



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE SUCRE
ESCUELA DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE FÍSICA

ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDAD DE ESTRATOS SEDIMENTARIOS EN LOS
CENTROS POBLADOS DE ARAPITO Y PLAYA COLORADA, ESTADO
SUCRE
(Modalidad: Investigación)

YSIMAR MIRBERTH RIVERA PINO

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA
OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN FÍSICA

CUMANÁ, 2011

ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDAD DE ESTRATOS SEDIMENTARIOS EN LOS
CENTROS POBLADOS DE ARAPITO Y PLAYA COLORADA, ESTADO
SUCRE

APROBADO POR:

Prof. Jorge Rojas
Asesor Académico

Prof. Luís Beupertuy
Jurado Principal

Prof. Jaime Avendaño
Jurado Principal

ÍNDICE

	Pág.
LISTA DE TABLAS	V
LISTA DE FIGURAS	VI
DEDICATORIA	X
AGRADECIMIENTO	XI
RESUMEN.....	XII
CAPÍTULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II.....	6
GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO	6
2.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	6
2.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS.....	7
2.2.1 Características estratigráficas	7
2.2.2 Características estructurales.....	8
CAPITULO III.....	10
FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	10
3.1 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.....	10
3.2 MÉTODOS SÍSMICOS.....	10
3.3 REFRACCIÓN SÍSMICA	12
3.4 FUNDAMENTOS FÍSICOS	12
3.5 INSTRUMENTOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS	13
3.5.1 Fuentes Sísmicas	14
3.5.2 Sensores	15

3.5.3 Cables de transmisión	16
3.5.4 Digitalizador:	16
3.5.5 Interruptor (trigger)	16
3.6 PROCESAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE DATOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA.....	16
3.6.1 Selección de las primeras llegadas.....	17
3.6.2 Construcción de las dromocronas.....	17
3.6.3 Cálculo de las velocidades de cada refractor.....	17
3.6.4 Seislmager	20
3.6.5 Tomografía sísmica	20
3.6.6 Cálculo de las velocidades de ondas S	22
CAPÍTULO IV.....	26
METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	26
4.1 ADQUISICIÓN DE DATOS	26
4.2 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS ADQUIRIDOS.....	30
4.3 CÁLCULO DEL PROMEDIO DE VELOCIDADES DE ONDAS S	34
CAPÍTULO V.....	35
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
5.1 TENDIDOS ARAPITO 1. (A.1) Y ARAPITO 2. (A.2)	35
5.2 PLAYA COLORADA, TENDIDO 1 (PC.1), TENDIDO 2 (PC.2) Y TENDIDO 3 (PC.3)	40
CAPÍTULO VI.....	48
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	48
BIBLIOGRAFÍA.....	51
HOJAS DE METADATOS.....	54

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipo de fuentes generadoras de perturbaciones artificiales	15
Tabla 2. Parámetros de los tendidos de refracción sísmica realizada en el centro poblado de Arapito.....	29
Tabla 3. Parámetros de los tendidos de refracción sísmica realizados en el centro poblado de Playa Colorada.	30
Tabla 4. Velocidades de ondas P y S correspondiente a cada capa de los tendidos realizados en Arapito.....	40
Tabla 5. Velocidades de ondas P y S correspondiente a cada capa de los tendidos realizados en Playa Colorada.	47

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esta imagen muestra la ubicación de la carretera troncal 9, que comunica las ciudades Cumaná y Puerto la Cruz en la cual se encuentran ubicados los centros poblados Arapito y Playa Colorada.....	2
Figura 2. Imagen tomada el 11 de septiembre de 2007, en la cual se observan los sedimentos deslizados desde las cabeceras y cauces de las quebradas hasta el centro poblado de Playa Colorada.	2
Figura 3. Mapa de fallas principales de Venezuela.....	3
Figura.4. Mapas donde se visualizan las representaciones de las trazas de fallas (líneas continuas rojas) en el eje costero, donde se encuentran ubicadas los centros poblados de Arapito y Playa Colorada.....	4
Figura 5. Imagen satelital donde se destaca con el recuadro rojo la ubicación relativa del área de estudio.....	6
Figura 6. Imagen satelital (<i>Google Earth</i>), donde se observa el relieve montañoso,y donde se evidencia que los centros poblados Playa Colorada y Arapito se encuentran en la zona de abanicos aluviales.....	8
Figura 7. Mapa de amenaza sísmica en Venezuela,.....	9

Figura 8. Diagrama esquemático del modelo utilizado para la refracción sísmica, se destacan las ondas directas, las reflejadas y las refractadas críticamente.	13
Figura 9. Diagrama esquemático de los instrumentos utilizados para la adquisición de datos.	14
Figura 10. Curva camino-tiempo. En la cual se representa la pendiente y el tiempo de intercepto de la refracción.	18
Figura 11. Esquema del problema planteado para la inversión.	21
Figura 12. Tendido de refracción sísmica en el balneario de Playa Colorada.	26
Figura 13. Fuente sísmica artificial diseñada por personal que labora en el CSUDO.	27
Figura 14. Imagen satelital <i>Google Earth</i> , en la cual se indica, con líneas rojas, la ubicación y sentido de los tendidos de refracción sísmica en Arapito.	28
Figura 15. Imagen satelital <i>Google Earth</i> , en la cual se indica, con líneas rojas, la ubicación y sentido de los tendidos de refracción sísmica en Playa Colorada.	28
Figura 16. Diagrama representativo de la geometría utilizada para la adquisición de datos de refracción sísmica.	29
Figura 17. Se muestra la selección de las primeras llegadas, utilizando el módulo <i>pickwin95</i>	31

Figura 18. Curva camino-tiempo con las rectas de velocidades obtenidas con el software <i>SeisImager</i> , correspondiente al tendido A.1 realizado en Arapito.	32
Figura 19. Se presenta el modelo tomográfico de un tendido sísmico realizado en Arapito.	33
Figura 20. Representación gráfica de las dromocronas observadas y calculadas por el software.	33
Figura 21. Conversión del modelo tomográfico al modelo de capas.	34
Figura 22. Ajuste de las curvas camino- tiempo con las rectas de velocidades del tendido A.1.	36
Figura 23. Ajuste de las curvas camino- tiempo con las rectas de velocidad del tendido A.2.	36
Figura 24. Tomografía sísmica para el tendido A.1.	37
Figura 25. Tomografía sísmica para el tendido A.2.	38
Figura 26. Conversión a modelo de capas de A.1.	39
Figura 27. Conversión a modelo de capas de A.2.	40
Figura 28. Ajuste de las curvas camino- tiempo con las rectas de velocidad del tendido PC.1.	41

Figura 29. Ajuste de las curvas camino- tiempo con las rectas de velocidad del tendido PC.2.....	42
Figura 30. Ajuste de las curvas camino- tiempo con las rectas de velocidad del tendido PC.3.....	42
Figura 31. Tomografía sísmica para el tendido PC.1.....	43
Figura 32. Tomografía sísmica para el tendido PC.2.....	44
Figura 33. Tomografía sísmica para el tendido PC.3.....	44
Figura 34. Conversión a modelo de capas de PC.1.....	45
Figura 35. Conversión a modelo de capas de PC.2.....	46
Figura 36. Conversión a modelo de capas de PC.3.....	47

DEDICATORIA

A mis padres Isidro Rivera y Magalis Pino, por sus confianza, apoyo y por los valores y principios, que han hecho de mi quien soy.

A mi hija Valeria Saray por ser mi inspiración y fuerza para vencer los obstáculos.

AGRADECIMIENTO

A Dios todopoderoso y a Santa Barbara por siempre ayudarme en las decisiones que he tomado en la vida.

A mis padres, mis hermanos Ysidro, Aloima y flor, y a mi compañero Ramón López, porque forman parte de este viaje de transcendencia que resulta la vida, y han depositado en mí su confianza, brindándome incondicionalmente apoyo para superar los momentos difíciles, ayudándome a alcanzar mis sueños

A todas aquellas personas que a lo largo de mi carrera, han estado ahí brindándome su ayuda y apoyo, colaborando con la culminación de esta etapa de mi vida, en especial Pedro Zurita, Rufino Valladares, Juan Marcano, María Figuera, Tomas Garcias, Janiescarlos Barreto, José Zabala, Victor Ysava , Luis Araque Lameda y María Valera.

A todo el personal que labora en el Centro de Sismología de la Universidad de Oriente (CSUDO), En especial a los profesores Jaime Avendaño, Américo Montilla , Francisco Bonive y Hernán Maneiro, por brindarme sus apoyo y ayudas incondicional, necesarios para llevar a cabo este proyecto.

A Eva Dubois, Dirección Estatal, Ministerio del Ambiente, Cumaná. Por suministrar los mapas referentes a las áreas de estudio.

A Jorge Rojas, por su dedicación y constancia, y por haber sido un guía en el desarrollo de este trabajo de investigación.

A todos gracias.

RESUMEN

Se caracterizaron estratigráficamente los suelos de los centros poblados Arapito y Playa Colorada, Estado Sucre, usando el método de prospección sísmica por refracción, para lo cual se realizaron tendidos con diferentes arreglos que permitieron estimar las velocidades de ondas sísmicas P y S. Para el procesamiento de los datos adquiridos se utilizó el paquete de software *SeisImager*, donde su inversión sísmica se fundamentó en la tomografía, generando como resultados modelos de capas estimados, del área de estudio. Los resultados obtenidos para Arapito, presentan un espesor sedimentario somero hasta 7 metros de profundidad, aproximadamente, con un contraste de velocidades promedio de onda P, entre 0.9 km/s y 1.8 km/s, y una velocidad promedio de onda S igual a 0.5 km/s. A partir de 25 metros de profundidad, aproximadamente, se ubicó el basamento, con una velocidad de onda P y S de 2.7 km/s y 1.5 km/s, respectivamente, la profundidad del basamento aumenta en dirección SE-NW, es decir, hacia la playa el basamento se encuentra más profundo. En el área del balneario de Playa Colorada, los resultados presentan un espesor sedimentario somero a 9 metros de profundidad. Con un contraste de Velocidad promedio de onda P, entre 1.1 km/s y 2.0 km/s, y una velocidades promedio de onda S igual a 0.6 km/s. A partir de una profundidad de 20 metros, aproximadamente, se ubica el basamento con una velocidad de onda P y S de 2.8 km/s y 1.6 km/s, respectivamente, la profundidad del basamento aumenta en dirección SE-NW, semejante a las características presentada por el Centro Poblado de Arapito. Además, en el modelo de capas obtenido del tendido Playa Colorada 3 (PC. 3), se presenta a una profundidad aproximada de 3 metros, un espesor sedimentario somero con un contraste de Velocidades promedio de onda P, entre 1.0 km/s y 2.2 km/s, y una velocidad promedio de onda S igual a 0.6 km/s. A partir de una profundidad de 15 metros, aproximadamente, se ubica el basamento que presenta una deformación que sugiere un fallamiento menor, con una velocidad de onda P y S de 2.6 km/s y 1.5 km/s, respectivamente.

Palabras claves: Refracción sísmica, Estratos, Seisimager, Tomografía.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Se entiende por «Alud Torrencial» como aquellos flujos con altas concentraciones de sedimentos (hiperconcentraciones) que se generan en las cuencas montañosas, cuyo origen está asociado a la ocurrencia de deslizamientos durante lluvias prolongadas y de alta intensidad, y que pueden estar conformados por agua, barro, rocas, y grandes restos de vegetación, así como por todo tipo de desperdicios y arrastres de materiales fabricados por el hombre (López, 2005).

En Venezuela, han ocurrido aludes torrenciales en la zona norte costera como consecuencia de la inestabilidad de laderas que se encuentran en la cordillera de la costa, la cual es una cadena montañosa ubicada al norte de Venezuela con alturas que varían hasta los 2000 metros, con pendiente promedio entre los 40 a 70 grados (Audemard, 2000). Todavía recordamos una de las catástrofes más impactantes en el país, como es la tragedia de Vargas en el año 1999, repetida en el tiempo producto de la inestabilidad de las laderas contiguas y la ocupación indebida de abanicos aluviales (López, 2005). El estado Sucre, entidad que forma parte de la serranía del interior, no escapa que sucedan estos fenómenos adversos. En septiembre de 2007, ocurrieron aludes torrenciales en el eje costero Arapo – Santa Fé, poblaciones ubicadas en el borde de la carretera troncal 9 que comunica las poblaciones de Cumaná y Puerto la Cruz (figura 1), impactando a la población así como la geomorfología local en los centros poblados de Arapito y Playa Colorada, generando deslizamientos acompañados de importantes caídas de material desde las cabeceras de las cuencas hidrográficas de las quebradas Hoyo Negro, Aceite e' Palo y Las Lajas, (Protección Civil, 2007), véase figura 2.



Figura 1. Esta imagen muestra la ubicación de la carretera troncal 9, que comunica las ciudades Cumaná y Puerto la Cruz en la cual se encuentran ubicados los centros poblados Arapito y Playa Colorada.



Figura 2. Imagen tomada el 11 de septiembre de 2007, en la cual se observan los sedimentos deslizados desde las cabeceras y cauces de las quebradas hasta el centro poblado de Playa Colorada.

Desde el punto de vista sísmico, se debe tener en cuenta que el Norte de Venezuela es parte del límite entre las placas Caribe y América del Sur. La zona de contacto de estas dos placas tectónicas ha generado un sistema de fallas principales activas del tipo transcurrente lateral derecho a lo largo de un cinturón de aproximadamente 150 km, definido por los sistemas montañosos de los andes venezolanos, la cordillera central y la oriental, denominado sistema de fallas Boconó-San Sebastián-El Pilar (figura 3). Del sistema de falla El Pilar, en el eje costero Arapo – Santa Fe, se genera una serie de fallas denominadas secundarias, tales como: El Naranjo, Alambique y Araguaita (figura 4), las cuales han originado eventos sísmicos de magnitudes menores a cuatro, (CSUDO, 2008).

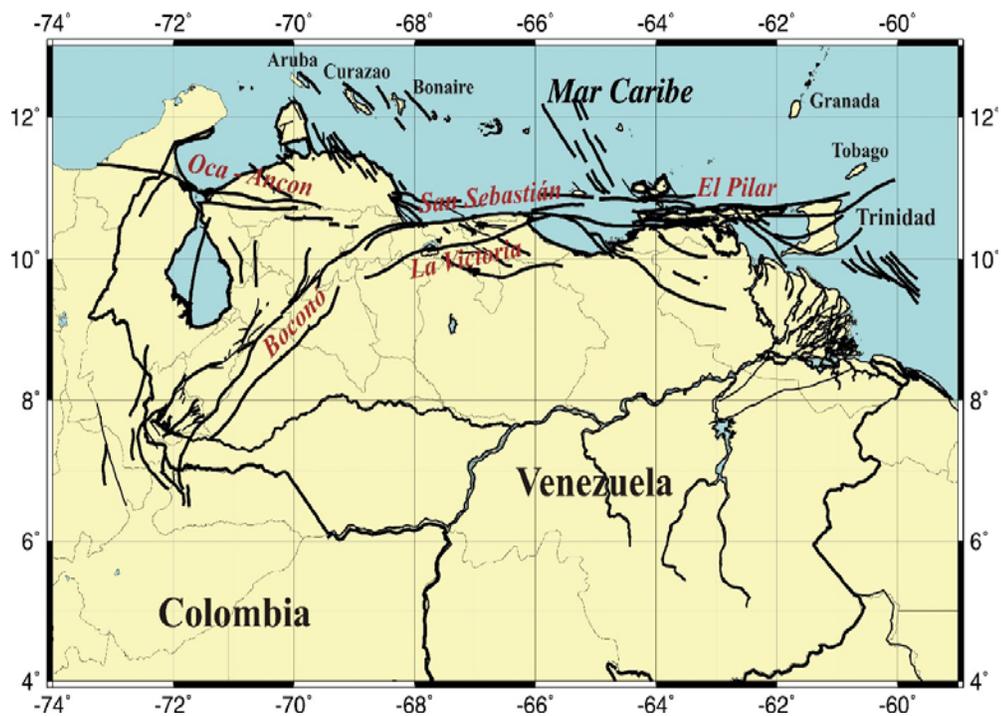


Figura 3. Mapa de fallas principales de Venezuela.

