MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN DEL SUBSUELO EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL, BLOQUE SAN GABRIEL, VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA

HERACLIO MEDINA TAMAYO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS
ESCUELA DE GEOLOGÍA
BUCARAMANGA
2004

MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN DEL SUBSUELO EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL, BLOQUE SAN GABRIEL, VALLE SUPERIOR DEL MAGDALENA

HERACLIO MEDINA TAMAYO

Director

RICARDO MIER UMAÑA. *Geólogo*

Codirectores

IVAN DARIO OLAYA. *Geólogo M.Sc. Geología*

TRINO SALINAS GARNICA. *Ing. Civil M.Sc. Geofísica*

Trabajo de grado para optar al título de Geólogo

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS

ESCUELA DE GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2004

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida, la buena fortuna y por ser mi apoyo espiritual. A mi Padre por ser la guía de mi existencia. A mi Madre quien me inculco los valores, principios y virtudes. A José Manuel por su apoyo y por impulsarme para salir adelante. A Javier por sus consejos y su dedicación y a Olga por su compañía y amor durante estos años.

Heraclio.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento:

A ALFREDO TADA GUARIN, Físico, M.Sc. Geofísico del Instituto Colombiano del Petróleo.

A CARLOS CESAR PIEDRAHITA ESCOBAR, Matemático, PhD. Geofísico del Instituto Colombiano del Petróleo.

A IVAN DARIO OLAYA, Geólogo, M.Sc. Estratígrafo del Instituto Colombiano del Petróleo.

A SAUL GUEVARA, Ingeniero Civil, M.Sc. Geofísico del Instituto Colombiano del Petróleo.

A SANDRA BECERRA, Ingeniera de Petróleos, Procesadora Sísmica de la Compañía Grant Geophysical.

A TRINO SALINAS, Ingeniero Civil, M.Sc., Procesador Sísmico del laboratorio de geofísica del Instituto Colombiano del Petróleo.

A todos los compañeros y trabajadores de la División de Exploración y Explotación del Instituto Colombiano del Petróleo.

A todas a aquellas personas que en mayor o menor grado colaboraron en la realización de la presente tesis de grado.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

1. GENERALIDADES

1.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO
1.2 VÍAS DE ACCESO
1.3 HISTORIA EXPLORATORIA
1.4 ANTECEDENTES
1.5 METODOLOGIA

2. GEOLOGÍA

2.1 ESTRATIGRAFÍA

2.1.1 Basamento
2.1.1.1 Grupo Garzón (PEg)
2.1.2 Jurásico

2.1.2.1 Formación Saldaña (Js)
2.1.2.2 Batolito de Mocoa (Jm)

2.1.3 Cretáceo

2.1.3.1 Formación Caballos (Kc)
2.1.3.2 Formación Villeta (Kv)
2.1.3.3 Grupo Oliní (Ko)
2.1.3.4 Formación Monserrate (Km)

2.1.4 Terciario

2.1.4.1 Formación Rumiyaco (Tr)

2.1.4.2 Formación Pepino (Tp)

2.1.4.3 Formación Guacacallo (TQg)

2.1.5 Reciente

2.1.5.1 Depósitos recientes (Qa, Qc)

2.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

2.2.1 Descripción de estructuras.

2.2.1.1 Sistema de fallas con vergencia Occidental

2.2.1.2 Sistema de fallas con vergencia Oriental

2.2.1.3 Sistema de fallas de rumbo

2.2.1.3 Pliegues

2.3 GEOLOGÍA HISTORICA

3. ADQUISICIÓN SÍSMICA

3.1 DEFINICIÓN.

3.2 ETAPAS DE UNA ADQUISICIÓN SÍSMICA.

3.2.1 Topografía.

3.2.2 Perforación.

3.2.3 Registro.

3.2.4 Restauración.

3.3 DESCRPCION GEOLOGICA DE LA LÍNEA SG-2002-1840.
3.4 ADQUISICIÓN DE LA LINEA SG-2000-18403.

3.4.1 Etapa de Nivelación y referenciación (Topografía).

3.3.1.1 El papel geológico durante la topografía.

3.4.2 Etapa de perforación y carga

3.3.2.1 El papel geológico durante la perforación y el tacado.

3.4.3 Registro

3.3.3.1 El papel geológico durante el registro.

3.4.4 Restauración.

3.3.4.1 El papel del geólogo durante la restauración.

4. PROCESAMIENTO SÍSMICO

4.1 ENTRADA DE DATOS DE CAMPO.
4.2 CAMBIO DEL INTERVALO DE MUESTRO DE 2 MS A 4 MS "RESAMPLING"
4.3 APLICACIÓN DE UNA FUNCIÓN DE GANANCIA PARA VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS.
4.4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EN BRUTO.

4.4.1 Disparos con delay
4.4.2 Disparos con grabación incompleta.
4.4.3 Disparos con interferencia sísmica.
4.4.4 Disparos con ruido tipo Spike.

4.5 ASIGNACIÓN Y CHEQUEO DE GEOMETRÍA.

4.6 EDICIÓN DE TRAZAS RUIDOSAS, MUERTAS E INVERTIDAS.

4.7 PRUEBAS DE FILTRO Y RECUPERACIÓN DE LA VERDADERA AMPLITUD.

- 4.7.1 Aplicación de filtros
- 4.7.2 Filtros de ruido incoherente
- 4.7.3 Filtros de ruido coherente.
- 4.7.4 Recuperación de la verdadera amplitud.

4.8 PRUEBAS DE DECONVOLUCIÓN.

- 4.8.1 Fundamentos.
- 4.8.2 Principios.
- 4.8.3 Filtrado Inverso
- 4.8.4 Tipos de Deconvolución.
- 4.8.5 Metodología y resultados de las pruebas en la línea SG-2002-1840.

4.9 CORRECCIONES ESTÁTICAS DE REFRACCIÓN.

- 4.9.1 Fundamentos.
- 4.9.2 Metodología para corregir las estáticas de refracción en la línea SG-200-1840.

    - 4.9.2.1 Edición de picos.
    - 4.9.2.2 Definición de la capa refractora.
    - 4.9.2.3 Velocidad del refractor.
    - 4.9.2.4 Visualización de las soluciones estáticas.
    - 4.9.2.5 Modelo de la capa meteorizada.
    - 4.2.9.6 Elección de la solución más apropiada.

4.10 CORRECCIÓN DEL EFECTO NORMAL MOVEOUT (NMO) y APILAMIENTO DE LA INFORMACION.

4.10.1 Fundamentos.

4.10.2 Corrección del NMO

4.10.3 Metodología para la corrección del efecto NMO en la línea SG-2002-18404.11 ANÁLISIS DE VELOCIDADES APILAMIENTO.

4.11.2 Métodos.

4.11.2.1 Análisis de velocidades en el plano (t^2-x^2)

4.11.2.2 Método del espectro de velocidades.

4.11.2.3 Método de apilados a velocidad constante. (Constant velocity stack CVS)

4.11.3 Análisis de velocidades de apilamiento de la línea SG-2002-1840.

4.12 CALCULO DE ESTÁTICAS RESIDUALES Y APILADO FINAL.

4.12.1 Estimación de las correcciones estáticas en la línea SG-2002-1840.

4.13. MIGRACIÓN EN TIEMPO POST-APILADO.

4.13.1 Fundamentos.

4.13.2 Tipos de Migración.

4.13.2.1 Método Kirchhoff.

4.13.3 Procedimiento para realizar la Migración.

4.13.4 Resultados Obtenidos.

5. INTERPRETACION SÍSMICA

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN GEOLÓGICA OBTENIDA DE LA SECCIÓN SÍSMICA SG-2002-1840.

5.2 DISCUSION DE LOS RESULTADOS

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFIA

GLOSARIO

ANEXOS

LISTADO DE TABLAS

1. Coordenadas específicas del Bloque San Gabriel.

2. Parámetros técnicos de adquisición de la línea SG-2002-1840.

3. Parámetros de registro.

4. Tabla de velocidades y tiempos utilizados para la recuperación de amplitudes de la línea SG-2002-1840

LISTADO DE FIGURAS

1. Ubicación Geográfica del Bloque del San Gabriel.
2. Coordenadas específicas y vías del Bloque del San Gabriel.
3. Programas sísmicos realizados en los Bloques San Gabriel y Acevedo.
4. Columna estratigráfica Generalizada del Bloque San Gabriel.
5. Mapa Geológico del Bloque San Gabriel.
6. Imagen de radar y principales rasgos estructurales extremo Sur del Valle Superior del Magdalena.
7. Generación, propagación y registro de ondas en una adquisición sísmica.
8. Fuente y receptor en la adquisición sísmica.
9. Sección sísmica de alta resolución.
10. Interpretación y modelo geológico a partir de una sección sísmica.
11. Actividades de topografía.
12. Actividades de perforación.
13. Actividades de registro.
14. Mapa de la localización de las líneas y pruebas experimentales en el programa San Gabriel 2D.
15. Corte y nivelación de la línea SG-2002-1840.
16. Relación de distancias entre estacas receptoras y Shot points en la línea SG-2002-1840.
17. Topografía convencional usada en el programa San Gabriel 2D.
18. Elementos usados para la nivelación de estacas y puntos de tiro.
19. Taladros de perforación "General 8.5"
20. Pistola Neumática "Ingersoll Rand "de perforación.
21. Compresores utilizados en la perforación de la línea SG-2002-1840.
22. Accesorios utilizados en la perforación de los pozos.
23. Enlace entre las diferentes herramientas de perforación.
24. Material empleado en los puntos de tiro durante el programa de registro en San Gabriel 2D.
25. Introducción de cargas en pozo.

