

**MODELO DE ESTRATO SOMERO PARA EL CAMPO TENERIFE A PARTIR DE  
LA INTEGRACIÓN DE DATOS DE REFRACCIÓN SISMICA E INFORMACIÓN  
GEOLÓGICA**

**DIEGO ARMANDO OSPINA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2011**

**MODELO DE ESTRATO SOMERO PARA EL CAMPO TENERIFE A PARTIR DE  
LA INTEGRACION DE DATOS DE REFRACCION SISMICA E INFORMACION  
GEOLOGICA**

**DIEGO ARMANDO OSPINA**

**Proyecto de grado para optar al título de  
GEÓLOGO**

**Director**

**Ph.D. WILLIAM AGUDELO**

**Codirectores**

**M.Sc SAIT KHURAMA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE GEOLOGÍA  
BUCARAMANGA**

**2011**

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la oportunidad de disfrutar de la vida, de recibir sabiduría y fortaleza para afrontar los sucesos que día a día van forjando la vida misma.

A mi grandiosa Madre que es el motor de mi éxito a quien agradezco por su entrega y sacrificio incondicional para poder lograr este sueño.

A mi hermano por confiar sin dudar nunca de mis capacidades.

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a:

WILLIAN AGUDELO, YAQUELINE FIGUEREDO, SAUL GUEVARA, GERMAN YURY OJEDA por su valiosa contribución para mi formación como profesional.

A mis compañeros de la escuela de geología que de alguna forma contribuyeron en mis conocimientos.

A JORGE EDUARDO PINTO Y SAIK KHURAMA por aceptar la evaluación de mi trabajo de tesis.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER y a su claustro de Profesores que compartieron sus conocimientos para lograr mi formación integral como geólogo.

Al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) por permitirme desarrollar mi trabajo de tesis con los recursos que me brindaron.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	15
OBJETIVOS	16
OBJETIVO GENERAL	16
OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
JUSTIFICACIÓN	17
1. GENERALIDADES	18
1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA	18
1.2 GEOLOGÍA GENERAL	18
1.3 ESTRATIGRAFÍA	22
1.3.1 Grupo Real (Tmp)	22
1.3.2 Depósitos Cuaternarios	22
1.4 TECTONICA	23
1.5 GEOMORFOLOGÍA	24
1.5.1 Geoformas De Tipo Denudacional-Estructural	25
1.5.2 Geoformas De Tipo Deposicional	27
1.5.3 Geoformas De Tipo Fluvial	28
2. SÍSMICA DE REFRACCIÓN	30
2.1 MODELO ANALÍTICO DE REFRACCIÓN UTILIZADO	32
2.1.1 Teoría De La Inversión Lineal	33
2.2 Tomografía Sísmica	38
3. METODOLOGÍA	39
3.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO SÍSMICO	39
3.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO TENERIFE	40
3.2.1 Adquisición Sísmica Del Proyecto Tenerife 2d-3c-	40
3.2.2 Adquisición Sísmica Del Proyecto Tenerife 3d-3c	40
3.3. FASE DE CAMPO	41
3.4 FASE DE OFICINA	42

3.4.1 Recolección De Información	42
3.4.2 Análisis De La Información Recopilada	42
3.4.3 Parámetros Para La Determinación Geofísica Del Estrato	42
3.4.5 Datos Para La Determinación Geológica Del Estrato Somero	43
3.4.6 Procesamiento	43
3.5 FASE DE RESULTADOS	43
4. DETERMINACIÓN GEOFÍSICA DEL ESTRATO SOMERO	45
4.1 MEDICIÓN DE LOS TIEMPOS DE POZO TIEMPO DE GEÓFONO BOCA DE POZO	45
4.2 MODELO DE ESTRATO SOMERO A PARTIR DE REFRACCIONES	48
4.3 TOMOGRAFÍA DE DATOS SÍSMICOS DE ONDA P PARA EL 3D	49
4.4 INTERPRETACIÓN DE TOMOGRAFÍA SÍSMICA	51
4.4.1 Depósitos Aluviales	52
4.4.2 Depositos De Terraza	52
4.4.3 Grupo Real	53
4.5 MODELO GEOFÍSICO CON BASE EN LA TOMOGRAFÍA SÍSMICA	55
4.6 INTERPRETACIÓN LÍNEA EXPERIMENTAL	56
5. POZOS SÍSMICOS DE LA LÍNEA EXPERIMENTAL	57
5.1 PERFIL GEOLÓGICO BASADO EN LOS DATOS DE POZOS SÍSMICOS	66
6. INTEGRACIÓN GEOFÍSICA Y GEOLÓGICA	67
7. DISCUSIÓN	68
8. CONCLUSIONES	69
9. RECOMENDACIONES	71
GLOSARIO	72
BIBLIOGRAFÍA	73

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Ubicación Geográfica De La Zona De Adquisición	18
Figura 2 Modelo evolutivo regional de la Cordillera Oriental y las cuencas del Valle Medio del Magdalena	20
Figura 3 Mapa Geológico proyecto Tenerife 3D-3C	21
Figura 4 Mapa Tectónico para el bloque Tenerife	24
Figura 5 Mapa Geomorfológico Proyecto Tenerife 3D-3C	26
Figura 6 Cierre y abandono meandrónico del río La Colorada	28
Figura 7 Geoformas de Tipo Fluvial presentes en el valle del río La Colorada. MA Meandros Abandonados; D Diques; B Basin	29
Figura 8 Refracción de ondas planas a través de una interfase horizontal ( $V_2 = 2V_1$ ). Variables: $\theta_1$ ángulo de incidente; $\theta_2$ Ángulo refractado, $\Delta t$ es la separación del frente de onda	31
Figura 9 Trazado de rayos a través del modelo de la Capa Somera. Izquierda modelo Hipotético. Derecha Modelo a partir de los primeros arribos obtenidos en campo	33
Figura 10 Errores entre los tiempos observados y del modelo	34
Figura 11 Parametrización del Modelo utilizado para el análisis de refracción	37
Figura 12 Línea experimental de color rojo, Proyecto Sísmico Tenerife 3D-3C de arreglo ortogonal con fuentes en rojo perpendiculares a las receptoras en verde	41
Figura 13 Cálculo de los tiempos de Geófono Boca de Pozo	45
Figura 14 Mapa de Velocidades de tiempo de Geófono Boca de Pozo	46
Figura 15 Topografía gris y base de la capa refractante amarillo. El espacio entre las dos capas es el volumen que corresponde a la capa de baja velocidad	49
Figura 16 Tomografía Sísmica. Software 3DGLI	50

Figura 17 Perfil para interpretar, mostrando variaciones de velocidad, el color rosado indica valor de velocidad 0, esta zona está por encima de la topografía, los valores de velocidad aumenta con la profundidad	50
Figura 18 Izquierda. Geometría rectilínea en superficie arroja valores inexactos. Derecha. Sección de análisis de la figura izquierda, demarcada con un recuadro amarillo	51
Figura 19 Interpretación de la base de los depósitos Aluviales delimitados en superficie con la línea de color fucsia oscura	52
Figura 20 Interpretación en base a la tomografía de los Depósitos de Terrazas	53
Figura 21 Interpretación en base a la tomografía de los Arcillas-Arenosas Zona Norte	53
Figura 22 Interpretación tomografica de lodolitas del Grupo Real en zona intermedia	54
Figura 23 Interpretación en base a la tomografía Grupo Real Zona Sur	54
Figura 24 Modelo Tomográfico Parte superior de la Imagen y corte Nor-Este Sur-Oeste señalado con flechas parte inferior de la imagen	55
Figura 25 Sección sísmica correspondiente a la línea experimental 2D-3C del programa Tenerife (noreste a la derecha de la figura) Nótese que los reflectores buzan hacia el sur	56
Figura 26 El primer grupo de pozos descritos están ubicados en el recuadro negro al sur del proyecto	58
Figura 27 Litologías presentes en el Grupo Real zona sur	59
Figura 28 Segundo grupo de pozos descritos ubicados en el recuadro negro zona centro del proyecto	60
Figura 29 Litologías presentes en los Depósitos Aluviales	61
Figura 30 Tercer grupo de pozos descritos ubicados en el recuadro negro	62
Figura 31 Litologías presentes en EL Grupo Real	63
Figura 32 Cuarto grupo de pozos descritos ubicados en el recuadro negro, Depósitos de Terrazas	64

Figura 33 Litologías Presentes en los depósitos de Terrazas	65
Figura 34 Perfil geológico con datos de pozo. Línea Experimental	66
Figura 35 Modelo capa somera producto de la integración del modelo Geofísico y Geológico	67

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Estadística de Valores de velocidad de Tiempos de Geófono Boca de Pozo en metros por segundo por cada zona Geológica	46
Tabla 2 Valores de Velocidad en metros por segundo, por cada metro de profundidad	47

## RESUMEN

**TITULO:** MODELO DE ESTRATO SOMERO PARA EL CAMPO TENERIFE A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DE DATOS DE REFRACCIÓN SISMICA E INFORMACIÓN GEOLÓGICA \*

**AUTOR.** Ospina Delgado Diego Armando\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Estrato Somero, Sísmica de Refracción, Integración Geofísica y Geológica, Inversión Lineal Generalizada.

## DESCRIPCIÓN

La construcción del modelo 3D del estrato somero del campo Tenerife se realizó con la integración de datos sísmicos de refracción e información Geológica. Inicialmente los datos sísmicos suministrados por el Instituto Colombiano del Petróleo ICP Ecopetrol del proyecto Tenerife 3D-3C, fueron procesados utilizando el algoritmo de tomografía y el método matemático Inversión Lineal Generalizada, para obtener el volumen del estrato somero del campo. Posteriormente con la información geológica obtenida en el análisis de los ripsos de perforación de los pozos sísmicos del proyecto Tenerife 2D-3C se determinaron las variables litológicas en la línea experimental que atraviesa los depósitos cuaternarios y El Grupo Real la cual está conformada por las formaciones Lluvia en la parte norte, Seguida de la formación Chontaorales parte intermedia y al sur la formación Bagre. Estas formaciones se lograron correlacionar con la información de los datos de pozo. Adicionalmente con una pequeña interpretación del resultado del procesamiento realizado a la línea Experimental de la fase uno del proyecto con el fin de visualizar las características de buzamiento de las formaciones que conforman El Grupo Real para realizar la correlación con los datos litológicos. Finalmente, a partir de la integración de los cálculos de refracción con la información litológica de la línea experimental con la interpretación de la misma e información geológica previa al proyecto (Geología de superficie y geomorfología) se realizó el modelo 3D del estrato somero.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físicoquímicas. Escuela De Geología. Director Ph.D. WILLIAM AGUDELO. Codirectores M.Sc SAIT KHURAMA

## ABSTRACT

**TITULO:** MODELO DE ESTRATO SOMERO PARA EL CAMPO TENERIFE A PARTIR DE LA INTEGRACIÓN DE DATOS DE REFRACCIÓN SISMICA E INFORMACIÓN GEOLÓGICA.

**AUTOR.** Ospina Delgado Diego Armando\*

**KEY WORDS:** Near surface, Seismic refraction, Geophysical and geological integration, Generalized Linear Inversion.

## DESCRIPTION

The construction of the 3D model of Tenerife shallow layer was done with the integration of seismic refraction and geological knowledge. Initially, the seismic data supplied by the Colombian Petroleum Institute ICP Ecopetrol of the project Tenerife 3D-3C were processed using the Tomography Algorithm and the Generalized Linear Inversion mathematical method in order to get the shallow layer volume. After this, with the geological information obtained in the analysis of drill cuttings from Tenerife 2D-3C seismic wells were determined the lithological variables in the experimental line that crosses the Quaternary deposits and El Real group which consists of Lluvia formations in the north, followed by Chontorales formation in the intermediate part and the Bagre formation in the south. Those formations were correlated with well data. Additionally, with a little interpretation of the results of processing on the experimental line on the phase one of the project in order to see the dip features of the formations that make up the Real group to make the correlation with lithological data. Finally, from the integration of the calculations of refraction, lithological information with the experimental line and pre-project geological information (surface geology and geomorphology) was developed the 3D model of the shallow layer.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Facultad Ingenierías Físicoquímicas. Escuela De Geología. Director Ph.D. WILLIAM AGUDELO. Codirectores M.Sc SAIT KHURAMA

## INTRODUCCIÓN

Uno de los eslabones del procesamiento de datos sísmicos son las correcciones estáticas, las cuales eliminan el efecto causado por la capa meteorizada o capa de baja velocidad. Esta capa tiene un efecto en la propagación de la onda, dando como resultado una alta tasa de absorción de la energía y a menudo actúa como un medio dispersor; estos efectos se ven reflejados en la sección sísmica dificultando la visualización de estructuras geológicas.

Existen varios métodos matemáticos para la determinación del espesor de esta capa, que se pueden utilizar de manera unilateral o integrada, ya sea para ver la respuesta entre cada uno de ellos o para corroborar o dar soporte de alguno de los métodos.

La integración del método Geofísico con la información Geológica da soporte al método matemático utilizado y por otro lado sería el factor determinante para identificar un método matemático que no se acople a la realidad.

Los datos utilizados son de refracción, su base teórica es la ley de *Snell*, y para este proyecto, el algoritmo utilizado fue: Inversión Lineal Generalizada, Tomografía de onda P y datos de Tiempo de Geófono Boca de Pozo.

La información Geológica se extrajo de estudios previos de geología de campo y recolección bibliográfica y el análisis de ripios en campo, en la perforación de la adquisición sísmica del proyecto.

Finalmente la integración de los resultados de los métodos antes mencionados da soporte para la construcción del modelo tridimensional con características litológicas y de espesores del estrato somero.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar el modelado 3D del estrato somero del campo Tenerife, integrando geofísica y geología para comprender el efecto de esta capa a la propagación de las ondas sísmicas.

### **OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Relacionar la geomorfología con los tiempos de geófonos boca de pozo.
- Correlacionar los ripsos de los pozos sísmicos con la geología de superficie.
- Modelar la capa somera con datos de refracción mediante el uso de tomografía sísmica.
- Modelar la litología de la capa somera con datos de pozos sísmicos.
- Integrar las diferentes variables para generar el modelo 3D del estrato somero.

## **JUSTIFICACIÓN**

En aras de conocer el estrato somero del área de estudio, el presente documento busca determinar las variaciones de velocidades y espesores de la capa meteorizada, con el fin de ayudar a corregir los efectos de propagación de las ondas sísmicas, por la pérdida de energía y el retardo en tiempo que esta sufre; generando distorsiones, la no continuidad de reflectores, y evitando que en las siguientes fases de procesamiento se incurra en errores que lleven finalmente una falsa interpretación de la imagen sísmica generando perdidas de alto costo en la exploración petrolera.

## **PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

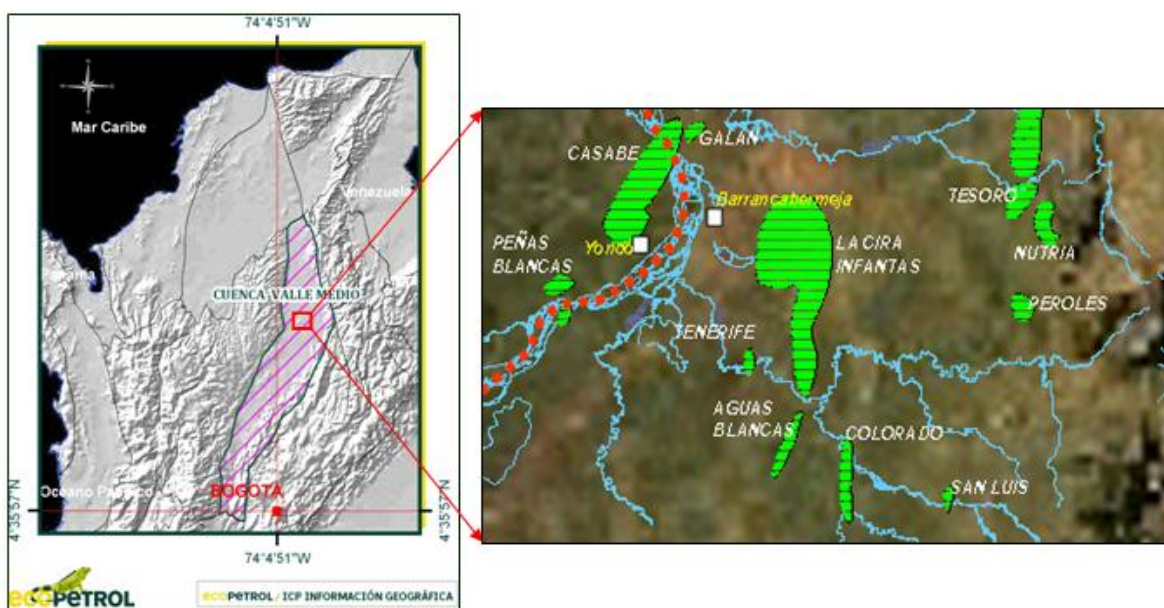
¿La integración de la información geofísica (ondas refractadas, registros en geófonos boca de pozo, pozos someros) con la información geológica (litología, geomorfología) para caracterizar el estrato somero del campo Tenerife, da soporte a un modelo matemático que se acople a la realidad? y ¿se puede aplicar en otros campos exploratorios?

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del Valle Medio del Magdalena está localizada en medio de las cordilleras Central y Oriental, está limitada geográficamente al norte por la Falla Bucaramanga-Santa Marta y al sur por la falla de Cambao.

Figura 1 Ubicación Geográfica De La Zona De Adquisición



El área de adquisición se encuentra en el campo Tenerife (Ver Figura 1) en el área limítrofe de los municipios de Simacota y Barrancaberme

### 1.2 GEOLOGÍA GENERAL

Geológicamente el área del programa sísmico se encuentra localizado en el Valle Medio del Magdalena, el desarrollo de la cuenca se inició durante el Triásico-Cretácico temprano con una mega secuencia sin-rift, relacionada directamente con

la separación entre norte y el sur de América, en el protocaribe (Montes, 2003; Taboada et al, 2000; Cooper et al, 1995; Dengo & Covey, 1993).

La Historia geológica del Valle Medio del Magdalena, data de principios del Jurásico (203 m.a<sup>1</sup>), cuando inicia un proceso de formación de cuencas. Este proceso se inicia en una franja estrecha dando lugar a sedimentitas jurásicas, que por esfuerzos distensivos empieza a hundirse en bloques escalonados, provocado por un fallamiento normal, formándose de esta manera el graben primario. (Royero y Clavijo, 2001).

