

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE REFRACCIÓN SÍSMICA CON FINES GEOTÉCNICOS EN EL SITIO DE PRESA DEL EMBALSE BOTALÓN, MUNICIPIO LIBERTAD, ESTADO ANZOÁTEGUI

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Tovar G., Angelvis, G

Caracas, noviembre de 2010

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE REFRACCIÓN SÍSMICA CON FINES GEOTÉCNICOS EN EL SITIO DE PRESA DEL EMBALSE BOTALÓN, MUNICIPIO LIBERTAD, ESTADO ANZOÁTEGUI

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Antonio Ughi

TUTOR INDUSTRIAL: Ing. Iván Veloso

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
Para optar al Título
de Ingeniero Geofísico
Por el Br. Tovar G., Angelvis

Caracas, noviembre de 2010

Caracas, noviembre de 2010

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Angelvis G. Tovar G., titulado:

**“ESTUDIO DE REFRACCIÓN SÍSMICA CON FINES GEOTÉCNICOS DEL
SITIO DE PRESA DEL EMBALSE BOTALÓN, MUNICIPIO LIBERTAD,
ESTADO ANZOÁTEGUI”**

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.

Prof. Jesús González

Jurado

Prof. Lenín González

Jurado

Prof. Antonio Ughi.

Tutor Académico

DEDICATORIA

A mis hermanos;

Corlam, Anyer e Isa.

A tu memoria, Melvis Eduardo, eres el ángel que guía mis pasos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a la Virgen.

A mis padres, hermanos, abuelos y demás familiares, jamás dejaré de estar agradecido.

A la ilustre Universidad Central de Venezuela mi *alma mater*; a mi tutor académico; Profesor Antonio Ughi y a todo el plantel docente del Departamento y Escuela de Geología, Minas y Geofísica.

A la Fundación Laboratorio Nacional de Hidráulica; a mi tutor industrial Ingeniero Iván Veloso, a mis compañeros y amigos del Departamento de Geociencias, SIG y a todos aquellos quienes me dieron su apoyo y atención.

Quiero agradecer muy especialmente a las personas que me brindan su amistad, apoyo, comprensión y cariño; Airam, Ivana, Ana, Diego, Anne, Marcos, Mariam, Yuniev, Issis, César, Verónica, Gerardo, Laura y Orianna.

A mis compañeros y amigos de la universidad y la vida; Morella, Maybelis, Leonardo, Albenis, Clemente, Patricia, Juanpablo, José Gregorio, Mariangélica, Robert, Rosana, Victor, Derick, Jorge, Atilio, Youleissy, Franklin, César, Yohana, Roberto, Sinaí, Andrés, Sofía, Angel, Mauricio, Kris, Arturo, Irwin, Yohanna, Milagros, Pablo, Tarek y otros muchos a quienes no alcanzo a nombrar.

¡Muchas Gracias!

Tovar G., Angelvis G.

**ESTUDIO DE REFRACCIÓN SÍSMICA CON FINES
GEOTÉCNICOS EN EL SITIO DE PRESA DEL EMBALSE
BOTALÓN, MUNICIPIO LIBERTAD, ESTADO ANZOÁTEGUI**

**Tutor Académico: Prof. Antonio Ughi. Tutor Industrial: Ing. Iván Veloso. Tesis.
Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica.
Año 2010, 83p.**

Palabras Clave: refracción sísmica, represa, Embalse Botalón, perfil sísmico.

Resumen

La presente investigación contempla el estudio de refracción sísmica con fines geotécnicos en el sitio donde se construirá el paramento que repesará el agua del Embalse Botalón, del pueblo de Botalón, municipio Libertad, estado Anzoátegui, área en la que se levantaron 960 m de líneas sísmicas. Para el procesamiento de los datos se empleó el paquete de programas de la marca Seisimager™ (PickWin®, Plotrefa® y WaveEq®) dando como resultados 18 perfiles sísmicos, 2 tomografías sísmicas y un modelo de velocidades integrado con la información geotécnica disponible (6 perforaciones y 1 calicata). El modelo de velocidades dio como resultado un sustrato compuesto por 3 capas diferenciadas entre sí, la primera (perfil de suelo) presenta un promedio de velocidad de propagación de onda P de 294 m/s para el estribo derecho y 299 m/s para el izquierdo, la segunda capa (roca descompuesta blanda) tiene una velocidad promedio de 861 m/s para el estribo derecho y 1613 para el izquierdo, por último la tercera capa (roca fresca blanda) presenta velocidades promedio de 1310 m/s y 2240 m/s para los estribos derecho e izquierdo respectivamente, estas diferencias se deben a la génesis de la roca, pues en el margen derecho del río afloran rocas del Miembro Revoltijo y en el izquierdo del Miembro Salomón (ambas de la formación terciaria Quiamare). Con los valores obtenidos de velocidades de onda P y onda S se calcularon los módulos dinámicos que arrojan resultados no exhaustivos pero mediante un análisis cualitativo se concluye que la elasticidad del material es muy pobre y por lo que se recomiendan realizar nuevas campañas de adquisición de datos geológico - geotécnicos en el vaso de la presa así como ensayos de laboratorio para determinar los módulos elásticos por métodos estáticos.

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	I
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
TABLA DE CONTENIDOS	IV
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABLAS	IX
CAPITULO I	1
1.1 Introducción	2
CAPÍTULO II	6
2.1 Formación Quiamare	8
2.2 Formación Uchirito	8
2.3 Geografía física del vaso y sitio de la presa	9
2.4 Geología local	11
2.5 Caracterización geotécnica del macizo	19
CAPÍTULO III	20
3.1 Antecedentes	21
3.1.1 Geología – Geotecnia	21
3.1.2 Hidrología	21
3.1.3 Riego	22
3.2 Obras civiles – Presas	23
3.3 Refracción Sísmica	26
3.3.1 Módulos elásticos del material geológico	27
CAPÍTULO IV	30
4.1 Adquisición y control de calidad de datos sísmicos de refracción	31
4.2 Procesamiento de datos sísmicos de refracción	34
4.3 Interpretación de los datos sísmicos de refracción	39
4.4 Alcances y limitaciones	40

CAPÍTULO V	41
5.1 Presentación y análisis de resultados	42
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS	73
APÉNDICES	76
ANEXOS	86

LISTA DE FIGURAS

Figuras	Pág.
1.1 Esquema de Ubicación del sitio de presa.	2
1.2 Composición fotográfica del sitio de presa y vaso del embalse de Botalón.	5
2.1 Mapa Geológico – Geotécnico de la zona de estudio.	9
2.2 Foto satelital del sitio de ubicación de la presa, donde se ha diagramado el eje de la presa, los estribos y parte del embalse.	11
2.3 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-03.	12
2.4 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-05.	13
2.5 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-07.	14
2.6 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-08.	15
2.7 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-09.	16
2.8 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-13.	17
2.9 Perfil de suelo de la calicata C2.	18
2.10 Composición fotográfica de un afloramiento lutítico del miembro Revoltijo en el cauce del Río Querecual en el vaso de la presa.	19
3.1 Esquema general de la presa, los estribos y la ataguía que es la obra de desvío del río mientras se construye el cuerpo de la represa.	24
3.2 Esquema general del equipo de refracción sísmica.	26
3.3 Esquema del desplazamiento definido por el módulo de rigidez (G).	28
3.4 Esquema del desplazamiento definido por el módulo de Young (E).	28
3.5 Esquema del cambio de volumen definido por el módulo de Bulk (B).	29
4.1 Localización de los componentes del sitio de presa.	31
4.2 Arreglo sísmico de refracción, tipo end on.	33
4.3 Arreglo sísmico de refracción, tipo split spread – end on.	33
4.4 Imagen del sismograma de la línea sísmica BOT10_01.	34
4.5 Imagen del sismograma de la línea sísmica BOT10_03.	35
4.6 Imagen de la dromocrónica proveniente del procesamiento de los datos del tendido T2.	36
4.7 Imagen del modelo de velocidades de onda P del tendido T2.	37
4.8 Imagen del modelo de velocidades de onda S del tendido T2.	38
4.9 Imagen de la tomografía sísmica del tendido T14.	39

4.9 Fotografía del funicular que sirve para acceder a la margen izquierda del Río Querecual.	40
5.1 Mapa de ubicación de los puntos medios de los tendidos levantados, perforaciones y calicata geotécnica, eje de la presa y estribos respecto al Río Querecual.	42
5.2 Imagen del modelo de velocidades del tendido T1 (N48°E), líneas sísmicas BOT10_01 y BOT10_02.	43
5.3 Imagen del modelo de velocidades del tendido T2 (N48°E), líneas sísmicas BOT10_03 y BOT10_04	44
5.4 Imagen del modelo de velocidades del tendido T3 (N48°E), líneas sísmicas BOT10_05 y BOT10_06.	45
5.5 Imagen del modelo de velocidades del tendido T4 (N46°E), líneas sísmicas BOT10_07 y BOT10_08	46
5.6 Imagen del modelo de velocidades del tendido T5 (N46°E), líneas sísmicas BOT10_09 y BOT10_10.	47
5.7 Imagen del modelo de velocidades del tendido T6 (N52°E), líneas sísmicas BOT10_11 y BOT10_12.	48
5.8 Imagen del modelo de velocidades del tendido T7 (N55°E), líneas sísmicas BOT10_13 y BOT10_14	49
5.9 Imagen del modelo de velocidades del tendido T8 (N66°E), líneas sísmicas BOT10_15 y BOT10_16.	50
5.10 Imagen del modelo de velocidades del tendido T9 (N75°E), líneas sísmicas BOT10_17 y BOT10_18.	51
5.11 Imagen del modelo de velocidades del tendido T10 (N53°E), líneas sísmicas BOT10_19 y BOT10_20	52
5.12 Imagen del modelo de velocidades del tendido T11 (N53°E), líneas sísmicas BOT10_21 y BOT10_22.	53
5.13 Imagen del modelo de velocidades del tendido T13 (N42°E), líneas sísmicas BOT10_25 y BOT10_26.	54
5.14 Imagen del modelo de velocidades del tendido T14 (N35°E), líneas sísmicas BOT10_27, BOT10_28 y BOT10_29.	55
5.15 Imagen del modelo de velocidades del tendido T15 (S62°E), líneas sísmicas BOT10_30, BOT10_31. BOT10_32, BOT10_33 y BOT10_34.	56

5.16 Imagen compuesta por la intersección de las tomografías T14 y T15 (perpendiculares entre sí).	56
5.17 Imagen del modelo de velocidades del tendido T16 (N43°E), líneas sísmicas BOT10_35 y BOT10_36.	57
5.18 Imagen del modelo de velocidades del tendido T17 (N41°E), líneas sísmicas BOT10_37 y BOT10_38.	58
5.19 Imagen del modelo de velocidades del tendido T18 (N42°E), líneas sísmicas BOT10_39, BOT10_40, BOT10_41, BOT10_42, y BOT10_43.	59
5.20 Imagen del modelo de velocidades del tendido T19 (N55°W), líneas sísmicas BOT10_44 y BOT10_45.	60
5.21 Modelo de velocidades integrado del estribo izquierdo.	61
5.22 Modelo de velocidades integrado del estribo derecho.	62
Apéndice 1 Imagen de una terraza antigua. Punto AN-03 (tabla 7.1)	78
Apéndice 2 Columna estratigráfica punto de observación AN-06.	78
Apéndice 3 Composición fotográfica de la vista externa desde el lindero SO del estribo izquierdo.	79
Apéndice 4 Columna estratigráfica punto de observación AN-10.	79
Apéndice 5 Columna estratigráfica punto de observación AN-14.	80
Apéndice 6 Estructura de acuñamiento en la secuencia estratigráfica. Punto AN-10 (Miembro Salomón).	81
Apéndice 7 Estructura de laminación cruzada. Punto AN-10 (Miembro Salomón).	81
Apéndice 8 Macizo de Clase III (RMR= 41 - 60). Arenisca de grano medio. Punto AN-10.	82
Apéndice 9 Macizo de Clase IV (RMR= 21 - 40). Lutita. Punto AN-10.	82
Apéndice 10 Vista de la inundación causada por el Río Querecual (25 Km aguas abajo del sitio de presa).	83
Apéndice 11 Fotografía de la adquisición de los datos en el tendido T14, estribo derecho.	83
Apéndice 12 Fotografía de la adquisición de los datos en el tendido T15 perpendicular al T14. (Estribo derecho).	84
Apéndice 13 Implantación de testigos de cemento en puntos de disparos (líneas sísmicas), con leyenda de la notación de los puntos GPS tomados.	84

LISTA DE TABLAS

Tablas	Pág.
3.1 Esquema de los estudios a realizar por fase para la construcción de una presa.	25
4.1 Comparativa entre los parámetros de adquisición planificados y los revisados después de las pruebas en campo.	32
4.2 Resumen de las líneas sísmicas y la geometría de adquisición por tendido.	33
5.1 Comparativa de velocidades de propagación de onda P (promedios) por capa en cada margen del río.	63
5.2 Comparativa de velocidades de propagación de onda P (promedios) por capa en cada margen del río.	64
5.3 Comparativa de velocidades promedio de propagación de onda P y onda S por capa y espesores para capa 1 y capa 2 en cada margen del río.	65
5.4 Comparativa de módulos dinámicos por tendidos donde se anexa el indicador V_s/V_p .	66
7.1 Tabla resumen de la información de los puntos de observación en el levantamiento geológico. (FLNH, 2010).	75
7.2 Tabla de coordenadas de puntos de ubicación tomados con un receptor GPS.	83

CAPÍTULO I
MARCO INTRODUCTORIO

1.1 Introducción

El Río Querecual, que alimenta los sistemas de riego de un área de aproximadamente 4.800 Ha dedicadas a la producción agrícola y pecuaria, representa una amenaza en épocas de máximas precipitaciones pues provoca graves y repetidas inundaciones en dicha zona, como respuesta a estas situaciones, a inicios de la década de 1960, se planteó la posibilidad de establecer un embalse de las aguas del río situado en las cercanías del pueblo de Botalón, luego, en 1963, bajo la tutela de la Dirección de Obras Hidráulicas del entonces Ministerio de Obras Públicas (M.O.P) se inician los estudios para emplazar la represa del embalse de Botalón. (Popoff y Castillo, 1963).

La zona de estudio se encuentra ubicada en el área rural destinada al uso agropecuario de la población de Botalón, municipio Libertad a 45 km al SE de Barcelona, estado Anzoátegui y comprende una extensión de 9 km² que se encuadra entre las coordenadas 9° 57' 58'' y 9° 55' 13'' de latitud norte y los 64° 22' 38'' y 64° 29' 45'' de longitud oeste como se muestra en la figura 1.1.

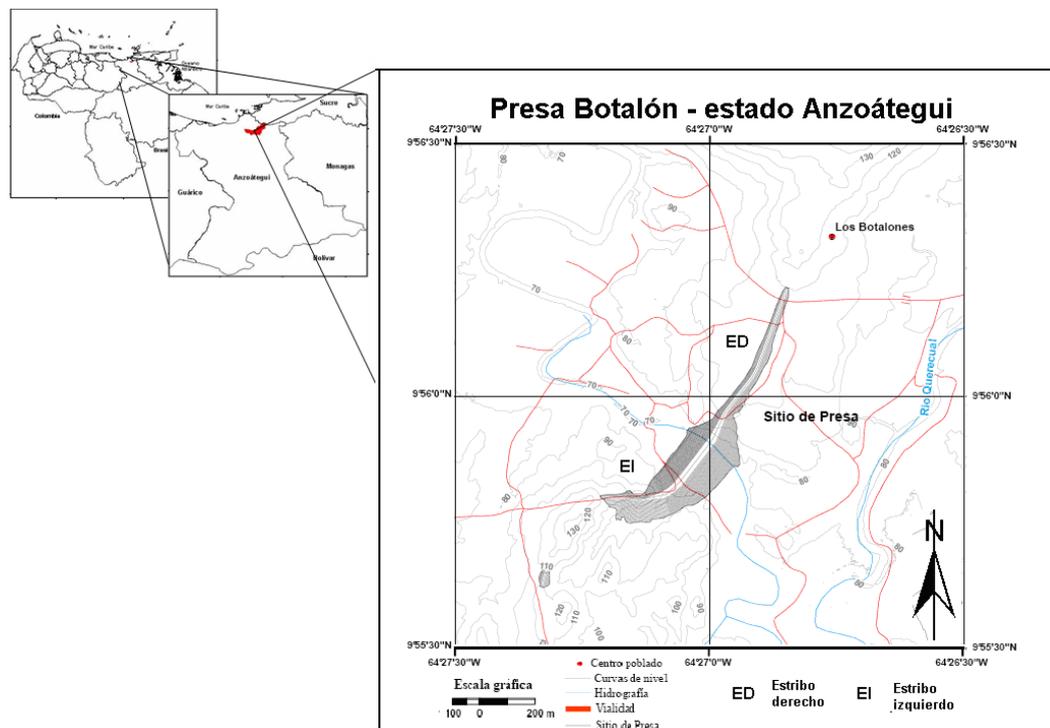


Figura 1.1 Esquema de Ubicación del sitio de presa. (FLNH, 2010).

Actualmente, enmarcado dentro de los proyectos de soberanía del recurso agua del gobierno nacional, a través del Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MppA), le asignó el proyecto de “Actualización del proyecto de la presa en el sitio “Botalón” del estado Anzoátegui” a la Fundación Laboratorio Nacional de Hidráulica (FLNH) para el reajuste y rediseño del proyecto original, empleando nuevas tecnologías de prospección y exploración geofísica aplicadas a la geotecnia e hidrogeología para las mediciones de parámetros físicos - dinámicos y químicos del sitio del embalse. Esto incluye la caracterización geofísica del subsuelo con fines geotécnicos, mediante el empleo de sondeos eléctricos verticales, refracción sísmica y tomografías eléctricas.

Al retomar los estudios generales que comprenden las áreas de geomorfología, geotecnia, hidrología, hidráulica e impacto ambiental, particularmente los relacionados con las condiciones del suelo y las respuestas de este ante los esfuerzos que se le someterá a través de las fundaciones del paramento que conforma la presa (interacción suelo – estructura) y a las solicitaciones a las que será sometido debido al peso del agua que se represará, surgió la necesidad de hacer un modelo de capas del subsuelo, dicho modelo servirá de base para optimizar la ubicación de las perforaciones con fines geotécnicos que se emplearán, además las velocidades de propagación de ondas calculadas para el modelo sirven para estimar los rangos de los módulos elásticos del subsuelo como insumo para los proyectistas y otros especialistas en ingeniería de fundaciones. Luego de algunos análisis preliminares de costos-beneficios de tipo técnico y económico se concluyó que el método sísmico de refracción es la mejor herramienta para satisfacer estos requerimientos (FLNH, 2009).

Para ello se acordó hacer un estudio de refracción sísmica cuyo objetivo general es caracterizar la geometría y las propiedades elásticas de la capa meteorizada del sitio de presa del Embalse Botalón a través del uso de perfiles sísmicos de refracción, y cuyos objetivos específicos sean elaborar un modelo de velocidades de propagación de ondas mediante perfiles sísmicos de la zona de interés y con las

velocidades obtenidas calcular los módulos elásticos del macizo rocoso; relación de Poisson, modulo de Young, de rigidez o cizalladura y de Bulk. Como valor agregado de dicho estudio se pretende integrar los resultados obtenidos y comparar con la información disponible del proyecto original (Popoff y Castillo, 1963) así como la información de geología local levantada para dicho embalse y generar un modelo físico del área de estudio.

Según Lexur (2009), aproximadamente 1.100 millones de personas, es decir, el 18% de la población mundial, no tienen acceso a fuentes seguras de agua potable, y más de 2.400 millones de personas carecen de saneamiento adecuado. En los países en desarrollo, más de 200 millones de personas, la mayoría de ellos niños, mueren cada año a causa de enfermedades asociadas con la falta de acceso al agua potable, saneamiento inadecuado e insalubridad. Además, gran parte de las personas que viven en los países en desarrollo sufren de enfermedades causadas directa o indirectamente por el consumo de agua o alimentos contaminados o por organismos portadores de enfermedades que se reproducen en el agua. Con el suministro adecuado de agua potable y de saneamiento, la incidencia de contraer algunas enfermedades y consiguiente muerte podrían reducirse hasta en un 75%. Venezuela, pese a que posee una vasta red hídrica, no está exenta de esos males, debido a que también existen zonas donde se presentan problemas de disponibilidad de agua dulce, como en Falcón septentrional (Península de Paraguaná), Isla de Margarita, llanos centro-occidentales (Guárico, Apure y Portuguesa) y la región capital (incluyendo el estado Vargas), en este sentido, la escasez de agua potable de fácil acceso limita el desarrollo agrícola, industrial y turístico.

En vista de la importancia que reviste contar con agua potable para asegurar el bienestar común, uno de los propósitos fundamentales de la “**Actualización del proyecto de Diseño de la Presa Botalón**” es subsanar la problemática que afecta la población de Botalón y zonas aledañas al garantizar el suministro de agua tanto para consumo humano como para las actividades económicas y evitar las inundaciones, para tal fin es imprescindible retomar el proyecto iniciando con los

estudios geofísicos con fines geotécnicos, lo que se traduce en hacer el modelado del sitio de la presa a escala adecuada, partiendo desde una exploración de refracción sísmica, cuyos productos desemboquen principalmente en la generación de un modelo de velocidades del sitio de presa, cálculo de módulos dinámicos de la roca, todo esto con el fin de proponer la mejor ubicación de las perforaciones geotécnicas y dar a los proyectistas de ingeniería civil información esencial para establecer las variables del suelo de fundación, evaluación de la cinemática y geometría de los valles, terrazas y taludes mostrados en la figura 1.2.

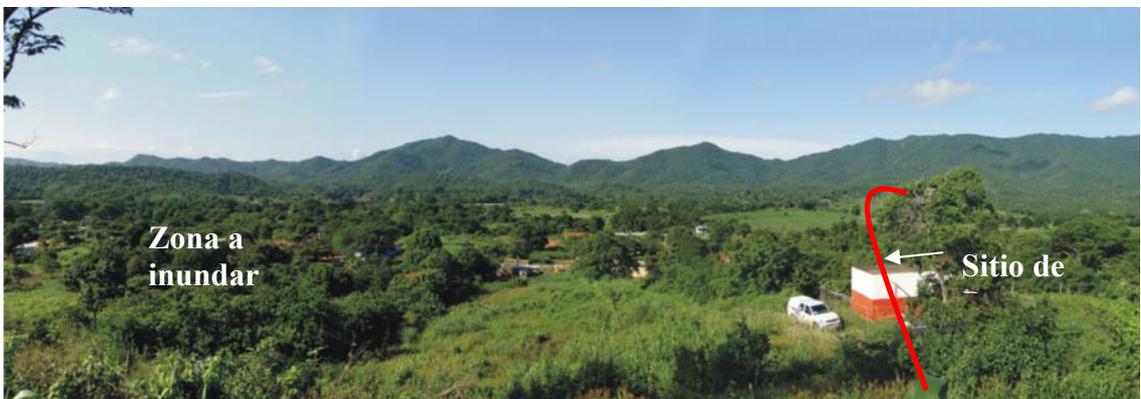


Figura 1.2 Composición fotográfica del sitio de presa y vaso del embalse de Botalón. La escala es el vehículo tipo pick up a la derecha de la imagen. (Modificado de Fundación Laboratorio Nacional de Hidráulica, 2010).

CAPÍTULO II
MARCO GEOLÓGICO

En el área de estudio aflora la Formación Quiamare (terciario), la cual se manifiesta a través de sus miembros; Salomón y Revoltijo, cuyo contacto lateral es localmente transicional, pero no se tiene información de geología de superficie debido a la cobertura sedimentaria de aluvión cuaternario que no permite examinar afloramientos cercanos al contacto entre dichos miembros, en la figura 2.1 se muestra el mapa de ubicación de geológico base con ubicación de sondeos geotécnicos e hidrología respecto al eje de la presa.

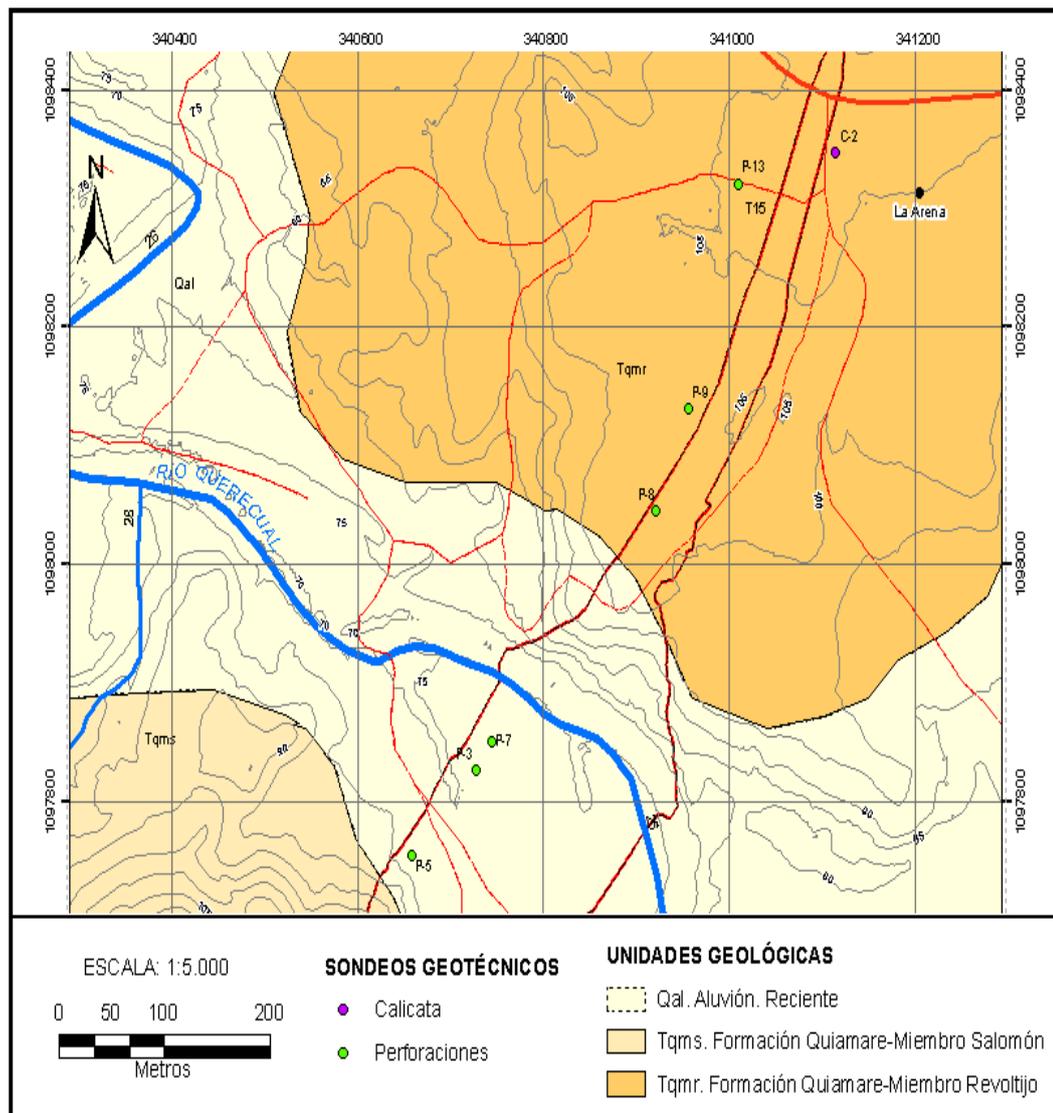


Figura 2.1 Mapa Geológico – Geotécnico de la zona. Modificado de Fundación Laboratorio Nacional de Hidráulica (2010).

2.1 Formación Quiamare

TERCIARIO (Mioceno Temprano-Tardío)

Se define como una secuencia monótona de arcilitas gris verdosas, rojas pardas y gris-azulado, en capas plurimétricas poco definidas, con intercalación de areniscas guijarrosas, lutitas carbonáceas y lignito en capas lenticulares, métricas. Carácter distintivo lo constituyen las secuencias arcilíticas dominantes (entre 80% y 95%) moteadas, abigarradas, monótonas; los miembros se distinguen entre sí por proporciones variables de otras litologías, como las areniscas guijarrosas, los escasos niveles carbonáticos (Onoto) o algunos conglomerados masivos (El Pilar, Guanape, Peña Mota), en la geología local se discutirán las características principales de cada miembro. (PDVSA-INTEVEP 1997).

En su región tipo, la Formación Quiamare tiene unos 3.050 m de espesor. Los contactos en la base de la Formación Quiamare son concordantes y generalmente transicionales sobre las formaciones Quebradón y Capiricual interdigita hacia el este con la Formación Carapita y es transicional lateralmente con la Formación Oficina hacia el sur y sureste.

La Formación Quiamare fue depositada principalmente en ambientes que variaban entre continentales, salobres y aguas marinas muy llanas que en escasos casos llegaban a niveles de aguas marinas abiertas.

2.2 Formación Uchirito

TERCIARIO (Mioceno Temprano)

Esta unidad se define como la serie de conglomerados fanáticos, formadores de filas, y areniscas con cementación calcárea que suprayacen inmediatamente a la Lutita Carapita y que sostienen la prominente Fila de Uchirito. Se indicó que la parte basal contiene intervalos de lutita gris, fisil, con foraminíferos. Las capas individuales de conglomerados son muy escasas. El resto de la formación consiste de lutitas blandas, limosas, carbonáceas y microfosilíferas intercaladas con algunas limolitas y areniscas delgadas, duras y de grano fino. Las areniscas

meteorizan a marrón rojizo y canela, mientras que algunas areniscas de grano más fino son gris blancuzcas. Son duras, localmente friables, frecuentemente calcáreas, de capas gruesas, aunque finamente laminadas. Las láminas y lentes de conglomerados (hasta 15 cm de espesor) se componen de cuarzo blanco, arenisca cuarcítica y ftanita gris clara a negra. El espesor es de unos 1.372 m en la quebrada Carapita, que se aumenta rápidamente hacia el oeste a expensas de las lutitas de la Formación Carapita.