26. Revisión de la continuidad y tacado del pozo.
27. Geófonos y ristras.
28. Cables, búster Box y baterías.
29. Conexión del cable de detonación para el registro.
30. Central de instrumentos.
31. Registro sísmico.
32. Restauración de la línea SG-2002-1840.
33. Flujo para transformar la información del formato SEG-Y al formato ProMAX.
34. Espectro de frecuencia de la información adquirida en el Bloque San Gabriel.
35. Disparo sin ganancia en la línea SG-2002-1840.
36. Aplicación de una función de ganancia AGC de diferentes longitudes a los datos en bruto de la línea SG-2003-2030
37. Disparo con delay de un segundo.
38. Disparo con grabación incompleta.
39. Disparo con actividad sísmica simultanea.
40. Disparo con presencia de spike noise.
41. Configuración de Geometría.
42. Configuración de receptores.
43. Configuración de fuentes.
44. Introducción del patrón de pozos.
45. Visualización de los receptores de la línea después de la configuración de la geometría.
46. Perfil topográfico de la línea obtenido a partir de la asignación y cheque de geometría.
47. Cubrimiento nominal de la línea
48. Apilado bruto de la línea SG-2002-1840.
49. Apilado bruto de una línea sísmica adquirida en una zona geológica menos compleja.
50 Ejemplo de una traza ruidosa.
51. Selección de la traza ruidosa de la Figura 50.
52. Exclusión de la traza ruidosa de la Figura 51.
53. Aplicación de un filtro band pass de 0-10 Hz.

54. Aplicación de un filtro band pass de 10-20 Hz.
55. Aplicación de un filtro band pass de 20-30 Hz.
56. Aplicación de un filtro band pass de 30-40 Hz.
57. Aplicación de un filtro band pass de 40-50 Hz.
58. Aplicación de un filtro band pass de 50-60 Hz.
59. Medición de la velocidad para energía de tipo Air blast.
60. Espectro de frecuencias del disparo.
61. Modelo Geológico para la línea HSG -99-1610 Tomado de Linares, 2000.
62. Apilado parcial de la línea SG-2002-1840 después de aplicar deconvolución predictiva (longitud de operador = 160).
63. Apilado parcial de la línea SG-2002-1840 después de aplicar deconvolución spiking. (longitud de operador = 140).
64. Apilado parcial de la línea SG-2002-1840 después de aplicar deconvolución Predictiva (longitud de operador = 120).
65. Lista de los procesos interactivos del sistema de procesamiento para el cálculo de las correcciones estáticas.
66. Edición de Picos para correcciones estáticas.
67. Picado de la capa refractora para la corrección de las estáticas de refracción.
68. Cálculo de la velocidad de la capa refractora para la corrección de las estáticas.
69. Visualización de las soluciones estáticas obtenidas con los métodos GRM, DRM y DT en las correcciones estáticas.
70. Modelo de la capa meteorizada para la línea SG-2002-1840.
71. Corrección de las anomalías estáticas.
72. Efecto normal moveout en un CMP gather de la línea SG-2002-1840.
73. Corrección del efecto NMO para un reflector horizontal.
74. Distorsión de frecuencias en los eventos someros y de gran offset producto de la corrección del efecto NMO, en un CMP gather de la línea SG-2002-1840.
75. Apilado de la línea SG-2002-1840 después de corregir el efecto NMO.
76. Método (constant velocity stack) para el cálculo de la velocidad de apilamiento de un evento en la línea SG-2002-1840.
77. Diagrama de velocidades de apilamiento de la línea SG-2002-1840.

78. Anomalías estáticas residuales presentes en un gather CMP.
79. Desviación del tiempo de viaje hiperbólico en un gather corregido por NMO
80. Modelo de estáticas consistentes con la superficie.
81. Horizontes para corrección de las estáticas residuales en la línea SG-2002-1840.
82. Modelo eventos aparentes en una sección sísmica.
83. Modelo de reflexión para un reflector sinclinal en profundidad.
84. Migración de la línea 1840 con apertura de 250 trazas y buzamiento límite de 65°.
85. Migración de la línea 1840 con apertura de 3000 trazas y buzamiento de 65°.
86. Migración de la línea 1840 con apertura de 800 trazas y buzamiento de 60°
87. Migración de la línea 1840 con apertura de teórica de 600 trazas y buzamiento límite de 60°
88. Líneas de reflexión correlacionables y pertenecientes a un mismo evento.
89. Interpretación sísmica de la sección SG-2002-1840
90. Sección geológica de la línea SG-2002-1840
91. Sección Geológica de la línea HSG99-1870 ubicada 4 Km al Norte de la línea SG-2002-1840.
92. Sección Geológica de la línea HSG99-1870 ubicada 4 Km al Sur de la línea SG-2002-1840.
93. Sección sísmica interpretada de la línea HSG99-1870.

LISTADO DE ANEXOS

A. Mapa Geológico del Bloque San Gabriel (1:50.000)
B. Mapa Geológico Línea SG-2002-1840 (1:25.000)
C. Apilado Final de la línea SG-2002-1840
D. Interpretación sísmica de la línea SG-2002-1840
E. Sección Geológica de la línea SG-2002-1840
F. Relación señal/ruido de todos los disparos en la línea SG-2002-1840

RESUMEN

TITULO: MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN DEL SUBSUELO EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL, BLOQUE SAN GABRIEL, V.S.M. *

AUTOR: HERACLIO MEDINA TAMAYO. **

PALABRAS CLAVES: Petróleo, adquisición sísmica, procesamiento, interpretación, modelo geológico.

DESCRIPCIÓN:

El Bloque San Gabriel se encuentra en el extremo Sur-Oeste del Valle Superior del Magdalena cerca al punto donde convergen las Cordilleras Central y Oriental. Hace parte de una provincia geológica compleja deformada por los mismos procesos geológicos que dieron lugar a estas cordilleras. Comprende rocas desde el Precámbrico hasta el reciente, siendo afectadas una última vez durante el Mioceno por un evento de tipo compresivo.

Dicha historia evolutiva generó en el área una topografía muy variable, colocando rocas ígneas de alta densidad sobre rocas cretácicas de interés petrolífero, y basamento pre-cretáceo sobre sedimentos recientes. Esta configuración genera en el Bloque fuertes contrastes de velocidad vertical y lateral, lo que sumado a la presencia de una gruesa capa de meteorización genera artefactos en la información sísmica, y una relación señal ruido muy baja.

La presente tesis de grado describe la adquisición, el procesamiento y la interpretación de una línea sísmica recientemente adquirida en la zona, donde además de los problemas ya mencionados se suma el efecto del ruido aleatorio.

El objetivo del trabajo fue lograr una mejor resolución de los reflectores de interés por medio de técnicas de procesamiento convencional, partiendo de la experiencia en campo y de la integración de la información geológica existente.

El resultado fue una sección geológica interpretable de resolución satisfactoria dada la calidad de los datos en bruto y la ausencia casi total de reflexiones. Además se generó una sencilla interpretación de la sección, la cual, es viable y coherente con la configuración geológica planteada por algunos autores. La intención de este trabajo es reducir la incertidumbre en el riesgo exploratorio del Bloque San Gabriel y ayudar a precisar el modelo geológico realizado por ECOPETROL.

*Proyecto de Grado, Modalidad investigación.

**Facultad de ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Geología, Iván D. Olaya, Ricardo Mier, Trino Salinas

SUMMARY

TITLE: IMPROVEMENT OF THE SUBSOIL IMAGE IN THE ORIENTAL MONTAIN RANGE´S OCCIDENTAL FOOTHILL, SAN GABRIEL BLOCK, V.S.M. *

AUTHOR: HERACLIO MEDINA TAMAYO. **

KEY WORDS: Petroleum, seismic acquisition, seismic processing, interpretation of seismic data, geologic model.

DESCRIPTION:

The San Gabriel Block is in the Southwestern end of the Upper Magdalena Basin near to the point where the Central and Eastern mountain ranges converge. It is part of a complex geologic province deformed by such geologic processes that gave rise to these mountain ranges. It includes rocks from the Precambrian to the recent age, being affected a last time during Miocene by an event of compressive type.

This evolutionary history generated in the area a very variable topography, placing igneous rocks of high density on cretaceous rocks of petroliferous interest, and plinth pre-cretaceous on recent sediments. This configuration generates in the Block strong variations of vertical and lateral speed, which added to the presence of a thick weathering layer, generates artifacts in the seismic information, and a very low signal noise ratio.

The present thesis of degree describes the acquisition, the processing and the interpretation of a seismic line recently acquired in the zone, where in addition to the problems already mentioned the effect of the random noise is added.

The objective of the work was to obtain one better resolution of the reflectors of interest by means of techniques of conventional processing to low cost, starting off of the experience in field and the integration of the existing geologic information.

The result was an interpretable geologic section of satisfactory resolution given the quality of the raw data and the almost total absence of reflections. In addition the work generated a simple interpretation of the section, which, is viable and coherent with the geologic configuration raised by some authors. The intention of this work is to reduce the uncertainty in the exploratory risk of the Block San Gabriel and to help the accuracy of the geologic model made by ECOPETROL.