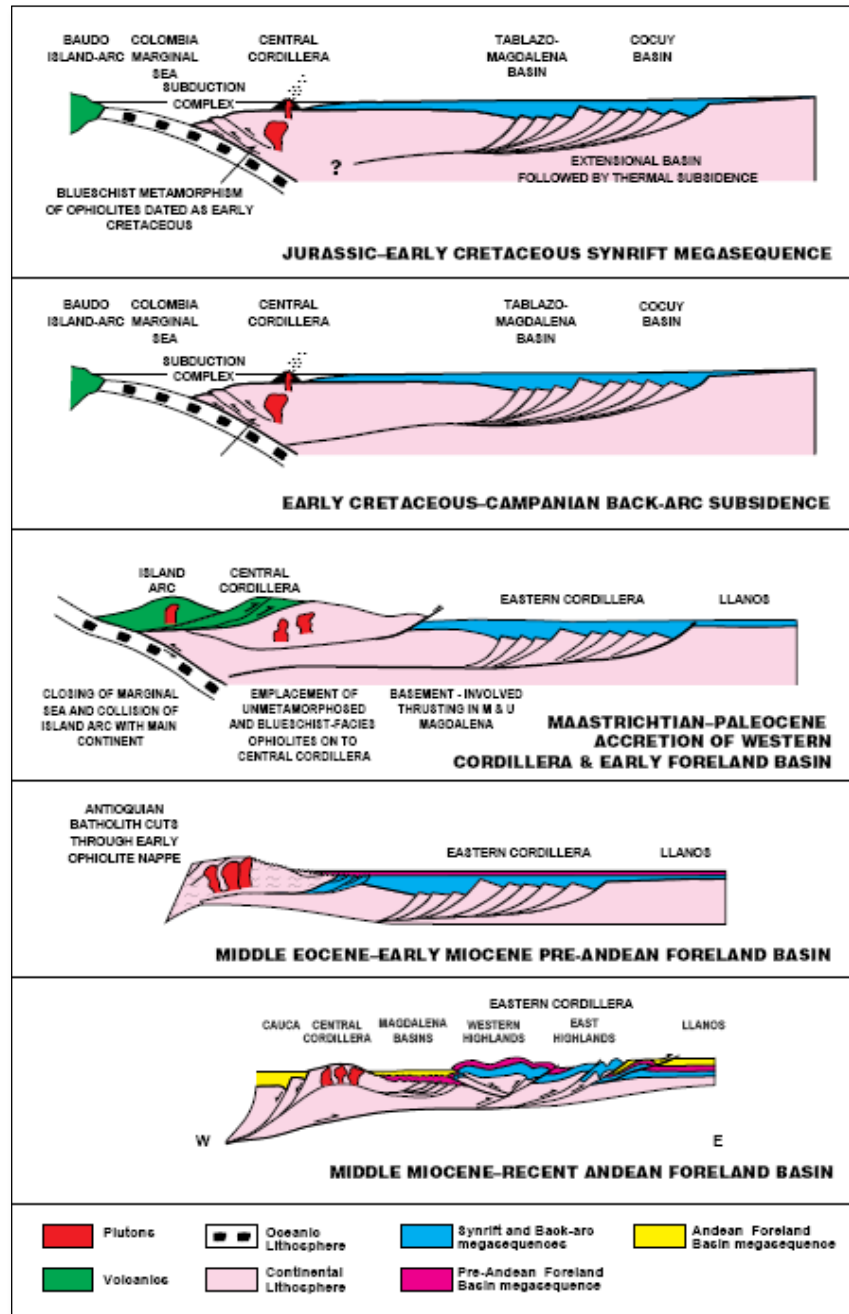
En el Cretácico temprano (135 m.a.) la sedimentación continental da paso de manera gradual a la transgresión marina, que inicialmente inunda las entradas de las ramificaciones del Paleorift del Magdalena y luego invade áreas mayores (Etayo, et al., 1989), depositándose una espesa secuencia de areniscas, lutitas y calizas de las formaciones cretácicas del Valle Medio del Magdalena.

En el Cretácico tardío y comienzos del Terciario (65 m.a.) se produce el retiro del mar, acompañado de un levantamiento diferencial. En este tiempo se produce una larga etapa distensiva y se produce una inversión de esfuerzos, que desde el paleoceno da inicios a una etapa comprensiva. En el paleoceno medio ocurre un levantamiento del Macizo de Santander y Cordillera Central donde ocurren grandes procesos erosionales que aporta el material que forma las diversas y potentes unidades terciarias (Cooper et. Al., 1994). Durante el Mioceno medio (14 m.a.), se inicia el levantamiento generalizado de la Cordillera Oriental y Central dando forma al actual Valle del Magdalena (Clavijo et. al., 2008).

---

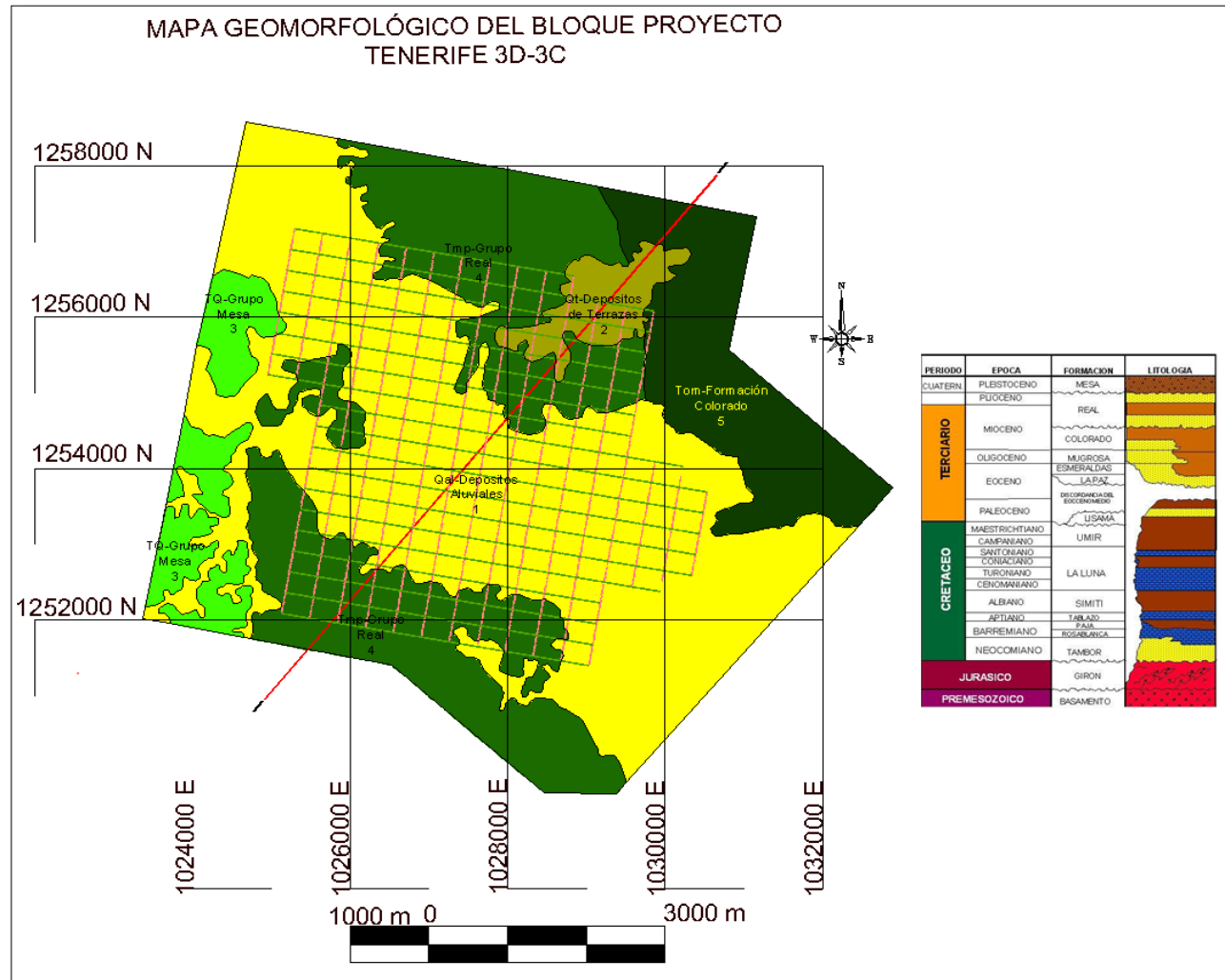
<sup>1</sup>m.a.: Millones de años

Figura 2 Modelo evolutivo regional de la Cordillera Oriental y las cuencas del Valle Medio del Magdalena



Fuente: Tomado de Cooper, M.A et al 1995

Figura 3 Mapa Geológico proyecto Tenerife 3D-3C.



Fuente: Tomado ICP- Ecopetrol.

Hacia el Mioceno superior Fabre (1986) menciona una fase de volcanismo en la cordillera oriental representado por la presencia de andesitas, pórfidos dacíticos y riolíticos, ingimbritas riolíticas y por numerosas fuentes termales ubicadas hacia el departamento de Boyacá y hacia la Sierra Nevada del Cocuy. La última fase comprensiva de la Cordillera Oriental se produce desde el Mioceno tardío (7.3 m.a.) hasta el presente generada por el desplazamiento de la placa Suramericana hacia el occidente (Cooper et. Al., 1994). Ver Figura 2.

La siguiente información fue tomada de la base de datos del Instituto Colombiano del Petróleo Ecopetrol S.A.

### **1.3 ESTRATIGRAFÍA**

**1.3.1 Grupo Real (Tmp)**- Fue descrita por Wheeler (en DE PORTA, et al., 1974) y su sección tipo se ubica en el sitio Bandera Real, cerca del río Opón, al oeste de la Quebrada Real. Esta unidad se encuentra presente en dos partes dentro del área de estudio, una se localiza en la parte norte y la otra en el sur; litológicamente está constituida por conglomerados polimícticos, areniscas conglomeráticas y arcillolitas; arcillolitas grises y gris rojizas con areniscas. Esta unidad descansa inconformemente sobre la Formación Colorado e infrayace también discordantemente del Grupo Mesa (Royero y Clavijo 2001). Este grupo tiene una edad del Mioceno, el ambiente de depósito de estos sedimentos es interpretado como fluvial. Su espesor total es de 3.600 m (Royero y Clavijo 2001).

#### **1.3.2 Depósitos Cuaternarios**

##### **Depósitos de Terrazas (QT)**

Son terrazas colgadas ubicadas en la parte media de la zona de ladera del área Tenerife, dentro de la finca El Danubio en la vereda Tenerife del municipio de

Barrancabermeja. Están constituidas por materiales finos, arenas y limos, con contenido de gravas, guijos y guijarros formando amplias altiplanicies que actualmente presentan un uso de cultivos de palma africana.

### **Depósitos Aluviales**

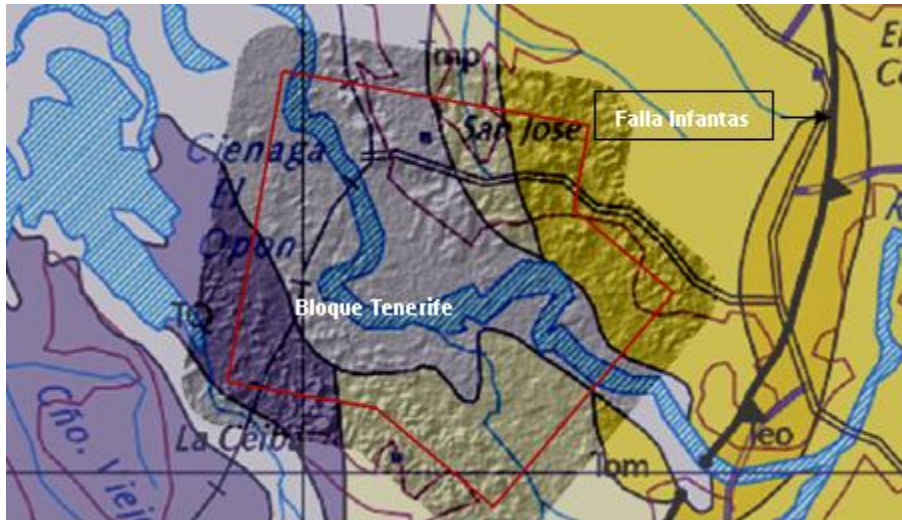
Los depósitos aluviales están conformados por materiales no consolidados de aluvión asociados principalmente al río La Colorada. Esta unidad es la que ocupa la mayor área dentro del bloque.

Estos depósitos están conformados por conglomerados de bloques bien redondeados con escasa matriz. En la parte occidental del bloque, aguas abajo del río la Colorada estos depósitos se componen de arenas finas grises, sueltas, bien seleccionada y sin presencia de material grueso. (Ver Figura 3 mapa geológico)

### **1.4 TECTONICA**

No hay evidencias de rasgos estructurales que indiquen una actividad dinámica en la zona de estudio según Royero y Clavijo, 2001, en dirección oriente de la zona de estudio pasa la falla denominada infantas de tipo inverso con convergencia hacia el oriente indicando un evento compresivo durante le Cenozoico, (Ver Figura 4) igualmente algunas capas arcillolíticas del Grupo Real se encuentra inclinadas a totalmente verticales indicando una dinámica reciente de la corteza terrestre en este sector. Tomado Plan de manejo ambiental para el programa sísmico Tenerife 3D-3C.

Figura 4 Mapa Tectónico para el bloque Tenerife.



Fuente: Herreno G. Kairuz F. 2009. Adaptado del mapa Geológico de Santander (Royero y Clavijo; 2001).

La siguiente información fue tomada de la base de datos del Instituto Colombiano del Petróleo Ecopetrol S.A. para ampliar la información con más detalle dirigirse a, Herreno (2009).

## 1.5 GEOMORFOLOGÍA

Según González et al, 1988; y Royero, et al 2001, la depresión o valle interandino del Magdalena se formó desde el Mesozoico, con el levantamiento de las cordilleras central y oriental a lo largo de las fallas inversas, dando lugar a intrusiones marinas durante todo el cretáceo que a finales de este y a comienzos del Terciario produce el retiro del mar, acompañado de un levantamiento diferencial. En este tiempo termina la larga etapa distensiva y se produce una inversión de esfuerzos, que desde el Paleoceno da inicio a la etapa compresiva que hace que se levante la cordillera oriental y se generen procesos erosivos dando lugar a la depositación de unidades terciarias de tipo continental en el valle del Magdalena.

Recientemente por la acción fluvial de los principales ríos del valle como el Magdalena y Suarez entre otros, se ocasiona la sedimentación de materiales clásticos finos y gruesos cubriendo toda la planicie del Valle Medio del Magdalena.

En el área del programa sísmico, en Tenerife se encuentran geoformas de tipo denudacional estructural, deposicional y de tipo fluvio- aluvial que se presentan o relacionan a continuación. Ver Figura 5.

**1.5.1 Geoformas de tipo Denudacional-Estructural.** Corresponde a aquellas geoformas asociadas o genéticamente vinculadas al Grupo Real, donde se encuentran geoformas colinadas y de altiplanicie, estas unidades se encuentran tanto en la parte norte como sur del bloque Tenerife.

#### **Altiplanicie (A)**

Son geoformas planas a ligeramente onduladas que se encuentran en el extremo norte del bloque. Parece ser una superficie de aplanamiento ó peneplanicie, cuyos procesos morfodinámicos son leves.

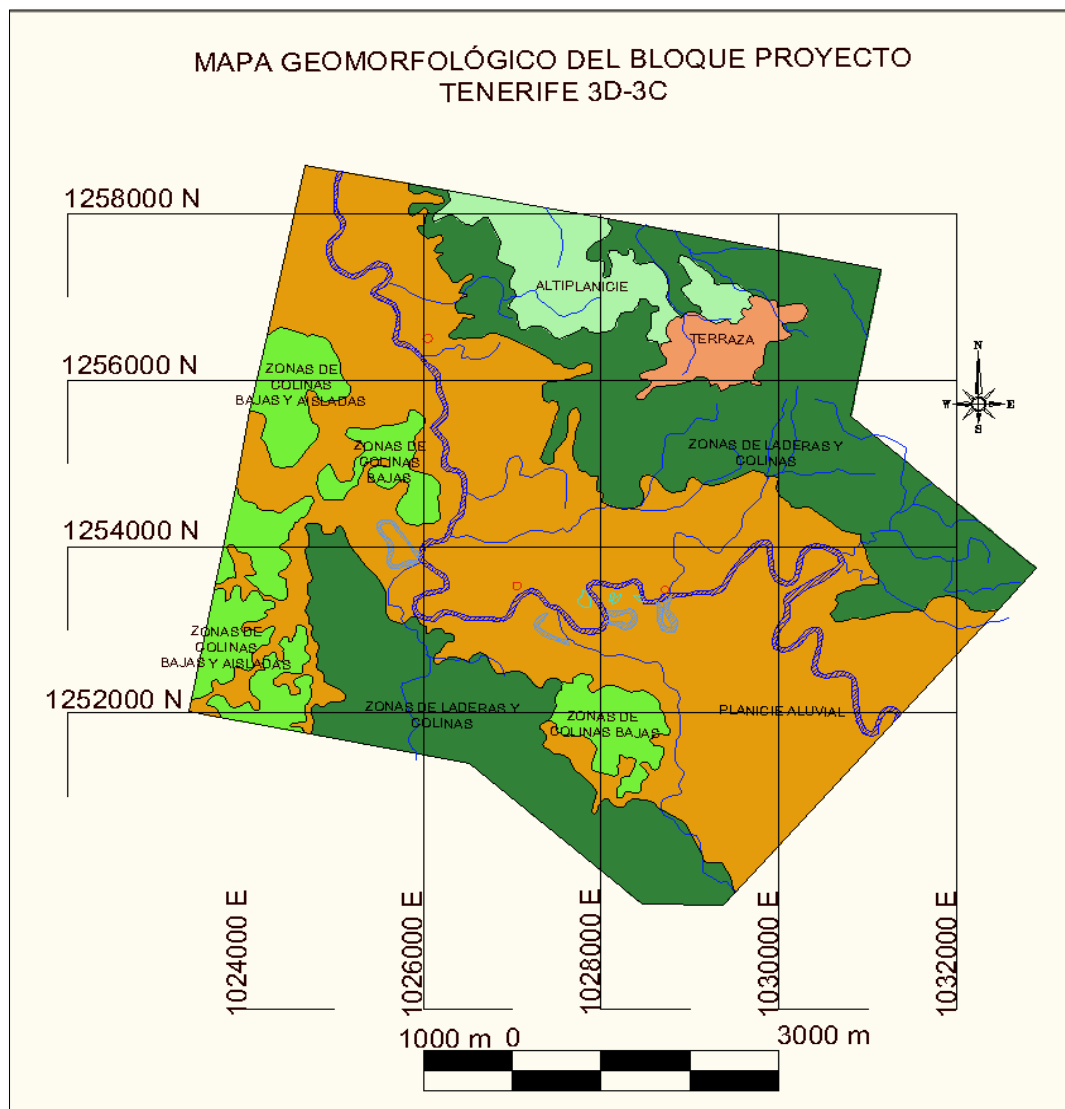
#### **Zonas de laderas y Colinas (ZLC)**

Corresponde al relieve colinado y las laderas que se encuentran al borde de la altiplanicie y de la terraza en la parte norte del área del polígono del programa sísmico Tenerife y el sector colinado de la parte sur del bloque, esta unidad se encuentra limitada por la Planicie Aluvial.