La formación es equivalente vertical y lateral de la Formación Carapita al este y la Formación Capiricual al oeste. La Formación Uchirito constituye el clástico superior, regresivo, de la Formación Carapita, en la misma forma que la Formación Capaya constituye el clástico inferior, transgresivo, de Carapita. El ambiente de formación es marino somero a moderadamente profundo. (PDVSA-INTEVEP 1997).

2.3 Geografía física del vaso y sitio de la presa

Según Popoff y Castillo (1963) el sitio de la presa, taponés, aliviadero y área de embalse están situados en la provincia fisiográfica conocida como Serranía del Interior de la Cordillera de la Costa, describiéndose localmente una topografía baja y suave dentro de dos filas abruptas que poseen rumbos aproximados E-W y la zona topográficamente baja está ocupada por lutitas de la Formación Quiamare, las cuales se erosionan con facilidad provocando este relieve bajo. Las filas Uchirito ó Cerro Grande, al norte y Purobolsa, al sur están constituidas por conglomerados y areniscas que naturalmente presentan mayor oposición a la erosión. En el sitio de la presa y el embalse el río ha formado terrazas aluvionales, las cuales corta en la actualidad indicándose así rejuvenecimiento de la zona. Hacia el norte del embalse y por la carretera del pueblo de Bergantín la topografía se torna bastante abrupta ya que está sostenida en su totalidad por litologías Eoceno – Cretácicas que en dicha zona está representada por calizas y areniscas, así pues, el río corre norte – sur cortando perpendicularmente las filas antes

mencionadas y al llegar a la Fila Uchirito se desvía con dirección Este – Oeste (paralelo a la serranía).

Los aspectos hidrológicos determinantes por la naturaleza de este estudio, están condicionados principalmente por el río Querecual, el cual es un afluente del río Aragua y es el principal receptor de agua en la zona. Presenta la particularidad de discurrir desde su nacimiento, al norte del pueblo de Bergantín, hasta la fila de Uchirito (ó Cerro Grande), aguas arriba del sitio de la presa, con dirección norte – sur y perpendicular a las estructuras compresionales del área, a partir de estas filas, discurre en dirección E-O paralelo a las mismas (figura 2.1).



Figura 2.2 Foto satelital del sitio de ubicación de la presa, donde se ha diagramado el eje de la presa, los estribos y parte del embalse. Modificado de FLNH (2009).

En la zona donde el río tiene rumbo N – S adquiere bastante velocidad y se considera que aún es joven, a partir de la Fila Uchirito el mismo pierde velocidad y desarrolla una cantidad de meandros por lo que se considera que en esta parte del curso está en edad madura.

El río ha depositado en su lecho material permeable, lo que permite la percolación de sus aguas en el subsuelo. La sedimentación principal del río la ejecuta aguas abajo de la Fila Uchirito, que es donde este ha perdido velocidad ya que estos sedimentos son de tipo fino (provenientes de la Formación Quiamare), especialmente limosos.

El único afluente de importancia del río Querecual es la Quebrada Carapita, la cual desemboca aguas arriba y dentro de la zona de inundación de la represa. Esta quebrada tiene un caudal intermitente y sólo tiene agua en época de lluvias, permaneciendo seca el resto del año. El resto de los afluentes son quebradas intermitentes que sólo tienen agua cuando se presentan precipitaciones, forman un drenaje tipo reticular y en el área de colinas redondeadas el drenaje es dendrítico.

2.4 Geología local

Para un embalse de grandes magnitudes es necesario realizar estudios de geología local los cuales contemplen identificación de estructuras que comprometan la seguridad de la presa, fallas que al cambiar las condiciones naturales puedan desplazarse, determinación de estabilidad de las laderas y estribos (ante la ocurrencia del primer llenado y/o sismicidad inducida), caracterización del macizo rocoso para saber su comportamiento geomecánico e impermeabilidad del vaso.

Los estudios realizados en esta primera etapa de viabilidad y proyecto, permiten verificar que la unidad geológica existente en el sitio de presa es la Formación Quiamare del Terciario - Mioceno, manifestada a través de dos miembros, Revoltijo y Salomón, están conformados por secuencias estratigráficas de lutita-

limolita-arenisca con facies conglomeráticas, la diferencia principal entre estos dos miembros son los dominios litológicos; Revoltijo es mucho más lutítico que Salomón y a su vez este último con mas presencia de roca arenisca. (FLNH, 2010).

De los sondeos con fines geotécnicos reportadas en el estudio de Popoff y Castillo (1963), las más cercanas al sitio de presa son las perforaciones P-03, P-05 y P-07 del estribo izquierdo y la calicata C2 junto a los pozos P-08, P-09 y P-13 del estribo derecho de la presa (figura 2.1).

A continuación se presentan los resultados de las perforaciones:

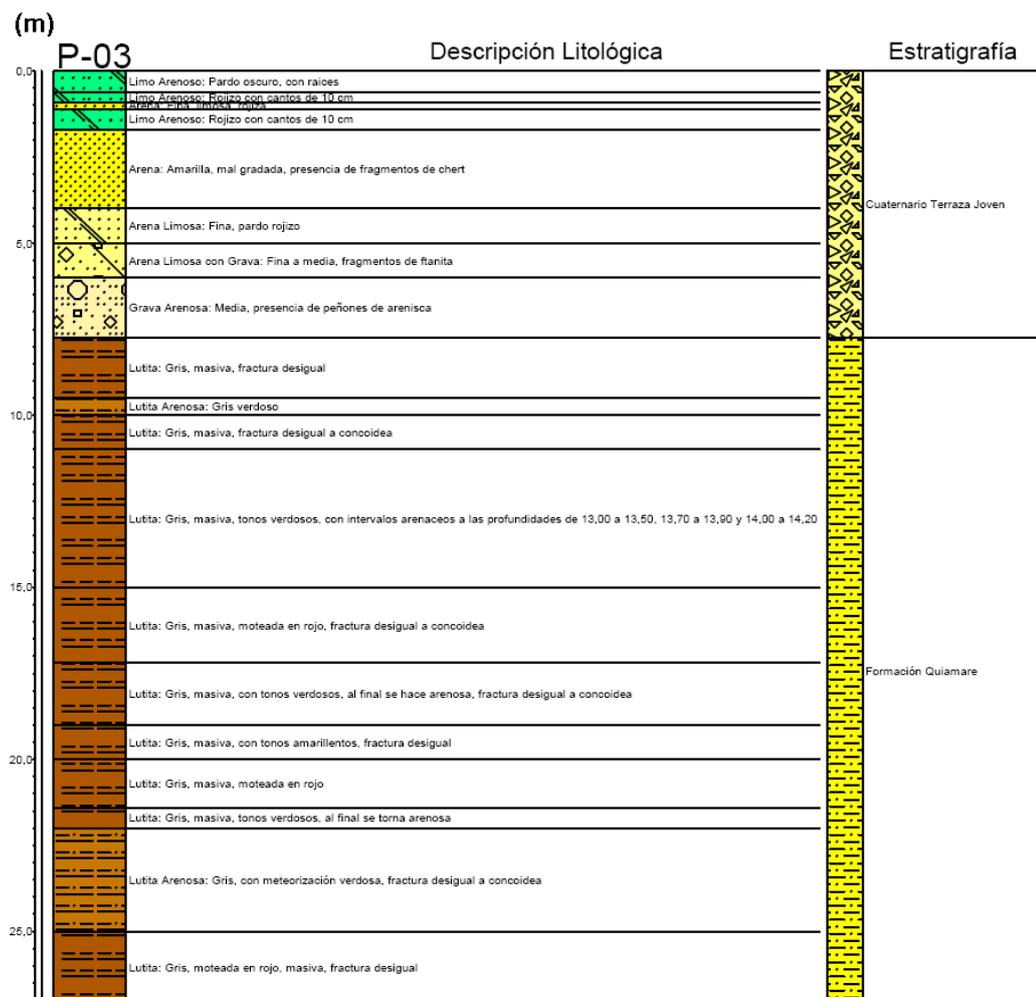


Figura 2.3 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-03. Unidades en metros. Modificado de FLNH (2010).

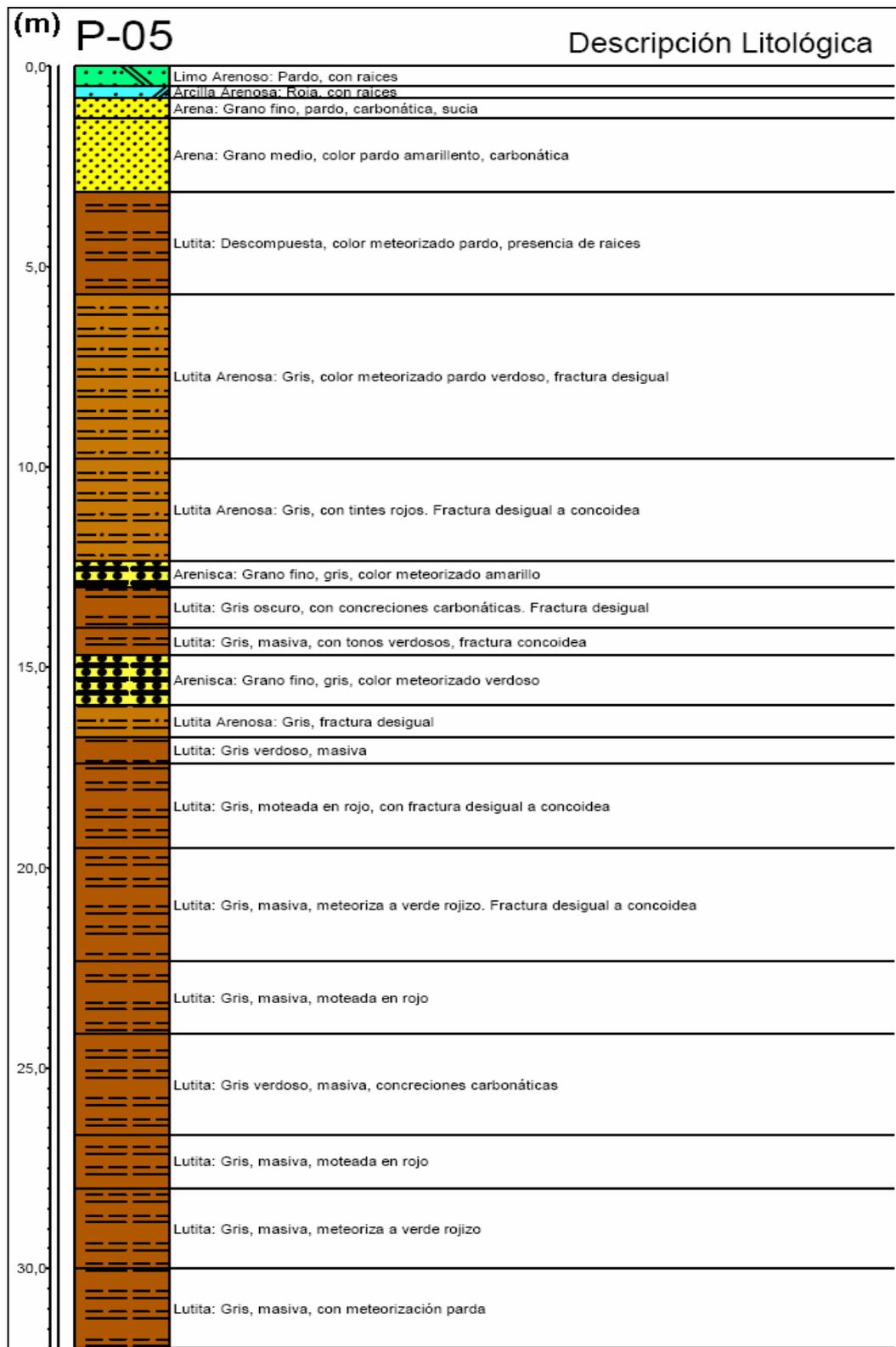


Figura 2.4 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-05. Unidades en metros. Modificado de FLNH (2010).

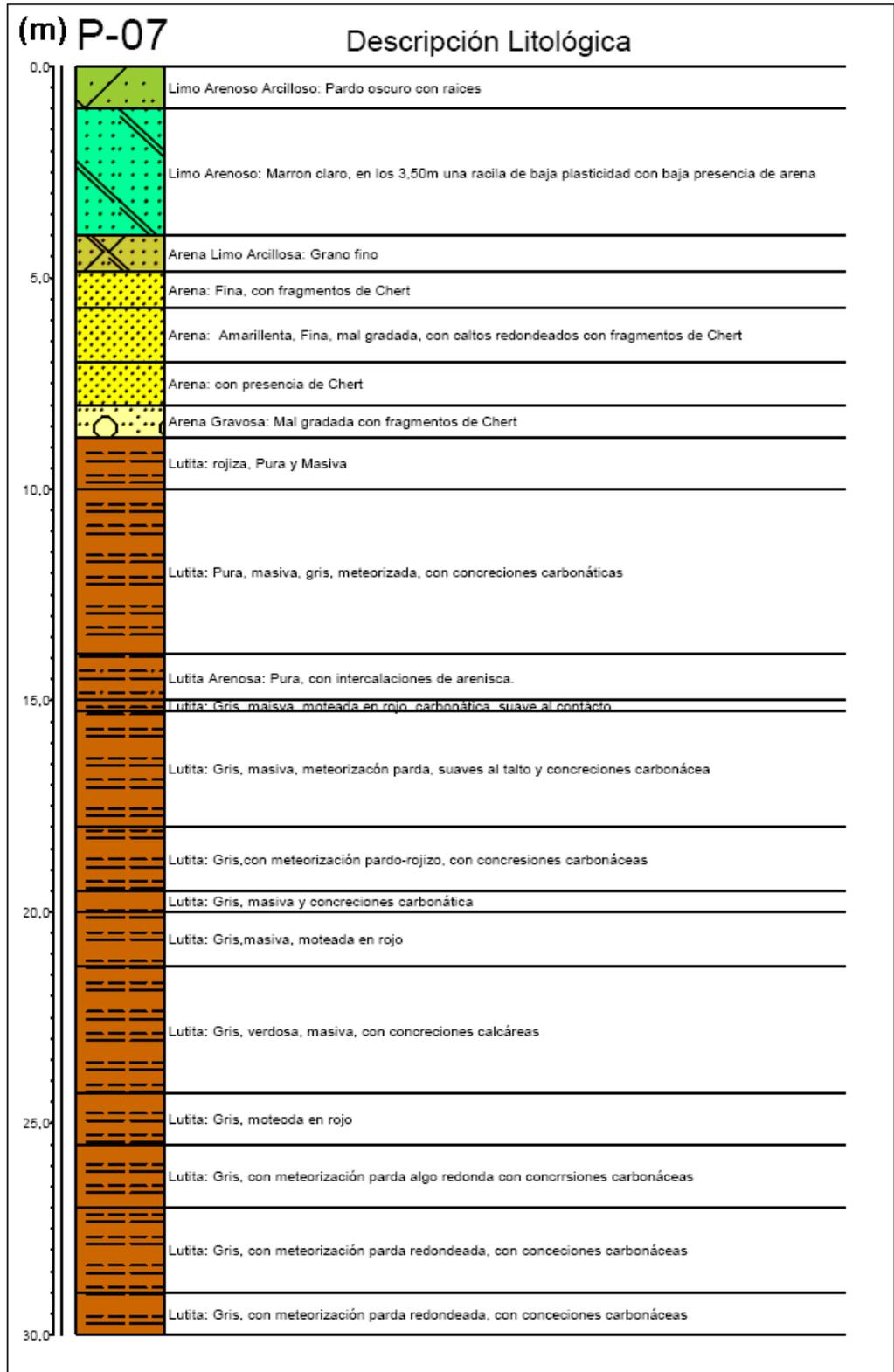


Figura 2.5 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-07. Unidades en metros. Modificado de FLNH (2010).

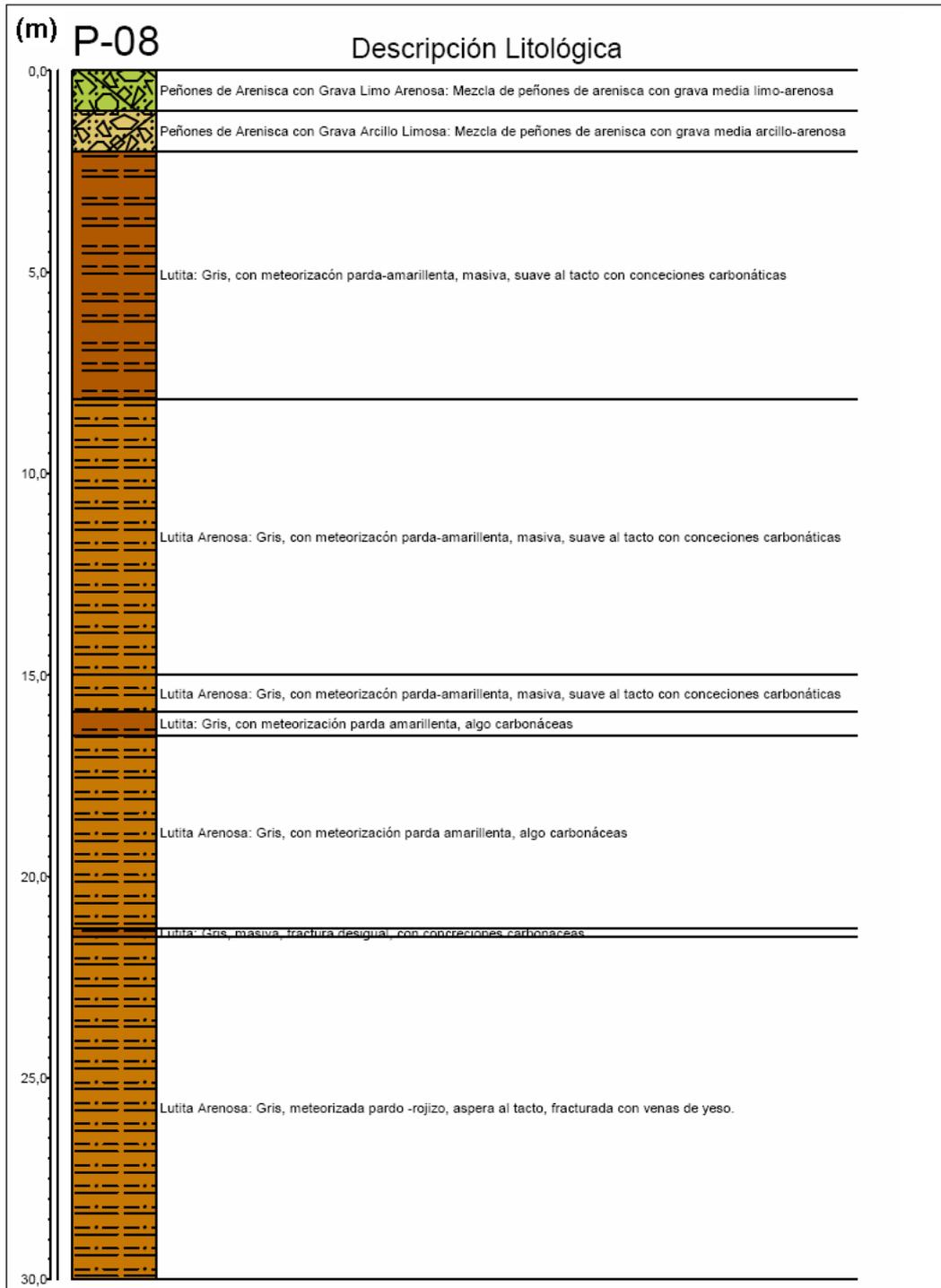


Figura 2.6 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-08. Unidades en metros. Modificado de FLNH (2010).

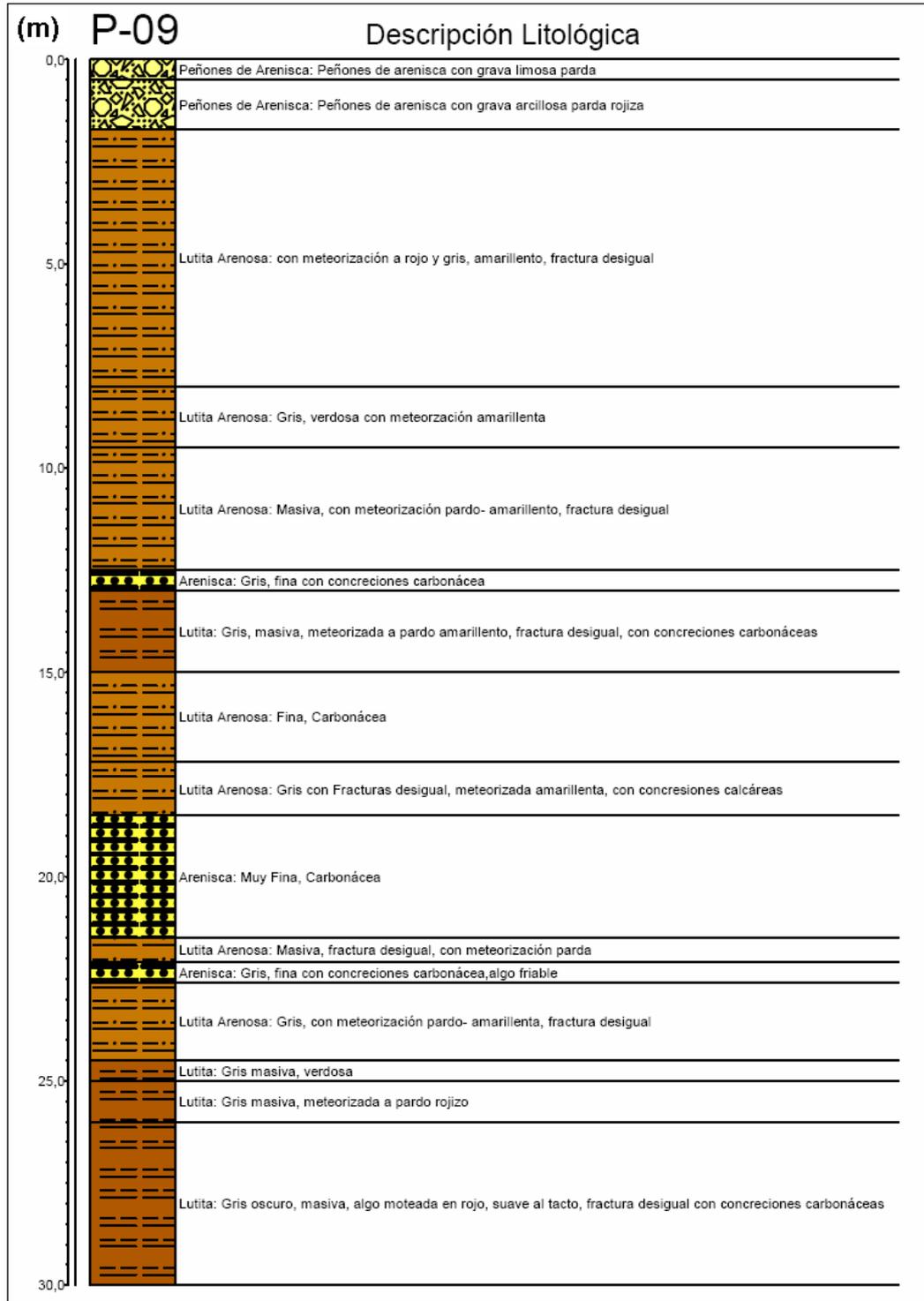


Figura 2.7 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-09. Unidades en metros. Modificado de FLNH (2010).

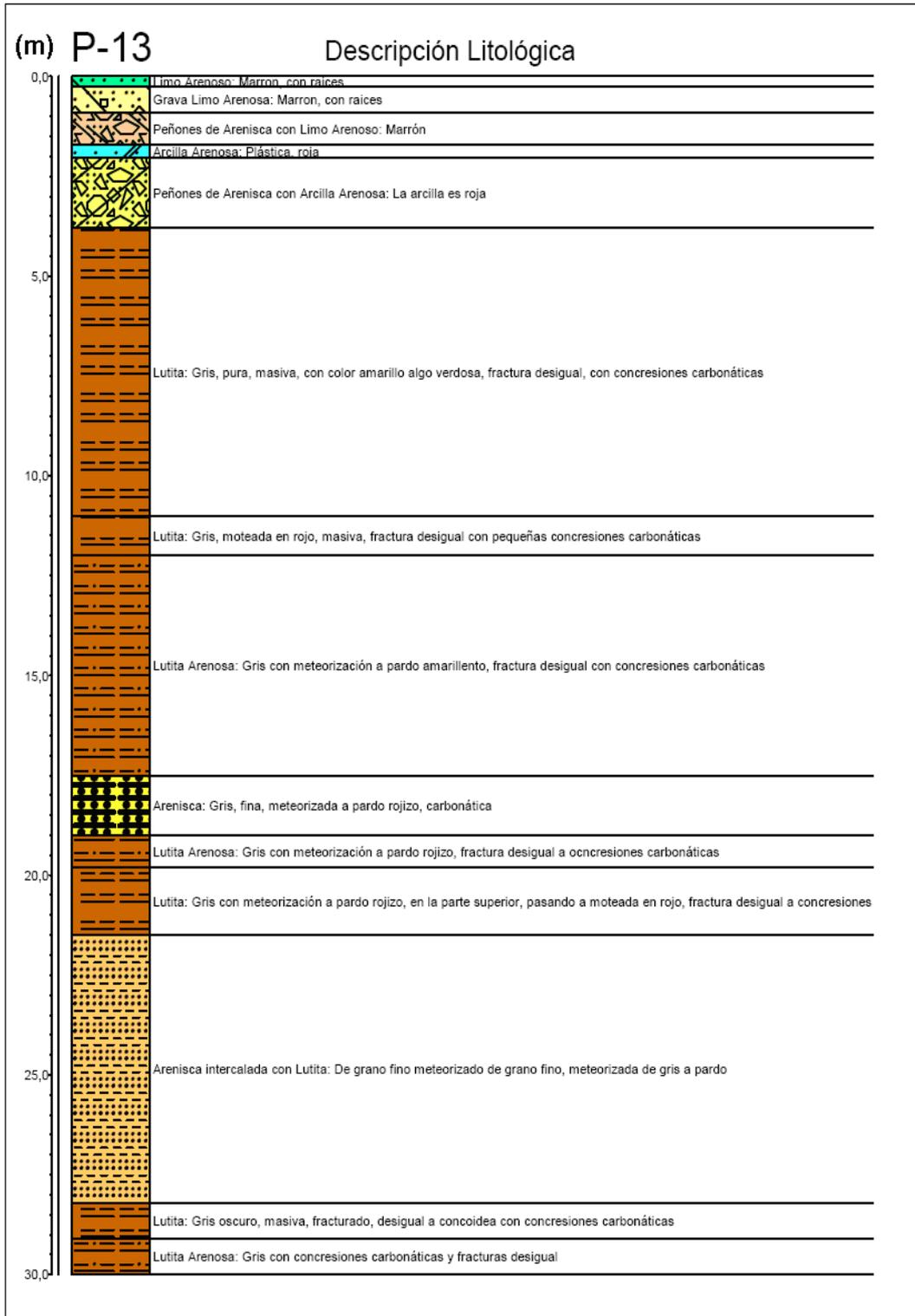


Figura 2.8 Perfil litológico estratigráfico del pozo P-13. Unidades en metros. Modificado de FLNH (2010).