*Degree Project, Investigation Modality.

**Physical and Chemical Engineering Faculty, Geology School, Iván D. Olaya, Ricardo Mier, Trino Salinas

OBJETIVOS

Objetivos Generales.

- Aportar información al conocimiento geológico del extremo sur del Valle Superior del Magdalena. Área Pitalito-Mocoa (Bloque San Gabriel)

- Reducir la incertidumbre en la exploración del Bloque San Gabriel mediante el mejoramiento de su imagen de subsuelo.

Objetivos Específicos.

- Hacer un análisis de área que permita escoger los mejores parámetros para el procesamiento de los datos adquiridos en el bloque San Gabriel, aplicándolos a una de las líneas problema recientemente adquiridas.

- Conseguir una mejor resolución de los reflectores de la línea SG-2002-1840 mediante pruebas de parámetros y evaluaciones cualitativas de procesamiento.

- Elaborar un texto de inicio en la adquisición, el procesamiento y la interpretación de datos sísmicos que sirva a estudiantes y profesionales interesados en el control de calidad de los datos adquiridos en un programa sísmico.

- Contribuir a precisar el modelo geológico en esta zona del país.

INTRODUCCIÓN

Con la disminución de los escenarios exploratorios (***plays***[1]) de alta facilidad y bajo el aumento en la demanda interna y externa de los combustibles orgánicos, ha crecido en los últimos años un profundo interés por explorar y desarrollar técnicas que permitan recuperar las acumulaciones de hidrocarburos presentes en las zonas de geología compleja.

Es por eso que en la última década se demarcaron estas áreas en bloques exploratorios y se realizaron incontables estudios estratigráficos, estructurales, geoquímicos y geofísicos entre otros. No obstante debido a las características propias de cada zona los resultados de dichos estudios algunas veces no han sido satisfactorios, como es el caso de la adquisición de información sísmica en el Bloque San Gabriel, creando así la necesidad de trabajar de manera más intensa la información con el fin de lograr su mejoramiento en cuanto a la resolución de los reflectores de interés.

El tema principal de la presente tesis es el procesamiento por medio de técnicas convencionales de los datos sísmicos de baja resolución adquiridos en este bloque.

La utilidad del trabajo radica en mostrar que con técnicas convencionales de procesamiento se logró mejorar la resolución de una información sísmica de mala calidad, entendiendo ésta como la baja relación señal – ruido y no la manera de adquisición de los datos.

[1] En el libro aparecen las palabras en ingles con negrita y estilo cursivo, para que el lector se desplace al glosario, donde se explican en español.

Este trabajo tiene como objetivos fundamentales, cumplir como requisito de grado para optar al titulo de Geólogo, describir las actividades realizadas durante el desarrollo de la tesis y además servir como documento de consulta a todas las personas interesadas en el tema.

La tesis también incluye las labores de adquisición de los datos procesados y una interpretación que confirma una configuración geológica ya planteada por algunos autores, pero no muy tenida en cuenta para el modelo geológico de la zona.

El trabajo se realizó por el interés de ECOPETROL en reducir la incertidumbre de exploración en los Bloques de trabajo, ya que de ello depende directamente el éxito de un prospecto exploratorio y se lleva a cabo mediante la integración de aspectos geológicos como cartografía, conocimiento estructural, conocimiento superficial del terreno, fuentes bibliográficas y fundamentos de adquisición, procesamiento e interpretación de datos sísmicos de reflexión.

La parte práctica del procesamiento se llevó a cabo mediante ensayos de parámetros y análisis cualitativos de los resultados obtenidos. Aunque la muy baja relación-señal ruido y la falta de conocimientos geofísicos impidieron la rápida realización de los esquemas de trabajo, la constancia y las múltiples pruebas de parámetros permitieron conseguir los objetivos planteados.

1. GENERALIDADES

1.1. LOCALIZACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO.

El Bloque San Gabriel corresponde a una franja alargada de cerca de 10 Km de ancho y 60 Km de largo, con orientación aproximada SW – NE, localizada en el extremo Sur-Occidental de la Cuenca del Valle Superior del Magdalena y entre las cuencas del Putumayo y las cuencas del Pacifico y Valle del Atrato. Se encuentra comprendida entre los paralelos 1° – 2° latitud Norte y entre los meridianos 75° – 76° de longitud Oeste de Greenwich. Geopolíticamente se encuentra en la región límite entre los Departamentos de Huila y Cauca. (Figura 1).

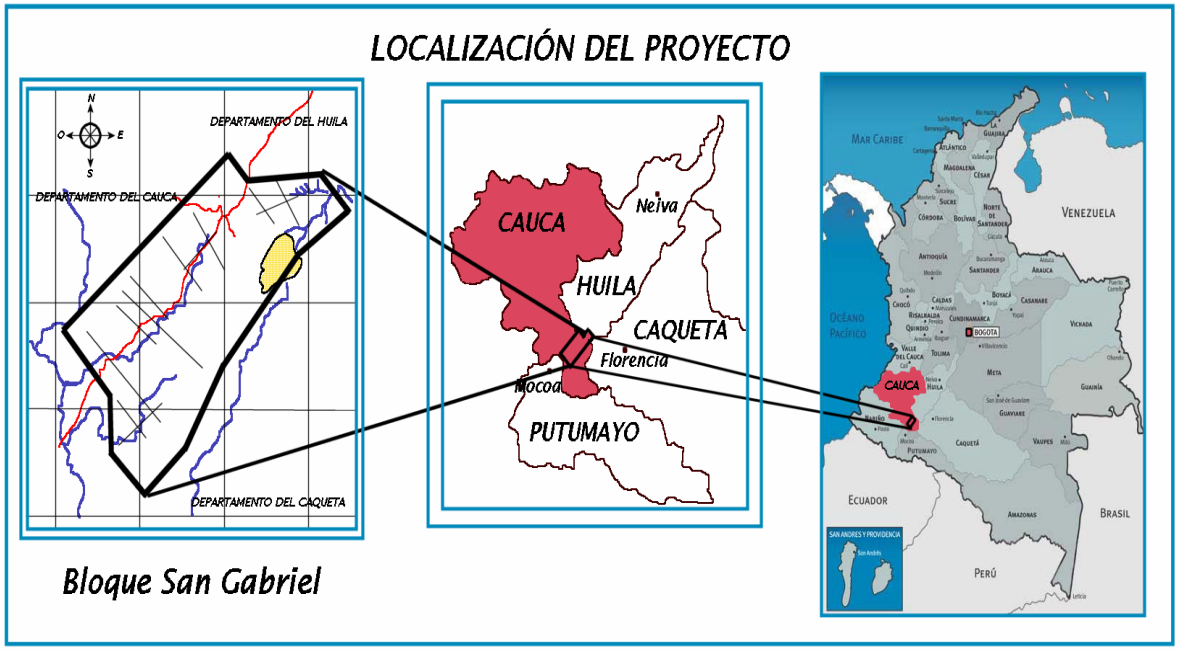


Figura. 1. Ubicación Geográfica del Bloque del San Gabriel.

Según el ECOPETROL las Coordenadas específicas del Bloque se encuentran enmarcadas por los puntos:

PUNTO	COORDENADAS X	COORDENADAS Y
A	772.182	681.590
B	778.565	685.740
C	774.100	676.700
D	777.100	672.800
E	745.100	644.300
F	729.900	644.300
G	723.850	651.900

Tabla 1. Coordenadas específicas del Bloque San Gabriel.

De acuerdo con la proyección de Gauss, con punto de origen en Santa fe de Bogota, con Coordenadas 1'000.000 N y 1'000.000 E. (Figura 2)