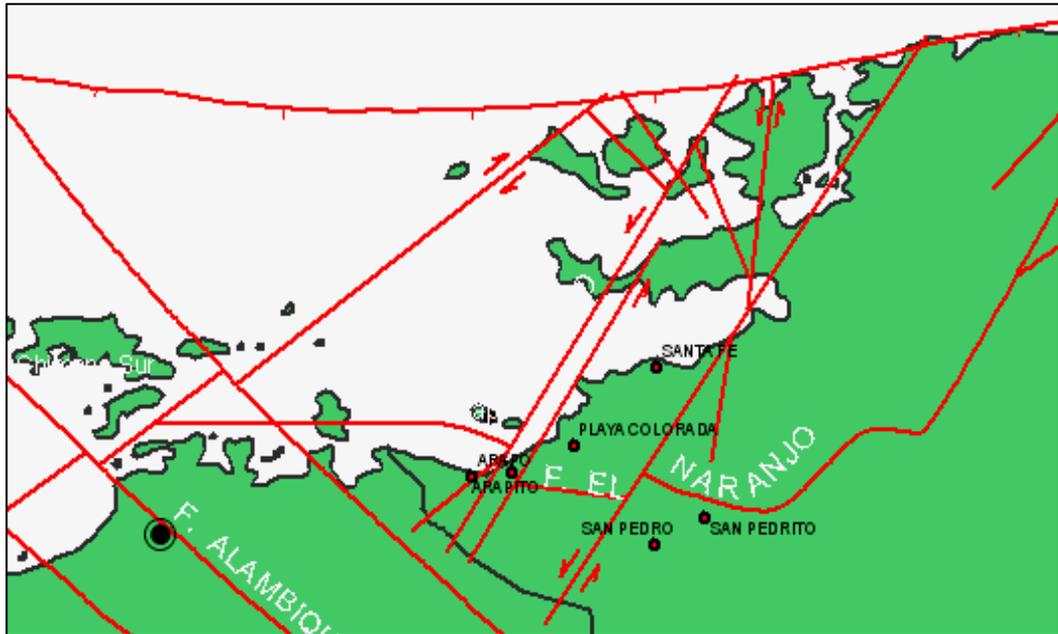


Figura.4. Mapas donde se visualizan las representaciones de las trazas de fallas (líneas continuas rojas) en el eje costero, donde se encuentran ubicadas los centros poblados de Arapito y Playa Colorada.

Para la estimación de las características de los suelos, se hace necesario acudir a una técnica no invasiva y de bajo costo, tal como lo es, la prospección sísmica, método empleado en la caracterización geofísica, que se inicia en 1761 cuando John Michel, sugirió que las observaciones sobre el tiempo de impacto, de un terremoto, en diferentes lugares, permitían determinar el lugar de origen de éste (Parasnis, 1970). Sin embargo, las primeras experiencias se deben a Robert Mallet, quién publicó en 1846, sobre la dinámica de los terremotos, "...sugiriendo la idea de generar terremotos artificiales por medio de explosiones de pólvora apuntando que las diferentes rocas debían tener velocidades características distintas" (Alfonso, 2003)

Durante los años siguientes, continuaron las experiencias y entre los años 1905 y 1906, nace la técnica de refracción sísmica, que consiste en generar ondas sísmicas en la superficie y registrar las que experimentan refracción total. Sin embargo, el verdadero desarrollo de los métodos sísmicos ocurrió entre los años 1925 y 1930,

cuando se descubre la lámpara amplificadora de vacío, permitiendo el desarrollo instrumental para el empleo de dicho método (Cantos, 1978)

Actualmente el método de refracción sísmica tiene un amplio rango de aplicación, tales como: en prospección petrolífera, minería, trabajos de ingeniería civil, entre otros. Esto se debe al desarrollo tecnológico que ha permitido la creación de instrumentos más sensibles. Las aportaciones de la refracción sísmica para medir parámetros mecánicos elásticos en suelos y rocas, ha permitido la construcción de túneles, puentes y otro tipo de infraestructura de gran magnitud (Alfonso, 2003), además, según Osiris (2005), ha comprobado ser el mejor método no invasivo para conocer, de forma rápida y económica, el horizonte de contacto entre los suelos superficiales y la roca base.

Considerando las características geomorfológicas y sísmicas del Eje Costero Arapo-Santa Fé, como también, el aumento vertiginoso de la población, sus viviendas y servicios básicos, es de sumo interés estimar un modelo estratigráfico, que permitan caracterizar los suelos de los centros poblados Arapito y Playa Colorada del estado Sucre. Para ello, utilizaremos la prospección sísmica por refracción, ya que conociendo las características de los suelos en los cuales se pretenden construir viviendas, se podrán diseñar medidas de protección y mitigación de riesgo, así como inferir el comportamiento de suelos ya habitados.

CAPÍTULO II

GEOLOGÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Ubicación geográfica

Las áreas de estudio, Playa Colorada y Arapito, se encuentran ubicadas específicamente, en el tramo Oriental de la parte septentrional de la Cadena del Interior perteneciente al Sistema Montañoso de la Costa. Se sitúa al norte del Macizo de Turimiquire en la Serranía Oriental, pertenecen al municipio Sucre del estado Sucre, Venezuela. A estas poblaciones se accede por medio de la carretera nacional Cumaná- Puerto la Cruz. En la figura 5, se representa la ubicación relativa del área de estudio.



Figura 5. Imagen satelital donde se destaca con el recuadro rojo la ubicación relativa del área de estudio.

2.2 Características geológicas

2.2.1 Características estratigráficas

Según Medina y Torres (2005), La Cuenca de la quebrada Hoyo Negro, está constituida por materiales de edad antigua (Cretáceo) y, en sitios específicos, conjuntos de rocas sedimentarias de edad más joven pertenecientes al Cuaternario.

La Formación Barranquín perteneciente al Cretáceo inferior, es la unidad de mayor extensión en la cuenca, con una litología constituida por areniscas y limolitas. Las primeras se ubican en la vertiente sur y sur-este de la cuenca; por encima de los 300 metros sobre el nivel del mar (msnm) estos macizos rocosos se encuentran muy diaclasados y aunado a la pendiente, las condiciones de alta humedad en esta vertiente y la macroporosidad que posee este tipo de material, ha dado origen a una cantidad significativa de deslizamientos, derrumbes y manantiales. De igual forma, al norte de la cuenca afloran limolitas, areniscas e intercalaciones de ambas, que pueden ser visualizadas claramente entre los 40 y 150 msnm.

Por otra parte, las rocas de edad más joven (Cuaternario) se localizan entre los 0 y 150 msnm al oeste de la cuenca; este material está compuesto por sedimentos mal seleccionados que van desde arenas finas hasta grandes bloques conformando un sistema de abanicos aluviales donde se asienta los centros poblados de Playa Colorada y Arapito (figura 6), los cuales están diferenciados por edad; desde el más antiguo hasta el más reciente.



Figura 6. Imagen satelital (*Google Earth*), donde se observa el relieve montañoso, y donde se evidencia que los centros poblados Playa Colorada y Arapito se encuentran en la zona de abanicos aluviales.

2.2.2 Características estructurales

El hecho de que el Estado Sucre esté ubicado sobre el eje de fallas donde contactan las Placas tectónicas Caribe y Suramérica, contribuye a que el norte de esta entidad sea considerado como la zona de mayor amenaza sísmica en Venezuela. (figura 7) (COVENIN 1756-1,2001).

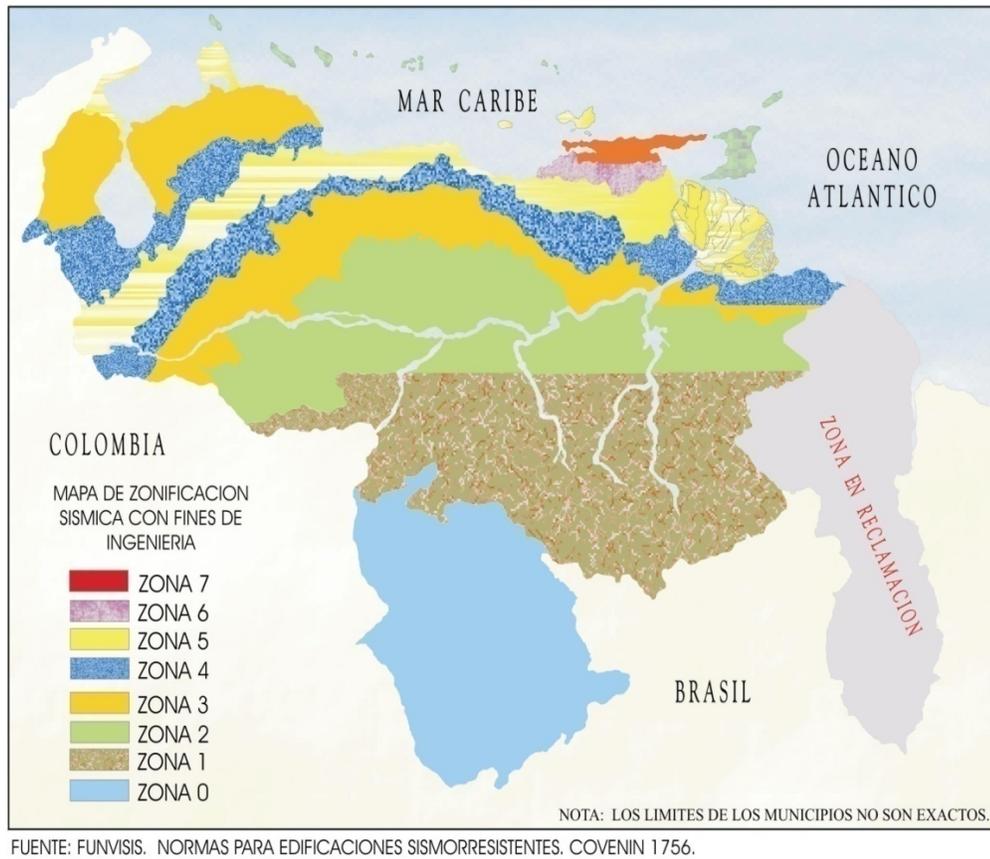


Figura 7. Mapa de amenaza sísmica en Venezuela,

CAPITULO III

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 Prospección geofísica

La prospección geofísica, es el arte de aplicar las ciencias físicas al estudio de la parte más superficial de la corteza terrestre (Cantos, 1978), esta tiene como finalidad detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas del subsuelo, además determinar sus dimensiones y algunas propiedades físicas (Griffiths y King, 1972).

La prospección geofísica está compuesta por diversas disciplinas tales como, los métodos eléctricos, magnético, electromagnéticos y sísmicos, siendo este último, “el método geofísico que ha proporcionado mayor información acerca del interior de la tierra, y ha delimitado los yacimientos de hidrocarburos con mejor resolución que cualquier otro” (Alfonso, 2003). Sin embargo, Actualmente tiene como objetivos la localización en el subsuelo de estratos que representen masas resistentes, que puedan soportar una obra civil además de localizar yacimientos de agua, petróleo, gas, vapor y minerales.

3.2 Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos, han sido de gran importancia para la prospección geofísica por su gran aporte de información en relación a estructuras presentes en el subsuelo.

Este método, consiste en generar liberación de energía en un punto en la superficie del suelo, mediante una fuente artificial, y registrar los tiempos de viaje de las ondas producidas hasta una serie de sensores o geófonos superficiales, instalados en una línea recta con origen en el punto de emisión, que se encargan de recibir la señal y transformarla en señal eléctrica para enviarla al sismógrafo mediante un cable de transmisión. De esta manera, se obtienen los registros sísmicos que permiten generar curvas camino versus tiempo, también conocidas como las dromocronas. Estas curvas, son las que permite estimar la velocidad de propagación, de la energía liberada, en cada estrato del suelo, generándose modelos de discontinuidades del subsuelo. (Udías y Mézcua, 1997)

Cuando se liberan energía en la superficie del suelo se obtienen varios tipos de ondas, como son: ondas reflejadas, ondas refractadas críticamente, ondas directas y ondas superficiales; Siendo cada una de estas la base de los diferentes métodos sísmicos. Entre estos métodos, se distinguen principalmente los de refracción y los de reflexión sísmica (Cavada, 2000), cada uno de estos métodos se emplean dependiendo de la información que se desea obtener del subsuelo.

Es conveniente, para llevar a cabo el objetivo de este trabajo de investigación, utilizar el método de refracción sísmica porque es un método de reconocimiento general especialmente adaptados para trabajos de ingeniería civil, prospección petrolera, y estudio hidrogeológicos. Debido a que permite prospectar estratos a muy poca profundidad en tierra, esto es difícil de lograr con métodos de reflexión y además la adquisición, procesamiento e interpretación son relativamente rápidos y sencillos.

3.3 Refracción sísmica

La refracción sísmica, consiste en ubicar la fuente y sensores en la superficie. Se fundamenta en las ondas sísmicas refractadas críticamente en las interfases entre dos medios con distintas propiedades físicas y tiene como objetivo principal proporcionar información de los espesores y velocidades de los estratos del subsuelo.

Los perfiles de refracción deben ser planificados considerando el objetivo del estudio, porque para estudios someros un perfil de refracción de unas decenas de metros es suficiente, sin embargo, para refracción profunda se deben realizar perfiles de centenares de kilómetros (Cavada, 2000)

3.4 Fundamentos físicos

Esta técnica se fundamenta en la Ley de Refracción (Ley de Snell), la cual establece que la razón entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es igual a la razón entre la velocidad de la onda en el primer medio y la velocidad de la onda en el segundo medio.

$$\frac{\text{sen}\theta_1}{\text{sen}\theta_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1)$$

Para entender mejor este método se presenta de manera esquemática el caso simple de dos medios de distintas propiedades físicas, con $V_2 > V_1$, separadas por una interfase, véase figura 8. Con una fuente ubicada en la superficie, con la cual se generan ondas sísmicas que se desplazan en diferentes direcciones, creándose entre estas las ondas cónicas o refractadas críticamente, las cuales son captadas por los geófonos durante la adquisición de la data.

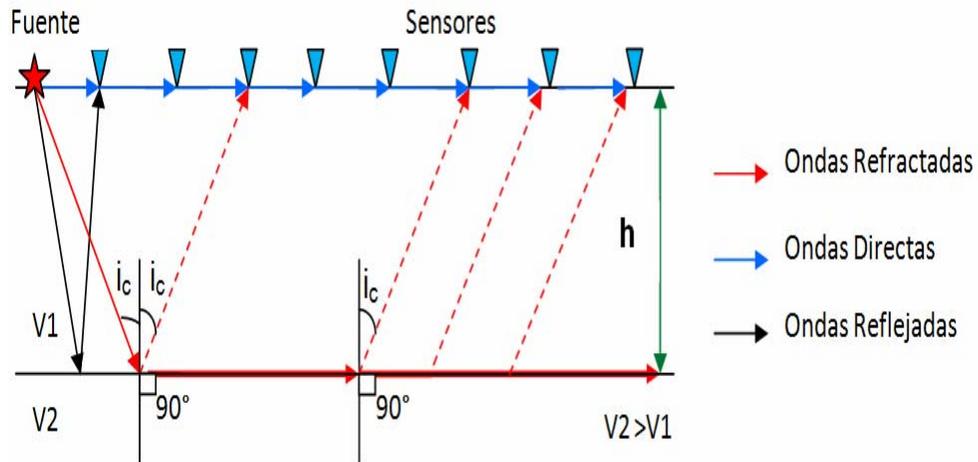


Figura 8. Diagrama esquemático del modelo utilizado para la refracción sísmica, se destacan las ondas directas, las reflejadas y las refractadas críticamente.