Geológicamente están vinculadas a la formación Colorado, Grupo Real y a Depósitos de Terraza, su morfometría cerca de la altiplanicie está constituida por pendientes más pronunciadas y los valles son en forma de “V” muy estrechos, mientras que la parte más distal las pendientes son más suaves y los valles son

más amplios. La forma de las pendientes son entre convexas a planas, con longitudes que varían entre 60 a 100 metros y la inclinación está entre 20° y 45° aproximadamente, ligeramente disectadas. En la parte norte las Colinas presentan formas redondeadas y alargadas, mientras que en la parte sur las colinas tienen un relieve más suave.

Figura 5 Mapa Geomorfológico Proyecto Tenerife 3D-3C.



Fuente: Tomado del Plan de Manejo Ambiental del Programa Sísmico Tenerife.

## **Zonas de Colinas Bajas y Aisladas (ZCBA)**

Esta unidad geomorfológica corresponde a pequeñas colinas que son remanentes de antiguas terrazas erosionadas, presentan una altitud menor de 30 metros y se encuentran de forma aislada. Se ubican en la parte occidental y sur del bloque. Las pendientes tienen una longitud aproximada de 30 metros, con forma cóncava y 30° de inclinación.

**1.5.2 Geoformas De Tipo Depositional.** Estas unidades como su nombre lo indica están asociadas a las geoformas relacionadas a depósitos tanto aluvial como coluvial, presentes en el área Tenerife, la principal fuente aportante es el río La Colorada que fue el que relleno toda la planicie aluvial.

## **Terrazas (T)**

Esta unidad se encuentra al norte del área Tenerife en la parte media de la zona colinada dentro de la Vereda Tenerife (B/bermeja). Se caracteriza por estar ligeramente inclinada hacia el suroeste con pendientes menores al 7%.

## **Planicie aluvial (PA)**

Esta planicie se encuentra asociada con el río La Colorada. Ocupa casi toda la parte baja del área del programa sísmico, se caracteriza por presentar un relieve plano a casi plano y presenta una amplitud general de 2 kms. Los procesos morfodinámicos están restringidos a erosión laminar y en menor proporción en surcos dado la topografía plana, sin embargo está siendo fuertemente afectada por la dinámica hidráulica o divagación del río La Colorada, donde se presenta socavación lateral del río especialmente hacia la margen derecha de este.

**1.5.3 Geoformas De Tipo Fluvial.** Dentro de esta categoría geomorfológica se encuentran todas las geoformas relacionadas con la acción fluvial del río La Colorada, que en consecuencia deja geoformas típicas como meandros abandonados, diques y *basin*. Estas geoformas presenta un paisaje de edad sub-actual a actual, susceptibles de inundaciones periódicas u ocasionales en el que se destacan varias generaciones de orillares o diques, meandros abandonados con agua.

### **Meandros Abandonados (Ma)**

Los meandros son una serie de curvas o vueltas en el curso de una corriente madura, producida cuando esta gira de un lado a otro en su recorrido a través de su llanura. (*American Geological Institute*, 1984, en IGAC, 2005).

Los meandros abandonados se originan por el aumento en la sinuosidad del río hasta que el cuello de este se rompe en donde los mismos sedimentos del río se encargan de taponar los extremos de las curvas abandonadas, aislándolas del nuevo curso. Ver Figura 6.

Figura 6 Cierre y abandono meandrónico del río La Colorada.



Fuente Herreno y Kairuz (2009)

## **Diques (D)**

Son geoformas originadas por el aumento de la sinuosidad del río, dejando pequeñas barras o diques en la parte interna del meandro, estas geoformas se encuentran en las antiguas orillas del río, están también presentes en la parte media del bloque.

## **Basin (B)**

Los *Basin* son pequeñas concavidades en forma alargada paralelo a los antiguos diques que se encuentran al interior al lado del dique. Ver Figura 7.

Figura 7 Geoformas de Tipo Fluvial presentes en el valle del río La Colorada. MA Meandros Abandonados; D Diques; B Basin.



Fuente: Grupo Consultor S.A. 2009.

## 2. SÍSMICA DE REFRACCIÓN

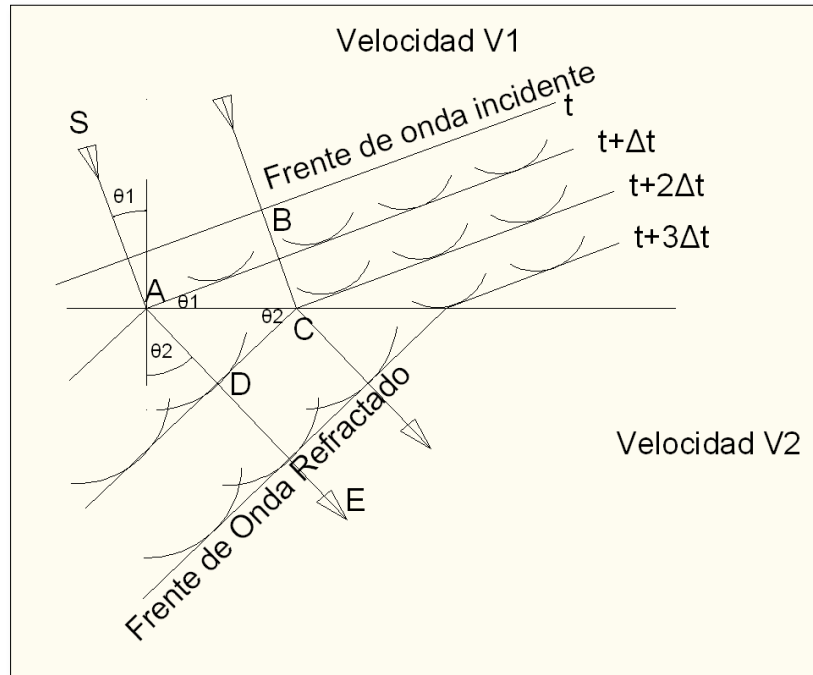
En un medio homogéneo, “todo punto en un frente de onda puede ser considerado como la fuente de una onda secundaria y que un frente de onda posterior es la envoltura tangente a todas las ondas secundarias” (Tomado de Geldart, Loyd P. and Sheriff, Robert E. Exploración Sismológica Volumen II, Procesamiento e interpretación de datos). Así cuando una onda incidente golpea una interfase separando dos medios, cada punto de incidencia sirve como la fuente de una onda reflejada en el mismo medio y a partir del ángulo de incidencia crítico como la fuente de una onda refractada en el segundo medio. La velocidad del medio determina la velocidad en la cual las ondas viajan y por lo tanto la distancia entre frentes de onda sucesivos.

En la (Figura 8). Muestra el frente de onda incidente golpeando una interfase horizontal entre dos medios. La construcción de varios frentes de onda entre la capa superior es mostrada, iniciando para un tiempo  $t$  con un incremento de  $\Delta t$ . La distancia entre estos frentes de onda es  $V_1 \Delta t$ , donde  $V_1$  es la velocidad en el medio superior y  $V_2$  la velocidad del medio inferior dos veces mayor que la velocidad del medio superior para este caso.

Los eventos sísmicos de refracción son observados en la propagación de un pulso elástico en el interior de la tierra. La refracción puede ser definida en términos del cambio de dirección de un rayo sísmico o frente de onda cuando cruza una interfase entre capas de diferentes velocidades en concordancia con el principio de la ley de *Snell's*. Ecuación 1.

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

Figura 8 Refracción de ondas planas a través de una interfase horizontal ( $V_2=2V_1$ ). Variables:  $\theta_1$  ángulo de incidente;  $\theta_2$  Ángulo refractado,  $\Delta t$  es la separación del frente de onda.



Fuente: Tomado de Cox M. (1999).

Donde  $\theta_1$  es el ángulo de incidencia,  $\theta_2$  es el ángulo de refracción,  $V_1$  es la velocidad en el medio superior y  $V_2$  es la velocidad del refractor (medio inferior).

Cuando el frente de onda refractado es perpendicular a la interfase,  $\theta_2=90^\circ$ , el rayo refractado en efecto viaja a lo largo de la interfase entre los dos medios. El correspondiente ángulo incidente  $\theta_1$  es llamado el ángulo crítico ( $\theta_c$ ) y es definido como

$$\text{sen}\theta_c = \frac{V_1}{V_2} \quad (2)$$

Para que la (Ecuación 2) sea válida, la velocidad en el medio con velocidad  $V_2$  debe ser mayor que la del medio con velocidad  $V_1$ . Ver Figura 8.

## 2.1 MODELO ANALÍTICO DE REFRACCIÓN UTILIZADO.

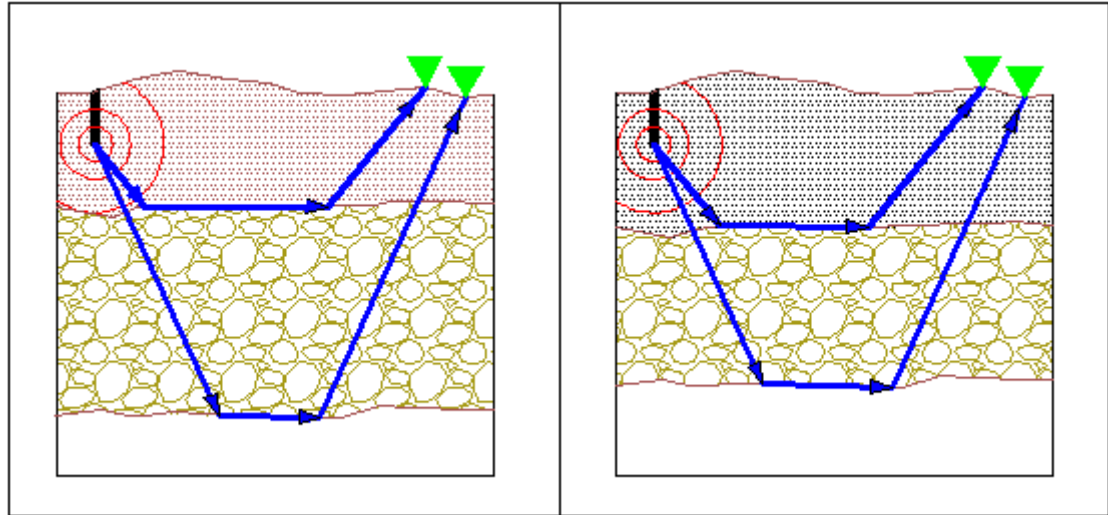
El método con el que nos basamos para definir las características físicas del estrato somero consiste en:

- Los métodos para el análisis de refracción suponen un modelo litológico con variación lateral y vertical y de propagación de la onda con variación lateral.
- Los tiempos de los primeros arribos dependen de la geometría y velocidades de cada capa.

Finalmente el modelo que obtenemos depende de los tiempos obtenidos en campo.

Un método alternativo es construirlo de forma iterativa para generar el modelo más real posible con la información de los primeros arribos. El concepto básico es simple y puede ser comprendido a partir de las Figuras 9 y 10. Suponemos que el estrato somero consiste de dos capas de baja velocidad ubicadas sobre algún material de alta velocidad, como está representado en el sector izquierdo de la Figura 9. Este modelo generara un conjunto de primeros arribos que serían registrados y graficados como “primeros arribos hipotéticos”, mediante un trazado de rayos. Sin conocer la configuración real. Generalmente, la aproximación del modelo tendrá un error y habrá una discrepancia entre los primeros arribos hipotéticos y observados, estos datos muestran discrepancia, que es el resultado de restarle los tiempos de los primeros arribos del modelo a los tiempos de los primeros arribos observados. Ver Figura 10. Mediante un análisis de este error, es posible estimar correcciones para nuestro modelo original que mejorarán la correspondencia entre los tiempos de los primeros arribos observados y del modelo, idealmente produciendo un error cercano a cero.

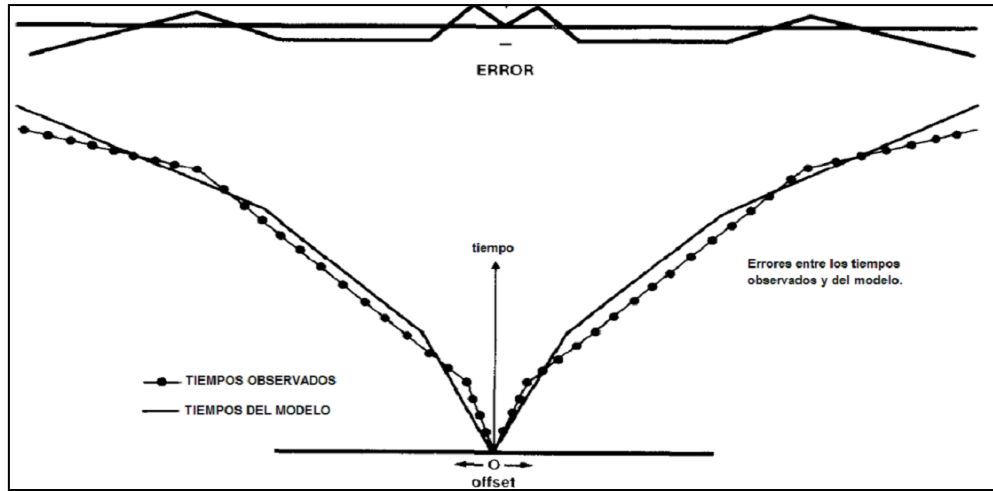
Figura 9 Trazado de rayos a través del modelo de la Capa Somera. Izquierda modelo Hipotético. Derecha Modelo a partir de los primeros arribos obtenidos en campo



El subsuelo somero está compuesto por un número de capas de baja velocidad ubicadas por encima de un medio con velocidad mayor. El espesor de cada capa puede variar como una función de la posición en superficie. La velocidad de cada capa puede variar lateralmente, pero no verticalmente. La velocidad de la primera capa se supone que ha sido estimada por otro método (como tiempos de geófono boca de pozo). Esto es porque la primera capa suele ser tan delgada que con las geometrías típicas del disparo no hay información suficiente para determinar tanto su profundidad como su velocidad.

**2.1.1 Teoría De La Inversión Lineal.** La técnica descrita en la sección anterior es la de Inversión Lineal Generalizada. Esta es una técnica matemática muy poderosa cuyo campo de aplicación en problemas geofísicos ha sido descrito en numerosos trabajos (e.g., Lines and Treitel, 1984). En la teoría del método de inversión lineal generalizada (Backus and Gilbert, 1967), se elige un conjunto de parámetros representados por el vector  $M$ , donde:

Figura 1 Errores entre los tiempos observados y del modelo.



Fuente: Tomado Hampson y Russell (1984).

$$M = (m_1, m_2, \dots, m_k)^T \quad (3)$$

Se supone que estos parámetros del modelo generan un conjunto de observaciones Representadas por el vector:  $T$  en donde:

$$T = (t_1, t_2, \dots, t_k)^T \quad (4)$$

A través de algunas relaciones funcionales no lineales,  $A$ :

$$t_i = A_i(m_1, m_2, \dots, m_k), i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

En este problema particular, el vector  $M$  es el conjunto de todos los espesores y velocidades desconocidos en el modelo del subsuelo somero, el vector  $T$  es el conjunto de todos los tiempos correspondientes a los primeros arribos observados, y la relación  $A$  es el algoritmo para el trazado de rayos incorporando la ley de Snell. Empezando desde algún modelo inicial,  $M^0$ , se calcula un conjunto de tiempos de arribo y se los compara con los tiempos medidos. Como hemos visto,

las Figura 9 y 10 muestran tal comparación, junto con el error residual entre los tiempos de arribo observados y calculados. El método de inversión lineal generalizada se reduce al análisis de este vector de error residual para determinar un conjunto de correcciones para el modelo.

Si representamos al vector de error mediante  $\Delta T$  y a los cambios en el modelo requeridos mediante  $\Delta M$ , luego  $\Delta M$  es determinado a partir del conjunto de ecuaciones lineales:

$$\Delta T = B \Delta M \quad (6)$$

Donde:  $\Delta T = A(M^{j+i}) - A(M^j)$

$$B_{ij} = \delta t_i / \delta m_j \quad (7)$$

$$\Delta M = M^{j+1} - M^j \quad (8)$$

J=iteracion numero j

Notar que en esta ecuación se supone que se conoce la matriz B, cuyos elementos contienen a las derivadas  $\delta t_i / \delta m_j$ . Cada elemento  $b_{ij}$  mide la sensibilidad del tiempo i calculado para el primer arribo,  $t_i$ , ante cambios en el parámetro j del modelo,  $m_j$ . De hecho, esos elementos son funciones del propio modelo y deben ser re-calculados en cada iteración. El cálculo se hace analíticamente, suponiendo que las velocidades y profundidades del modelo varían lo suficientemente lento como para que éste pueda ser considerado localmente lineal.