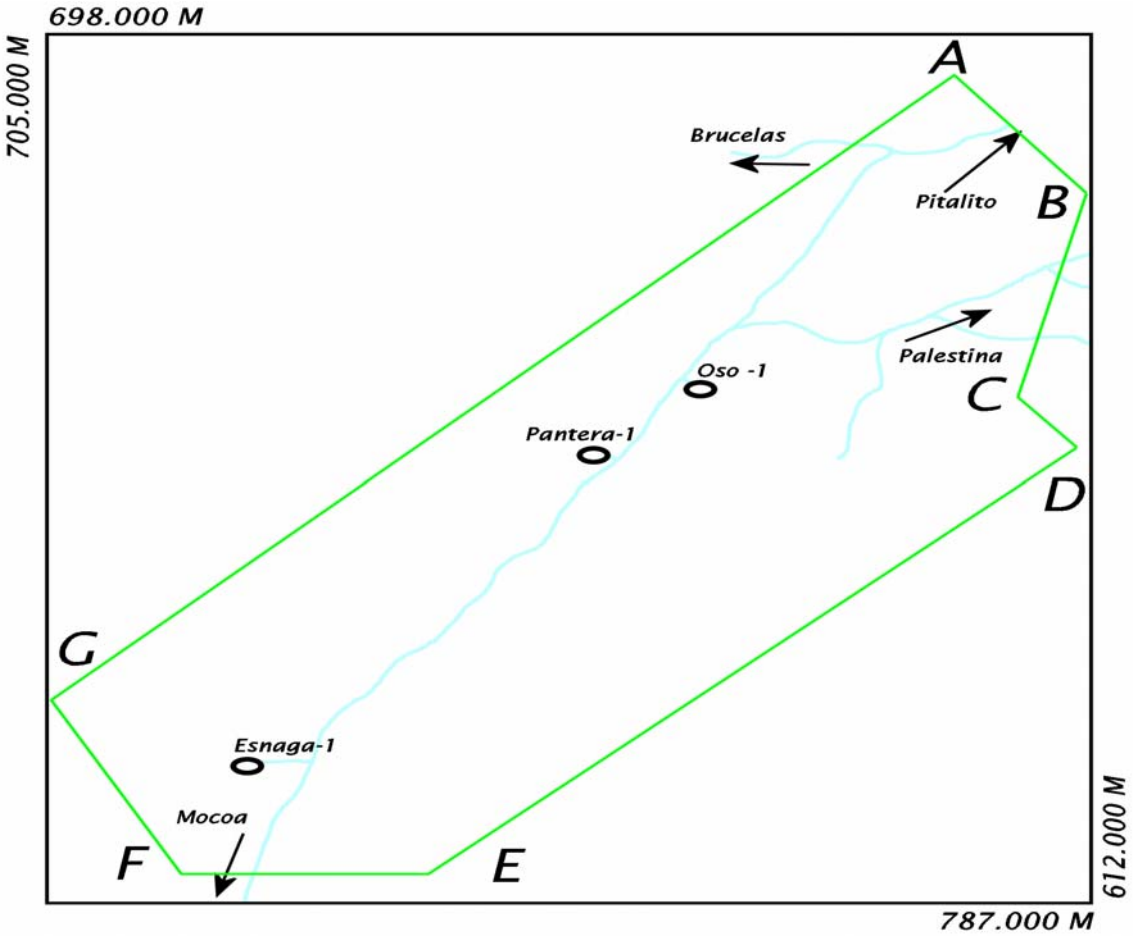


Figura. 2. Coordenadas específicas y vías del Bloque del San Gabriel.

1.2. VÍAS DE ACCESO.

La principal vía de acceso al área del proyecto es la carretera nacional que conduce de los municipios de Pitalito a Mocoa, vía que se encuentra actualmente en construcción pero que esta en muy buenas condiciones para el paso de vehículos particulares y de carga y que atraviesa el área de Norte a Sur, (Figura 2).

También existen una serie de caminos y trochas para el paso de personas y ganado que se desprenden de está vía y que sirven como acceso a las diferentes líneas del programa.

Además en la parte norte se encuentran los carreteables Pitalito-Palestina, Brúcelas-Palestina, Escuela de Montecristo-Palestina, Palestina-San Adolfo y Vereda Jericó-Palestina. En los sectores centro y sur del área además de la vía a Mocoa, solo se encuentran las vías de acceso a los pozos Pantera – 1, Oso – 1 y Esnaga -1.

1.3. HISTORIA EXPLORATORIA.

- La actividad exploratoria en el Bloque inició en los años 50 con reconocimientos geológicos de superficie realizados por la compañía SHELL.
- Las compañías TEXACO y SUNOIL entre 1975 y 1995, realizaron cartografías de superficie e hicieron estudios geofísicos, geoquímicos y petrográficos a partir de muestras de aceite y roca recogidas en los rezumaderos de petróleo presentes en el área. En una segunda fase exploratoria adquirieron aproximadamente 350 Km de datos sísmicos durante los años 1997,1998 y 1999, al final perforaron tres pozos exploratorios: Esnaga-1, Pantera-1, y Oso-1, (Figura 2), que fueron clasificados como no productores, aunque los pozos Esnanga-1 y Pantera-1 presentaron abundantes manifestaciones de CO_2 en las pruebas técnicas.
- En 1996 se realizaron estudios de aerogravimetría y aeromagnetometría para el sector sur del país cuenca V.S.M. y Putumayo, desde Neiva hasta la frontera con el Ecuador, donde se observan en algunos sectores la continuidad de rocas de baja densidad bajo fallas mayores inversas que limitan los piedemontes de las Cordilleras Central y Oriental.

- En 1996 INGETEC realiza para ISAGEN, el estudio de factibilidad para el Proyecto Hidroeléctrico del Alto Caquetá, elaborando mapas geológicos de superficie y muestreo litológico, este trabajo incluye principalmente el Río Caquetá desde su nacimiento hasta el municipio de Puerto Limón en el Putumayo. Involucrando el sector sur del bloque San Gabriel.
- En 1998 ECOPETROL adquiere el programa sísmico Acevedo 98 (HAC-98.138 Km) y reprocesa 64 Km de información sísmica adquirida por TEXACO entre 1997 y 1999 (Figura 3), con lo cual se identifica la continuidad de reflectores cretácico-terciarios hacia el sur del bloque Acevedo e identifican cuatro zonas de interés prospectivo relacionadas con posibles repeticiones de sedimentos en escamas más profundas que las perforadas por los Pozos Oso-1, Esnanga-1 y Pantera-1 y solicita para exploración directa el Bloque San Gabriel. Las zonas de interés prospectivo identificadas inicialmente son las siguientes:

  1- Palestina. Ubicada en límites entre los bloques Acevedo y San Gabriel.
  2- La Petrolera. Relacionada con escamas más profundas que la perforada por el pozo Oso1.
  3- Villalobos al oeste de Pantera-1. Asociada con la extensión hacia el oeste de sedimentos del terciario-cretácico, área donde actualmente se define el Prospecto Compadre-1.
  4- Mandiyaco relacionada con ***plays*** más profundos a los perforados con el pozo Esnanga-1. Constituye el área de mayor riesgo y aún de menor nivel de exploración pero con mayor expectativa de reservas.
- En 1999 ECOPETROL registra el Programa sísmico San Gabriel 99 (HSG-99,152 Km.), con parámetros de adquisición mejor diseñados que los realizados anteriormente, confirma las áreas de interés y los riesgos identificados previamente dada la ausencia de perforación exploratoria para escamas más profundas.
- En 1999 INGEOMINAS elabora la cartografía geológica del área a escala 1:100.000 y ECOPETROL levanta seis columnas estratigráficas del terciario, cretáceo y de la Formación Saldaña en la parte oriental del bloque.

- Durante el 2000 se realizó un estudio de gasometría con 523 puntos separados 500 m en las zonas con mayor importancia exploratoria, Prospecto Compadre-1 y áreas Caucano, Pantera, Palestina, con el fin de identificar y comparar las anomalías de hidrocarburos como las reportadas en el campo Los Mangos y otros sectores donde se han realizado estudios similares y con igual metodología.
- También en el 2001 DUNIA CONSULTORES para ECOPETROL elaboró la cartografía del sector Oriental del bloque aproximadamente 1.100 Km^2 sobre las zonas de interés evaluadas con la gasometría.
- En el 2002 GRANT GEOPHYSICAL para ECOPETROL registra el programa Sísmico San Gabriel 2D (SG-2002, 145 Km.), con el fin de definir mejor las estructuras del Bloque en aquellas zonas de interés prospectivo encontradas durante el reprocesamiento de la información adquirida por Texaco. Esta información pretendía complementarse con la adquirida en el programa HSG-99 (Figura 3) y cubrir aquellas zonas que no cubrió dicho programa, partiendo de la nueva información cartográfica recientemente realizada por DUNIA CONSULTORES.

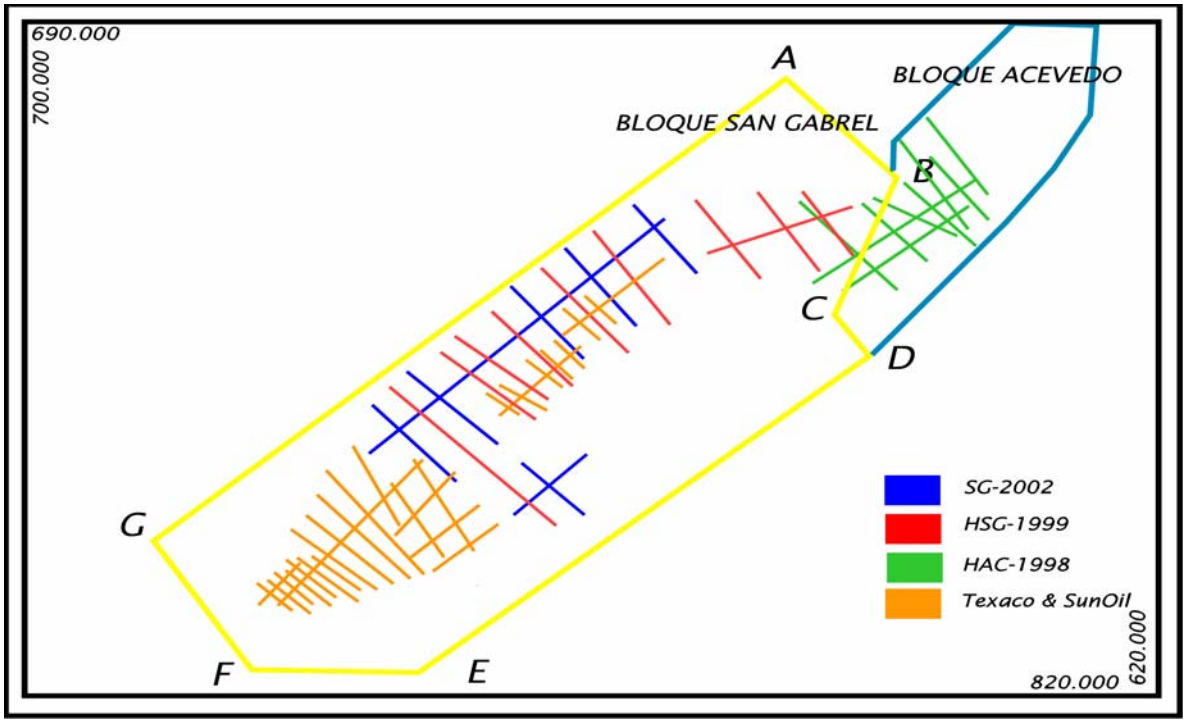


Figura 3. Programas sísmicos realizados en el Bloque San Gabriel y en el Bloque de Acevedo.