Es importante destacar que el ángulo crítico (i_c) se alcanza cuando el ángulo de refracción. En este caso la Ley de Snell se reduce a la expresión (2):

$$\frac{\text{sen } i_c}{V_1} = \frac{\text{sen } 90^\circ}{V_2} = \frac{1}{V_2} \quad (2)$$

3.5 Instrumentos para la adquisición de datos

Los tendidos de refracción sísmica están compuestos básicamente por una fuente generadora de energía, sensores, cable de transmisión, digitalizador e interruptor, véase figura 9.

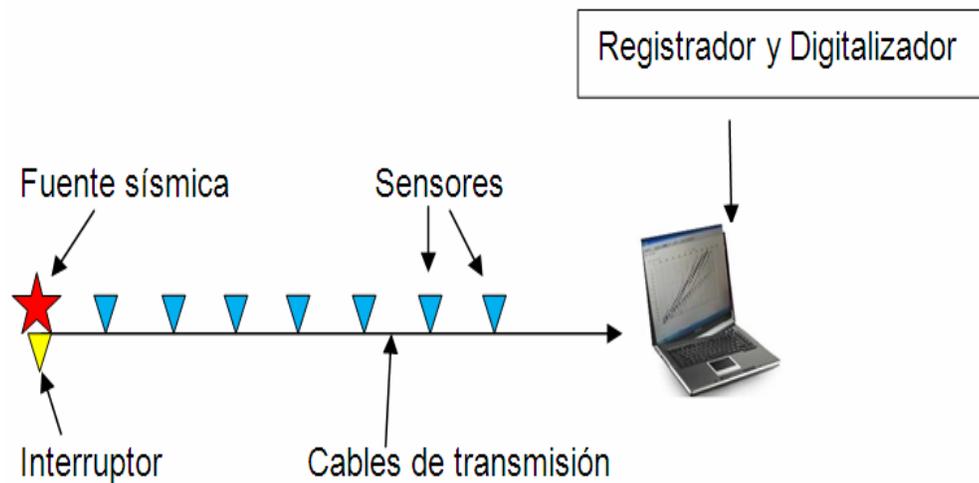


Figura 9. Diagrama esquemático de los instrumentos utilizados para la adquisición de datos.

3.5.1 Fuentes Sísmicas

Es necesario generar perturbación artificial para controlar la localización y el tiempo del impulso sísmico.

Debido a las variaciones elásticas que pueden presentar los diferentes tipos de suelos y estructura geológicas del subsuelo, se han creado una variedad de sistemas generadores de energías, que se adapten a las distintas condiciones del terreno en estudio, aportando mejor información tanto superficial como profunda. En la tabla 1, se presentan dos tipos de fuentes con los diferentes sistemas que los conforman.

Tabla 1. Tipo de fuentes generadoras de perturbaciones artificiales

GRUPOS DE FUENTES	SISTEMAS
EXPLOSIVOS	<ul style="list-style-type: none"> • Dinamita • Cargas dirigidas • Cordones explosivos
SISTEMAS MECÁNICOS	<ul style="list-style-type: none"> • Caída de pesas • Explosiones de gases confinados • Cañones Neumáticos • Vibradores

3.5.2 Sensores

Estos son conocidos también como geófonos, y son de primordial importancia para los tendidos de refracción, ya que ellos transforman los movimientos sísmicos del suelo en una señal eléctrica de características de frecuencia y amplitud análogas a las ondas sísmicas que detectan.

Generalmente, en la sísmica de refracción se usan geófonos con una componente (en su mayoría vertical), se ubican alineados entre sí, con un espaciado equidistante, dicha distancia depende del nivel de detalle necesario para obtener una buena resolución lateral y de la profundidad del refractor. Los geófonos están conectados a un cable y éste a su vez está conectado al digitalizador.

3.5.3 Cables de transmisión

Estos están compuestos por un par de conductores aislados por cada geófono, que se encargan de transmitir la señal generada por cada geófono a un canal de amplificación y registro en el sismógrafo.

3.5.4 Digitalizador:

Son aparatos electrónicos que registran, amplifican y filtran las señales eléctricas generadas por los sensores de ondas sísmicas. Equivalen en cierta forma, a un osciloscopio de múltiples canales. (Cavada, 2000), cada canal tiene su propio módulo de amplificación, filtrado y memoria, por tal motivo si un canal es dañado los demás no son afectados.

3.5.5 Interruptor (*trigger*)

Es el que le indica al sistema cuando debe comenzar a grabar. Este se encuentra ubicado cerca de la fuente generadora de energía, para accionar el digitalizador en el instante en que se genere el impacto.

3.6 Procesamiento e interpretación de datos de refracción sísmica

El objetivo principal del método de refracción sísmica es obtener un modelo estratigráfico del suelo en estudio, para esto, es necesario seguir entre otros pasos, los siguientes: seleccionar las primeras llegadas de los registros, construir la curva camino- tiempo y calcular las velocidades de cada superficie refractora.

3.6.1 Selección de las primeras llegadas

La selección de primeras llegadas constituye el primer paso para el procesamiento de los datos adquiridos por el método de refracción sísmica. Estos, se pueden realizar de manera manual o automática en cada una de las trazas registradas, y obtener como resultado los tiempos necesarios para la construcción de las curvas camino- tiempo.

Actualmente, existe una serie de software basado en principios matemáticos y físico con la finalidad de realizar la selección semi-automática, debido a que tienden a confundirse las primeras llegadas con los ruidos asociados con problemas de adquisición.

3.6.2 Construcción de las dromocronas

Las dromocronas son curvas generadas a partir de los tiempos de primeras llegadas de las ondas. Este procedimiento se puede realizar de manera manual o automático y es de suma importancia para la interpretación de los datos de refracción sísmica debido a que hace posible identificar que secciones de las curvas pertenecen a un mismo refractor o capa.

3.6.3 Cálculo de las velocidades de cada refractor

Para el cálculo de las velocidades, existen varios métodos de interpretación. Su uso depende de los modelos de suelo que se desean generar y estudiar. En la actualidad existen algoritmos basados en uno o varios de los siguientes métodos de interpretación con el objetivo de agilizar los cálculos.

- **Tiempos de intercepto**

Este método generalmente es usado para modelos de capas planas, este utiliza la pendiente de las dromocronas, la cual representa la lentitud (inverso de la velocidad), lo que permite el cálculo de la velocidad de cada refractor y los tiempos de intercepto de las curvas camino- tiempo, con el eje del tiempo permite el cálculo de las profundidades de cada capa (figura 10)

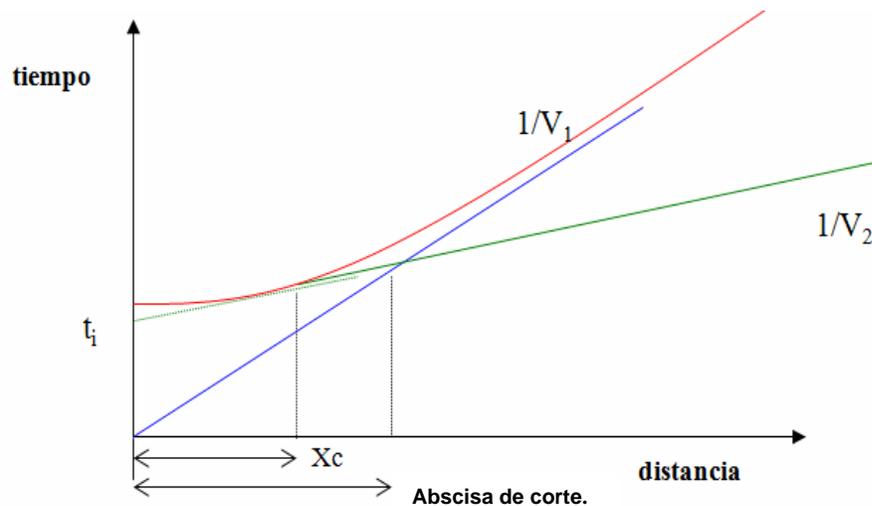


Figura 10. Curva camino-tiempo. En la cual se representa la pendiente y el tiempo de intercepto de la refracción.

- **Velocidades aparentes**

Este método se basa en la ley de velocidades aparentes, la cual dice que la velocidad con que aparenta transmitirse una onda en un cierto punto de la superficie del suelo (V_a) es igual al cociente entre la velocidad superficial (V_0) y el seno del ángulo de emergencia, tomados ambos en dicho punto, donde el ángulo de

emergencia es aquel formado por la onda emergente con la vertical a la superficie (Peralta, 2007)

$$V_a = \frac{V_0}{\sin \theta} \quad (3)$$

Este método es utilizado para modelos de capas inclinados paralelos, basándose en los tiempos de intercepto en el origen de un tendido directo y de su reverso.

- **Tiempo de retardo**

Este método es muy útil en caso de que la topografía de la superficie refractora sea irregular.

Utiliza la definición del tiempo de retardo como la diferencia entre el tiempo que requiere la onda para recorrer la trayectoria ente el punto de disparo y el refractor, con el ángulo crítico dentro del medio superior y con su propia velocidad, v_1 , y el tiempo requerido por las misma onda para recorrer la proyección de esa misma trayectoria, pero con velocidad de refractor v_2 .

- **Método de reciprocidad generalizada (GRM)**

Es una técnica de inversión de los datos, que utiliza los tiempos de recorrido de los disparos realizados en cada extremo del tendido sísmico, para determinar la geometría de los refractores en el subsuelo a través de una solución gráfica. El método emplea la migración de refracciones para obtener una estructura detallada de la interfase y variaciones laterales de la misma. La migración de refracciones usa la distancia de desfase, que es la separación horizontal entre el punto en donde empieza la refracción crítica y otro sobre la superficie en donde el rayo emerge.

3.6.4 SeisImager

Este es un paquete de algoritmos generados por *Geometrics*, está constituido por diferentes módulos, los cuales fueron de vital utilidad para el desarrollo de este proyecto, el modulo *Pickwin* que tiene como objetivo principal ayudar a identificar las primeras llegadas, escogerlas y guardarlas para que luego sea analizadas por el modulo *Plotrefa* que sirve para realizar la inversión sísmica mediante alguna de las tres siguientes técnicas: Mínimos cuadrados(*the time-term method*), Tiempo de retardo(*the reciprocal method*) o inversión tomográfica (*the tomography*). Siendo este último el utilizado para llevar a cabo nuestros objetivos. Este módulo permite la identificación de las dromocronas, las velocidades correspondientes de cada interfaz interpretada, entre otro, y la inversión a través de la tomografía.

3.6.5 Tomografía sísmica

Es una técnica de inversión que tiene como objetivo construir una imagen de un medio, para esto es necesario generar un modelo inicial de velocidades, a través del cual se rastrean la dirección de propagación de las ondas en dicho modelo y se comparan los tiempos de viajes medidos y calculados. Realizando luego la modificación del modelo inicial. Este proceso puede repetirse hasta que la diferencia de los tiempos de viaje calculados y observados sea mínima.

En el programa *SeisImager* la tomografía sísmica tiene como objetivo conseguir el mínimo tiempo de viaje entre la fuente y el receptor para cada par fuente- receptor. Para llevar a cabo este objetivo se realiza un planteamiento del problema y una ecuación para los tiempos de viajes. (figura 11)

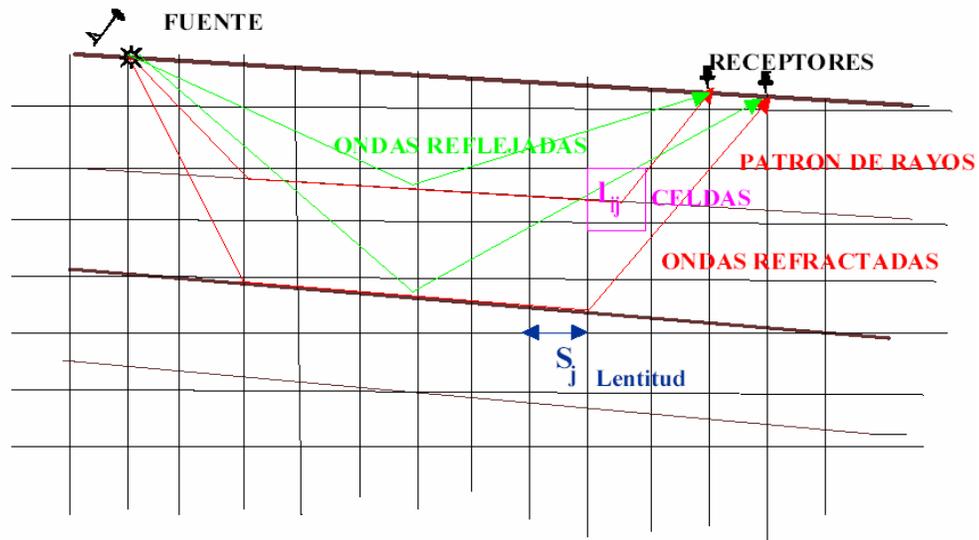


Figura 11. Esquema del problema planteado para la inversión.

Basándose en el esquema de la figura 11 se define:

$$S = \frac{1}{v} \quad (4)$$

Donde:

S = lentitud

v = velocidad

Considerando que $t = \frac{l}{v}$, donde l = la distancia recorrida por el rayo

Se puede expresar el tiempo de viaje de la siguiente forma:

$$t_r = \int_x \frac{dX}{v(X)} = \int_x S(X) dX \quad (5)$$

También se puede expresar de manera discreta de la siguiente forma:

$$t_i = s_1 l_{i1} + s_2 l_{i2} + s_3 l_{i3} + s_4 l_{i4} + \dots + s_N l_{iN} \quad (6)$$

Luego se separa una ecuación para cada tiempo de viaje, es decir, en M ecuaciones simultáneas y N incógnitas, se obtiene lo siguiente,

$$\begin{aligned} t_1 &= s_1 l_{11} + s_2 l_{12} + \dots + s_N l_{1N} \\ t_2 &= s_1 l_{21} + s_2 l_{22} + \dots + s_N l_{2N} \\ t_3 &= s_1 l_{31} + s_2 l_{32} + \dots + s_N l_{3N} \\ &\dots \\ t_M &= s_1 l_{M1} + s_2 l_{M2} + \dots + s_N l_{MN} \end{aligned} \quad (7)$$

Finalmente se obtiene una ecuación aproximada para el cálculo de los tiempos de viajes, expresado de forma matricial:

$$LS = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1N} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2N} \\ l_{31} & l_{32} & \dots & l_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l_{M1} & l_{M2} & \dots & l_{MN} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_M \end{pmatrix} = T \quad (8)$$

Rayo
Modelo

Tiempo de viaje

3.6.6 Cálculo de las velocidades de ondas S

Obtener la velocidad de propagación de las ondas S es muy importante para determinar las características elásticas del terreno.