Para la actualización geológica del sitio de presa del embalse, se realizaron sondeos geotécnicos tipo calicatas, la más cercana a los perfiles sísmicos levantados es la C2. Dicha calicata muestra la siguiente información:

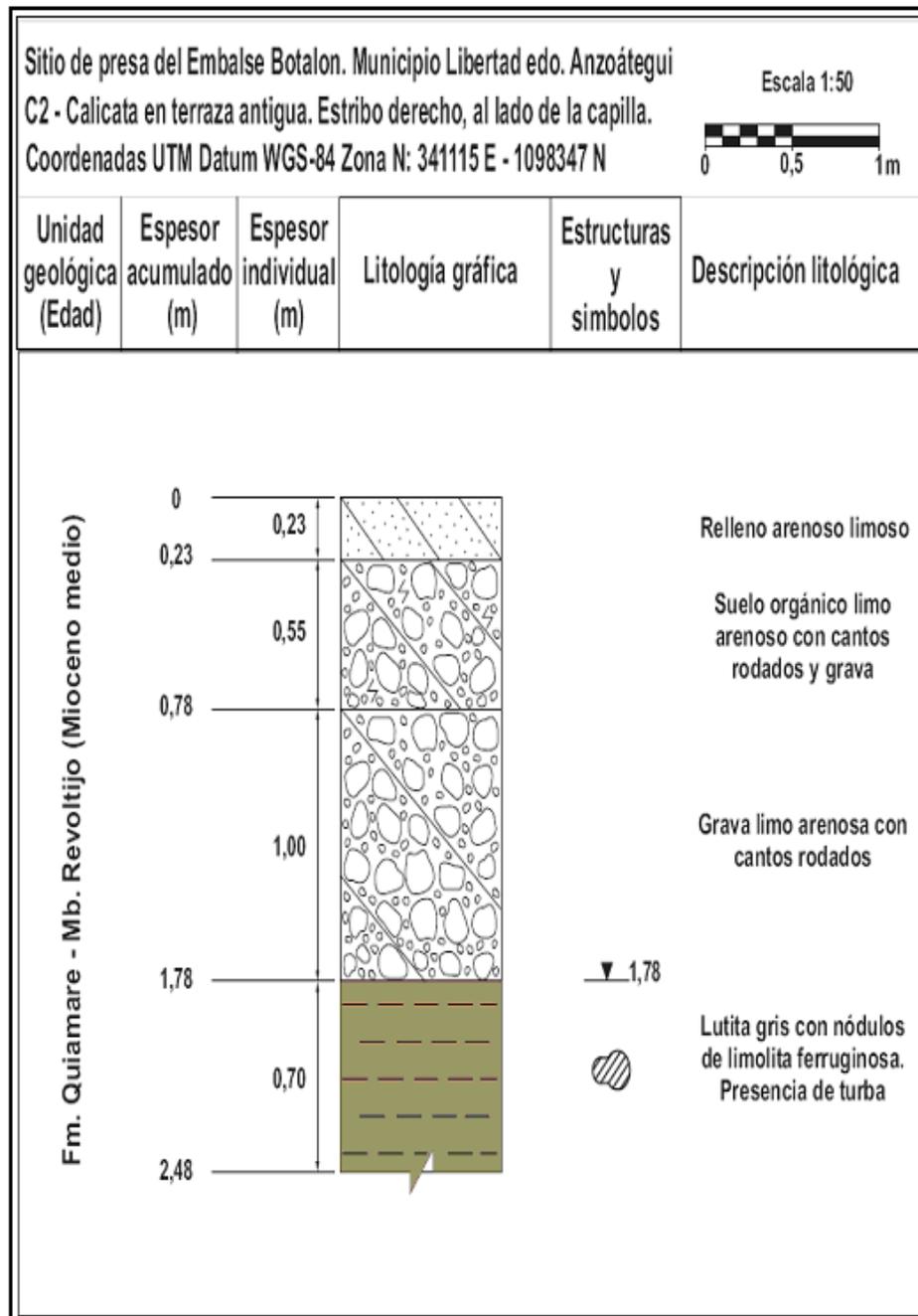


Figura 2.9 Perfil de suelo de la calicata C2. Unidades en metros. Modificado de FLNH (2010).

2.5 Caracterización geotécnica del macizo

Luego de hacer el levantamiento de la información geológica y su posterior análisis en base al índice RQD (*Rock Quality Designation*), la descripción de las diaclasas, la orientación de las capas, rumbo y buzamiento con respecto al eje de la presa, se estimó una clasificación según el índice RMR (*Rock Mass Rating*) y el índice GSI (*Geological Strength Index*), se concluye lo siguiente:

- Según el índice RMR se definen las rocas del área dentro de las clases III (41 a 60) y IV (21 a 40), es decir, de calidad media a mala (figura 2.11).
- Según el rango del índice GSI (45 - 70) se clasifican las rocas con una calidad de media a mala.
- Según la orientación de las discontinuidades, rumbo y buzamiento, se pueden clasificar los macizos rocosos, más o menos favorables (Regular), esto con relación a la orientación de la obra que se va ejecutar.
- Se observó la influencia tectónica en el área, siendo la estructura principal el plegamiento interno de las capas.
- En base a los análisis cinemáticos realizados a los taludes, considerando el ángulo de fricción interno del macizo rocoso en $\phi = 20^\circ$ y el talud modificado en N45W45S, se deduce que no hay posibilidad de que se generen fallas planares, en cuña o por volcamiento.



Figura 2.10 Composición fotográfica de un afloramiento lutítico (RMR Clase III) del miembro Revoltijo Fm Quiamare, en el cauce del Río Querecual en el vaso de la presa. La escala es el bastón topográfico (izq) en el que cada sección roja equivale a 0,30 m. Modificado FLNH (2010).

CAPÍTULO III
MARCO REFERENCIAL

El emplazamiento de una represa, la cual es una obra civil de gran envergadura, conlleva una serie de consideraciones y estudios previos, en este capítulo se hace una síntesis de los estudios del Embalse Botalón proyectado desde la década de los 60, así como las consideraciones teóricas más relevantes para esta investigación.

3.1 Antecedentes

En el año 1961 empiezan los estudios para el diseño del embalse, generando hasta la presente fecha una amplia documentación referente a la obra, al sitio de presa y a la cuenca, abarcando aspectos de conservación, caracterización biológica, desarrollo del sistema de riego, geología y geotecnia, hidrología y obras de embalse, siendo todos llevados por el antiguo Ministerio de Obras Públicas y el Ministerio del Ambiente, pero es en 1963 cuando se realiza la ingeniería de detalle de la presa, por la Oficina de Ingeniería Christo Popoff, para el Ministerio de Obras Públicas, cuya finalidad principal era el control de inundaciones y aprovechamiento de agua para riego de 4.800 hectáreas, aguas abajo de la presa. (FLNH, 2009).

En resumen, a continuación se muestran los principales estudios dentro de las áreas de principal interés para el diseño de la presa de Botalón y por último un breve resumen de las características más importantes del proyecto de Popoff y Castillo (1963). (FLNH, 2009).

3.1.1 Geología – Geotecnia

En estas áreas se puede mencionar que los primeros informes datan del año 1961 (referencia perdida), cuando se hacen los primeros reconocimientos geológicos del lugar, pero es a finales del año 1962 cuando se emite el “*Informe geotécnico, para el anteproyecto de la presa Botalón, río Querecual*” en el cual se resumen los resultados de los estudios geotécnicos y geológicos realizados al sitio de la

presa. Dichos estudios abarcan la evaluación de la fundación de la presa, como la caracterización de los materiales de construcción. (FLNH, 2009).

3.1.2 Hidrología

En 1973 se realiza el “*Estudio hidrológico del río Querecual*” que servirá de base para la ingeniería de detalle de las obras del embalse, el mismo fue realizado por la Oficina de Ingeniería de C. Popoff entre 1975-1976. (FLNH, 2009).

En 1990 se realizó el “*Estudio hidrológico del río Querecual, Embalse Botalón*”, realizado por Abellán y Porras para el MARNA, tomando la información hidrológica existente a la fecha. (FLNH, 2009).

3.1.3 Riego

En el año 1963, junto con los primeros estudios en el sitio de la presa, se realizó el “*Anteproyecto del sistema de riego del río Querecual*” y, en 1966 se realiza el “*Anteproyecto de riego del asentamiento campesino Querecual, estado Anzoátegui*” para el riego de un área de 300 hectáreas. Posteriormente los estudios en torno a la obra fueron enfocados en el diseño de la presa y la conservación y manejo de la cuenca.

Según FLNH (2009), en 1993 Halcrow realiza para el MARNR el “*Proyecto Botalón: Proyecto de rehabilitación del sistema de riego*”, cuyo enfoque fue hecho fundamentalmente para calcular el potencial de agua subterránea en el área.

En 1994 fue realizado por Agroplan C.A., el “*Estudio de apoyo al proyecto de desarrollo agrícola Botalón*”. En el mismo año 1994, el ingeniero Manuel Carrasco realizó un “*Diagnóstico al sistema de riego del río Querecual, estado Anzoátegui*” y el “*Replanteo de la poligonal de expropiación dentro del área de influencia del embalse Botalón*” así como el censo del área comprendida dentro de dicho polígono. (FLNH, 2009).

El *Informe Geológico geotécnico de avance de la actualización del proyecto de Diseño de la Presa Botalón(2009)* recoge lo más relevante de estos trabajos previos y destaca la importancia de un adecuado modelado geológico geotécnico apoyado tanto en métodos directos (sondeos geotécnicos) como en métodos indirectos (sondeos geofísicos). (FLNH, 2009).

3.2 Obras civiles – Presas

Las presas o represas, cuya etimología proviene del latín *repressus*; que significa contenido, son unas de las obras de ingeniería de mayor magnitud en el mundo, según lo explican González, et al. (2002) estas revisten una importancia especial en el desarrollo de un país, pues tienen diversos propósitos: regadío, abastecimiento de agua potable, control de avenidas y producción de energía eléctrica (19% del total mundial). El crecimiento económico de un país está directamente relacionado, entre otras variables, con la construcción de grandes presas, existiendo más de 45.000 grandes presas en todo el planeta (aquellas cuya altura es superior a los 15 m o cuya capacidad de embalse supere los 3 millones de metros cúbicos). Otro punto importante a considerar dentro de la planificación de recursos hídricos es la escasez, pues el agua es una de las mayores necesidades a nivel mundial; más de mil millones de personas no disponen del agua mínima necesaria (50 l/ persona/ día), mientras que en la mayoría de países industrializados se consume entre 4 y 14 veces la cantidad citada.

Desde el punto de vista de ingeniería civil, tal como lo exponen Bolinaga, et al. (1999) una presa es una estructura hidráulica que se construye para resguardar los escurrimientos de un río creando un embalse o bien para desviar sus aguas fuera del cauce natural. Usualmente, las presas se construyen a través de los valles y el área ocupada por ella se llama sitio de presa, para efectos de esta investigación se entiende por sitio de presa el concepto antes expuesto.

Dentro las clasificaciones de las represas, según Bolinaga et al. (1999) la clasificación que corresponde a la estructura diseñada para el proyecto de diseño

de la presa Botalón es una presa de tierra zonificada, en cuya sección predominan los siguientes materiales: arcillas, limos, arenas y gravas, colocados y compactados mediante equipos convencionales, con alineamiento de dos direcciones, y un espaldón de grava; en la figura 3.1 se muestra la sección generalizada de la presa.

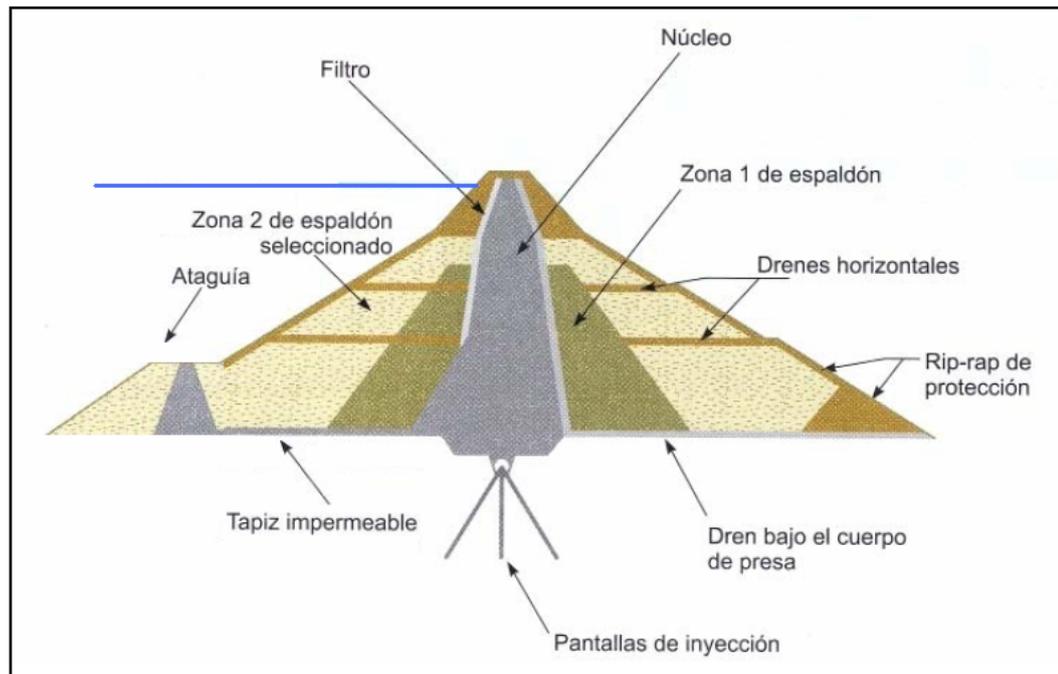


Figura 3.1 Esquema general de la presa, los estribos y la ataguía que es la obra de desvío del río mientras se construye el cuerpo de la represa. (Modificado de González et al., 2002).

Por sus características, la presa en cuestión se clasifica como una obra civil de gran envergadura pues se estima que la superficie ocupada por el embalse de Botalón será de $9,0 \text{ km}^2$ aproximadamente, la cual será represada por un dique cuya cresta tendrá una longitud de aproximadamente $1085,0 \text{ m}$, a una cota de trabajo (de la presa) de $104,5 \text{ m}$ y una profundidad estimada del dentellón de $40,0 \text{ m}$ lo que representa un volumen de $95.000.000,0 \text{ m}^3$ de agua represada. (Popoff y Castillo, 1963).

Para la construcción de dicha presa es necesario contar con información muy variada, que a grandes rasgos va desde levantamientos topográficos hasta ensayos geotécnicos e hidrológicos, que se describen en el siguiente esquema:

Tabla 3.1. Esquema de los estudios a realizar por fase para la construcción de una presa. Modificado de González et al. (2002).

Fase	Estudios	Descripción
Estudios de viabilidad y anteproyecto	Estudios Geológicos regionales	Investigación geológica, impermeabilidad del vaso, estabilidad de laderas, préstamos, aterramientos y subsidencias.
	Estudios previos de cerradas	Reconocimiento geofísico, modelo estructural, permeabilidad.
Proyecto de construcción	Caracterización de las cerradas	Macizos rocosos, suelos.
	Problemas específicos	Resistencia y deformabilidad, permeabilidad, obras auxiliares, otros problemas.
Desvío del río, excavaciones y construcción	Estudios durante la construcción	Cartografía detallada, controles geofísicos, ensayos de resistencia y deformabilidad, ensayos de inyectabilidad, otros reconocimientos, archivo técnico de la presa.
Explotación	Estudios de evaluación	Primer llenado, situaciones de emergencia, resolución y análisis de la seguridad.

El número y la profundidad de las investigaciones, así como el tipo de ensayo varía con la naturaleza de las presas y sus dimensiones este proyecto por considerar una presa de materiales sueltos muy probablemente los estudios de la fase de proyecto de construcción serán suficientes, González et al (2002) explica la necesidad de la utilización de métodos geofísicos en esta etapa:

“Los perfiles sísmicos de refracción en superficie y, en ocasiones, los sondeos eléctricos verticales, se realizan a lo largo del eje de presa y transversales al mismo en números suficientes para identificar la zona alterada y su espesor, presencia de acarreo, etc. Estos perfiles se complementan con los datos de ensayos downhole o crosshole y diagrafas. La interpretación geofísica permite zonificar geotécnicamente, estimar módulos de deformación, identificar fallas, zonas alteradas, diques, la ripabilidad de las rocas, etc., por lo que su utilización es necesaria.”

3.3 Refracción Sísmica

Según lo explica el trabajo de Martín (2008), en los métodos sísmicos se mide el tiempo de propagación de ondas elásticas, transcurrido entre el sitio donde se generan las ondas sísmicas y las llegadas de estas a diferentes puntos de observación, en la sísmica de refracción los parámetros de adquisición de los datos deben ser seleccionados de acuerdo a la profundidad del objetivo.

Las ondas sísmicas se generan a través de golpes en el suelo con un martillo, con un camión vibrador ó mediante explosiones; estas incluyen tanto ondas sísmicas internas, Primarias y Secundarias, como ondas superficiales, Love y Rayleigh. Estas ondas se propagan en el interior de la tierra hasta alcanzar puntos donde existen cambios en las propiedades elásticas de los medios estas fronteras son llamadas interfases.

Para recabar información de interés a través de sísmica de refracción, en sondeos de poca profundidad y con fines geotécnicos para determinar la profundidad de la roca dura, el grado de meteorización y competencia de la roca dura, así como también para obtener la velocidad a lo largo de la superficie refractora que resulta de la interfase entre dos medios con distintas propiedades físicas.

Según Martín (2008), los componentes del equipo de medición de refracción sísmica se pueden agrupar de la siguiente manera (Figura 2.4):

- Fuente de generación de ondas sísmicas.
- Detectores de los movimientos del terreno.
- Sistema de adquisición y almacenamiento.



Figura 3.2 Esquema general del equipo de refracción sísmica. (Martín, 2008).

3.3.1 Módulos elásticos del material geológico

La propagación punto a punto de un tren de ondas en un medio elástico genera perturbaciones en las partículas que lo componen, las cuales producto de ello sufren una deformación. Para deformaciones pequeñas y elásticas (que desaparecen al ser suprimido el esfuerzo) la Ley de Hooke explica que el comportamiento de la deformación es proporcional a la cantidad de esfuerzo que le fue impuesto. (Manilla, 2003).

Según Popov y Balan (2000), para un rango limitado medido desde el origen, los valores experimentales del esfuerzo en función de la deformación se encuentran esencialmente sobre una línea recta. Esta vasta idealización y generalización es aplicable a todos los materiales y es conocida como ley de Hooke:

$$\sigma = E \epsilon \quad (1)$$

Donde E es el módulo de Young (ó módulo elástico) una propiedad de cada material, ϵ es la deformación en *sensu lato* y σ es el esfuerzo aplicado.

No obstante, como explica Manilla (2003), la deformación (ϵ) que experimentan los cuerpos conformados por materiales geológicos idealmente homogéneos e isotrópicos se puede descomponer matemáticamente por un tensor de deformación, el cual tiene constantes que dependen de sus propiedades elásticas, las cuales pueden ser caracterizadas mediante los módulos elásticos dinámicos. Los más usados en el estudio de los materiales son cuatro:

- **Relación de Poisson (ν):** también llamado radio de Poisson, este número define la relación entre los cambios unitarios de área de la sección transversal y la deformación longitudinal.

$$\nu = \frac{(V_p / V_s)^2 - 2}{2 (V_p / V_s)^2 - 2} \quad (2)$$

- **Módulo de Rigidez (G):** es la relación entre el esfuerzo transversal unitario y el desplazamiento relativo de los planos de desplazamiento (figura 3.3)

$$G = \rho V_s^2 \quad (3)$$

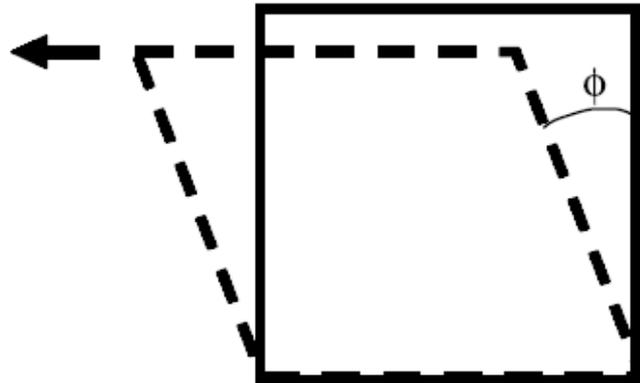


Figura 3.3 Esquema del desplazamiento definido por el módulo de rigidez o cizalla (G). (Manilla, 2003).

- **Módulo de Young (E):** para la tracción y compresión uniaxial, el módulo de Young es la relación entre el esfuerzo unitario y la deformación longitudinal unitaria (ver figura 3.4)

$$E = 2G (1 + \nu) \quad (4)$$

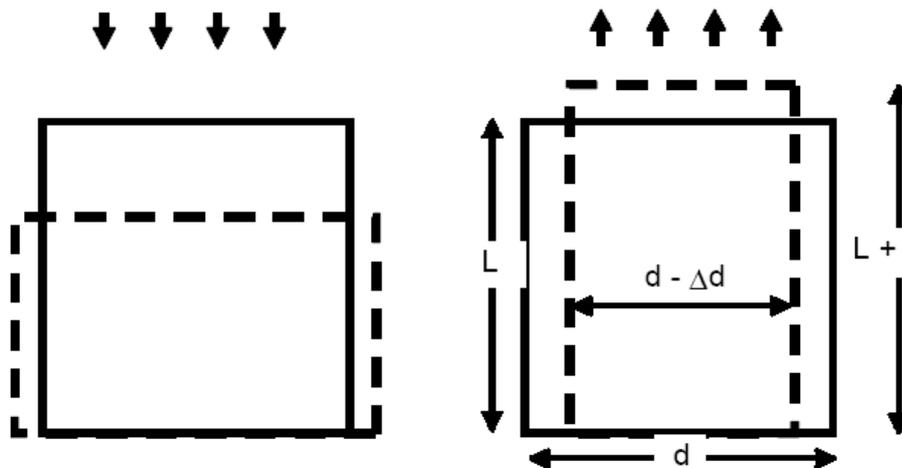


Figura 3.4 Esquema del desplazamiento definido por el módulo de Young (E). (Manilla, 2003).

- **Módulo de Bulk (K):** es la relación entre la presión hidrostática ejercida y el cambio de volumen unitario sufrido.

$$K = E / 3 (1 - 2 \nu) \quad (5)$$

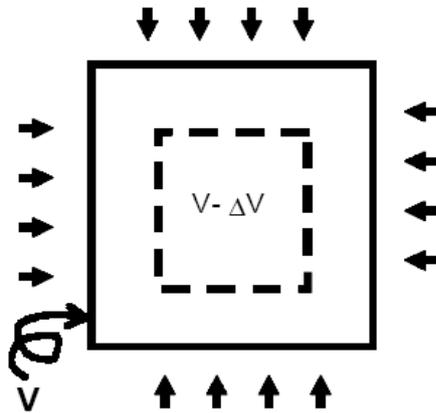


Figura 3.5 Esquema del cambio de volumen definido por el modulo de Bulk (B). (Manilla, 2003).

CAPÍTULO IV
MARCO METODOLÓGICO

4.1 Adquisición y control de calidad de datos sísmicos de refracción

El diseño de la campaña de adquisición se realizó de acuerdo a la profundidad del objetivo la cual varía entre 2 m y 8 m, por lo que resulta importante usar la geometría adecuada, es decir, la distancia entre los receptores y la distancia entre el punto de disparo y los receptores necesarios para resolver dicho objetivo. En tal sentido, si se desea obtener información sobre un objetivo profundo se requiere de arreglos de centenares de metros y una fuente sísmica de alta potencia y viceversa. (Peralta, 2007).

Se desarrolló una campaña de adquisición de datos sísmicos de refracción entre los días 20/07/2010 y 05/08/2010, el área en estudio correspondió al eje de los estribos de la presa, en la figura 4.1 se muestra la disposición de los estribos de la misma.

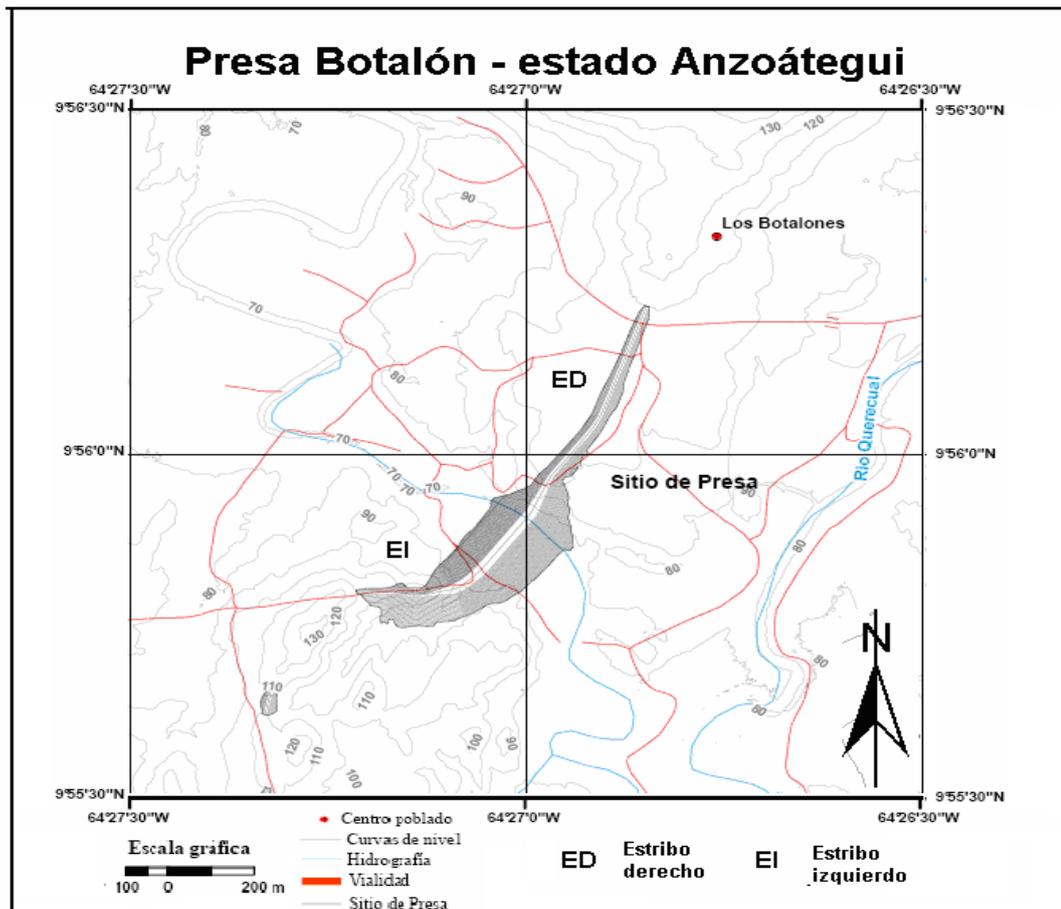


Figura 4.1 Localización de los componentes del sitio de presa.

El levantamiento sísmico de refracción contó con 45 líneas distribuidas en 19 tendidos, se realizaron dos tendidos de prueba (cuatro líneas sísmicas) el primer día de adquisición de datos, a partir de resultados de las mismas se tomó la decisión de ajustar los parámetros de adquisición de datos. En la tabla 4.1 se hace una comparación entre lo planificado en la etapa precampo (planificación campo) y lo ejecutado luego de las líneas de pruebas.

Tabla 4.1 Tabla comparativa entre los parámetros de adquisición planificados y los revisados después de las pruebas en campo.

Parámetros de Adquisición	Propuesta	Revisada
Geometría	End – On (Disparos en 0 m y 48 m)	End – On (Disparos en 0 m y 48 m)
N° de Canales	12	12
N° Receptores	12	12
Distancia entre receptores	4 m	4 m
Offset mínimo	2 m	2 m
Offset máximo	46 m	46 m
Intervalo de muestreo	125 μ s	250 μ s
Longitud de muestreo	256 ms	512 ms
Distancia entre fuentes	48 m	48 m
Longitud del tendido	48 m	48 m
Empalme	25%	0%

En la campaña de adquisición se realizaron dos tipos de tendidos, el comúnmente conocido *end – on* con puntos de disparo o fuentes al principio y al final de la línea sísmica y el *split spread* donde la fuente se ubica en las cinco posiciones mostradas en la figura 4.3 (con cuadrado rojo). Cambiando la posición del disparo

en un mismo arreglo, se obtienen datos adicionales que proporcionan mayor detalle del horizonte refractor por ello se hicieron tendidos de tres disparos (Tendido 14) y de cinco disparos (Tendidos 15 y 18).

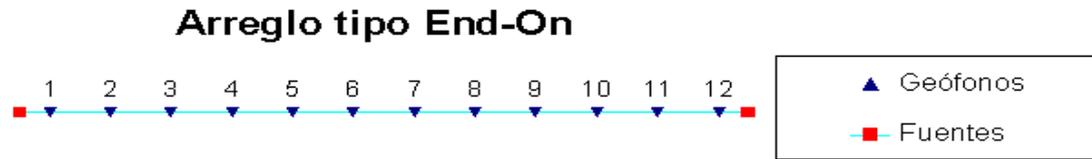


Figura 4.2 Arreglo sísmico de refracción, tipo end on. Modificado de Martín (2008).

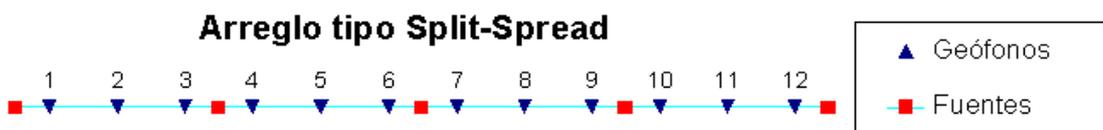


Figura 4.3 Arreglo sísmico de refracción, tipo split spread – end on. Modificado de Martín (2008)

En las tablas 4.2 y 4.3 se resumen los tipos de tendidos utilizados, en el cual la mayoría fue tipo end-on con una longitud total de 48 m.

Tabla 4.2 Tabla resumen de las líneas sísmicas y la geometría de adquisición por tendido.

Ubicación	Tendido	Líneas sísmicas	Geometría de adquisición (Arreglo)
Estribo Derecho	T1	BOT10-01 y BOT10-02	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T2	BOT10-03 y BOT10-04	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T3	BOT10-05 y BOT10-06	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T4	BOT10-07 y BOT10-08	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T5	BOT10-09 y BOT10-10	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T6	BOT10-11 y BOT10-12	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T7	BOT10-13 y BOT10-14	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T8	BOT10-15 y BOT10-16	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T9	BOT10-17 y BOT10-18	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T10	BOT10-19 y BOT10-20	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T11	BOT10-21 y BOT10-22	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T13	BOT10-25 y BOT10-26	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T14	BOT10-27 al BOT10-29	Split Spread. Disparos en 0 m, 36 m y 72 m
	T15	BOT10-30 al BOT10-34	Split Spread. Disparos en 0 m, 18 m, 36 m, 54 m y 72 m

Tabla 4.2 Tabla resumen de las líneas sísmicas y la geometría de adquisición por tendido.