Como resultado de un registro sísmico multi-fold, el sistema lineal (6) suele ser sobredeterminado, es decir que el número de tiempos correspondientes a primeros arribos excede el número de parámetros desconocidos del modelo. Esto permite alguna compensación para los errores que surgen del picado de los

tiempos correspondientes a los primeros arribos. La solución es el ajuste por mínimos cuadrados:

$$M = (B^T B)^{-1} B^T T \quad (9)$$

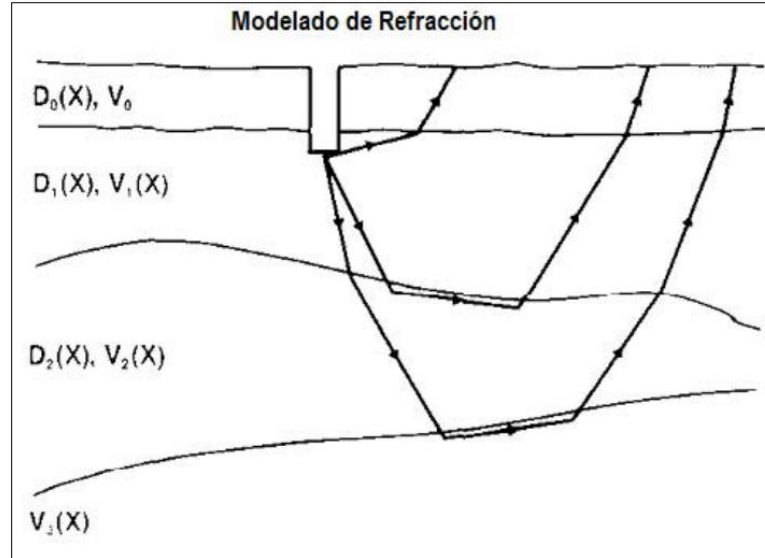
que compensará aquellos errores cuya distribución de probabilidad sea una función Gaussiana al azar con media cero. Desafortunadamente, los errores de picado suelen ser eventos grandes. Se debe implementar un algoritmo que detecte desviaciones en el error inusualmente grandes luego de varias iteraciones de la secuencia de inversión.

En la práctica, la inversión de la gran matriz  $B^T B$  no es ni práctica ni necesaria, ya que cada aplicación de la ecuación (9) es un paso dentro de una serie de iteraciones, y no se requiere la solución exacta de  $M$  en cada paso. Es por esta razón que la solución (9) puede ser reemplazada por una aproximación iterativa adecuada.

La (Figura 11) se ilustra el procedimiento general. El usuario introduce una aproximación inicial para la configuración del subsuelo próximo a la superficie, indicándole al programa cuantas capas se esperan tener junto con sus velocidades y espesores aproximados. Generalmente, este es un modelo de capas planas, a pesar de que pueden requerirse modelos más complicados para situaciones con variaciones rápidas. El programa realiza una serie de iteraciones en las cuales se calculan los tiempos correspondientes a los primeros arribos, mediante trazado de rayos, y se los compara con los tiempos medidos; luego se modifica el modelo y se calcula un nuevo conjunto de tiempos. Este procedimiento se repite hasta alcanzar una correspondencia aceptable entre los tiempos observados y los del modelo.

A pesar de que tanto las velocidades como las profundidades pueden variar con cada estación, el algoritmo puede hacerse más robusto forzando un modelo de solución cuya variación sea más lenta. Esto aumenta el número de tiempos de primeros arribos utilizados para actualizar cualquier parámetro del modelo y disminuye el efecto de errores de picado aleatorio. Se espera que las velocidades de las capas varíen lentamente, cosa que no debería suceder para el caso de los espesores. De hecho, sus variaciones de alta frecuencia son precisamente la causa de las estáticas de corta longitud de onda mencionadas anteriormente. Forzar que un modelo sea suave significa que sólo las componentes de mayores longitudes de onda serán consideradas en la técnica del modelado iterativo. Las componentes de corta longitud de onda pueden ser estimadas al final del proceso como retrasos temporales simples consistentes con la superficie en el error residual final (Tomado de Chun y Jacewitz, 1981).

Figura 11 Parametrización del Modelo utilizado para el análisis de refracción.



Fuente: Tomado Hampson y Russell (1984).

## **2.2 TOMOGRAFIA SÍSMICA**

Tomografía sísmica es un proceso iterativo de dos pasos, su producto es determinar los valores de velocidad sísmica a lo largo de la trayectoria de los rayos entre las fuentes y las receptoras de su cubrimiento. El primer paso consiste en discretizar los tiempos erróneos comparando los tiempos de viaje obtenidos por picado de primeros arribos, a través de un modelo de velocidades hipotético, el cual es construido por una grilla en donde cada celda tiene un valor de velocidad. Entre más pequeña sea la celda aumentara el consume del recurso maquina pero el nivel de precisión será mayor. Finalmente, de la proyección de un trazado de rayos a través del modelo de velocidades hipotético, el cual está sujeto a cambios, será comparado e iterativamente modificado, hasta lograr el mejor ajuste de los datos de primeros arribos.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO SÍSMICO

La aplicación del método sísmico cubre varias fases que se concatenan para optimizar los resultados. El proceso comienza con un grupo de geólogos y/o geofísicos que hacen un estudio del subsuelo y definen un área interna de la tierra donde se sugiere qué podría estar almacenado el hidrocarburo. Luego se determinan los parámetros de adquisición que iluminen la zona de interés creando un balance entre presupuestos, operación, calidad de la imagen y preservación del medio ambiente. Luego se procede a obtener permisos de los propietarios de los terrenos para poder tener acceso a la superficie en las etapas de adquisición. Simultáneamente se desarrollan estudios y planes de manejo tanto social como ambiental. Posteriormente se realiza el levantamiento topográfico del proyecto, para ubicar los puntos fuentes y receptores y finalmente el registro de la energía emitida por las fuentes. (Yajaira Herrera Norman Cooper et al., Tomado Manual para adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia. ANH 2010)

Para el caso del proyecto Tenerife se utilizaron explosivos como fuente de energía, para lo cual se realiza la perforación de pozos. Al comienzo de las actividades de registro, los obreros de campo (linieros) se encargan de regar las ristras en las estacas correspondientes. Cuando se tienen líneas suficientes en el tendido se comienza a registrar activando las fuentes. Durante el registro, la información procedente de los geófonos se almacena en discos duros. Estos datos son suministrados al procesador quien al final crea un volumen de datos para que el intérprete analice los resultados y determine si es viable una siguiente etapa de exploración (Yajaira Herrera Norman Cooper et al., Tomado Manual para adquisición y procesamiento de sísmica terrestre y su aplicación en Colombia. ANH 2010)

## **3.2 CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO TENERIFE**

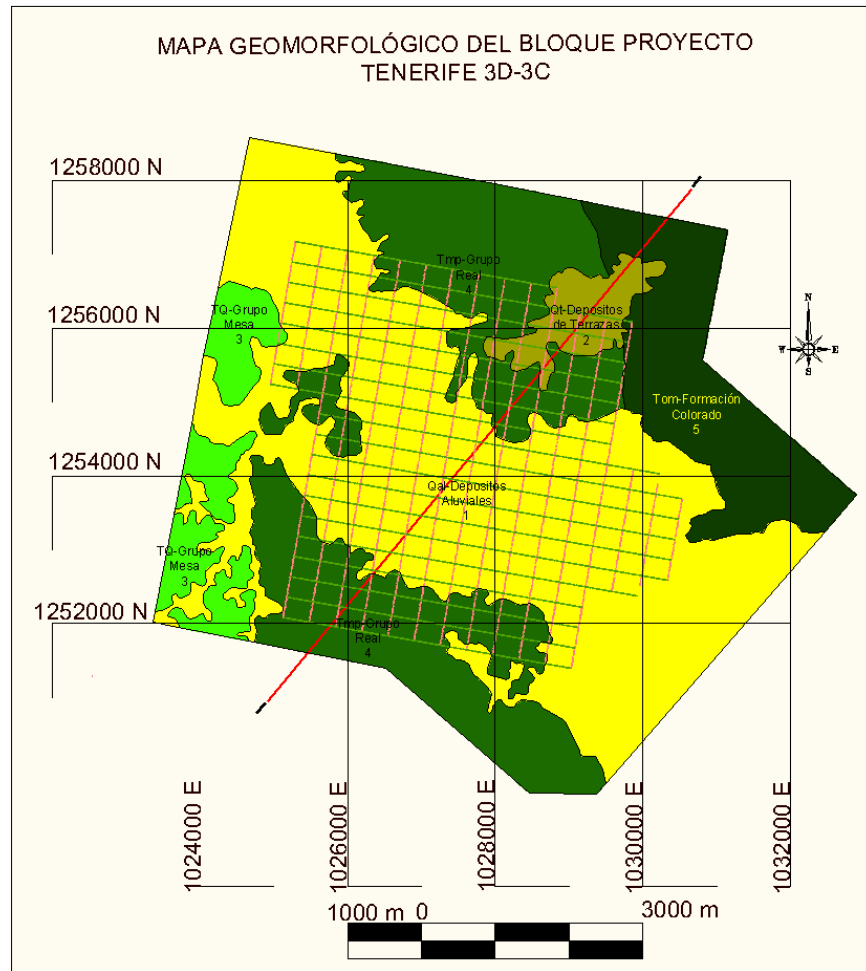
El proyecto Tenerife 2D-3C y 3D-3C fue realizado por el Instituto Colombiano del Petróleo en la cuenca del Valle Medio del Magdalena, constando de una adquisición sísmica 3D y multicomponente, utilizando acelerómetros como sensores sísmicos de la casa SERCEL referencia 428 XL.

**3.2.1 Adquisición Sísmica Del Proyecto Tenerife 2D-3C-** La primera etapa del proyecto Tenerife consistió en realizar la adquisición 2D-3C Línea Experimental, (Ver Figura 12), la cual cortó todas las litologías encontradas en superficie. Las fuentes utilizadas variaban a diferentes patrones de perforación, permitiendo identificar la mejor opción respecto a la calidad de los datos según el aspecto litológico. Posteriormente se aplicó el mejor parámetro al resto del proyecto, que consistió en la adquisición 3D-3C. Por medio de una salida de campo, los integrantes del grupo de investigación Petrosísmica (convenio UIS-ICP 005 de 2003), fueron los responsables del análisis de los rípios, su clasificación y determinación litológica. De esta forma se construyó el modelo del perfil litológico de las capas superficiales.

**3.2.2 Adquisición Sísmica Del Proyecto Tenerife 3D-3C.** La adquisición sísmica del proyecto Tenerife 3D-3C fue un diseño ortogonal, designado al área delimitada por 19 líneas receptoras paralelas y 17 líneas de disparo paralelas las cuales se disponen ortogonalmente entre ellas (Ver Figura 12), definiéndose así la dirección *cross line* que son en la dirección de las líneas fuentes y la dirección *in line* que es en dirección de las líneas receptoras, en la gráfica se representan de color verde las receptoras y rojo las fuentes.

### 3.3 FASE DE CAMPO

Figura 12 Línea experimental de color rojo y Proyecto Sísmico Tenerife 3D-3C de arreglo ortogonal con fuentes en rojo perpendiculares a las receptoras en verde.



Fuente: Tomado ICP-Ecopetrol Proyecto Tenerife 3D-3C

En la primera etapa con una permanencia en campo de 10 días. Acompañando a las cuadrillas de perforación se fue realizando el control litológico de algunos pozos de la línea experimental. El muestreo de los ripios de perforación se realizó con la ayuda de una pala manual, permitiendo de forma segura su análisis directamente en campo, finalmente se conservaron en balsas plásticas como testigos para análisis posteriores. Las muestras con alto contenido de agua no se

almacenaban ya que la muestra se contaminaba por los materiales de la perforación como *cydril*, químico utilizado en perforación, bentonita, espesante de lodos y por materiales de diferentes niveles del pozo.

### **3.4 FASE DE OFICINA**

**3.4.1 Recolección De Información.** La información utilizada para el desarrollo del presente trabajo es la correspondiente al programa sísmico TENERIFE 3D-3C consignada en los archivos de la base de datos del Instituto Colombiano del Petróleo ICP-ECOPETROL.

**3.4.2 Análisis De La Información Recopilada.** Se estudiaron los datos corroborando que no hubieran errores numéricos o de formato y que correspondieran con el proyecto TENERIFE 3D-3C, posteriormente se convirtieron los datos a formatos en los cuales se pudieran trabajar con los software Surfer, Autocad, Petrel.

**3.4.3 Parámetros Para La Determinación Geofísica Del Estrato.** Se analizó la información obtenida de los Tiempo de Geófono Boca de Pozo y calculando con los datos de profundidad de cada pozo sísmico se obtuvo un primer dato de velocidad de la capa somera. Posteriormente utilizando los datos de refracción de la onda P, los cuales se le realizó previamente un picado de primeros arribos, por el personal del ICP. Utilizando estos datos con el software 3D GLI se calculó un modelo de tres capas con sus respectivos valores de velocidad y espesor, un segundo modelo fue calculado por el mismo software aplicando el inverso mostrando un modelo diferente con variaciones verticales y laterales.

Se realizó la tomografía sísmica con el software 3DGLI a los datos de refracción de la onda P de todo el proyecto.

### **3.4.5 Datos Para La Determinación Geológica Del Estrato Somero**

- Parte de la información utilizada para determinar geológicamente la capa meteorizada, fue recopilada por la empresa “Grupo Consultor Ecopetrol S.A. 2009”.
- El análisis de ripios con recolección de muestras realizado en la perforación de los pozos sísmicos de la línea experimental por los estudiantes pertenecientes al grupo de investigación petrosísmica.
- Determinación litológica de los pozos, uno de 60 metros, descrito por la Geóloga Yudy Estévez y un segundo pozo de 55 metros de profundidad, por los controles de calidad de la compañía encargada de la adquisición sísmica.

Con la descripción de los ripios en campo de la línea experimental, pozos profundos y su correlación se obtiene el modelo de los primeros metros de la capa somera.

**3.4.6 Procesamiento.** Para este trabajo se procesó la información sísmica de refracción en el Instituto Colombiano del Petróleo (ICP) por medio del software *Hampson-Russell Software Services 3D GLI*. Obteniendo los datos de profundidad del modelo geofísico explicado analíticamente en el capítulo 2.

En la Universidad Industrial de Santander, Escuela de Geología, se interpretaron e integraron los datos antes mencionados.

### **3.5 FASE DE RESULTADOS**

Unificar toda la información en bases de datos y mapas temáticos que puedan dar respuesta a los modelos geofísicos antes mencionados, obteniendo como

resultado final, un modelo de la capa somera que muestre los valores de espesor y de velocidad, comprendiendo la respuesta sísmica en este medio de propagación.

## 4. DETERMINACIÓN GEOFÍSICA DEL ESTRATO SOMERO

### 4.1 MEDICIÓN DE LOS TIEMPOS DE POZO TIEMPO DE GEÓFONO BOCA DE POZO.

La medición de los Tiempos de Geófono Boca de Pozo, es el tiempo que tarda la onda desde la profundidad en donde queda la fuente en el pozo sísmico (Ver Figura 13) hasta la superficie, donde se encuentra un receptor llamado, “geófono boca de pozo”, este se localiza en superficie, a un radio de 80 cm del pozo. Con la medida del tiempo y la profundidad del pozo, se puede calcular la velocidad de transito de la onda en este medio, mostrando propiedades sísmicas de la trayectoria directa de la onda. Mostrando las velocidades para cada punto de disparo. Ver Figura 13.

Figura 13 Cálculo de los tiempos de Geófono Boca de Pozo

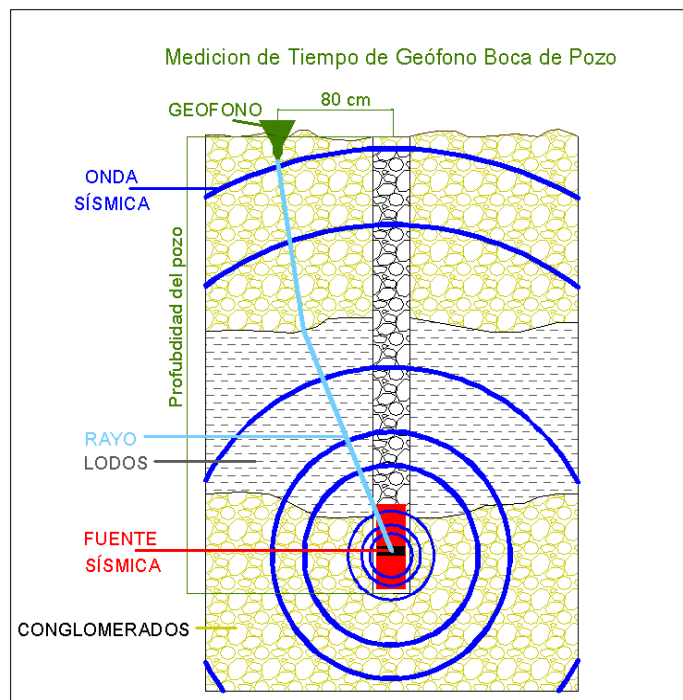
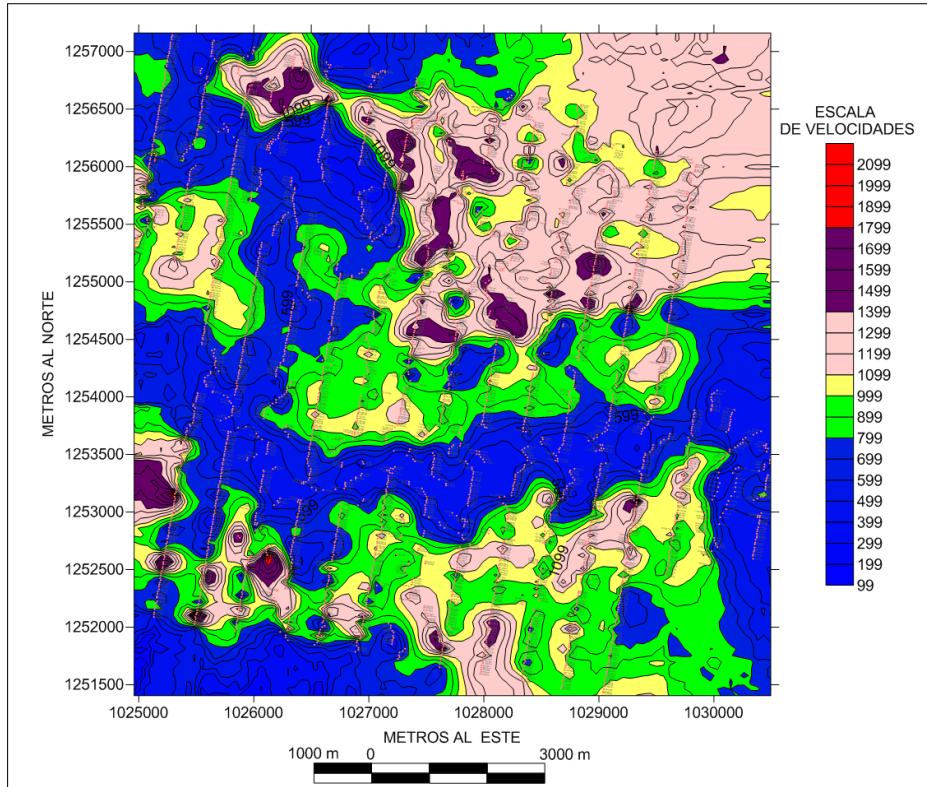


Figura 14 Mapa de Velocidades de tiempo de Geófono Boca de Pozo



En la (Figura 14) se muestra un mapa en colores mostrando la variación de velocidad según los datos de Tiempos de Geófono Boca de Pozo.