Para el estudio de las ondas S, se puede utilizar los mismos principios y métodos analíticos, usados para las ondas P. La diferencia radica en el uso de sensores de componente horizontal los cuales registran mejor la llegada de las ondas S, que no se registran bien en los sensores de componente vertical de análoga manera como los sensores de componente vertical registran mejor la llegada de las onda verticales de P.

Admitiendo la variabilidad de esfuerzo a lo largo de un sólido, se puede utilizar como ecuación de movimiento para las ondas sísmicas, la ecuación de Newton para medios isotrópicos continuos:

$$\rho \vec{a}_i = \sigma_{i,j,j} + f_i \quad (9)$$

Siendo ρ la densidad de la masa del medio donde se dispersan las ondas,

$a_i = \left(\frac{d^2 u_i}{dt^2} \right)_t$ componente cartesiana "i" del campo aceleración del terreno,

$\sigma_{i,j,j} = \frac{\partial \sigma_{i,j}}{\partial x_j}$ derivada con respecto a x_j de la componente i,j del tensor de esfuerzo y f_i es la densidad volumétrica de fuerza.

La relación entre las componentes del tensor de esfuerzo y las deformaciones del terreno están constituidas por la Ley empírica de Hooke para medios isotrópicos, además en ausencia de fuerzas externas, la ecuación de movimiento viene dada por la siguiente expresión:

$$\rho \vec{a}_i = (\lambda + \mu) \nabla(\nabla \cdot \vec{u}) + \mu \nabla^2 \vec{u} \quad (10)$$

Donde λ y μ son las constantes de lamé.

Usando el teorema de Helmholtz, el campo vectorial de desplazamientos $\vec{u}(\vec{r}, t)$ se puede descomponer en una parte irrotacional (desplazamiento de ondas P) y otra solenoidal (desplazamiento de ondas S):

$$\vec{u} = \vec{u}_P + \vec{u}_S \quad (11)$$

Que cumplen las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{u}_P &= \vec{0} \\ \nabla \cdot \vec{u}_S &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Sustituyendo la expresión del campo vectorial (11) en la ecuación del movimiento (10), aplicando las condiciones (12) y separando las partes irrotacional y solenoidal, se obtienen la ecuación para cada onda P y S en un medio isotrópico:

$$\frac{\partial^2 \vec{u}_P}{\partial t^2} = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{u}_P \quad (13)$$

Donde se identifica la siguiente velocidad de fase:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (14)$$

Y para la onda S la ecuación viene dada por:

$$\frac{\partial^2 \vec{u}_S}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{u}_S \quad (15)$$

Donde se identifica la siguiente velocidad de fase:

$$\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (16)$$

La razón de las velocidades de onda P y S, se genera de las ecuaciones 14 y 16,

$$\frac{\alpha}{\beta} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} \quad (17)$$

El coeficiente de Poisson en función de las constantes de Lamé, viene dado por:

$$\sigma = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad (18)$$

Despejando la ecuación 18 y sustituyendo en 17, se obtiene:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma}} \quad (19)$$

Como el coeficiente de Poisson para las rocas consolidadas es típicamente 0.25, se obtiene la siguiente relación,

$$\frac{\alpha}{\beta} \approx 1.7 \quad (20)$$

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1 Adquisición de datos

En varias salidas de campo se planificó, con la ayuda de un equipo multidisciplinario que labora en el Centro de Sismología de la Universidad de Oriente (CSUDO), la recolección de datos sísmicos.

Considerando la topografía de la zona, se ubicaron en los centros poblados de Playa Colorada y Arapito áreas planas suficientemente extensas para realizar los tendidos de refracción y obtener una resolución vertical funcional, véase figura 12.



Figura 12. Tendido de refracción sísmica en el balneario de Playa Colorada.

Las herramientas necesarias para llevar a cabo el levantamiento sísmico fueron un equipo de refracción sísmica GEODE, el cual consta de un digitalizador, 24 geófonos verticales de 4.5 Hz, un interruptor, un cable de transmisión del cual se conectan los geófonos con la unidad de almacenamiento (Digitalizador) y una batería, como fuente de energía eléctrica para el digitalizador. Adicionalmente se utilizó una brújula para orientar el tendido sísmico, un trípode y una pesa de 100 kilogramos de masa, como fuente sísmica de impacto. Es oportuno mencionar que la fuente sísmica artificial utilizada fue diseñada por personal que labora en el CSUDO. El uso de fuente de impacto es permitido para tendidos de refracción de longitudes menores de 300 metros (figura 13)

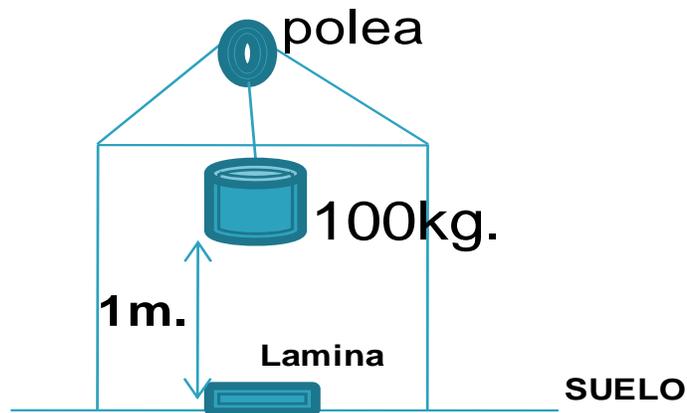


Figura 13. Fuente sísmica artificial diseñada por personal que labora en el CSUDO.

En los centros poblados Arapito y Playa Colorada se realizaron 2 (figura 14) y 3 líneas de tendidos sísmicos respectivamente (figura 15), en cada línea se realizaron 3 disparos, un disparo en el extremo inicial de la línea, un disparo central y un disparo en el otro extremo, conocido técnicamente como contradisparo, véase figura 16.



Figura 14. Imagen satelital *Google Earth*, en la cual se indica, con líneas rojas, la ubicación y sentido de los tendidos de refracción sísmica en Arapito.

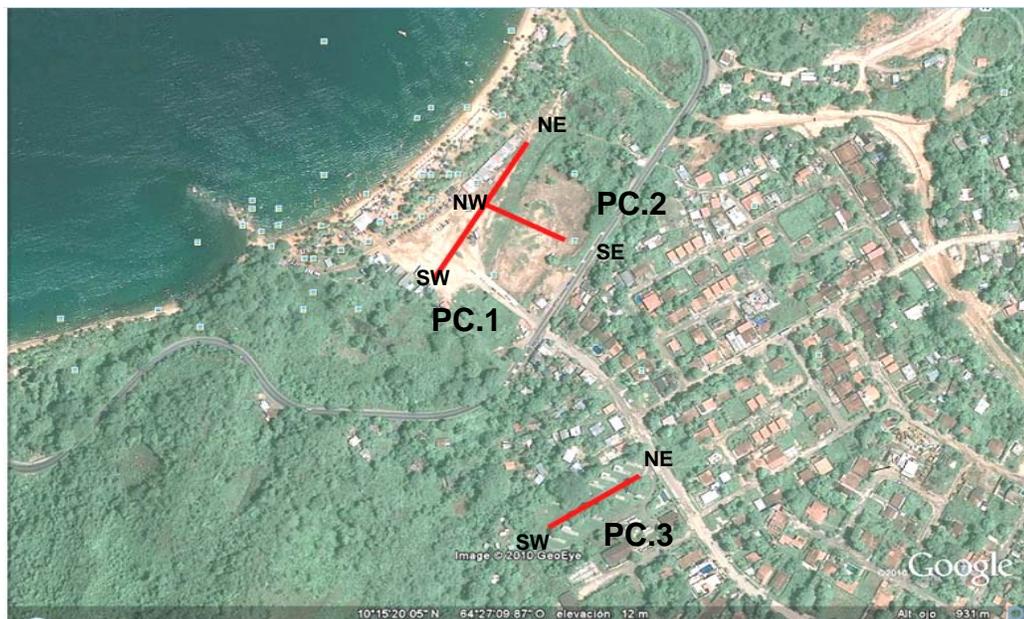


Figura 15. Imagen satelital *Google Earth*, en la cual se indica, con líneas rojas, la ubicación y sentido de los tendidos de refracción sísmica en Playa Colorada.

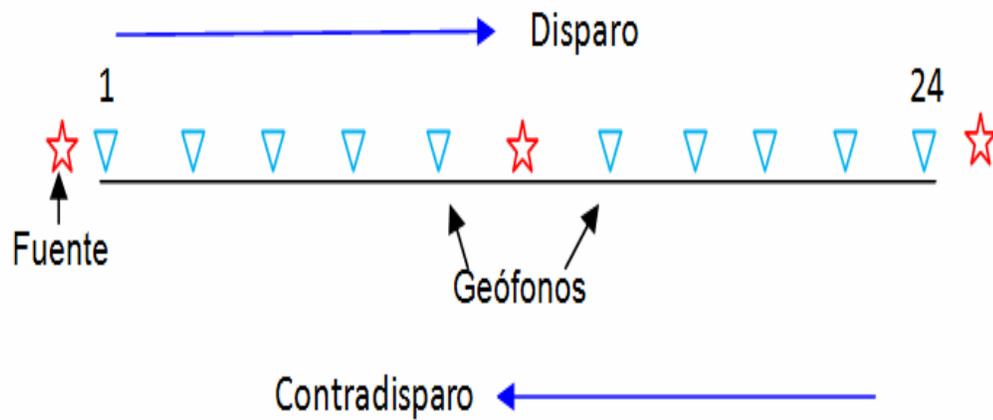


Figura 16. Diagrama representativo de la geometría utilizada para la adquisición de datos de refracción sísmica.

En las siguientes tablas se presentarán los parámetros de los tendidos realizados en los centros poblados de Arapito y Playa Colorada.

Tabla 2. Parámetros de los tendidos de refracción sísmica realizada en el centro poblado de Arapito.

	Arapito 1 (A.1)	Arapito2 (A.2)
Longitud de perfil	230 m.	115 m.
longitud de línea	240 m.	120 m.
número de geófonos	24	24
distancia entre geófonos	10 m.	5 m.
distancia fuente- receptor	5 m.	2,5 m.
Dirección	NE-SW	NW-SE

Tabla 3. Parámetros de los tendidos de refracción sísmica realizados en el centro poblado de Playa Colorada.

	Playa Colorada1 (PC.1)	Playa Colorada2 (PC.2)	Playa Colorada3 (PC.3)
longitud de perfil	161 m.	92 m.	115 m.
longitud de línea	168 m.	96 m.	120 m.
número de geófonos	24	24	24
distancia entre geófonos	7 m.	4 m.	5 m.
distancia fuente- receptor	3,5 m.	2 m.	2,5 m.
Dirección	NE-SW	NW-SE	NE-SW

4.2 Procesamiento de los datos adquiridos

Una vez medidos los datos con el sismógrafo, se procede a extraerlo del mismo hacia una computadora, se revisa cada archivo para verificar que cada uno corresponda al disparo asociado. Luego, se procede a la utilización del software *SeisImager*, realizando la siguiente rutina de análisis para cada tendido:

Se utilizó el módulo *pickwin95* para seleccionar las primeras llegadas. Para esto se importó la data de uno de los disparos, se realizó los ajustes necesarios a los parámetros, para una mejor observación, luego se seleccionaron las primeras llegadas, este procedimiento se repitió para los otros dos disparos y por último se guardó el resultado para luego ser utilizado por el módulo *plotrefa*, con el cual se realizan las curvas camino-tiempo.

Un ejemplo de los resultados obtenidos con el módulo *pickwin95* se puede ver en la figura 17, donde se observan las perturbaciones registradas por cada uno de los geófonos, las líneas verdes que representan las curvas construidas por las primeras llegadas seleccionadas para el disparo y contradisparo, y la curva roja que es la generada por la selección de las primeras llegadas para el disparo central.

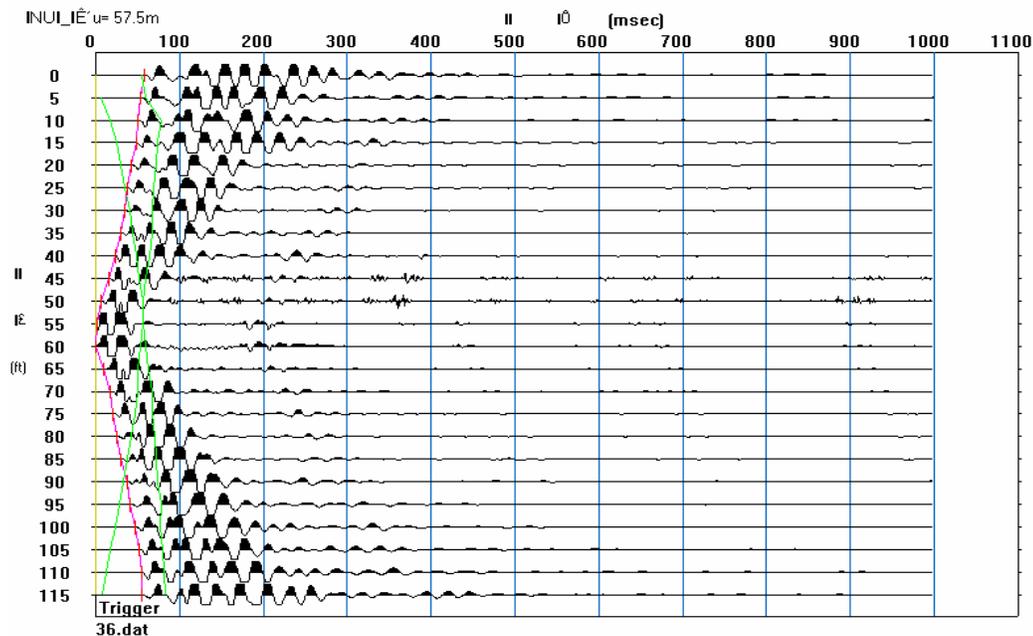


Figura 17. Se muestra la selección de las primeras llegadas, utilizando el módulo *pickwin95*.

Para el cálculo de las velocidades y la construcción de un modelo de capas se utilizó el módulo *plotrefa*, para esto se importó el resultado obtenido con el módulo *pickwin95*. Obtenidas las curvas camino- tiempo (dromocronas), se procede a identificar los puntos de quiebre de pendientes, a lo largo de cada curva, que indiquen la presencia de una interfaz. Luego, se le asigna el valor de velocidad a cada uno de los medios. Estos valores deben de ser anotados para ser usado posteriormente, para realizar la tomografía sísmica.

En la figura 18, se pueden observar las dromocronas con las velocidades de cada capa asignada según las diferentes pendientes representadas por las líneas rosadas.