Ubicación	Tendido	Líneas sísmicas	Geometría de adquisición (Arreglo)
Estribo Izquierdo	T16	BOT10-35 y BOT10-36	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T17	BOT10-37 y BOT10-38	End - On. Disparos en 0 m y 48 m
	T18	BOT10-39 al BOT10-43	Split Spread. Disparos en 0 m, 18 m, 36 m, 54 m y 72 m
	T19	BOT10-44 y BOT10-45	End - On. Disparos en 0 m y 48 m

4.2 Procesamiento de datos sísmicos de refracción

Para procesar los datos adquiridos que vienen en formato SEG-2, se emplea un software especializado de la casa SmartSeis™, en el que se marcan las primeras llegadas, pertenecientes a las ondas primarias P, llamado PickWin®, el cual permite visualizar el tren de ondas con sus amplitudes respecto al tiempo que tomaron para llegar a los receptores. En la figura 4.4 se muestra un sismograma tipo para un tendido end-on, específicamente la línea sísmica BOT10_01 (línea sísmica de prueba).

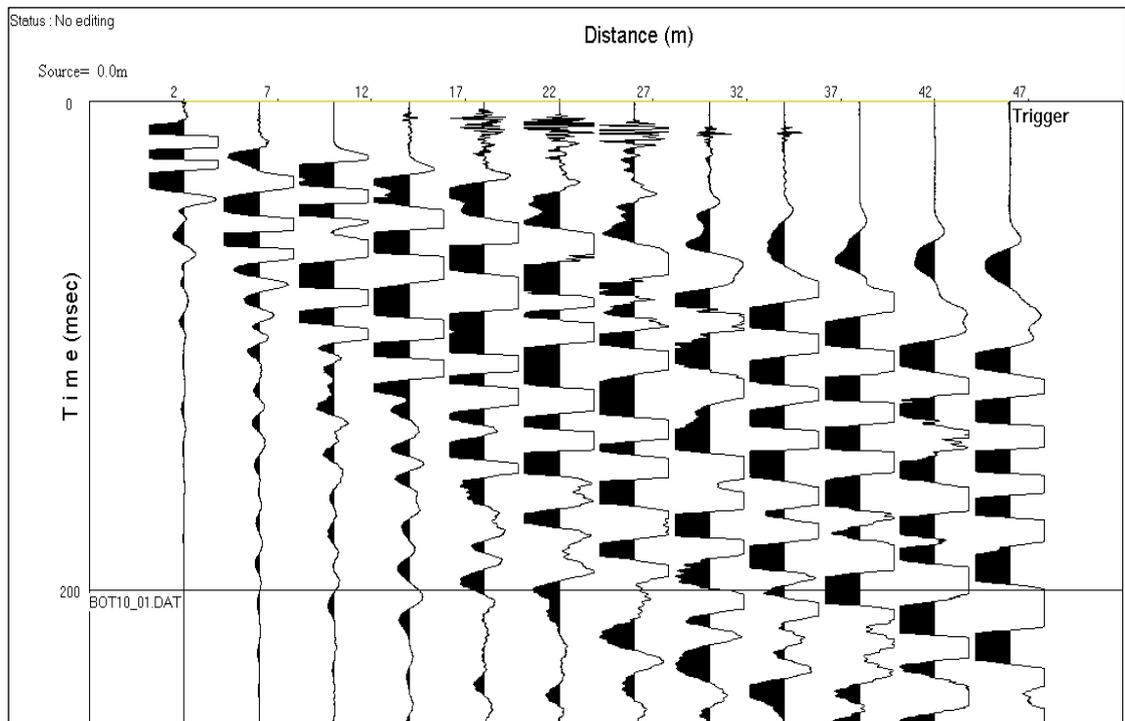


Figura 4.4 Imagen del sismograma de la línea sísmica BOT10_01, con parámetros de adquisición propuestos, ver tabla 4.1.

Seguidamente, en la figura 4.5 se muestra el sismograma de la línea sísmica BOT10_03, que se realizó en el mismo sitio y con la misma geometría que la de prueba, sólo cambiándole los parámetros de adquisición longitud e intervalo de muestreo lo que muestra una mejora en la resolución debido a notable disminución del ruido ambiental en las trazas correspondientes a los receptores 4 al 9.

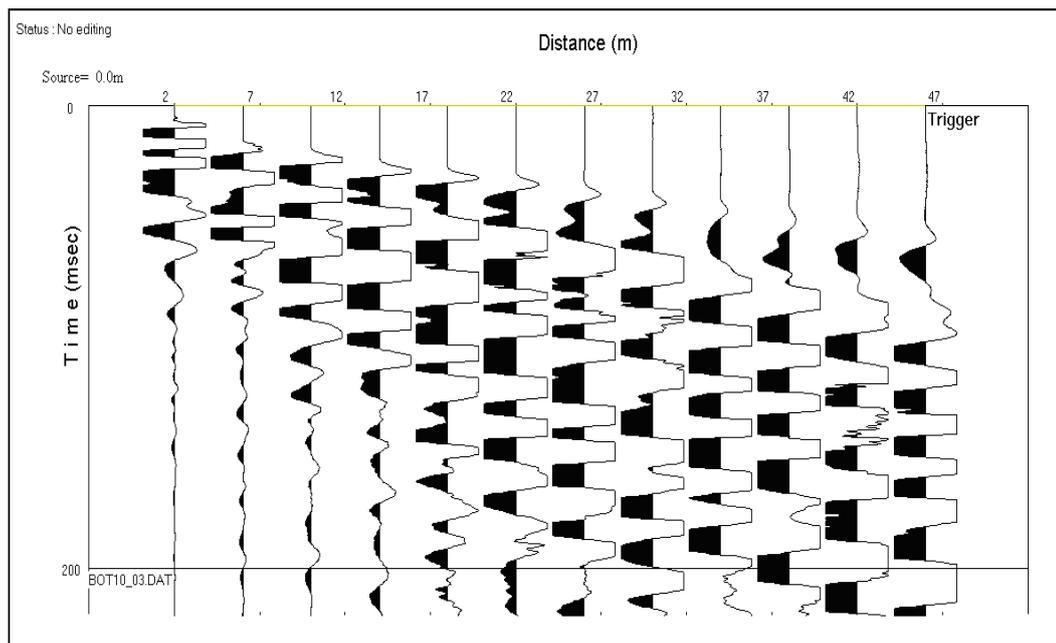


Figura 4.5 Imagen del sismograma de la línea sísmica BOT10_03, del mismo sitio de la línea BOT10_01 pero con parámetros de adquisición corregidos en campo, ver tabla 4.1.

Una vez procesados de esta forma, se emplea el software Plotrefa® el cual básicamente hace un modelo inicial a partir del archivo cargado de Pickwin®, el cual es una gráfica de tiempo-espesor en la que se separan las capas por velocidades.

Las fases de procesamiento con este módulo son las siguientes:

- Carga de archivo sísmico de refracción.
- Verificación de geometría de adquisición.
- Elaboración de dromocrónicas.
- Elaboración del modelo de velocidades para 3 capas.
- Inversión sísmica (modelo inicial).

En la figura 4.6 se muestra una dromocrónica, curva que describe el tiempo que ocupa el desplazamiento de las ondas mecánicas por el medio elástico que es el suelo, dicha dromocrónica es del tendido T2 (tendido de prueba), que corresponde a la línea sísmica BOT10_03 y BOT10_04 mostrada en la figura 4.5.

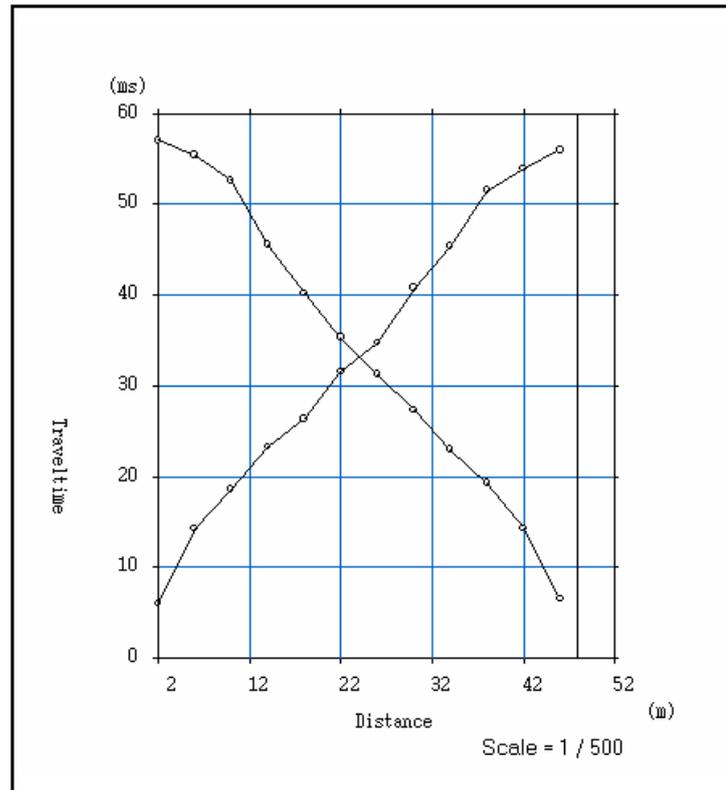


Figura 4.6 Imagen de la dromocrónica proveniente del procesamiento de los datos del tendido T2.

Luego de generar las dromocrónicas, se hace el modelo inicial del subsuelo, por el método del tiempo – espesor siguiendo la metodología que expone Martín (2008), la cual es una inversión matemática basada en principios físicos de refracción de ondas, que reproduce la configuración y geometría de las capas que conforman la parte más superficial del subsuelo que da solución a las respuestas obtenidas de tiempo de viaje de la onda en el medio, este modelo se revisa y ajusta para generar un perfil de velocidades como el mostrado en la figura 4.7, en el cual las velocidades de propagación de onda P aumentan a medida que aumenta la profundidad, muy común para medios estratificados donde el soterramiento hace que se compacten los estratos infrayacentes.

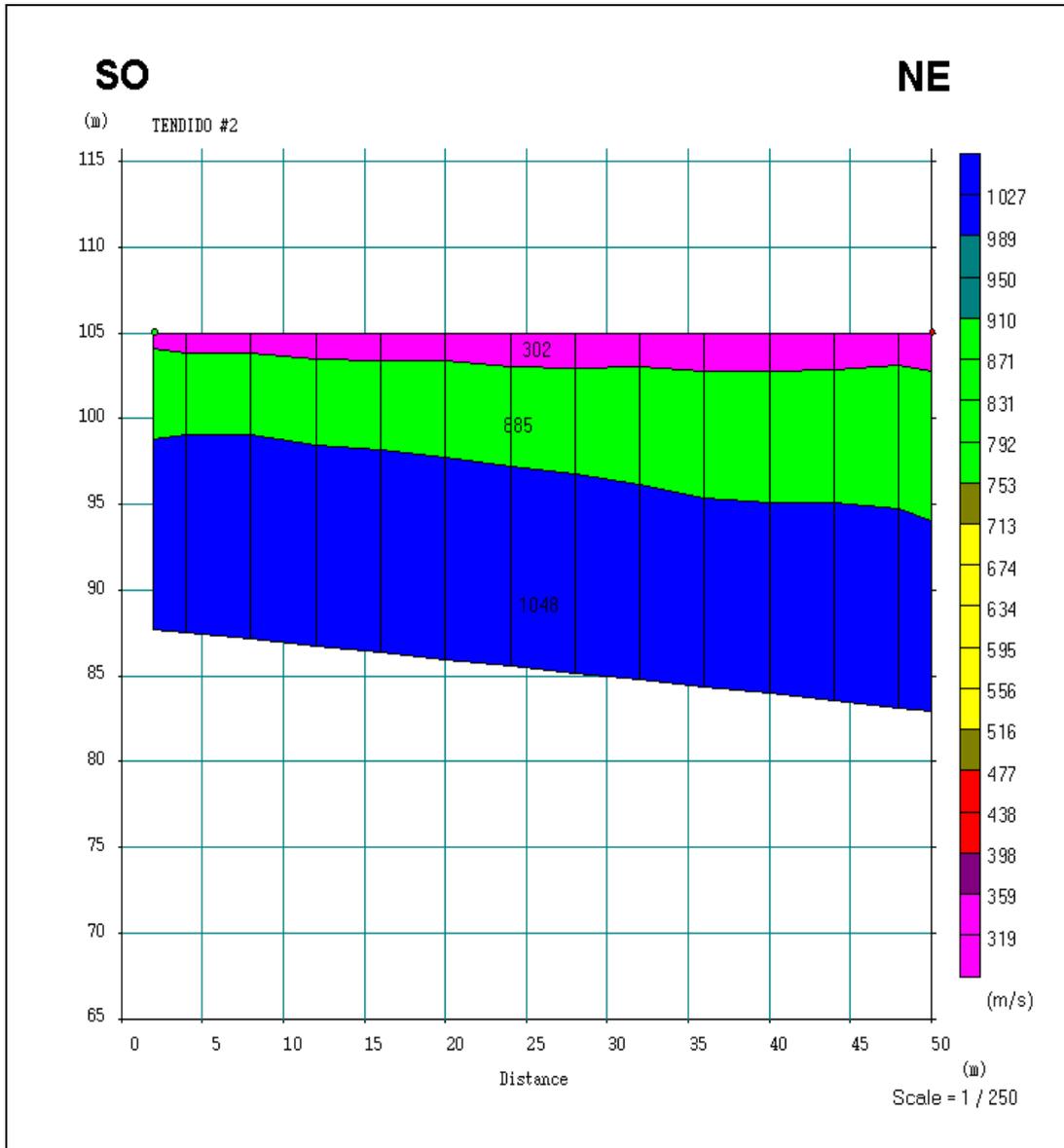


Figura 4.7 Imagen del modelo de velocidades de onda P del tendido T2.

Una metodología similar se utilizó para elaborar el modelo de velocidades de onda S, para el cual se cargan las líneas sísmicas en el módulo Pickwin®. En las opciones se elije en la lista desplegable de “Surface wave analysis” ó análisis de ondas superficiales (porque en el registro tenemos una mezcla de onda S y ondas superficiales) en el cual se hace la transformación de velocidad a frecuencias debido a que en el espectro de frecuencias es que se van a discriminar los modos de más baja energía (teóricamente) y con ayuda del módulo WaveEq® se

visualiza un modelo 1D de onda S; para mejorar este modelo se hace una inversión mejorada de los datos modelados (figura 4.8).

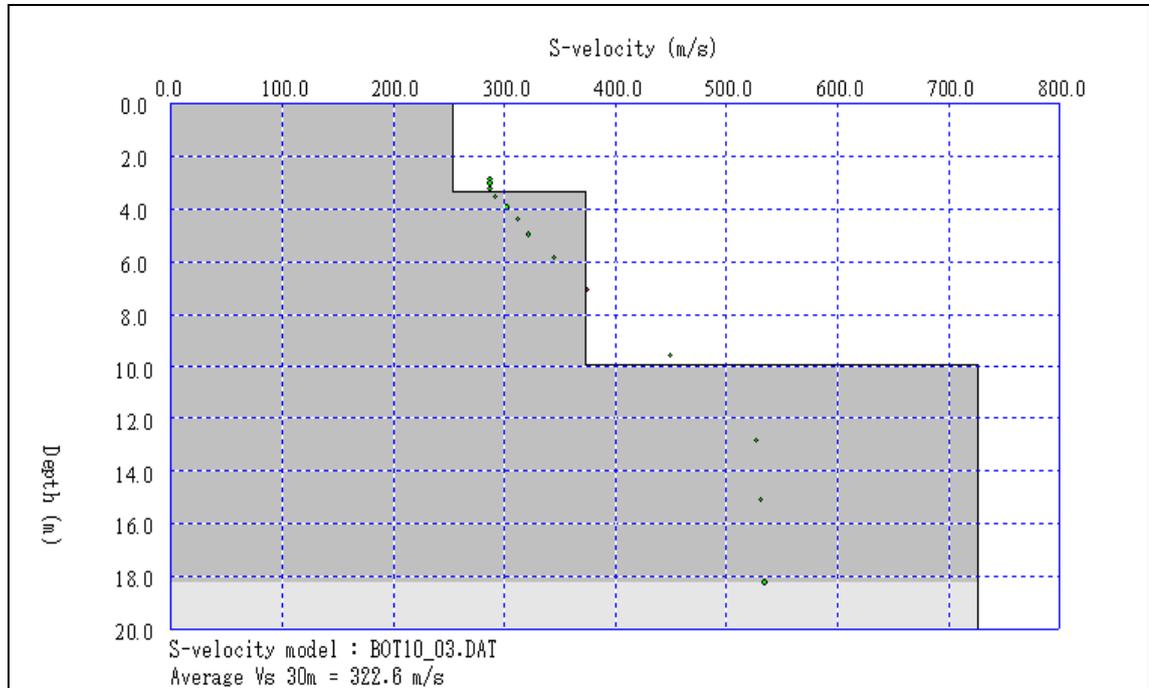


Figura 4.8 Imagen del modelo de velocidades de onda S del tendido T2.

El propósito de calcular las velocidades de propagación de ondas S, es para calcular los módulos dinámicos que caracterizan la elasticidad del material que conforma el sustrato, para ello se emplean las ecuaciones de la 1 a la 4, presentadas en la sección 3.3.1.

Para la elaboración de las tomografías sísmicas, se utilizó el modelo inicial de propagación de onda P creado, luego con el mismo programa Plotrefa® se procede al cálculo de las velocidades resultando un modelo de 10 iteraciones para el perfil adquirido con geometría *split spread* de 3 puntos de disparos y modelos de 25 iteraciones para los perfiles adquiridos con geometría *split spread* de 5 puntos de disparos (figura 4.9).

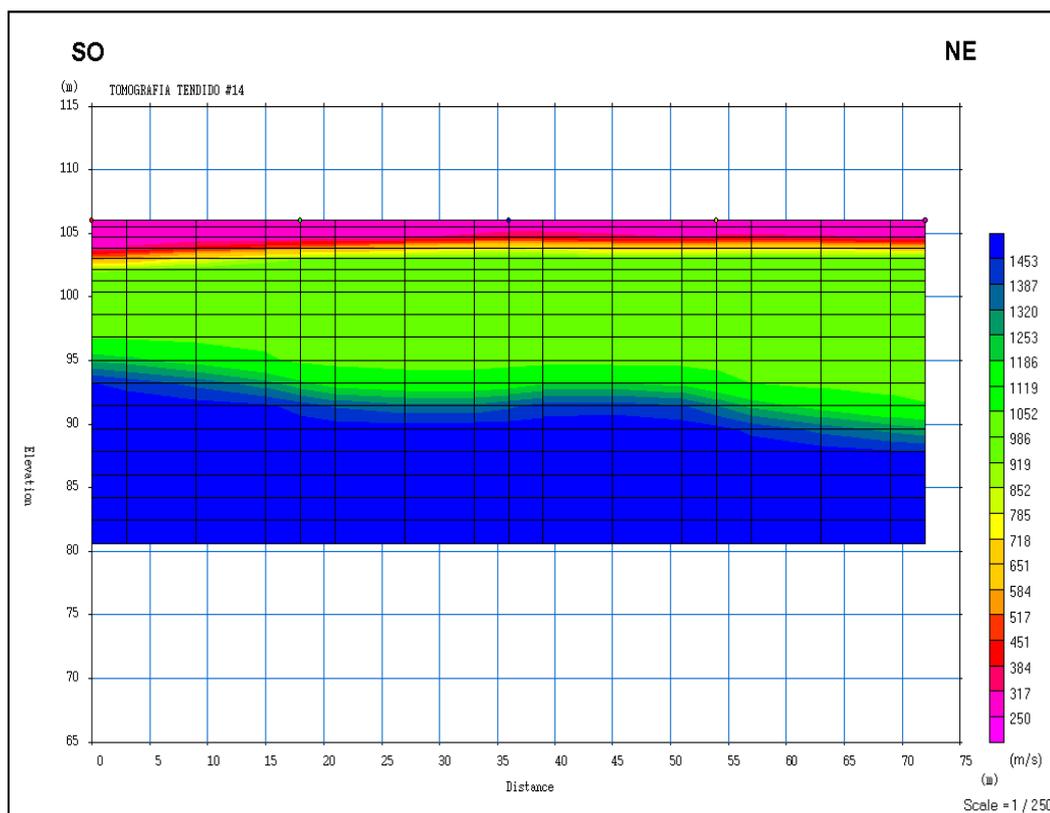


Figura 4.9 Imagen de la tomografía sísmica del tendido T14.

4.3 Interpretación de los datos sísmicos de refracción

Teniendo el modelo de velocidades se inicia la fase de interpretación de los resultados, que en este caso se traduce en el modelo de velocidades. Para ilustrar mejor la distribución de velocidades se generan perfiles sobre el conjunto de datos obtenidos, se fija el basamento geotécnico y se integran todos estos datos con los resultados de los ensayos geotécnicos obtenidos, se fijan el número y ubicación de los puntos de muestreo (perforaciones) más convenientes y se designan las geometrías de las capas.

De los módulos elásticos calculados se derivan análisis de tipo cualitativo del material que conforma el sustrato, se correlacionan con las tablas existentes y definen las áreas con mejores características para fundación de obras civiles de gran envergadura e impacto, que en teoría deben coincidir con las propuestas anteriormente.

4.4 Alcances y limitaciones

Dentro de lo contemplado en el cronograma propuesto para la campaña de adquisición de los datos sísmicos se cumplió aproximadamente un 90% de lo programado, esto debido a la dificultad para movilizar los equipos y el personal a la margen izquierda del río, ya que en temporada de lluvias el único acceso a esa zona es a través de un funicular de fabricación artesanal (figura 4.10) que disponen los habitantes del área, en su mayoría parceleros y trabajadores de la actividad agropecuaria.



Figura 4.10 Fotografía del funicular que sirve para acceder a la margen izquierda del Río Querecual.

Si bien durante el trabajo de oficina de la campaña de adquisición se procesaron algunos tendidos (aproximadamente 40%) para hacer control de calidad de lo adquirido, no contamos con la suerte de detectar un problema que se suscitó con los archivos del tendido T12, los cuales se encuentran dañados y por lo tanto no aportaran resultados a considerar para este estudio.

CAPÍTULO V
RESULTADOS

5.1 Presentación y análisis de resultados

Los resultados inmediatos luego del procesamiento son: mapa de ubicación de los tendidos sísmicos, perfiles sísmicos de cada tendido donde se muestran las velocidades de onda, tabla resumen de velocidades tanto de los modelos 1D de onda S como de onda P, tabla de módulos calculados, perfiles generalizados e imagen de integración de datos geotécnicos.

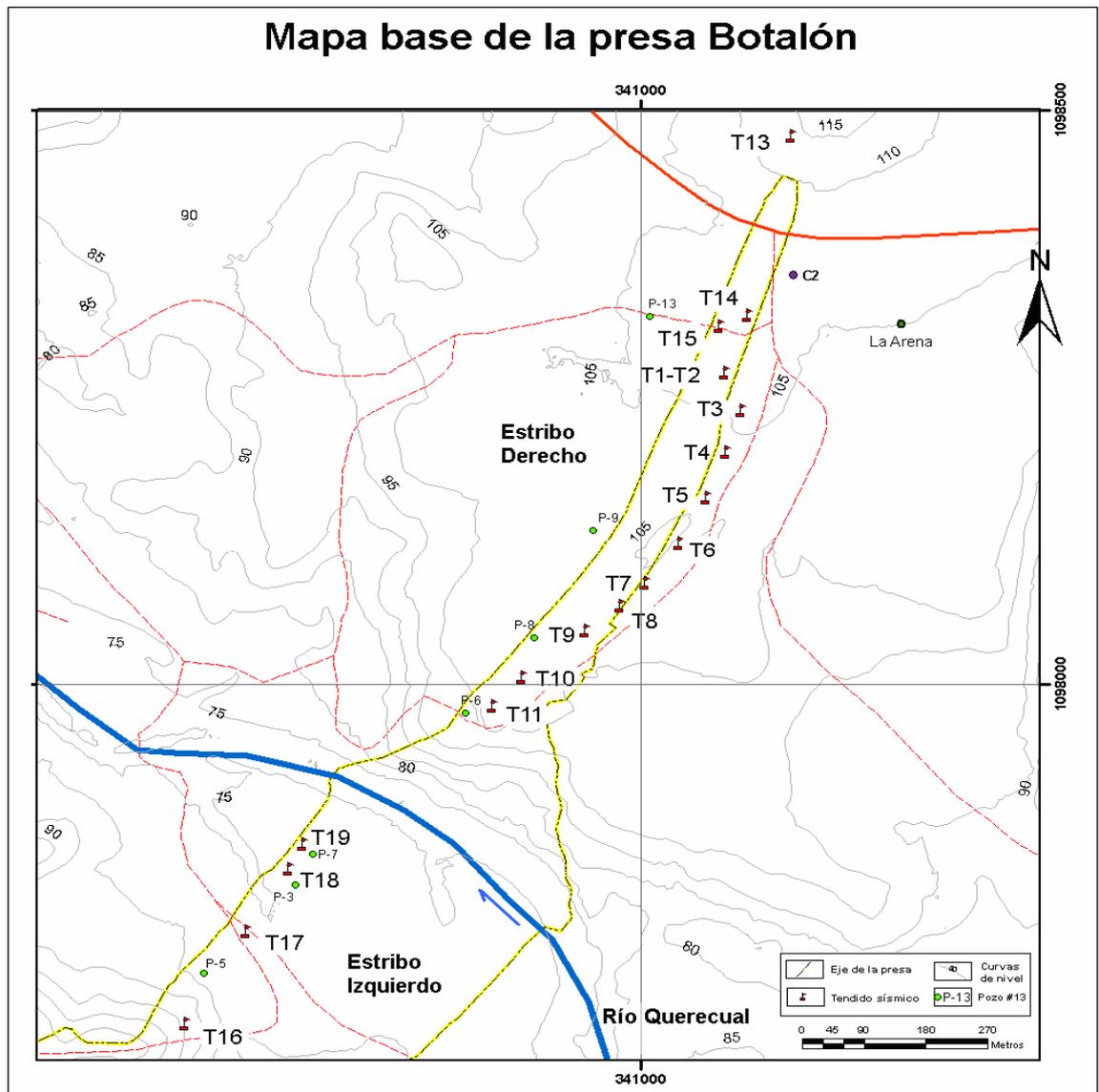


Figura 5.1 Mapa de ubicación de los puntos medios de los tendidos levantados, perforaciones y calicata geotécnica, eje de la presa y estribos respecto al Río Querecual. (anexo 01). (FLNH, 2010)

El estribo derecho (figura 5.1) tiene los perfiles de los tendidos T1 a T15, a excepción del tendido T12 que por presentar problemas de lectura con el programa no se incluye dentro del análisis. Por tanto, la longitud total de datos procesados e interpretados para el estribo derecho es de 720 m distribuidos a lo largo del sitio de presa como se muestra en la figura 5.1.

A continuación se presentan los perfiles sísmicos de tendidos del estribo derecho:

Tendido T1 (prueba)

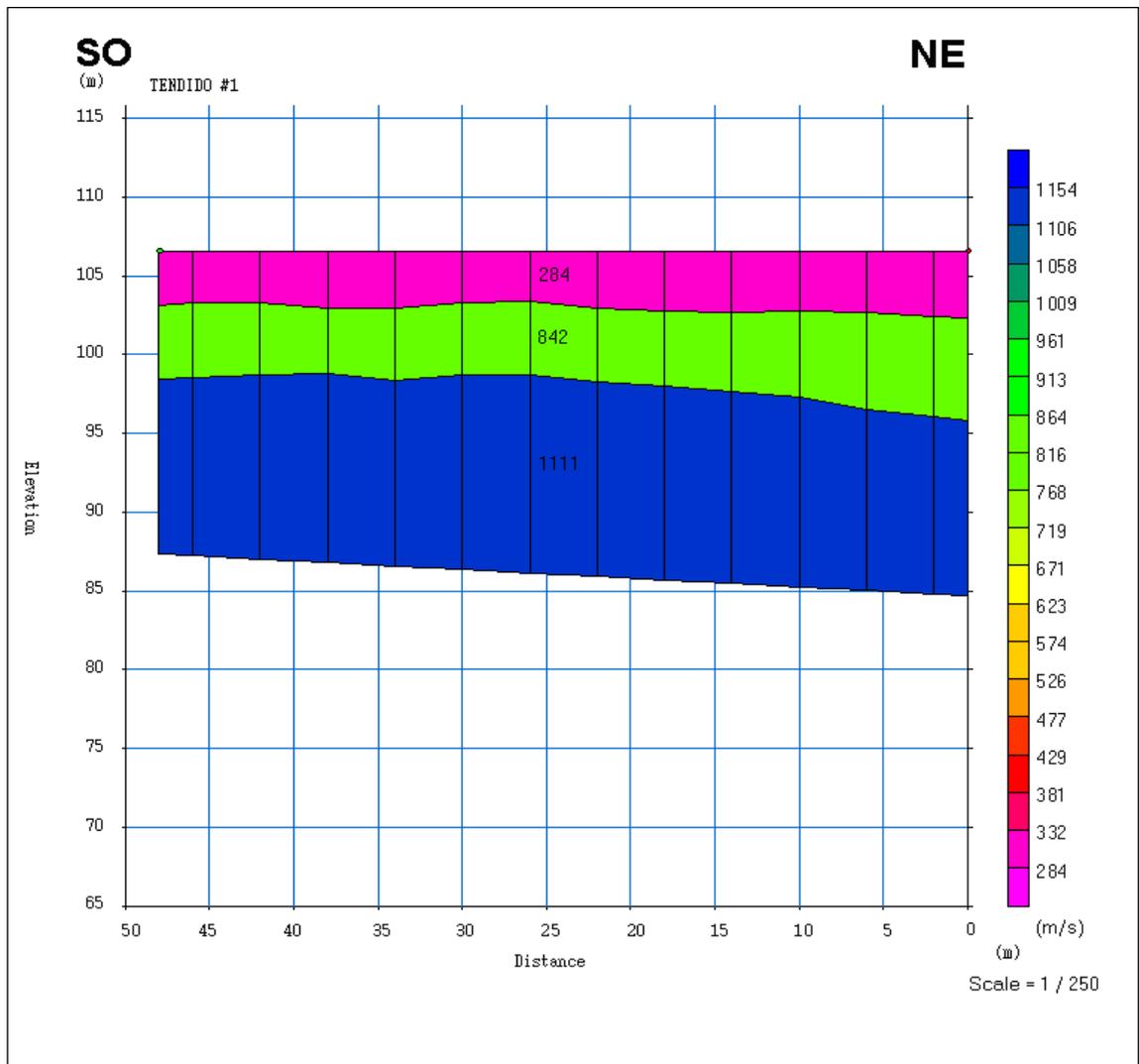


Figura 5.2 Modelo de velocidades tendido T1 (N48°E), líneas sísmicas BOT10_01 y BOT10_02.