Tabla 1 Estadística de Valores de velocidad de Tiempos de Geófono Boca de Pozo en metros por segundo por cada zona Geológica.

	<b>Depósitos Aluviales [m/s]</b>	<b>Depósitos de Terrazas [m/s]</b>	<b>Grupo Real [m/s]</b>
<b>Media</b>	<b>786.1212833</b>	<b>1030.492796</b>	<b>1031.37262</b>
<b>Error típico</b>	<b>6.847369263</b>	<b>11.61502654</b>	<b>11.5929935</b>
<b>Mediana</b>	<b>772.73</b>	<b>1062.5</b>	<b>1062.5</b>
<b>Moda</b>	<b>944.44</b>	<b>1181.82</b>	<b>1181.82</b>
<b>Desviación</b>	<b>319.2666232</b>	<b>371.4993203</b>	<b>370.613334</b>

	<b>Depósitos Aluviales [m/s]</b>	<b>Depósitos de Terrazas [m/s]</b>	<b>Grupo Real [m/s]</b>
<b>estándar</b>			
<b>Coeficiente de asimetría</b>	<b>0.825915418</b>	<b>0.095901449</b>	<b>0.10356518</b>
<b>Rango</b>	<b>2236.54</b>	<b>2035.36</b>	<b>2020.84</b>
<b>Mayor (1)</b>	<b>2400</b>	<b>2166.67</b>	<b>2166.67</b>
<b>Menor(1)</b>	<b>163.46</b>	<b>131.31</b>	<b>145.83</b>

La Estadística realizadas de valores de velocidad entre Depósitos Aluviales, Terciarios (Grupo real) y Depósitos de Terrazas en este documento nos dan ideas de la variación del medio en estas profundidades. La distancia recorrida de la onda en la zona de depósitos aluviales por cada pozo es de 8.5 metros y la distancia recorrida en los pozos perforados en zona de terciarios es de 13 metros, los resultados muestran que la velocidad media en Depósitos Aluviales es menor que la del Grupo Real y los depósitos Terciarios, (ver Tabla 1). Es de tener en cuenta que el espacio recorrido de la onda en cada pozo, en zona de Depósitos Aluviales es menor que en los depósitos Terciarios. Al hacer el análisis de los valores de velocidad metro a metro el resultado es opuesto En depósitos Terciarios es menor que en Depósitos Aluviales. Lo cual indica un gradiente vertical de velocidad, mayor, en los Depósitos Aluviales. (Ver Tabla 2).

Tabla 2 Valores de Velocidad en metros por segundo, por cada metro de profundidad.

<b>profundidad [m]</b>	<b>Depósitos Aluviales [m/s]</b>	<b>Grupo Real [m/s]</b>
<b>1</b>	<b>184.9411765</b>	<b>158.6153846</b>
<b>2</b>	<b>369.8823529</b>	<b>317.2307692</b>
<b>3</b>	<b>554.8235294</b>	<b>475.8461538</b>

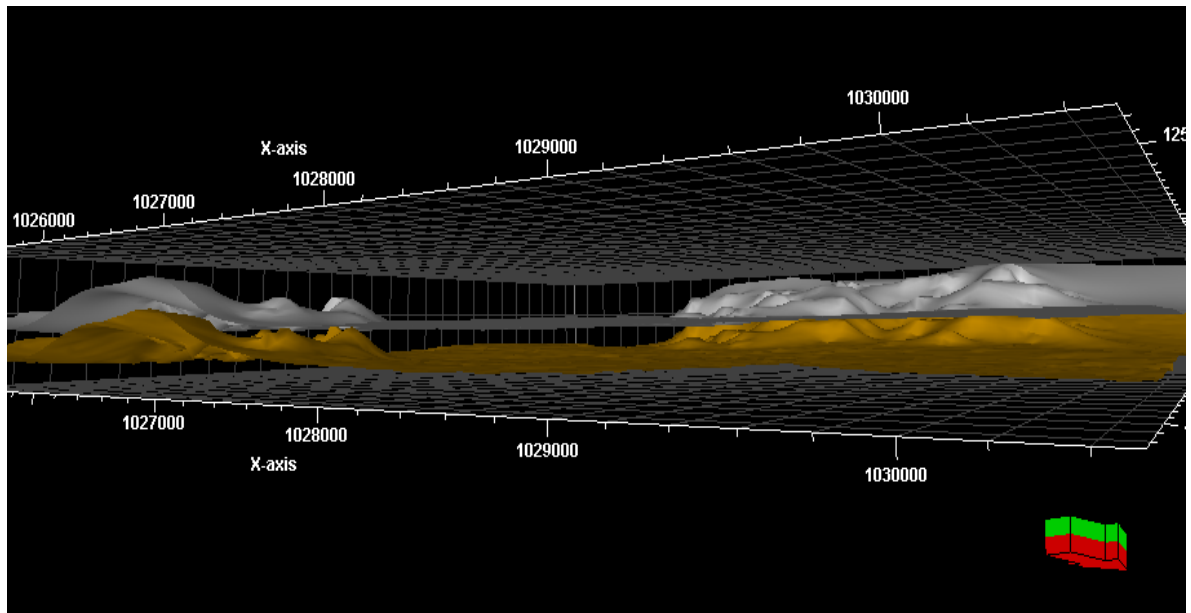
<b>profundidad [m]</b>	<b>Depósitos Aluviales [m/s]</b>	<b>Grupo Real [m/s]</b>
<b>4</b>	<b>739.7647059</b>	<b>634.4615385</b>
<b>5</b>	<b>924.7058824</b>	<b>793.0769231</b>
<b>6</b>	<b>1109.647059</b>	<b>951.6923077</b>
<b>7</b>	<b>1294.588235</b>	<b>1110.307692</b>
<b>8</b>	<b>1479.529412</b>	<b>1268.923077</b>
<b>8.5</b>	<b>1572</b>	<b>1348.230769</b>
<b>10</b>		<b>1586.153846</b>
<b>11</b>		<b>1744.769231</b>
<b>12</b>		<b>1903.384615</b>
<b>13</b>		<b>2062</b>

Estos datos de Tiempo de Geófono Boca de Pozo son muy importantes en los algoritmos utilizados en la construcción de los modelos geofísicos que se describen a continuación.

#### **4.2 MODELO DE ESTRATO SOMERO A PARTIR DE REFRACCIONES**

En base a lo explicado en el capítulo 2 el resultado fue obtener la profundidad de la capa meteorizada, esto se debe al contraste de impedancia acústica entre la capa de baja velocidad y la capa de alta velocidad. La onda viaja por el tope de la capa suprayacente según la teoría de la ley de *Snell*. (Ver Figura 15).

Figura 15 Topografía gris y base de la capa refractante amarillo. El espacio entre las dos capas es el volumen que corresponde a la capa de baja velocidad



#### 4.3 TOMOGRAFÍA DE DATOS SÍSMICOS DE ONDA P PARA EL 3D.

Aplicando el algoritmo de tomografía por medio del software 3D GLI de *Hampson y Russell* se genera el modelo de velocidades. La componente vertical de la figura está correspondiente a la variable tiempo. (Ver Figura 16). Los valores de velocidad en la zona de color rosado son cero, quiere decir que está por encima de la topografía, y los valores de velocidad van aumentando con la profundidad. (Ver Figura 17)

Figura 16 Tomografía Sísmica. Software 3DGLI.

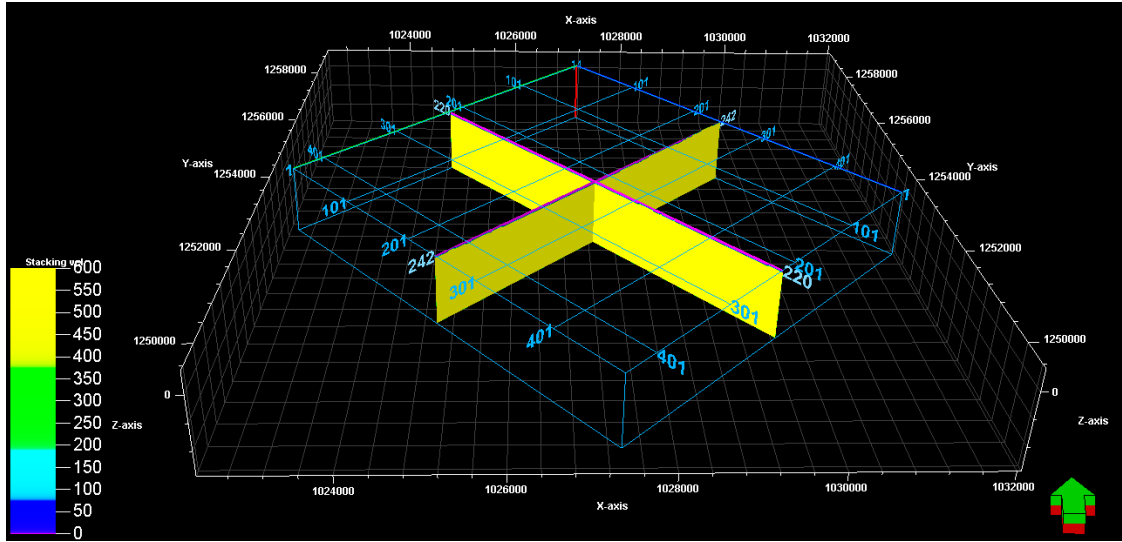
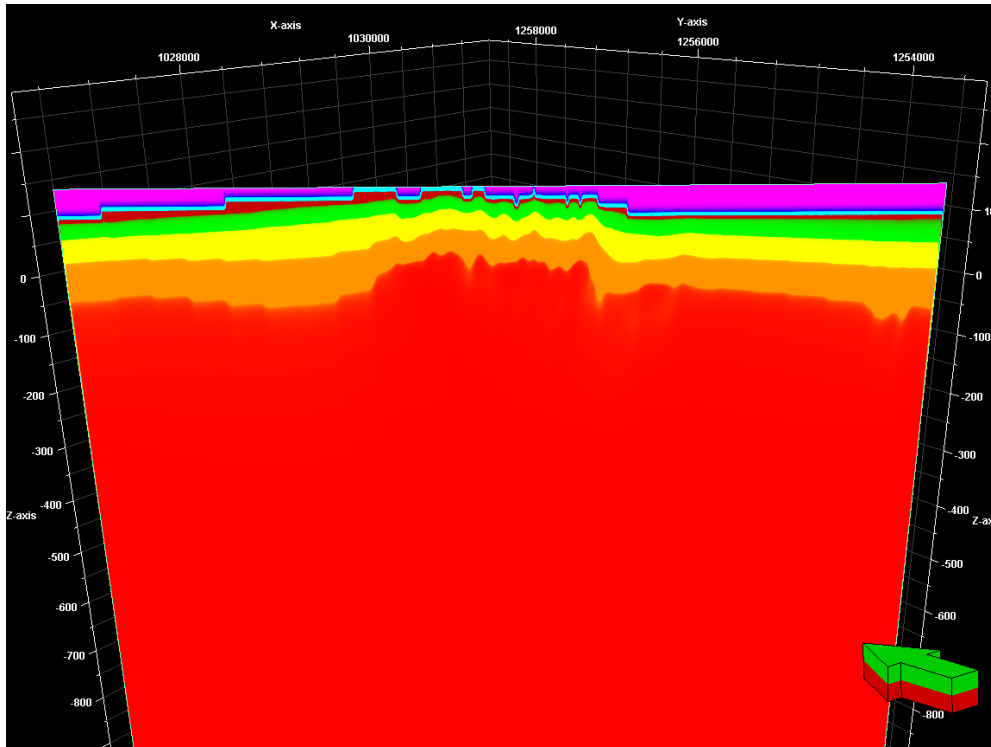


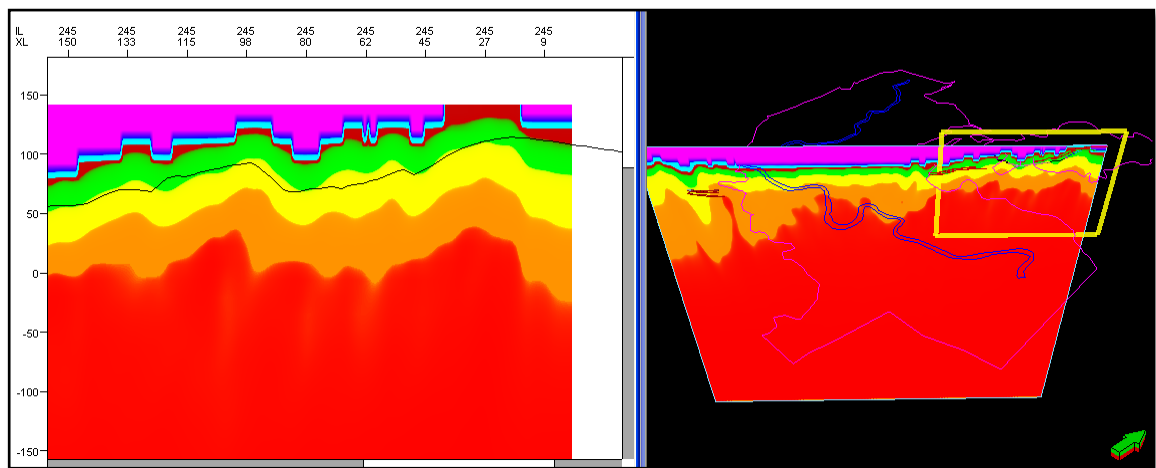
Figura 17 Perfil para interpretar, mostrando variaciones de velocidad, el color rosado indica valor de velocidad 0, esta zona está por encima de la topografía, los valores de velocidad aumenta con la profundidad.



En la interpretación de la tomografía se trazan horizontes según el valor de la velocidad, obteniéndose mejores lecturas en la zona de planicie aluvial debido a sus características topográficas llanas.

Sin embargo para este estudio la complementación con la geología arroja un mejor modelo. Para el caso de zonas con topografía variada los horizontes no se pueden basar sólo en la tomografía. Ya que el arreglo geométrico que emplea este algoritmo no es exacto.

Figura 18 Izquierda. Geometría rectilínea en superficie arroja valores inexactos. Derecha. Sección de análisis de la figura izquierda, demarcada con un recuadro amarillo

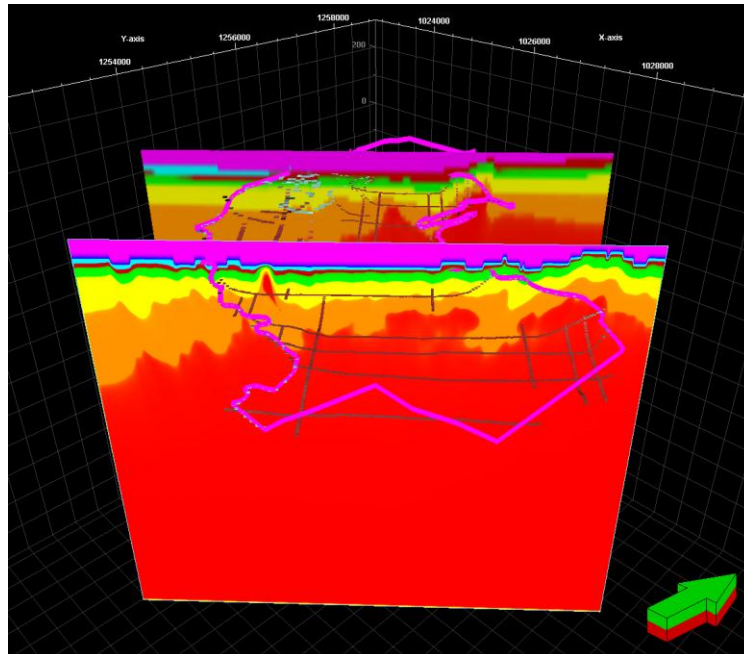


#### 4.4 INTERPRETACIÓN DE TOMOGRAFÍA SÍSMICA

La interpretación tomográfica se basó en los valores de velocidad, los cuales diferencian litológicamente el modelo geofísico. Es decir los valores de velocidad que muestra la tomografía se comprenden como cambios litológicos. Siguiendo los horizontes de velocidades y correlacionándolos con la geología de superficie da como resultado las interpretaciones siguientes.

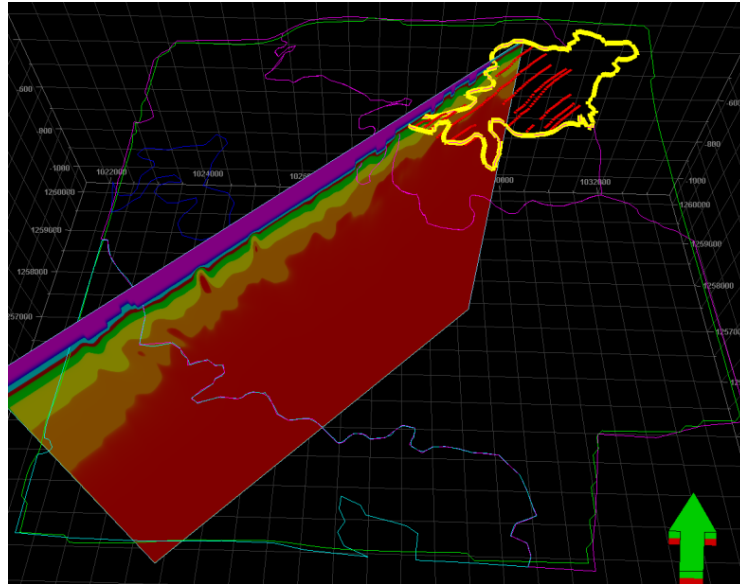
**4.4.1 Depósitos Aluviales.** En la (Figura 19) se observan los horizontes de velocidad visualizados por el cambio de color y limitados por la demarcación de los depósitos aluviales en superficie. Con el software Petrel, el cual tiene en sus herramientas un modulo de interpretación que consiste en llevar la continuidad de horizontes, estos horizontes se construyen en todo el volumen. En la figura 19 se aprecian líneas en todo el campo, las cuales se unen para construir la superficie limítrofe entre las dos capas. En este caso el límite inferior de los depósitos aluviales donde se refractaron los rayos.

Figura 19 Interpretación de la base de los depósitos Aluviales delimitados en superficie con la línea de color fucsia oscura.