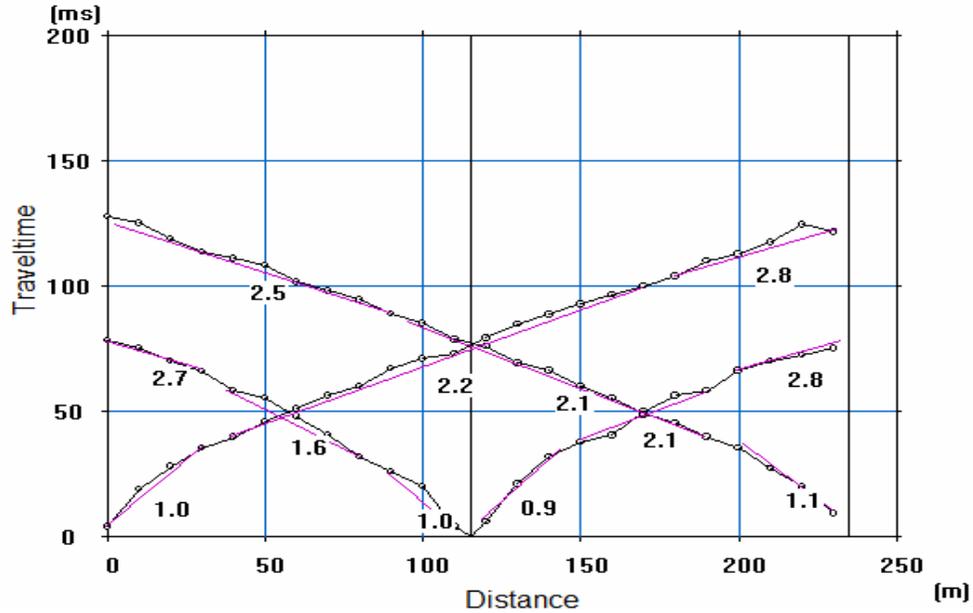


Figura 18. Curva camino-tiempo con las rectas de velocidades obtenidas con el software *SeisImager*, correspondiente al tendido A.1 realizado en Arapito.

La tomografía se realiza con el mismo módulo *plotrefa*, se debe reiniciar dicho módulo importando nuevamente el resultado obtenido por *pickwin95*. Se genera un modelo inicial, luego el programa realiza automáticamente la inversión de velocidades y genera el modelo tomográfico (figura 19). Para verificar si la selección manual, la asignación de capas y velocidades son adecuadas, se observan la dromocronas (figura 20), donde las líneas azules representan las velocidades medidas para cada capa, por lo tanto es posible observar el ajuste entre la curva C – T, generada a partir de los datos de adquisición (observada) y la curva C-T arrojada por la inversión del programa (calculada). En este caso, se presenta un buen ajuste entre ambas curvas. Esto permite inferir que el procedimiento es aceptable.

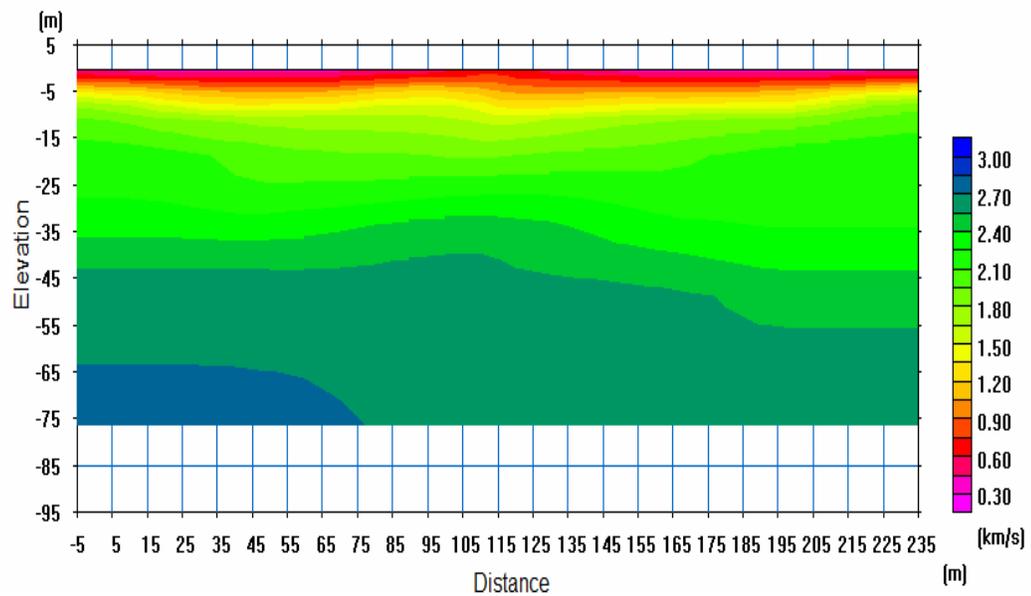


Figura 19. Se presenta el modelo tomográfico de un tendido sísmico realizado en Arapito.

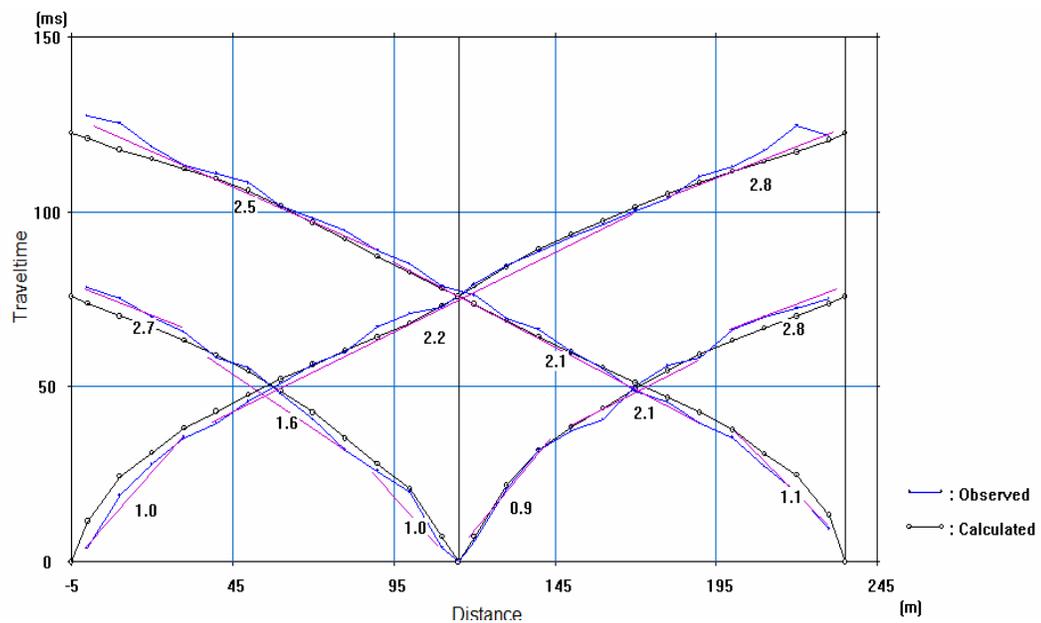


Figura 20. Representación gráfica de las dromocronas observadas y calculadas por el software.

Finalmente el modelo tomográfico se convierte en un modelo bidimensional de capas (figura 21), en donde se aproxima y promedia las velocidades de cada capa, basándose en las velocidades obtenidas mediante la asignación de las pendientes.

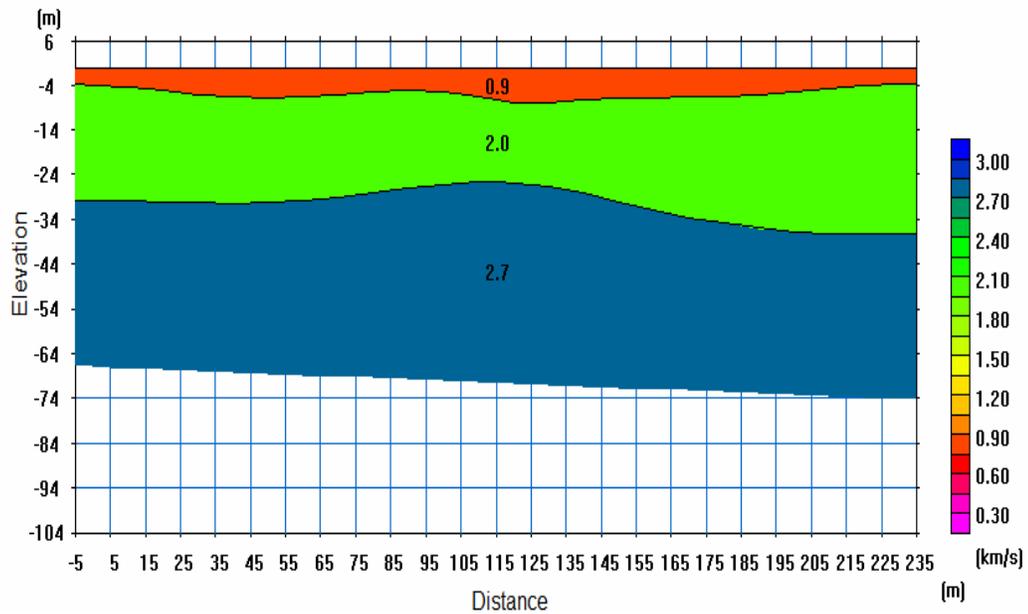


Figura 21. Conversión del modelo tomográfico al modelo de capas.

4.3 Cálculo del promedio de velocidades de ondas s

Ya conocidas las velocidades de las ondas P para cada estrato, se utilizó la relación entre $V_p / V_s = 1.76$ obtenidas por Montilla *et al.*, (2001).

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Tendidos arapito 1. (a.1) y arapito 2. (a.2)

En las figuras 22 y 23 se pueden observar las curvas camino- tiempo para los 3 disparos realizados en los perfiles A.1 y A.2 respectivamente, las curvas señalan variaciones con las distancias de los geófonos lo cual indica una topografía irregular en el subsuelo, además se muestran las líneas de tendencias que se trazan con el programa para el cálculo de las velocidades. Es posible observar el ajuste entre la curva camino-tiempo generado a partir de los datos de adquisición (observada) y la curva camino tiempo calculado por la inversión del programa. Debido a que dichas curvas presentan un buen ajuste, se puede inferir que la selección manual, la asignación de capas y velocidades son adecuadas.

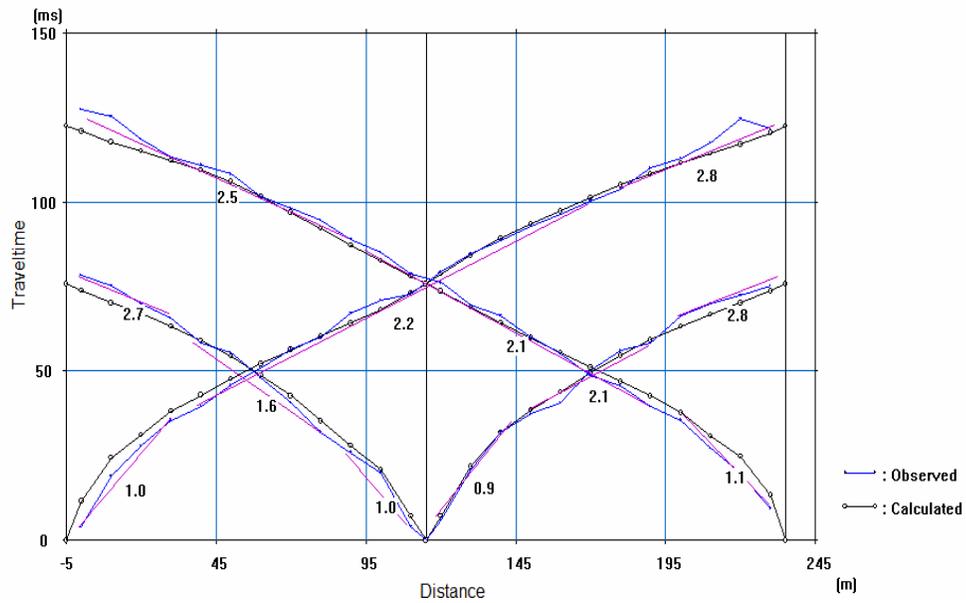


Figura 22. Ajuste de las curvas camino- tiempo con las rectas de velocidades del tendido A.1.

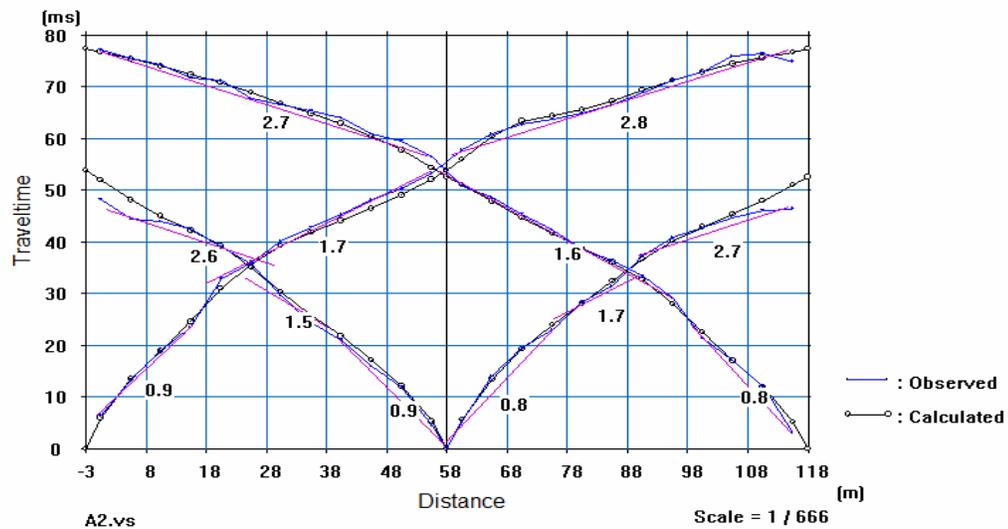


Figura 23. Ajuste de las curvas camino- tiempo con las rectas de velocidad del tendido A.2.

En las figuras 24 y 25, se puede observar el modelo de variación de velocidades en profundidad laterales, generado a partir de la inversión de los datos para los

perfiles A.1 y A.2, respectivamente, cuyo gradiente está representado por diversos colores. Estos modelos, fueron generados utilizando como parámetros los asignados por el programa, un mínimo de velocidad de 0.3 km/s, un máximo de velocidad de 3 km/s, un máximo de 10 capas y se realizaron 10 iteraciones. Nótese, que aquellos colores predominantes en los modelos representan valores similares a los valores de velocidades medidos en sus respectivas curvas camino-tiempo.

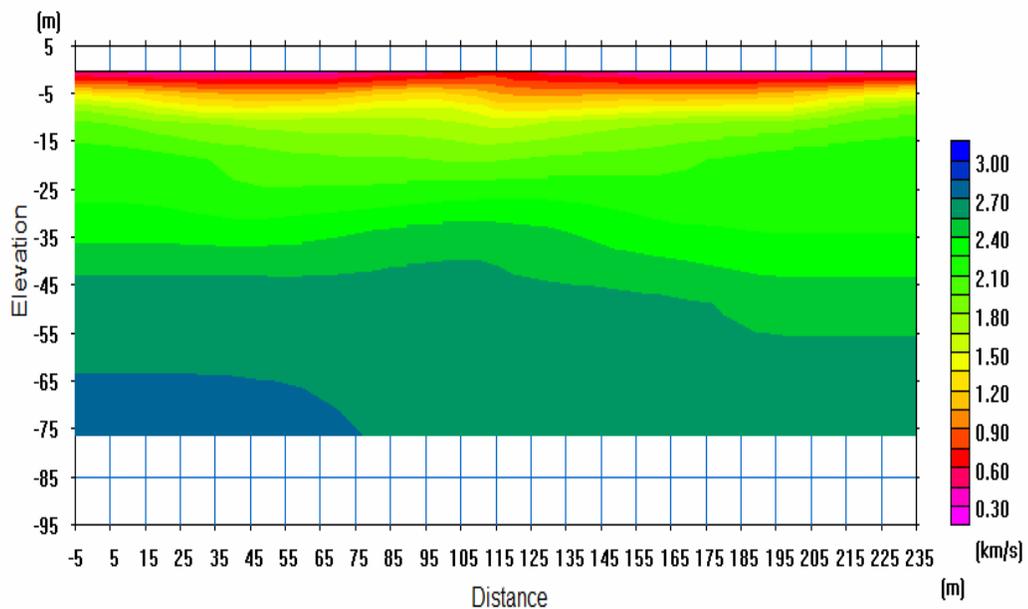


Figura 24. Tomografía sísmica para el tendido A.1.

