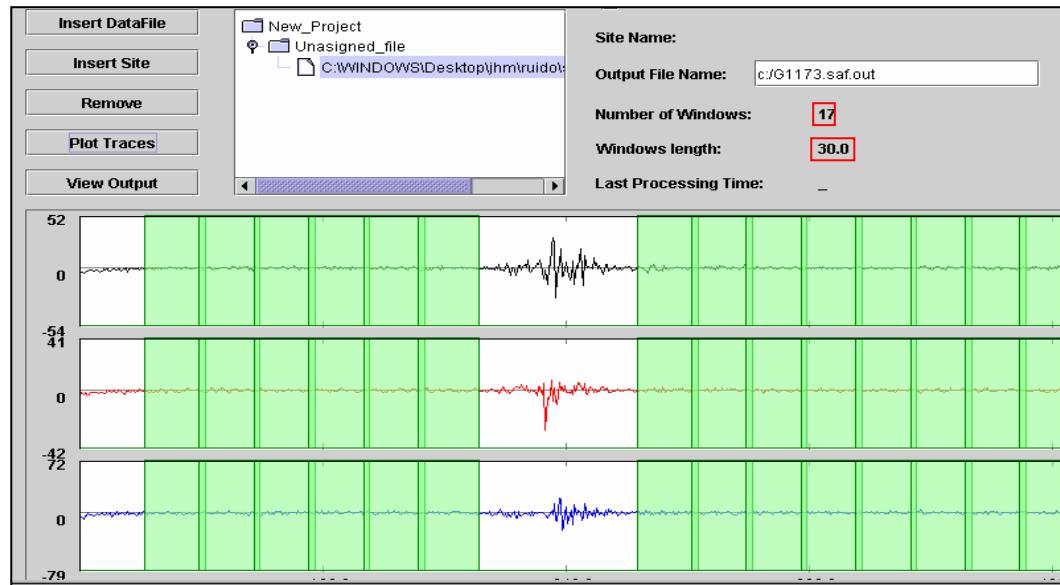


Figura 4.6. Selección automática de ventanas para la estación G1173.

En la figura 4.6 se observan las ventanas seleccionadas automáticamente por el programa para la estación G1173. En total fueron 17 ventanas con una longitud de 30 segundos (recuadros rojos en la figura). En muchos casos la señal obtenida no es tan buena debido a la cercanía de la autopista intercomunal Guarenas-Guatire, de industrias en el área (hay muchas industrias en las cercanías del pueblo de Guatire) o

de tránsito de personas y vehículos en algunas urbanizaciones (Los Naranjos, Castillejo, Nueva Casarapa, Las Rosas. Para estas situaciones la selección automática no determinaba suficientes ventanas y en algunos casos ninguna, por lo cual se tuvieron que aplicar distintos mecanismos para un análisis posterior de los datos, entre los cuales están: disminución de la longitud temporal de las ventanas a 20 segundos, aplicación de filtros pasa banda, o selección manual de las ventanas, esto último se aplicó en algunos casos donde la selección automática sólo tomaba unas pocas ventanas (2 a 5 ventanas). En definitiva se trató en lo posible de tener un número mínimo de diez ventanas para obtener una mejor estimación de la relación H/V, pero esto dependió de la calidad de los datos grabados. En el apéndice B se puede observar un resumen de los datos con todos los parámetros del análisis (tabla 4.2).

Tabla 4.2. Campos de la tabla de datos del análisis de ruido sísmico ambiental.

Estación	Nro. de ventanas	Tipo Selección	Filtro pasabanda	UTM (N-S)	UTM (O)	(E-T) fund. (s)	Rel. Amplitudes
----------	------------------	----------------	------------------	-----------	---------	-----------------	-----------------

3. Cálculo de la relación H/V: El programa SESAME realiza automáticamente el cálculo de los espectros de amplitud para cada componente así como la relación H/V aplicando para ello la transformada de Fourier a cada una de las componentes. Una ventaja del programa SESAME es que permite el empleo de distintos acercamientos y cambios de escala, tanto en el eje de las abcisas (frecuencia) como en el eje de las ordenadas (relación de las amplitudes H/V), para poder realizar una selección más fácil del período fundamental. En todos los datos se aplicó el parámetro Konno-Ohmachi con una frecuencia de 40 Hz para realizar el suavizado de los datos (Rocabado, comunicación personal).

En la figura 4.7 se puede observar el gráfico de la relación H/V para la estación G1173 y la selección del período fundamental en el mismo. El criterio para realizar esta selección consiste en tomar el máximo absoluto (pico más alto) que se

observa en el gráfico. El valor en el eje de las abcisas corresponde a la frecuencia asociada al período fundamental. La salida en pantalla del programa SESAME muestra tres curvas, la curva de color negro corresponde a la relación H/V, las curvas en rojo y azul corresponden a la relación H/V multiplicada por su desviación estándar y dividida entre su desviación estándar, respectivamente.

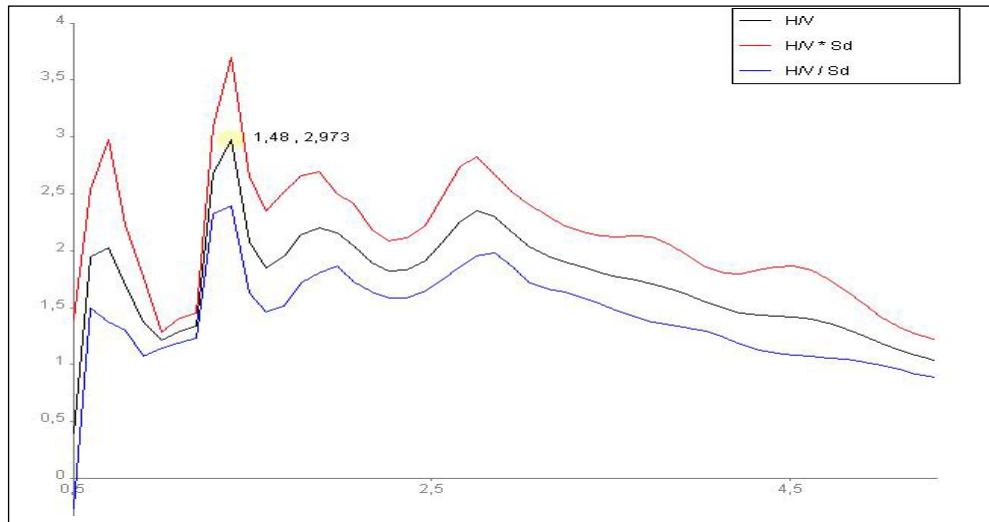


Figura 4.7. Relación H/V para la estación G1173, con la selección de la frecuencia correspondiente al período fundamental.

En la figura anterior se aprecia la curva de la relación H/V para la estación G1173 y la selección de la frecuencia asociada al período fundamental (círculo amarillo), 1.48 Hz y el valor respectivo de la amplitud de la relación H/V (2.973). En muchos casos el determinar el pico que representa el período fundamental puede ser más complicado debido a que el mismo no se puede distinguir claramente en la curva como consecuencia de un bajo contraste de velocidad entre los sedimentos y la roca base (Konno y Ohmachi, 1998), y en otros casos la relación H/V puede mostrar más de un pico debido a configuraciones complejas de varias capas en el subsuelo (Bard, 1999).

4.4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

Ya finalizada la etapa de procesamiento y de control de los datos se elaboró un mapa de períodos fundamentales en un SIG empleando el programa Mapinfo Profesional. En la tabla 4.3 se observan los datos de las primeras 10 estaciones. En el apéndice B se encuentra la base de datos completa a partir de la cual se elaboraron los mapas.

Tabla 4.3. Resultados de las 10 primeras estaciones del análisis de ruido símico ambiental.

Estación	UTM_E	UTM_N	Frec. (Hz)	Período (s)	Amplitud de la rel. H/V	Nro. de ventanas	Selección	Filtro Pasa Banda
1001	766770	1158192	0.65	1.54	1.896	11	a	
1002	763986	1160916	3.198	0.31	2.482	9	m,a	
1003	764507	1160362	1.199	0.83	3.658	18	a	
1004	764206	1160526	1.149	0.87	2.124	8	m,a	
1005	763622	1160797	1.699	0.59	1.475	8	m,a	
1006	763941	1160384	1.549	0.65	1.914	16	a	
1007	764455	1159970	1.249	0.80	2.675	7		
1008	764026	1160161	1.449	0.69	3.085	9	3 + m	
1009	764086	1159618	1.199	0.83	5.205	7	5 + m	
1010	763446	1160074	1.599	0.63	1.258	12	a	

En la tabla 4.3 se observa el número de la estación, las coordenadas UTM, los valores de frecuencia y el período fundamental asociado, el valor de amplitud H/V, el número de ventanas empleadas para el cálculo de la relación H/V, el tipo de selección corresponde a automático (a) y/o manual (m) en el caso que se requería y el último campo corresponde al tipo de filtro aplicado en aquellos análisis donde fue necesario.

4.4.1 Mapa de períodos fundamentales

En la figura 4.8 se observa el mapa de períodos fundamentales de Guatire. El rango de variación de los períodos fundamentales para el área de Guatire es entre 0,1 a 2,2 segundos. En la zona central del mapa (pueblo de Guatire y Urbanización Castillejo) se concentran los valores de períodos fundamentales más altos, en el rango de 1,2 a 2,2 segundos. Estos valores se extienden hacia el este por la zona central, donde comienza la carretera vía Araira y hacia el oeste, entre los ríos Guatire y Guarenas. En el centro del pueblo de Guatire se alcanzan tres máximos con valores de 2 y 2,2 s., como también en el sector Castillejo con un período de 2 segundos. En el extremo oeste, desde el sector Los Naranjos (al norte) hasta la Urbanización Nueva Casarapa (al sur), los valores de períodos se encuentran en el rango de 0,6 a 0,9 s, de manera regular sin presentar cambios. Al norte se observan dos mínimos relativos con valores de 0,31 y 0,59 segundos. La transición entre los períodos altos en el centro del mapa y los períodos al oeste del mapa es gradual a la altura del sector El Ingenio con períodos en el rango de 0,9 a 1,2 segundos.

En la base del Cerro Colorado (sur de la ventana) se realizaron mediciones a lo largo de un camino de tierra que conduce por una serie de caseríos. En esta zona la señal obtenida fue de muy buena calidad y se hallan los valores mínimos dentro del rango de variación total; estos valores de períodos se encuentran en el intervalo de 0,1 s a 0,6 s, alcanzando en esta zona el valor mínimo absoluto (0,16 s.) y a su vez varios mínimos relativos (0,17 y 0,2 s.).

Valores de períodos por debajo de 0,9 segundos, se encuentran también en todo el norte del mapa de estudio, alcanzando varios mínimos relativos, así como en el área que conforma la Urbanización Las Rosas. La transición entre los valores de períodos mínimos al norte y los valores de períodos altos en el centro de la ventana de estudio es rápido, pasando de períodos en el rango de 0,6 a 0,9 s a valores en el intervalo de 1,2 a 1,8 s. En el extremo sureste del mapa también se observan valores mínimos (rango de 0,3 a 0,6 s) con un cambio gradual a valores de períodos más altos hacia el norte.

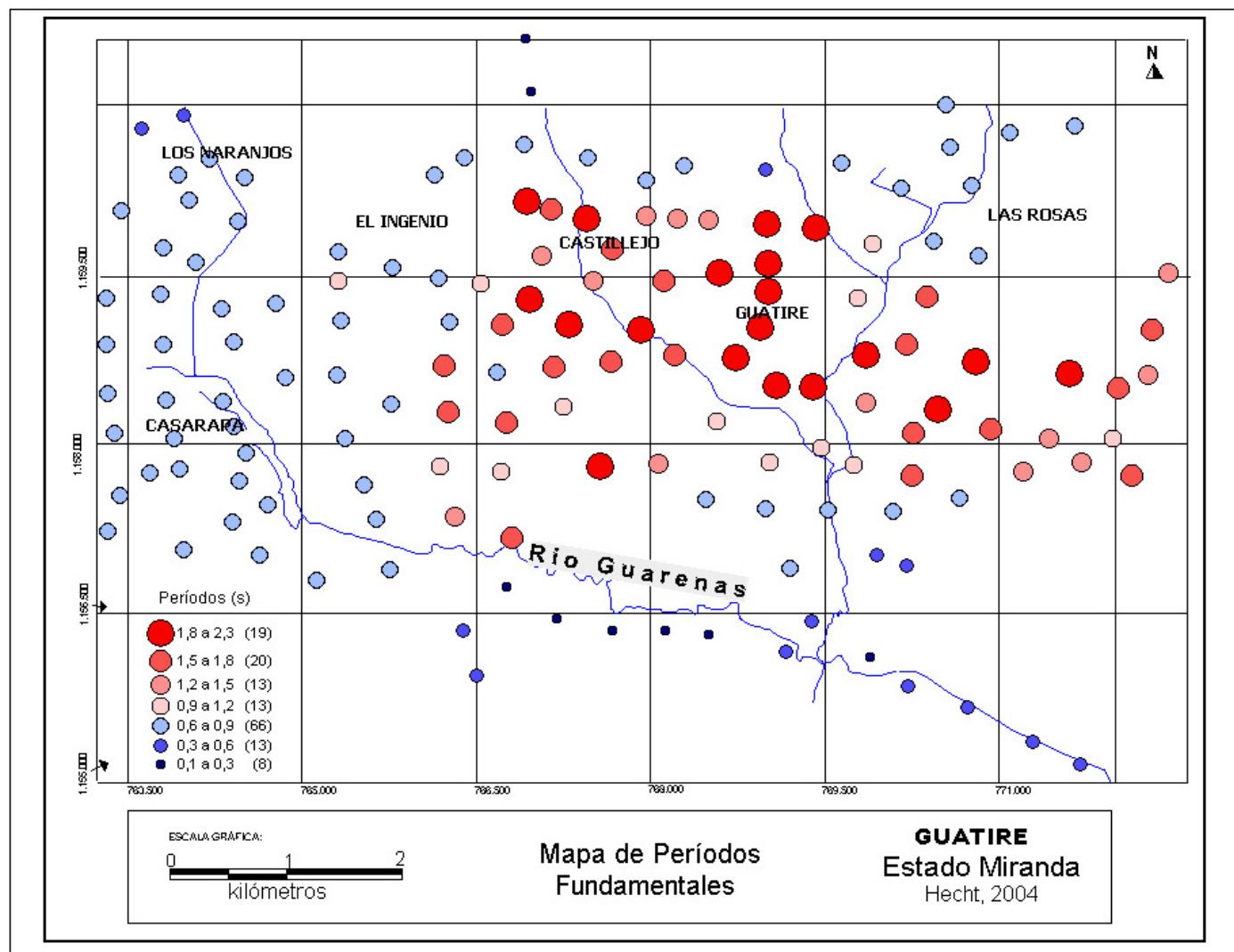


Figura 4.8. Mapa de períodos fundamentales para el municipio Zamora (Guatire), Estado Miranda.

4.4.2 Relación entre períodos fundamentales y espesores sedimentarios

Como se explicó en la base teórica del método se pueden relacionar los valores de períodos fundamentales con los espesores sedimentarios del área. En las zonas donde los valores de períodos son más altos se pueden asociar espesores de sedimentos mayores, y por analogía, en la zona donde los períodos son mínimos el espesor sedimentario es menor.

Entonces en el área central de la ventana de estudio, al sur del pueblo de Guatire, así como en la Urbanización Castillejo, se espera encontrar el mayor espesor sedimentario. Este espesor se extiende hacia el oeste hasta el área que se encuentra entre el sector El Ingenio, al norte, y el río Guarenas ubicado en el sur. Asimismo, hacia el este se mantiene el espesor en la ruta vía Araira. Los espesores sedimentarios disminuyen en el oeste a la altura de las Urbanizaciones Los Naranjos y Nueva Casarapa, donde comienza el valle de Guarenas, área en la cual se puede observar un acortamiento de la distancia que separa los dos sistemas montañosos que limitan la cuenca. Asimismo, hacia el sur disminuye considerablemente el espesor por la presencia de las unidades metamórficas del Grupo Caracas (Esquistos de Las Mercedes). En la zona noreste del mapa (norte de Guatire y la Urbanización Las Rosas) se observa una disminución fuerte del espesor de sedimentos, debido a que en esta zona comienza la faja piemontina del Macizo del Ávila.

Los valores de profundidad de basamento para esta área según un estudio gravimétrico desarrollado por Graterol (1970), indican una profundidad entre 150 y 200 metros en la zona central de la ventana de estudio, disminuyendo hacia el norte, donde tiene 50 metros y hacia el sur, donde llega hasta 100 metros de profundidad.

En el estudio de microzonificación para la ciudad de Caracas elaborado por Rocabado (2000), se determinó que los períodos entre 1,2 y 2,1 segundos están asociados a espesores de sedimentos mayores a 150 metros, el rango de períodos entre 0,7 y 1,2 a profundidades entre 70 y 150 metros y para profundidades menores a 50 o 70 metros corresponden períodos entre 0,2 y 0,7. Menciona que esta relación no

siempre es lineal. Estos valores están de acuerdo a los valores de períodos obtenidos en la región bajo estudio y los perfiles gravimétricos realizados por Graterol (1970).

Se mencionan los resultados obtenidos por Rocabado (2000) en el presente estudio debido a que las características de los suelos en ambos valles son parecidas, así como la fuente de los sedimentos (Macizo El Ávila), además, ambas cuencas están inmiscuidas en el mismo proceso geológico.

4.4.3 Análisis Estadístico de los datos

Como parte del control de los datos se presenta un análisis estadístico clásico con la finalidad de estudiar como es el comportamiento de los resultados obtenidos en el estudio.

Tabla 4.4. Tabla de parámetros estadísticos para los datos de período fundamental.

Media		1,0274
Mediana		,8340
Moda		,69
Desv. típ.		,5166
Varianza		,2669
Asimetría		,609
Error típ. de asimetría		,193
Curtosis		-,546
Error típ. de curtosis		,384
Mínimo		,17
Máximo		2,22

En la tabla 4.4 se presentan los estadísticos descriptivos calculados para los resultados de períodos fundamentales. Como se puede apreciar el valor promedio de los datos se encuentra en 1,02 s, mientras que la mediana o el percentil 50 es de 0,83, con una moda en 0,69 s. El valor obtenido para la desviación típica (0,52) indica una alta dispersión de los datos alrededor de la media debido a que desde el punto de vista probabilístico el 68 % de las mediciones se ubica en un intervalo comprendido entre 0,5 y 1,54 segundos, que adquieren mucha significancia en un estudio de ruido

sísmico ambiental. El valor de Curtosis (-0.546) para los datos nos indica que la distribución es cercana a la normal, si este valor fuese nulo, entonces la distribución sería normal, además el hecho de que este parámetro tenga un valor negativo indica que los datos se agrupan menos y las colas de la curva normal en el histograma de frecuencia son más cortas.

En el histograma de frecuencias (figura 4.9), se observa que un total de 76 estaciones (48 %) tienen valores de períodos en el rango de 0,5 y 0,9 segundos, mientras que las demás mediciones se distribuyen en las restantes clases del histograma de frecuencias. Otra cantidad de mediciones se ubica en el rango entre 1,5 y 1,7 segundos (13 %). La distribución de los datos es normal, con dos modas aparentes correspondientes a la concentración de los datos en los rangos mencionados anteriormente.

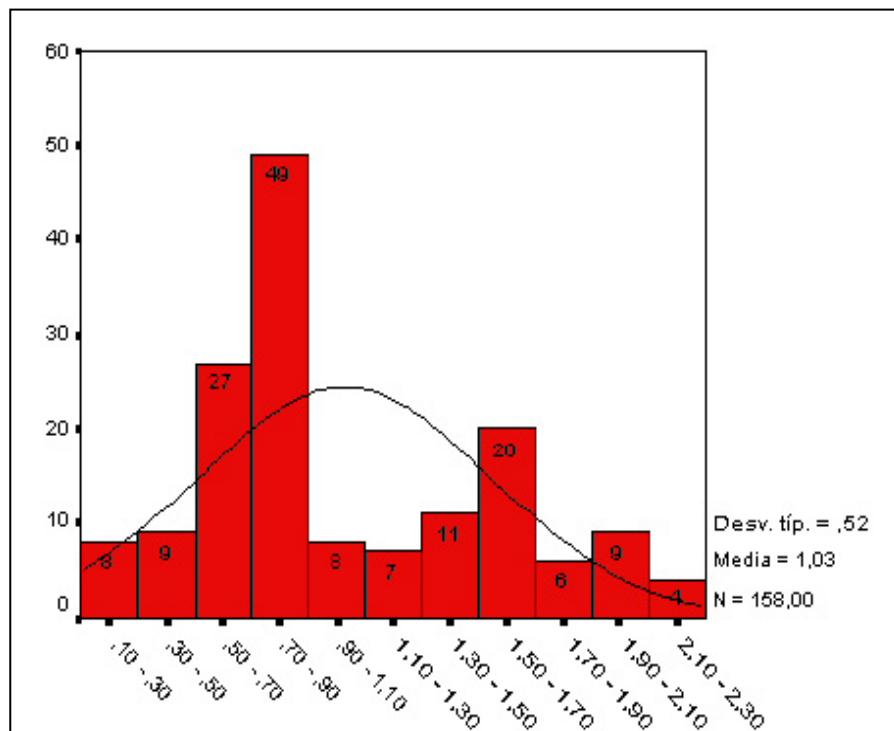


Figura 4.9. Histograma de frecuencia de los valores de períodos fundamental.

Los gráficos Q-Q son una herramienta de probabilidad que se emplea con la finalidad de determinar si la distribución de los datos coincide con una distribución teórica dada. Si la distribución de datos coincide con la distribución de prueba, los puntos correspondientes a los datos se aproximan a una línea recta. Estos gráficos fueron elaborados con el programa SPSS versión 10 y se emplearon dos tipos de distribuciones de prueba, una normal y la otra uniforme.

En la distribución normal (figura 4.10, izquierda) se puede observar que hay un ajuste regular entre los períodos medidos (puntos) y el valor esperado (recta). El mayor ajuste se obtiene a partir de los períodos mayores a 1,5 segundos. Para el rango entre 0,4 y 0,7 segundos aproximadamente, los valores medidos se aproximan a la recta de ajuste. Para el gráfico Q-Q correspondiente a la distribución de prueba uniforme (figura 4.10, derecha), los valores de períodos que van desde 0,2 a 0,7 segundos se ajustan mucho mejor, pero después de este valor se pierde en gran medida el ajuste.

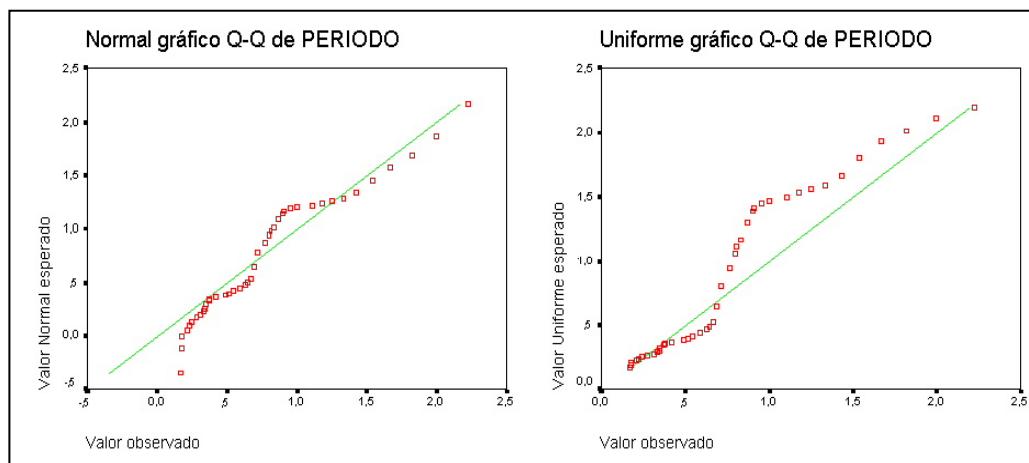


Figura 4.10. Gráficos de probabilidad Q-Q. Izquierda: distribución de prueba normal, derecha: distribución de prueba uniforme.

El diagrama de caja es un gráfico resumen que se basa en la mediana, los cuartiles y los valores extremos. La caja representa la amplitud intercuartil que contiene el 50% de los valores centrales. Los "bigotes" son las líneas que se extienden

desde la caja hasta los valores más altos y más bajos, excluyendo los valores atípicos. La línea que atraviesa la caja indica la situación de la mediana.

El diagrama de caja de los datos de períodos fundamentales (figura 4.11) muestra como el 50 % de los datos se concentran entre 0,7 a 1,5 segundos. La extensión del bigote superior indica que los datos se dispersan más hacia valores altos ($> 1,5$ s) que hacia valores mínimos.

En conclusión se puede inferir que la distribución de los períodos fundamentales en la ventana de estudio es normal, presentando una alta dispersión en los valores de períodos. Asumiendo que los valores de período fundamental están asociados a los espesores sedimentarios del área y a partir del análisis estadísticos de los datos se puede inferir que la alta dispersión en los valores de períodos, refleja una variación de espesor de sedimentos notable en el área, pudiendo este espesor variar notablemente según el punto en el cual se haya realizado la medición.

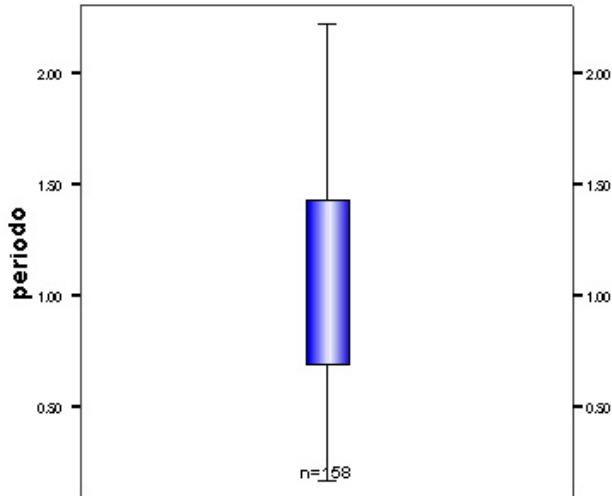


Figura 4.11. Diagrama de caja para los valores de período fundamental.

CAPÍTULO V

MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS

5.1 PRINCIPIOS DE LA GRAVIMETRÍA

La fuerza gravitacional se expresa por la *ley de Newton*: La fuerza entre dos partículas de masas m_1 y m_2 es directamente proporcional al producto de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre los centros de esas masas:

$$F_g = G \left(\frac{m_1 * m_2}{r^2} \right) \quad (\text{ec. 5.1})$$

donde F_g expresa la fuerza de atracción en dinas (newtons, N en unidades SI), y G es la constante gravitacional la cual tiene un valor medido de 6.672×10^{-8} en centímetros-gramos-segundos en unidades cgs ($6.672 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ en unidades SI).

La fuerza expresada por esta ecuación no puede ser determinada independientemente. Mejor dicho, la fuerza de atracción gravitacional está determinada por unidad de masa donde esta unidad de masa es una masa ficticia localizada en el punto de medición. Entonces, de acuerdo a la segunda ley de Newton:

$$F_g = m_1 \times a \quad (\text{ec. 5.2})$$

donde a es la aceleración de la masa m_1 , causada por la caída libre en el campo gravitacional de la masa M . Entonces la aceleración de la gravedad g es:

$$a = g = \frac{F_g}{m_1} = G \frac{M}{r^2} \quad (\text{ec. 5.3})$$

La unidad de la aceleración de la gravedad en el sistema cgs es cm/s^2 (m/s^2) la cual se ha definido para uso de exploración gravimétrica como Gal. En exploración

geofísica se trabaja sólo con cambios muy pequeños en la gravedad debidos a variaciones de densidad comparados a la aceleración de gravedad de la Tierra (~ 980 Gals o 9.8 m/s^2), por lo tanto, las unidades miliGal (mGal), microGal (μGal) o unidad de gravedad (g.u., por sus siglas en inglés) son normalmente usadas como unidades de magnitud de anomalías, donde:

$$1 \text{ mGal} = 0.001 \text{ Gal}$$

$$1 \mu\text{Gal} = 0.001 \text{ mGal}$$

$$1 \text{ g. u.} = 0.1 \text{ mGal}$$

5.2 GRAVEDAD DE LA TIERRA

5.2.1 General

La prospección de gravedad abarca el estudio del campo gravitacional terrestre, una materia de interés para los geodestas en función de determinar la forma de la Tierra. Como la Tierra no es perfectamente una esfera homogénea, la aceleración de gravedad no es constante sobre la superficie de la misma.

La magnitud de la gravedad depende de 5 factores: latitud, elevación, topografía de terrenos adyacentes, mareas terrestres, y variaciones de densidad en el subsuelo. La exploración gravimétrica estudia las anomalías debidas al último factor, y estas anomalías generalmente son mucho más pequeñas que los cambios debidos a la latitud y la elevación, aunque mayores que las debidas a las mareas o (usualmente) a los efectos topográficos (Telford et al., 1990).

5.2.2 El esferoide de referencia y el geoide

La forma de la Tierra, determinada por medidas geodésicas y rastreo satelital, es cercana al esferoide, abultada en el ecuador y achatada en los polos. El

achatamiento polar es $(R_{ec} - R_p)/R_{ec} = 1/298.25$, donde R_{ec} y R_p son los radios ecuatorial y polar, respectivamente.