**4.4.2 Depósitos De Terraza.** Interpretación de los depósitos de terrazas dentro de su límite, demarcado en superficie. (Ver Figura 20)

Figura 20 Interpretación en base a la tomografía de los Depósitos de Terrazas



**4.4.3 Grupo Real.** La interpretación del Grupo Real se da al norte, centro y al sur del proyecto delimitados por la líneas de color fucsia y cian, como se puede ver respectivamente en las Figuras 21, 22 Y 23.-

Figura 21 Interpretación en base a la tomografía de los Arcillas-Arenosas Zona Norte.

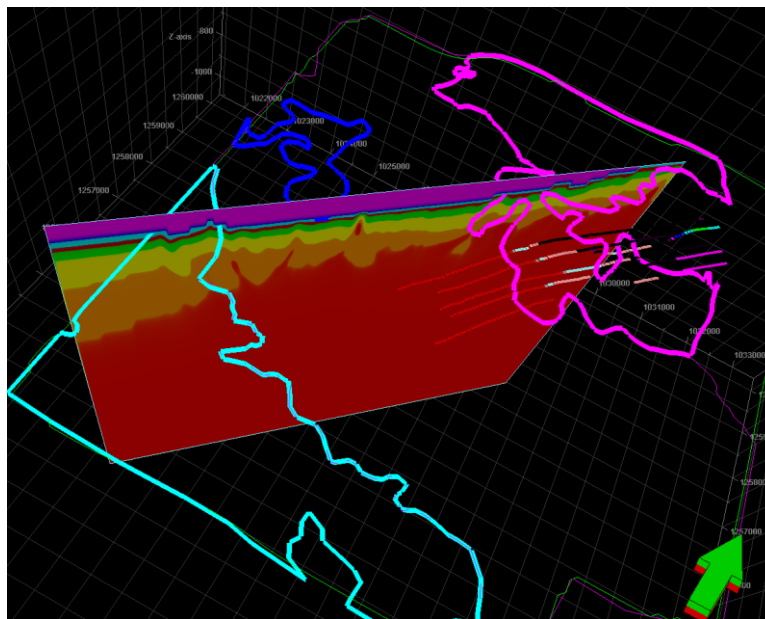


Figura 22 Interpretación tomográfica de lodolitas del Grupo Real en zona intermedia.

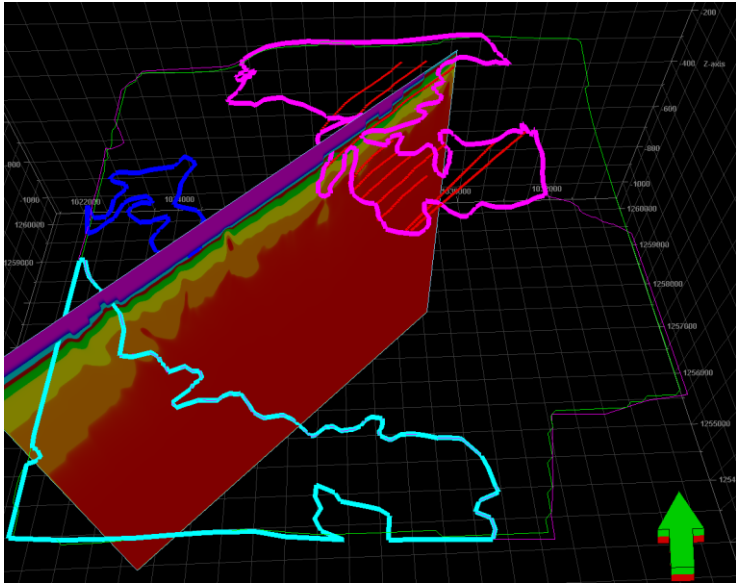
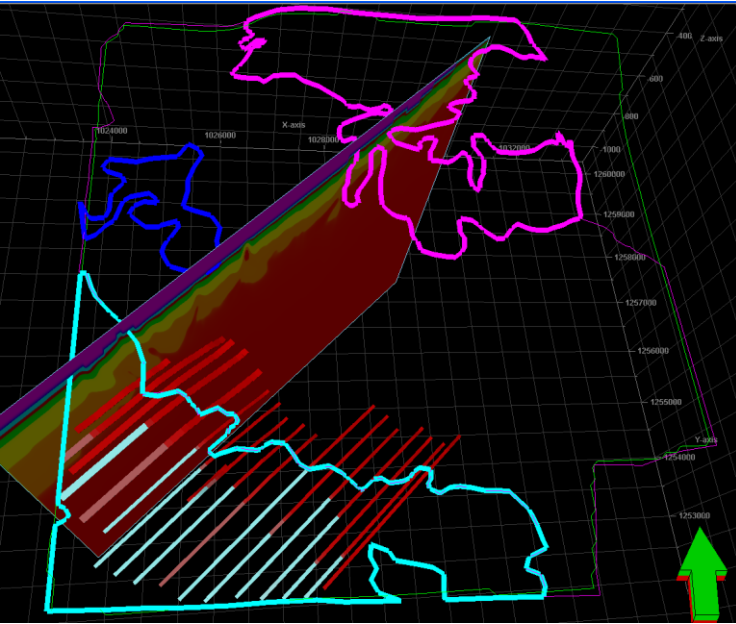


Figura 23 Interpretación en base a la tomografía Grupo Real Zona Sur

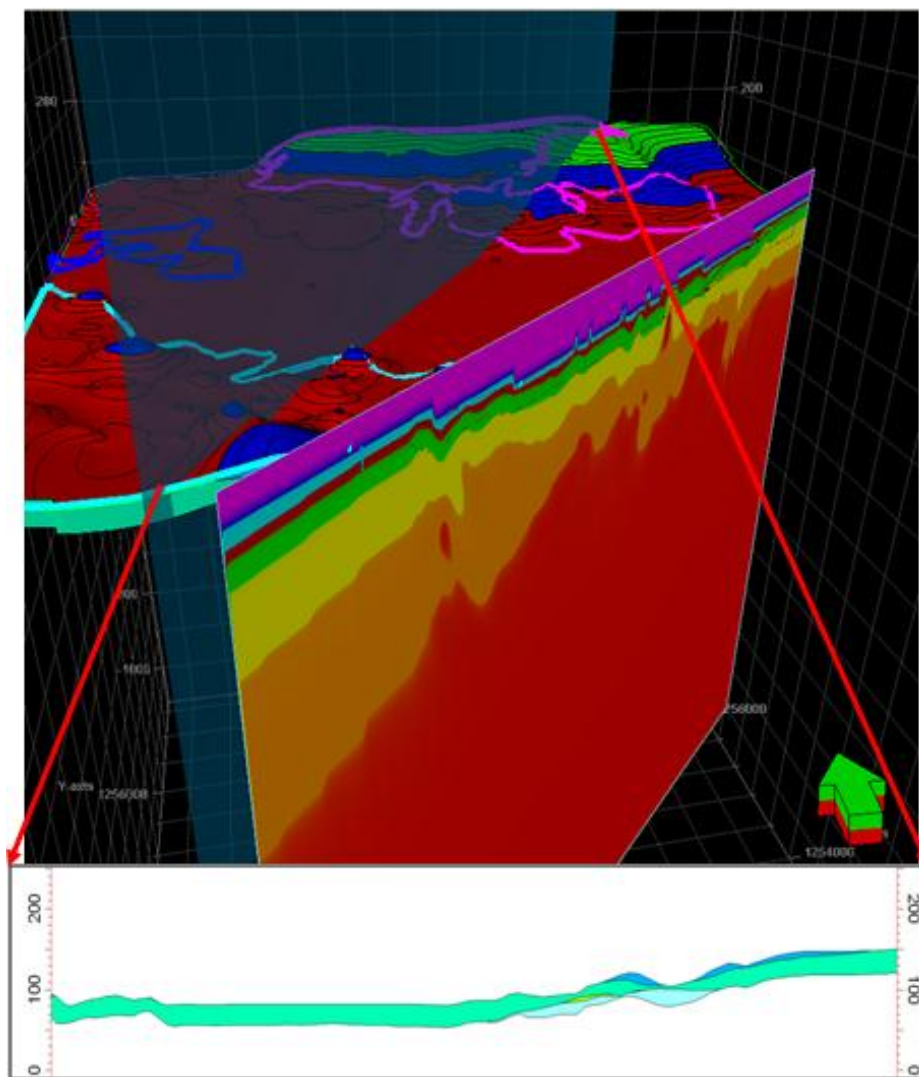


#### 4.5 MODELO GEOFÍSICO CON BASE EN LA TOMOGRAFÍA SÍSMICA

La suma de todas las superficies interpretadas anteriormente da como resultado el volumen de la capa somera (Ver Figura 24).

El límite inferior está entre los 25 y 35 metros de profundidad el cual coincide con el método de Inversión generalizada de 3DGLI.

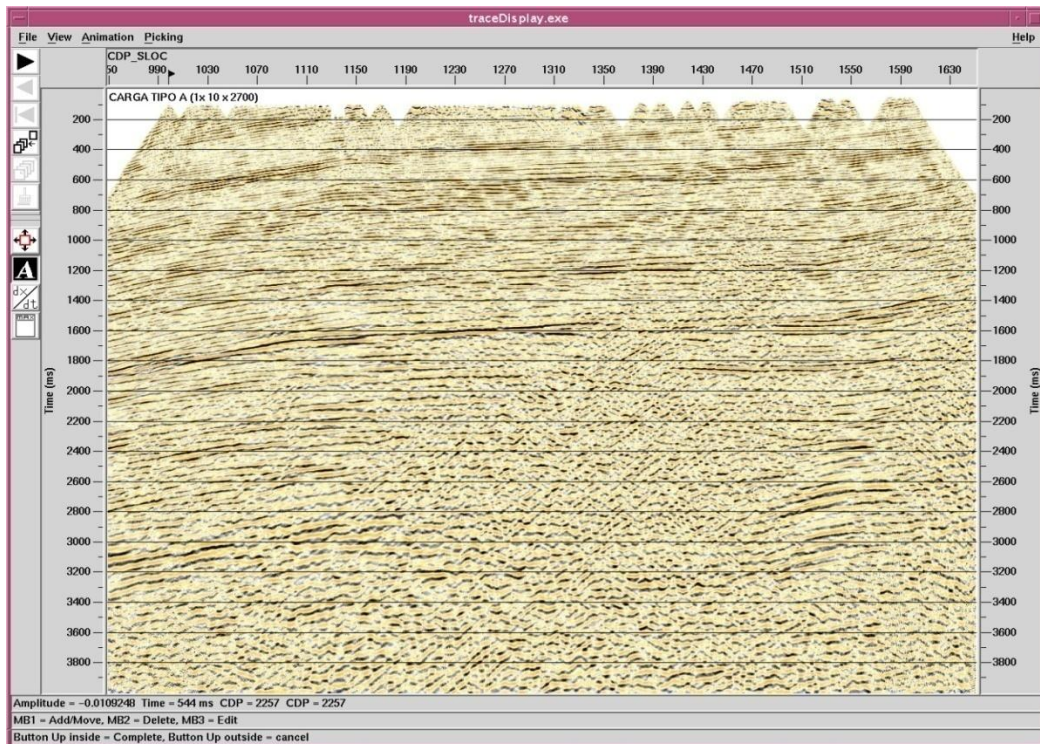
Figura 24 Modelo Tomográfico Parte superior de la Imagen y corte Nor-Este Sur-Oeste señalado con flechas parte inferior de la imagen.



## 4.6 INTERPRETACIÓN LÍNEA EXPERIMENTAL

La imagen de la Línea Experimental en la (Figura 25) fue fundamental para la determinación de la dirección de Buzamiento de las formaciones Colorado y Grupo Real. En la (Figura 25) se puede ver la tendencia de los reflectores. De esta forma se logró correlacionar las litologías presentes en los pozos sísmicos con la geología de campo.

Figura 25 Sección sísmica correspondiente a la línea experimental 2D-3C del programa Tenerife (noreste a la derecha de la figura) Nótese que los reflectores buzanan hacia el sur.



Fuente: Tomado de proyecto Tenerife 3D-3C.

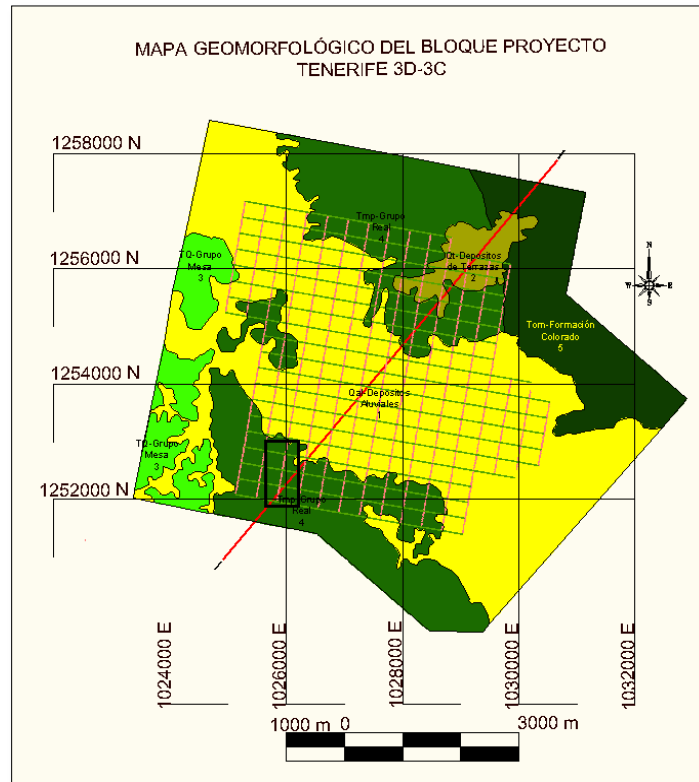
## 5. POZOS SÍSMICOS DE LA LÍNEA EXPERIMENTAL

La descripción en campo de los pozos de la línea experimental se basó en los ripsos que expulsaban las brocas, estas muestras se recogían directamente, identificando su composición y características del terreno, como presencia de agua, el nivel freático son evidentes en campo pero los niveles en que aparece se determinan por el aumento del flujo de agua en el pozo, esto para el caso de perforaciones hechas con aire. En el caso de perforaciones realizadas con agua, el flujo de agua que se le inyecta a un caudal estándar, dado por las revoluciones de la motobomba debe ser igual al de salida. Para determinar el nivel freático, se debe hacer la relación: el flujo de salida en la perforación siempre es mayor que el flujo de entrada.

En este trabajo los pozos sísmicos de la línea experimental fueron correlacionados con zonas litológicas diferenciables en superficie, sectorizando la información.

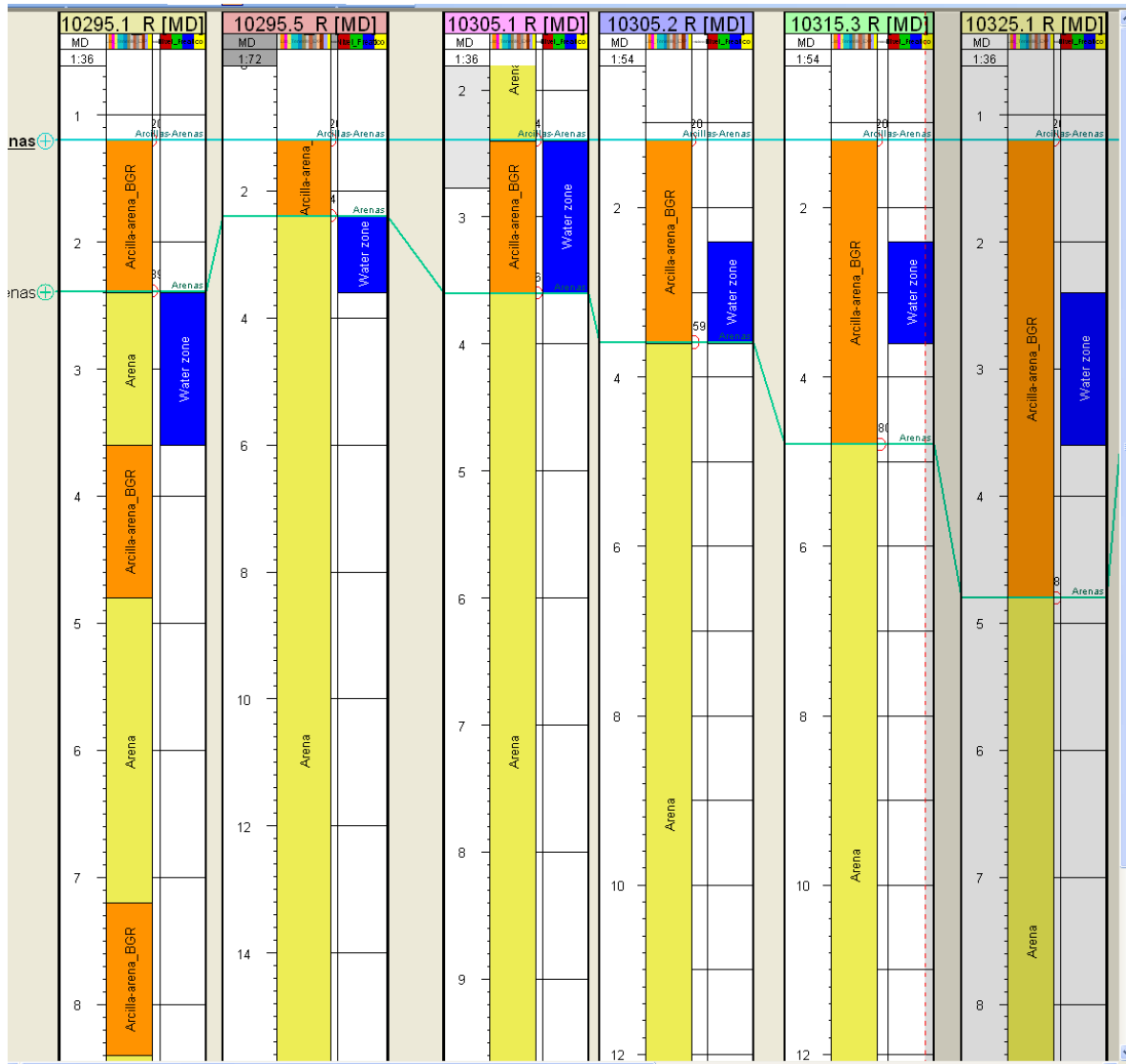
- El primer grupo de pozos descrito están en El Grupo Real al Sur del proyecto demarcados con un cuadro negro. (Ver Figura 26)

Figura 26 El primer grupo de pozos descritos están ubicados en el recuadro negro al sur del proyecto.



Se describieron 9 pozos, en los cuales predominan arcillas-arenosas con un espesor promedio de 3 metros de color marrón y arenas de color amarillo con un espesor indefinido, la base del pozo no supera la base de las arenas. Tenemos nivel freático el cual fluye a través de las arcilla-arenosas. (Ver Figura 27).