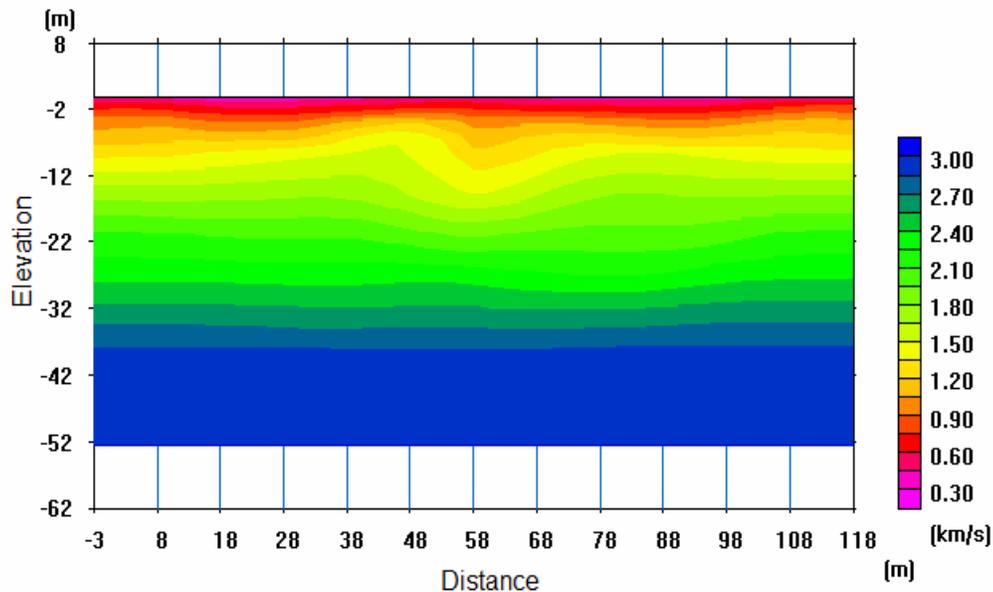


Figura 25. Tomografía sísmica para el tendido A.2.

En Las figuras 26 y 27, se puede observar la conversión de los modelos tomográficos a modelos representados por capas. Es de notar, que entre estos dos tipos de modelos existe una relación directa, dependiendo de los valores de capas y velocidades asignadas.

Del modelo de capas de la figura 26, se puede deducir que en la zona donde se realizó el tendido A.1, existe un espesor sedimentario somero que se encuentra, en promedio, hasta los 7 metros de profundidad y una discrepancia de velocidades de onda P entre 0.9 km/s y 2.0 km/s, con un basamento localizado, con una velocidad promedio de onda P de 2.7 km/s, que inicia aproximadamente a una profundidad de 30 metros.

NE

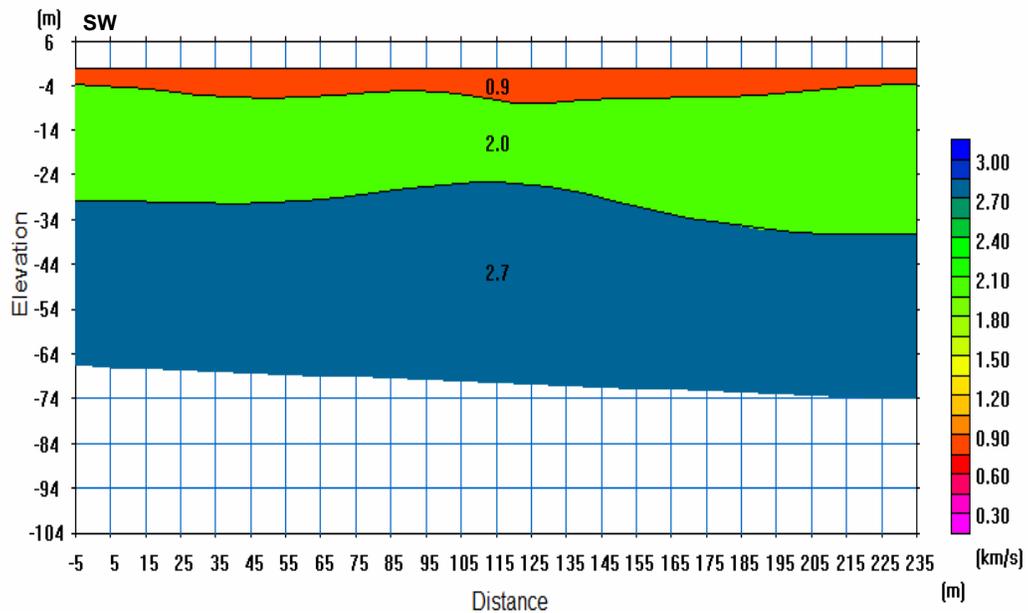


Figura 26. Conversión a modelo de capas de A.1.

Del modelo de capas de la figura 27 se puede deducir que en la zona donde se realizó el tendido A.2, existe un espesor sedimentario somero que se encuentra, aproximadamente, hasta los 6 metros de profundidad y una discrepancia de velocidades de onda P entre 0.9 km/s y 1.6 km/s, con un basamento localizado, con una velocidad promedio de onda P de 2.7 km/s, ubicado aproximadamente a 20 metros de profundidad.

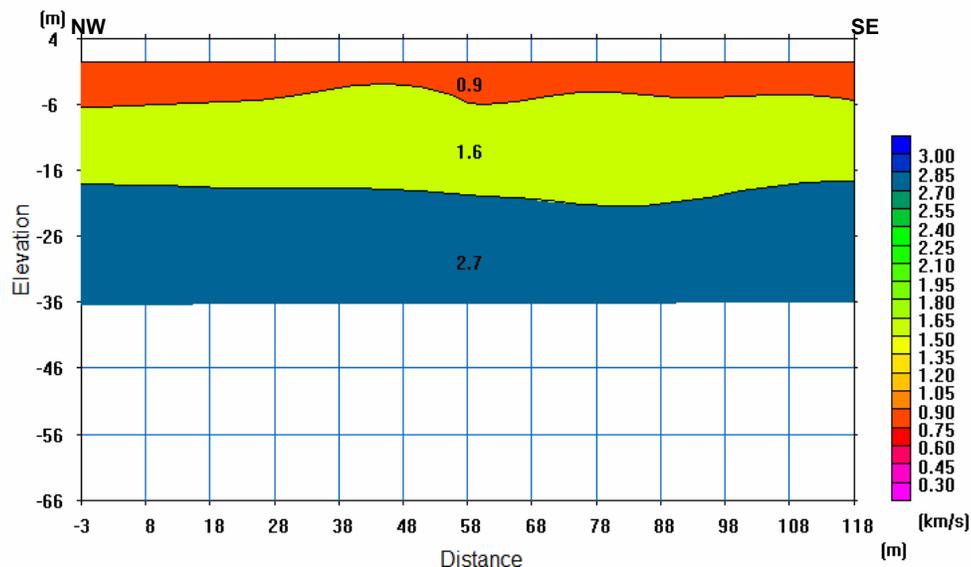


Figura 27. Conversión a modelo de capas de A.2.

En la tabla 4, se presentan las velocidades de corte (V_s) para cada capa obtenida de los tendidos realizados en Arapito. En el tendido A.1, se obtuvo para las capas 1, 2 y 3, las velocidades 0.5, 1.1 y 1.5 km/s respectivamente, y para A.2 también se obtuvo para las capas 1, 2 y 3, las velocidades 0.5, 0.9 y 1,5 km/s respectivamente.

Tabla 4. Velocidades de ondas P y S correspondiente a cada capa de los tendidos realizados en Arapito.

TENDIDOS	CAPA 1		CAPA 2		CAPA 3	
	V_P (km/s)	V_S (km/s)	V_P (km/s)	V_S (km/s)	V_P (km/s)	V_S (km/s)
A.1	0.9	0.5	2.0	1.1	2.7	1.5
A.2	0.9	0.5	1.6	0.9	2.7	1.5

5.2 Playa colorada, tendido 1 (pc.1), tendido 2 (pc.2) y tendido 3 (pc.3)

En las figuras 28, 29 y 30 se pueden observar las curvas camino- tiempo para los 3 disparos realizados en los perfiles PC.1, PC.2 y PC.3 respectivamente, las curvas señalan variaciones con las distancias de los geófonos, lo cual indica una topografía irregular en el subsuelo, además se muestran las líneas de tendencias que se trazan con el programa para el cálculo de las velocidades. Es posible observar también el ajuste entre la curva camino-tiempo generado a partir de los datos de adquisición (observada) y la curva camino-tiempo calculado por la inversión del programa.

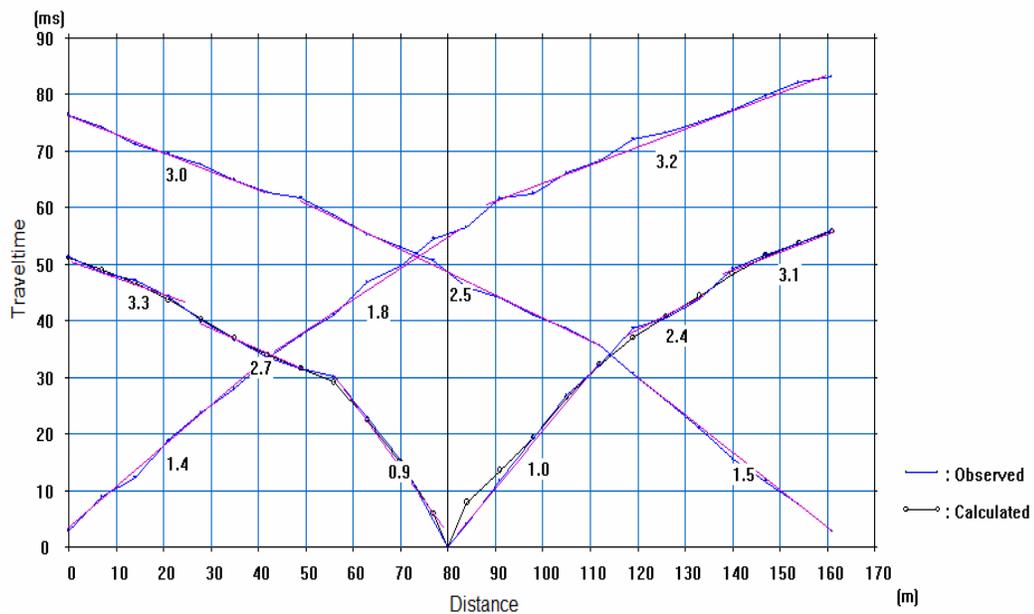


Figura 28. Ajuste de las curvas camino- tiempo con las rectas de velocidad del tendido PC.1.

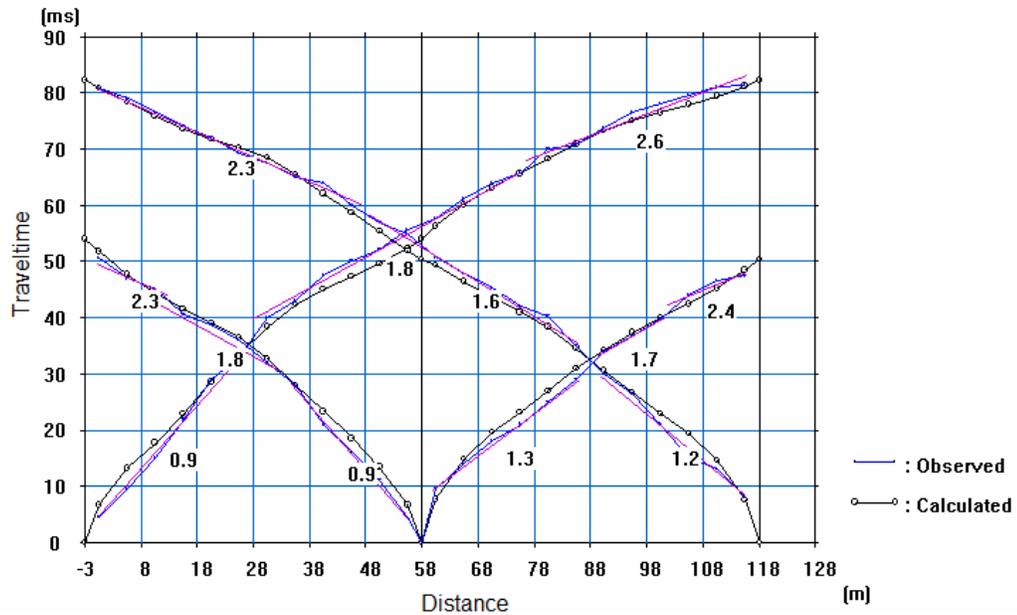


Figura 29. Ajuste de las curvas camino- tiempo con las rectas de velocidad del tendido PC.2.

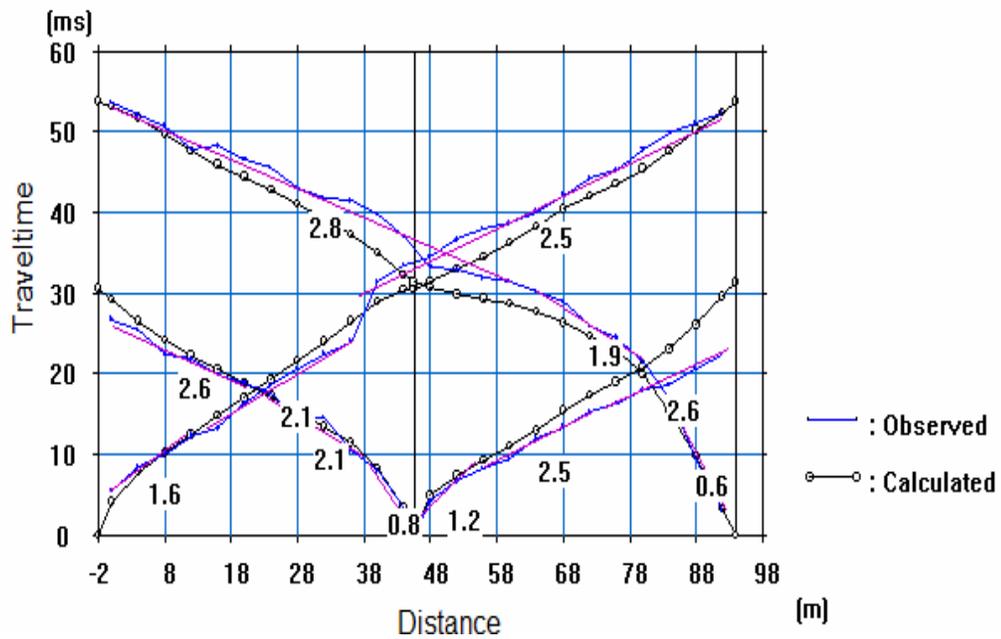


Figura 30. Ajuste de las curvas camino- tiempo con las rectas de velocidad del tendido PC.3.

En Las figuras 31, 32 y 33 se puede visualizar el modelo de variación de velocidades en profundidad y laterales (tomografía), generado a partir de la inversión de los datos para los perfiles PC.1, PC.2 y PC.3, respectivamente, cuyo gradiente está representado por diversos colores. Estos modelos fueron generados utilizando como parámetros los asignados por el programa, un mínimo de velocidad de 0.3 km/s, un máximo de velocidad de 4 km/s, un máximo de 10 capas y se realizaron 10 iteraciones. Nótese, que aquellos colores predominantes en los modelos representan valores similares a los valores de velocidades medidos en sus respectivas curvas camino-tiempo.