1.4 ANTECEDENTES.

Son incontables los estudios geológicos realizados en el Valle Superior del Magdalena, las primeras publicaciones están relacionadas con el estudio y conocimiento de las Cordilleras Central y Oriental así como de las formaciones geológicas de mayor cubrimiento que fueron las primeras en diferenciarse. Algunos de los primeros trabajos que abordaron tanto la estratigrafía como algo de la tectónica son los de Grosse (1926), Hubach (1955), Nelson (1957), Irving (1971), León et al (1973) y Toussaint y Restrepo (1976). Algunos trabajos un poco más recientes son los realizados por estudiantes universitarios como los estudios compilados por la Universidad Nacional de Colombia (1994), bajo la orientación de Etayo, F.

Sobre estudios en el Bloque San Gabriel uno de los más recientes trabajos es la tesis de grado de Polo. M, (2000), donde a partir del análisis de las condiciones de las rocas fuente, reservorio y sello más la posibilidad de que existan estructuras ***sub-thrust*** bajo la superficie, se proponen áreas prospectivas en el extremo sur Oeste del bloque.

En el 2001 Freitas. M, publica las razones del poco éxito exploratorio obtenido en estos ***plays*** tipo *sub-thrust* del valle superior del magdalena, revisándolos a través de casos históricos donde asocia que se presenta menor éxito en trampas *sub-thrust* donde el basamento Pre-cretáceo (Formación Saldaña) sobreyace el objetivo. Concluye que aunque hay múltiples factores que contribuyen, el obstáculo clave común a todos los intentos es la pobre definición estructural producto de las fuertes topografías, complejas geometrías de las trampas, artefactos sísmicos como ***pull-ups***, e inesperada reflectividad interna de la Formación Saldaña. Recomienda combinar técnicas sísmicas modernas, con un mayor uso de adquisición en tres dimensiones y de migración pre apilado.

Roger Higgs (2001) para TALISMAN OIL & GAS realiza una revisión de la literatura sedimentológica de las formaciones Caballos y Monserrate en las cuencas del Putumayo y

del Valle Superior del Magdalena, la cual presenta nuevas implicaciones para la exploración de los Bloques San Gabriel y Acevedo.

En Octubre de 2002 Guevara. S, Salinas. T, y Piedrahita. C, estudian los efecto de los artefactos sísmicos, específicamente en el Valle Superior del Magdalena. El problema se asocia con las capas someras de baja velocidad afectadas por la meteorización, que se encuentran sobre capas de rocas cristalinas de alta velocidad, las cuales a su vez suprayacen rocas sedimentarias de interés petrolífero. Para ello parten de un perfil geológico con esta configuración y generan dos modelos sintéticos del subsuelo donde observan que la configuración rocosa produce un alto nivel de ruido coherente como reverberaciones, validando así las hipótesis planteadas por Freitas (2001). Por último plantean algunos métodos para contrarrestar los efectos observados, como aplicación de filtros y técnicas de migración pre-apilado.

En el volumen 9 (2003) del Fold Research Project. Helen Isaac y Dow Lawton publican "Limitations of conventional seismic data processing in a complex area: an example from Colombia". En este artículo comentan que las técnicas de procesamiento convencional no permiten tratar apropiadamente la información del Bloque San Gabriel debido a la pobre relación señal ruido, que se origina por varios factores como la variable y abrupta topografía, la alta velocidad de las rocas ígneas y a los cambios de velocidad lateral a lo largo de la zona. En su trabajo toman en cuenta las consideraciones realizadas por Guevara, Salinas, y Piedrahita, y logran mediante la aplicación de filtros radiales y técnicas de tomografía y de migración pre-apilado y bajo la hipótesis de puntos de reflexión común (CRP), una sección más interpretable que la obtenida con migración en tiempo. No obstante estas técnicas el trabajo culminan con incertidumbres en el modelo de velocidades debido a la muy limitada información de buena calidad y por consiguiente a la falta de reflexiones coherentes para el picado de las velocidades de apilamiento.

1.5 MÉTODO DE TRABAJO.

El presente proyecto de grado se desarrollo en 2 etapas. La primera de ellas fue la adquisición de los datos y la segunda el procesamiento y la interpretación de los mismos.
Durante la adquisición se trabajó con la cartografía y la información geológica proporcionada por ECOPETROL. En esta etapa se llevó a cabo un estricto control de calidad en las labores de campo, ya que los esquemas de trabajo, coordenadas y parámetros de adquisición ya estaban definidos por la empresa. Esta etapa concluyó con la elaboración de un informe sobre las labores de adquisición y sobre las pruebas de carga en la línea, (Becerra et al. 2003).
La etapa de procesamiento se dividió en una fase investigativa y una fase práctica.
En la primera se recopiló y consultó la información referente a la zona de trabajo y la teoría necesaria para comenzar el procesamiento; durante esta fase se consultaron los trabajos realizados en el Bloque, los informes de geología regional existentes los libros pilares del procesamiento de información sísmica; también se comenzaron a leer los manuales del software de procesamiento.
En la fase práctica se aplicaron de manera interactiva los conocimientos de campo y los conceptos aprendidos en la primera fase del procesamiento. Para lograr una mejor resolución de la imagen bajo la línea se realizaron pruebas con diferentes parámetros. Ya que el proyecto pretendía producir el mejoramiento de la imagen del subsuelo en el Bloque San Gabriel, solo a través de imágenes se podía conseguir este objetivo, por lo tanto la evaluación de los resultados obtenidos se hizo de manera cualitativa dada la imposibilidad de realizar evaluaciones cuantitativas de las imágenes.
La segunda fase del procesamiento se realizó con la ayuda del software Geo-Científico ProMAX 2D (Landmark Inc. 1998) y en estaciones de trabajo "SUN".
Por último se hizó la interpretación geológica de la línea, la cual cumple con los conceptos estructurales del balanceo de secciones y se hizo una discusión acerca de modelo geológico existente y de las implicaciones derivadas de la imagen conseguida con este procesamiento.

A continuación se presentan de manera resumida las dos etapas del trabajo.

Parte 1. Adquisición.

- Control de calidad de los parámetros establecidos para la toma de datos.

Parte 2. Fase investigativa.

- Recopilación bibliográfica (geología, procesamiento, antecedentes).
- Lectura y análisis de textos sobre la geología del área.
- Lectura y análisis de trabajos realizados en el Bloque San Gabriel.
- Lectura y análisis de textos sobre procesamiento de datos sísmicos.
- Lectura y análisis de manuales del software
- Lectura y análisis de textos sobre los pilares del procesamiento

Parte 2. Fase practica "Aplicación de tecnología y el conocimiento al desarrollo del objetivo planteado"

- Comparación y chequeo de geometría.
- Revisión y Edición de trazas ruidosas, muertas e invertidas.
- Búsqueda de disparos anómalos.
- Apilado bruto.
- Cálculo de estáticas de elevación.
- Cálculo de correcciones ***Normal Move Out*** (NMO).
- Cálculo de estáticas residuales.
- Análisis de velocidades y apilado.
- Cálculo de estáticas residuales después del análisis de velocidad y apilado.
- Migración después del apilado.
- Interpretación y discusión de las implicaciones derivadas de la imagen.

2. GEOLOGÍA

2.1 ESTRATIGRAFÍA.

En el Bloque San Gabriel afloran rocas metamórficas del precámbrico, rocas intrusivas, sedimentarias y vulcano-sedimentarias del Jurásico, sedimentitas cretácicas y terciarias; y depósitos cuaternarios de talud, terrazas y rellenos de valles aluviales. La denominación de las unidades para la descripción estratigráfica y la cartografía geológica es la usada normalmente por la industria en el Valle Superior del Magdalena y en el Putumayo.

Estas unidades afloran en la parte estructuralmente deformada del sur de la Cuenca del Valle Superior. La figura 4 muestra la sucesión litológica generalizada para las rocas aflorantes en el Bloque y la figura 5 presenta su distribución.

Las edades de estas formaciones varían entre el Precámbrico y el Cuaternario. Son unidades muy conocidas y existe abundante literatura sobre ellas.