El esferoide de referencia es un elipsoide que se aproxima en promedio al nivel del mar (geoide), con el material terrestre encima de este removido. En 1930 la Unión de Geodesia y Geofísica Internacional adoptó una fórmula para el valor teórico de la gravedad g_t , pero éste ha sido precedido por el Sistema de Referencia Geodésico 1967 (GRS67, por sus siglas en inglés):

$$G_t = 978031,846(1 + 0,005278895 \sin^2\phi + 0,000023462 \sin^4\phi) \text{ mgales} \quad (\text{ec.5.4})$$

donde ϕ es latitud.

El promedio de elevaciones continentales es 500 m, y las elevaciones de tierra máximas y las depresiones oceánicas están en el orden de 9.000 m referidas al nivel del mar. El nivel del mar es influenciado por estas variaciones y otros cambios laterales de densidad. Se define el nivel del mar (el equipotencial para la gravedad terrestre más los efectos de la fuerza centrífuga), llamado *geoide*, como el nivel del mar promedio sobre océanos y sobre la superficie de agua de mar que podría permanecer en canales si éstas estuvieran cortadas a través de masas de tierra.

La figura simplificada de la Tierra permite el incremento de la densidad con la profundidad, pero no variaciones laterales, las cuales son el objeto de la exploración gravimétrica. Debido a las variaciones laterales, el geoide y el esferoide de referencia no coinciden. Anomalías de masas locales modifican el geoide como se observa en la figura 5.1.a, se debe esperar que el geoide sea desviado hacia arriba bajo los continentes debido a la atracción del material sobre éste, y hacia abajo sobre las cuencas oceánicas debido a la baja densidad del agua (figura 5.1.b). Como sea, las desviaciones desde el esferoide no se correlacionan con los continentes y tampoco con las placas litosféricas, sugiriendo que las diferencias de densidad existen por debajo de la litósfera. La desviación entre estas dos superficies es cuando mucho 100 m.

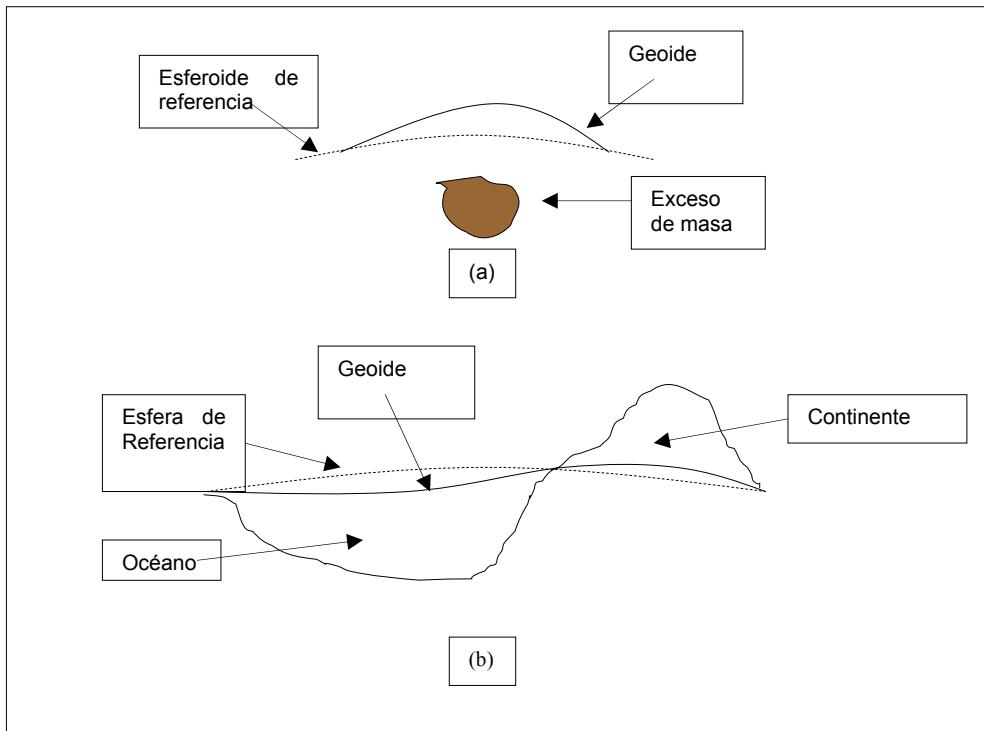


Figura. 5.1: Comparación del esferoide de referencia con el Geoide. (a) desviación del geoide por una masa local. (b) desviación a larga escala. Telford et al. (1990)

5.3 MÉTODO GRAVIMÉTRICO

5.3.1 Definición

El método gravimétrico hace uso del campo de potencial natural asociado a la gravedad, el cual se compone de los contribuyentes de las formaciones geológicas, que constituyen la corteza terrestre hasta cierta profundidad determinada por el alcance del método gravimétrico. Generalmente no se pueden distinguir las contribuciones a este campo provenientes de una formación o una estructura geológica de aquellas de las otras formaciones o estructuras geológicas por el método gravimétrico, sólo en casos especiales se puede lograr una separación de los efectos causados por una formación o estructura geológica individual (Telford et al., 1990).

La aplicación del método en campo se realiza mediante mediciones relativas. Los datos reducidos apropiadamente entregan las variaciones en la gravedad, que solo dependen de variaciones laterales en la densidad del material ubicado en la vecindad de la estación de observación.

Ya teniendo la información gravimétrica recolectada, el problema matemático de la interpretación gravimétrica consiste en encontrar una distribución de masas cuyo campo gravitacional se ha determinado sobre una superficie plana; por lo tanto, cada vez que se realiza una interpretación gravimétrica, lo que se busca es resolver el problema inverso de la teoría potencial del campo, o sea, determinar la fuente de su potencial. En definitiva, se busca encontrar una fuente cuyo tamaño y forma se ajusten a las observaciones.

5.3.2 Ajustes y correcciones

Para poder realizar una interpretación real de los datos gravimétricos, es necesario preparar los mismos mediante ajustes y correcciones, debido a que éstos se deben llevar a un nivel de referencia equipotencial, en este caso el geoide. Estos procesos son pasos matemáticos sencillos que hoy en día constituyen un proceso de rutina en los estudios gravimétricos.

5.3.2.1 Deriva instrumental: Es un ajuste que se realiza para compensar las variaciones en las lecturas debido a la deriva del instrumento, se considera como la desviación de las lecturas de un valor estándar o normal. Las mediciones se estandarizan con respecto a una sola lectura por circuito; en este caso se tomó la primera lectura de cada circuito.

$$\text{Der} = t_n (\text{lect}_f - \text{lect}_i) / t_{\text{total}} \quad (\text{ec. 5.5})$$

5.3.2.2 Corrección por latitud: la rotación de la Tierra y el ensachamiento de la misma en el ecuador producen un incremento de la gravedad con la latitud.

Mientras que en el ecuador la aceleración centrífuga es máxima, ésta disminuye hacia los polos, siendo cero en éstos, y por ser esta aceleración opuesta a la aceleración de gravedad, el comportamiento es inversamente proporcional. Para eliminar su efecto se debe tomar en cuenta la latitud del sitio donde se realizó la medición. En la ecuación para el cálculo de la gravedad teórica (ec. 5.4) se incluye esta corrección.

5.3.2.3 Corrección de altura: Como la gravedad varía inversamente con el cuadrado de la distancia, es necesario corregir los cambios de elevación entre las estaciones para reducir las mediciones a una superficie de referencia (geoide). Esta corrección no tomó en cuenta el material entre las estaciones, solamente toma la diferencia de alturas.

$$\text{Val} = 0,3086 * h \text{ mGal/m} \quad (\text{ec. 5.6})$$

5.3.2.4 Corrección por mareas: Los instrumentos para medir la gravedad son muy sensibles, tanto que pueden incluir en las mediciones las variaciones de la gravedad ocasionadas por el movimiento de la luna y el sol, estos cambios dependen de la ubicación y el tiempo. Esta corrección puede ser calculada por conocimiento de la ubicación del sol y la luna. Debido a que esta variación es leve y lenta, se incluye en la corrección de deriva. También se encuentran catálogos y listas, a manera de base de datos con las correcciones de marea para un determinado número de años.

La corrección para el efecto de mareas se puede calcular recurriendo a diversos algoritmos computacionales que calculan la variación de la gravedad por este efecto de manera específica para un lugar y fecha determinados.

5.3.2.5 Corrección de Bouguer: La corrección de Bouguer toma en cuenta la atracción ocasionada por el material que se encuentra entre las estaciones y el nivel de referencia, tomando en cuenta la densidad del material.

$$CB = 0,04192 h \rho \text{ mGal/m} \quad (\text{ec. 5.7})$$

con h en metros y ρ en gr/cm^3 .

5.3.2.6 Corrección topográfica: La corrección topográfica busca eliminar el efecto que causan las irregularidades del terreno en las cercanías de cada estación levantada, valles o colinas en los alrededores. Existen diversos métodos para calcular la corrección topográfica, estos se basan en el uso de retículas y usan un mapa base de la zona de estudio con intervalos de curvas menores a 10 metros. Actualmente existen paquetes computarizados que se encargan de realizar esta corrección, solo suministrándoles dos informaciones de entrada: el mapa topográfico digitalizado del área de estudio y una base de datos con la ubicación de las estaciones y la cota.

5.3.3 Anomalía de Bouguer

Se entiende por anomalía gravimétrica el cambio en la intensidad del campo gravitacional, en la componente vertical, causada por masas locales. Después que todas las correcciones han sido llevadas a cabo sobre las lecturas de campo, se puede obtener el valor de la anomalía de Bouguer para cada estación por la siguiente ecuación:

$$AB = G_{\text{obs}} - G_t + (Cm \pm Cal \pm CB + CT) \quad (\text{ec. 5.8})$$

donde Cm : corrección por mareas, Cal : corrección de aire libre, CB : corrección de Bouguer y CT : corrección topográfica.

5.3.4 Separación Regional – Residual

Las anomalías gravitacionales en un punto están constituidas por dos efectos de atracción ocasionados por distintas estructuras en el subsuelo. El primero de estos efectos es ocasionado por cuerpos de gran tamaño, llamado anomalía regional, mientras que el segundo se produce debido a cuerpos o estructuras menores. La suma de ambos efectos es la anomalía de Bouguer. Con la finalidad de analizar por separado ambos efectos, debido a que se obtiene información muy útil de cada uno, existen diversos métodos analíticos y gráficos.

5.3.5 Modelo Gravimétrico

Como se mencionó en la definición del método, el problema matemático de la interpretación gravimétrica, es un proceso inverso, o sea, a partir de la observación se busca determinar un modelo que se ajuste a estas observaciones. Para ello existen diversos programas computacionales, que cada vez son más versátiles, aplicando algoritmos internos más completos, que permiten construir modelos del subsuelo más ajustados a la geología del área.

Para construir un modelo que represente de la manera más real el subsuelo de la región investigada, es necesario poseer la mayor información geológica y geofísica disponible del área bajo estudio con el fin de evitar ambigüedad en los modelos planteados.

5.4 METODOLOGÍA DE LA ADQUISICIÓN

5.4.1 Preparación del equipo y ubicación de las estaciones

La adquisición de los datos gravimétricos se realizó entre los meses de mayo y julio de 2004. Se empleó un gravímetro digital, marca Scintrex, modelo CG-3. En total se levantaron 164 estaciones gravimétricas ordinarias y una estación base.

Previo a la fase de adquisición de los datos se realizó la preparación del gravímetro Scintrex CG-3. En primer lugar se determinó la deriva del equipo a fin de calcular la constante de deriva que se debe suministrar al programa interno del gravímetro. Para ello se dejó el equipo realizando mediciones en un mismo punto durante 36 horas; el equipo realizaba mediciones durante dos minutos (una por segundo) cada diez minutos y se almacenaban en la memoria del mismo, esto se hizo en la oficina del Departamento de Sismología de Funvisis. Luego se realizaron calibraciones para el ajuste de nivelación del equipo. Esto se llevó a cabo en una urbanización que se encuentra cerca de Guatire dentro de la ventana de estudio (Nueva Casarapa). En el apéndice C se encuentran una explicación de los ajustes realizados al equipo y la metodología.

Para tener un patrón inicial de los sitios en los cuales se levantarían las estaciones gravimétricas, se creó en un SIG un diseño teórico de la ubicación de las estaciones dentro de la ventana de estudio con un espaciamiento entre estaciones de 500 metros, como se muestra en la figura 5.2. Las estaciones fueron levantadas dependiendo de la disposición de autopistas, carreteras y caminos de tierra.

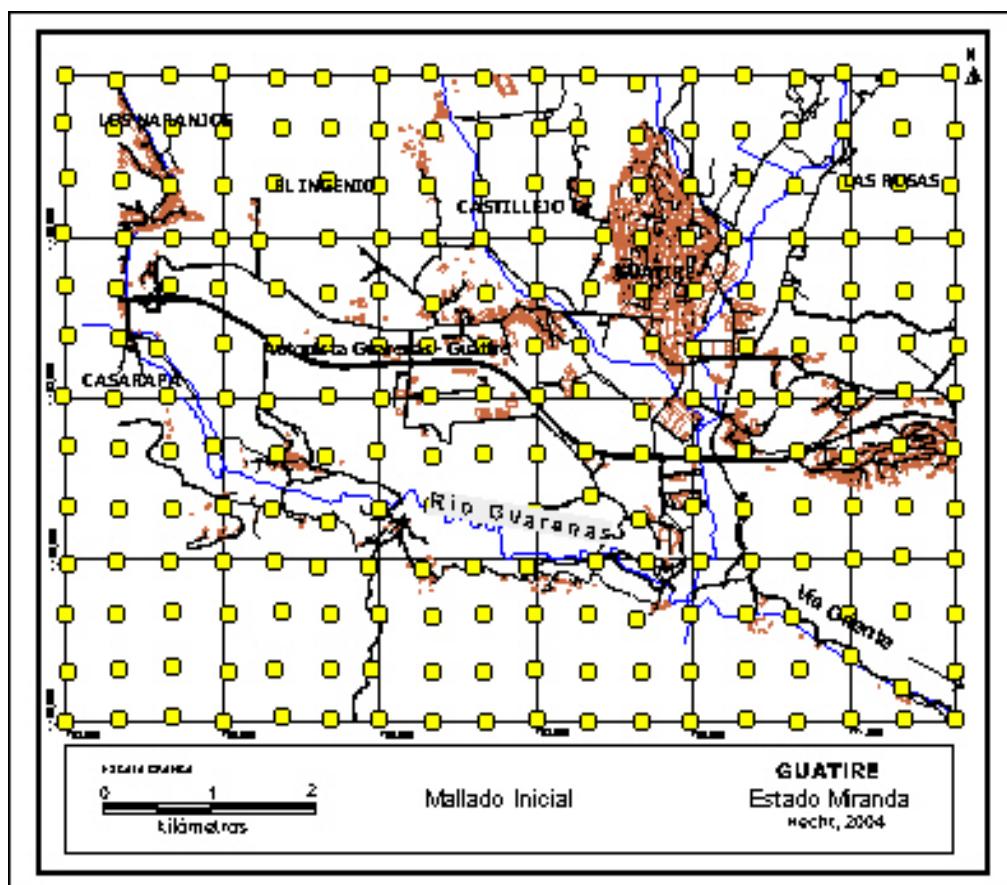


Figura 5.2. Mapa del área de estudio con el diseño de medición inicial. Cada círculo representa un punto planteado de medición.

Tabla 5.1. Equipos y parámetros.

Gravímetro	Scintrex
Modelo	CG-3
Rango de Medición	Hasta 7000 mGales
Resolución	0,0005 mGales
Lecturas por estación	60 lecturas por minuto promediadas
Vehículos	Toyota Macho, Chevrolet Swift
GPS	Garmin, Plus III (error ± 5 m)

5.4.2 Levantamiento de la estación base y estaciones ordinarias

Se estableció una estación base ubicada en el centro de la ventana de estudio (Figura 5.3) de manera que se tuviese rápido acceso a la vía principal en el área, en este caso la autopista intercomunal Guarenas-Guatire. Esta estación base (denominada Guatire) se "amarró" con la estación gravimétrica ubicada en la Villa Santa Inés en el sector Caño Amarillo de la ciudad de Caracas, la cual forma parte de la red nacional de estaciones gravimétricas, mediante la realización de tres circuitos entre ambas estaciones. En la tabla 5.2 se aprecia el valor obtenido para la estación base Guatire.

Tabla 5.2. Estaciones bases empleadas.

Base	Grav _{obs}	Cota	Descripción	UTM_E	UTM_N	Latitud	Longitud
Santa Ines	978065,867	929,75	Caño amarillo	727444	1162590	10,5102	-66,9219
Guatire	978108,52	327	Central Polimiranda	756053	1124758	10,46781	-66,5631

Las coordenadas geográficas de las estaciones se tomaron con un instrumento de posicionamiento global (GPS). En la figura 5.3 se puede observar la disposición final de las estaciones levantadas. Algunas mediciones fueron llevadas a cabo fuera de la ventana de estudio o en sus límites para reducir los efectos de borde.

La metodología del trabajo de campo para levantar las estaciones ordinarias consistió en la realización de circuitos con apertura y cierre en la estación base, en los cuales se obtenían mediciones gravimétricas según el diseño de adquisición inicial. La duración de los circuitos era de dos horas y media máximo y se realizaban cuantas mediciones eran posibles en este lapso de tiempo.

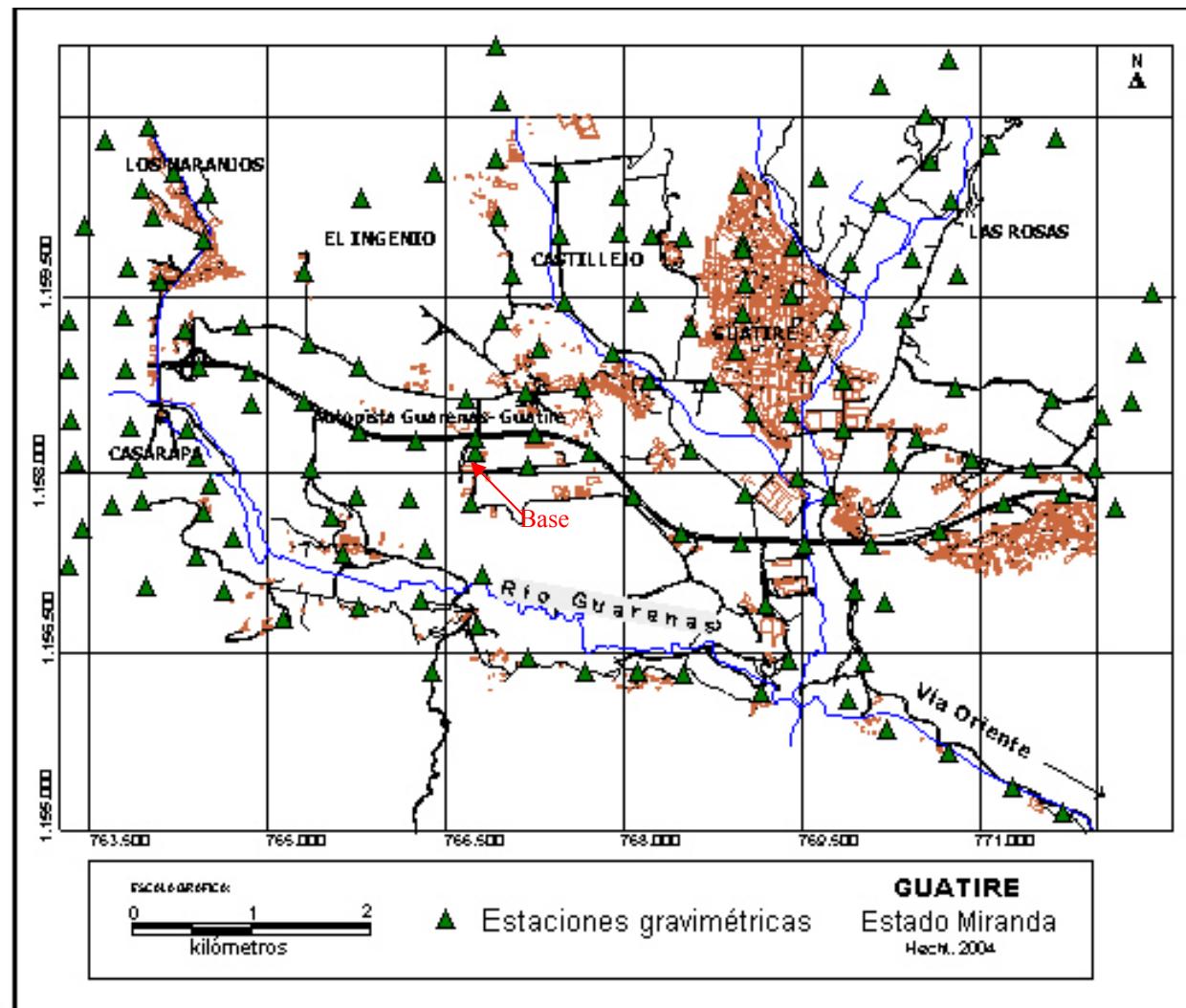


Figura 5.3. Ventana de estudio con las Estaciones gravimétricas ordinarias levantadas para este estudio y la ubicación de la estación base.

5.5 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS GRAVIMÉTRICOS

5.5.1 Descarga de los datos del gravímetro

Para descargar los datos del gravímetro, el equipo se conecta a un computador mediante un cable de interfase tipo puerto serial con un programa facilitado por el fabricante del equipo. Se descargan los datos del instrumento al computador personal, los mismos se guardan en un archivo con formato de texto (.txt).

5.5.2 Determinación de las cotas de las estaciones

Las cotas de las estaciones se tomaron a partir de los mapas obtenidos del Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB) en escala 1:5000.

5.5.3 Cálculo de la corrección topográfica

Para realizar la corrección topográfica se empleó un mapa digital del área de estudio obtenido del Instituto Geográfico de Venezuela Simón Bolívar, escala 1:25000 y un mapa digital obtenido del programa GMT (Generic Mapping Tools, ver. 3.3.2, programa GNU) en escala 1:100000. La extensión total del área seleccionada para la corrección fue de 22 km a partir del área de estudio en las direcciones norte, sur, este y oeste. Las curvas de nivel de los mapas se transformaron en puntos con el programa Vertical Mapper. Con el programa Terrain de Geosoft Inc. V 4.00.03, se realizó la corrección topográfica empleando para ello los mapas mencionados anteriormente junto con el archivo de las estaciones gravimétricas. Finalmente este programa realiza el cálculo de la corrección según las rutinas internas del equipo y lo anexa en la base de datos que posee la información de las estaciones como columna adicional.

5.5.4 Cálculo de la Anomalía de Bouguer

Para el cálculo de la anomalía de Bouguer se empleó un archivo realizado en Excel (Microsoft, Office 2000) que posee distintas hojas de cálculo con varios módulos desarrollados en Visual Basic (Sánchez, J., comunicación personal). En este archivo se realizaron las correcciones de deriva, latitud, altitud y mareas. La corrección de mareas se basa en las ecuaciones de Longman (1959).

La determinación de la gravedad observada y el cálculo de la anomalía de aire libre y la anomalía de Bouguer se realizaron en este mismo archivo. Esta base de datos conforma además una lista de información gravimétrica en expansión a medida que se desarrollan trabajos de investigación gravimétrica por parte de Funvisis en Venezuela. La densidad empleada para la corrección de los datos fue 2,5 grs/cc, la misma utilizada por Graterol (1970), quien la determinó aplicando el método de Nettleton. Como nivel de referencia se tomó el nivel medio del mar (0 metros), debido a la regularidad en las alturas de las estaciones.

Tabla 5.3. Campos de la primera hoja de cálculo empleada en el procesamiento de los datos gravimétricos.

Círculo Fecha	Estación	Altura	Gravedad (mg)	Tiempo (hh:mm:ss)	Tiempo Transcurrido (mm)	Corrección por Marea (mg)	Lectura Corregida Marea (mg)	Deriva (mg)	Lectura corregida por Deriva (mg)	Gravedad amarrada
------------------	----------	--------	------------------	----------------------	--------------------------------	---------------------------------	---------------------------------------	----------------	---	----------------------

En la tabla 5.3 se pueden observar los campos referentes a los cálculos necesarios para obtener la gravedad observada de cada estación. En ésta se realizan dos correcciones: por mareas y por deriva. La deriva se calcula de la forma en que fue descrita en el marco teórico de este capítulo.

Tabla 5.4. Campos de la segunda hoja de cálculo empleada en el procesamiento de los datos gravimétricos.

Estación	UTM_E	UTM_N	longitud	latitud	SD	Altura	Gravedad (mg)	G teo WGS-84	Aal (mg)	CT	AB (mg)
----------	-------	-------	----------	---------	----	--------	---------------	--------------	----------	----	---------

En la tabla 5.4 se observan los campos de la hoja de cálculo en la cual se obtienen los resultados para la anomalía de aire libre, la anomalía de Bouguer y se

encuentra el campo necesario para introducir los valores de corrección topográfica. Los ocho primeros campos de esta hoja de cálculo se completan con la información proveniente de la hoja de cálculo mostrada en la tabla 5.2. En el apéndice C (Tabla C.1) se encuentran los valores de anomalías de Bouguer para cada estación.

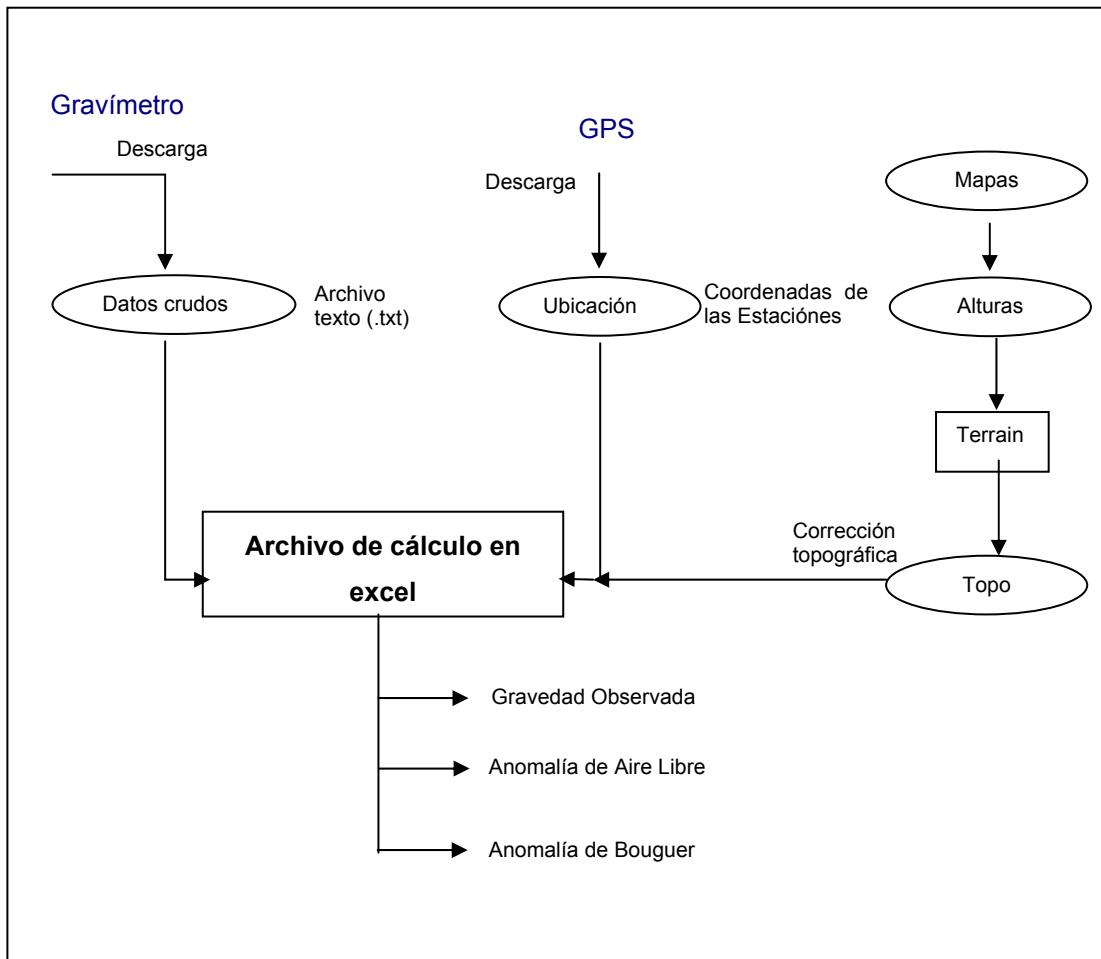


Figura 5.4. Esquema de procesamiento de los datos gravimétricos.

5.5.5 Elaboración de los mapas de anomalía de Bouguer

Para la elaboración del mapa de anomalía de Bouguer se empleó el programa Vertical Mapper y el programa Surfer. Con el programa Surfer 8.0 desarrollado por Golden Software (2002), se realizó la separación regional-residual, según la regresión

polinomial; con ésta se obtuvieron los mapas de anomalía de Bouguer regional y residual para el área.