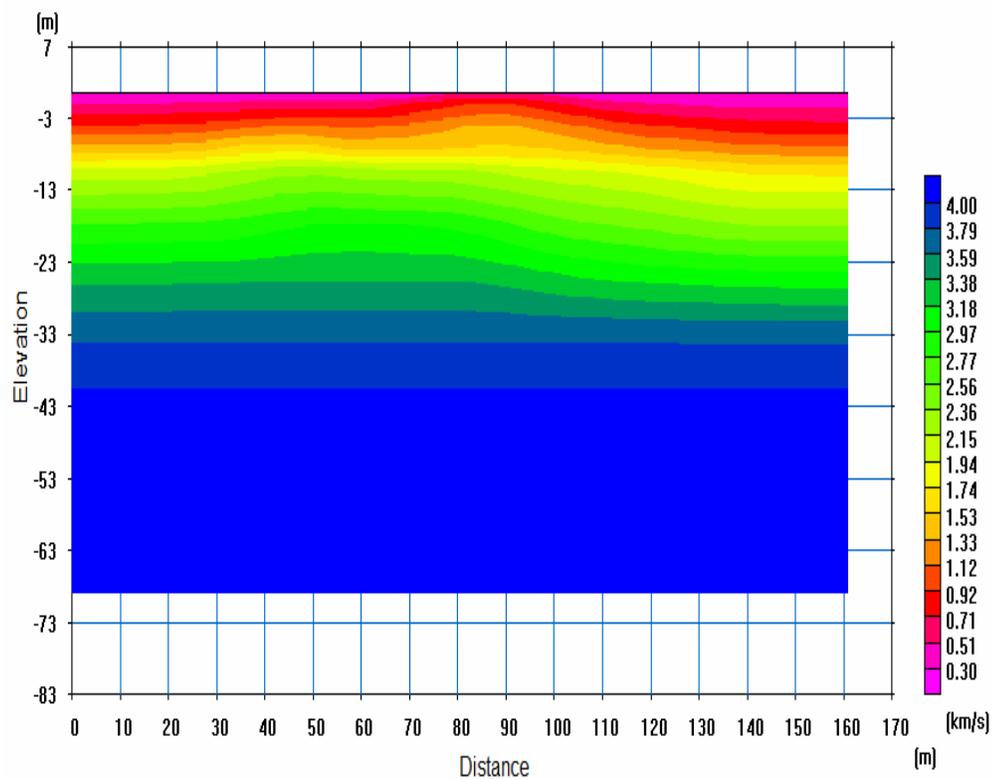


Figura 31. Tomografía sísmica para el tendido PC.1

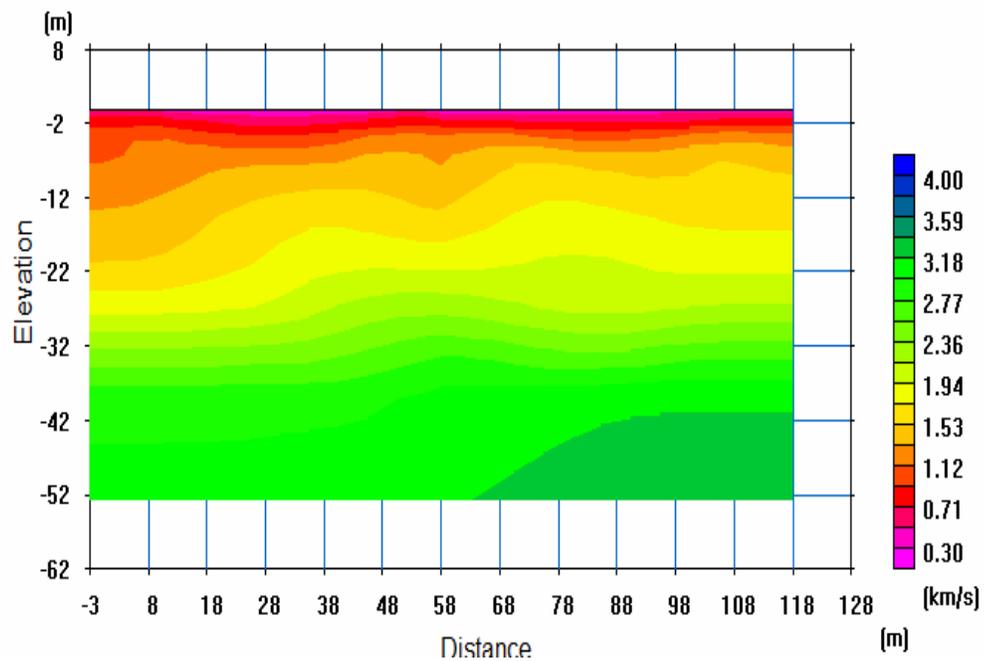


Figura 32. Tomografía sísmica para el tendido PC.2

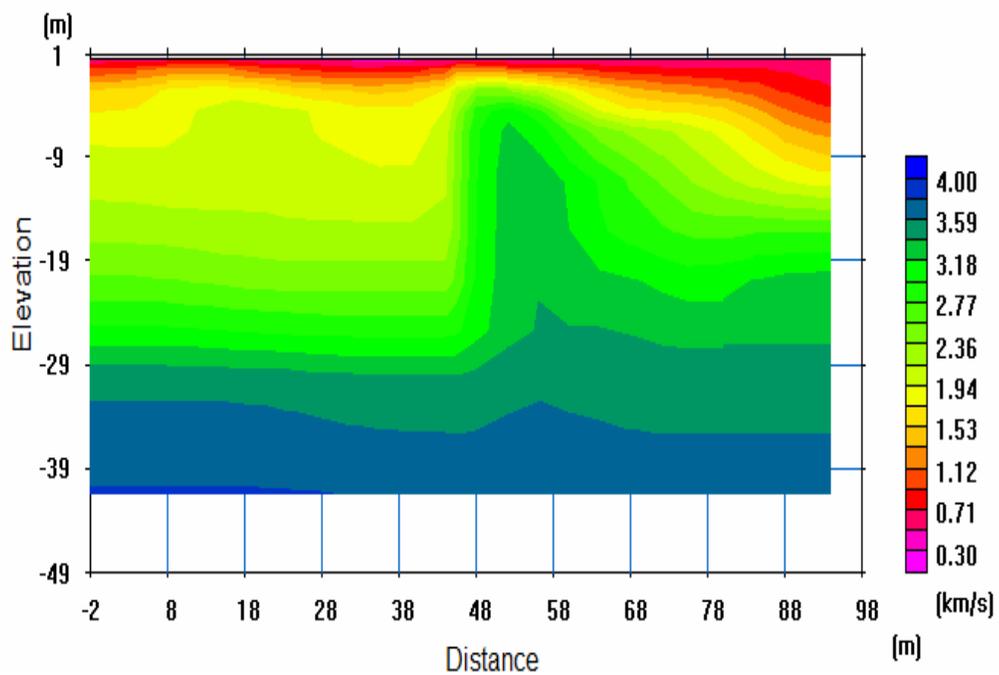


Figura 33. Tomografía sísmica para el tendido PC.3

Las figuras 34, 35 y 36, representan la conversión de los modelos tomográficos, anteriores, a modelos representados por capas. Es de notar, que entre estos dos tipos de modelos existe una relación directa, dependiendo de los valores de capas y velocidades asignadas. Sin embargo, cada modelo de capas tiene su particularidad.

Del modelo de capas de la figura 34, se puede deducir que en la zona donde se realizó el tendido PC.1, existe un espesor sedimentario somero que se encuentra aproximadamente, hasta los 8 metros de profundidad, también se puede observar que los estratos superficiales tienen una forma que sugiere una zona de deposición baja y tiene un contraste de velocidades de onda P desde 1.2 km/s a 2.3 km/s, con un basamento detectable de 3.2 km/s ubicado aproximadamente a partir de una profundidad de 15 metros.

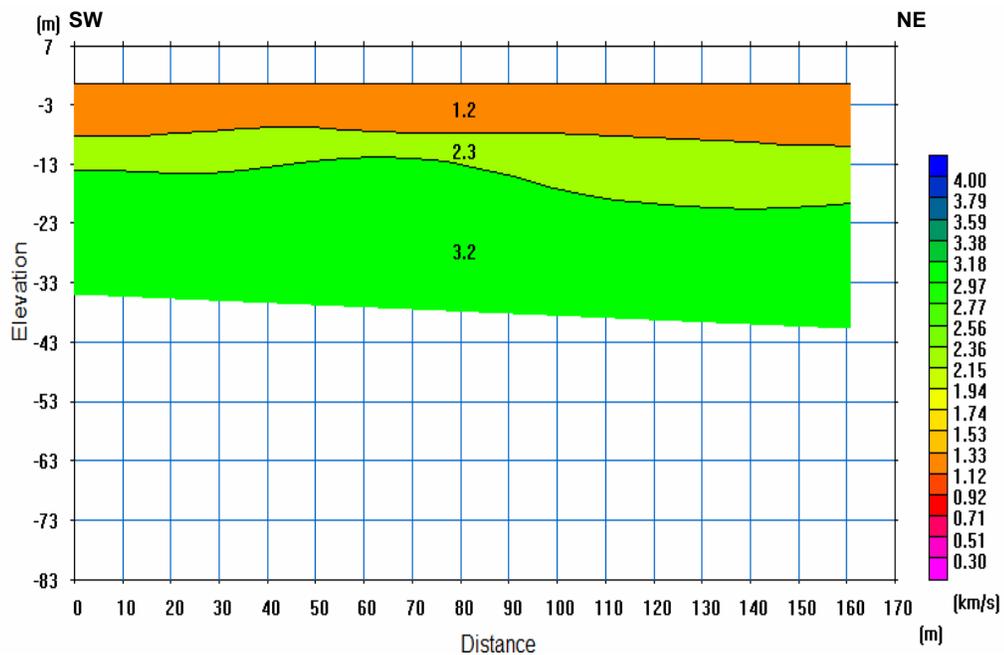


Figura 34. Conversión a modelo de capas de PC.1.

La figura 35, representa un modelo de tres capas del tendido PC.2. Donde la primera y segunda capa indican un contraste de velocidades de onda P entre 1.1 km/s

y 1.7 km/s, de profundidad promedio de 6 metros y un basamento detectable a los 24 metros de profundidad promedio, con velocidad de la onda P de 2.4 km/s

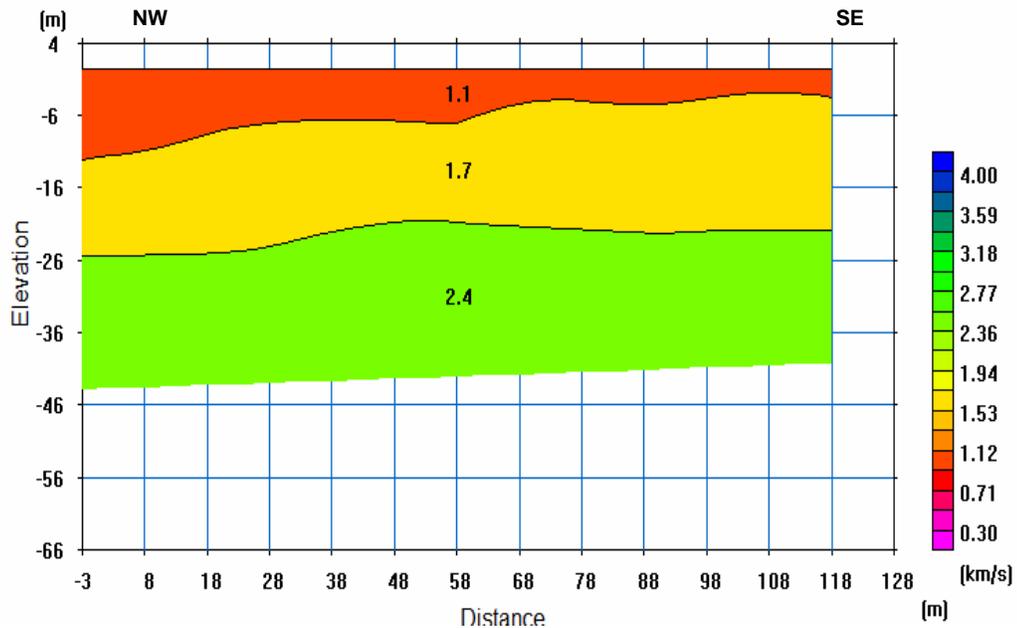


Figura 35. Conversión a modelo de capas de PC.2.

En la figura 36, se puede observar que los estratos superficiales tienen una forma que sugiere una zona deformada con un contraste de velocidades de onda P entre 1.0 km/s y a 2.2 km/s, de profundidad promedio de 3 metros y un basamento detectable a los 13 metros de profundidad promedio en el NE, y profundidad promedio de 16 metros, con velocidad de la onda P de 2.6 km/s. La forma especial del basamento, puede sugerir, una erosión cuaternaria del mar o un desnivel tectónico de un fallamiento menor.

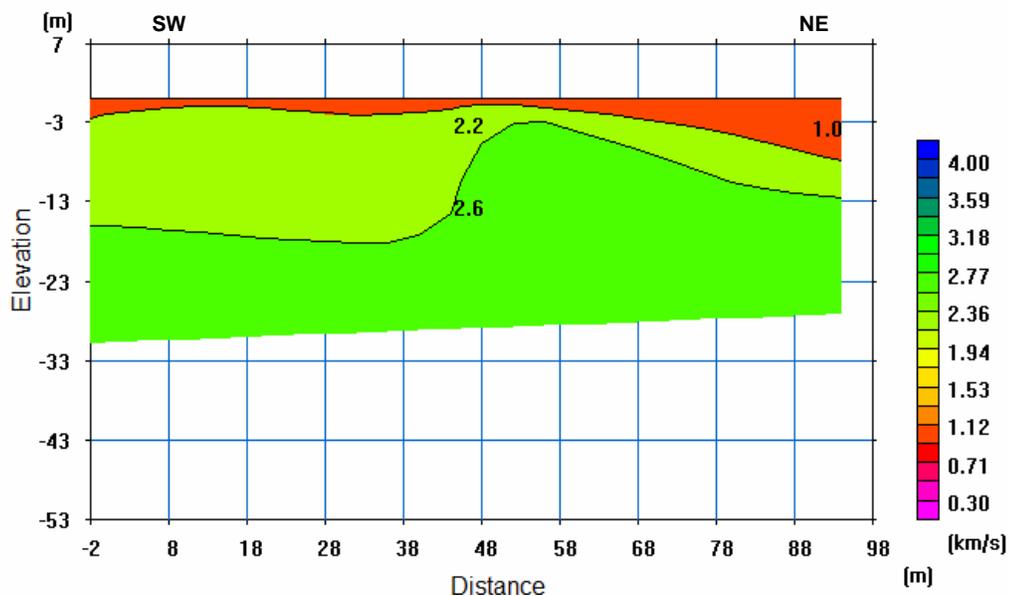


Figura 36. Conversión a modelo de capas de PC.3.

Las velocidades de corte (V_s) para cada capa obtenida para Playa Colorada, se visualizan en la tabla 5. En el tendido PC.1 se obtuvo para las capas 1, 2 y 3, las velocidades 0.7, 1.3 y 1.8 km/s respectivamente. Para PC.2 también se obtuvo para las capas 1, 2 y 3, las velocidades 0.6, 1.0 y 1.4 km/s, respectivamente. Para PC.3 también se obtuvo para las capas 1, 2 y 3, las velocidades 0.6, 1.2 y 1.5 km/s, respectivamente.