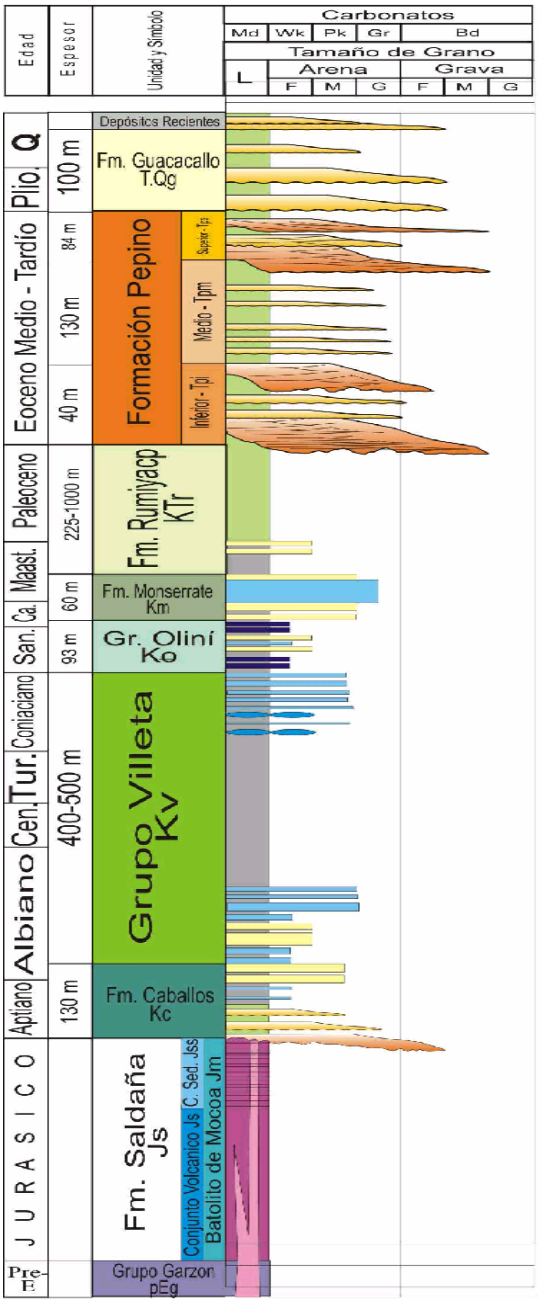


Figura 4. Columna estratigráfica Generalizada del Bloque San Gabriel. Tomada de Maya et al, 2001.

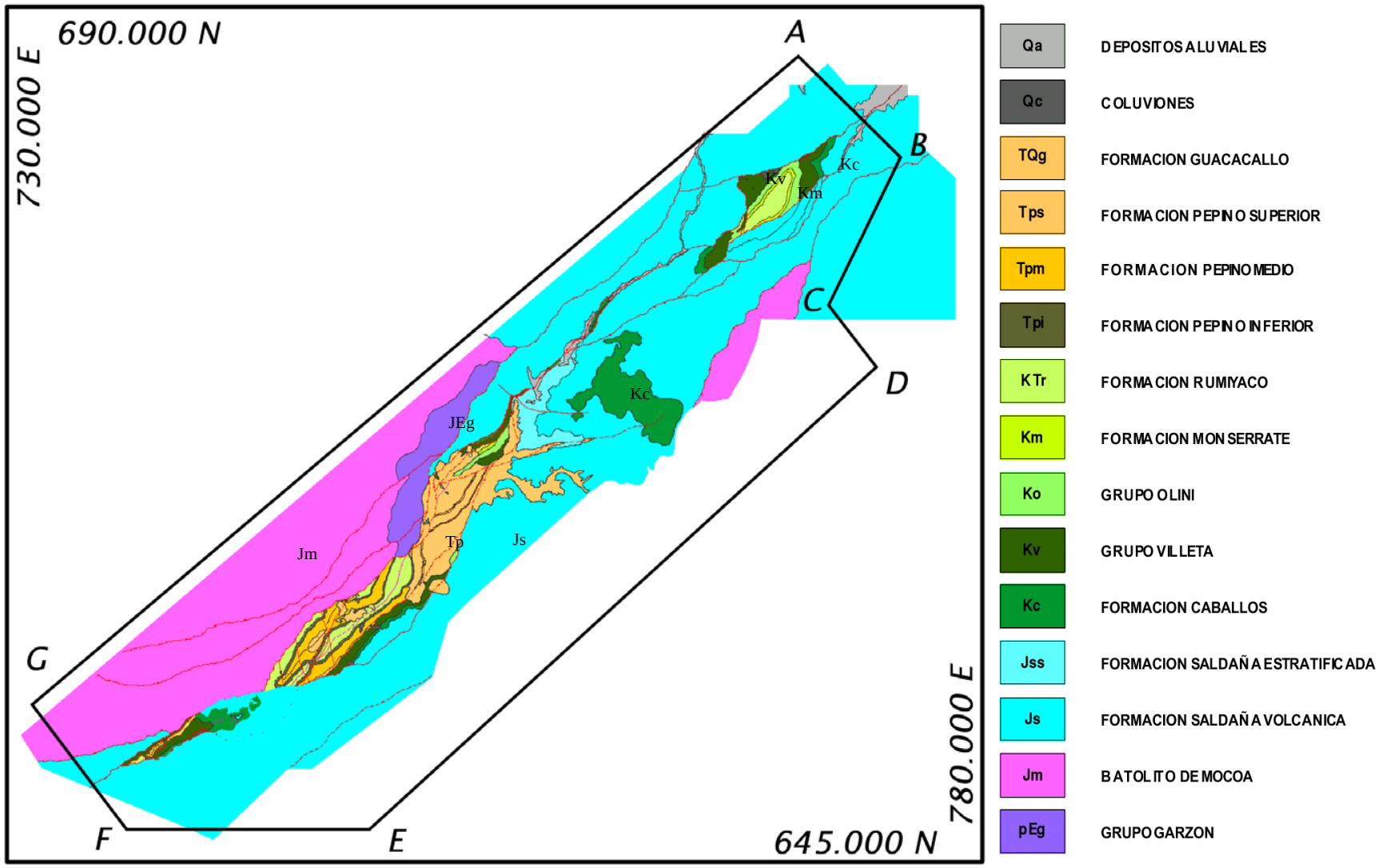


Figura 5. Mapa Geológico del Bloque San Gabriel. (Ver anexo A). ECOPETROL 2001

A continuación se reseñan las unidades litoestratigráficas aflorante en el sector de una manera muy general y de acuerdo a la nomenclatura usada por ECOPETROL en el Valle Superior del Magdalena y en el Putumayo.

2.1.1 Basamento.

2.1.1.1 Grupo Garzón. (PEg)

Se refiere al conjunto de rocas con alto grado de metamorfismo que constituye la unidad en superficie más antigua del área.

Distribución y extensión.

Esta unidad aflora únicamente en la parte Occidental del área y hace parte del bloque colgante de la Falla San Francisco - Yunguillo, corresponde a un cuerpo elongado en dirección NNE-SSW, con extensión aproximada de 2 Km de ancho y 15 Km de largo.

Descripción.

En general se trata de rocas con alto grado de metamorfismo, de facies granulita y anfibolita alta, con textura néisica, mostrando una clara alternancia de bandas claras y oscuras, el espesor de este bandeamiento rara vez supera los 10 cm, los neises presentan variaciones texturales a migmatítas.

Edad.

Según Maya et al, (2001) se asume una edad precámbrica para esta unidad por comparación con rocas metamórficas que presentan el mismo grado de metamorfismo y características texturales muy semejantes con las que afloran en el Macizo de Garzón.

2.1.2 Jurásico.

2.1.2.1 Formación Saldaña. (Js)

El primero en usar el término Formación Saldaña fue Cediel et al, (1980), para describir aquellos cuerpos constituidos por intercalaciones de piroclastitas, vulcanitas y sedimentitas del Mesozoico inferior que afloran en el Valle Superior del Magdalena, postulando así mismo que sus materiales se acumularon en ambientes continentales y lacustres, como producto de estrato-volcanes.

Distribución y extensión.

Las rocas de la Formación Saldaña afloran en todo el borde Oriental del piedemonte de la Cordillera Central y en la parte Sur-Oeste del correspondiente a la Cordillera Oriental, hacia el río Magdalena; igualmente se encuentra en los bloques levantados del Valle Superior.

Descripción.

La Formación Saldaña se caracteriza por presentar una mezcla heterogénea de depósitos piroclásticos de variada composición: flujos de escombros, flujos de lavas y depósitos epiclásticos o piroclásticos resedimentados.

Contactos.

Las rocas de está Formación están relacionadas espacial y composicionalmente con cuerpos intrusivos, distribuidos por toda el área. Presenta contactos fallados y discordantes con la parte basal del Cretáceo. Fallas inversas hacen que esta Formación cabalgue sobre el Cretáceo y el Terciario.

Edad y espesor.

Por estudios paleontológicos y radiométricos (Florez y Carrillo, 1993) se deduce que la acumulación de los materiales de la Formación Saldaña comenzó en el Triásico tardío posiblemente durante la era noriana y el vulcanismo se extendió hasta principios del Cretáceo.
La sección presenta un espesor aproximado de 800 a 1200 metros en la zona de estudio (Polo y Vence. 2001) y en algunos sectores de la cuenca excede los 2000 metros (Mejía y García. 2000).

2.1.2.2 Batolito de Mocoa. (Jm)

Bajo este nombre se agrupa a las diferentes facies de plutonitas con texturas claramente faneríticas que intruyen al Grupo Garzón en el oeste y que han sido reconocidas como integrantes del cinturón de intrusivos de edad jurásica que se extiende desde el Ecuador (Plutón de La Bonita) hacia el norte, por la Cordillera Central (Batolitos de Suaza, La Plata, e Ibagué, etc.).