Para la creación del mapa de anomalías de Bouguer se empleó el método de “natural neighbour”, o vecino natural. Este método es una técnica de estimación geométrica que emplea las regiones vecinas generadas para cada punto en un grupo de datos (Figura 5.5).

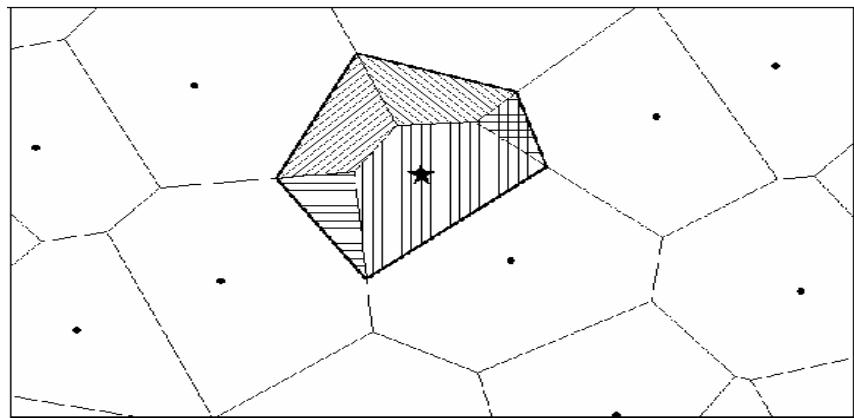


Figura 5.5. Ejemplo del método de interpolación Natural Neighbour empleado para la elaboración del mapa de anomalías de Bouquer.

5.5.6 Modelos gravimétricos 2D (perfils) y modelo 3D

Los modelos gravimétricos se elaboraron a partir del mapa de anomalía de Bouguer residual con la finalidad de modelar la cuenca separando el efecto regional. En total se definieron 7 perfils con orientación norte-sur para poder elaborar el modelo 3D. Para la construcción de los modelos se empleó el programa IGMAS que debe su nombre a las iniciales de: Sistema de Aplicación Interactivo Gravimétrico y Magnético desarrollado por los Doctores H. Götze y S. Schmidt de la Universidad Libre de Berlín, Alemania. Se emplearon los valores de anomalías residuales del polinomio de primer grado debido a que éstos representan de manera más ajustada la forma de la cuenca.

Las densidades empleadas en el estudio se ajustaron a partir de: un estudio previo existente en el área (Graterol, 1970), del estudio gravimétrico llevado a cabo en la ciudad de Caracas por Sánchez (2001) y por las densidades obtenidas a partir de la relación densidad-velocidades sísmicas, obtenidas en el capítulo 3 de la presente investigación.

Tabla 5 .5. Densidades empleadas en los modelos. * calculadas por el método de Nettleton.

Formación	Autor	Sánchez (2001)	Graterol (1970)*	Relación vel-dens.	Usada
Aluviones		1,8	-	1,6-1,7	1,6
Guatire (QG1, QG2)		-	1,9	1,8-1,9	1,8-1,9
Esquistos de Las Mercedes (CaM)		2,6	2,8	2,2	2,8

5.5.5.1 Sistema interactivo gravimétrico y magnético IGMAS.

El sistema computarizado IGMAS es una aplicación gráfica interactiva para la interpretación de campos potenciales (gravimétrico y magnético) mediante la simulación numérica de promedios (Götze, 1978; Götze, 1984; Götze y Lahmeyer, 1988), desarrollado en Fortran y que trabaja bajo ambiente LINUX. Este sistema de modelado combina información a partir de varios métodos geocientíficos con la incorporación de funciones de los Sistemas de Información Geográfico SIG. Un artículo completo acerca del principio de funcionamiento del programa así como de su empleo se encuentra en “Physics and Chemistry of the Earth”, Götze y Schmidt, 1998.

El método en que se basa el modelado con este sistema consiste en pruebas de ensayo y error, y una intensa interacción entre el usuario y el sistema requiere numerosas funciones. El algoritmo empleado para el cálculo de los campos potenciales se basa en triangulación de poliedros (Götze, 1978).

5.5.5.2 Manejo del programa IGMAS e ingreso de los datos

El ingreso de los datos se realiza mediante tres archivos:

- Estaciones.sta: este archivo posee la ubicación de las estaciones en coordenadas UTM y el valor de la anomalía gravimétrica.
- Modelo.mod: este archivo posee el modelo inicial a partir del cual se realizará el ajuste entre la anomalía calculada por el programa y la anomalía medida.
- Configuración.cfg: constituye el archivo principal del trabajo a realizarse. Este archivo ejecuta los dos anteriores y posee la información acerca de que cálculos realizará el sistema.

En el apéndice C se encuentran un ejemplo del archivo con el modelo.

El modelo inicial a ser introducido en el programa debe ser lo más sencillo posible para poder comenzar un trabajo interactivo eficiente con el programa. El mismo debe ser elaborado a partir de la información de geología de superficie y cualquier otra información que pueda resultar útil para la elaboración del modelo más realista posible, como: información de pozos, columnas estratigráficas y modelos previos.

Este modelo consiste en diversos perfiles 2D que se definen al principio de la interpretación, paralelos entre si y que cubran el área de mayor interés a partir de las estructuras presentes en el substituto y la información geológica (figura 5.6). La integración de estos perfiles permitirá entonces la elaboración del modelo 3D el cual puede ser visualizado por otro módulo llamado IVIS3D (Klesper et al., 1997).

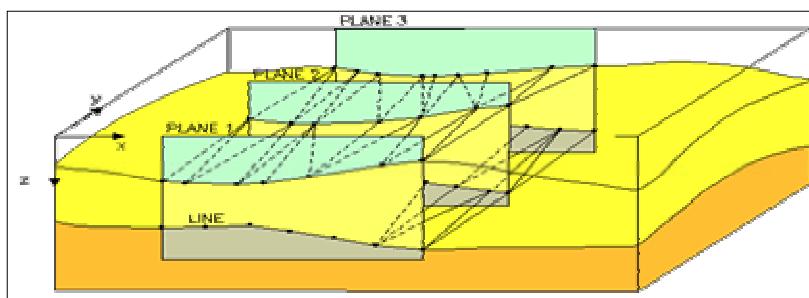


Figura 5.6. Definición de los planos 2D de ingreso en el programa IGMAS. Götze y Lahmeyer, 1988.

5.6 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.6.1 Mapa de anomalías de Bouguer

El mapa de anomalías de Bouguer se elaboró con el programa Vertical Mapper y el método de graficación empleado fue el de “Natural Neighbors”. A partir del mapa (figura 5.7) se puede determinar que el rango de variación de las anomalías de Bouguer se encuentra entre 15 miligales y 29 miligales. La tendencia general de las líneas isoanómala de Bouguer es este – oeste. También se aprecia que los valores por debajo de 19 miligales predominan en el área central y el extremo sureste de la ventana de estudio.

En la zona central se observan los valores mínimos (zona en azul oscuro) prologándose al este y oeste con forma de elipse, dentro de esta elipse se alcanza el mínimo absoluto del área (15,4 mGals) y varios mínimos relativos. En el norte y parte del este (Las Rosas, Castillejo y Los Naranjos) de la ventana de estudio, las anomalías alcanzan los valores más altos (de 22 a 28 mGal) con una tendencia este – oeste.

El mayor gradiente en las anomalías de Bouguer es 5 mGal/km aproximadamente, en dirección norte-sur, tomado desde el pueblo de Guatire hacia el extremo norte del mapa. Este gradiente se observa constante a lo largo del norte de la ventana de estudio, mientras que para el sur no se observa un gradiente en los valores de anomalías. Por otra parte, se observa un aumento de la anomalía hasta 20 mGals (cierres amarillos al este), entre dos mínimos con valores alrededor de 16 mGals.

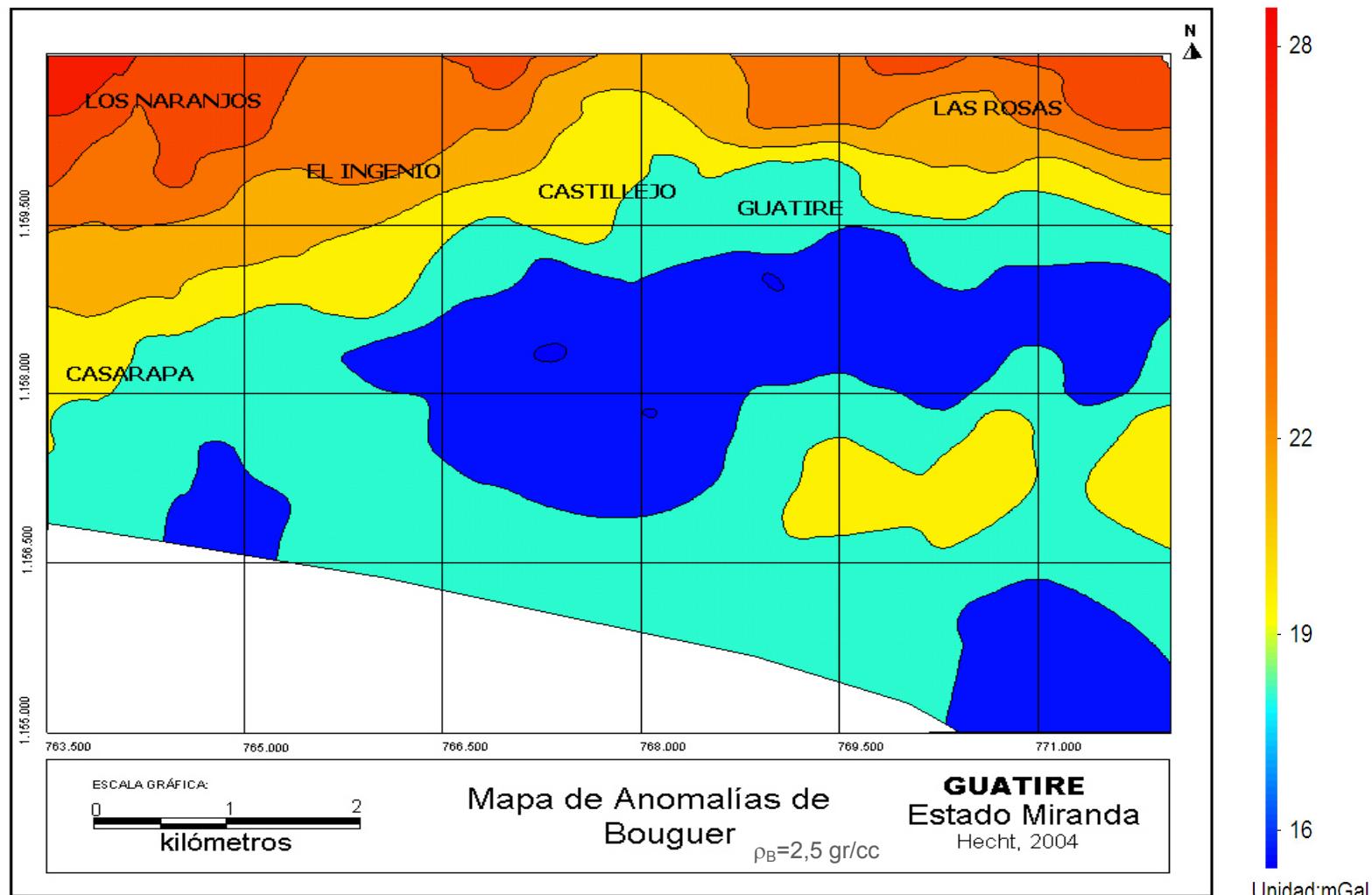


Figura 5.7. Mapa de anomalías de Bouguer de Guatire.

Los valores mínimos en el área se interpretan como la zona con mayor profundidad del cuerpo más denso, o el mayor espesor de sedimentos en el área. Por ello se puede inferir que la zona donde se encuentran las curvas de isoanomalías con valores mínimos (cierre de color azul en la parte central) indican el área en la cual el basamento es más profundo. Al norte esta profundidad disminuye evidenciado en el gradiente observado y el aumento en los valores de anomalías de Bouguer, mientras que hacia el sur, a lo largo del río Guarenas, la profundidad del basamento disminuye con un gradiente más bajo, pero la información gravimétrica en esta zona no es suficiente.

El comportamiento regular de valores por debajo de 19 miligales en el centro de la ventana corresponde a la mayor profundidad de la cuenca.

El alto gradiente presente en el norte (5 mGals/km) y los valores de anomalías (22 a 28 mGals) obtenidos en esta área, son ocasionados por la disminución del espesor de sedimentos en esta dirección.

El mapa de anomalías de Bouguer muestra las mismas tendencias de las curvas isoanómala obtenidas por Graterol (1970). Asimismo, el área con los valores mínimos coincide para ambos estudios, así como el aumento hacia el norte con un alto gradiente de las anomalías. Ambos mapas presentan las mismas características cualitativas.

5.6.2 Separación Regional – Residual

El mapa de anomalía regional (figura 5.8), se construyó con el método de regresión polinomial y se ajustó con un polinomio de primer grado. Se empleó el método de “kriging” para realizar la interpolación de los datos en la elaboración del mapa. Se elaboraron los mapas de anomalías regionales y residuales para los polinomios de primero a quinto grado. Finalmente se seleccionaron los mapas de anomalías regionales y residuales del polinomio de primer grado debido a que por un análisis cualitativo de los mapas generados para los distintos grados polinómicos, se

determinó que estos representaban con mayor ajuste las anomalías gravimétricas del área.

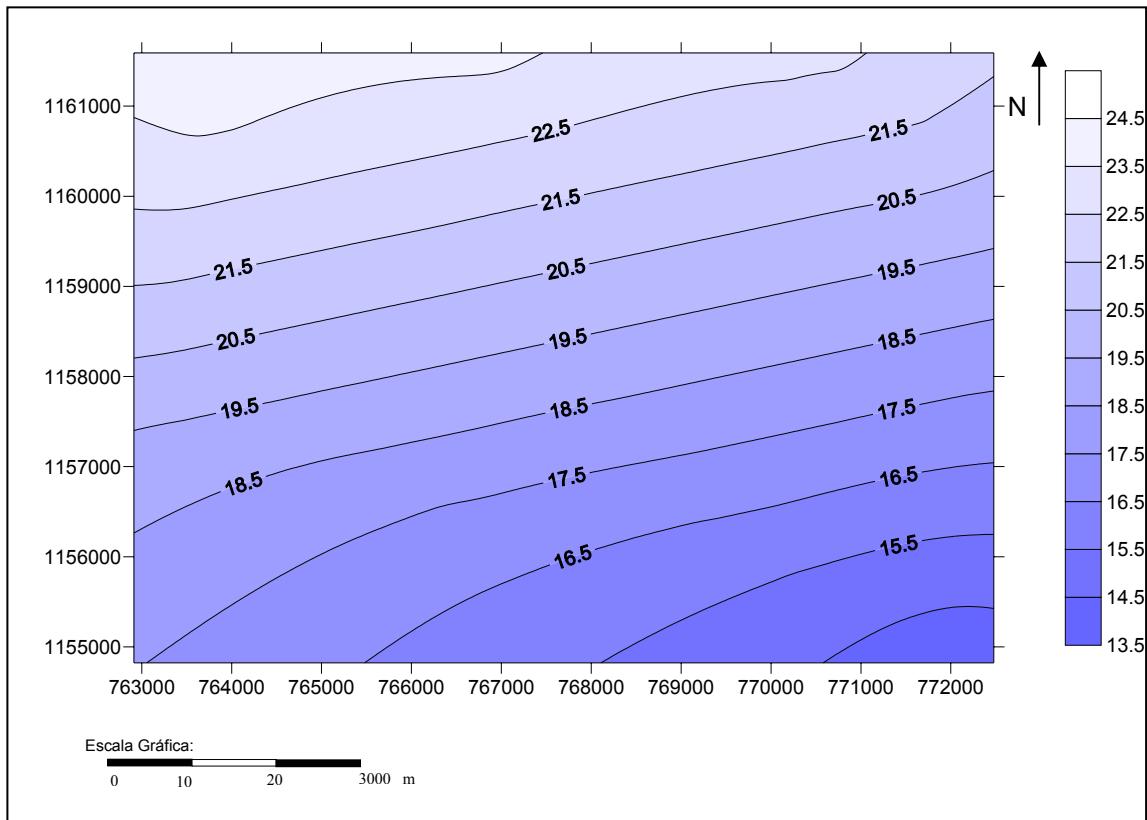


Figura 5.8. Mapa de anomalía regional, calculado con el polinomio de primer grado. Intervalo entre curvas 1 mGal.

La tendencia de las isoanomalías regionales es N80E con un valor mínimo en el sur de 14,5 miligales y un máximo al norte de 23,5 miligales. El gradiente es constante en el área con valor de 5 mGal/km. Las curvas isoanómicas indican que el buzamiento del basamento es hacia el sur, o sea, el basamento profundiza en la dirección norte-sur, así como el espesor de sedimentos.

El mapa de anomalías residuales (figura 5.9) muestra una zona anómala en la parte central con un valor mínimo de -3,5 miligales causado por el espesor de los sedimentos pertenecientes a la Formación Guatire (QG2). Este espesor se extiende hacia el este y oeste, y disminuye en las direcciones norte y sur. Los cierres presentes al sur y el cambio en la dirección de las curvas son debido a la falta de información

gravimétrica en esta zona. Por otra parte el gradiente presente al norte donde se alcanzan un valor de hasta 3,5 miligales y las tendencias este-oeste de las curvas de isoanomalías, son causados por la disminución de profundidad de las rocas metamórficas de los Esquistos de las Mercedes.

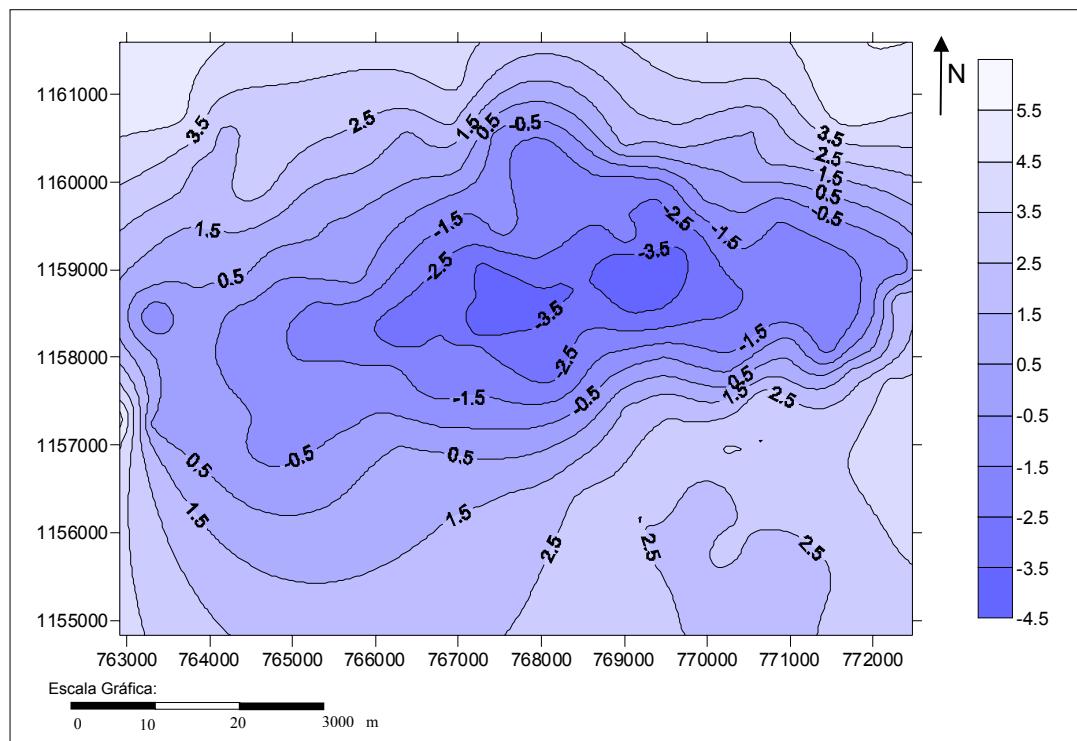


Figura 5.9. Mapa de anomalía residual, calculado con el polinomio de primer grado. Intervalo entre curvas 1 mGal.

Este mapa muestra la forma de la cuenca de Guatire compuesta principalmente por sedimentos poco compactados. La misma abarca un área aproximada de 6 km de largo por 3 km de ancho y se ubica en la parte área central de la ventana de estudio con un alineamiento este-oeste.

La regularidad en el comportamiento de las curvas isoanómicas, así como la ausencia de cierres característicos, permiten inferir que no hay estructuras geológicas locales en el área sino que lo que causa mayor efecto en el área es el contraste de densidades entre los Esquistos de las Mercedes y la Formación Guatire.

5.6.3 Análisis estadístico de los datos

Con la finalidad de cuantificar los datos se realiza un análisis estadístico clásico de los datos, empleando pruebas de normalidad como: valores de tendencia central, diagramas de caja, histogramas de frecuencia y gráficos Q-Q. Para esto se emplea el programa SPSS 10.0 de SPSS Inc. (1999).

En la tabla 5.6 se muestran los valores estadísticos de tendencia central para los datos de anomalías de Bouguer.

Tabla 5.6. Valores estadísticos de tendencia central para los datos de anomalías de Bouguer.

Media	19.73492
Mediana	18.80019
Desv. típ.	3.05125
Varianza	9.31014
Asimetría	1.034
Error típ. de asimetría	.197
Curtosis	.341
Error típ. de curtosis	.391
Mínimo	15.424
Máximo	28.596

La tendencia central de los datos se encuentra en 19,73 miligales, con una mediana en 18,8 miligales. Los valores más repetidos en el rango de variaciones de las anomalías de Bouguer corresponden a valores mínimos en el rango de 18 y 19 miligales, mientras que la desviación típica es de 3,05 mGal. El alto valor de la varianza (9,31) indica una alta dispersión de los datos con respecto a su media. El valor de Curtosis (0,341) obtenido para el conjunto de datos indica una distribución con tendencia normal y con una concentración de los datos alrededor de un rango específico de anomalías. Este rango se determinó entre el mínimo absoluto 15,45

mGal, y 21 mGal. El valor obtenido de asimetría (1,034) indica que la cola derecha en el histograma de frecuencia es más larga y existe un sesgamiento a la derecha.

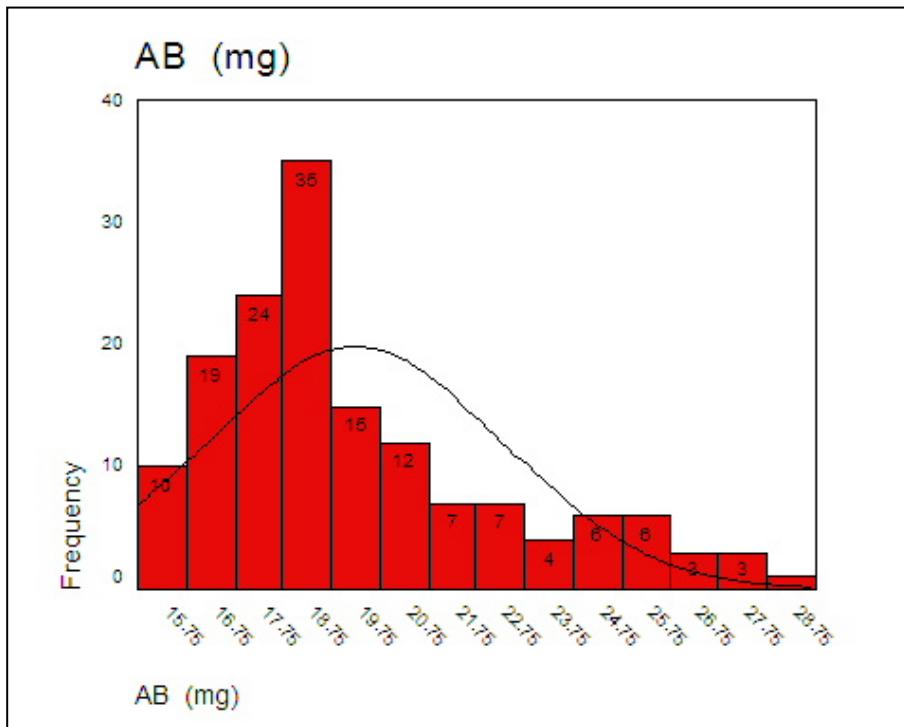


Figura 5.10. Histograma de frecuencia de los datos de anomalías de Bouguer.

Observando el histograma de frecuencia se deduce que la distribución es bimodal. Una moda se encuentra en el rango de 18 mGals y 19 mGals, y otra moda entre los valores de anomalía 24 y 26 mGals. Los resultados mayores a 21 miligales afectan notablemente los cálculos de tendencia central tales como: la media y la varianza debido a que un alto porcentaje de mediciones se encuentra cerca de un valor central que debe ser mayor a la media. En efecto 52 % de los resultados de anomalías de Bouguer de las estaciones levantadas se encuentran en el rango 15 a 21 miligales, o sea una mitad de los datos se encuentra en este rango de variación mientras que la otra mitad se distribuye en valores de anomalías que van desde los 21 a 29 miligales.

Por otra parte el análisis del gráfico probabilístico Q-Q de distribución normal indica un buen ajuste de los datos en el rango de 16 a 22 miligales, para los demás rangos las mediciones se desvían ligeramente del resultado esperado.

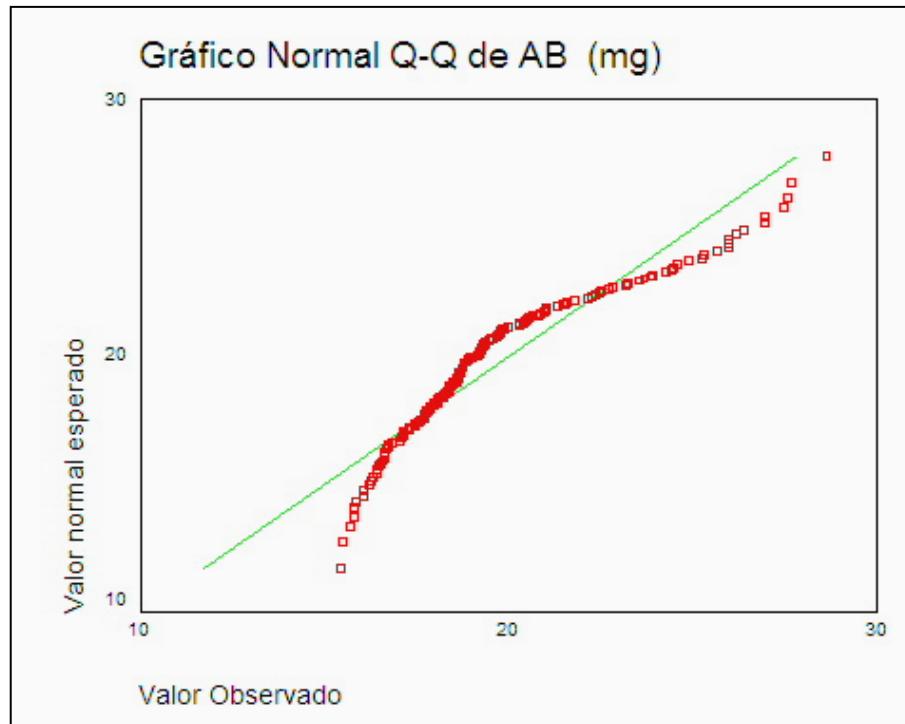


Figura 5.11. Gráfico Q-Q normal de los valores de anomalías de Bouguer

El diagrama de caja también muestra que la concentración de los valores de anomalías de Bouguer se encuentra en los valores mínimos obtenidos en el estudio. Esta herramienta indica que el rango en el cual se encuentra el mayor número de mediciones se ubica entre 17 y 22 miligales.

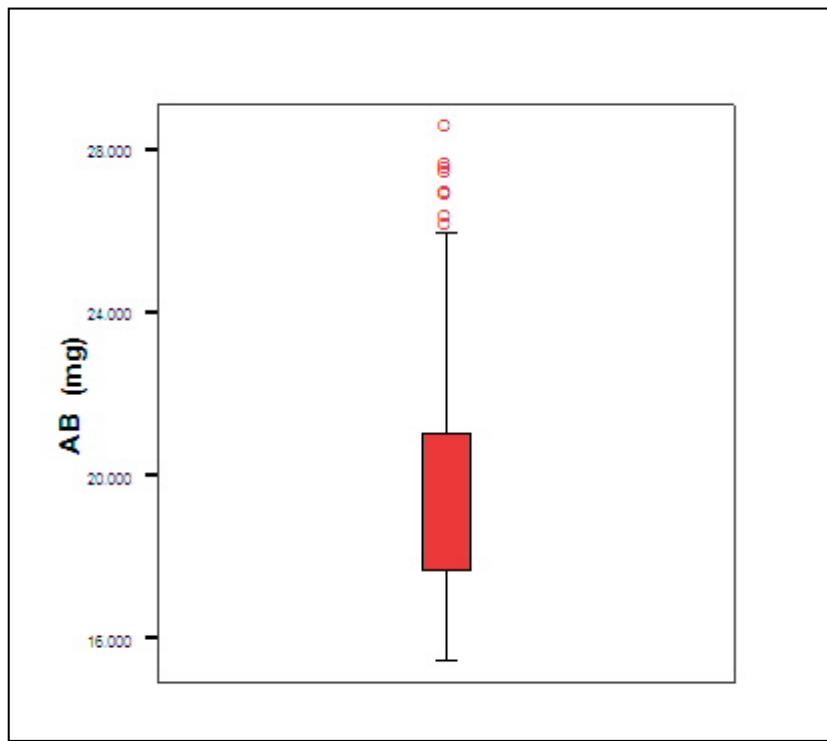


Figura 5.12. Diagrama de caja de los datos de anomalías de Bouguer.