Tendido T2

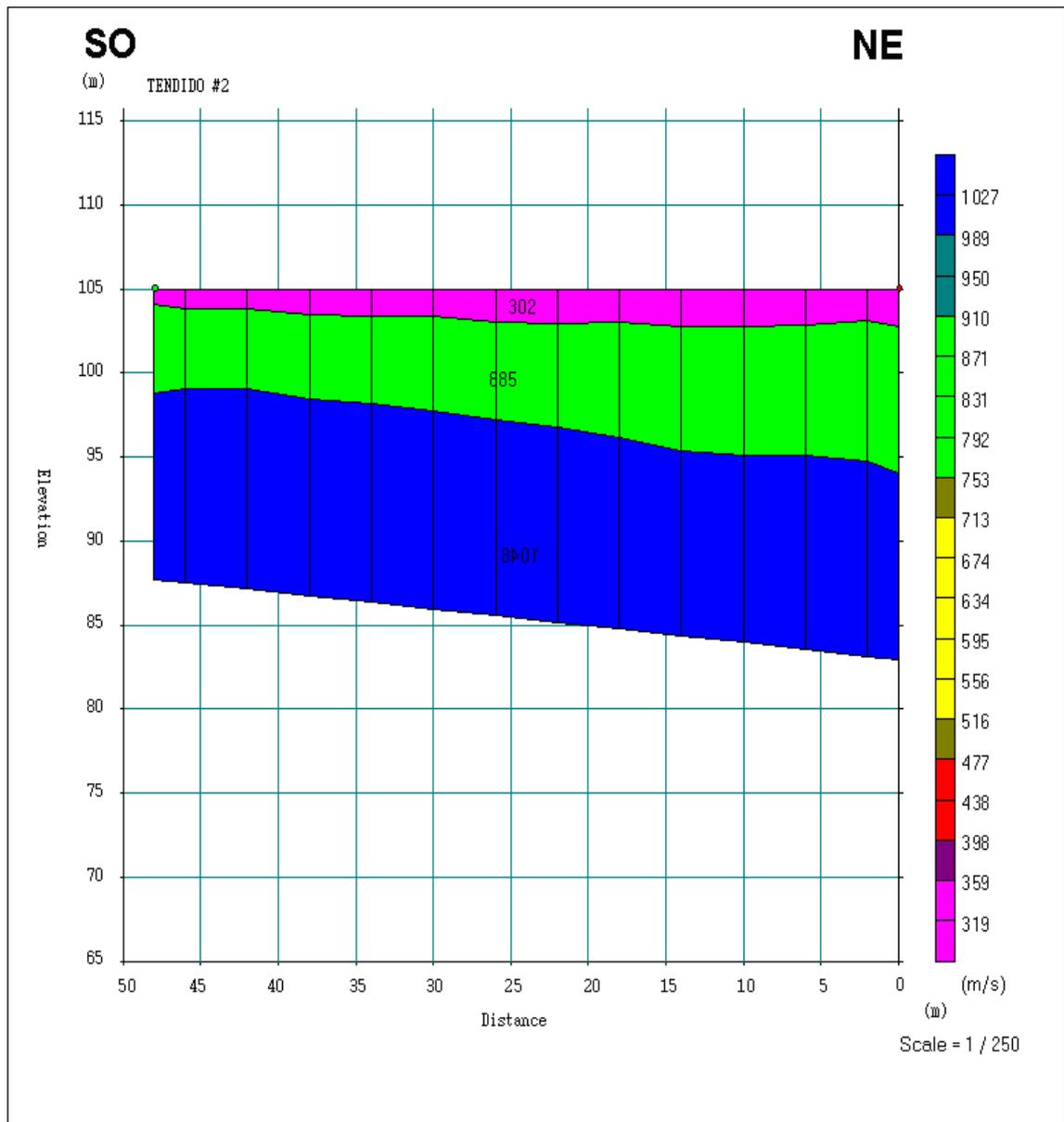


Figura 5.3 Imagen del modelo de velocidades del tendido T2 (N48°E), líneas sísmicas BOT10_03 y BOT10_04.

Como era de esperarse este perfil es semejante a al perfil sísmico del tendido T2, porque fueron levantados los datos sobre el mismo terreno pero con cambios en los parámetros de adquisición (detallados en la metodología de adquisición).

Tendido T3

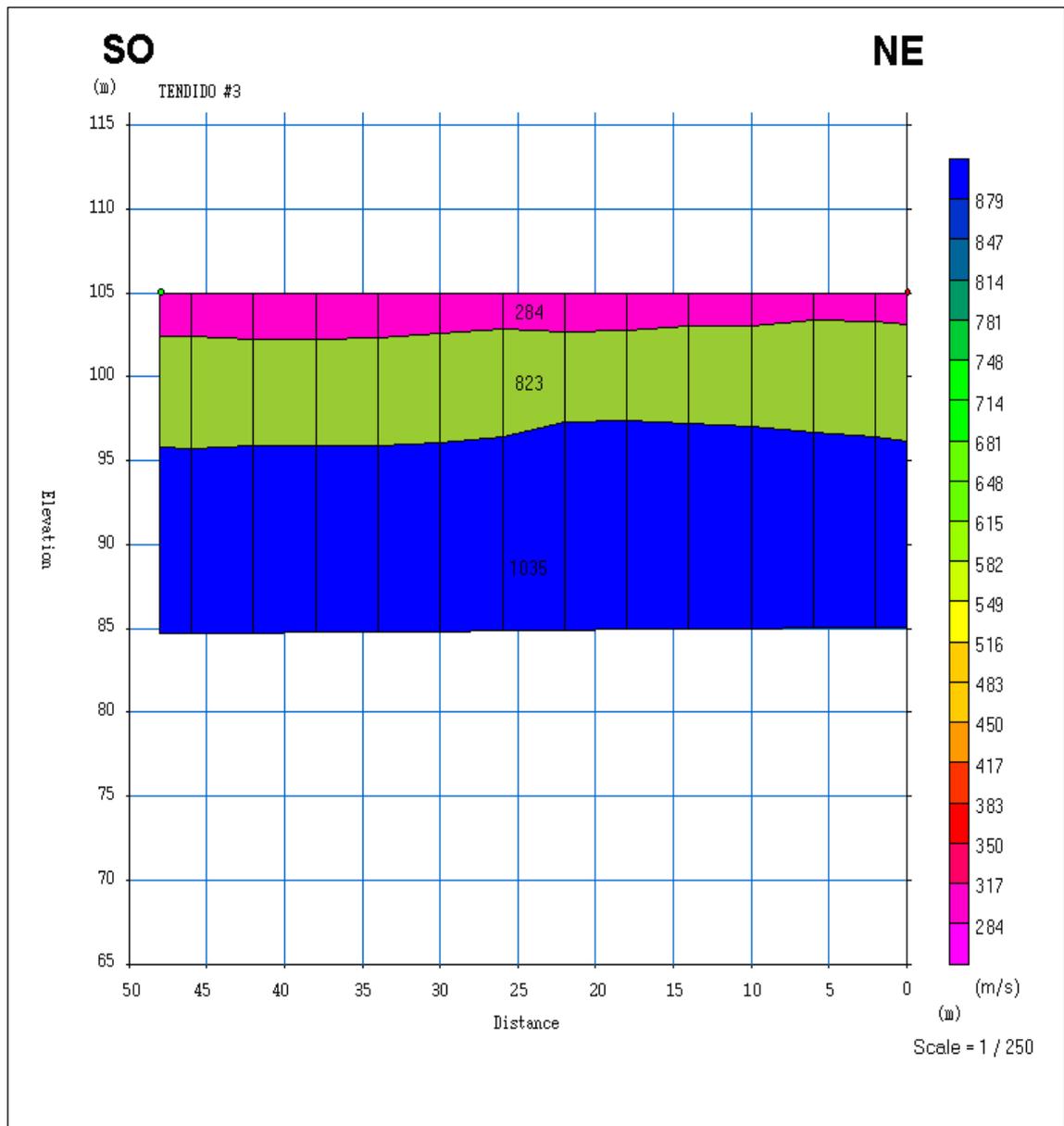


Figura 5.4 Imagen del modelo de velocidades del tendido T3 (N48°E), líneas sísmicas BOT10_05 y BOT10_06.

El levantamiento de los datos para elaborar este tendido se hace sobre la trocha que conduce a los potreros del Hato Llano Lindo, la misma fue rellena con material sobrante de construcción, mezcla de gravas, bloques y escombros.

Tendido T4

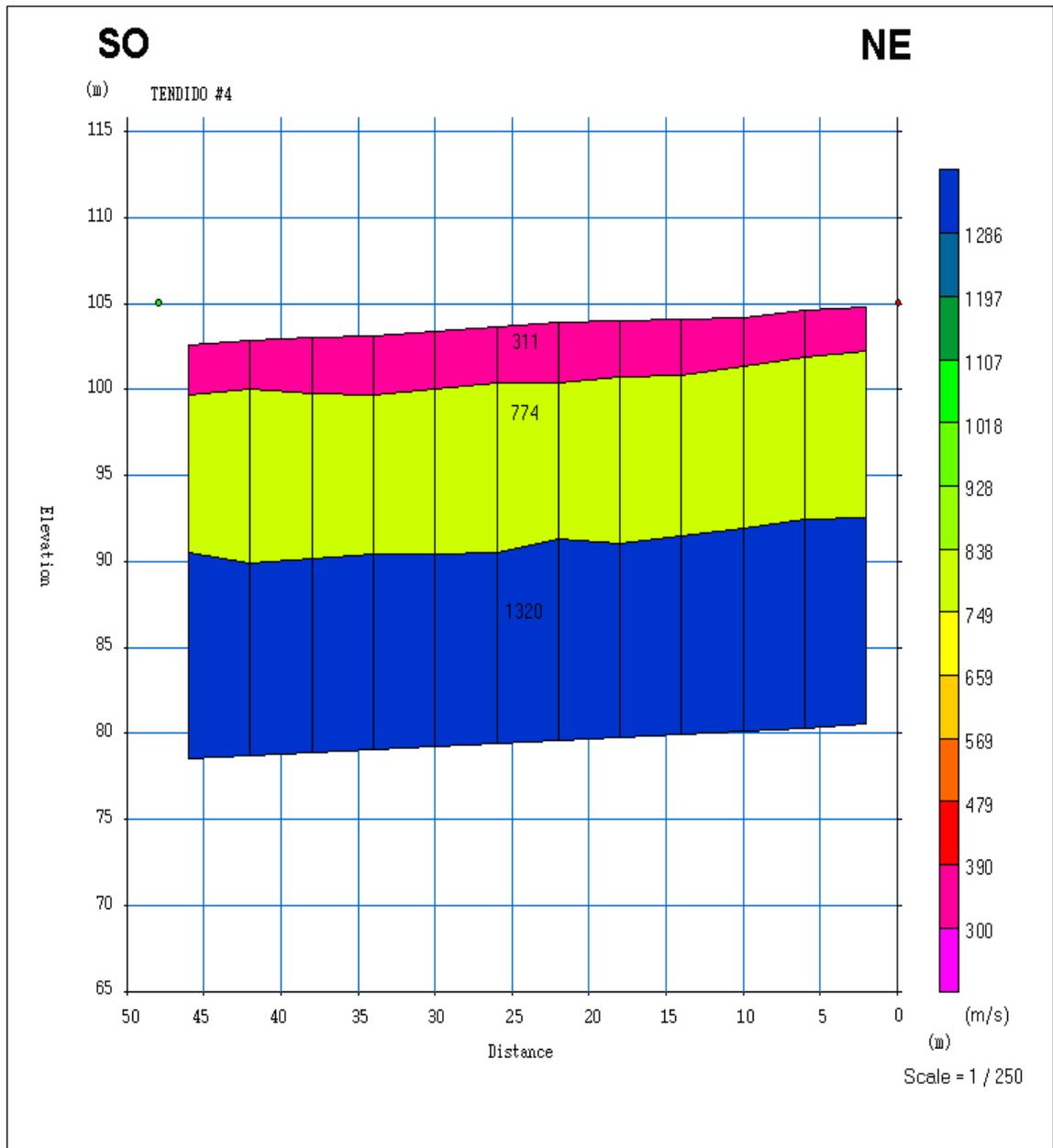


Figura 5.5 Imagen del modelo de velocidades del tendido T4 (N46°E), líneas sísmicas BOT10_07 y BOT10_08.

Tendido T5

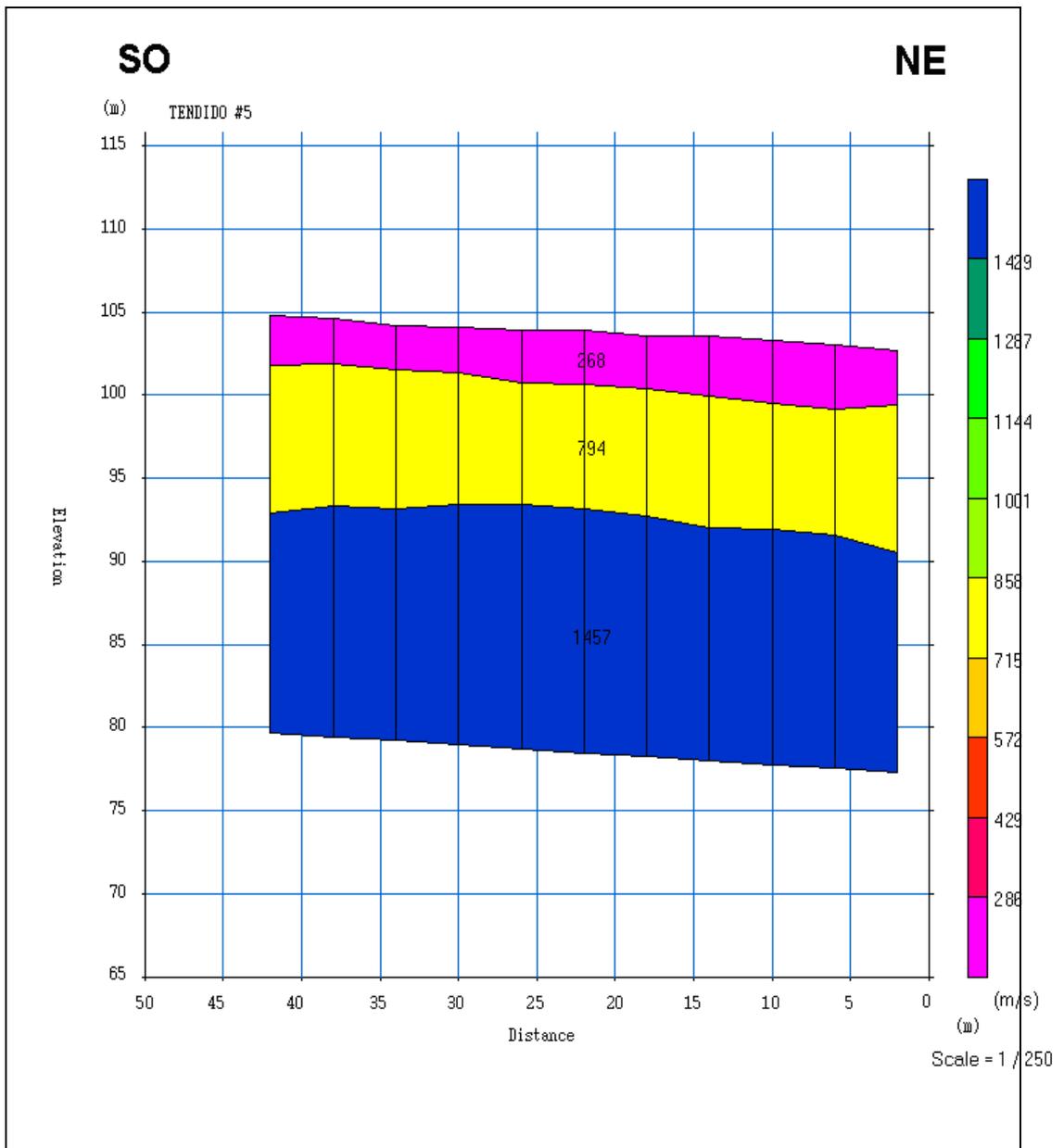


Figura 5.6 Imagen del modelo de velocidades del tendido T5 (N46°E), líneas sísmicas BOT10_09 y BOT10_10.

Tendido T6

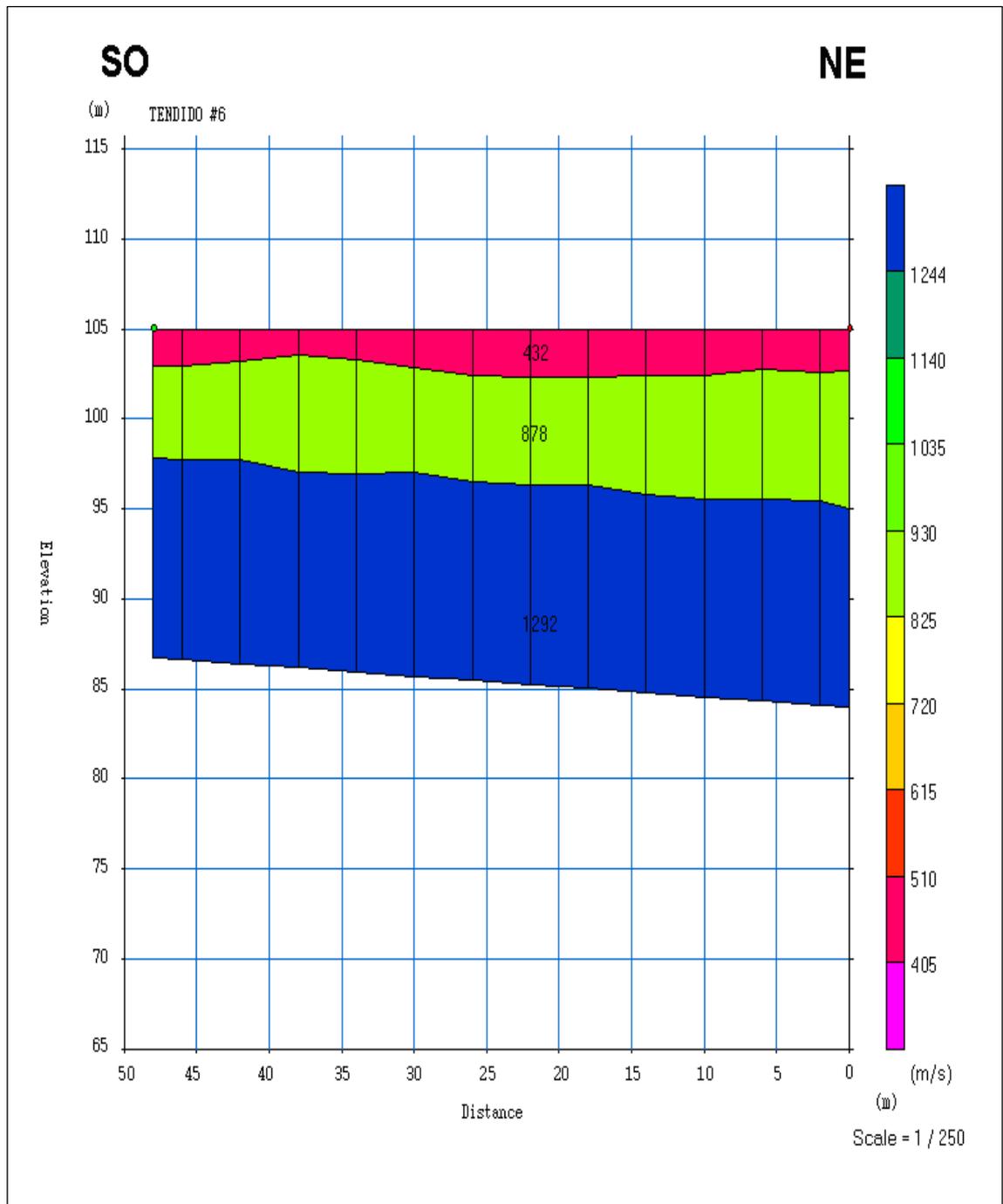


Figura 5.7 Imagen del modelo de velocidades del tendido T6 (N52°E), líneas sísmicas BOT10_11 y BOT10_12.

En este perfil (figura 5.7) se observa un leve aumento en la velocidad de propagación de onda P de la primera capa, esto es atribuible a que en esa parte del transepto el suelo es de origen antrópico, conformado por una mezcla de gravas y bloques para mejorar la trocha.

Tendido T7

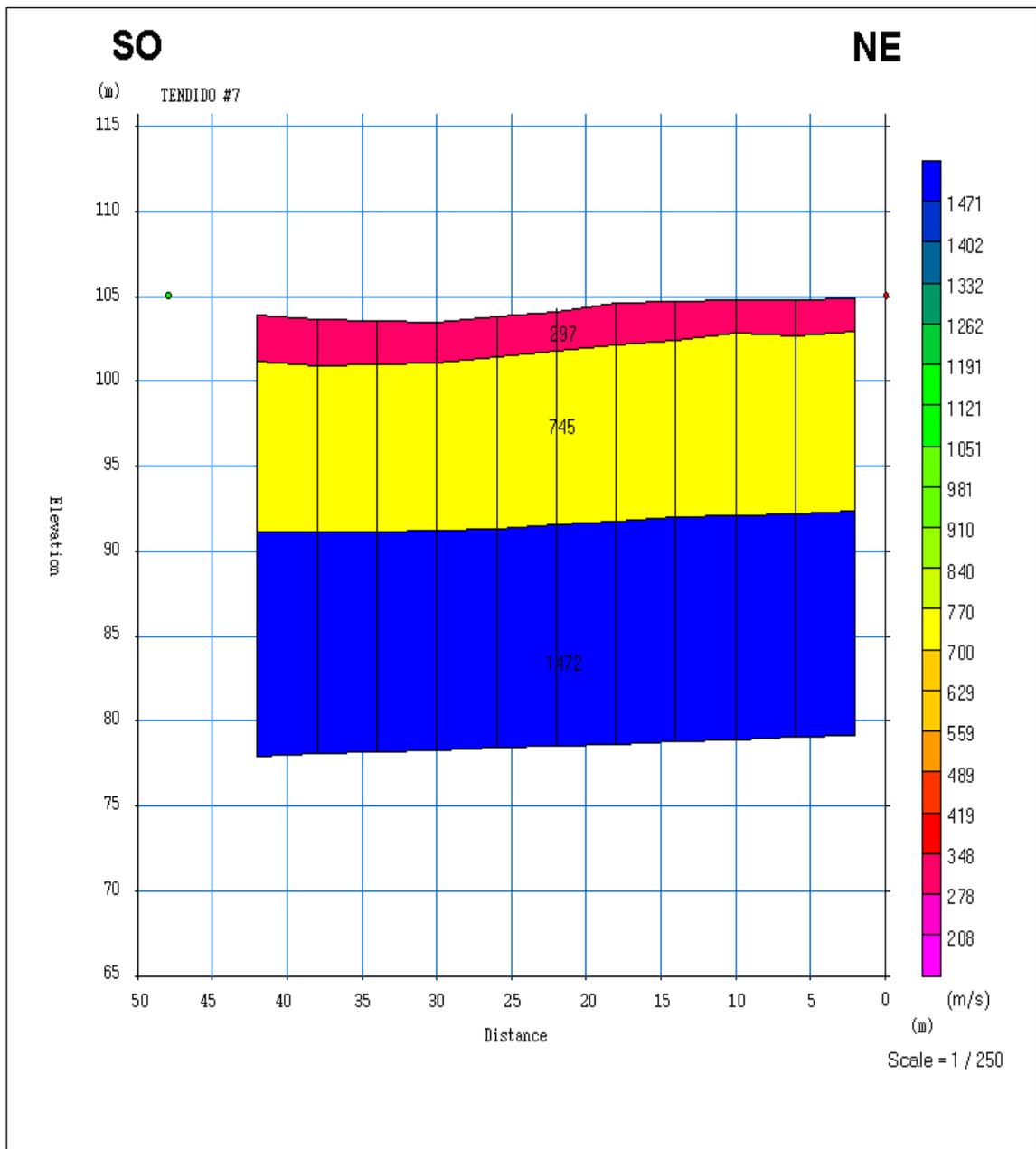


Figura 5.8 Imagen del modelo de velocidades del tendido T7 (N55°E), líneas sísmicas BOT10_13 y BOT10_14.

Este perfil (figura 5.8) tiene la particularidad de poseer un engrosamiento de la segunda capa, característica que se manifiesta hasta el perfil correspondiente al tendido T11, situado al final del transepto.

Tendido T8

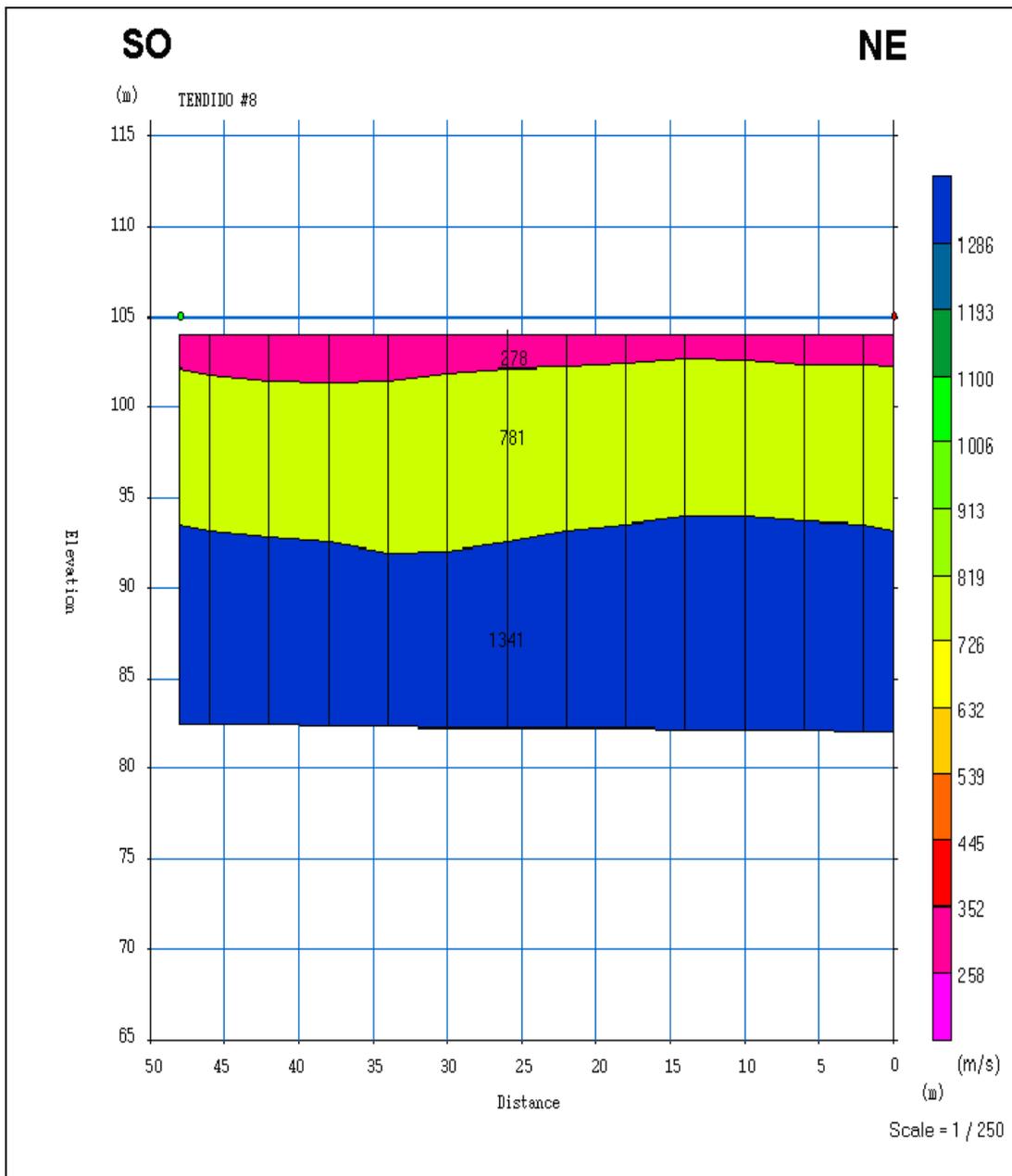


Figura 5.9 Imagen del modelo de velocidades del tendido T8 (N66°E), líneas sísmicas BOT10_15 y BOT10_16.