Distribución y extensión.

Se presenta como un gran cuerpo alargado que cubre la parte más Sur-Occidental del área en el sector, desde el Río Verdeyaco hasta el río Suacita, en el bloque colgante del sistema de fallas con vergencia Oriental, en donde constituye las mayores elevaciones topográficas del área; y también aparece en el sector Nor-Oriental del área como una franja alargada con orientación NNE - SSW del bloque colgante de la Falla de los Pinos.

Descripción.

Esta unidad muestra textura fanerítica y composición principalmente granodiorítica y cuarzomonzonítica, con variaciones locales a diorítica y granítica; son rocas masivas, holocristalinas, compuestas por cuarzo, plagioclasa, biotita, feldespato potásico y

anfíboles, en diferente proporción; el tamaño mediano y grueso, colores gris claro, gris verdoso y rojizo, y con frecuente meteorización esferoidal; es común apreciar diques básicos afaníticos de color verdoso, composición andesítica a basáltica, que llegan a tener hasta más de un metro de espesor cortando este cuerpo intrusivo.

Edad.

Dataciones radiométricas indican que se trata de una intrusión del Jurásico Inferior, contemporánea o ligeramente posterior al vulcanismo del Saldaña. Localmente los intrusivos infrayacen a la Formación Caballos y por lo tanto debieron constituir fuente importante de aporte para la sedimentación Cretácica inicial.
La superficie del intrusivo por debajo de la Formación Caballos se aprecia intensamente meteorizada. (Etayo, 1994)

2.1.3 Cretácico.

2.1.3.1 Formación Caballos. (Kc)

Constituye la unidad basal del Cretáceo en el área. El nombre fue primero aplicado por Olson (1956) en Vergara et al (1995), para las areniscas básales de la cuenca del Putumayo y fue adoptado por la industria, para la estratigrafía del Valle Superior del Magdalena.

Distribución y extensión.

La Formación Caballos aflora en gran parte del área. De Sur a Norte sus principales afloramientos se presentan en el bloque colgante de la Falla de Villalobos, en la zona entre los dos sistemas de fallas donde quedan varias ventanas de la Formación Caballos desde el puente del Río Villalobos hasta el Cerro de Las Antenas y en el Sinclinal de Palestina en el Norte. Los afloramientos más continuos y accesibles están a lo largo de la vía a Mocoa, entre La Horqueta y el puente sobre el río Villalobos. Las areniscas de está formación se

depositaron en un ambiente marino superficial y tranquilo durante un periodo de trasgresión.

Descripción.

La Formación Caballos se compone de una sucesión grano-decreciente que Beltrán y Gallo (1968) separan en tres conjuntos: uno inferior, integrado por conglomerados y areniscas gruesas, uno intermedio de shales carbonosos con intercalaciones de areniscas fino-granulares y otro superior, de areniscas cuarzosas de grano fino a medio en capas gruesas, sub-tabulares.

Edad y espesor.

A esta unidad se le ha asignado, una edad comprendida entre el Aptiano y el Albiano tardío, con base en determinaciones palinológicas. (Mora, 1988 en Ujueta, 1999). En el área la Formación Caballos tiene un espesor entre 70 y 90 metros (Polo y Vence, 2001)

2.1.3.2 Formación Villeta. (Kv)

El nombre fue primero usado por Hettner (1892) en Barrio y Coffield (1992), para describir una secuencia espesa de shales negros expuestos en el pueblo de Villeta, en el área de Cundinamarca. Este nombre fue posteriormente adoptado para la Cordillera Oriental y en la estratigrafía del Magdalena Superior.

Distribución y extensión.

Se encuentra bien distribuida por toda el área, generalmente en la zona deprimida que queda en el bloque yacente de los dos sistemas de fallas con vergencias contrarias, sus principales exposiciones están en la carretera Pitalito – Mocoa, en el sector entre la quebrada Quebradona y el cerro de Las Antenas, y en el sinclinal de Palestina.

Descripción.

Se caracteriza por una espesa secuencia de shales negros marinos, hacia la base, carbonatos y calizas nodulares en el medio y capas arenosas menores hacia el techo.
Los shales presentan foraminíferos, restos de peces y a menudo pirita. En la parte media existen concreciones calcáreas que alcanzan hasta 3 metros de diámetro (Macia, et al, 1985). Esta unidad se depositó en condiciones de calma y en condiciones reductoras con profundidades reducidas a superficiales con abundancia de materia orgánica.

Edad y espesor.

Se ha determinado mediante amonitas que su depositación duró desde el Aptiano tardío hasta el Coniaciano (Etayo et al, 1994). Según Maya et al, (2001) el espesor total de la unidad en el área de San Gabriel está entre 400 y 550 metros.

2.1.3.3 Grupo Oliní. (Ko)

Se ha denominado como Grupo Oliní a la sucesión de rocas silíceas en capas delgadas y tabulares, que conforman una unidad diferenciable y cartografiable; se manifiesta en el terreno como un nivel duro entre las depresiones del Grupo Villeta y los pequeños filos de la Formación Monserrate.

Distribución y extensión.

La unidad aflora en el bloque yacente de la Falla del Villalobos, cerca al río; en el sinclinal de La Petrolera; en la vía al pozo Oso –1 y en el Sinclinal de Palestina.
Esta unidad reposa concordantemente sobre pelitas del Grupo Villeta, y su límite superior con la formación Monserrate es neto y concordante.

Descripción.

Esta secuencia se compone de capas tabulares y lenticulares de lodolitas y limolitas silíceas de color gris claro con algunas concreciones de micríticas y capas tabulares. Hacia la parte media de la unidad las lodolitas alternan con delgados de lentes de cuarzoarenitas de grano fino y algunas capas delgadas y medianas de fosforita con abundantes restos de peces. Hacia el techo de la sucesión se aprecia otra secuencia de limolitas silíceas en capas delgadas, lentiformes y tabulares, con laminación plano paralela, con abundantes restos de peces e intercalaciones de capas de chert negro

Edad y espesor.

En el Valle Superior del Magdalena, la edad ha sido determinada con base en palinomorfos y dinoflagelados como Coniaciano tardío – Santoniano – Campaniano (Jaramillo y Yepes, 1994 en Maya et al, 2001). Se ha estimado un espesor total de 100 m para el Grupo Oliní.

2.1.3.4 Formación Monserrate. (Km)

Es la unidad más reciente de la sucesión cretácea y que aflora en el área de San Gabriel, presenta características marinas – litorales. También se le conoce como Formación Guadalupe

Distribución y extensión.

La Formación Monserrate se presenta en el sector del sinclinal de Palestina, donde se reconoce como un filo delgado y continuo, que es más claramente reconocible hacia el flanco Occidental de la estructura; en el sector de la Petrolera se encuentra en el núcleo del sinclinal del mismo nombre y algunos afloramientos se distinguen en la Quebrada Quebradona.

Descripción.

Consiste de una unidad de areniscas con algunas intercalaciones de areniscas conglomeráticas, limolitas, lititas y chert. Las areniscas cuarzosas de grano fino a medio generalmente van de gris claro a blanco. Se depositó en llanuras de mareas y plataformas someras, esta formación está representando el retiro del mar cretácico.

Edad y espesor.

Según estudios realizados por Ujueta (1999), está formación corresponde al Campaniano-Mastrichtiano, edad sugerida también por Etayo (1994)

2.4 Terciario.

2.1.4.1 Formación Rumiyaco. (Tr)

Se conoce como Formación Rumiyaco a la unidad blanda que se interpone entre la Formación Monserrate y la secuencia clástica de la Formación Pepino. También se le conoce como la Formación Guaduas

Distribución y extensión.

Aflora en el extremo Sur del área, en la quebrada Santa Lucía, en el sector de las estructuras complejas del Sinclinal de Cajones y núcleo del Anticlinal de Cajones – La Babosa; en el norte del área forma parte del núcleo del sinclinal de Palestina.
Su contacto inferior es neto y concordante con la Formación Monserrate, su límite superior es la discordancia angular con el primer nivel de conglomerados de la Formación Pepino.

Descripción.

Se compone de arcillolitas rojas y lodolitas de varios colores, intercaladas con litóarenitas friables, micáceas, de grano fino a medio, con laminación inclinada, en capas medias a

gruesas cuneiformes a sub-tabulares. Su ambiente es transicional entre marino somero y continental (Mejía y Diederix, 1993).

Edad y espesor.

Esta Formación presentó un espesor de 403 metros durante la perforación del pozo exploratorio Pantera 1 y de 670 metros en la perforación del Esnaga 1. Su edad según Van der Hammen en Caceres (2000) es Mastrichtiano Tardío a Paleoceno.

2.1.4.2 Formación Pepino. (Tp)

Se ha designado como Formación Pepino a la sucesión de rocas clásticas de origen continental que suprayace a la Formación Rumiyaco.

Distribución y extensión.

La Formación Pepino aparece en el bloque yacente de la falla de San Francisco – Yunguillo, se extiende desde el sur de la vereda La Petrolera hasta el límite sur del área de estudio; esta unidad se encuentra involucrada en las estructuras del Sinclinal de Cajones y el Anticlinal de Cajones – La Babosa. (Maya et al, 2001)

Descripción.