Figura 27 Litologías presentes en el Grupo Real zona sur.



- El segundo grupo de pozos descritos, se encuentran en los Depósitos Aluviales, con 37 pozos (Ver Figura 28) descritos con litologías arcillas-arenosas en la parte inicial del pozo, con un espesor promedio de 10 metros, seguidas de arenas y esporádicamente conglomerados en la base. Se encontró nivel freático en diferentes niveles del pozo. Ver Figura 29.

Figura 28 Segundo grupo de pozos descritos ubicados en el recuadro negro zona centro del proyecto.

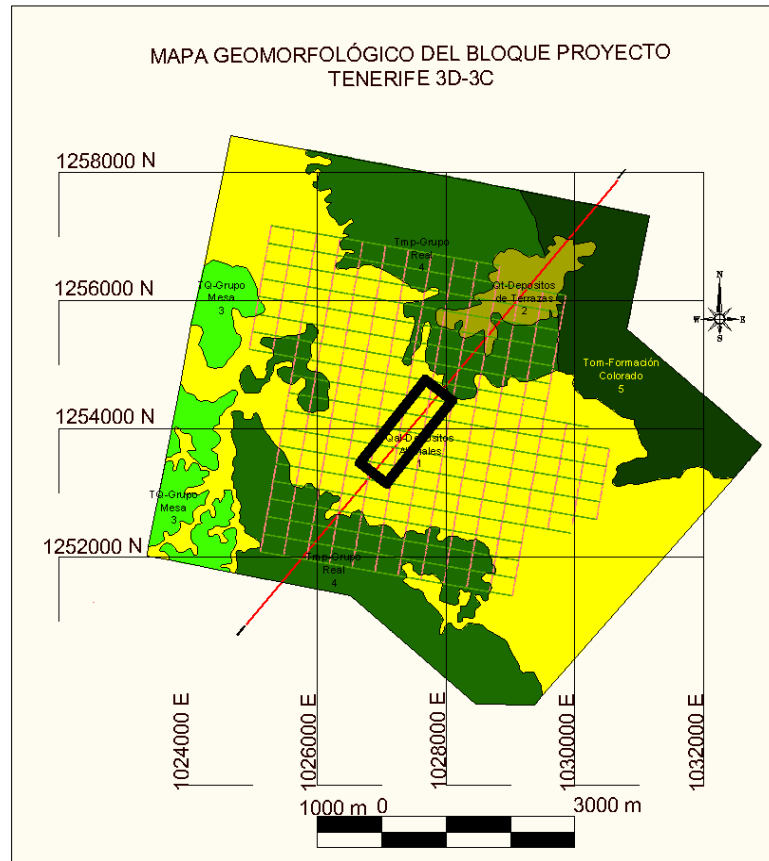
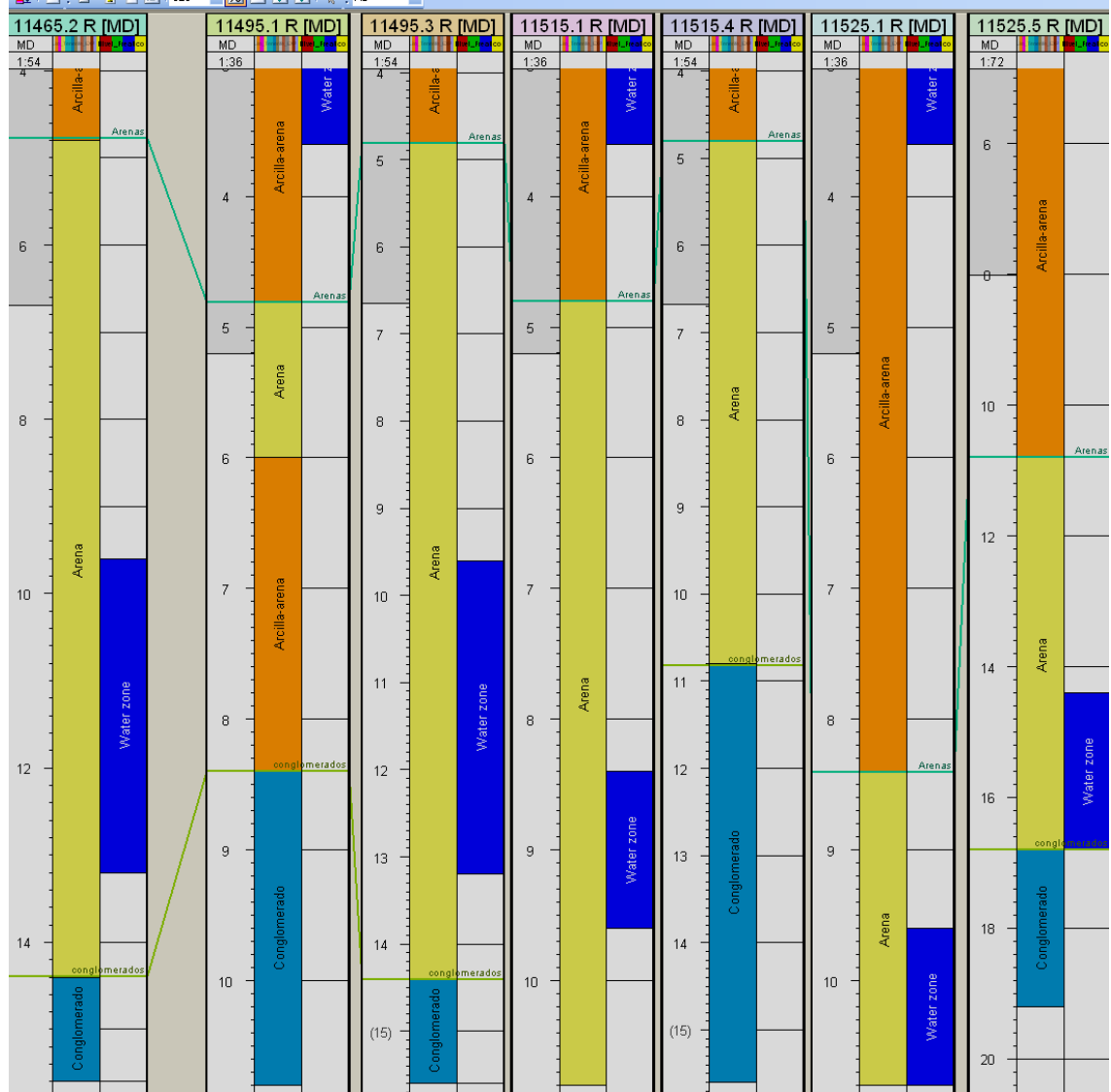


Figura 29 Litologías presentes en los Depósitos Aluviales



- El tercer grupo de pozos descritos están en la zona norte de Grupo Real con 31 pozos (Ver Figura 30) Pozos grupo real norte) descritos con litologías conglomerados al inicio del pozo con un espesor promedio de 3 metros seguido de Lodolita con un espesor superior a 10 metros sin conocer su espesor promedio ya que la base del pozo no llega a la base de las Lodolitas. (Ver Figura 31).

Figura 30 Tercer grupo de pozos descritos ubicados en el recuadro negro

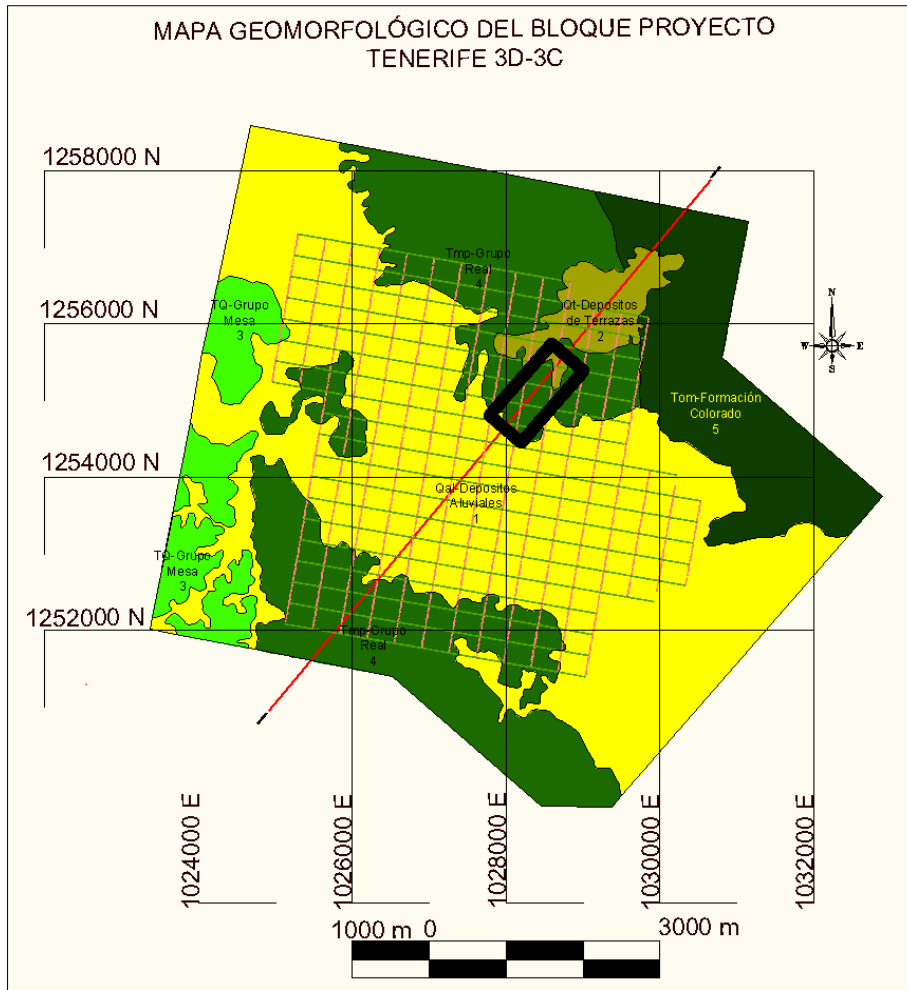
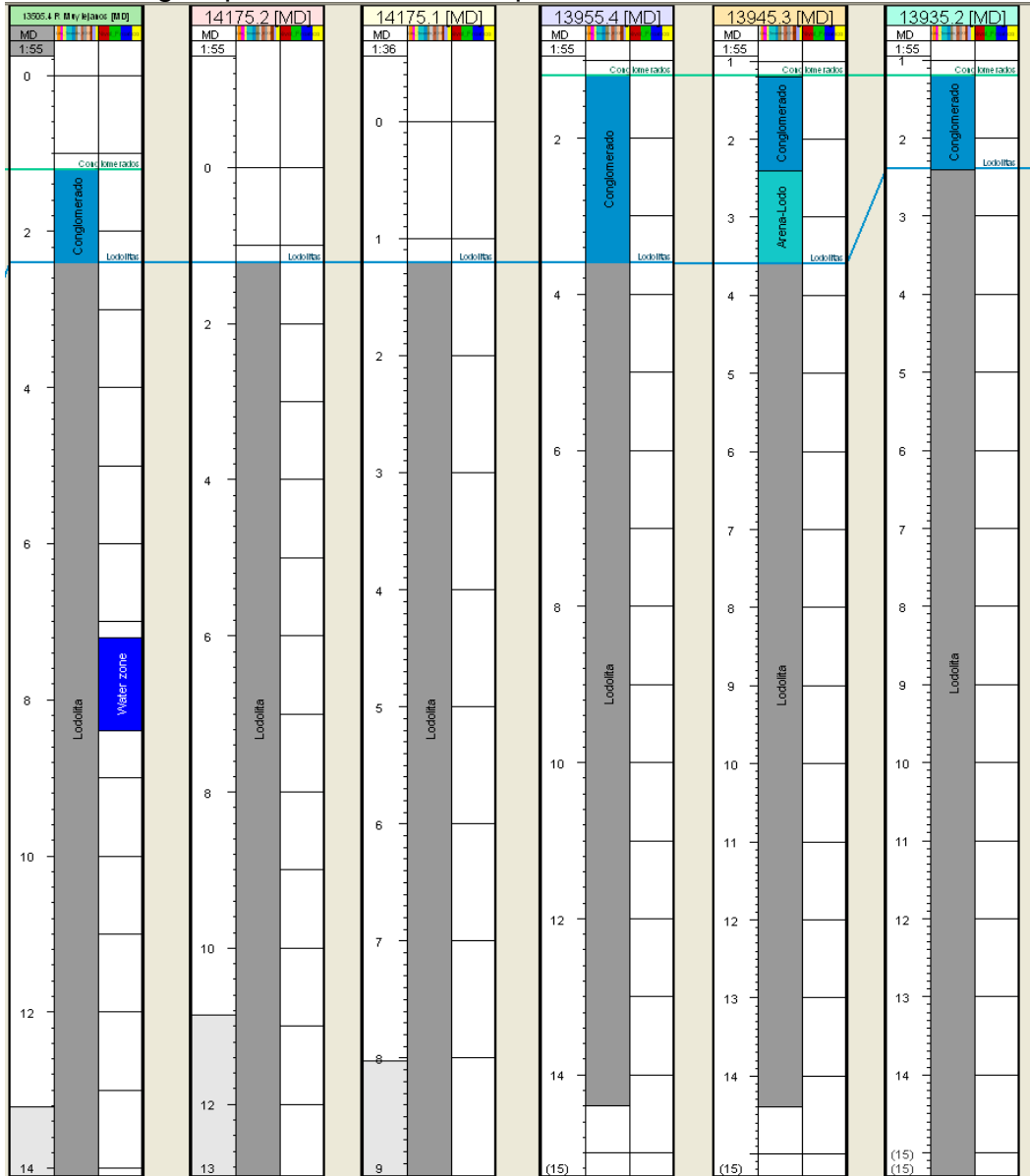


Figura 31 Litologías presentes en EL Grupo Real



- Cuarto grupo de pozos descritos están en la zona de Depósitos de Terrazas con 40 pozos (Ver Figura 32) descritos con litologías conglomerados al inicio del pozo con un espesor que varía de 3 metros en unos pozos y en los pozos intermedios de la zona de depósitos de Terrazas el espesor aumenta en promedio a 8 metros de espesor, seguidos de arcillas arenosas que varían de espesor y es superior a 8 metros, en algunos casos el pozo no supera la base de las arcillas

arenosas y las arenas que están debajo de las arcillas arenosas aparecen esporádicamente en algunos pozos y no se puede saber su espesor promedio. (Ver Figura 33)

Figura 32 Cuarto grupo de pozos descritos ubicados en el recuadro negro, Depósitos de Terrazas.