Los perfiles correspondientes a los tendidos T8, T9 y T10 (figuras 5.9, 5.10 y 5.11) presentan características similares al T6 (figura 5.7).

Tendido T9

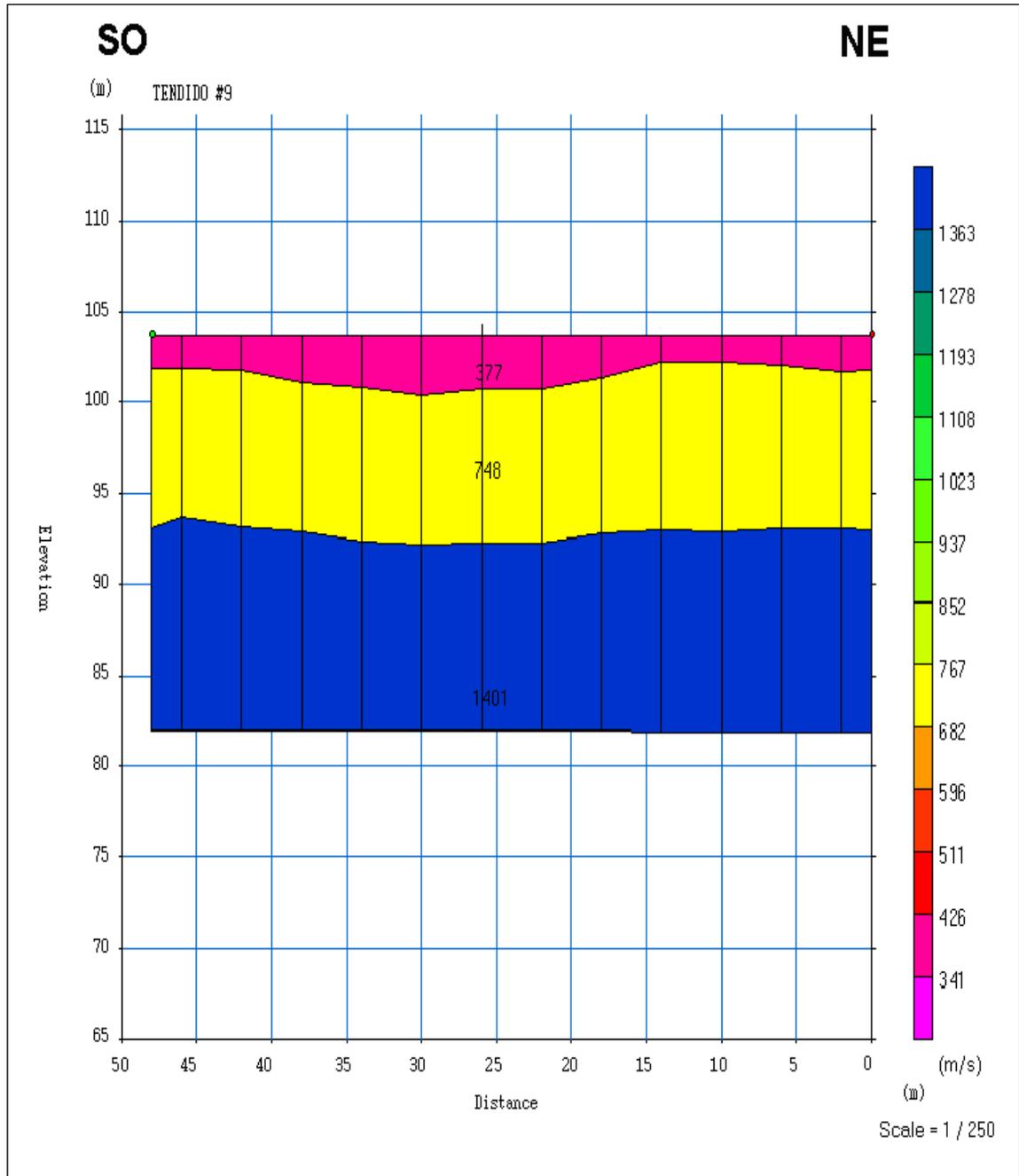


Figura 5.10 Imagen del modelo de velocidades del tendido T9 (N75°E), líneas sísmicas BOT10_17 y BOT10_18.

Tendido T10

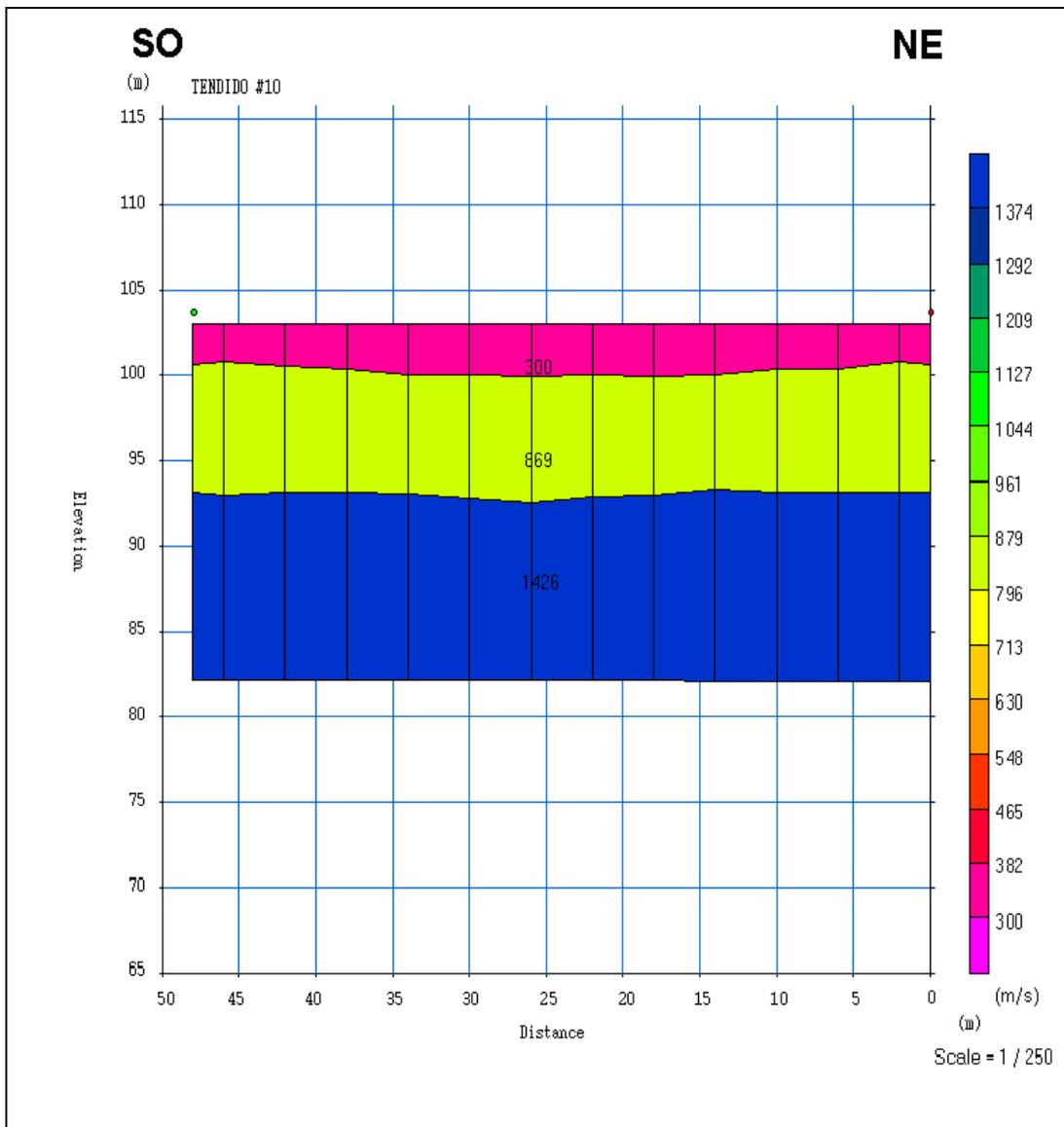


Figura 5.11 Imagen del modelo de velocidades del tendido T10 (N53°E), líneas sísmicas BOT10_19 y BOT10_20.

Tendido T11

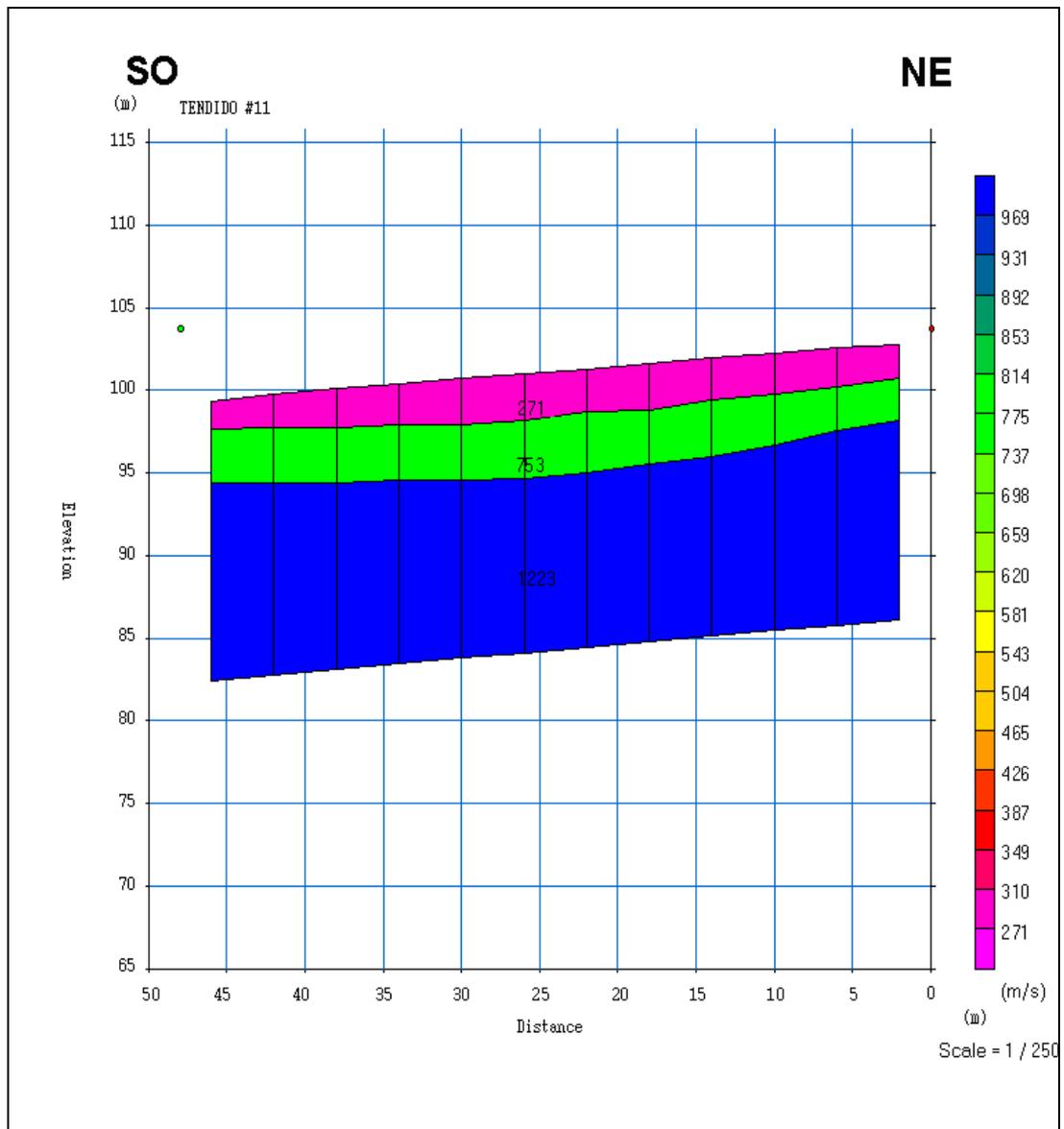


Figura 5.12 Imagen del modelo de velocidades del tendido T11 (N53°E), líneas sísmicas BOT10_21 y BOT10_22.

Se puede observar en la figura 5.12 una disminución de los espesores de las primera y segunda capa, esto debido a que este es el perfil más cercano al río por el SO y es donde comienza un declive abrupto desde la cota 100 m hasta el nivel base del río que es 70 m y es en esta zona donde el efecto de la erosión del suelo se hace más evidente.

Tendido T13

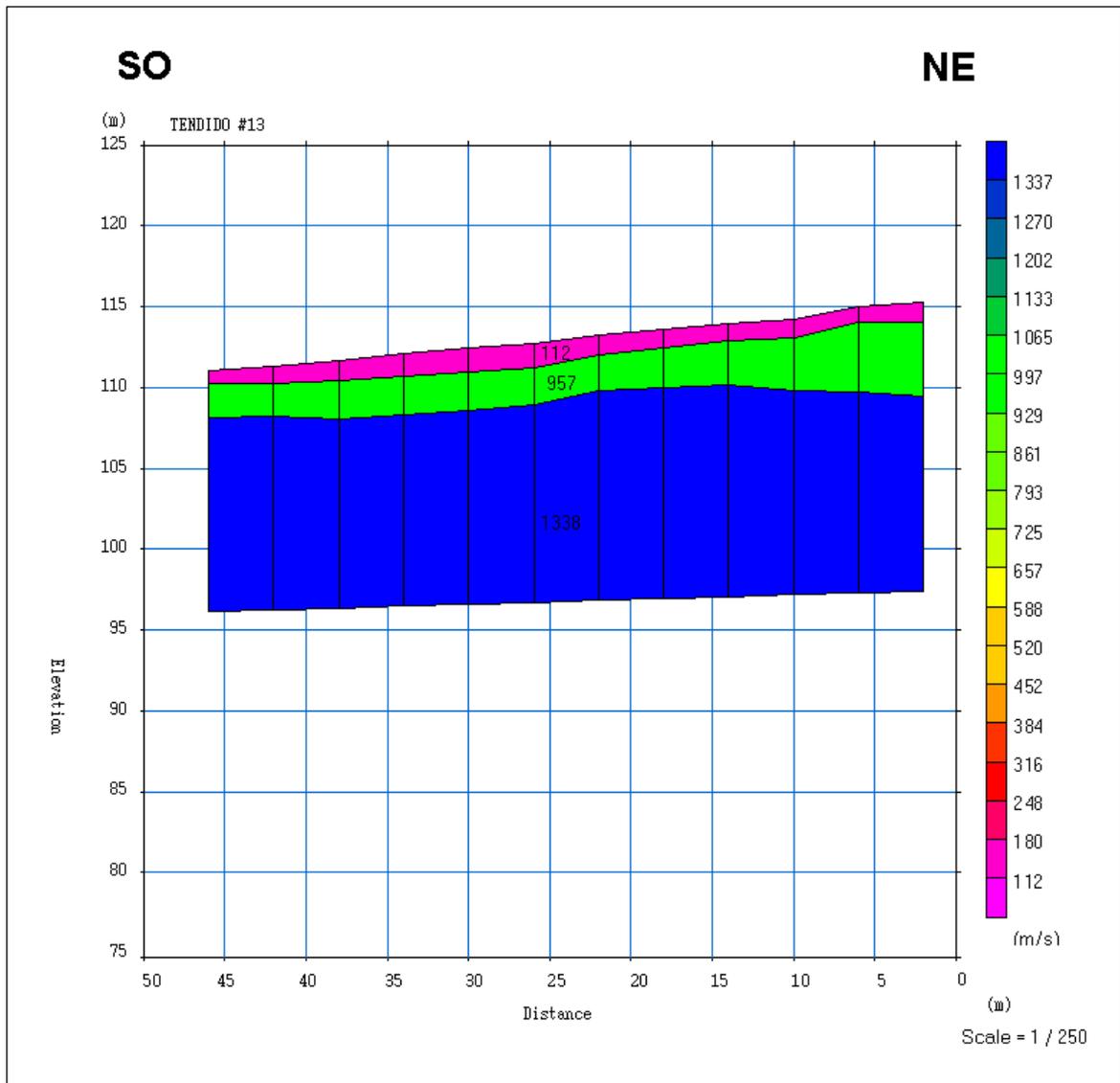


Figura 5.13 Imagen del modelo de velocidades del tendido T13 (N42°E), líneas sísmicas BOT10_25 y BOT10_26.

Este perfil (figura 5.14) ubicado en la loma que conforma el lindero más al NE del estribo derecho de la presa, la cual es una terraza dedicada al cultivo intensivo de cereales, tiene 2 peculiaridades; la primera es que el perfil de suelo es muy delgado ya que la inclinación que posee ayuda a que la lluvia y otros agentes erosivos arrastren el material cuesta abajo y la segunda es que la velocidad de la primera capa es un mínimo relativo debido a que la misma está conformada por

materia orgánica y suelo antropogénico abonado para mejorar la producción agrícola.

Tendido T14

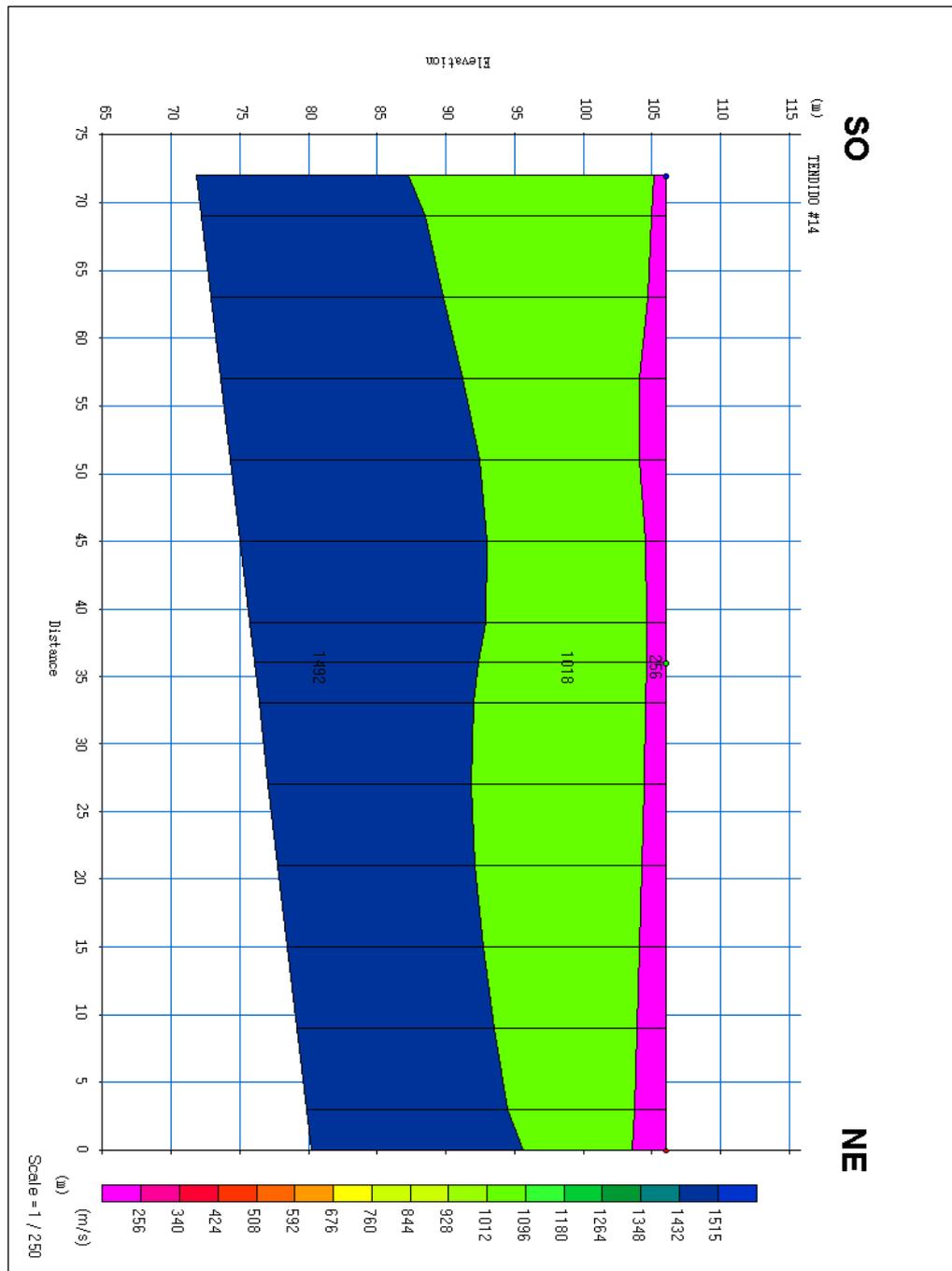


Figura 5.14 Imagen del modelo de velocidades del tendido T14 (N35°E), líneas sísmicas BOT10_27, BOT10_28 y BOT10_29.

Tendido T15

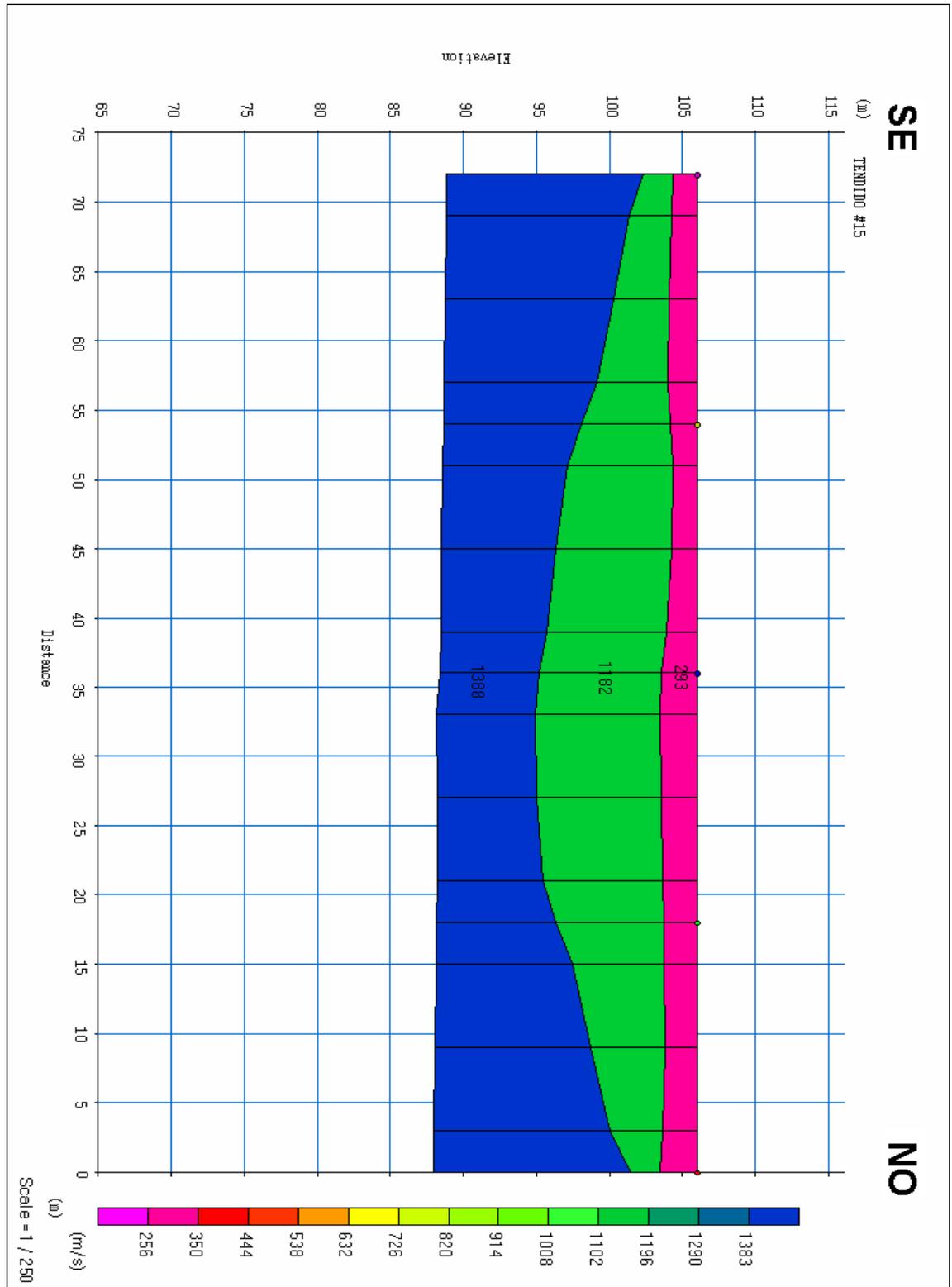


Figura 5.15 Imagen del modelo de velocidades del tendido T15 (S62°E), líneas sísmicas BOT10_30, BOT10_31, BOT10_32, BOT10_33 y BOT10_34.

La figura 5.16 es el perfil sísmico corresponde al tendido T15, cuya longitud total es 72 m, con arreglo de adquisición *Split spread – end on* con 5 puntos de tiro (en 18 m, 36 m, 54 m y 72 m). Es perpendicular al transepto en el tendido T14, por lo que el T15 lo corta entre el geófono G6 y G7 (a los 36m del perfil T14). Para ajustar las profundidades de las interfases se emplea la herramienta de tomografía sísmica de los tendidos T14 y T15, la cual luego de procesarlas en un editor de imágenes convencional e interceptarlas en el punto de corte generan la siguiente imagen:

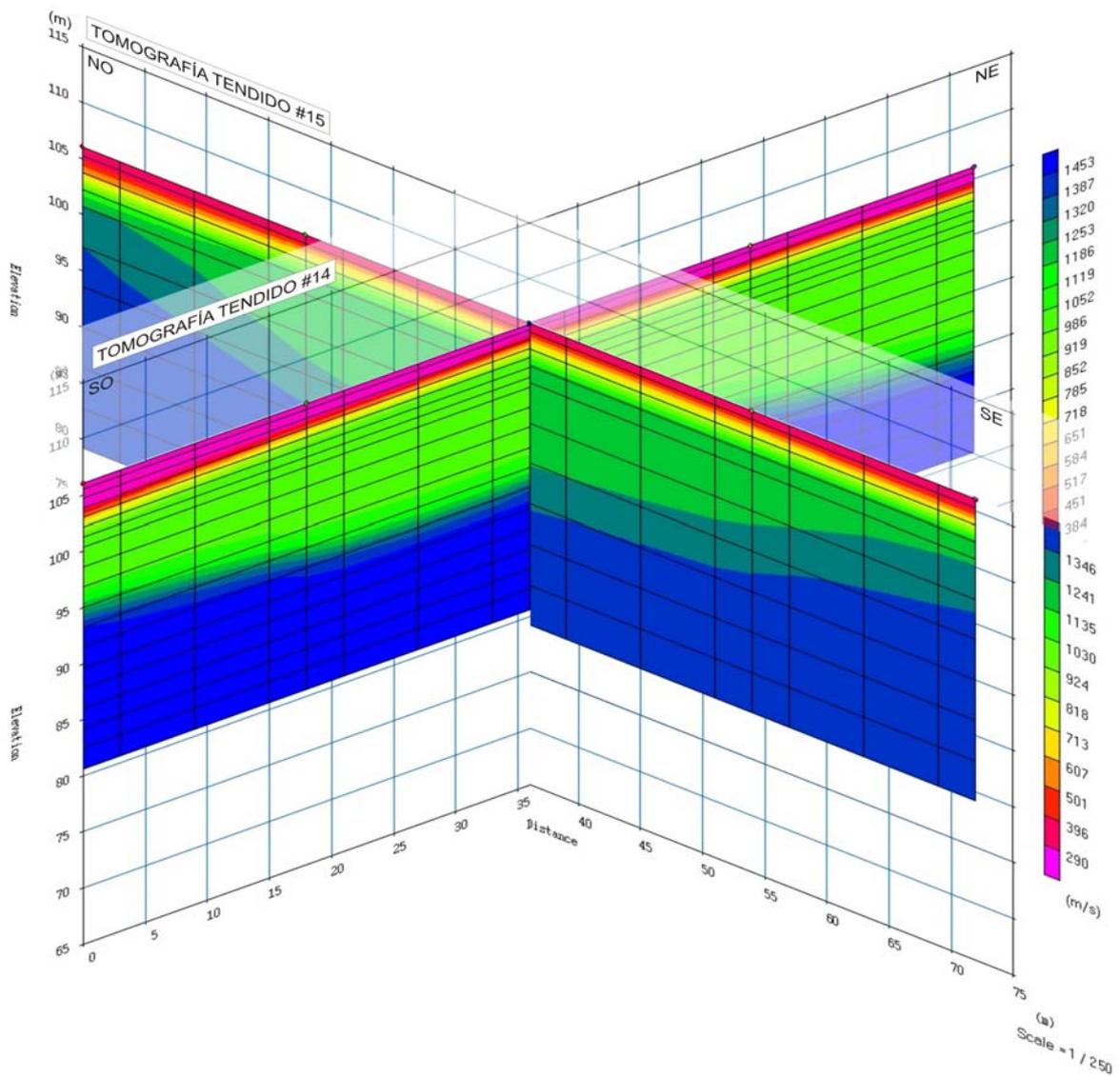


Figura 5.16 Imagen compuesta por la intersección de las tomografías T14 y T15.

En la figura 5.17 (tomografías cruzadas) se observa claramente una correspondencia en la intersección de las tomografías de los perfiles sísmicos generados, en la que la variación de profundidad de capa meteorizada de la tomografía T14 es de aproximadamente 52 cm más profunda que la T15, caso similar sucede con la segunda interfase en la que el desnivel es de aproximadamente 65 cm siendo de nuevo la T15 más somera que la T14.