En conclusión los tres métodos gráficos empleados en el análisis estadístico indican que la distribución de los datos tiene tendencia a un comportamiento normal con una dispersión de los datos hacia valores altos. Se pueden distinguir dos rangos de variación de los resultados. El primero de estos rangos se ubica entre 21 miligales hasta el valor mínimo absoluto del área ($15,45$ mGal), teniendo este intervalo un rango de 5,6 miligales. El segundo intervalo (21 a 29 mGal) con un rango de 8 miligales, concentra la otra mitad de los datos distribuidos uniformemente dentro de este rango.

5.8 MODELADO GRAVIMÉTRICO

El modelo gravimétrico se elaboró a partir de los datos de anomalías residuales del polinomio de primer grado.

Las densidades empleadas para las formaciones geológicas presentes en el modelo fueron tomadas del trabajo realizado por Graterol (1970) y comparadas con las densidades obtenidas en la relación velocidad-densidad a partir de la investigación sísmica de la presente investigación y las densidades empleadas por Sánchez (2001) para la ciudad de Caracas. La geología superficial fue tomada del Atlas Geológico de la Cordillera de la Costa (un mapa completo se puede observar en la figura 2.10 del capítulo 2). La profundidad asignadas a las estructuras someras presentes en el área (aluviones), fue restringida por los espesores obtenidos de los modelos sísmicos 2D.

En la figura 5.13 se presentan los mapas de anomalía residual de Bouguer medido y modelado, generados con el programa IGMAS. El mapa modelado se ajusta a medida que se elaboran los perfiles gravimétricos con el programa (modelos 2D). Por medio de ambos mapas se establece un control entre el modelo y la información medida. Durante el desarrollo interactivo de los perfiles con el programa, el mapa modelado debe ajustarse cada vez mejor al mapa medido.

En el mapa modelado (figura 5.13, derecha) se aprecia el área para la cual se obtienen los valores mínimos de anomalías en azul, correspondientes a la zona donde se espera el mayor espesor de sedimentos, mientras que para el norte del mapa aumentan los valores debido a la presencia del Macizo del Ávila (Esquitos de las Mercedes). Este mismo aumento en los valores de anomalías se observa hacia el sur debido a la presencia del Cerro Colorado.

Por limitación del programa con respecto a la ubicación de los perfiles, el norte del área de estudio se encuentra hacia la derecha de la imagen.

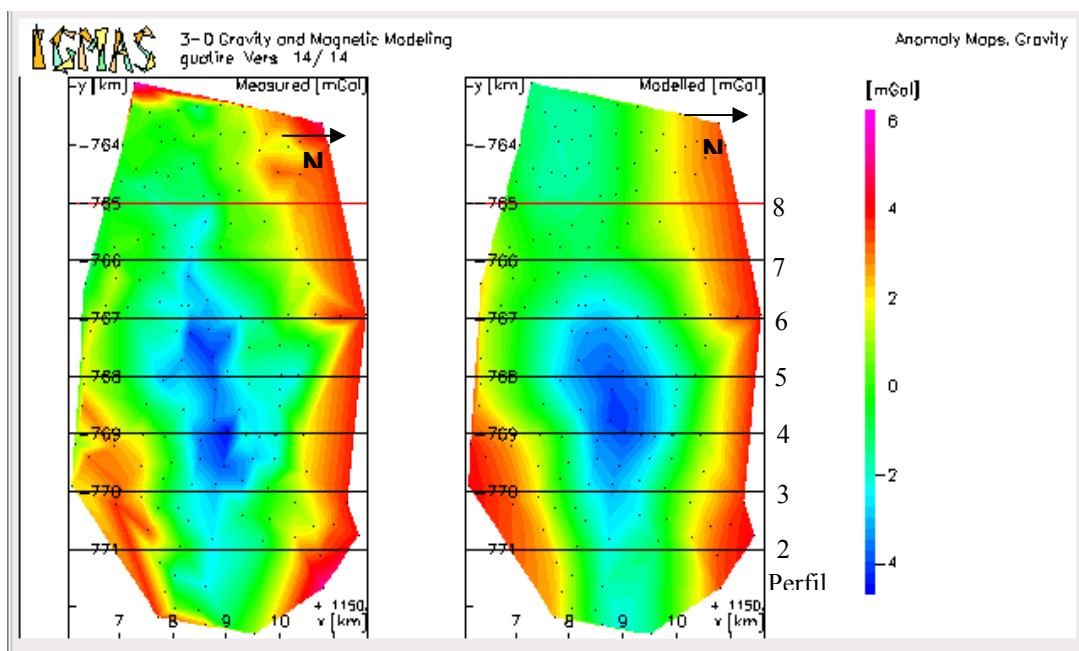


Figura 5.13. Mapas de anomalías de Bouguer residuales. Izquierda: datos medidos, derecha: mapa modelado. Las líneas representan los perfiles propuestos.

5.8.1 Modelos 2D

Para elaborar el modelo 3D con el programa IGMAS es necesario definir una serie de planos verticales, los cuales independientemente constituyen modelos 2D del área. Después de realizar el mejor ajuste posible entre las curvas de anomalías medidas y calculadas de cada modelo 2D, se obtiene una estructura del subsuelo completa que permite trazar perfiles en direcciones aleatorias dependiendo del área de mayor interés dentro de la ventana de estudio. En total se definieron 7 perfiles, también llamados planos verticales para este “software” interactivo, con orientación norte-sur, paralelos entre si y con una separación de 1 km. En la figura 5.13 se pueden observar los 7 perfiles definidos para elaborar el modelo 3D.

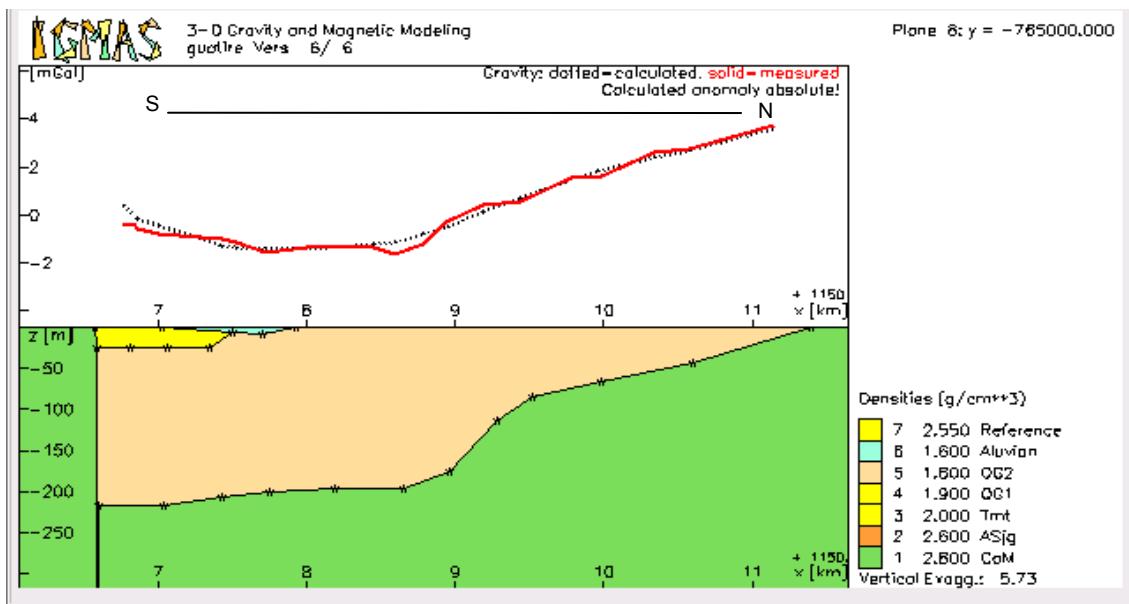


Figura 5.14. Perfil 8, dirección norte-sur, coordenada UTM E-O = 765000 m.

En la figura 5.14 se observa el perfil 8, con orientación N-S, definido en la coordenada UTM E-O = 765000 m. Este perfil se encuentra al este de la urbanización Nueva Casarapa y del sector Los Naranjos (oeste de la ventana de estudio). Como se puede apreciar en el perfil 8, la Formación Guatire con sedimentos no cementados (QG2) constituye la mayor parte de la cuenca. Infrayacente a ésta formación, se encuentran los Esquitos de las Mercedes, limitándola al norte y al sur. Suprayacente a la Formación Guatire en el sur, aflora una acumulación de aluviones, asociados al cauce del río Guarenas y en contacto lateral a estos aluviones aflora la secuencia correspondiente a la Formación Guatire de sedimentos clásticos cementados (QG1).

Hacia el norte la cuenca presenta una disminución de la profundidad uniforme hasta alcanzar el inicio de la faja piemontina del Macizo del Ávila donde finaliza la cuenca y el espesor de los sedimentos de la Formación Guatire es cero. Por el contrario hacia el sur el espesor de los sedimentos se conserva. El buzamiento de la cuenca es hacia el sur alcanzando profundidades un poco mayores a los 200 metros.

El modelado de la falla presente al sur se realiza a partir de la información geológica del área (mapa geológico) y, debido a que existen evidencias de que esta

falla llega hasta la superficie en la zona (Urbani, comunicación personal). No se obtuvo mayor información gravimétrica en esta región debido a que no se pudieron levantar estaciones gravimétricas suficientes por la falta de acceso en la zona.

Esta falla puede constituir una falla conjugada a la falla del Ávila que realiza el ajuste de la cuenca de Guarenas-Guatire entre los dos sistemas montañosos en la cual se encuentra enclavada. Wherman (1972) menciona la presencia de fallas con orientación este-oeste y buzamiento principalmente vertical entre ambos sistemas montañosos, como consecuencia del emplazamiento de las napas que conforman el norte de Venezuela.

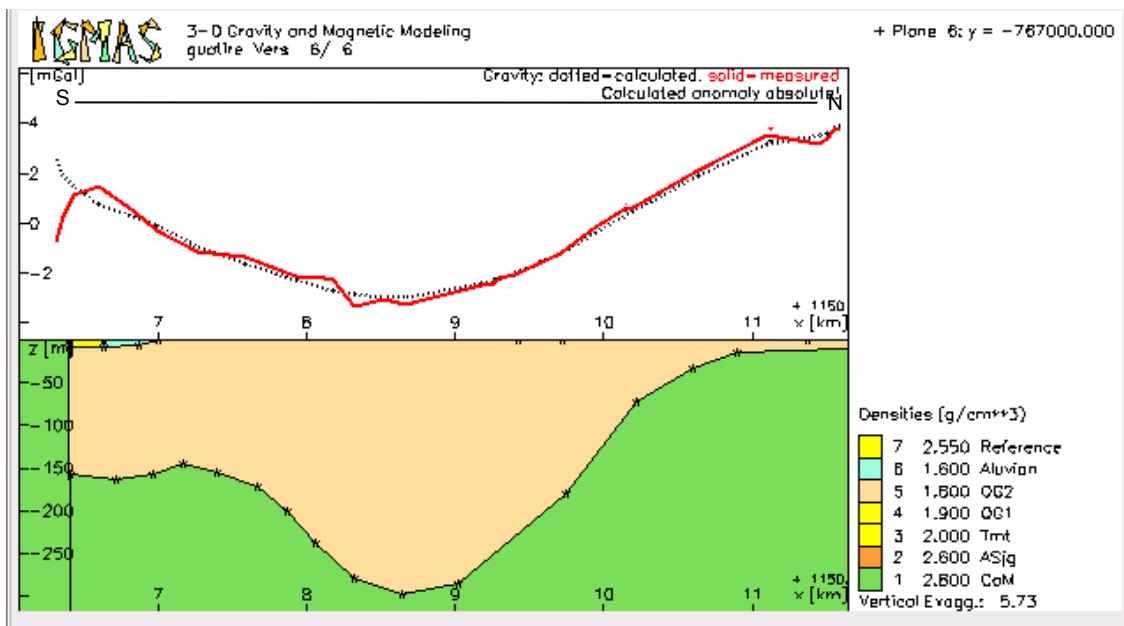


Figura 5.15. Perfil 6, dirección norte-sur, coordenada UTM E-O = 767000 m.

En la figura 5.15 se observa el perfil correspondiente al plano vertical número 6 (UTM E-O = 767000 m). Este perfil se encuentra en el centro de la zona de estudio. La profundidad de la cuenca aumenta hacia el centro de la misma alcanzando aproximadamente los 300 metros. Hacia el norte la disminución de la profundidad es más fuerte que en el perfil anterior (la pendiente es mucho más pronunciada). El espesor de la Formación Guatire de sedimentos cementados (CG1) y de los aluviones

diminuye a sólo unos pocos metros (máximo 10 metros en esta área). La falta de ajuste entre la curva calculada y la medida al sur del perfil se debe a los efectos de borde en esta zona, causado por la falta de estaciones en el área.

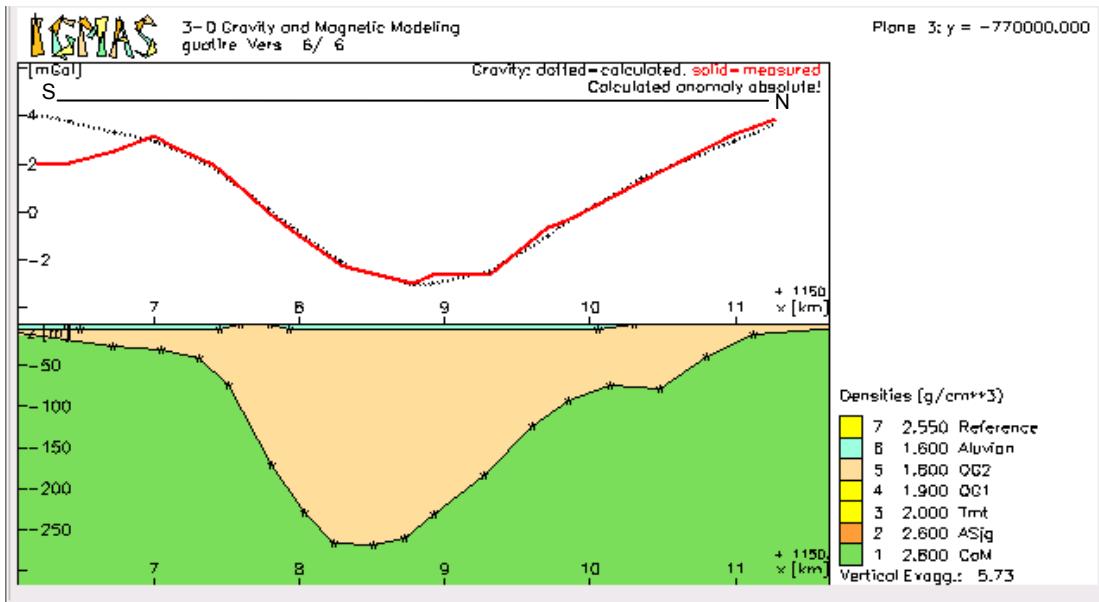


Figura 5.16. Perfil 3, dirección norte-sur, coordenada UTM E-O = 770000 m.

En la figura 5.16 se observa el plano vertical número 3 (UTM E-O 770000 m). En este perfil se puede apreciar que la cuenca profundiza hasta los 270 metros presentando disminuciones rápidas de la profundidad tanto al norte como al sur. Se observan también grandes extensiones aluvionales con espesores no mayores a los 10 metros. La falta de ajuste en el extremo sur entre la curva medida y la modelada, se debe al efecto de borde que comienza a aparecer hacia el sureste de la ventana de estudio por falta de estaciones gravimétricas en esta zona.

En la figura 5.17 se observa el plano definido en extremo este de la ventana de estudio (UTM E-O = 771000). En este punto la cuenca alcanza un máximo de 370 metros de profundidad, mostrando cierta simetría con respecto al eje de la cuenca. Sólo se observan dos formaciones, Guatire (QG2) y los Esquistos de las Mercedes (CaM) infrayacente a la anterior.

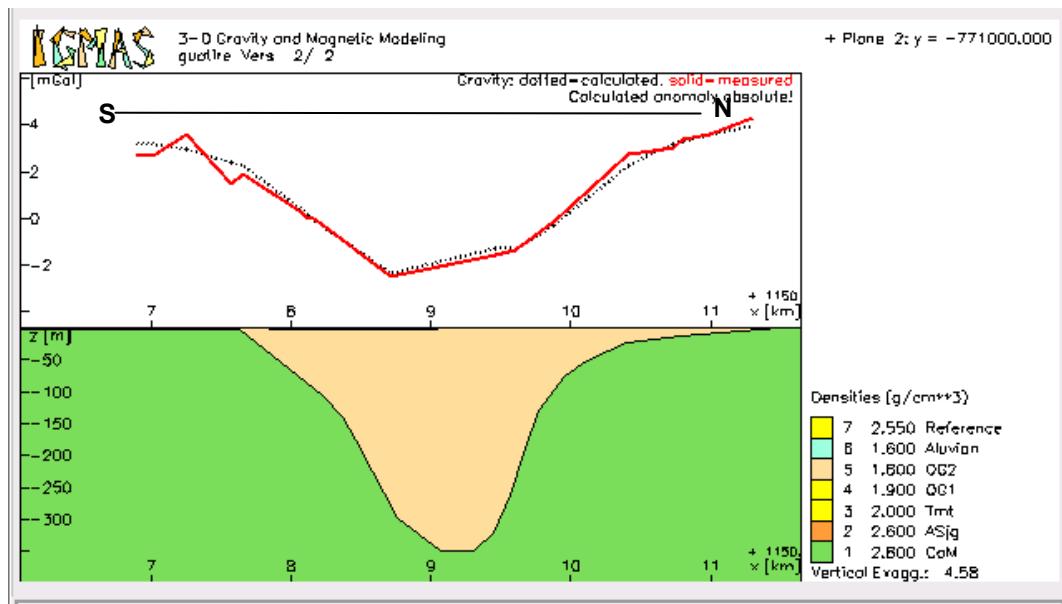


Figura 5.17. Perfil 2, dirección norte-sur, coordenada UTM E-O = 771000 m.

La figura 5.18 presenta diversos perfiles realizados interactivamente con el programa IGMAS, la versatilidad del programa permite realizar perfiles en la zona y dirección de mayor interés. Los tres perfiles presentados tiene rumbos aproximados a los trazados por Graterol (1970) en su estudio, mostrados en los capítulos 1 y 2 de este trabajo.

Los perfiles 2 y 3 (medio e inferior) muestran profundidades similares a las obtenidas por Graterol (1970), alcanzando 270 metros. El perfil superior por su parte presenta la mayor profundidad alcanzada por la cuenca según el modelo, aproximadamente 370 metros. Este último valor de profundidad es similar al mencionado por Bermúdez (1966), quien le asigna un espesor de 366 metros a la cuenca de Guatire.

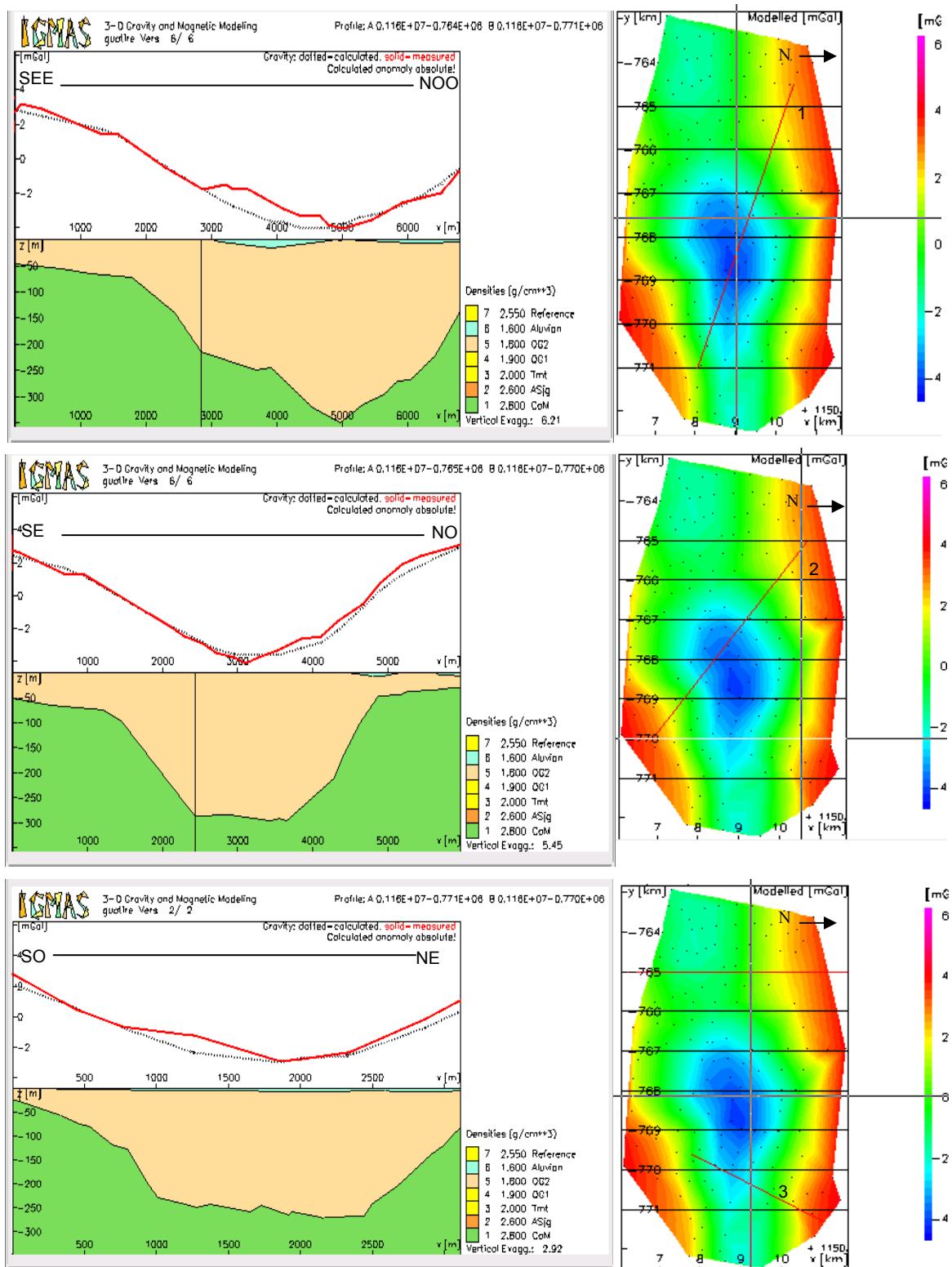


Figura 5.18. Diversos perfiles elaborados interactivamente con el programa IIGMAS. Izquierda: perfil, derecha: ubicación del perfil en el mapa de anomalía residual.

Otra de las ventajas del programa IGMAS es que permite realizar secciones horizontales del modelo seleccionadas por el usuario según la profundidad de interés. En la figura 5.19 se presenta una secuencia de secciones horizontales elaboradas cada 50 metros de profundidad del modelo elaborado para la cuenca de Guatire.

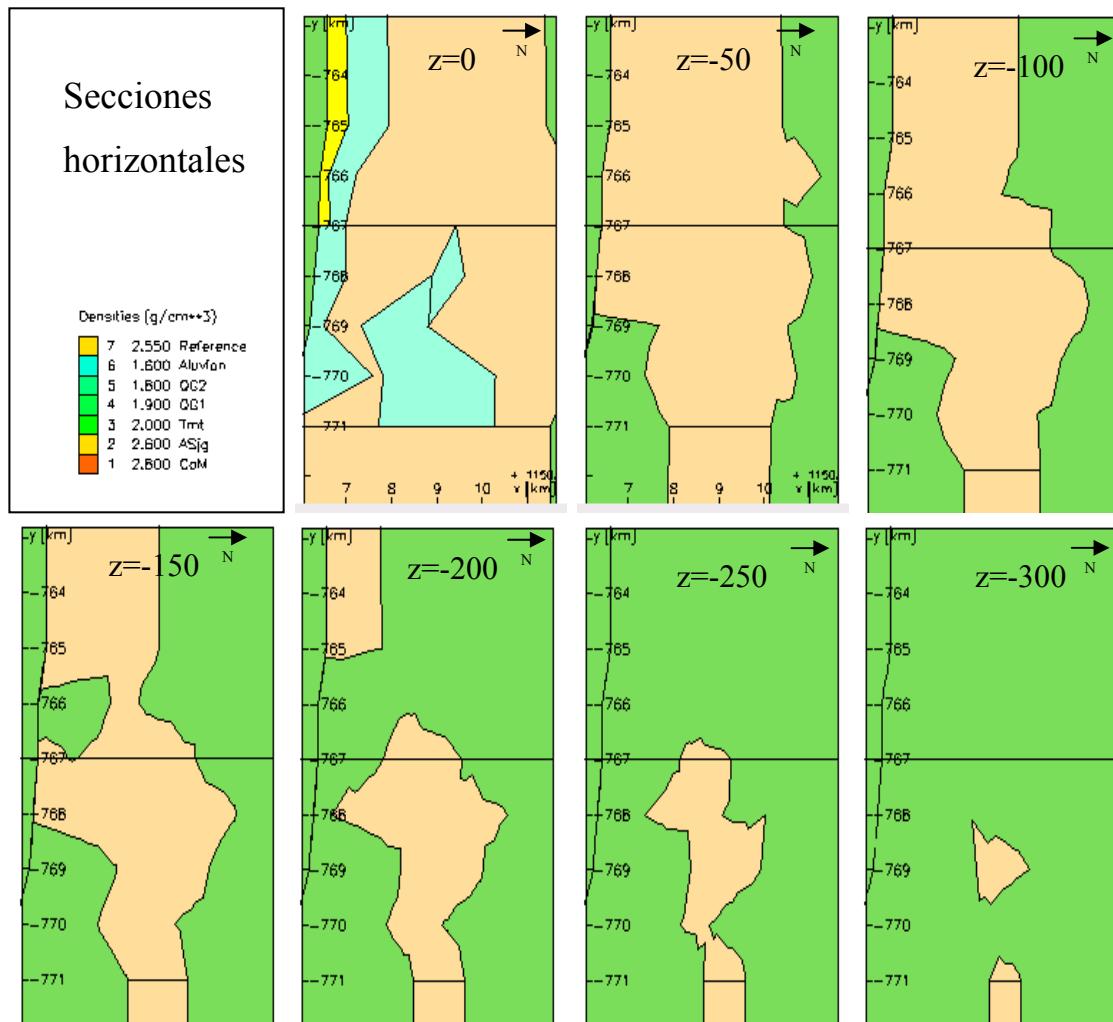


Figura 5.19. Secciones horizontales generadas con el programa IGMAS cada 50 metros de profundidad.

En la secuencia se puede observar la forma de la cuenca a medida que aumenta la profundidad. El área verde representa geológicamente la Formación Guatire de sedimentos clásticos no cementados, geología predominante. Hasta los primeros 100 metros la forma es rectangular y abarca casi toda la ventana de estudio.

Después de los 100 metros se comienza a empequeñecer, para los 200 metros de profundidad la cuenca se conserva en el área central de la ventana de estudio extendiéndose hacia el este. A la altura de Nueva Casarapa (suroeste de la ventana de estudio) se observa un remanente de la cuenca con una profundidad aproximada de 220 metros. A 300 metros de profundidad se observan el alcance de la cuenca más profundo que alcanzan hasta 370 metros. Obsérvese la presencia de la falla al sur del área de estudio.

5.8.3. Mapas Isópacos

Los mapas isópacos muestran la profundidad en el subsuelo de una determinada formación dentro de la ventana de estudio. Para el presente estudio se presentan los mapas isópacos de los Aluviones (Qal), la Formación Guatire no cementada (QG2) y los Esquistos de las Mercedes (CaM) por ser las de mayor importancia en el área.