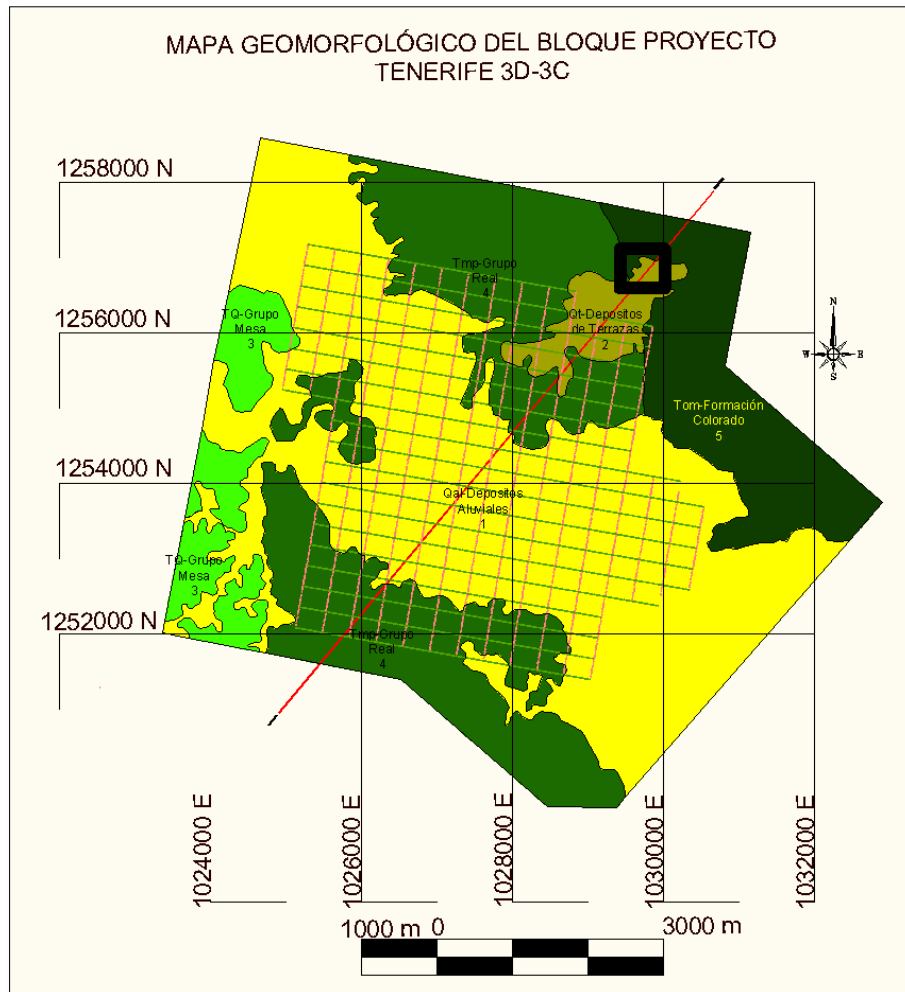
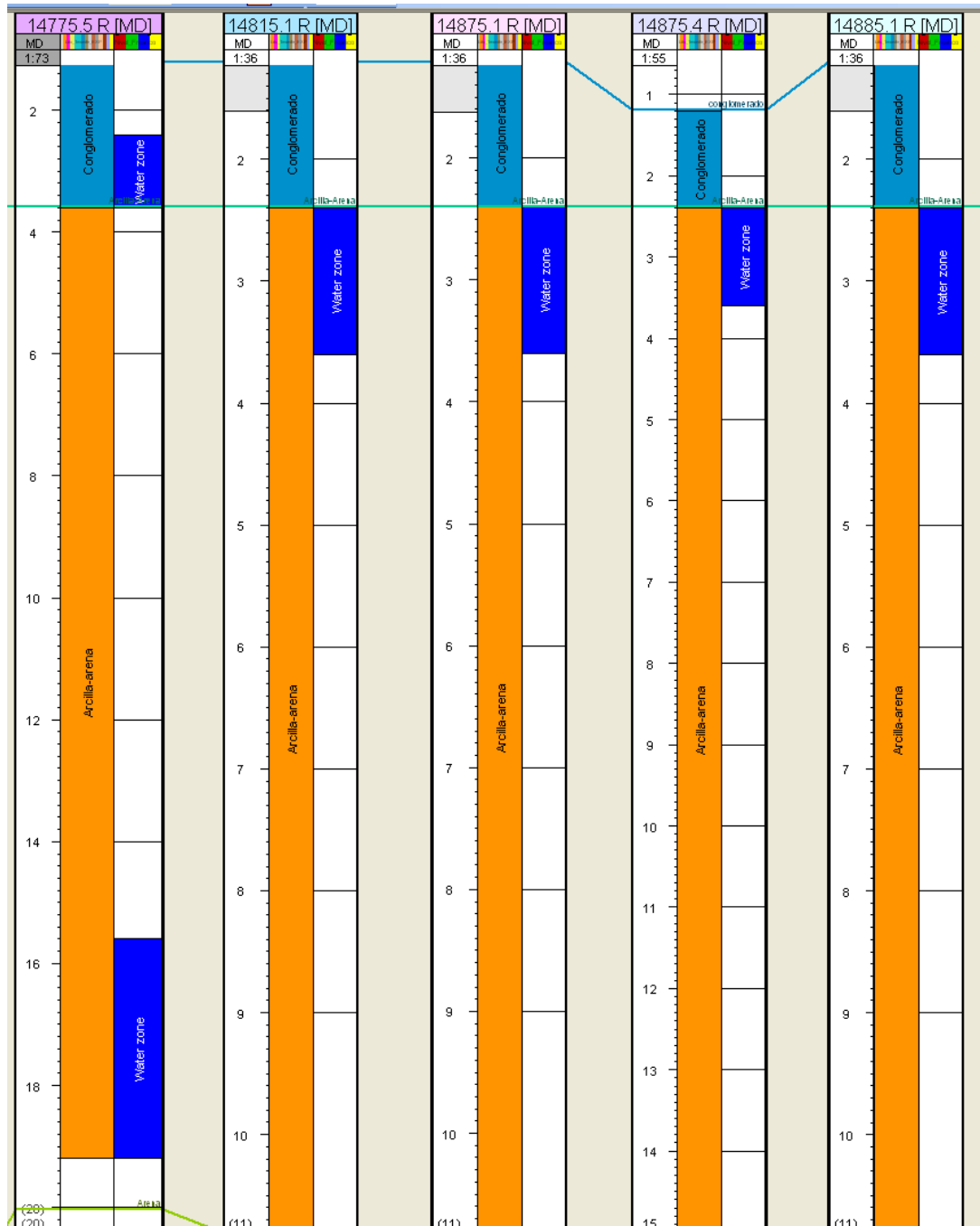
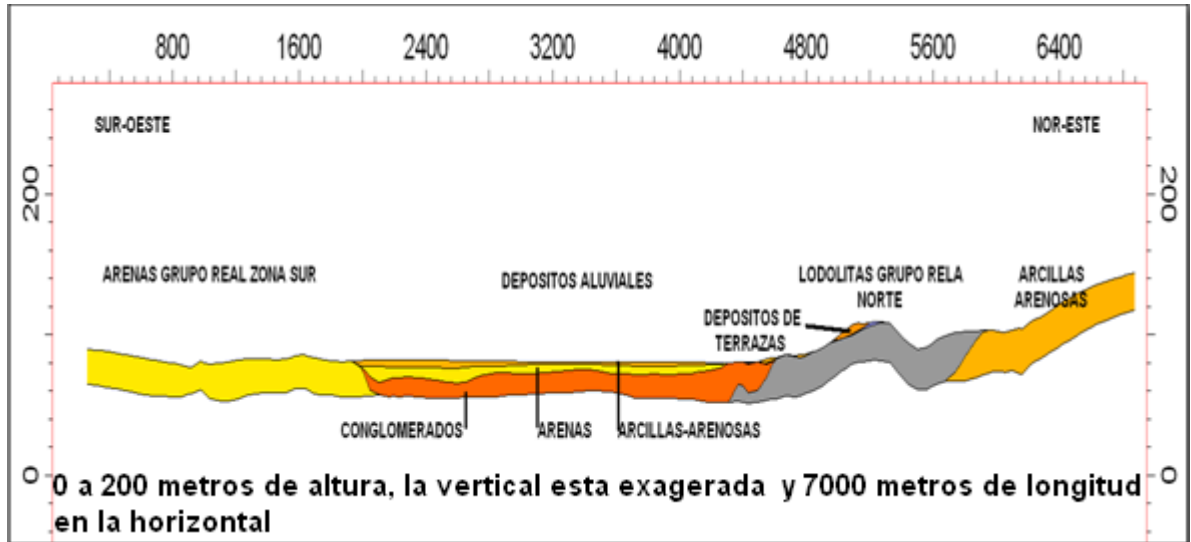


Figura 33 Litologías Presentes en los depósitos de Terrazas



## 5.1 PERFIL GEOLÓGICO BASADO EN LOS DATOS DE POZOS SÍSMICOS

Figura 34 Perfil geológico con datos de pozo. Línea Experimental

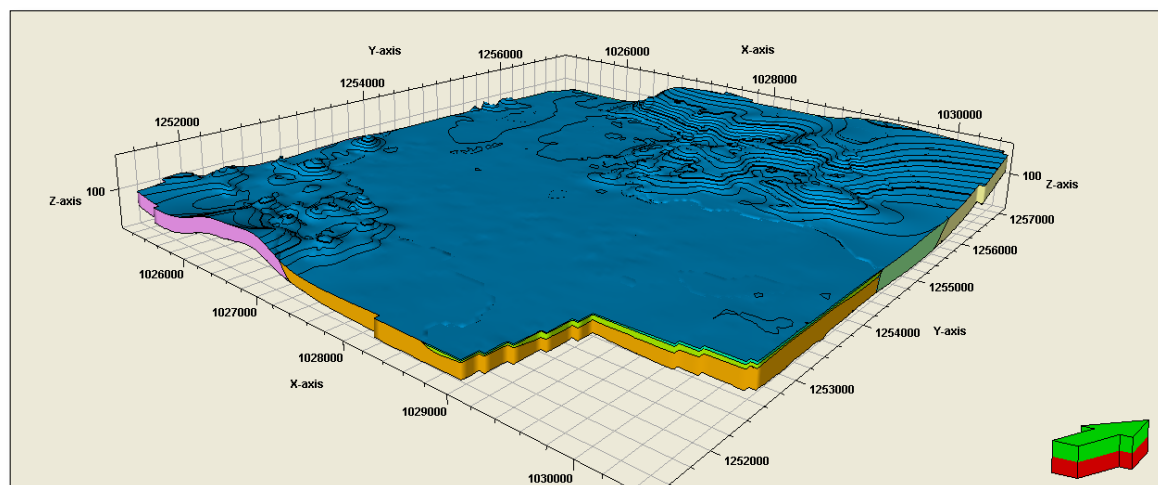


## 6. INTEGRACIÓN GEOFÍSICA Y GEOLÓGICA

La interpretación de las variables anteriormente enunciadas dan como resultado un modelo con un espesor aproximado de 30 metros desde la topografía, Los depósitos de Terrazas están compuestos por conglomerados, arcillas arenosas. El Grupo Real Norte está compuesto por Conglomerados, arcillas-arenosas y lodolitas, las cuales hacen parte de la base del Grupo Real, las Arcillas-Arenosas hacen parte de la Formación Lluvia, y las lodolitas hacen parte de la formación suprayacente con el nombre de Formación Chontorales, Las Formaciones Hiel y Enrejado las cuales suprayace la formación Chontorales son las que están debajo de los Depósitos Aluviales y finalmente sigue la formación Bagre, esta es la litología aflorante en el sector Sur del campo.

La geomorfología del subsuelo de los depósitos aluviales corresponde a una batea, cuyo contacto inferior con rocas terciarias son las Formaciones Hiel y Enrejado las cuales hacen parte del Grupo Real, el contacto entre las rocas del Grupo Real es paralelo y están buzantes en dirección SE. (Ver Figura 34).

Figura 35 Modelo capa somera producto de la integración del modelo Geofísico y Geológico



## 7. DISCUSIÓN

Según la tomografía, los datos de variación litológica se diferencian, pero se observa continuidad de la velocidad en todo el campo, Asumiendo geofísicamente que existen capas con la misma velocidad, geológicamente creeríamos que existe una misma litología que corresponde a esta velocidad en toda el área y a diferentes profundidades, pero se sabe, con geología de superficie que tenemos límites entre formaciones y depósitos de ambientes diferentes por lo cual esto no corresponde. Una solución es; utilizar diferentes algoritmos para identificar el límite inferior o interfaz de refracción y otros algoritmos para determinar las velocidades de cada litología y ver sus variaciones laterales de velocidad.

Según la tabla 2 el gradiente de velocidad de los Depósitos Terciarios es menor que el de los Depósitos Cuaternarios para esto hay dos posibles respuestas: las rocas Terciarias las cuales por su edad, presentan un mayor grado de litificación y la capa meteorizada esta a menor profundidad, por ende la perforación supera considerablemente el espesor de la capa de baja velocidad y la onda recibirá el efecto directo del cambio en el contraste de impedancia acústica al propagarse primero por un medio de alta velocidad y luego en un medio de muy baja velocidad. Este cambio puede ser el causante del retardo mostrado en la tabla 2. La segunda opción es que la zona de depósitos aluviales por su condición de roca con mayor porosidad, permite la saturación de agua y esta es la causante del aumento de velocidad según la teoría de Viot Savart.

En la tomografía sísmica se evidencia un aumento de la velocidad, exactamente debajo de la zona del río La Colorada, este hecho aparentemente es provocado por la saturación de agua bajo este nivel, aumentando la velocidad de propagación. Es necesario analizar el resultado del algoritmo utilizado, ya que en este sector del río, no hay datos, debido a que la cantidad de ruido generado por el río no hizo aconsejable la ubicación de receptores.

## 8. CONCLUSIONES

La profundidad de la capa somera es de aproximadamente 30 metros, calculada por el método de Inversión Lineal Generalizada y a su vez corroborada con el algoritmo de tomografía, Los menores espesores están en los depósitos de Terrazas con el Grupo Real y el mayor espesor está en el área de Depósitos Aluviales. La información Previa de Geología, La pequeña interpretación de la línea sísmica, los rípos de perforación y finalmente su integración, permitieron construir el modelo 3D del Estrato Somero.

La Geomorfología es un aspecto que está ligado a la litología o a las características de resistividad del material, a las condiciones atmosféricas y otros agentes; por esta razón, no es un condicionante directo en la propagación de la onda y no es un punto de vista relevante. Es más determinante el aspecto litológico.

La variación litológica determinada con los rípos de perforación, la correlación con la geología de superficie, la básica interpretación de la imagen sísmica y la integración de los resultados muestran aparentemente que la línea experimental atraviesa gran parte del Grupo Real. Mirando de norte a sur o de mayores a menores, según la nomenclatura de los pozos y la conformación desde la base hasta el tope del Grupo Real, correlacione esta información con las Formaciones Lluvia en la parte norte, seguida de la Formación Chontorales parte intermedia y finalmente por la Formación Bagre en la parte sur.

La tomografía sísmica, da los valores de velocidad de la propagación de la onda en la capa refractante, la correlación con el método de inversión Lineal Generalizada nos confirma la efectividad en el cálculo de la profundidad, Pero estos algoritmos no permite ver la variabilidad lateral de la velocidad entre los tres

cambios litológicos del campo, Grupo Real, Depósitos Aluviales y las Terrazas aluviales.

La información obtenida con los rípos de perforación permitió introducir la diferenciación o composición litológica del estrato somero y con la información de la imagen sísmica, comprender estructuralmente su dirección y la relación con su variación espacial en todo el campo.

La utilización de un solo algoritmo es una desventaja para determinar el espesor del estrato somero. Ya que en algunos sectores del campo el resultado del algoritmo introducirá errores a otros datos, especialmente si hay variación topográfica entre límite de capa meteorizada y roca fresca con respecto a la superficie, variación litológica o de edades.

A partir de esta investigación se determinó que se puede evidenciar la afectación de velocidad de propagación de la onda por la porosidad y flujo de fluidos como aire y agua. En el caso de la comparación de la media de los tiempos de “ geófono boca de pozo”, se puede atribuir que el aumento comparativo entre los Depósitos Aluviales con respecto a los Depósitos Terciarios es por la mayor cantidad de agua en esta zona con respecto los Depósitos de Terciarios.

## 9. RECOMENDACIONES

En el caso de el gradiente de velocidad de los “tiempos de Geófono Boca de Pozo” de los Depósitos Aluviales con respecto a los Depósitos Terciarios, en donde el tiempo de propagación de la onda, resulta ser de mayor velocidad en los cuaternarios que en los terciarios. Se debería buscar en la base de datos que entrego la compañía que realizó la adquisición sísmica al ICP para verificar con el reporte de los perforadores, si los niveles de saturación de agua en los Depósitos Cuaternarios es mayor con respecto a los Depósitos Terciarios. Dado este caso se afirmaría la teoría de propagación de onda en medios porosos saturados de agua de Viot Savart donde se comprobaría que la saturación de agua aumenta la velocidad de propagación.

Los datos de tiempos de Geófono Boca de Pozo, miden la velocidad de propagación de la onda directa en cada pozo. Dado esto es necesario realizar un análisis minucioso a estos datos ya que no se puede discretizar las variables litológicas y de flujo de fluidos, siendo estos condicionantes de la propagación de la energía sísmica.

Solicitar en los próximos proyectos a las compañías de adquisición sísmica, que en el respectivo Reporte de perforación del día a día, en el total de los pozos, con la respectiva profundidad, las variables: litológicas, nivel freático, y la resistividad relativa de los cero metros a su correspondiente profundidad. Esto para ver si se logra comprender el tiempo de geófono boca de pozo y a que profundidad esta la roca fresca. De esta forma comprenderemos mejor, el estrato somero.

Hacer uso de información preliminar que nos muestra la dirección y el buzamiento de la capa meteorizada. Para utilizar el algoritmos pertinente para cada sector del campo, bajo las condiciones de la base da la capa refractante.

## GLOSARIO

**BATEA.** Forma con superficie convexa.

**CAPA SOMERA.** Capa expuesta a la intemperie, con poca compresibilidad expuesta a los factores ambientales.

**CYDRILL.** Químico utilizado en perforaciones para entrapar partículas que no salen del pozo, también como sellante y adherente de las paredes del pozo para evitar fluidos de agua y el derrumbe del pozo.

**MULTICOMPONENTE.** Receptor de información sísmica de tres componentes, una en dirección vertical y las otras dos en dirección horizontales y perpendiculares entre ellas.

**PICADO DE PRIMEROS ARRIBOS.** es el tiempo que el procesador marca en la traza para medir el tiempo de llegada de la onda evitando tener en cuenta tiempos falsos producidos por agentes externos.

**SCATTERING.** Es el proceso físico donde la radiación, la luz, el sonido o movimiento de partículas es forzado a desviarse de una trayectoria rectilínea en sectores de uniformidad por el medio que atraviesa.

**TIEMPO GEÓFONO BOCA DE POZO.** es el tiempo de llegada directa, de la fuente a un receptor cercano al pozo llamado “Geófono boca de pozo”.

## BIBLIOGRAFÍA

American Geological Institute 1984, en IGAC, 2005.

Backus, G.E., and Gilbert, J.F., 1967, Numerical applications of a formalism for geophysical inverse problems: Geophy. J. Roy. Astr. Soc., 13, 247-27

Cox, M. (1999). Static Correction for Seismic Reflection Surveys. Society Exploration Geophysicists, Tulsa, USA, pp. 6.1-6.6.

Cooper, M. A., et al., (1995) : Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 79, 10, 1421-1443.

Chun, J. H., and Jacewitz, C. A., 1981, Fundamentals of frequency-domain migration: Geophysics.

Camarasa, Marina, Contribución a la teoría de Biot sobre propagación de ondas acústicas en sedimentos saturados en una mezcla de fluidos: Teoría Generalizada de Biot. Trabajo de PhD. Madrid: Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Físicas. Departamento de física de materiales, 1992. 229p.

De Porta J., 1974. Lexique Stratigraphique Internationale Amerique Latine-Colombie. Volumen V-Fascicule 4B. Paris-Francia, UNION INTERNATIONALES DES SCIENCES GEOLOGIQUES.

Etayo, F. et al, 1989, Mapa de Terrenos de Colombia, Publicaciones Geológicas Especiales del Ingeominas, No 14.

Fabre, A. 1986. Geología de la Sierra Nevada del Cocuy (Cordillera Oriental de Colombia), Tomo II. Département de Géologie et Paléontologie. Université de Genève.

Geldart, Loyd P. and Sheriff, Robert E. Exploración Sismológica Volumen II, Procesamiento e interpretación de datos. Traducido por Cambridge University Press. Primera edición. Mexico DF. Editorial Limusa S.A. de C.V, 1991. pp17-25.

Herreno G. Kairuz F. 2009. Mapa de geomorfología, plan de manejo ambiental para el programa sísmico Tenerife 3D-3C.

Herreno G. Kairuz F. 2009. Mapa de geología, plan de manejo ambiental para el programa sísmico Tenerife 3D-3C.

Ingeominas 2004. Proyecto Compilación y Levantamiento de la Información Geomecánica. Propuesta Metodológica para el Desarrollo de la cartografía Geomorfológica para la Zonificación Geomecánica Volumen I. Bogota.

Lines, L.R., and Treitel, 1984, A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems: Geophysical Prospecting

Mojica, J. and Franco, R., (1990): Estructura y evolución tectónica del Valle Medio y Superior del Magdalena. Geología colombiana, 17, 41-6.

Rueda, Dany, Aplicación del método de refracción sísmica en la obtención de modelos del estrato somero en el área del Catatumbo y su efecto en la imagen sísmica. Trabajo de grado Geólogo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Físicoquímica. Departamento de Geología, 2009. 142p.

Royero J.M, Clavijo J. 2001. Memoria explicativa del mapa geológico generalizado

del departamento de Santander.

Royero J.M, Clavijo J. 2001. Mapa geológico generalizado del departamento de Santander.

Virginia, Maria, 3-D Refraction Statics Dan Hampson and Russell. Octubre, 2008. 21p.

Virginia, Maria, Tomographic Inversion of Near Surface Velocity Structure and Refraction Static, Qing Li, Octubre 2008, 4p.

Yajaira Herrera Norman Cooper et al., Manual para adquisición y procesamiento de sismica terrestre y su aplicación en Colombia. ANH 2010