El estribo izquierdo tiene los perfiles de los tendidos T16 a T19, dando una longitud total de datos procesados e interpretados para dicho estribo de 216 m. Comenzando por el límite izquierdo de la presa (más al SO), cuyo estribo descansará sobre una loma en la que se levantó en perfil T16.

Tendido T16

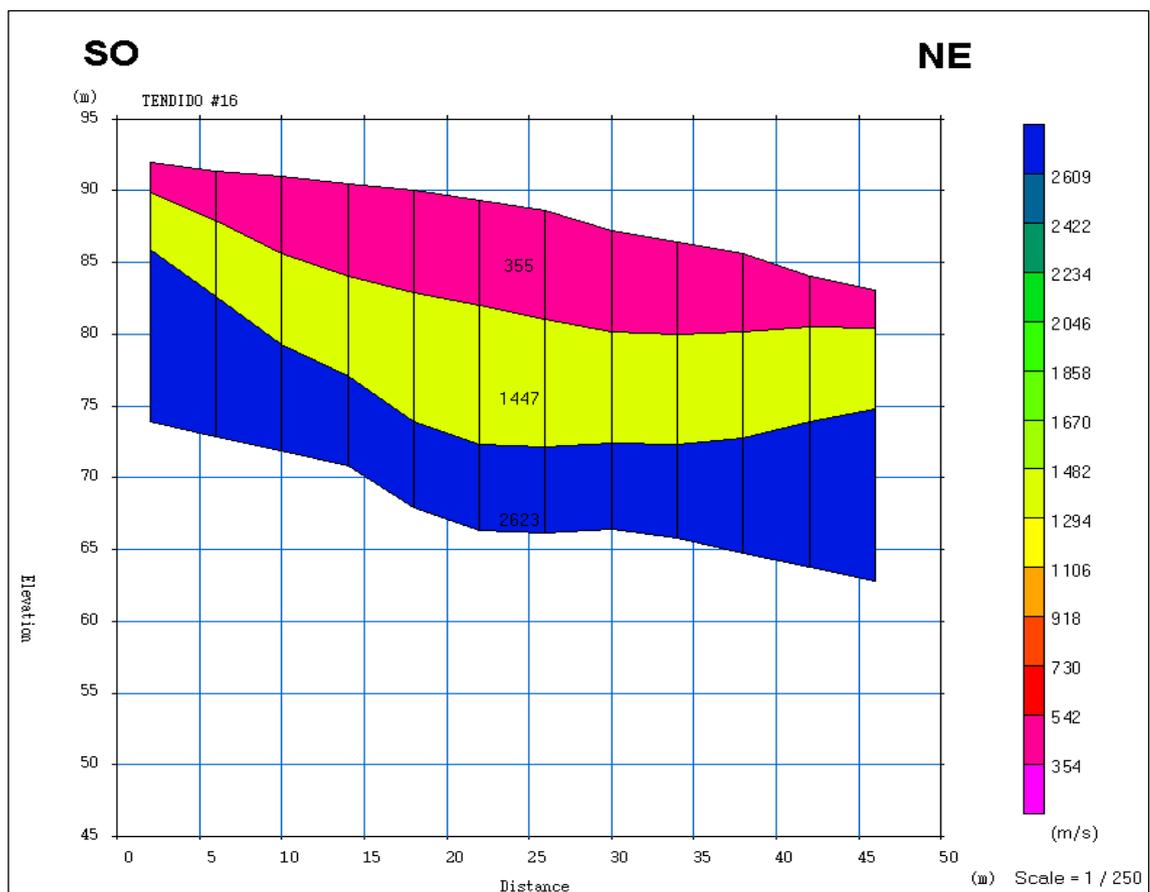


Figura 5.17 Imagen del modelo de velocidades del tendido T16 (N43°E), líneas sísmicas BOT10_35 y BOT10_36.

Se puede apreciar la significativa diferencia de alturas desde el inicio (G1) en 92,5 m hasta el final (G12) en 83,1 m. En este estribo se observa también un incremento en el perfil de suelo llegando a 4,3 m de espesor, esto debido a que se encuentra en el Miembro Salomón de la Formación Quiamare; el cual posee facies litológicas mucho más arenosas y un perfil de suelo rico en gravas y limos arenosos (figura 5.17).

Tendido T17

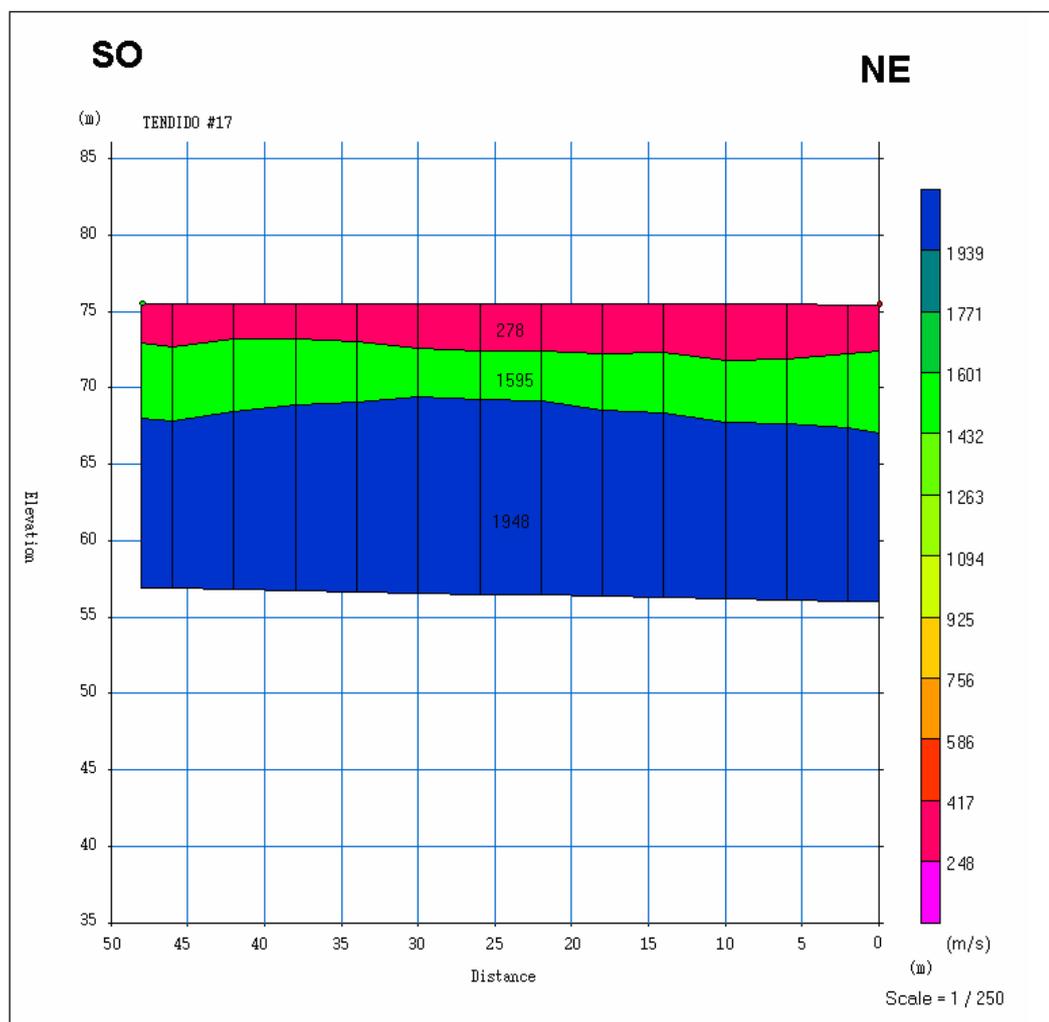


Figura 5.18 Imagen del modelo de velocidades del tendido T17 (N41°E), líneas sísmicas BOT10_37 y BOT10_38.

Este perfil y los siguientes (figuras 5.20, 5.21 y 5.22) se encuentran en la llanura de inundación del río, que en temporada de lluvias vence la altura que impone la

topografía y anega la zona depositando sedimentos finos limo arcillosos, que se intercalan con los clásticos gravo arenosos provenientes de zonas más elevadas que se depositan por efecto meteórico en época de bajas precipitaciones, lo que genera una mezcla de material con granulometría variada.

Tendido T18

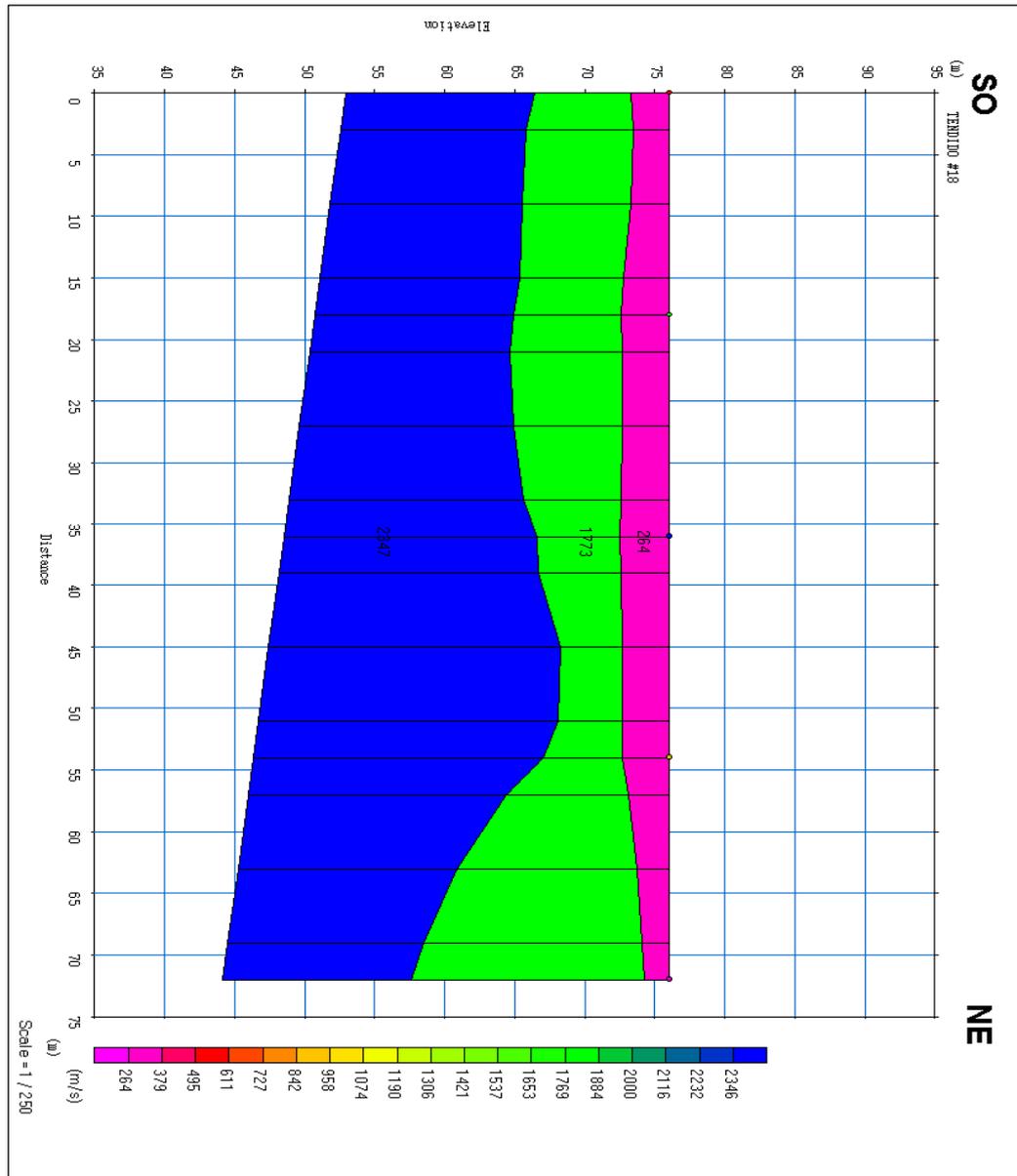


Figura 5.19 Imagen del modelo de velocidades del tendido T18 (N42°E), líneas sísmicas BOT10_39, BOT10_40, BOT10_41, BOT10_42, y BOT10_43.

Tendido T19

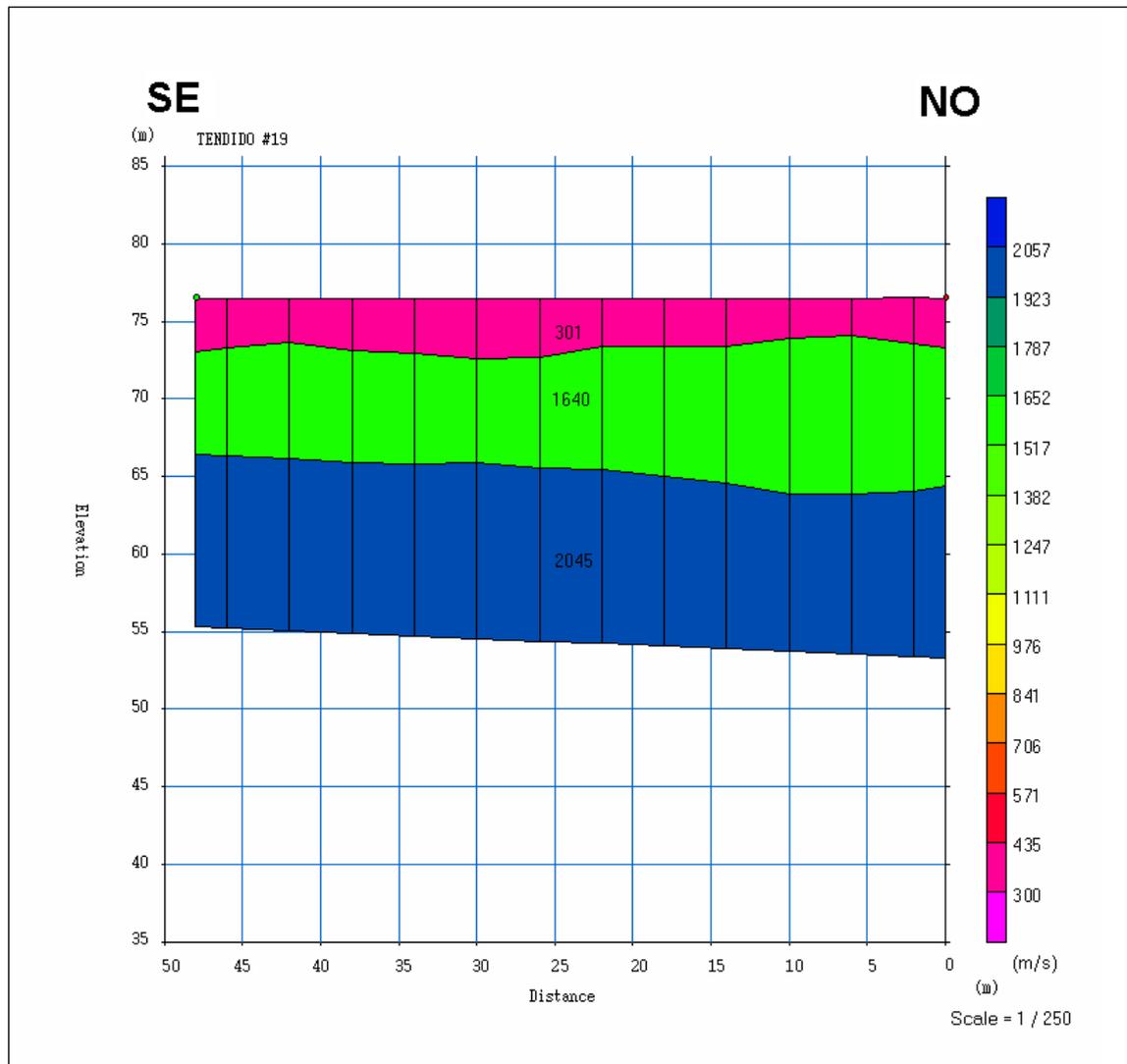


Figura 5.20 Imagen del modelo de velocidades del tendido T19 (N55°W), líneas sísmicas BOT10_44 y BOT10_45.

El río viene migrando en sentido SO a NE (figura 5.20), dejando la huella en los sitios de enclave de las terrazas antiguas, como se ve en el segmento más al NE del perfil T18 (figura 5.21), en la que la litología lutítica se ve degradada por la acción erosiva del cauce, lo mismo se evidencia en el extremo SO del perfil T17 (figura 5.18).

A continuación se presentan los perfiles sísmicos integrados del estribo izquierdo (figura 5.21) y del estribo derecho (figura 5.22).

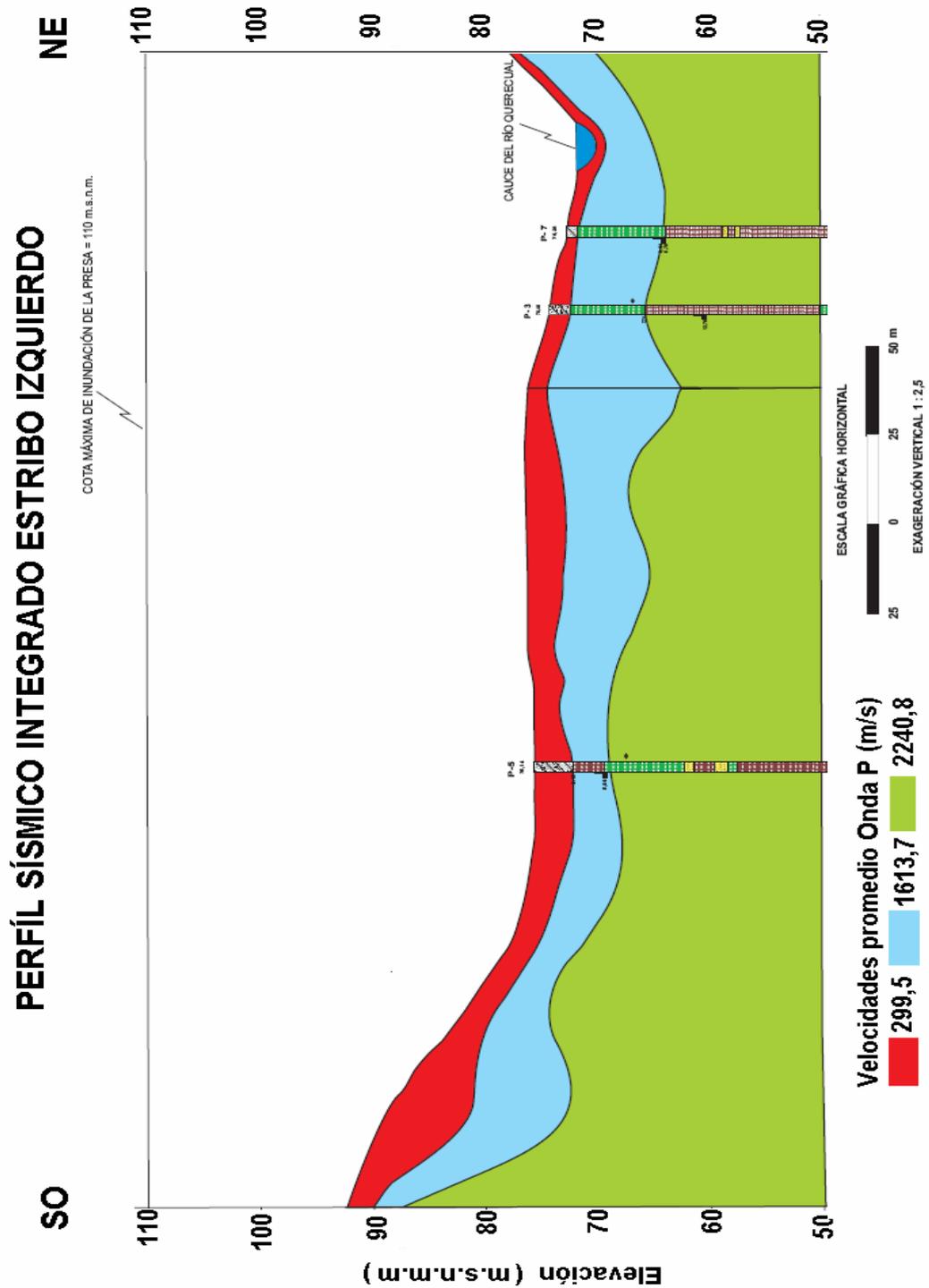


Figura 5.21 Perfil sísmico integrado del estribo izquierdo, conformado por los tendidos T16, T17 y T18 (anexo 2).

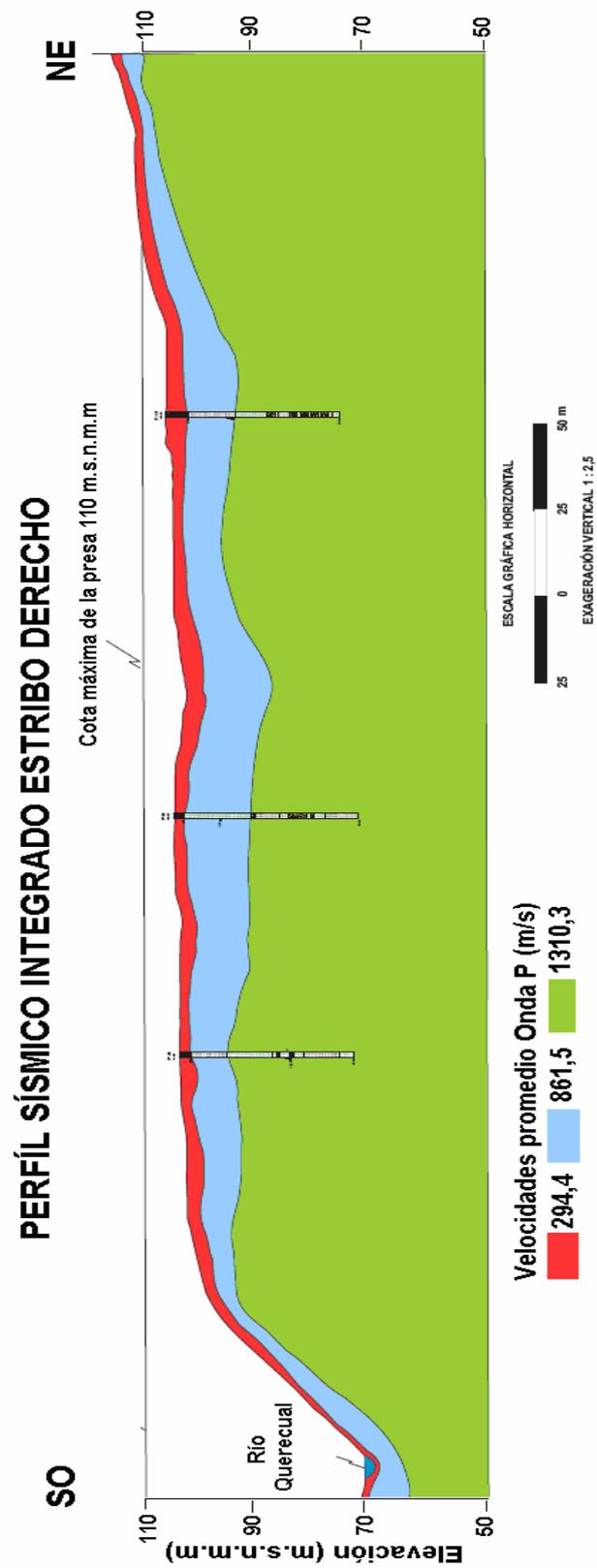


Figura 5.22 Modelo de velocidades integrado del estribo derecho, conformado (desde el NE) por los tendidos T13, T14, y del T1 al T11 (anexo 2).

Luego de examinar con detenimiento las imágenes que conforman el modelo de velocidades (figuras 5.21 y 5.22) elaborada al unir los distintos perfiles creados, se tiene una visión generalizada de la historia geológica que definió la geometría actual de las capas que se observan, estas son el producto de litologías distintas representadas en el modelo de velocidades; estas según FLNH (2010) en el estribo derecho pertenecen al Miembro Revoltijo (localmente más lutítico) depositado en un margen transicional lacustre - salobre a marino – somero, a diferencia del estribo izquierdo en el que aflora el Miembro Salomón con mayor presencia de granulometrías limo – arenosas, lo que evidencia un ambiente depositacional de carácter continental predominante (con meteorización subaérea por los nódulos y concreciones ferruginosas), *con suficientes capas duras de areniscas y conglomerados de guijarros ftaníticos, como para sostener una topografía escabrosa* (PDVSA, 1997) con presencia local de niveles conglomeráticos de cemento calcáreo.

Si bien el contacto entre los dos miembros no está bien definido arealmente debido a la cobertura de aluvión cuaternario, éste se asume en la localidad como transicional –lateral (PDVSA, 1997). Es por ello que las diferencias de velocidades promedio de segunda y tercera capa se acentúan en el Miembro Salomón con el carácter arenoso -conglomerático de cemento calcáreo respecto al Miembro Revoltijo de litología más lutítica.

Las citadas diferencias de velocidades promedio de segunda y tercera capa van de 800 m/s y 1300 m/s respectivamente en el estribo derecho a 1600 m/s y 2200 m/s respectivamente en el estribo izquierdo (tabla 5.1), mientras que a nivel de suelo – capa meteorizada se manejan velocidades promedio en el orden de los 290 m/s para ambas márgenes del río, esto debido a que estas velocidades pertenecen a una capa meteorizada que se compone de materiales muy heterogéneos que van desde rellenos con fines agrícolas hasta suelo residual.

Tabla 5.1 Tabla comparativa de velocidades de propagación de onda P (promedios) por capa en cada margen del río.

	Velocidad del Estribo izquierdo (Miembro Salomón) en m/s	Velocidad del Estribo derecho (Miembro Revoltijo) en m/s	Caracterización geotécnica (Popoff y Ramírez, 1963)
Capa 1	299,50	294,42	Perfil de suelo.
Capa 2	1.613,75	861,50	Roca descompuesta blanda
Capa 3	2.240,75	1.310,28	Roca fresca blanda

A continuación se presenta una tabla resumen de velocidades de propagación de onda P y onda S para cada capa organizada por tendidos.

Tabla 5.2 Tabla comparativa de velocidades de propagación de onda P (promedios) por capa en cada margen del río. (Notación: \parallel : paralelo a, \perp : perpendicular a, ED: Estribo Derecho, EI: Estribo Izquierdo).

Tendido	Velocidad de Onda P (m/s) Plotrefa®	Velocidad de Onda S (m/s) WaveEq®	OBSERVACIONES
T1	1111,00	475,54	Tendido de prueba
T2	1048,00	636,59	Tendido de prueba con parámetros nuevos.
T3	1035,00	612,01	ED - Hato Llano Lindo.
T4	1320,00	566,15	ED - Hato Llano Lindo.
T5	1457,00	642,57	ED - Hato Llano Lindo.
T6	1292,00	506,75	ED - Hato Llano Lindo.
T7	1472,00	567,19	ED - Hato Llano Lindo.
T8	1341,00	738,07	ED - Hato Llano Lindo.
T9	1401,00	709,86	ED - Hato Llano Lindo.
T10	1426,00	703,75	ED - Hato Llano Lindo.
T11	1223,00	751,63	ED - Hato Llano Lindo.
T13	1338,00	710,640	ED - Al SE del tanque de agua.
T14	1492,00	660,84	ED - Capilla – Split Spread (72 m).
T15	1388,00	900,66	\parallel Carretera. Split Spread (72 m) \perp T14.
T16	2623,00	998,03	EI – Loma lindero SO.
T17	1948,00	1072,51	EI – al E de la quebrada.
T18	2347,00	719,04	EI – Split Spread (72 m).
T19	2045,00	854,53	EI \parallel río y \perp a T18.

Se observa el aumento progresivo de las velocidades a medida que se profundiza dado por las condiciones de compactación por presión litostática, además es evidente la citada tendencia de aumento de velocidades del estribo izquierdo (enmarcadas en azul) respecto al estribo derecho (enmarcadas en amarillo).

Tabla 5.3 Tabla comparativa de velocidades de promedio de propagación de onda P y onda S por capa y espesores para capa 1 y capa 2 en cada margen del río. (Notación: fondo amarillo estribo derecho, fondo azul estribo izquierdo).

Tendido	Vel Onda P (m/s) Plotrefa®	Velocidad de Onda S (m/s) WaveEq®	Espesor capa 1 (m)	Espesor capa 2 (m)
1	1111	475,54	2,12	6,7
2	1048	636,59	2,57	8,43
3	1035	612,01	1,74	5,8
4	1320	566,15	2,6	9,8
5	1457	642,57	2,97	8,85
6	1292	506,75	2,3	7,6
7	1472	567,19	1,6	9,7
8	1341	738,07	1,8	9,1
9	1401	709,86	1,9	9,8
10	1426	703,75	2,4	9,6
11	1223	751,63	2,6	5,9
13	1338	710,64	1,2	3,6
14	1492	660,84	1,85	11,4
15	1388	900,66	2,55	7,75
16	2623	998,03	4,25	8,35
17	1948	1072,51	2,85	5,75
18	2347	719,04	3,14	8,6
19	2045	854,53	3,3	10,5

La tabla 5.3 muestra los espesores calculados para cada tendido (al ser comparados con la información geotécnica disponible) otorgan un alto grado de

confianza en la profundidad propuesta de la interfase suelo - roca, por ello es válido citar el caso del perfil mejor ajustado; el T14 (que dista 21,3 m al SO de C2) en el cual se propone dicha interfase a una profundidad de 1,85 m mientras que la calicata C2 reporta un espesor de suelo de 1,78 m, es decir, existe una diferencia de 7 cm. También hay que nombrar que la perforación más lejana, a 72,4 m al oeste del mismo perfil T14 es la P13 con un espesor de 3,8 m, es decir, una variación de 2 m entre la interfase litológica (reportada en el sondeo geotécnico) y la interfase sísmica. Es importante resaltar que la interfase propuesta con un método indirecto (como la refracción sísmica) que se basa en propiedades físicas de las rocas no siempre corresponden con las clasificaciones del material expuesto mediante un sondeo geotécnico, sin embargo la correlación entre ambas en este estudio es muy elevada.