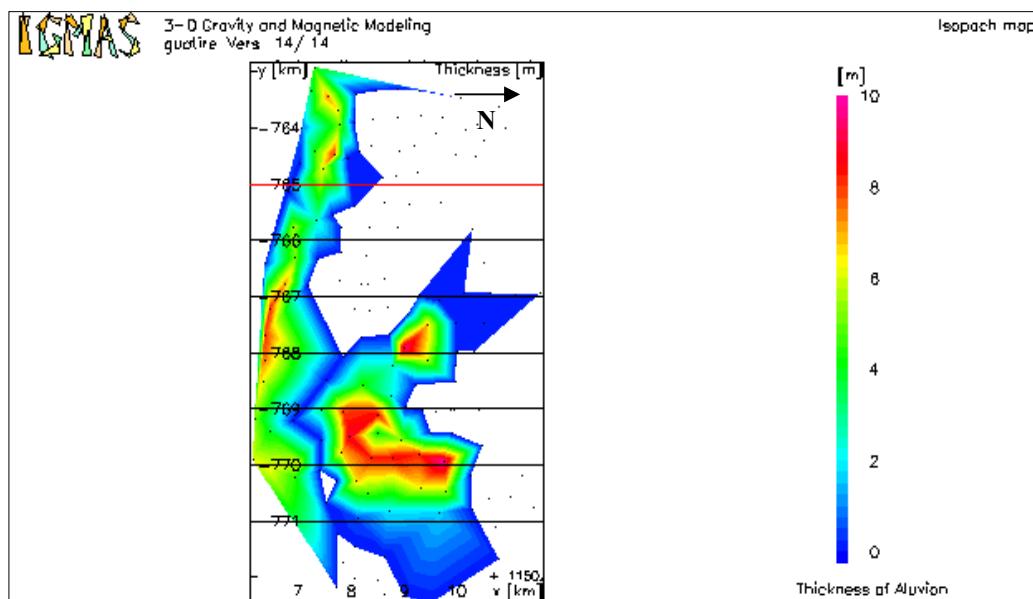


Figura 5.20. Mapa de espesores de la formación Aluviones (Qal)

La unidad geológica correspondiente a los aluviones se concentra alrededor de los ríos principales del área (Guarenas, Guatire y Pacairigua). El espesor a lo largo del río Guarenas (todo el sur de la ventana de estudio) es aproximadamente de 4 a 6 metros. El mayor espesor de los aluviones se encuentra al sur y al este del pueblo de Guatire alcanzando espesores superiores a los 8 metros.

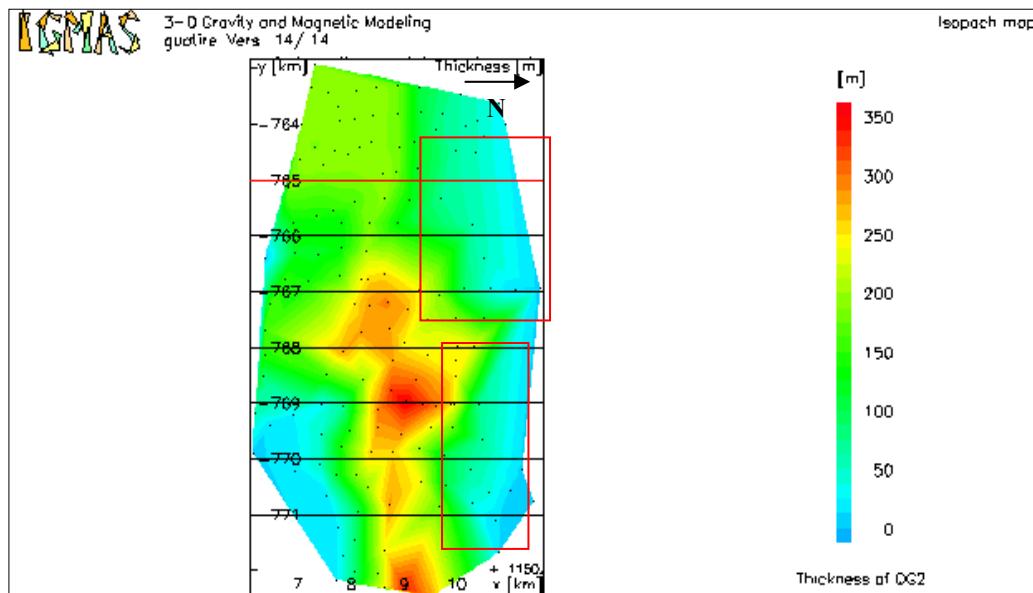


Figura 5.21. Mapa de espesores de la Formación Guatire no cementado (QG2).

En la figura 5.21 se observa el mapa de espesores de la Formación Guatire (QG2). Se puede apreciar la orientación de la cuenca según el espesor de esta formación. La cuenca se extiende de este a oeste a lo largo de la zona central del área de estudio, esta zona corresponde al área que va desde el sur del pueblo de Guatire hasta la Urbanización o Hacienda Nueva Casarapa, siguiendo aproximadamente el curso de la autopista intercomunal de Guarenas – Guatire. El mayor espesor se alcanza al sur y al sureste del pueblo de Guatire con un rango de profundidad entre 250 y 350 metros. Hacia el norte y el sur disminuyen los valores de espesor de la Formación Guatire hasta los 50 metros para luego llegar a 0 metros de espesor. A lo largo del extremo norte se observa un área en la cual el espesor se encuentra en el rango entre 0 y 50 metros (azul claro) extendiéndose hacia el sur, esto indica que el

mayor aporte de sedimentos viene del Macizo del Ávila creando una pendiente más suave que en el extremo sur. Se observan dos áreas (cuadrados rojos) donde el aporte de sedimentos ha sido mayor. Por su parte la figura 5.22 presenta el espesor de los Esquistos de Las Mercedes (CaM), para la elaboración del modelo se le asignó un espesor inicial de 500 metros, por ello esa es la máxima profundidad que puede observar en el mapa isópaco correspondiente. En este mapa se verifica la forma de la cuenca en profundidad observada en la figura 5.21.

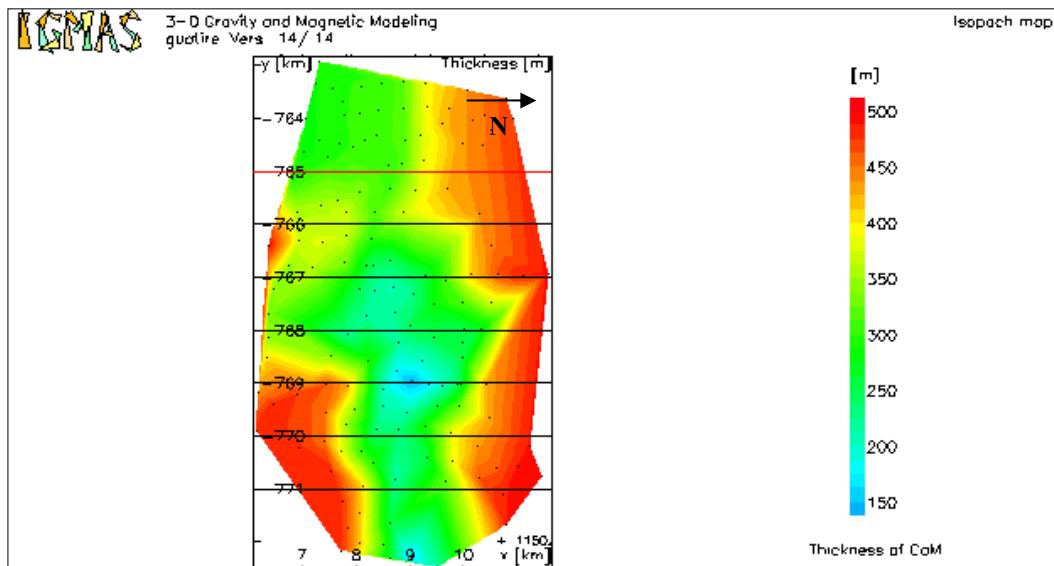


Figura 5.22. Mapa de espesores de los Esquistos de las Mercedes (CaM).

5.8.4 Modelos 3D

El modelo 3D de la Cuenca de Guatire permite visualizar de manera integrada todos los resultados presentados anteriormente (figuras 5.21 y 5.22). El mismo constituye una integración de toda la información que suministra el programa IGMAS. La visualización se realiza por medio del programa IVIS3D.

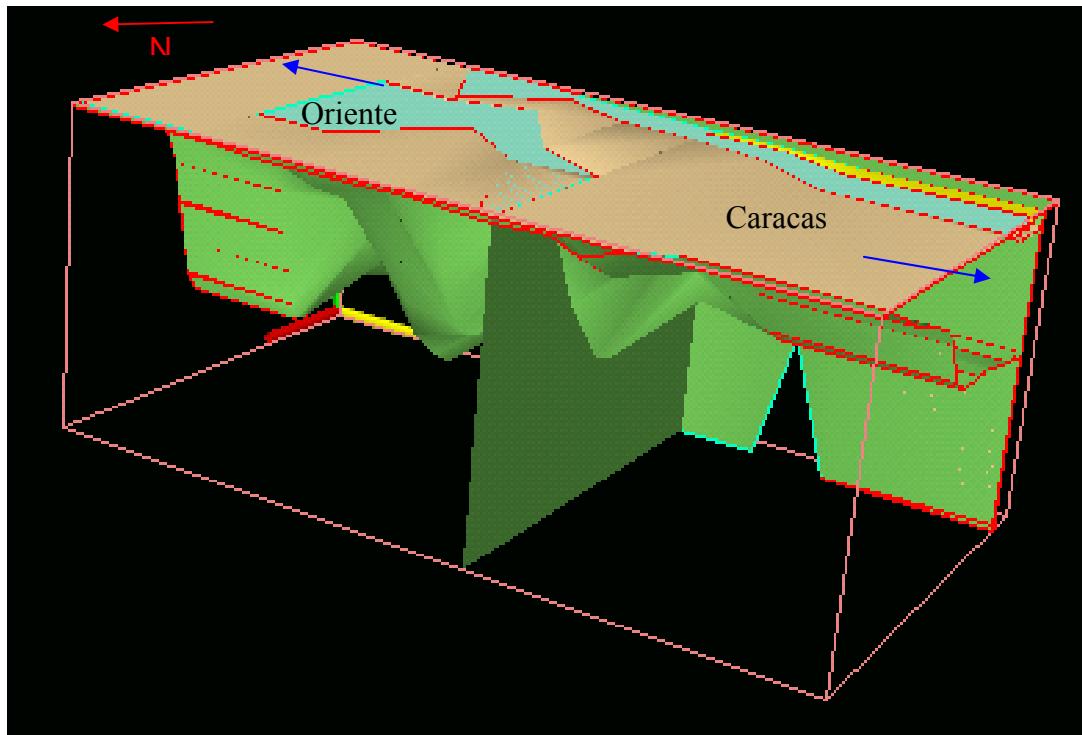


Figura 5.23. Vista 3D de la cuenca de Guatire modelada en IGMAS.

En la figura 5.24 (página siguiente) se observan los modelos 3D de la cuenca de Guatire. En la figura superior se observa la vertiente este (vía Oriente). En la parte central y este de la ventana de estudio la cuenca alcanza su mayor profundidad (370 m). En la figura 5.24 inferior se observa el límite del modelo en el extremo oeste con una profundidad de 220 metros. En general la cuenca presenta forma de cilindro con alineación este-oeste, se observan dos máximos en la profundidad (figura 5.23) en la zona central-este. Hacia el oeste la profundidad disminuye así como la simetría de la cuenca, teniendo una pendiente más suave hacia el norte. En la parte superior de todas las figuras se observa el mapa geológico de superficie del área.

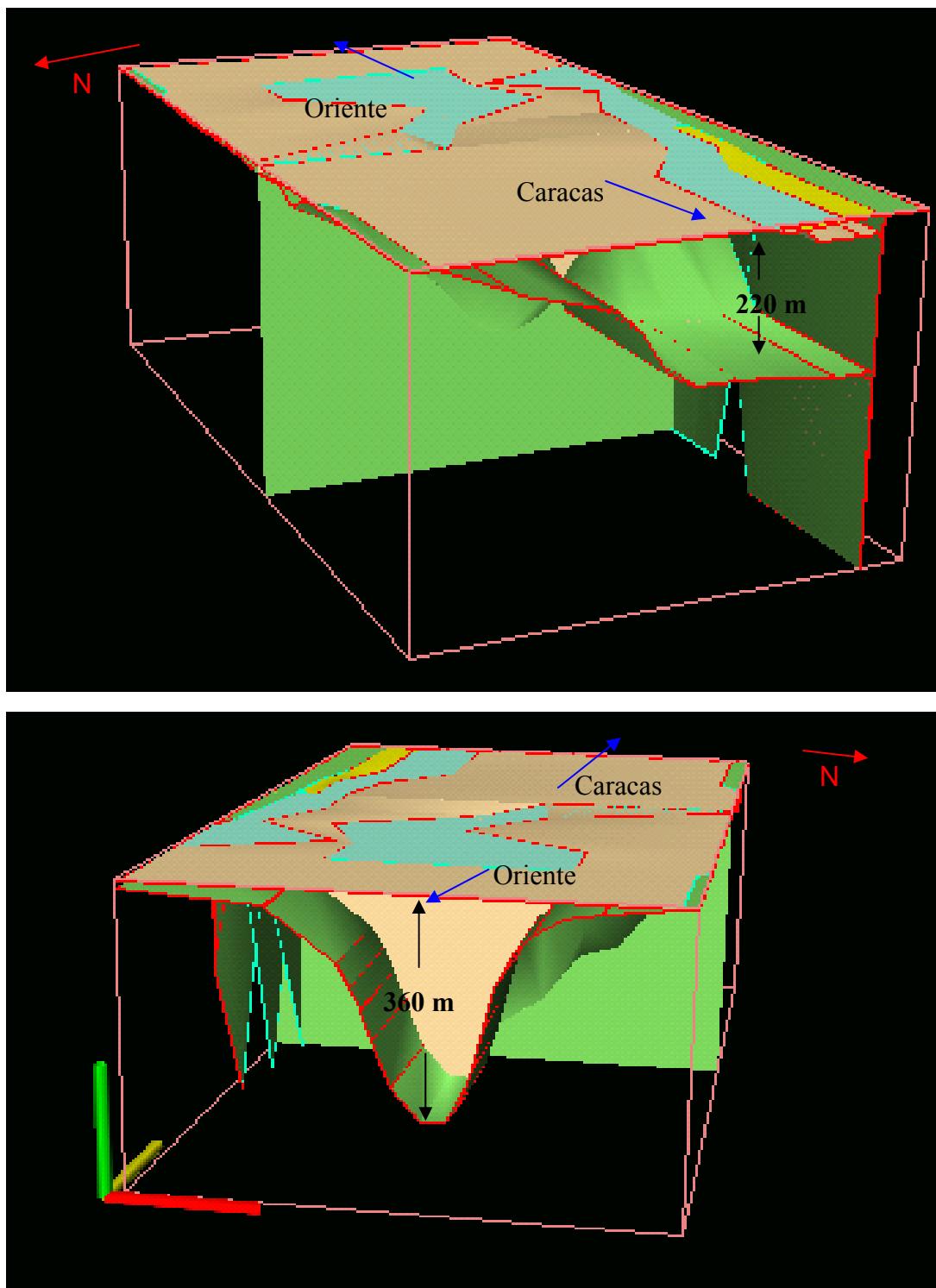


Figura 5.24. Vista 3D de la cuenca de Guatire modelada en IGMAS.
Arriba: vista desde el oeste. Abajo: vista desde el este.

CAPÍTULO VI

INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS

6.1 RELACIÓN PERÍODO – PROFUNDIDAD

Debido a que los valores de períodos fundamentales están asociados al espesor de sedimentos en una determinada área, es posible crear una relación cuantitativa que permita asignar rangos de valores de períodos fundamentales con intervalos de espesores en el subsuelo.

Con la finalidad de realizar esta relación se trazaron tres perfiles en el mapa isópaco de la Formación Guatire, que cubrieran cambios en el espesor sedimentario representativos del área. Se determinaron las estaciones que conformaban cada perfil con su respectivo valor de período fundamental. Finalmente, con los modelos elaborados en IGMAS, se obtuvo el espesor de sedimentos asociado a cada estación. En el apéndice B se encuentra las tablas de datos de cada perfil.

A partir de los datos de período fundamental y el espesor obtenido para cada estación, se elaboraron tres modelos de período-profundidad. De esta manera la relación obtenida entre los períodos fundamentales y el espesor de sedimentos es aparente.

Los perfiles 1 y 2 tienen dirección norte-sur, mientras que el perfil 3 tiene dirección noreste-suroeste, los tres perfiles se pueden observar en la figura 6.1, ubicados sobre el mapa de espesor de sedimentos de la Formación Guatire.

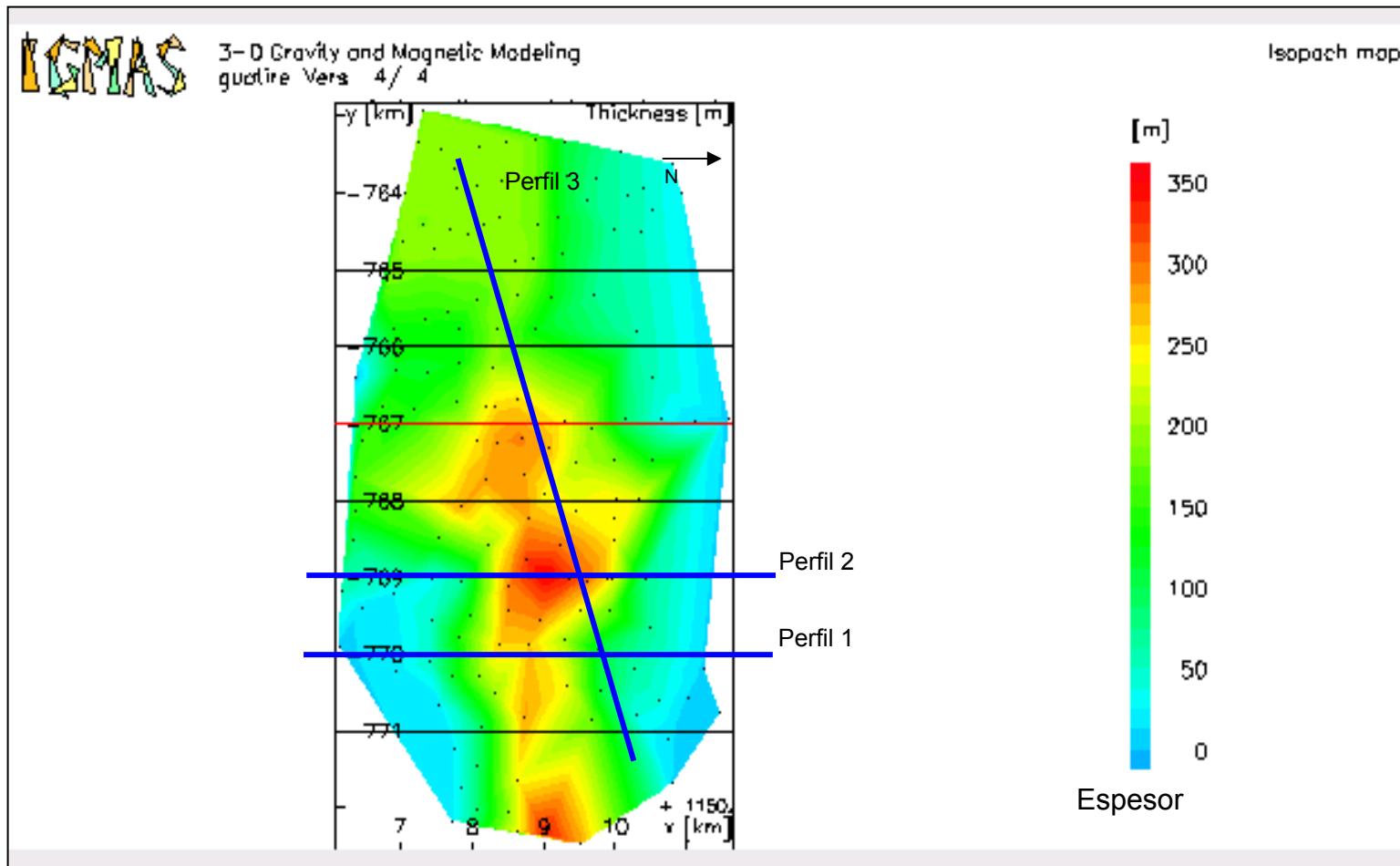


Figura 6.1. Mapa de espesores de sedimentos (Formación Guatire), con los perfiles definidos para los modelos período-profundidad.

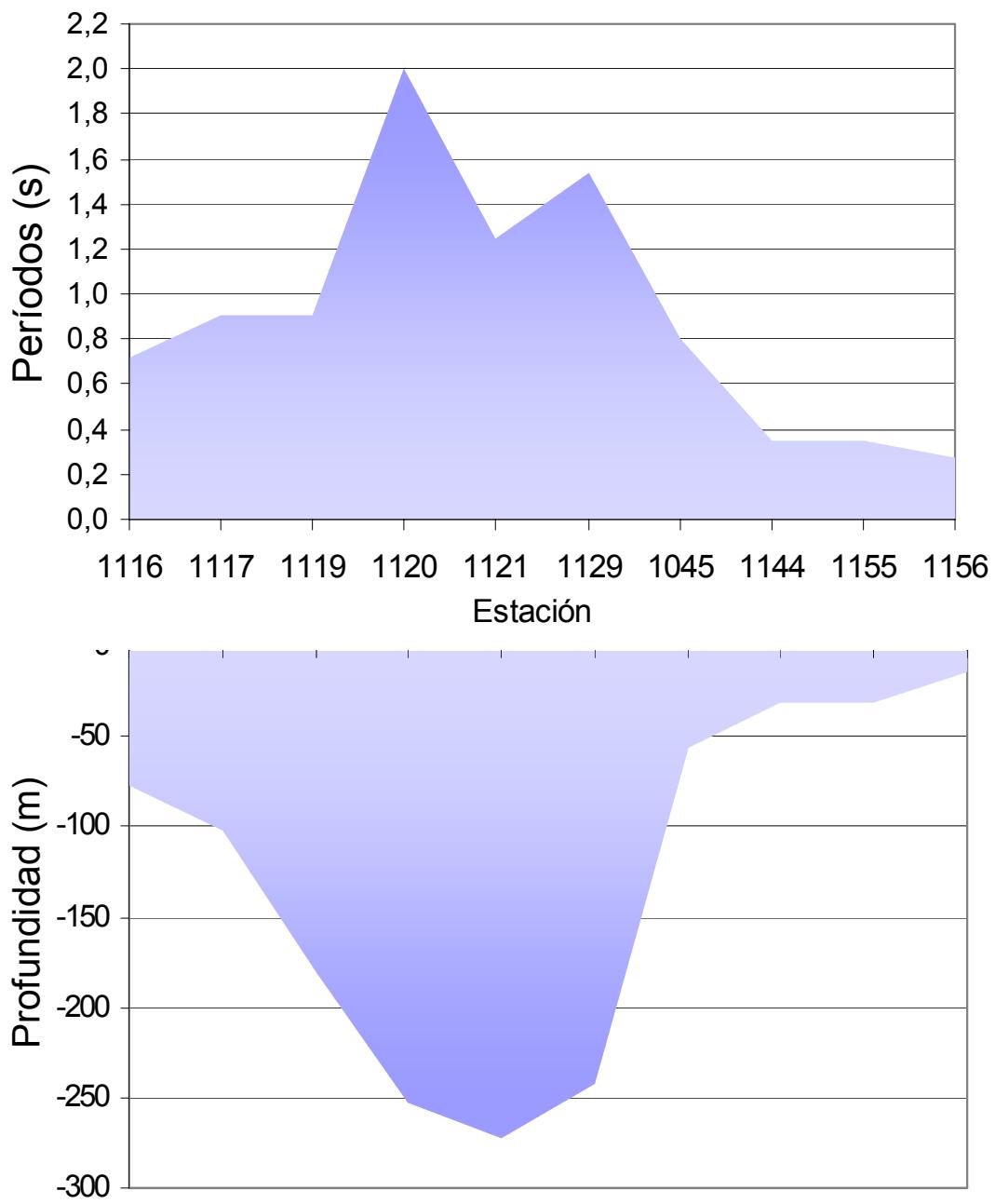


Figura 6.2. Relación entre período y profundidad para el perfil 1.

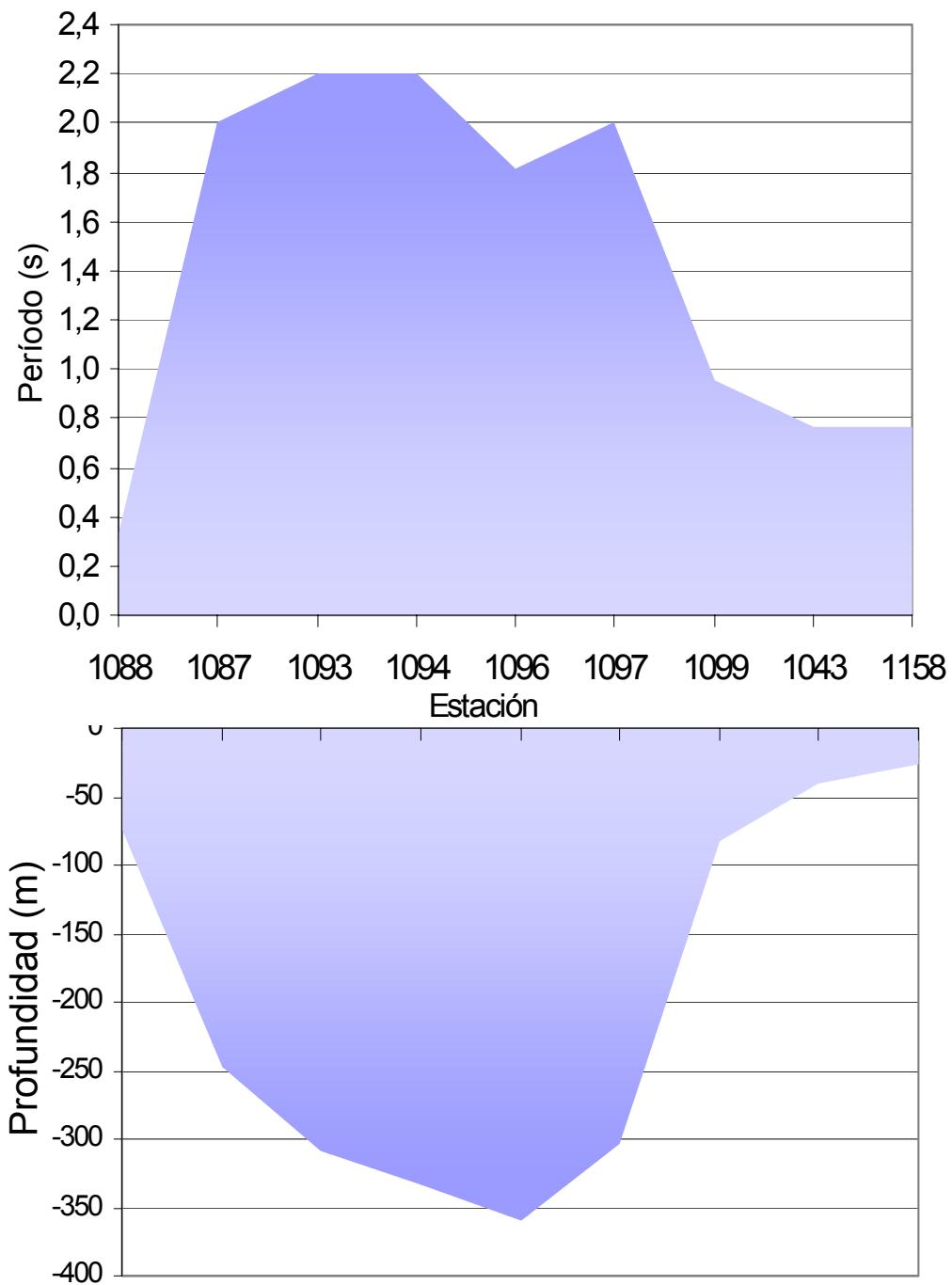


Figura 6.3. Relación entre período y profundidad para el perfil 2.

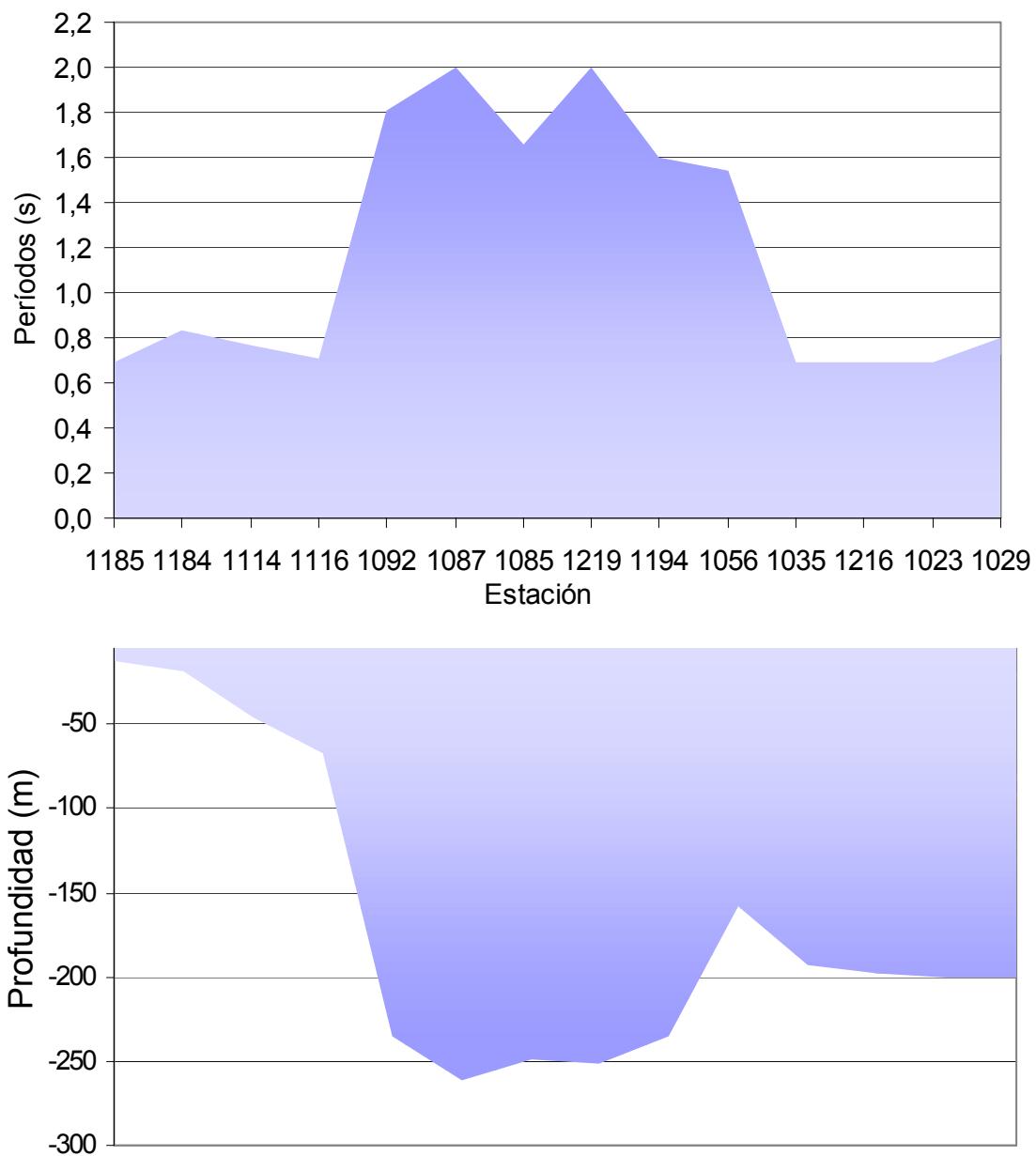


Figura 6.4. Relación entre período y profundidad para el perfil 3.