Tabla 5. Velocidades de ondas P y S correspondiente a cada capa de los tendidos realizados en Playa Colorada.

TENDIDOS	CAPA 1		CAPA 2		CAPA 3	
----	V_P (km/s)	V_S (km/s)	V_P (km/s)	V_S (km/s)	V_P (km/s)	V_S (km/s)
PC.1	1.2	0.7	2.3	1.3	3.2	1.8
PC.2	1.1	0.6	1.7	1.0	2.4	1.4
PC.3	1.0	0.6	2.2	1.2	2.6	1.5

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis y la interpretación de los registros obtenidos, mediante el empleo del método de refracción sísmica, en los centros poblados de Arapito y Playa Colorada, permite concluir que:

Los modelos de capas obtenidos para el centro poblado de Arapito, sugieren la presencia de una estructura sedimentaria consolidada, debido a que presenta un espesor sedimentario somero hasta 7 metros de profundidad aproximadamente, con un contraste de velocidades promedio de onda P, entre 0.9 km/s y 1.8 km/s, y una velocidad promedio de onda S igual a 0.5 km/s. A partir de 25 metros de profundidad, aproximadamente, se ubica el basamento, con una velocidad de onda P y S de 2.7 km/s y 1.5 km/s, respectivamente, la profundidad del basamento aumenta en dirección SE-NW, es decir, hacia la playa el basamento se encuentra más profundo.

Según la clasificación de la Norma de Edificaciones Sismorresistentes (COVENIN, 2001) y las velocidades de ondas S, obtenidas para el centro poblado de Arapito. Los estratos con profundidades menores a 7 metros, se pueden clasificar como suelos muy duros o muy densos con velocidades mayores a 0.4 km/s y los estratos con profundidades mayores a 25 metros, como rocas sanas/ fracturadas con velocidades mayores a 0.5 km/s.

Teniendo presente los tendidos Playa Colorada 1 (PC. 1) y Playa Colorada 2 (PC. 2), afirmamos que los modelos de capas que se elaboraron para el centro poblado de Playa Colorada, corresponden a una estructura sedimentaria consolidada,

debido a que presentan un espesor sedimentario somero a 9 metros de profundidad. Con un contraste de Velocidad promedio de onda P, entre 1.1 km/s y 2.0 km/s, y una velocidades promedio de onda S igual a 0.6 km/s. A partir de una profundidad de 20 metros, aproximadamente, se ubica el basamento con una velocidad de onda P y S de 2.8 km/s y 1.6 km/s, respectivamente, la profundidad del basamento aumenta en dirección SE-NW, semejante a las características presentada por el centro poblado de Arapito. Sin embargo se puede notar que existe una diferencia aproximada de 5 metros de profundidad, es posible que lo extendido del abanico de Playa Colorada ayude a que los sedimentos deslizados, desde las cabeceras y cauces de las quebradas, se distribuyan, de tal manera, que la capa formada por los sedimentos es de menor espesor, que la formada en el centro poblado de Arapito, que presenta un abanico más estrecho.

En el modelo de capas obtenido del tendido Playa Colorada 3 (PC. 3), se presenta a una profundidad aproximada de 3 metros, un espesor sedimentario somero con un contraste de Velocidades promedio de onda P, entre 1.0 km/s y 2.2 km/s, y una velocidad promedio de onda S igual a 0.6 km/s. A partir de una profundidad de 15 metros, aproximadamente, se ubica el basamento con una velocidad de onda P y S de 2.6 km/s y 1.5 km/s respectivamente. Se puede notar que en el área donde se realizó este tendido el espesor del estrato sedimentario somero es mucho menor que el obtenido en el área del balneario, debido a que este disminuye en dirección NW-SE.

Las velocidades de ondas S obtenidas, permiten clasificar los estratos sedimentarios de Playa Colorada como rocas sanas/ fracturadas con velocidades mayores a 0.5 km/s, según la clasificación de la Norma de Edificaciones Sismorresistentes (COVENIN, 2001).

Se puede notar que las velocidades de ondas S obtenidas tienen valores elevados en la mayor parte de las zonas, lo cual es coherente con los ambientes sedimentarios montañosos donde se encuentran ubicados los centros poblados Arapito y Playa Colorada.

En este trabajo de investigación se evidencia lo importante que es la caracterización apropiada de los perfiles geotécnicos, con propiedades representativas de su comportamiento dinámico. Como también, lo necesario que es determinar la velocidad de onda de corte (V_s) como parámetro esencial para evaluar el comportamiento dinámico de perfiles geotécnicos de acuerdo a lo dispuesto en la Norma Covenin 1756-2001 (COVENIN, 2001), para así lograr minimizar los riesgos que puedan perturbar los desarrollos habitacionales, creando diseños eficientes y adecuados.

Es de suma importancia tener en cuenta que los valores de las velocidades de las ondas P y S son estimaciones, que no tienen validez para profundidades mayores a 70 metros. Además se recomienda complementar este trabajo de investigación con ensayos de SPT (Standar Penetration Test) y estudios de riesgos geológicos que pueden afectar los centros poblados Arapito y Playa Colorada, como también, implementar un control de sedimentos en los cauces para mitigar y prevenir los flujos torrenciales. Teniendo en cuenta que se pueden repetir fenómenos como el ocurrido en septiembre del 2007.

La metodología implementada para llevar a cabo este trabajo de investigación, es una opción válida para este tipo de estudio, considerando que es una metodología fácil de implementar, no invasiva y de bajo costo.

BIBLIOGRAFÍA

Alfonso, M. (2003). *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil*.
Publicación técnica N° 229. Sanfandila. Instituto mexicano del transporte.
<http://www.crodam.com/documentos/geofisica_aplicada.pdf>
(23/08/2009).

Arias, F. (2006). *El proyecto de investigación, introducción a la metodología científica*. (5ª ed.). Caracas: Episteme.

Audemard, F. (2000) Aludes torrenciales en los sistemas montañosos de Venezuela:
¿Imprevisibles? [X Congreso Venezolano de Geología].
< http://www.funvisis.gob.ve/archivos/pdf/ponencias/2000_10CVG_FAM.pdf>
(21/02/2011)

Cantos, J. (1978). *Tratado de geofísica aplicada*. Segunda edición. LITOPRINT.
España, Madrid.

Cavada, J. (2000). *Guía de prospección sísmica por refracción* (versión 1.4).
Universidad Central de Venezuela, Caracas

COVENIN 1756 – 1: 2001 (2001). *Norma Venezolana para Edificaciones
Sismoresistentes*. Fondonorma. <<http://www.funvisis.gob.ve.pdf>. Caracas,
Venezuela.>
(01/10/2009).

CSUDO, (2008). *Boletines del Centro de Sismología de la UDO, 1995-2008*, Boletines sobre la actividad Sísmica, Universidad de Oriente.

FUNVISIS. (2002). *La investigación sismológica en Venezuela*. Caracas: Impresos Lauper. (CD-ROM).

González, J. y Schmitz, M. (2008). *Caracterización dinámica de perfiles geotécnicos de Cariaco (Estado Sucre, Venezuela), partiendo de datos de refracción sísmica*. Revista de la facultad de ingeniería de la U.C.V., 23, (2), p. 83-93. <<http://www.scielo.org.ve/scielo.php>> (03/09/2009).

Griffiths, D. y King, R. (1972). *Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos*. PARANINFO. España, Madrid.

López, J. (2005). *Presas para el control de flujos torrenciales en el estado Vargas, Venezuela*. Universidad Central de Venezuela, Caracas

Márquez, J. (2007). *Informe Preliminar de deslizamiento ocurrido en Playa Colorada y Arapito en Septiembre de 2007*, Protección Civil, estado Sucre, Venezuela.

Medina, M. y Torres, E. (2005). *Evaluación de niveles de susceptibilidad a movimientos de masa en el sector playa colorada (progresivas 48+000m - 50+450m), estado sucre: proyecto gasoducto Barbacoa-Margarita*. Trabajo de Grado para optar al título de Geógrafo, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de Geografía, Universidad de Yacambú, Barquisimeto.

Montilla, A.; Ramos, C. y Rojas, J. (2001). Relación V_p/V_s para la región nororiental de Venezuela comprendida entre las coordenadas geográficas 9,5-11,5°N y 61,5-65,5°O. *Saber, Universidad de Oriente, Venezuela*. 13 (2), 119-122.

Osiris, R. (2005). *Suelos Y Rocas Susceptibles a los Fenómenos Hidrometeorológicos*. Disponible en correo electrónico: geofitec@verizon.net.do

Parasnis, D. (1970). *Principios de geofísica aplicada*. PARANINFO, Madrid.

Peralta, A. (2007). *Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al norte del poblado de Urumaco, Estado Falcón*. (Tesis en línea) .Universidad Simón Bolívar. Sartenejas. <<http://www.gc.usb.ve/Tesis/Pre/Alfredo%20Peralta.pdf>> (18/08/2009).

Udías, A. y Mezcuca, J. (1997). *Fundamentos de Sismología*. UCA, El Salvador.

HOJAS DE METADATOS

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 1/6

Título	ESTIMACIÓN DE PROFUNDIDAD DE ESTRATOS SEDIMENTARIOS EN LOS CENTROS POBLADOS DE ARAPITO Y PLAYA COLORADA, ESTADO SUCRE
Subtítulo	

Autor(es)

Apellidos y Nombres	Código CVLAC / e-mail	
RIVERA P., YSIMAR M.	CVLAC	16.061.896
	e-mail	Ysimar.river@gmail.com
	e-mail	Ysimar-river@hotmail.com

Palabras o frases claves:

Refracción sísmica
Estratos
SeisImager
Tomografía

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 2/6

Líneas y sublíneas de investigación:

Área	Subárea
Ciencias	Física

Resumen (abstract):

Se caracterizaron estratigráficamente los suelos de los centros poblados Arapito y Playa Colorada, Estado Sucre, usando el método de prospección sísmica por refracción, para lo cual se realizaron tendidos con diferentes arreglos que permitieron estimar las velocidades de ondas sísmicas P y S. Para el procesamiento de los datos adquiridos se utilizó el paquete de software *SeisImager*, donde su inversión sísmica se fundamentó en la tomografía, generando como resultados modelos de capas estimados, del área de estudio. Los resultados obtenidos para Arapito, presentan un espesor sedimentario somero hasta 7 metros de profundidad, aproximadamente, con un contraste de velocidades promedio de onda P, entre 0.9 km/s y 1.8 km/s, y una velocidad promedio de onda S igual a 0.5 km/s. A partir de 25 metros de profundidad, aproximadamente, se ubicó el basamento, con una velocidad de onda P y S de 2.7 km/s y 1.5 km/s, respectivamente, la profundidad del basamento aumenta en dirección SE-NW, es decir, hacia la playa el basamento se encuentra más profundo. En el área del balneario de Playa Colorada, los resultados presentan un espesor sedimentario somero a 9 metros de profundidad. Con un contraste de Velocidad promedio de onda P, entre 1.1 km/s y 2.0 km/s, y una velocidades promedio de onda S igual a 0.6 km/s. A partir de una profundidad de 20 metros, aproximadamente, se ubica el basamento con una velocidad de onda P y S de 2.8 km/s y 1.6 km/s, respectivamente, la profundidad del basamento aumenta en dirección SE-NW, semejante a las características presentada por el Centro Poblado de Arapito. Además, en el modelo de capas obtenido del tendido Playa Colorada 3 (PC. 3), se presenta a una profundidad aproximada de 3 metros, un espesor sedimentario somero con un contraste de Velocidades promedio de onda P, entre 1.0 km/s y 2.2 km/s, y una velocidad promedio de onda S igual a 0.6 km/s. A partir de una profundidad de 15 metros, aproximadamente, se ubica el basamento que presenta una deformación que sugiere un fallamiento menor, con una velocidad de onda P y S de 2.6 km/s y 1.5 km/s, respectivamente.

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 3/6

Contribuidores:

Apellidos y Nombres	ROL / Código CVLAC / e-mail	
Rojas, Jorge L.	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input checked="" type="checkbox"/> JU <input type="checkbox"/>
	CVLAC	9.817.861
	e-mail	rogojorge@gmail.com
	e-mail	
Avendaño L., Jaime	ROL	CA <input type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input checked="" type="checkbox"/>
	CVLAC	8.438.392
	e-mail	javendamol@hotmail.com
	e-mail	
Beauperthuy U., Luis D	ROL	CA <input checked="" type="checkbox"/> AS <input type="checkbox"/> TU <input type="checkbox"/> JU <input checked="" type="checkbox"/>
	CVLAC	2.925.877
	e-mail	luisboper@yahoo.com
	e-mail	

Fecha de discusión y aprobación:

Año Mes Día

2011	08	15
------	----	----

Lenguaje: SPA

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 4/6

Archivo(s):

Nombre de archivo	Tipo MIME
Tesis-RiveraYsimar.doc	Application/word

Alcance:

Espacial : _____ (Opcional)

Temporal: _____ (Opcional)

Título o Grado asociado con el trabajo: Licenciatura en Física

Nivel Asociado con el Trabajo: Licenciatura

Área de Estudio: Física - Sismología

Institución(es) que garantiza(n) el Título o grado:

Universidad de Oriente

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 5/6



UNIVERSIDAD DE ORIENTE
CONSEJO UNIVERSITARIO
RECTORADO

CUN°0975

Cumaná, 04 AGO 2009

Ciudadano
Prof. JESÚS MARTÍNEZ YÉPEZ
Vicerrector Académico
Universidad de Oriente
Su Despacho

Estimado Profesor Martínez:

Cumplo en notificarle que el Consejo Universitario, en Reunión Ordinaria celebrada en Centro de Convenciones de Cantaura, los días 28 y 29 de julio de 2009, conoció el punto de agenda **"SOLICITUD DE AUTORIZACIÓN PARA PUBLICAR TODA LA PRODUCCIÓN INTELECTUAL DE LA UNIVERSIDAD DE ORIENTE EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL DE LA UDO, SEGÚN VRAC N° 696/2009"**.

Leído el oficio SIBI – 139/2009 de fecha 09-07-2009, suscrita por el Dr. Abul K. Bashirullah, Director de Bibliotecas, este Cuerpo Colegiado decidió, por unanimidad, autorizar la publicación de toda la producción intelectual de la Universidad de Oriente en el Repositorio en cuestión.

Comunicación que hago a usted a los fines consiguientes.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
SISTEMA DE BIBLIOTECA
RECIBIDO POR *[Firma]*
FECHA 5/8/09 HORA 5:30

Cordialmente,

[Firma]
JUAN A. BOLANOS CUNPEL
Secretario



C.C: Rectora, Vicerrectora Administrativa, Decanos de los Núcleos, Coordinador General de Administración, Director de Personal, Dirección de Finanzas, Dirección de Presupuesto, Contraloría Interna, Consultoría Jurídica, Director de Bibliotecas, Dirección de Publicaciones, Dirección de Computación, Coordinación de Teleinformática, Coordinación General de Postgrado.

JABC/YGC/marija

Apartado Correos 094 / Telfs: 4008042 - 4008044 / 8008045 Telefax: 4008043 / Cumaná - Venezuela

Hoja de Metadatos para Tesis y Trabajos de Ascenso – 6/6

Artículo 41 del REGLAMENTO DE TRABAJO DE PREGRADO (vigente a partir del II Semestre 2009, según comunicación CU-034-2009): “Los trabajos de grados son de la exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente, y solo podrá ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Concejo de Núcleo respectivo, quien deberá participarlo previamente al Concejo Universitario, para su autorización”.



Br: Ysimar Rivera

C.I: 16.061.896



Prof. Jorge Rojas
Asesor Académico

C.I: 9.817.861