Luego de establecer los valores de profundidades a la que se sitúa la de la interfase de capa meteorizada – roca se obtiene que: para el estribo derecho varían de 1,2 m en el T13 (situado más al NE) a 2,97 m en el T5, mientras que en el estribo izquierdo varían entre 4,55 m en el T16 (situado más al SO) y 2,85 m en el T17.

Los indicadores V_s/V_p se obtienen para estimar la confiabilidad de los datos obtenidos, un valor confiable debe estar entre $0,3 \leq V_s/V_p \leq 0,7$, en la última columna de la tabla 5.4 se observa que la totalidad de los valores del indicador están dentro del rango establecido y todos están alrededor de 0,5 (valor en el que la velocidad de onda S es la mitad de la velocidad de onda P).

De los módulos dinámicos calculados, mostrados en la tabla 5.4, se puede apreciar que en líneas generales se encuentran por debajo de los valores que Flores et al. (2000) discuten para rocas arenosas, por esto se concluye que el material que conforma las capas estudiadas tiene una elasticidad muy pobre.

Tabla 5.4 Tabla comparativa de módulos dinámicos por tendidos, se anexa el indicador Vs/Vp.

Tendido	Densidad "ρ" (kg/m³)	Poisson (ν) (GPa)	Rigidez (G) (GPa)	Young (E) (GPa)	Bulk (K) (GPa)	Vs/Vp
T1	2250	0,39	5,1E+08	1,4E+09	2,1E+09	0,43
T2	2250	0,21	9,1E+08	2,2E+09	1,3E+09	0,61
T3	2250	0,23	8,4E+08	2,1E+09	1,3E+09	0,59
T4	2250	0,39	7,2E+08	2E+09	3E+09	0,43
T5	2250	0,38	9,3E+08	2,6E+09	3,5E+09	0,44
T6	2250	0,41	5,8E+08	1,6E+09	3E+09	0,39
T7	2250	0,41	7,2E+08	2E+09	3,9E+09	0,39
T8	2250	0,28	1,2E+09	3,1E+09	2,4E+09	0,55
T9	2250	0,33	1,1E+09	3E+09	2,9E+09	0,51
T10	2250	0,34	1,1E+09	3E+09	3,1E+09	0,49
T11	2250	0,20	1,3E+09	3E+09	1,7E+09	0,61
T13	2250	0,30	1,1E+09	3E+09	2,5E+09	0,53
T14	2250	0,38	9,8E+08	2,7E+09	3,7E+09	0,44
T15	2250	0,14	1,8E+09	4,1E+09	1,9E+09	0,65
T16	2350	0,42	2,3E+09	6,6E+09	1,3E+10	0,38
T17	2350	0,28	2,7E+09	6,9E+09	5,3E+09	0,55
T18	2350	0,45	1,2E+09	3,5E+09	1,1E+10	0,31
T19	2350	0,39	1,7E+09	4,8E+09	7,5E+09	0,42

Si bien estos parámetros calculados no son exhaustivos para definir un modelo sismo-elástico del área de estudio se pueden plantear observaciones cualitativas de las distribuciones de dichos coeficientes, en lo que se tiene que:

- El módulo de Poisson (ν): en el estribo derecho varía de 0,14 (valor típico de zonas insaturadas consolidadas) a 0,41 (valor típico de zonas saturadas pero no muy consolidadas), mientras que en el estribo izquierdo se mantiene por encima de 0,25, lo que indica una mayor consolidación del material.
- El módulo de Young (E): en la totalidad de los datos se presentan dos marcadas tendencias; en el estribo izquierdo cuyo promedio se sitúa cerca de los 5,5 GPa y la del estribo derecho con promedio alrededor de los 2,5 Gpa, por lo que se tiene que potencialmente la mayor deformación ante los

esfuerzos longitudinales a los que se someterá el material se encuentran en el estribo derecho.

Esta distribución de los módulos dentro de la zona de estudio servirán de guía al equipo técnico especializado para ubicar los sitios en los que se necesitan evaluaciones más profundas (pilotajes, pantallas de inyección, obras de protección y desvío, túneles, etc.) considerando el punto en el que se establecerá la presa, para lo que es imprescindible emplear estudios de los módulos elásticos por métodos estáticos (de laboratorio).

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Producto del análisis de los datos sísmicos procesados y la integración de datos de carácter geotécnico se concluye que el modelo de velocidades integrado de la zona de estudio presenta las siguientes características:

- La interfase capa meteorizada – roca adecuada, pues se postula un perfil de suelo con un espesor promedio de 2,15 m para el estribo derecho y de 3,38 m para el estribo izquierdo, con un margen de error bajo producto de la comparación con los sondeos geotécnicos.
- Las velocidades promedio de propagación de onda P en el estribo derecho son: para la capa 1 (capa meteorizada y perfil de suelo) 294,42 m/s, para la segunda capa (roca descompuesta blanda) 861,50 m/s, y para la tercera (roca fresca blanda) 1.310,28 m/s. Mientras que en el estribo izquierdo se presentan velocidades mayores; para la capa 1 de 299,50 m/s, capa 2 de 1.613,75m/s y capa 3 de 2.240,75m/s.
- Las distintas velocidades entre un estribo y otro se deben a las diferencias del origen del material que conforma los estratos; para el estribo izquierdo conformado por el Miembro Salomón (formado en un ambiente sedimentario continental predominante) que tiene capas con facies conglomeráticas es más arenoso de cemento calcáreo mientras que el estribo derecho el Miembro Revoltijo (depositado en un ambiente transicional lacustre a marino somero) es localmente más lutítico y las capas de granulometría gruesa (arenas, gravas y conglomerados) se presentan más esporádicamente.
- Los módulos dinámicos obtenidos, al encontrarse todos por debajo de los parámetros esperados para ese tipo de roca reflejan la pobre elasticidad del medio y confirman la presencia de fluidos saturando el material poco consolidado.

Los objetivos planteados fueron cumplidos de manera satisfactoria, aportando información necesaria para llevar adelante la “**Actualización del proyecto de Diseño de la Presa Botalón**”, dadas las condiciones actuales de dicho proyecto y producto de este trabajo de investigación es de suma importancia recomendar lo siguiente:

- Programar una campaña de adquisición sísmica para el estribo izquierdo, que debe efectuarse en temporada de sequía para aprovechar el paso de vehículos y así facilitar tanto el traslado como la adquisición de los datos.
- Optimizar el levantamiento de datos geofísicos de refracción sísmica alternándolos con sondeos geoelectricos tipo calicatas o sondeos eléctricos verticales (SEV), debido a la poca accesibilidad de al estribo izquierdo y demás zonas de interés dentro del proyecto (vaso de la presa, tapones y aliviadero).
- Programar una campaña de levantamiento de datos geológicos, tanto para el estudio de rocas sedimentarias aflorantes en el vaso de la presa, como de tipo geotécnicos, para aumentar la certeza de la distribución y las características del material que conforma el sustrato en el vaso y sitio de presa.
- Diseñar un arreglo optimizado de sitios de toma de muestras para hacer ensayos de laboratorio; de caracterización de suelos y de comportamiento geomecánico, con el fin de generar un modelo sismo – elástico y dar respuesta a las necesidades de información que tienen los proyectistas.
- Aplicar la metodología sistemática del proyecto, similar a la empleada pero en menor escala, para el estudio de los tapones y aliviadero en la zona ubicada al SO del sitio de presa.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

- Bolinaga, J. J. y Fundación Polar (1999). *Proyectos de ingeniería hidráulica*. Volumen 1. Editorial Fundación Polar. Caracas.
- Flores, J. H., R. Ángeles, A. Medina, R. Marines y J. Urrutia (2000). *Estimación de las constantes elásticas del terreno en el área de Salazar, Ciudad de México, a través de exploración sísmica*. *Ciencia Ergo Sum*, noviembre volumen 7, número 3. Universidad Autónoma de México. Toluca. Pp 280 – 285.
- Fundación Laboratorio Nacional de Hidráulica (2009). *Actualización del proyecto de Diseño de la Presa Botalón*. Oferta técnico – económica. Caracas. Inédito.
- Fundación Laboratorio Nacional de Hidráulica (2010). *Informe Geológico geotécnico de avance de la actualización del proyecto de Diseño de la Presa Botalón*. Informe técnico de avance. Caracas. Inédito.
- Gonzalez, L. I., M. Ferrer, L. Ortuño y C. Oteo (2002). *Ingeniería Geológica*. Editorial Prentice Hall. Madrid. 744pp.
- Lexur (2009). *Problemática global del agua*. Agua potable. Recuperado en marzo, 10, 2010, de: www.solociencia.com/ecologia/problematika-global-agua-problema-falta-agua.htm
- Martín, J. (2008). *Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de “El Casino”, al norte del poblado Urumaco (edo. Falcón)*. Trabajo de Grado no publicado, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- Ministerio del Poder Popular para la Comunicación e Información (MINCI) (2007). *Gestión del agua en Venezuela muestra resultados exitosos: entrevista al Viceministro de Agua: Ernesto Paiva*. Recuperado

en marzo, 15, 2010, de:
http://www.minci.gob.ve/entrevistas/3/5922/gestion_del_agua.html.

- Petróleos de Venezuela – INTEVEP (1997). *Código estratigráfico de las cuencas petroleras de Venezuela*. Código geológico de Venezuela. PDVSA-INTEVEP. Caracas, Venezuela. Recuperado en enero, 16, 2010, de: <http://www.pdvsa.com/lexico/lexicoh.htm>.
- Popoff, C. y C. R. Castillo (1963). *Informe Geotécnico para ante-proyecto de la presa “Botalón”*. Primeras Jornadas de Riego, Colegio de Ingenieros de Venezuela. Caracas. Talleres Tipo – litográficos de la Dirección de Cartografía Nacional.
- Popov, E. P. y T. A. Balan (2000). *Mecánica de sólidos*. Segunda edición. Editorial Pearson Educación. Naucalpán de México.
- Peralta, A. (2007). *Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en El Mamón, al norte del poblado Urumaco, estado Falcón*. Trabajo de Grado no publicado, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.

APÉNDICES

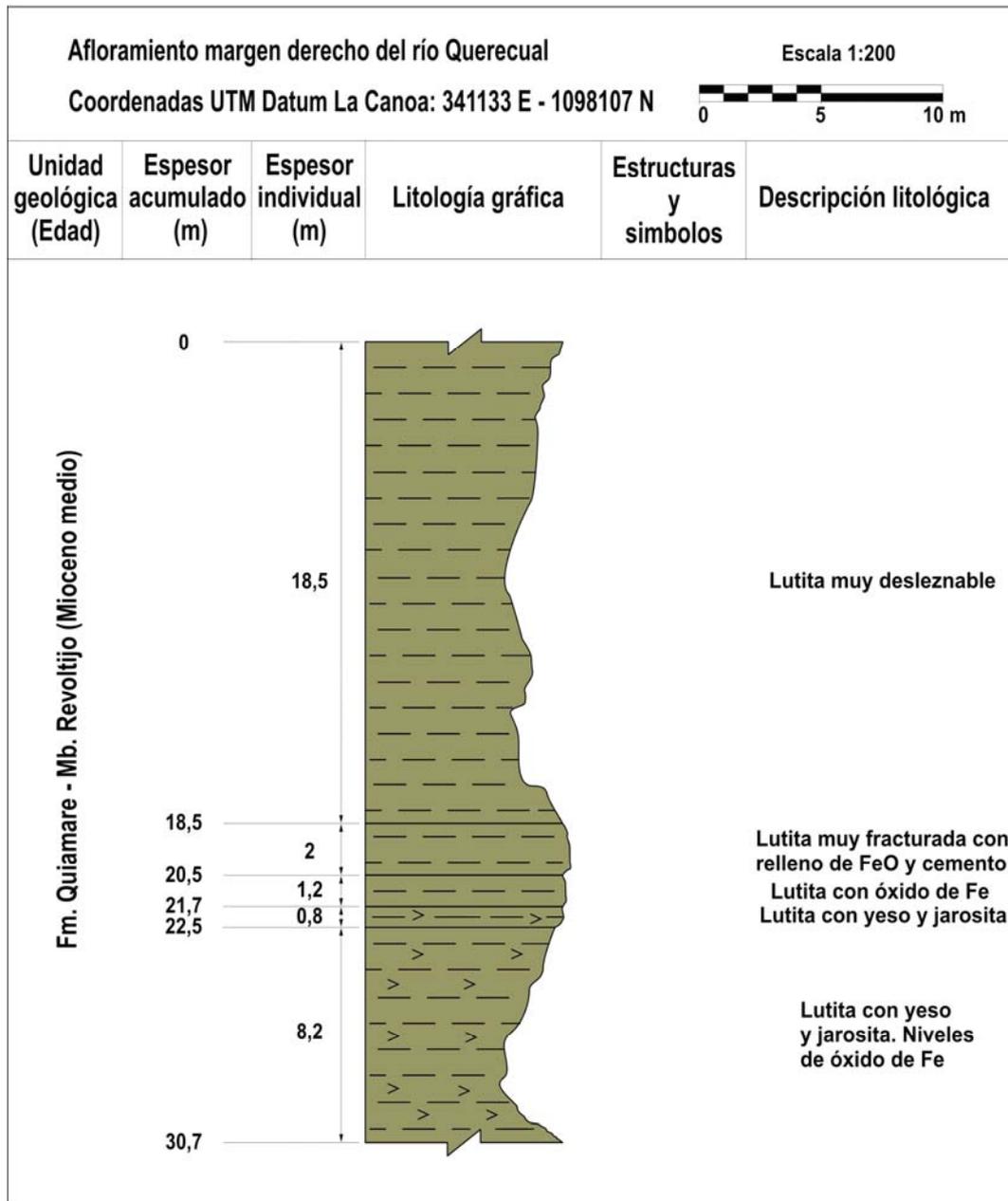
7.1 Geología – Geotécnia

Tabla 7.1 Tabla resumen de la información de los puntos de observación en el levantamiento geológico. (FLNH, 2010).

Punto	Este	Norte	Sitio	Descripción Litológica	Orientación de los planos		Muestras
					Estratificación	Diaclasa	
AN-01	341131	1098516	Vertice del estribo derecho de la presa (El Tanque)	Cantos rodados de areniscas	-	-	No
AN-02	341578	1099067	Q. El Matrimonio, aguas arriba al NE del sitio de presa	Cantos rodados de areniscas	-	-	No
AN-03	341490	1099150	Colina al NE del sitio de presa	Agrupación de numerosos cantos rodados de areniscas (Terraza antigua)	-	-	No
AN-04	341187	1099256	Ladera de una colina al Norte del sitio de presa	Arenisca de grano medio	N20°E 74S	-	AN-04
AN-05	341505	1099314	Cresta de de la colina al Norte del sitio de presa (Divisoria de aguas)	Arenisca de grano medio a grueso	N50°W 35°S	N22°E 89°N N4°W 71°N	AN-05
AN-06	341119	1098111	Este del sitio de presa (en el Vaso de la presa)	Lutita	N33°E 24N N50°E 33N N75°E 30°N	-	No
AN-07	341508	1098344	Q. El Matrimonio, aguas abajo al NE del sitio de presa	Cantos rodados de areniscas	-	-	No
AN-08	341678	1098253	Afluencia de la Q. El Matrimonio en el Río Querecual	Terraza reciente compuesta por cantos rodados de areniscas en una matriz fina arenosa	-	-	No
AN-09	341664	1098222	Lecho del Río Querecual	Terraza reciente compuesta por cantos rodados de areniscas en una matriz fina arenosa	-	-	No
AN-10	341269	1097736	Rancho Gaucho, al SE del sitio de presa	Arenisca, limolita, lutita	N30°E 43°N N57°E 37°N N52°E 37°N N20°E 20°N	N55°W P.V N45°E 45°S N60°E 70°S N50°W 75°N E- W 50°S N55°W 80°N N40°E 50°S	AN-06, AN-07, AN-08
AN-11	340204	1100185	Finca la Paragua N° 160, al Oeste del sitio de presa	Terraza de inundación	-	-	No
AN-12	340749	1099257	Fundo el Conuco, al oeste del sitio de presa	Lutita, arenisca	-	N45°E P.V N65°W 60°S	No
AN-13	340743	1098309	Finca Llano Lindo - Oeste del sitio de presa	Probablemente aflora una roca lutítica arenosa que actualmente (en época de lluvias) se encuentra cubierta por el río Querecual	-	-	No
AN-14	340723	1098334	Margen sur del Río Querecual, a nivel de la finca Llano Lindo	Limolita	N25°W 10°S N50°E 10°N	N28°W 50°N N88°E 79°N	No
AN-15	340554	1100034	Corte de carretera Querecual II - Sta Ines	Lutita, arenisca con facetas conglomeraticas	N74°W 60°N a P.V N30°E 20°S	N15°E 75°N N50°E 21°N N52°E 74°S N42°W 79°N	AN-09, AN-10
AN-16	341626	1097430	Carretera en el margen sur del río Querecual cruzando la planchada, al este del sitio de presa	Terrazas recientes compuestas por bloques de arenisca cuarzo-plagioclasica en una matriz arenosa	-	-	No
AN-17	339808	1100331	Carretera Querecual II - Sta Ines	Arenisca de grano medio a grueso con facetas conglomeraticas	N70°W 82°N	N62°E 20°N N45°E P.V	AN-11
AN-18	341373	1098146	Fundo Rancho Gaucho	Lutita	-	-	No
AN-19	340220	1097436	Finca Las Trías, sitio de los tapones y el aliviadero	Arenisca de grano medio a grueso	N20°W 50°S	N70°E 76°N N85°W 62°N	AN-13



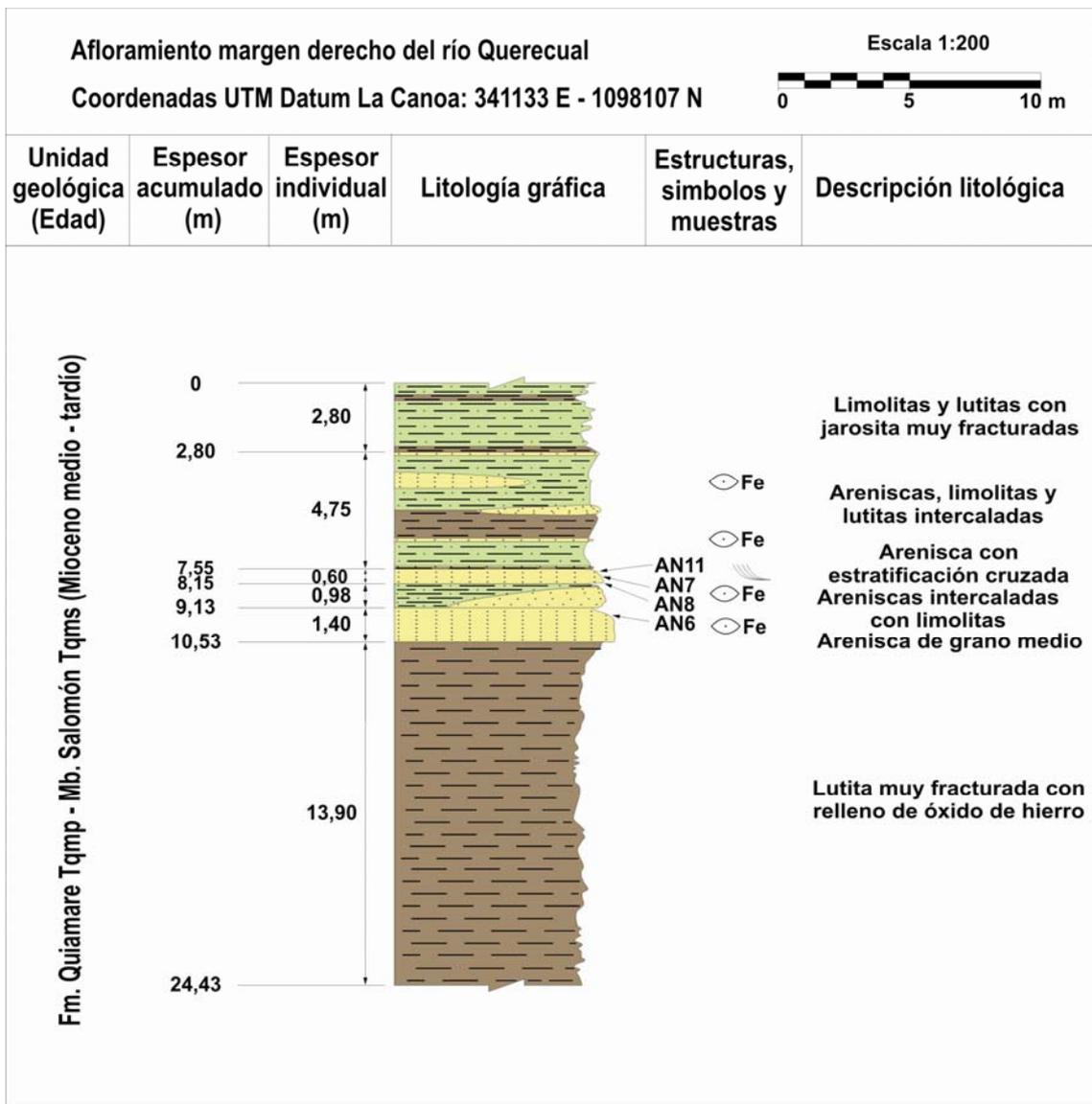
Apéndice 1 Imagen de una terraza antigua. Punto AN-03 (tabla 7.1).



Apéndice 2 Columna estratigráfica punto de observación AN-06. (FLNH, 2010).



Apéndice 3 Composición fotográfica de la vista externa desde el lindero SO del estribo izquierdo.



Apéndice 4 Columna estratigráfica punto de observación AN-10. (FLNH, 2010).

Afloramiento margen izquierdo del río Querecual

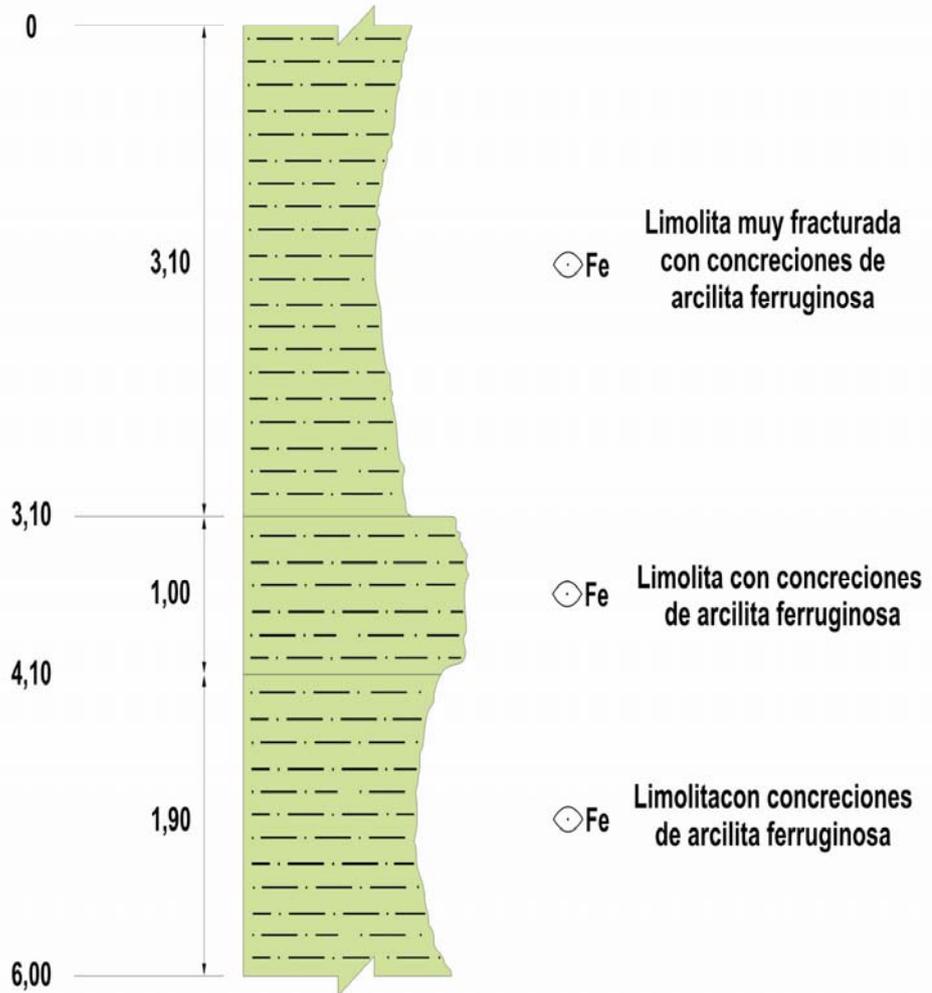
Coordenadas UTM Datum La Canoa: 340701 E - 1098333 N

Escala 1:50



Unidad geológica (Edad)	Espesor acumulado (m)	Espesor individual (m)	Litología gráfica	Estructuras, simbolos y muestras	Descripción litológica
-------------------------	-----------------------	------------------------	-------------------	----------------------------------	------------------------

Fm. Quiamare Tqmp - Mb. Salomón Tqms (Mioceno medio - tardío)



Apéndice 5 Columna estratigráfica punto de observación AN-14. (FLNH, 2010).



Apéndice 6 Estructura de acuñamiento en la secuencia estratigráfica. Punto AN-10 (Miembro Salomón). (FLNH, 2010).



Apéndice 7 Estructura de laminación cruzada. Punto AN-10 (Miembro Salomón). (FLNH, 2010).

Tabla 7.2 Clasificación geomecánica del macizo rocoso en relación al índice RMR. (FLNH, 2010).

Clase	Calidad	Valoración RMR
I	Muy buena	100 - 81
II	Buena	80 - 61
III	Media	60 - 41
IV	Mala	40 - 21
V	Muy mala	<20



Apéndice 8 Macizo de Clase III (RMR= 41 - 60). Arenisca de grano medio. Punto AN-10. (FLNH, 2010).



Apéndice 9 Macizo de Clase IV (RMR= 21 - 40). Lutita. Punto AN-10. (FLNH, 2010).

7.2 Adquisición sísmica

En la figura 7.10 se muestra como las lluvias provocan inundaciones (hasta de 50 cm) en la carretera de acceso al sitio de presa.



Apéndice 10 Vista de la inundación causada por el Río Querecual (25 Km aguas abajo del sitio de presa).



Apéndice 11 Fotografía de la adquisición de los datos en el tendido T14,. (FLNH, 2010).



Figura 7.12 Fotografía de la adquisición de los datos en el tendido T15 perpendicular al T14. (Estribo derecho). (FLNH, 2010).



Apéndice 13 Implantación de testigos de cemento en puntos de disparos (líneas sísmicas), con leyenda de la notación de los puntos GPS tomados. (FLNH, 2010).

Tabla 7.3 Tabla de coordenadas de puntos de ubicación tomados con un receptor GPS. La referencia de altura utilizada es la cota dada por el estudio aereotopográfico LIDAR. (FLNH, 2010).

Nombre del Punto	Datum: WGS84. Zona 20N		Cota	Cota LIDAR	Tendido
	Este	Norte	(m.s.n.m.m)	(m.s.n.m.m)	
Bot10-01	341270	1098652	115	106	T1
Bot10-02	341249	1098611	113	105,3	
Bot10-03	341272	1098656	104	106	T2
Bot10-04	341251	1098614	106	105,5	
Bot10-05	341276	1098621	115	106	T3
Bot10-06	341268	1098576	111	104,9	
Bot10-07	341266	1098579	116	104,8	T4
Bot10-08	341253	1098543	112	102,6	
Bot10-09	341255	1098542	107	102,4	T5
Bot10-10	341234	1098503	115	105	
Bot10-11	341235	1098501	113	105	T6
Bot10-12	341210	1098464	117	104,8	
Bot10-13	341205	1098463	87	104,9	T7
Bot10-14	341188	1098431	107	104	
Bot10-15	341195	1098441	110	104,5	T8
Bot10-16	341158	1098414	111	104	
Bot10-17	341169	1098418	114	104	T9
Bot10-18	341129	1098393	112	103,4	
Bot10-19	341113	1098385	108	103,1	T10
Bot10-20	341085	1098346	107	102,8	
Bot10-21	341089	1098358	110	103	T11
Bot10-22	341061	1098322	110	99,3	
Bot10-23	341335	1098893	129	122,5	T12
Bot10-24	341332	1098874	128	119,5	
Bot10-25	341318	1098859	124	115,7	T13
Bot10-26	341304	1098817	120	111,1	
Bot10-27	341289	1098718	117	106,3	T14
Bot10-29	341267	1098646	116	106	
Bot10-30	341289	1098665	111	106	T15
Bot10-34	341220	1098677	111	105,9	
Bot10-35	340821	1098044	86	92,5	T16
Bot10-36	340843	1098084	77	83,1	
Bot10-37	340868	1098124	78	76,7	T17
Bot10-38	340891	1098164	77	75	
Bot10-39	340895	1098170	84	75	T18
Bot10-43	340932	1098228	82	76,3	
Bot10-44	340945	1098211	85	76,9	T19
Bot10-45	340905	1098230	85	76,2	

ANEXOS