Como se puede observar en los modelos elaborados para cada perfil, existe una relación aparente entre los períodos fundamentales y el espesor de los sedimentos. Para valores de período fundamental elevados se observan profundidades mayores en el subsuelo. Esta relación, aunque no siempre es lineal, se conserva en los

tres perfiles mostrados anteriormente y se pueden determinar rangos de variación de períodos para intervalos de profundidad.

A partir del perfil 1 (figura 6.2), se determinaron tres rangos de variación aparentes, el primero de éstos de 0,2 a 0,4 segundos se asocia a espesores de sedimentos de 10 a 30 metros. El segundo de 0,4 a 0,8 segundos corresponde a espesores entre 70 y 170 metros, mientras que para valores de períodos de 0,8 a 2 s, se asocian profundidades de 150 a 250 metros. En el perfil 2 (figura 6.3), se observaron dos rangos principales: el primero de éstos con un rango de variación de períodos de 0,6 a 1 segundos asociados a espesores de 30 a 100 metros, el segundo grupo corresponde a períodos desde 1,5 a 2 segundos, con profundidades desde 250 a 320 metros.

En el perfil 3 (figura 6.4) se observan tres rangos: el primero con períodos entre 0,5 a 0,6 segundos para espesores entre 20 y 70 metros; el segundo corresponde a períodos entre 0,6 y 0,8 segundos, asociados a espesores entre 150 y 200 metros; mientras que el último rango con períodos entre 1,6 y 2 segundos se corresponden a espesores de 200 y 270 metros.

En conclusión se determinaron cuatro intervalos principales los cuales se presentan en la tabla 6.1.

En la figura 6.5 se presenta la relación entre períodos fundamentales y profundidad y la regresión lineal, de los tres perfiles mostrados anteriormente. Se observa como los valores de períodos se dividen en dos grupos, uno asociado a profundidades entre 20 y 100 metros y el otro grupo asociado a valores entre 220 y 350 metros. Para profundidades entre 100 y 220 metros no se observan valores de períodos que se ajusten a la recta. Esto es debido a que los cambios de profundidad en la cuenca para los perfiles seleccionados tienen una pendiente alta.

Tabla 6.1. Clasificación de la relación período-profundidad determinada a partir de los perfiles.

Período (s)	Profundidad (m)	Ubicación
0,2 – 0,4	10 – 60	Norte y sur de la ventana de estudio, en las fajas piemontinas de los sistemas montañosos limitantes (Ávila y Cerro Colorado)
0,6 – 1	100 – 200	Zona oeste del área de estudio, urbanización Los Naranjos y Nueva Casarapa, también el sector Las Rosas (noreste)
1 – 1,5	200 – 250	Zona central del área de estudio, Castillejo, pueblo de Guatire, vía hacia Araira.
1,5 – 2,2	250 - 350	Zona central del área de estudio, Castillejo, pueblo de Guatire, vía hacia Araira.

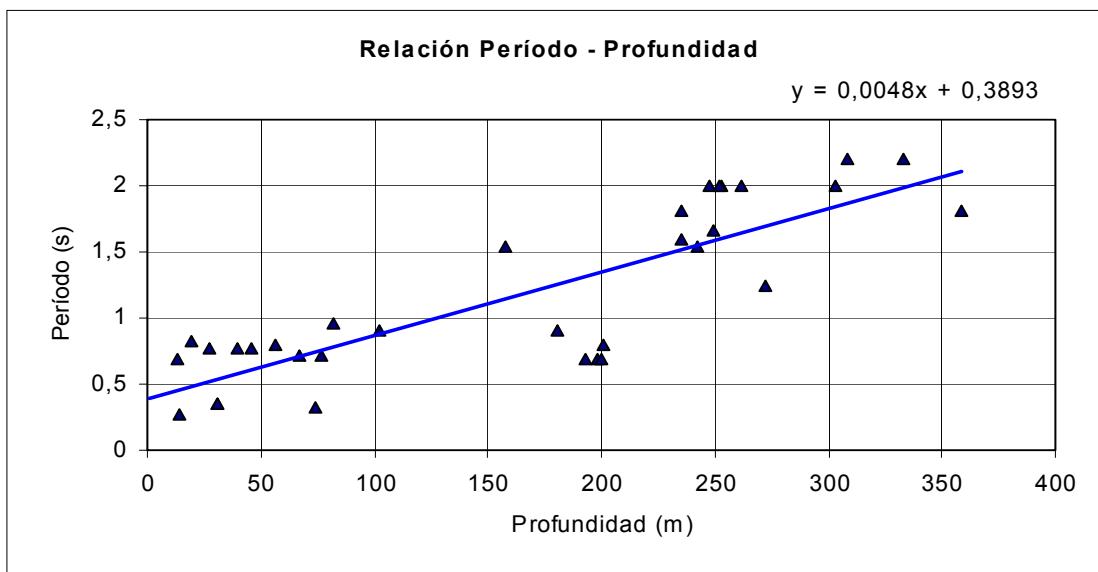


Figura 6.5. Relación período-profundidad de los perfiles 1,2 y 3 y la regresión lineal

A partir de la ecuación de la recta obtenida mediante la regresión lineal se calculó el período fundamental asociado al espesor 0 metros para Guatire en 0,38 segundos, valor semejante al obtenido por Rocabado (2000) para el área de Los Palos Grandes y Santa Eduvigis, en Caracas (0,32 s). En comparación a la relación período-profundidad para el área de Caracas completa, determinada en ese mismo estudio, la respuesta varía levemente. Las pendientes de ambas curvas son similares, sin embargo, el valor de período para el espesor de 0 metros de la relación para Caracas es de 0,2 s. Por lo tanto la curva de relación de período-profundidad para Guatire es paralela a la de Caracas pero se encuentra por encima de ésta. Por lo tanto para un espesor dado en Caracas el período fundamental correspondiente sería menor que el período esperado en Guatire.

6.2 INTEGRACIÓN DE LOS TRES MÉTODOS

De los modelos 2D elaborados se determinaron tres zonas dentro de la ventana de estudio.

Para la primera zona conformada por los perfiles A01, B01 y C01, se determinaron tres capas. Los sedimentos someros de la Formación Guatire no cementada (QG2) constituyen la primera capa con velocidades de ondas P entre 350 y 600 m/s y velocidad de ondas S entre 220 m/s y 350 m/s. El espesor de esta capa varía de 8 a 12 metros, la segunda capa se interpretó como una acumulación de arcillas de 30 metros de espesor aproximadamente con velocidad de ondas P entre 1200 y 1600 m/s, la velocidad de ondas S varía entre 680 y 700 m/s. La tercera capa alcanza los 60 metros aproximadamente, constituye la capa meteorizada de los Esquistos de las Mercedes (CaM), con velocidades de ondas P superiores a 2000 m/s.

En la segunda zona, conformada por los perfiles D01 y E01, se identificaron tres capas, la primera con un espesor de 8 metros con velocidades de ondas P y S de 500 a 600 m/s y 200 a 400 m/s, respectivamente, esta capa corresponde a aluviones recientes. La segunda capa se interpreta como los sedimentos someros de la Formación Guatire (arenas y arcillas poco consolidadas) con una

profundidad de 30 metros. Las velocidades de ondas P para esta capa se calcularon en el rango de 800 a 1200 m/s, mientras que para las ondas S se determinaron en el rango de 300 a 750 m/s. Para la tercera capa se determinó una profundidad de 40 m con velocidad de ondas P superiores a 1700 m/s y velocidad de ondas S mayores a 900 m/s.

Para la tercera zona se determinaron dos capas: la primera se interpretó como aluviones recientes del Cuaternario con un espesor de 10 metros y velocidad de ondas P entre 400 y 900 m/s y de ondas S entre 350 y 450 m/s. Subyacente a esta capa se identificaron los Esquitos de Las Mercedes diferenciada en dos partes, la primera constituida por rocas metamórficas meteorizadas y la segunda pasa a ser gradualmente por rocas más competentes, esto se evidencia en el alto gradiente de velocidad de ondas P, las cuales varían de 1400 a 2000 en 35 metros de espesor aproximadamente.

Las anomalías de Bouguer en el rango de 15 a 19 mGales se corresponden con las zonas para las cuales se determinaron los períodos más altos (1 a 2,2 s) en el centro de la ventana de estudio, pueblo de Guatire y urbanización Castillejo. En esta región aflora la Formación Guatire (QG2) con sedimentos clásticos no cementados. Esta relación se mantiene hasta el límite este de la ventana de estudio. Por su parte en los límites norte y sur de la ventana de estudio los valores de anomalías de Bouguer aumentan hasta 28 mGales y los períodos en esta área se encuentran en el rango de 0,2 a 0,6 s. Ambos resultados responden a la disminución del espesor de la cuenca como consecuencia de la presencia de los sistemas montañosos del Ávila (al norte) y el Cerro Colorado (al sur).

En el oeste de la ventana de estudio (Los Naranjos, Casarapa) se observan valores estables tanto para las anomalías de Bouguer (17 a 22 mGal), como para los períodos fundamentales (0,6 a 0,8 s). La pendiente de la cuenca en la parte norte del área presenta dos comportamientos, en la parte nor-este la pendiente es mucho más inclinada, hecho que se evidencia en el gradiente calculado para las anomalías de Bouguer (5 mGal/km) y en el cambio obtenido para los períodos fundamentales variando de 0,6 s a 1 y 1,5 segundos. Por el contrario, en la zona nor-oeste (Los

Naranjos) el gradiente de las anomalías gravimétricas disminuye y los valores de períodos se mantienen estables, lo que indica que la pendiente es menos inclinada.

Con los métodos gravimétricos y el estudio de ruido sísmico ambiental se determinó que la forma de la cuenca es un siniforme con alineación este – oeste. En el límite este las pendientes de la cuenca son asimétricas, mientras que para el extremo oeste las pendientes son simétricas. La profundidad máxima (370 m) se alcanza en la zona central, al sur del pueblo de Guatire y en el extremo este de la ventana de estudio. La forma de la cuenca se puede observar en el modelo 3D del capítulo de gravimetría.

Asumiendo que el espesor de los sedimentos es la variable de mayor influencia en el área, el comportamiento normal con dos modas obtenido en el análisis estadístico de los datos gravimétricos y de ruido sísmico ambiental, permite inferir que los datos reflejan dos áreas dentro de la ventana de estudio. Un área asociada a un mayor espesor de sedimentos y la otra área relacionada a un menor espesor de sedimentos. Por otra parte la alta dispersión de los datos, indica de cierta forma las variaciones del espesor sedimentario en el subsuelo de la zona estudiada.

6.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para los perfiles sísmicos realizados en el área de estudio se identificaron tres capas en los modelos sísmicos 2D. La primera capa varía de sedimentos mal consolidados a aluviones recientes dependiendo de la ubicación del perfil analizado, mientras que la segunda capa se corresponde a estratos de la Formación Guatire (QG2).

- Para la primera capa correspondiente a las zonas 1 y 2 (zona central del área de estudio), se obtuvieron velocidades de ondas P en el rango de 350 a 600 m/s. La onda S para esta misma capa presentó un rango de velocidad de 200 a 400 m/s.
- Esta capa corresponde a sedimentos someros de la Formación Guatire (QG2) y aluviones recientes, con un espesor promedio de 14 metros.

- La primera capa correspondiente a la zona 3 (este de la ventana de estudio), posee velocidades de ondas P en el rango de 500 a 900 m/s, y velocidades de ondas S en el rango de 350 a 450 m/s, respectivamente. Esta capa se interpretó como aluviones recientes con un espesor promedio de 10 metros.
- La segunda capa determinada en la zona 1, corresponde a una capa de arcillas con un espesor de 30 m aproximadamente. Las velocidades ondas P de esta capa se encuentra en el rango de 1200 a 1600 m/s, mientras que para las ondas S se ubica entre 680 y 700 m/s.
- En la zona 1 (perfil A01), se identificó una tercera capa entre 30 y 60 m de profundidad asociada a la capa superior meteorizada de los Esquistos de Las Mercedes, con velocidades superiores a 2000 m/s.
- La tercera capa determinada en la zona 2 (perfils D01 y E01) se interpretó como sedimentos cementados de la Formación Guatire (QG1), con velocidades superiores a 2000 m/s para ondas P y 1000 m/s para las ondas S. El espesor de esta capa es 10 metros aproximadamente.
- La unidad por debajo de la primera capa obtenida para los perfils ubicados en la zona de aluviones (zona 3), se interpretó como rocas meteorizadas de los Esquistos de las Mercedes con velocidades de ondas P superiores a 2000 m/s y superiores a 500 m/s para las ondas S, con un gradiente de velocidad muy elevado que alcanza los 2700 m/s. Este aumento es ocasionado por un cambio en la compactación de las rocas metamórficas a medida que aumenta la profundidad.
- En el modelo inicial propuesto para el mapa de velocidades promedio a 30 metros de profundidad (V_{s30}), se obtuvo un rango de velocidad de ondas S entre 550 y 650 m/s.

La energía de la fuente sísmica empleada no fue suficiente para que los frentes de ondas alcancaran una mayor profundidad, además la relación señal–ruido fue muy baja en la región debido a la poca compactación de los sedimentos.

En la zona central de la ventana de estudio se registraron los valores de períodos fundamentales más altos del conjunto de datos, conservándose este comportamiento hacia el este. Por su parte, se observaron valores mínimos en las anomalías gravimétricas para esta región, alcanzando mínimos relativos y el mínimo absoluto. Esto permite determinar una relación inversa aparente entre el mapa de anomalía de Bouguer y el mapa de períodos fundamentales.

- Las anomalías gravimétricas en la zona central se encuentran en el rango de 15 a 19 mGales, en correspondencia con los valores máximos de ruido sísmico ambiental, registrados en el orden de 1,5 a 2,2 segundos, siendo este último un máximo absoluto en la ventana de estudio. Por lo tanto esta región constituye la zona de mayor espesor sedimentario correspondiente a la Formación Guatire (QG2).
- El modelo gravimétrico mostró un espesor máximo de 370 m para la zona central de la región, disminuyendo hacia el norte y el sur de la ventana de estudio. El espesor promedio de la cuenca se encuentra entre los 200 y los 270 metros de profundidad. El límite entre la Formación Guatire y los Esquistos de Las Mercedes al nor-este posee una pendiente alta, mientras que en el nor-oeste la pendiente es más baja.
- La cuenca de Guatire es un sinclinal con alineación este-oeste, asimétrica en su extremo oeste y simétrica en la parte este de la ventana de estudio. La acumulación actual de los sedimentos es en el centro y sur de la cuenca debido al basculamiento mencionado por Picard (1976).
- Se emplearon las anomalías gravimétricas residuales para elaborar el modelo gravimétrico, debido al efecto regional reflejado en las anomalías de Bouguer como consecuencia del contraste de densidad entre las formaciones que se encuentran implicadas en el área (1 mGal).
- El mapa de anomalías de Bouguer obtenido es similar al elaborado por Graterol (1970), verificando la tendencia de las curvas isoanómalias.

Asimismo, la ubicación y forma de la cuenca representada por las anomalías de Bouguer es similar en ambos estudios.

- A diferencia del trabajo de Graterol (1970), a partir de los modelos obtenidos se determinó una profundidad máxima de la cuenca de 370 metros.

La relación período-profundidad obtenida por la integración del método de ruido sísmico ambiental y los métodos gravimétricos no siempre es lineal, mas aparentemente asocia períodos altos con el mayor espesor de los sedimentos en el área. El mejor ajuste se da en la región central donde los períodos oscilan entre 1,5 a 2,2 segundos y los espesores obtenidos en el modelo gravimétrico van desde los 250 metros hasta los 370 metros de profundidad. Se definieron cuatro rangos aparentes de la relación período – profundidad.

- El primer rango muestra valores de 0,2 a 0,4 segundos, asociados a espesores de 10 -60 metros de espesores, correspondiente a los extremos norte y sur de la ventana de estudio.
- El segundo rango varía entre 0,6 a 1 segundos relacionado a espesores entre 100 y 200 metros. Este rango predomina en la región oeste de la ventana de estudio.
- El rango de períodos entre 1 a 1,5 segundos asociados a espesores entre 200 y 250 metros constituye el tercer rango, correspondiente a las zonas circundantes a la máxima profundidad de la cuenca.
- Finalmente el rango entre 1,5 a 2,2 asociado a lo máximos espesores de la cuenca con un rango de variación entre 250 y 350 metros se ubica en la zona central del área de estudio y se extiende hacia el este.

Se recomienda la realización de perfiles sísmicos de mayor longitud y con una fuente sísmica de mayor energía para poder obtener información para modelar las velocidades sísmicas de estratos más profundos de la Formación Guatire. Además realizar una mayor cantidad de perfiles que permitirían elaborar un mapa de velocidades Vs30 con mayor información.

Asimismo, se recomienda la recopilación de datos geotécnicos que existan de la región, para verificar los valores de densidades, así como la composición y profundidad de los estratos que conforman el subsuelo.

Una malla más densa de datos gravimétricos y de ruido sísmico ambiental permitirá obtener una mejor correlación entre ambos métodos, debido a que las anomalías gravimétricas en esta región responden fuertemente a la componente regional del área, mientras que los datos de ruido sísmico responden al efecto de sitio. Asimismo el efecto de borde fue muy alto debido a la presencia de los sistemas montañosos al norte y al sur del área, por ello sería útil realizar un mayor número de mediciones en el límite de las ventanas de estudio del presente trabajo extendiéndose, siempre que sea posible, varios kilómetros a partir de éstos.

Un análisis geoestadístico de los datos recopilados en esta investigación sería de gran utilidad para abordar los factores mencionados anteriormente.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- Abeki, N., T. Enomoto, T. Guevara, y Z. Villegas (1995). Fundamental concept for seismic microzonation and preliminary surveys of microtemor observations in Caracas and Cumaná City, Venezuela. II Coloquio Internacional sobre “Microzonificación Sísmica” y V Reunión de Cooperación Iberoamericana, Cumaná, Venezuela, 12 al 16 de junio de 1995, Resumen. 6 p.
- Abeki, N., K. Seo, I. Matsuda, T. Enomoto, D. Watanabe, M. Schmitz, H. Rendón, y A. Sánchez (1998). Microtremor observations in Caracas city, Venezuela. 2nd. International Symposium on Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama, 6 p.
- Audemard, F. (1984). Evaluación geológica de la Cuenca del Tuy para fines de investigación neotectónica. Trabajo Especial de Grado, U.C.V., Caracas, 226 p.
- Audemard, F. y C. Giraldo (1997) Desplazamientos destrales a lo largo de la frontera meridional de la placa del Caribe, Venezuela Septentrional, VIII Congreso Geológico Venezolano, Barquisimeto, Edo. Lara - Venezuela. 1: 101-108.
- Audemard, F., M. Machette, J. Cox, R. Dart, y K. Haller (2000). Map of Quaternary Faults in Venezuela. A project of International Lithosphere Program Task Group II-2, Major Active Faults of the World, scale 1:2000000, en Edic. Fundación Geos, U.C.V., ediciones en CD-rom, número 1, Caracas
- Barboza L. y S. Rodríguez (2001). Integración de la geología del Estado Vargas y del flanco sur del Macizo del Ávila al norte de Caracas. Trabajo Especial de Grado. Dep. Geol., Minas y Geof. U.C.V., Caracas, 334 p.

Bard, P.Y., (1999). Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?. The Effects of Surface Geology on Seismic Motion - Recent progress and new Horizon on ESG Study, Volume 3, Balkema, Rotterdam, 1251-1279 p.

Beck, C. (1986). Caribbean colliding, Andean drifting and the Mesozoic – Cenozoic geodinamic evolution of the Caribbean. Soc. Ven. Geol., Mem. VI Congreso Geológico Venezolano 10: 163-182.

Bellizia, A. (1986). Sistema Montañoso del Caribe, una cordillera alóctona en el Norte de América del Sur. Soc. Ven. Geol., Mem. VI Congreso Geológico Venezolano 10: 6657-6836.

Beltrán C. (comp.) (1993). Mapa neotectónico de Venezuela a escala 1:2.000.000. Public. FUNVISIS. Caracas.

Bermúdez, P. (1966). Consideraciones sobre los sedimentos del Mioceno Medio al Reciente de las Costas Central y Oriental de Venezuela. Boletín de Geología, volumen VII, Caracas, Venezuela, 342 –343 p.

Cantos, F. (1974) Tratado de Geofísica Aplicada. Editorial Litoprint, España, 520 p.

Chávez García, J., y J. Lermo (1994). Are microtremors useful in site response evaluation?. Boletín de la SOGV, 84(5): 1350 – 1364.

Dobrin, M.B. (1960) Introducción a la Prospección Geofísica. Edit. McGraw Hill, New York, 630 p.

Dusenbury, A. N., 1956. Guatire, Formación. Léxico Estratigráfico de Venezuela. *Bol. Geol.*, Pub. Esp. N° 1, 289-290 p.

Duval, A.-M., Méneroud, J.-P., Vidal, S. y A. Singer (1998). Relation between curves obtained from microtremor and site effects observed after Caracas 1967 earthquake. 11th European Conference on Earthquake Engineering, Rotterdam, 1-9 p.

Enomoto, T. (2001) Seismic microzoning and risk assessment in Caracas from the point of view of seismic disaster mitigation. Taller Internacional “Estudios de métodos y acciones para contrarrestar los efectos producidos por terremotos en Caracas (1999-2001)”. Serie Técnica No.1. FUNVISIS. Caracas, Venezuela, 9–16 p.

Enomoto, T., M. Schmitz, I. Matsuda, N. Abeki, K. Masaki, M. Navarro, V. Rocabado, y A. Sánchez (2001). Seismic risk assessment using soil dynamic characteristics in Caracas, Venezuela. 6th International Conference on Seismic Zonation, Palm Springs, Nov. 12-15, 2000, CD, 6p.

FUNVISIS (1978). Segunda Fase del Estudio del Sismo Ocurrido en Caracas el 29 de Julio de 1967, Ministerio de Obras Públicas, Comisión Presidencial para el estudio del Sismo, Caracas, Venezuela, Volumen A, 517 p.

Graterol V. (1970). Estudio Gravimétrico de la Cuenca de Guarenas-Guatire. Boletín de Geología, Caracas, Venezuela, incluye mapa, 11(21): 319-336.

Graterol V. y A. Fonseca (1978). Gravimetría en Venezuela. Boletín de Geología, Caracas, Venezuela, incluye Mapa, 3(5): 235-242.

Giunta G., L. Beccaluva, M. Coltorti, F. Siena y C. Vaccaro (2002). The Southern margin of the Caribbean Plate in Venezuela: tectono –magmatic setting of the ophiolitics unit and kinematic evolution. Lithos, 63: 19-49.

González de Juana, C., J. Iturrealde de Arozena y X. Picard, (1980). Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas. Ediciones FONINVES. 2: 715-716.

Götze, H. J. (1978): Ein numerisches Verfahren zur Berechnung der gravimetrischen Feldgrößen drei-dimensionaler Modellkörper. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. A, 25, Wien, 195-215.

Götze, H. J. (1984). Über den Einsatz interaktiver Computer graphik im Rhamen 3-dimensionaler Interpretationstechniken in Gravimetrie und Magnetik: Habil. T.E.G. Universidad Clausthal.

Götze, H. J. y B. Lahmeyer (1988). Application of three-dimensional interactive modeling in gravity and magnetics. Geophysics, 53 (8): 1096-1108.

Götze, H. J. y S. Schmidt (1998). Modelling techniques in geology and geophysics by the aid of geoscientific information systems (GIS). Special Issue "Physics and Chemistry of the Earth", 23(3): 86.

Guevara, L. T. y M. Stolk de Petersson (1993). La Microzonificación Sísmica como base para el ordenamiento urbanístico de Caracas. Presentado en el Coloquio celebrado en Cardón, Venezuela.

Huang H. y T.L. Teng (1999). An Evaluation on H/V Ratio vs. Spectral Ratio for Site-response Estimation Using the 1994 Northridge Earthquake Sequences, Pure and Applied Geophysics, 156 (4): 631 – 649.

Huang H. y Y. Tseng (2002). Characteristics of Soil Liquefaction using H/V of Microtremors in Yuan-Lin area, Taiwan. TAO, 13(3): 325-338.

Kanai, K. y Tanaka T. (1961). On Microtremor VIII, Bull.Earthq. Res.Inst., Tokyo University, 39: 97-114

Klesper C., S. Schmidt y H. J. Götze (1997). Concept and examples of interactive visualization with IVIS-3D. - abstract (poster), Part I, Volume 16, 23th General Assembly of the European Geophysical Society, Nice.

Konno, K. y T. Ohmachi (1998). Ground motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. BSSA, 88: 228-241.

Lermo, J. y F. J. Chávez-García (1993). Site effect evaluation using spectral ratios with only one station. BSSA, 83, 1574-1594.

Longman, I. (1959). Formulas for Computing the Tidal Accelerations Due to the Moon and the Sun. Journal of Geophysical Research. 64(12):2351-2355

Ludwig, J.W., J.E. Nafe y C.L. Drake (1970). Seismic refraction, in: The Sea, vol. 4, Maxwell, A.E. (ed), Wiley, New York, 53-84 p.

Masaki, K. (1998). Microtremor measurements and its application to seismic risk assessment. Int. conference of th 30 years aniversal of the 1967 Caracas earthquake, FUNVISIS, Caracas, 10 p.

Menéndez A. (1966). Tectónica de la parte central de las montañas occidentales del Caribe, Venezuela. *Bol. de Geol.* 8 (15): 154-155.

Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Quartely Report of Railway Technical Research Institute (RTRI), 30(1):1122-1128.

Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. 12 WCEE, 8 p.

Navarro E, M. Ostos y F. Yoris (1988). Revisión y redefinición de unidades litoestratigráficas y síntesis de un modelo tectónico para la evolución de la parte norte – central de Venezuela durante el Jurásico Medio – Paleógeno. Acta Científica Venezolana, 39: 427-436.

Nicklas, M. (1953). Las formaciones terciarias en la cuenca de Guarenas-Guatire. Soc. Cienc. Nat. La Salle., Mem. 13(36): 369-376.

Nogoshi, M. y T. Igarashi (1971). On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). Jour. Seism. Soc. Japan, 24, 26-40 p.

Orihueña, N. (1990). Estudio Gravimétrico de la zona nor-central de la cordillera de la costa. Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela, 124 p.

Orta M. C. (2003). Integración Geológica de la región Caracas–Charallave-Santa Teresa del Tuy, Distrito Capital y Estado Miranda. Trabajo Especial de Grado. Dep. Geol., Minas y Geof. U.C.V. 236 p.

Ostos, M. (1990). Evolución tectónica del margen Sur-Central del Caribe, basados en datos geoquímicos. Escuela Geología, Minas y Geofísica, Caracas, Geos. 30:1 –294.

Parasnus, D. (1970) Principios de Geofísica Aplicada. Editorial. Paraninfo. Madrid, 367 p.

Picard, X. y N. Pimentel (1968). Geología de la cuenca Santa Lucía-Ocumare del Tuy, *Bol. Geol.*, 10(19): 263-296.

Picard, X. (1976). Geología de la Cuenca Guarenas-Guatire, sedimentación continental intracordillerana. Mem. Bol. Geol., Publicación Especial, 7(2): 965-984

Pindell, J. (1993). Mezosoic and early Cenozoic development of the Gulf of México and Caribbean Region: Transaction, Gulf Coast section. SEPM, Foundation Annual Research Conference, 13 th. Houston, SEPM Foundation, 251-274 pp.

Pindell, J. y S. Barrett (1990). Geological evolution of the Caribbean Region: a Plate-tectonic prospective. In: Dengo, G., J.E. Case, (Eds.), The Geology of North America, Volume H. The Caribbean Region. Geol. Soc. of America, Boulder, CO, 405– 432 p.

Rocabado, V. (2000). Períodos fundamentales del suelo de la ciudad de Caracas a partir de mediciones de ruido ambiental. Trabajo Especial de Grado, Dep. Geol., Minas y Geof. U.C.V, Caracas. 87 p.

Ruiz, F. (1989). Modelado Gravimétrico de un perfil desde Altagracia de Orituco hasta el Distrito Federal. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela. 138 pp.

Sánchez J. (2001). Modelado gravimétrico del basamento de la cuenca de Los Palos Grandes. Trabajo Especial de Grado. Dep. Geol., Minas y Geof. U.C.V., Caracas, 83 p.

Seed H. B. y J. L. Alonso (1974). Efectos de Interacción Suelo-Estructura en el Terremoto de Caracas de 1967, (Versión Ampliada), I Congreso de Sismología e Ingeniería Sísmica, AVIE, Caracas, FUNVISIS.

Seiders, V. M. (1965). Geología de Miranda central, Venezuela. *Bol. Geol.*, Caracas, 6 (12): 289-416

Semblat, J. F., A. M. Duval, P. Dangla (2000). Numerical analysis of seismic wave amplification in Nice (France) and comparisons with experiments, *Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, 19(5): 347-362.

Telford, W. M., L.P. Geldart y R.E. Sheriff (1990) *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, United Kingdomg, 769 p.

Urbani, F. (1972). Primera localidad fosilífera del Miembro Zenda de la Formación Las Brisas: Cueva del Indio, La Guairita, estado Miranda. *Bol. Inf. Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról.*, 12(11): 417-423.

Urbani, F. (1973). Notas sobre el hallazgo de fósiles en rocas metamórficas de la parte central de la Cordillera de la Costa. *Bol. Inf. Asoc. Venez. Geol., Min. y Petról.*, 16(4-6): 41-54.

Urbani, F., R. Sánchez y J. Silva. (1989). Reconocimiento Geológico de la región de La Sabana - Cabo Codera - Capaya, D.F. y Miranda. Mem. VII Congr. Geol. Venezolano, Barquisimeto, 1: 223-243.

Urbani, F. (2000). Revisión de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa. Caracas, Venezuela. U.C.V. Geos (33): 1-170.

Urbani, F. (2002). Nomenclatura de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Separata de GEOS, número 35, 107 p.

Urbani, F., y M. Ostos (1989). El Complejo Ávila. Cordillera de la Costa, Venezuela. GEOS, Caracas, (29): 205-217.

Urbani, F., y J.A. Rodríguez (2004). Atlas geológico de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Edic. Fundación Geos, U.C.V., ediciones en CD-rom, número 1, Caracas, ix + 146 mapas a escala 1:25.000.

Wehrmann, M. (1972). Geología de la región Guatire-Colonia Tovar. Bol. Geol., Caracas, Public. Esp. 5,4: 2093-2119.

Weston (Weston Geophysics Engineers Internatonal. Inc.) (1969). Investigaciones sísmicas en el valle de Caracas y el Litoral Central (bajo la planificación y supervisión de la comisión presidencial para el estudio del sismo de Caracas), Caracas, 22 p.

William, J. H. (1990). The role of gravity and magnetics method in engineering and environmental studies. Investigations in Geophysics number SOEG 5:75 -126.

Wolcott (1943). Fossils from metamorphic rocks of the Coast Range of Venezuela. Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., 27: 1632.

APÉNDICE A
Datos empleados en la sísmica de refracción

Tabla A.1. Datos empleados para elaborar los modelos 2D de ondas P.

Perfil		Distancia (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00	185.00
A01	Capa 1	Velocidad tope (km/s)	0.55	0.80	0.80	0.85	0.85	0.85	0.95	0.90	0.85	0.85
		Velocidad base (km/s)	1.0	1.0	1.0	1.15	1.15	1.18	1.15	1.12	1.10	1.10
		Profundidad (m)	6.50	6.50	7.20	7.80	8.40	9.20	9.30	9.80	11.00	12.00
		Velocidad tope (km/s)	1.1	1.12	1.20	1.22	1.22	1.20	1.20	1.19	1.19	1.15
	Capa 2	Velocidad base (km/s)	1.60	1.60	1.60	1.60	1.70	1.70	1.70	1.60	1.60	1.60
		Profundidad (m)	32.00	33.00	34.00	35.00	35.50	36.00	36.70	37.30	38.00	39.00
		Velocidad tope (km/s)	2.00	2.00	2.00	1.80	1.80	1.80	2.00	2.10	2.20	2.20
	Capa 3	Velocidad base (km/s)	2.40	2.40	2.50	2.50	2.60	2.60	2.50	2.40	2.40	2.40
		Profundidad máxima (m)	65.00									
B01	Capa 1	Distancia (m)	0.00	12.00	20.00	34.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	136.00
		Profundidad (m)	0.80	0.60	0.55	0.30	0.30	0.40	0.35	0.40	0.45	0.50
		Velocidad tope (km/s)	0.9	0.6	0.6	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
		Velocidad base (km/s)	12.0	14.0	15.0	16.0	15.0	14.0	14.0	14.0	14.0	14.0
	Capa 2	Velocidad tope (km/s)	1.00	1.00	1.00	1.00	0.80	1.00	1.00	1.20	1.00	1.0
		Velocidad base (km/s)	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.30	1.30	1.30	1.30
		Profundidad máxima (m)	35.00									

Tabla A.1. (continuación)

Perfil		Distancia (m)	0.00	5.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	144.00
C01	Capa 1	Velocidad tope (km/s)	0.35	0.35	0.35	0.30	0.38	0.40	0.40	0.50	0.35	0.35
		Velocidad base (km/s)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.6	0.60	0.5
		Profundidad (m)	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.5	5.0
	Capa 2	Velocidad tope (km/s)	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.6
		Velocidad base (km/s)	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7
		Profundidad (m)	13.00	13.00	13.00	13.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00	11.00
	Capa 3	Velocidad tope (km/s)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.20	1.20	1.10	1.10	1.20	1.00
		Velocidad base (km/s)	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
		Profundidad máxima (m)	30.00									
D01	Capa 1	Distancia (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	144.00	
		Velocidad tope (km/s)	0.33	0.38	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.35	
		Velocidad base (km/s)	0.6	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
		Profundidad (m)	6.0	6.0	6.0	7.0	7.0	7.0	8.0	8.0	8.0	
	Capa 2	Velocidad tope (km/s)	0.65	0.65	0.6	0.6	0.6	0.70	0.80	0.9	0.9	
		Velocidad base (km/s)	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	
		Profundidad (m)	22.00	22.00	22.00	22.00	22.50	23.00	23.00	23.50	24.00	
	Capa 3	Velocidad tope (km/s)	1.80	1.80	1.80	1.90	1.90	1.90	1.90	1.80	1.80	
		Velocidad base (km/s)	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.40	2.40	
		Profundidad máxima (m)	45.00									

Perfil E01	Capa 1	Distancia (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	144.00	
		Velocidad tope (km/s)	0.50	0.50	0.40	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.50	
		Velocidad base (km/s)	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	0.50	0.55	0.60	0.60	
		Profundidad (m)	9.0	9.0	9.0	9.0	8.5	8.0	7.0	6.0	6.0	
	Capa 2	Velocidad tope (km/s)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.00	1.0	1.0	1.00	
		Velocidad base (km/s)	1.20	1.20	1.20	1.20	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	
		Profundidad (m)	30.00	30.00	30.00	30.00	27.00	27.00	26.00	25.00	24.00	
	Capa 3	Velocidad tope (km/s)	1.80	1.80	1.80	1.80	1.70	1.50	1.50	1.50	1.50	
		Velocidad base (km/s)	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	
		Profundidad máxima (m)	55.00									
Perfil F01	Capa 1	Distancia (m)	0.00	20.00	30.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	
		Velocidad tope (km/s)	0.40	0.40	0.40	0.50	0.60	0.50	0.40	0.35	0.30	
		Velocidad base (km/s)	0.90	0.90	0.90	1.00	1.00	1.20	1.00	0.80	0.80	
		Profundidad (m)	10.0	11.0	10.0	10.0	9.0	10.0	7.0	8.0	8.0	
	Capa 2	Velocidad tope (km/s)	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.6	1.6	1.4	1.4	
		Velocidad base (km/s)	2.7	2.7	2.7	2.8	3.0	3.0	3.0	2.9	2.9	
		Profundidad (m)	50.00									

Tabla A.1. (continuación)

Perfil		Distancia (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	144.00	
G01	Capa 1	Velocidad tope (km/s)	0.6	0.70	0.65	0.65	0.65	0.70	0.75	0.6	0.6	
		Velocidad base (km/s)	0.7	0.8	0.7	0.7	0.67	0.8	0.8	0.7	0.7	
		Profundidad (m)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	
		Velocidad tope (km/s)	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0	
	Capa 2	Velocidad base (km/s)	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	
		Profundidad (m)	26.50	26.50	26.50	27.50	27.50	27.50	28.00	28.00	28.00	
		Velocidad tope (km/s)	2.00	2.00	2.00	1.90	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	
	Capa 3	Velocidad base (km/s)	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	
		Profundidad máxima (m)	40.00									

Tabla A.2. Datos empleados para elaborar los modelos 2D de ondas S.

Perfil		Distancia (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	160.00	185.00
A01	Capa 1	Velocidad tope (km/s)	0.50	0.40	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.50	0.50
		Velocidad base (km/s)	0.55	0.45	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.55	0.55
		Profundidad (m)	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.50	7.00
		Velocidad tope (km/s)	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
B01	Capa 1	Velocidad base (km/s)	0.69	0.69	0.69	0.69	0.69	0.70	0.70	0.69	0.70	0.70
		Profundidad (m)	15.00									
		Distancia (m)	0.00	12.00	20.00	34.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	136.00
		Velocidad tope (km/s)	0.35	0.32	0.32	0.28	0.28	0.20	0.22	0.22	0.25	0.25
B01	Capa 2	Velocidad base (km/s)	0.40	0.35	0.35	0.45	0.30	0.30	0.30	0.40	0.40	0.50
		Profundidad (m)	10.0	11.0	13.0	16.0	10.0	11.0	13.0	14.0	14.0	14.0
		Velocidad tope (km/s)	0.55	0.50	0.40	0.46	0.35	0.35	0.40	0.45	0.50	0.50
		Velocidad base (km/s)	0.70	0.60	0.60	0.50	0.50	0.57	0.57	0.57	0.60	0.70
		Profundidad (m)	40.00									

Tabla A.2. (continuación)

Perfil		Distancia (m)	0.00	5.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	144.00
C01	Capa 1	Velocidad tope (km/s)	0.20	0.20	0.22	0.27	0.22	0.24	0.22	0.28	0.25	0.26
		Velocidad base (km/s)	0.25	0.25	0.25	0.30	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
		Profundidad (m)	7.0	7.0	6.5	6.5	7.0	7.0	6.0	7.0	6.0	6.0
	Capa 2	Velocidad tope (km/s)	0.35	0.35	0.35	0.33	0.4	0.4	0.40	0.40	0.4	0.4
		Velocidad base (km/s)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.45	0.45	0.45	0.45	0.55
		Profundidad (m)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	16.00	16.00	16.00	16.00
	Capa 3	Velocidad tope (km/s)	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	0.6	0.60	0.55	0.55	0.6
		Velocidad base (km/s)	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
		Profundidad máxima (m)	35.00									
D01	Capa 1	Distancia (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	144.00	
		Velocidad tope (km/s)	0.18	0.20	0.20	0.19	0.19	0.18	0.16	0.14	0.12	
		Velocidad base (km/s)	0.2	0.22	0.22	0.22	0.2	0.19	0.17	0.16	0.14	
		Profundidad (m)	5.0	5.0	5.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	
	Capa 2	Velocidad tope (km/s)	0.3	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.3	0.3	
		Velocidad base (km/s)	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	
		Profundidad (m)	21.00	21.00	21.00	21.00	20.50	20.00	20.00	20.00	20.00	
	Capa 3	Velocidad tope (km/s)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	
		Velocidad base (km/s)	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	
		Profundidad máxima (m)	35.00									

Tabla A.2. (continuación)

Perfil		Distancia (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	144.00	
E01	Capa 1	Velocidad tope (km/s)	0.20	0.22	0.18	0.15	0.18	0.20	0.20	0.19	0.19	
		Velocidad base (km/s)	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.50	0.50	0.5	
		Profundidad (m)	5.0	6.0	7.0	6.8	6.5	6.0	5.0	4.5	5.0	
	Capa 2	Velocidad tope (km/s)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	
		Velocidad base (km/s)	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.75	0.75	0.75	0.75	
		Profundidad (m)	28.00	28.00	28.00	30.00	27.00	26.50	26.00	26.00	26.00	
	Capa 3	Velocidad tope (km/s)	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.90	1.00	1.00	1.00	
		Velocidad base (km/s)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	
		Profundidad máxima (m)	55.00									
F01	Capa 1	Distancia (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	144.00	
		Velocidad tope (km/s)	0.3	0.3	0.3	0.4	0.45	0.45	0.40	0.35	0.30	
		Velocidad base (km/s)	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.4	0.4	
		Profundidad (m)	6.0	6.0	6.0	5.0	5.0	6.0	6.0	6.0	6.0	
	Capa 2	Velocidad tope (km/s)	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	
		Velocidad base (km/s)	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.55	0.60	0.60	0.60	
		Profundidad (m)	18.00									

Tabla A.2. (continuación)

G01	Capa 1	Distancia (m)	0.00	20.00	40.00	60.00	80.00	100.00	120.00	140.00	144.00	
		Velocidad tope (km/s)	0.35	0.35	0.35	0.40	0.30	0.35	0.40	0.30	0.30	
		Velocidad base (km/s)	0.4	0.4	0.40	0.5	0.32	0.40	0.45	0.40	0.4	
		Profundidad (m)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.5	4.0	5.0	5.6	6.0	
	Capa 2	Velocidad tope (km/s)	0.5	0.5	0.5	0.6	0.4	0.5	0.50	0.5	0.5	
		Velocidad base (km/s)	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	
		Profundidad (m)	25.00									

Tabla A.3. Datos empleados para la elaboración del mapa Vs30.

Perfil	UTM_E	UTM_N	Vs (m/s)
B01	765330	1159648	550
C01	766929	1158814	550
D01	766300	1157350	615
E01	766180	1157744	570
G01	769923	1156923	562

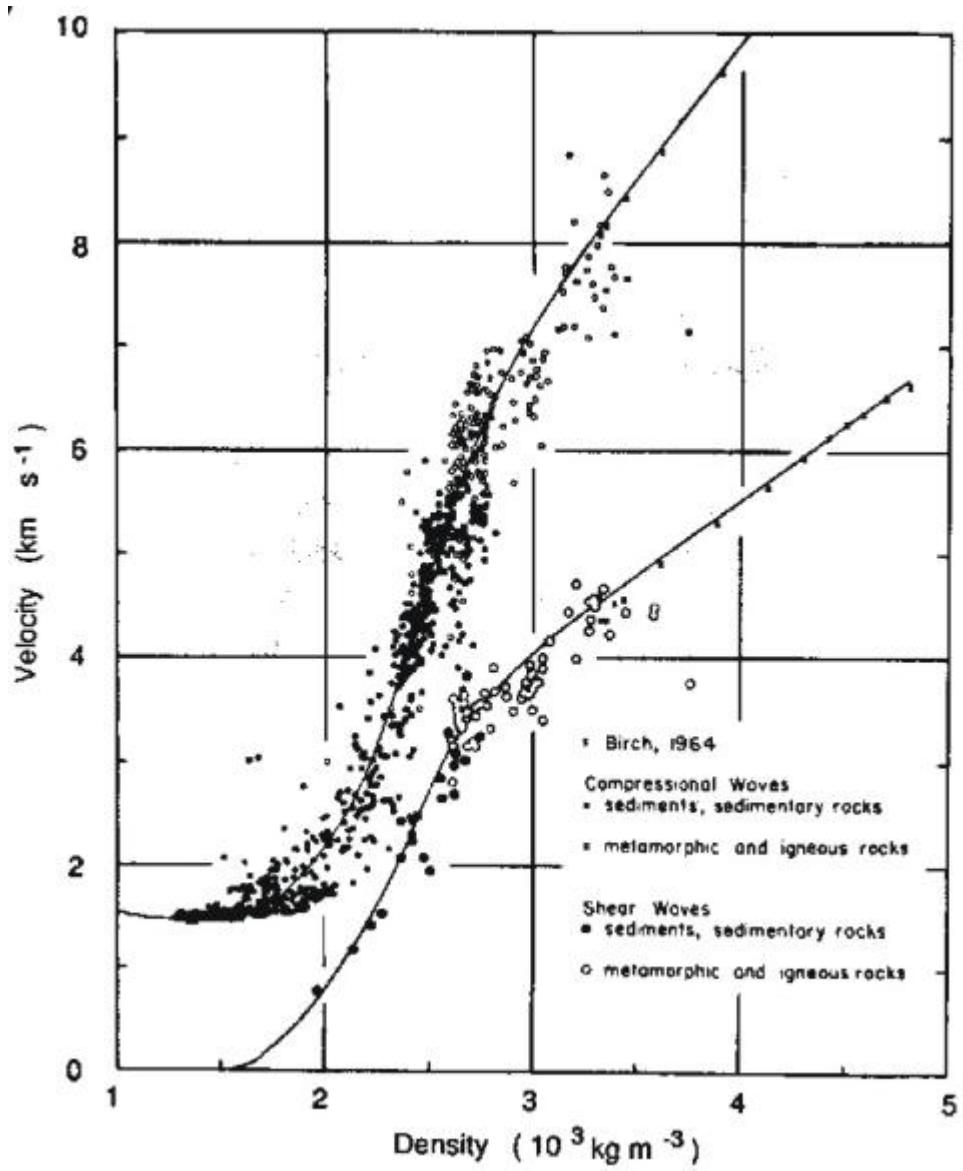


Figura A.1. Curva de relación velocidad-densidad para rocas sedimentarias y metamórficas, Ludwig, Nafe y Drake, 1970.

En el disco compacto que acompaña adjunto a la tesis, se pueden conseguir los datos de los perfiles sísmicos en código SEG2.

APÉNDICE B
Tablas de datos de ruido sísmico ambiental

Tabla B.1. Datos de ruido sísmico ambiental

Estación	UTM_E	UTM_N	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Amplitud rel. H/V	Nro. de ventanas	Selección
1001	766770	1158192	0,65	1,54	1,896	11	a
1002	763986	1160916	3,198	0,31	2,482	9	m,a
1003	764507	1160362	1,199	0,83	3,658	18	a
1004	764206	1160526	1,149	0,87	2,124	8	m,a
1005	763622	1160797	1,699	0,59	1,475	8	m,a
1006	763941	1160384	1,549	0,65	1,914	16	a
1007	764455	1159970	1,249	0,80	2,675	7	a
1008	764026	1160161	1,449	0,69	3,085	9	3m
1009	764086	1159618	1,199	0,83	5,205	7	5m
1010	763446	1160074	1,599	0,63	1,258	12	a
1011	763813	1159742	1,299	0,77	4,116	5	a,m
1012	763784	1159331	1,399	0,71	1,696	12	a
1013	763318	1159294	1,249	0,80	3,146	10	a,m
1014	763805	1158882	1,599	0,63	4,061	9	20 seg 5m
1015	763315	1158890	1,449	0,69	1,852	14	20 seg
1018	764418	1158908	1,499	0,67	1,701	6	20 seg
1019	763836	1158398	1,399	0,71	3,081	18	a
1020	764322	1158377	1,399	0,71	5,38	18	a
1021	764522	1157926	1,299	0,77	5,164	9	2m
1022	764710	1157465	1,249	0,80	4,069	10	2m
1023	763898	1158054	1,449	0,69	3,131	13	a
1024	763333	1158458	1,449	0,69	11,003	20	a
1025	762914	1157301	1,449	0,69	10,82	10	4m
1028	763383	1158108	1,249	0,80	7,566	14	a
1029	763689	1157749	1,249	0,80	3,351	15	a
1030	764411	1157315	1,499	0,67	7,363	10	a
1033	764307	1159206	1,149	0,87	1,963	9	a
1035	765308	1158620	1,449	0,69	4,548	15	a
1036	765773	1158356	1,149	0,87	3,582	14	a

Estación	UTM_E	UTM_N	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Amplitud rel. H/V	Nro. de ventanas	Selección
1037	766266	1158293	0,65	1,54	2,602	15	a
1039	767264	1158334	1,109	0,90	4,51	20	a
1040	767731	1158183	1,499	0,67	1,017	8	5 min
1041	768086	1157827	0,75	1,33	2,876	16	a
1042	768496	1157515	1,149	0,87	3,211	8	1m
1043	769006	1157439	1,299	0,77	11,8	7	a
1044	769544	1157423	1,299	0,77	8,63	17	a
1045	770106	1157406	1,249	0,80	5,05	11	a
1046	770678	1157525	1,299	0,77	4,231	17	a
1047	771232	1157757	0,75	1,33	2,165	8	a
1048	771729	1157849	0,7	1,43	2,099	16	a
1049	772171	1157731	0,6	1,67	2,852	10	2m
1052	764779	1159250	1,449	0,69	3,14	9	a
1053	765348	1159096	1,399	0,71	2,131	7	7m
1054	765319	1159703	1,449	0,69	4,271	11	a
1056	766237	1158701	0,65	1,54	3,428	19	a
1057	766691	1158636	1,149	0,87	3,224	10	2m
1058	767176	1158685	0,65	1,54	2,936	13	a
1059	766966	1159280	0,5	2,00	2,329	19	a
1060	767075	1159676	0,7	1,43	1,855	19	a
1061	767516	1159444	0,7	1,43	1,704	8	a
1062	767465	1160000	0,55	1,82	2,722	9	v 20 seg.
1063	767471	1160535	1,299	0,77	5,827	11	v 20 seg.
1064	767927	1159013	0,5	2,00	3,239	9	3m
1065	767666	1158737	0,65	1,54	2,259	20	a
1066	768224	1158793	0,6	1,67	2,273	15	a
1067	768753	1158763	0,5	2,00	2,967	15	a
1070	766928	1160649	1,249	0,80	5,451	15	a
1071	766976	1161126	4,098	0,24	2,075	18	a
1072	766929	1161591	4,748	0,21	4,018	19	a
1077	766945	1160153	0,55	1,82	2,156	10	a
1078	766405	1160532	1,149	0,87	3,857	13	a

Estación	UTM_E	UTM_N	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Amplitud rel. H/V	Nro. de ventanas	Selección
1078	766405	1160532	1,149	0,87	3,857	13	a
1082	767977	1160337	1,399	0,71	2,129	19	a
1083	767975	1160019	0,7	1,43	2,054	8	3m
1084	768243	1160001	0,7	1,43	1,685	10	a
1085	768129	1159444	0,6	1,67	2,58	10	a
1086	768513	1159982	0,7	1,43	1,414	15	a
1087	769019	1159946	0,5	2,00	2,097	13	a
1088	769007	1160435	2,999	0,33	2,212	12	a
1090	769541	1158948	1,149	0,87	2,123	19	a
1091	769423	1159504	1,199	0,83	4,214	7	1m
1092	769444	1159912	0,55	1,82	2,301	14	a
1093	769035	1159605	0,45	2,22	2,564	9	3m
1094	769030	1159353	0,45	2,22	2,901	8	8m v 20 seg
1096	768965	1159035	0,55	1,82	1,773	11	a
1097	769102	1158519	0,5	2,00	3,05	20	a
1098	769421	1158516	0,5	2,00	3,702	10	a
1099	769041	1157847	1,049	0,95	3,402	9	5 min
1100	768583	1158209	1,099	0,91	7,426	15	a
1102	766728	1157764	0,85	1,18	2,066	19	a
1104	764866	1158590	1,245	0,80	3,802	13	a
1105	765375	1158058	1,299	0,77	4,542	7	5 min
1106	765543	1157641	1,399	0,71	3,866	19	a
1107	766198	1157811	0,85	1,18	1,961	12	a
1108	766331	1157370	0,8	1,25	2,381	15	a
1109	766812	1157173	0,65	1,54	2,818	18	a
1113	770560	1161010	1,399	0,71	3,139	10	1m
1114	770602	1160630	1,299	0,77	2,508	11	a
1116	770182	1160272	1,399	0,71	3,901	12	a
1117	769930	1159775	1,099	0,91	5,19	18	a
1118	769658	1160493	1,149	0,87	4,331	19	a
1119	769805	1159299	1,099	0,91	4,203	7	4m
1120	769870	1158792	0,5	2,00	3,979	15	a

Estación	UTM_E	UTM_N	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Amplitud rel. H/V	Nro. de ventanas	Selección
1121	769878	1158373	0,8	1,25	2,565	14	a
1123	770786	1160291	1,199	0,83	4,564	15	a
1124	770458	1159803	1,199	0,83	2,65	15	a
1125	770403	1159308	0,65	1,54	2,633	14	a
1126	770823	1158732	0,5	2,00	3,591	9	a
1127	769763	1157826	0,9	1,11	2,699	14	a
1129	770286	1158101	0,65	1,54	2,815	19	a
1130	770492	1158309	0,55	1,82	2,995	14	a
1131	770951	1158132	0,65	1,54	3,376	13	a
1132	771457	1158053	0,75	1,33	2,813	9	2m
1134	772047	1158500	0,65	1,54	2,477	15	a
1135	772303	1158623	0,7	1,43	1,622	13	a
1136	772345	1159012	0,65	1,54	2,269	6	4m
1137	772478	1159524	0,7	1,43	1,601	19	a
1138	771628	1158627	0,55	1,82	2,53	15	a
1139	772005	1158060	0,9	1,11	3,964	11	v 20 seg. + 3m
1144	770220	1156937	2,849	0,35	3,918	9	a
1146	770232	1155866	1,849	0,54	2,41	9	9m v 20 s
1147	770753	1155676	2,899	0,34	4,28	8	8m v 20 seg
1148	771307	1155378	1,849	0,54	2,72	8	8m v 20 seg
1149	771724	1155175	1,699	0,59	1,465	8	8m v 20 seg
1150	772099	1154822	1,449	0,69	2,915	3	2 min 20 seg
1155	769962	1157022	2,849	0,35	2,035	15	a
1156	769906	1156127	3,598	0,28	5,89	8	2m
1157	769492	1157976	1,049	0,95	3,726	20	a
1158	769216	1156911	1,299	0,77	3,662	18	a
1159	769399	1156443	1,949	0,51	3,807	11	a
1160	769179	1156171	2,399	0,42	4,343	12	a
1164	768510	1156325	5,947	0,17	2,899	16	a
1165	768136	1156356	5,797	0,17	2,703	18	a
1166	767680	1156357	4,448	0,22	1,711	10	3m
1167	767205	1156465	5,747	0,17	1,796	19	a

Estación	UTM_E	UTM_N	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Amplitud rel. H/V	Nro. de ventanas	Selección
1168	766775	1156744	5,797	0,17	2,713	20	a
1170	765766	1156900	1,399	0,71	2,78	19	a
1173	765641	1157341	1,449	0,69	4,237	17	a
1174	765134	1156803	1,149	0,87	2,547	19	a
1175	764634	1157027	1,449	0,69	4,089	18	a
1176	763986	1157069	1,299	0,77	3,625	21	a
1177	763943	1157786	1,499	0,67	2,238	8	20 seg
1180	766512	1155958	2,649	0,38	1,81	20	a
1181	766401	1156359	2,049	0,49	2,075	16	a
1182	770226	1158885	0,6	1,67	3,832	6	5 min 20 seg
1184	771116	1160755	1,199	0,83	4,136	14	a
1185	771678	1160814	1,449	0,69	1,948	19	a
1188	768300	1160470	1,449	0,69	2,534	16	a
1189	768613	1159514	0,45	2,22	2,995	15	a
1190	766151	1160387	1,449	0,69	7,078	15	a
1191	767162	1160083	0,65	1,54	2,53	13	a
1192	765665	1164342	2,699	0,37	1,581	8	a
1193	766547	1159419	0,9	1,11	3,05	18	a
1194	766737	1159064	0,6	1,67	3,19	18	a
1195	766277	1159087	1,149	0,87	4,989	19	a
1196	766183	1159477	1,149	0,87	3,049	17	a
1198	765787	1159569	1,149	0,87	2,524	17	a
1199	765323	1159445	1	1,00	9,98	17	a
1211	767579	1157804	1,099	0,91	2,77	16	a
1212	763325	1157240	1,149	0,87	3,935	14	a
1213	763431	1157557	1,399	0,71	4,891	17	a
1214	764460	1157684	1,399	0,71	2,355	11	a
1215	770275	1157732	0,65	1,54	4,287	19	a
1216	764411	1158156	1,449	0,69	2,872	8	a
1217	767579	1157804	0,45	2,22	4,454	9	a
1218	767684	1159732	0,6	1,67	2,229	9	v 20 seg 5m
1219	767304	1159061	0,5	2,00	2,065	13	a

Estación	UTM_E	UTM_N	Frecuencia (Hz)	Período (s)	Amplitud rel. H/V	Nro. de ventanas	Selección
1220	770275	1157732	0,6	1,67	1,771	10	a
1227	770846	1159668	1,199	0,83	1,913	13	a

Tabla B.2. Perfiles período-profundidad

Perfil	Estación	UTM_E	UTM_N	Período (s)	Profundidad (m)
1 (N-S) UTM= 770000	1116	770182	1160272	0,7	-77
	1117	769930	1159775	0,9	-102
	1119	769805	1159299	0,9	-181
	1120	769870	1158792	2,0	-253
	1121	769878	1158373	1,3	-272
	1129	770286	1158101	1,5	-242
	1045	770106	1157406	0,8	-56
	1144	770220	1156937	0,4	-31
	1155	769962	1157022	0,4	-31
2 (N-S) UTM=769000	1156	769906	1156127	0,3	-14
	1088	769007	1160435	0,3	-74
	1087	769019	1159946	2,0	-248
	1093	769035	1159605	2,2	-308
	1094	769030	1159353	2,2	-333
	1096	768965	1159035	1,8	-359
	1097	769102	1158519	2,0	-303
	1099	769041	1157847	1,0	-82
	1043	769006	1157439	0,8	-40
	1158	769216	1156911	0,8	-27

Tabla B.2. (continuación)

Perfil	Estación	UTM_E	UTM_N	Período (s)	Profundidad (m)
3 A:(763600,1159700) B:(772100,1161000)	1023	763898	1158054	0,69	-200
	1029	763689	1157749	0,8	-201
	1035	765308	1158620	0,69	-193
	1056	766237	1158701	1,54	-158
	1085	768129	1159444	1,66	-249
	1087	769019	1159946	2	-262
	1092	769444	1159912	1,81	-235
	1114	770602	1160630	0,77	-46
	1116	770182	1160272	0,71	-67
	1184	771116	1160755	0,83	-19
	1185	771678	1160814	0,69	-13
	1194	766737	1159064	1,6	-235
	1216	764411	1158156	0,69	-198
	1219	767304	1159061	2	-252

En el disco compacto anexo a esta tesis se encuentra la base de datos de ruido sísmico ambiental en código ASCII.

APÉNDICE C

**Parámetros de ajuste del gravímetro Scintrex CG-3 y datos empleados en el
procesamiento gravimétrico.**

GRAVÍMETRO DIGITAL SCINTREX AUTOGRAV CG-3

El Autograv es un gravímetro automatizado basado en microprocesadores y que tiene un rango de medición hasta de 7000 miligales y una resolución de lectura de 0.005 miligales. Esto permite que el equipo pueda ser utilizado para investigaciones de campo detalladas y/o estudios de gran escala regional o geodésicos.

El Autograv CG-3 obtiene una lectura promediando continuamente una serie de muestras de un segundo. La lectura es mostrada en una pantalla de cristal líquido directamente en miligales. Los datos son almacenados en una memoria física del equipo y puede ser enviada a una impresora o computadora.

Cuando se prepara al gravímetro para una lectura, los sensores de “tilts” electrónicos proveen gran precisión y son más sencillos que las burbujas de nivel. El gravímetro despliega en pantalla la desviación de los sensores, lo que permite una perfecta nivelación.

El gravímetro dispone de una excelente protección ante los diversos cambios de temperatura y presión a través de una cámara estabilizadora. El amplio rango de operación en cuanto a la temperatura (-40 °C a +45 °C) le permite al operador usar el Autograv en diversos ambientes. Debido a que el sensor está hecho de un cuarzo no magnético, el equipo no se ve afectado por variaciones del campo magnético.

Uno de los pasos previos a la adquisición de datos es la calibración del gravímetro, con el objetivo de verificar y garantizar la precisión de las lecturas obtenidas como el correcto funcionamiento del equipo. La calibración se realizó de la siguiente manera:

Compensación de Temperatura: debe ser revisada y ajustada para comprobar la estabilidad de la temperatura arrojando valores que se encuentren entre los rangos recomendados (+1,-1); de no ser así, se busca ajustar hasta lograr colocar el valor de temperatura en cero.

El cuarzo es el componente más sensible a la temperatura que posee el gravímetro con un coeficiente aproximado de -130 mGal/°C. Este resorte es protegido

de cambios en la temperatura del ambiente por dos termostatos que mantienen la temperatura del resorte Ts constante con una variación de 0,5 mK por debajo de las condiciones normales de operación. Los cambios en Ts son medidos usando un sensor de temperatura en buen contacto termal con el resorte. El valor de la temperatura es convertido a una señal digital, TEMP, y ésta a su vez es convertida a la señal compensada por temperatura.

$$TEC = TEMPCO \times TEMP$$

TEMPCO es el coeficiente de temperatura del instrumento en mGal/mK. El nuevo valor TEC es computarizado y aplicado después que la última muestra ha sido tomada. La temperatura TEMP del resorte puede ser observada directamente en la pantalla de cristal líquido.

Ajuste de la Corrección de los “Tilts”: la condición perfecta para el ajuste de los tilts es que ellos coincidan en cero; para ello, se debe ajustar la sensibilidad del equipo por medio del teclado numérico y los sensores se ajustaran mecánicamente.

El error cero X_E y Y_E son medidos y ajustados cada uno por separado comenzando con el eje X. Para realizar estos ajustes se debe inicializar el sistema fijando los siguientes parámetros:

PARÁMETRO	ESTADO
MODO	CAMPO
TIEMPO DE LECTURA	120
CORRECCIÓN DEL TILT	ACTIVADO
CORRECCIÓN DE MAREA	ACTIVADO
AUTO RECHAZO	ACTIVADO
STOP: ERR. < LIM	DESACTIVADO

Metodología (X_E):

- ✓ Colocar el Autograv sobre el trípode en un lugar tranquilo con un suelo sólido.
- ✓ Presionar START. Los valores de los TILTS aparecerán en pantalla.
- ✓ Ajustar el trípode hasta fijar $X = 150 \pm 10$ y $Y = 0 \pm 5$
- ✓ Esperar 5 minutos y luego anotar el valor exacto (X_1) que se muestra en la pantalla.
- ✓ Tomar una lectura y registrar el valor como R_1 .
- ✓ Rotar la base giratoria del frente en sentido contrario de las agujas del reloj hasta poder fijar el valor $X = -150 \pm 10$ y de ser necesario ajustar la base giratoria de fondo hasta $Y = 0 \pm 5$
- ✓ Esperar por 5 minutos y anotar el valor exacto (X_2) que se muestra en la pantalla.
- ✓ Tomar una lectura y registrar el valor como R_2 .
- ✓ Calcular el error cero usando la siguiente fórmula:

$$X_E = \frac{R_2 - R_1}{X_1 - X_2} \times 43386$$

donde X_1 , X_2 y X_E se encuentran en segundos de arco y R_1 , R_2 en mGal.

Posteriormente, se hace el ajuste para (Y_E). La metodología es esencialmente la misma.

Metodología (Y_E):

- ✓ Presionar START. Los valores de los TILTS aparecerán en pantalla.
- ✓ Rotar la base giratoria del fondo hasta fijar el valor $Y = 150 \pm 10$ y de ser necesario ajustar la base giratoria de fondo hasta $X = 0 \pm 5$

- ✓ Esperar 5 minutos y luego anotar el valor exacto (Y_1) que se muestra en la pantalla.
- ✓ Tomar una lectura y registrar el valor como R_1 .
- ✓ Ajustar la base giratoria de fondo hasta $Y = -150 \pm 10$ y de ser necesario ajustar la base giratoria de fondo hasta $X = 0 \pm 5$
- ✓ Esperar por 5 minutos y anotar el valor exacto (Y_2) que se muestra en la pantalla.
- ✓ Tomar una lectura y registrar el valor como R_2 .
- ✓ Calcular el error cero usando la siguiente fórmula:

$$Y_E = \frac{R_2 - R_1}{Y_1 - Y_2} \times 43386$$

donde Y_1 , Y_2 y Y_E se encuentran en segundos de arco y R_1 , R_2 en mGal.

Corrección de Deriva: para ello se niveló perfectamente el gravímetro y se colocó en MODE CICLING de forma que el equipo tomara medidas automáticamente cada 600 segundos (15 minutos) durante 36 horas. Luego se transfirió la data al computador y se graficó la lectura registrada vs. el período de tiempo en minutos. De esta manera se obtuvo la gráfica de deriva del instrumento.

Sí se registran dos mediciones diferentes en dos tiempos t_1 y t_2 , en un punto en donde no deberían existir cambios en el valor de la gravedad, entonces la diferencia radica en la tasa de deriva, d , del instrumento:

$$RU(\bar{t}_2) - RU(\bar{t}_1) = d(\bar{t}_2 - \bar{t}_1)$$

Para eliminar los efectos de deriva del instrumento, la corrección de deriva

$$DC(t) = (t - t_s)DRIFT$$

es sustraída de cada muestra SU incorrecta.

DRIFT es la constante de deriva con unidades de mGal/24hrs, t_s es la corrección de deriva al momento inicial y t es el tiempo al cual las muestras han sido tomadas.

Con la corrección de deriva aplicada, la ecuación anterior queda:

$$R(\bar{t}) - R(\bar{t}_1) = RU(\bar{t}_2) - DC(\bar{t}_2) - RU(\bar{t}_1) + DC(\bar{t}_1)$$

$$= \left(d(\bar{t}_2 - \bar{t}_1) - DRIFT(\bar{t}_2 - \bar{t}_1) \right)$$

Sí la corrección de deriva está apropiadamente ajustada:

$$DRIFT = d$$

$$R(\bar{t}_2) - R(\bar{t}_1) = 0$$

Para mayor información del equipo referirse al manual de usuario del gravímetro marca Scintrex, modelo CG-3.

Figura C.1. Curva de deriva del gravímetro GC-3 (04 de marzo de 2004)

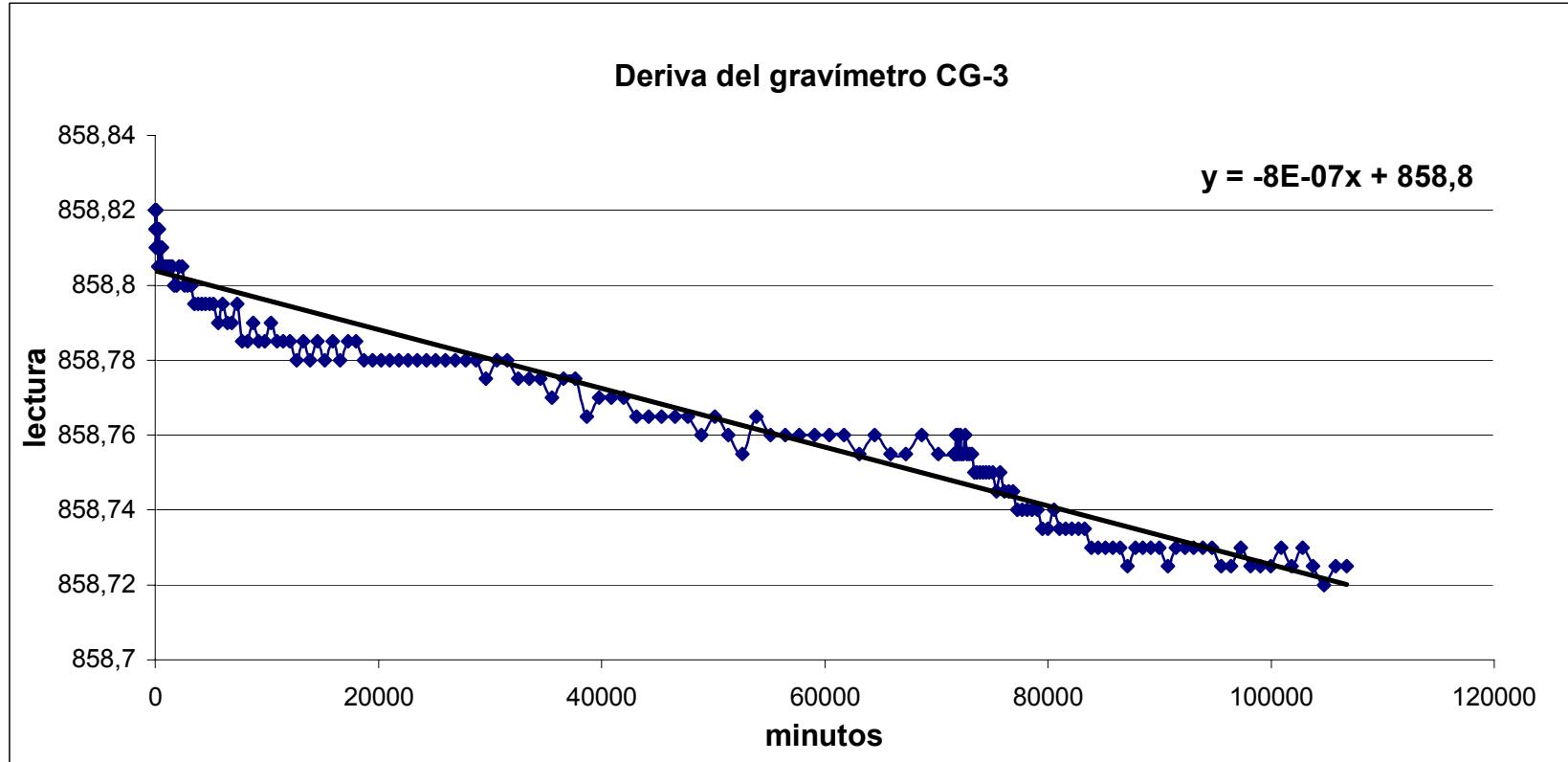


Tabla C.1. Datos de anomalía de Bouguer, con las componentes regional y residual.

Estación	UTM_E	UTM_N	Altura	CT	AB (mg)	Residual	Regional
Guatire	766760	1158183	336,4	1,248	17,112	-2,353	19,466
1002	763986	1160916	432	3,434	27,430	3,716	23,715
1003	764507	1160362	400	2,093	25,949	3,084	22,865
1004	764206	1160526	400	2,159	25,225	2,069	23,156
1005	763622	1160797	460	2,764	28,596	4,935	23,661
1006	763941	1160384	420	1,999	26,160	3,115	23,046
1007	764455	1159970	379,8	2,042	25,660	3,283	22,377
1008	764026	1160161	415	2,304	24,253	1,515	22,738
1009	764086	1159618	354	1,645	23,854	1,827	22,027
1010	763446	1160074	370	3,161	25,964	3,181	22,783
1011	763813	1159742	351	1,908	24,471	2,212	22,259
1012	763784	1159331	339,2	1,628	22,669	0,928	21,741
1013	763318	1159294	332	2,019	22,490	0,670	21,820
1014	763805	1158882	328	1,708	21,782	0,620	21,161
1015	763315	1158890	327	2,105	22,135	0,830	21,305
1018	764418	1158908	330	1,577	21,532	0,504	21,028
1019	763836	1158398	328	1,429	20,924	0,390	20,533
1020	764322	1158377	315,5	1,341	19,247	-1,128	20,375
1021	764522	1157926	314,5	1,769	18,735	-1,009	19,743
1022	764710	1157465	314,5	1,671	17,521	-1,582	19,103
1023	763898	1158054	345,5	1,758	19,730	-0,346	20,076
1024	763333	1158458	350	1,200	19,210	-1,536	20,747
1025	762914	1157301	395	1,630	27,624	8,244	19,380
1028	763383	1158108	355	1,200	20,500	0,215	20,285
1029	763689	1157749	384	1,500	19,182	-0,561	19,743
1030	764411	1157315	362,5	1,971	18,772	-0,220	18,992
1033	764307	1159206	346	1,809	22,455	1,015	21,440
1034	764848	1158866	340	1,564	20,281	-0,578	20,858
1035	765308	1158620	355	1,165	18,829	-1,590	20,419

Estación	UTM_E	UTM_N	Altura	CT	AB (mg)	Residual	Regional
1036	765773	1158356	351	1,106	17,554	-2,400	19,954
1037	766266	1158293	342	1,091	16,637	-3,103	19,740
1038	766769	1158311	338,4	1,130	17,281	-2,346	19,627
1039	767264	1158334	324	1,042	15,424	-4,098	19,522
1040	767731	1158183	320	1,100	16,060	-3,143	19,203
1041	768086	1157827	305	1,416	15,683	-2,968	18,651
1042	768496	1157515	300	1,395	17,271	-0,869	18,140
1043	769006	1157439	300	1,372	19,340	1,435	17,905
1044	769544	1157423	299,4	1,408	19,998	2,260	17,738
1045	770106	1157406	300	1,419	19,450	1,885	17,565
1046	770678	1157525	319,8	1,402	20,868	3,307	17,561
1047	771232	1157757	327	1,466	18,455	0,747	17,708
1048	771729	1157849	350	1,597	19,320	1,629	17,691
1049	772171	1157731	380	1,440	21,004	3,584	17,420
1052	764779	1159250	367,6	1,364	21,557	0,189	21,368
1053	765348	1159096	360	1,487	21,301	0,283	21,017
1054	765319	1159703	376,4	1,113	22,334	0,533	21,801
1055	765778	1158897	359,8	1,331	20,386	-0,260	20,646
1057	766691	1158636	340,6	1,037	17,124	-2,940	20,064
1058	767176	1158685	322	0,938	16,619	-3,376	19,995
1059	766966	1159280	320,4	1,242	18,436	-2,378	20,814
1060	767075	1159676	323	1,168	19,782	-1,508	21,290
1061	767516	1159444	320,2	1,202	19,721	-1,153	20,874
1062	767465	1160000	319,2	1,820	20,427	-1,172	21,599
1063	767471	1160535	325,6	1,588	21,438	-0,845	22,282
1064	767927	1159013	311	1,499	17,798	-2,413	20,211
1065	767666	1158737	320	1,208	15,824	-4,104	19,928
1066	768224	1158793	303	1,260	16,238	-3,611	19,849
1067	768753	1158763	300	1,359	16,183	-3,484	19,668
1070	766928	1160649	337,4	1,270	24,875	2,300	22,575
1071	766976	1161126	339	2,185	26,919	3,747	23,172

Estación	UTM_E	UTM_N	Altura	CT	AB (mg)	Residual	Regional
1072	766929	1161591	350	2,257	27,557	3,778	23,780
1077	766945	1160153	333	1,652	23,153	1,217	21,936
1078	766405	1160532	340	1,430	23,909	1,341	22,568
1079	765790	1160315	360	1,611	24,553	2,097	22,456
1082	767977	1160337	338	1,344	19,674	-2,217	21,891
1083	767975	1160019	335	1,537	19,499	-1,986	21,485
1084	768243	1160001	338	1,532	19,203	-2,186	21,390
1085	768129	1159444	314,4	1,160	18,865	-1,843	20,708
1086	768513	1159982	332,2	1,725	19,234	-2,059	21,293
1087	769019	1159946	327	1,569	18,756	-2,354	21,109
1088	769007	1160435	357	1,510	23,525	1,787	21,739
1090	769541	1158948	319	1,759	16,012	-3,679	19,691
1091	769423	1159504	332	1,339	17,396	-3,037	20,433
1092	769444	1159912	331	1,648	18,578	-2,371	20,950
1093	769035	1159605	320	1,062	18,177	-2,491	20,668
1094	769030	1159353	319	1,307	18,339	-2,009	20,348
1095	769018	1159896	324	1,505	18,927	-2,118	21,045
1096	768965	1159035	317	1,508	15,479	-4,479	19,958
1097	769102	1158519	303	1,109	15,778	-3,483	19,261
1098	769421	1158516	307	1,205	15,777	-3,393	19,170
1099	769041	1157847	299,8	1,304	18,204	-0,213	18,418
1100	768583	1158209	300	1,440	16,814	-2,191	19,004
1102	766728	1157764	339,8	1,241	16,684	-2,254	18,938
1103	767214	1158065	320	1,251	17,043	-2,149	19,192
1104	764866	1158590	339,8	1,177	19,249	-1,251	20,500
1105	765375	1158058	346	1,533	18,011	-1,669	19,681
1106	765543	1157641	345	1,263	18,704	-0,397	19,102
1107	766198	1157811	335	1,332	17,947	-1,195	19,142
1108	766331	1157370	328	1,489	17,848	-0,693	18,541
1109	766812	1157173	305	2,159	17,682	-0,477	18,160
1112	770764	1161466	337,2	3,552	25,952	3,371	22,581

Estación	UTM_E	UTM_N	Altura	CT	AB (mg)	Residual	Regional
1113	770560	1161010	334	3,237	25,278	3,225	22,053
1114	770602	1160630	319,8	2,383	23,186	1,631	21,555
1115	770186	1161259	360	2,942	26,355	3,883	22,472
1116	770182	1160272	315,2	2,043	22,243	1,033	21,211
1117	769930	1159775	313	1,643	20,267	-0,377	20,644
1118	769658	1160493	340	2,228	23,656	2,020	21,636
1119	769805	1159299	300	1,740	17,015	-3,053	20,068
1120	769870	1158792	299	1,455	16,393	-3,009	19,402
1121	769878	1158373	299,8	1,425	16,578	-2,286	18,864
1123	770786	1160291	316	2,786	22,800	1,729	21,071
1124	770458	1159803	319	1,664	20,795	0,259	20,535
1125	770403	1159308	312	1,817	18,765	-1,152	19,918
1126	770823	1158732	345	1,445	16,691	-2,375	19,067
1127	769763	1157826	299,4	1,379	18,322	0,127	18,194
1129	770286	1158101	328	2,200	16,590	-1,815	18,405
1130	770492	1158309	314	1,393	16,610	-2,006	18,615
1131	770951	1158132	339,8	1,344	18,530	0,266	18,264
1132	771457	1158053	346	1,519	16,295	-1,731	18,026
1134	772047	1158500	385	1,545	18,035	-0,402	18,437
1135	772303	1158623	399,8	1,537	20,997	2,471	18,526
1136	772345	1159012	431	2,073	18,033	-0,979	19,013
1137	772478	1159524	480	2,438	20,533	0,901	19,631
1138	771628	1158627	386,8	1,442	16,443	-2,271	18,714
1139	772005	1158060	359,8	1,553	18,695	0,809	17,886
1144	770220	1156937	311	1,669	20,629	3,696	16,933
1145	770043	1156427	299	2,246	18,337	2,007	16,329
1146	770232	1155866	296	3,614	18,377	2,817	15,560
1147	770753	1155676	284	4,913	17,097	1,921	15,175
1148	771307	1155378	280	5,606	16,478	1,834	14,644
1149	771724	1155175	287	5,396	17,664	3,392	14,271

Estación	UTM_E	UTM_N	Altura	CT	AB (mg)	Residual	Regional
1150	772099	1154822	281	6,905	16,370	2,653	13,717
1155	769962	1157022	299	1,676	19,793	2,681	17,112
1156	769906	1156127	289,4	3,402	18,071	2,089	15,982
1157	769492	1157976	297,4	1,498	17,749	-0,711	18,460
1158	769216	1156911	299	1,599	19,890	2,718	17,172
1159	769399	1156443	299,2	2,269	19,561	3,037	16,524
1160	769179	1156171	300	3,669	18,577	2,342	16,236
1164	768510	1156325	299,4	3,558	19,348	2,734	16,614
1165	768136	1156356	304	3,600	18,698	1,944	16,754
1166	767680	1156357	305	3,600	18,586	1,706	16,879
1167	767205	1156465	307	2,783	18,331	1,185	17,146
1168	766775	1156744	305	2,205	18,585	0,965	17,620
1169	766304	1156942	315	1,934	18,534	0,533	18,001
1170	765766	1156900	319,8	1,935	18,213	0,119	18,093
1173	765641	1157341	310	1,588	17,700	-0,992	18,691
1174	765134	1156803	320	2,558	17,678	-0,463	18,140
1175	764634	1157027	358	2,424	17,431	-1,131	18,562
1176	763986	1157069	383	2,207	18,699	-0,093	18,793
1177	763943	1157786	340	1,851	19,308	-0,413	19,721
1181	766401	1156359	370	2,517	18,299	1,070	17,229
1184	771116	1160755	336	3,502	24,421	2,845	21,576
1185	771678	1160814	380	5,859	26,948	5,448	21,499
1212	763325	1157240	408	1,778	19,170	-0,021	19,191
1213	763431	1157557	395	1,433	19,810	0,244	19,567
1214	764460	1157684	340	1,456	18,523	-0,928	19,450
1216	764411	1158156	314	1,741	18,992	-1,076	20,068
1220	770275	1157732	312	1,308	17,834	-0,102	17,936
1221	768571	1159239	310	1,545	17,403	-2,922	20,325
1223	767304	1159061	320,8	1,350	16,533	-3,908	20,441
1224	765758	1157821	323	1,393	17,928	-1,346	19,275
1227	770846	1159668	326	1,959	18,911	-1,347	20,258

Esquema C.1. Ejemplo archivo de entrada en IGMAS del modelo gravimétrico. Solo se muestra el encabezado y el primer plano definido. El archivo completo se encuentra en el disco compacto adjunto al trabajo.

```
#gmdf_ascii

unit CaM
density 2.80000
unit ASjg
density 2.60000
unit Tmt
density 2.00000
unit QG1
density 1.90000
unit QG2
density 1.80000
unit Aluvion
density 1.60000
reference_density 2.55000

section First_section
point 1157000.00000 -872000.00000
point 1161000.00000 -872000.00000
coordinates
    1 -10000.00000      0.00000
    2 -9000.00000      0.00000
    3 -1700.62500      0.91922
    4  207.87500       0.00000
    5  600.00000       0.00000
    6  800.00000       0.00000
    7  3300.00000      0.00000
    8  4500.00000      0.00000
    9  9300.00000      0.00000
   10 10000.00000      0.00000
   11 -10000.00000     -20.00000
   12 -9100.00000     -20.00000
   13 -1659.75000     -499.16754
   18  9200.00000     -30.00000
   19 10000.00000     -30.00000
   20 -1696.87500      0.15805
   21 1729.00000     -296.21729
```

22	3093.37500	-38.70778									
23	-10000.00000	-500.00000									
24	10000.00000	-500.00000									
25	429.25000	-3.02382									
26	1330.00000	-198.04414									
27	2237.50000	-303.80054									
28	2547.37500	-197.94814									
29	2801.75000	-110.48130									
30	2045.75000	-338.20261									
unit Tmt											
back_only											
vertices											
1	2	12	11								
unit ASjg											
back_only											
vertices											
9	10	19	18								
unit CaM											
back_only											
vertices											
2	3	13	20	25	26	21	30	27	28	29	22
8	9	18	19	24	23	11	12				
unit QG2											
back_only											
vertices											
3	4	5	6	7	8	22	29	28	27	30	21
26	25	20	13								
section 2											
point 1157000.00000 -771000.00000											
point 1161000.00000 -771000.00000											
coordinates											
1	-10000.00000	0.00000									
2	-9000.00000	0.00000									
3	-1501.00000	0.00000									
5	-1422.37500	0.00000									
6	710.75000	0.00000									
7	3300.00000	0.00000									
8	4500.00000	0.00000									
9	9300.00000	0.00000									

10	10000.00000	0.00000
11	-10000.00000	-20.00000
12	-9100.00000	-20.00000
13	-1500.75000	-2.40359
16	974.00000	-3.02382
17	3128.00000	-0.89937
18	9200.00000	-30.00000
19	10000.00000	-30.00000
20	-1496.87500	-3.84970
21	2665.50000	-195.39780
22	3786.87500	-12.80241
23	-10000.00000	-500.00000
24	10000.00000	-500.00000
25	629.50000	-3.02382
26	1588.25000	-224.50722
27	1765.37500	-298.60394
28	2304.00000	-348.88385
29	2960.62500	-73.66756
30	3108.12500	-52.49706
31	3403.25000	-23.38764
32	2768.75000	-129.24007
33	2562.12500	-261.55557
34	2451.50000	-319.77441
35	2067.87500	-348.88385
36	1226.75000	-105.42328
37	1367.00000	-139.82529
38	1466.50000	-176.39355
39	-1460.37500	-499.16754

unit Tmt
 vertices
 1 2 12 11

unit ASjg
 vertices
 9 10 19 18

unit CaM
 vertices
 2 3 13 39 20 25 36 37 38 26 27 35
 28 34 33 21 32 29 30 31 22 8 9 18
 19 24 23 11 12

unit QG2
 front_only

```
vertices
 3  5  6  7  8  22 31 30 29 32 21 33
 34 28 35 27 26 38 37 36 25 20 39 13

unit QG2 #2
back_only
vertices
 5  6  16 17  7  8  22 31 30 29 32 21
 33 34 28 35 27 26 38 37 36 25 20 39
13

unit Aluvion
back_only
vertices
 3  5  13

unit Aluvion #2
back_only
vertices
 6  7  17 16
```

APÉNDICE D
Fotos del área de estudio



Ávila

Imagen D.1. Zona central del valle de Guatire. Tomada desde el cerro Colorado 700 m.s.n.m rumbo aprox.: E-W.



Imagen D.3. Arriba: afloramiento sedimentos perfil C01. Medio: Realización perfil E01, terrazas aluvionales. Abajo: Realización del perfil G01 con algunas dificultades con el equipo.



Imagen D.4. Arriba: medición de ruido zona de aluviones, sitio donde se realizó el perfil F01, rumbo aprox. E-W, vista norte. Medio: mismo sitio, vista hacia el sur. Abajo: medición de ruido al sur de Guatire, vía EL Carmen.