Esta formación está constituida principalmente por conglomerados y areniscas con abundantes clastos de chert. La unidad fue subdividida en tres niveles. (Mejía y Diederix, 1993). El nivel inferior corresponde a conglomerados y capas muy gruesas de chert. El nivel medio está compuesto por una secuencia grano creciente que inicia con ruditas de Chert y pasa luego a arenitas líticas conglomeráticas. El nivel superior está conformado por capas conglomeráticas intercaladas con capas coloridas de chert y capas de lodolitas arenosas de colores marrón.

La alternancia de conglomerados y areniscas refleja intermitencias en el levantamiento del área de aporte (Polo y Vence, 2001)

Edad y espesor.

No se conocen dataciones de esta unidad, pero por su posición estratigráfica reposando sobre la superficie de discordancia regional que se ha identificado como Eoceno en todo el país y su similitud con el grupo Gualanday, se ha asumido una edad Eoceno tardío – Oligoceno. (Maya, 2001)
Su espesor se reportó como 490 y 680 metros en las perforaciones de los pozos Esnaga 1 y Pantera 1 respectivamente.

2.1.4.3 Formación Guacacallo. (TQg)

Se reconoce como la unidad más reciente de la sucesión de rocas del Terciario, que cubre discordantemente a las demás unidades descritas anteriormente, se caracteriza por formar valles y relieves suaves.

Distribución y extensión.

Se extiende desde el Valle del río San Juan, en cercanías a San Juan de Villalobos en el Sur, hasta el sector del río Los Cauchos a la vereda. La Petrolera en el Norte; en toda esta área cubre de manera discontinua a las unidades y estructuras preexistentes.

Descripción.

La Formación Guacacallo presenta muy pobres exposiciones pero consta de una sucesión de rocas piroclásticas, conformada por conglomerados en bloques de composición variada, ígnimbritas y capas de ceniza volcánica.

Edad y espesor.

La edad fue determinada por Van der Wiel (1991) como Plio-Pleistoceno, por el método de K – Ar y determinaciones de huellas de fisión en circones.
Debido a la irregularidad de los depósitos, no es fácil medir su espesor, pero se estima que es inferior a 100 m, (Maya et al, 2001).

2.1.5 Reciente

2.1.5.1 Depósitos recientes (Qa, Qc)

Se clasifican dentro de este grupo, los depósitos coluviales (Qc), los depósitos aluviales y las terrazas (Qa) generados por acumulaciones de gravas, arenas y lodos, en donde intervinieron corrientes de primer y segundo orden. Estos depósitos llegan a tener espesores de hasta 50 m y la edad más apropiada es del Holoceno.

2.2 GOLOGIA ESTRUCTURAL

La Geología Estructural del Bloque San Gabriel está muy asociada a la del Valle Superior del Magdalena y se encuentra influenciada por los mismos procesos, aunque presenta algunas diferencias debido a que se encuentra en el extremo Sur Oeste del Valle, donde se aprecia de manera más clara el levantamiento progresivo de la Cordillera Central durante el Cretáceo, hecho evidente por la disminución en el espesor de las Formaciones Villeta y Monserrate durante la regresión del Cretáceo. (Mejía y Diederix, 1993).

El Bloque San Gabriel se encuentra dentro de una cuenca elongada, limitada por fallas inversas de alto grado que generaron el cabalgamiento de las unidades más antiguas. En su margen Occidental está limitado por la Falla San Francisco de Yunguillo, mientras que al margen Oriental lo limita el sistema de fallas Los Pinos, Villalobos y Palestina.

El fallamiento de las unidades básales se produjo por fuerzas compresivas provenientes del Oeste y son debidas al proceso de subducción-obducción de las placas de Nazca y el Pacífico, (Polo y Vence, 2001).

Posteriormente durante la Orogenia Andina en el Plioceno se produce una nueva deformación que afecta a la secuencia depositada durante el Cretáceo y Terciario. Es por esto que algunos autores como Ressetar y Barrio (1990), afirman que el estilo estructural en el área de San Gabriel es el reflejo del levantamiento de la Cordillera Central, basados en las estructuras semejantes a las encontradas en el margen Oeste de todo el Valle Superior del Magdalena.

Debido a la alta complejidad tectónica se pueden encontrar en superficie gran variedad de unidades que tienen por lo general contacto fallado con las unidades aledañas.
La gran mayoría de estructuras tienen carácter regional, especialmente las fallas de cabalgamiento. Las tres estructuras sinclinales conservan un carácter local y su núcleo esta conformado por rocas de la Formación Pepino.

Una característica destacable en el área San Gabriel es la dirección preferente SW-NE del tren principal de fallas que atraviesan en su mayor parte el Bloque, estas son más aparentes en la imagen de radar de la zona. (Figura 6).

2.2.1 Descripción de estructuras

Según Maya et al, (2001) en el Bloque existen tres sistemas de fallamiento, cada uno con patrones geométricos particulares; estos sistemas particulares conforman el sistema estructural general de la región. Las evidencias indican que el alto grado de deformación ha sido generado por la superposición de cinturones de cabalgamiento, con vergencia contraria e intensa componente lateral, lo que ha dejado como resultado una zona triangular central, intensamente plegada, constituida principalmente por unidades sedimentarias del Cretáceo y el Terciario.

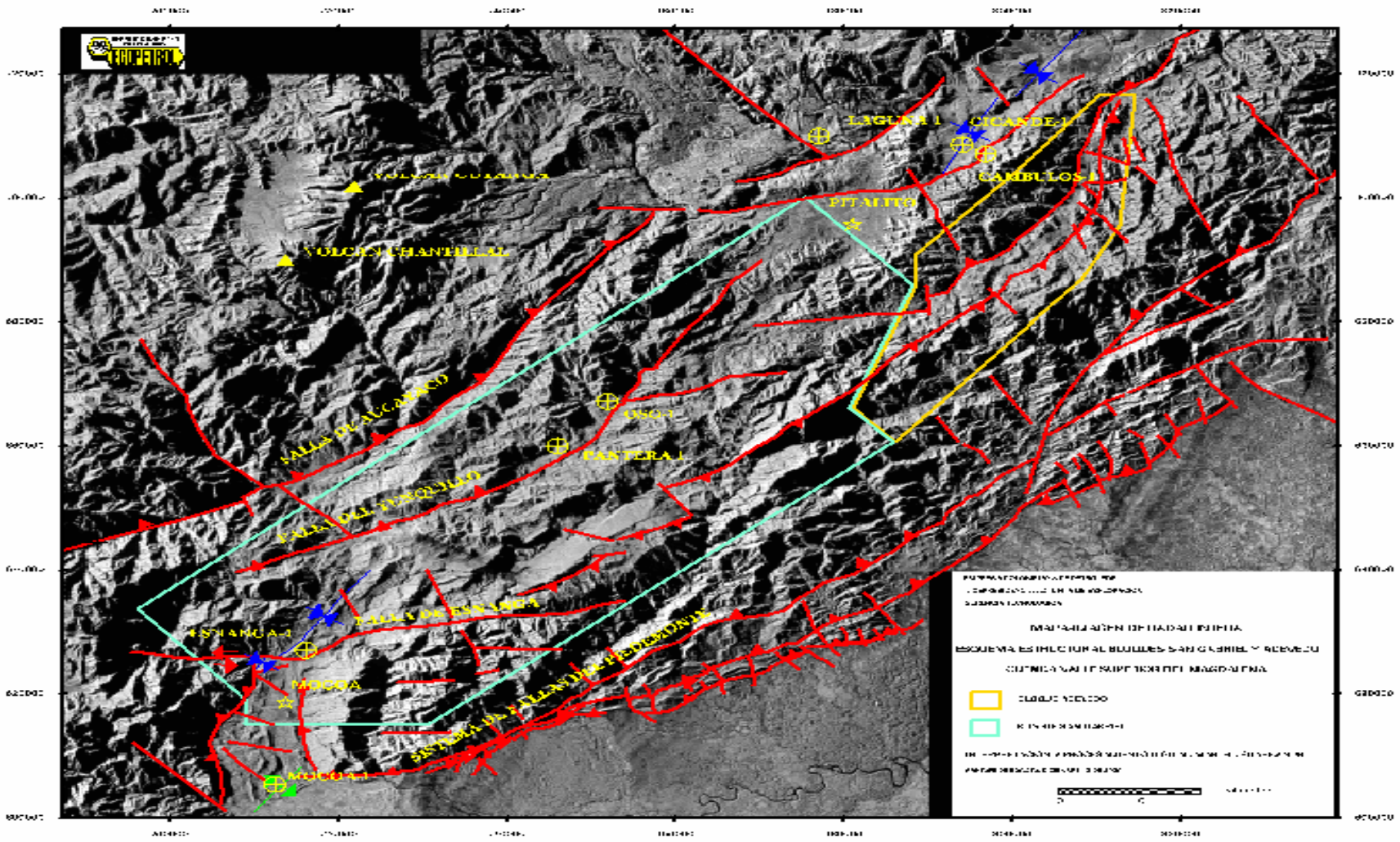


Figura 6. Imagen de radar y principales rasgos estructurales extremo Sur del Valle Superior del Magdalena. Tomada de Lombo y López 2001.

Se reconoce entonces un sistema de fallas con vergencia Occidental que domina la parte Oriental del área, un sistema de fallas con vergencia Oriental al Oeste del área y un sistema de fallas de rumbo que actúa en la zona triangular al centro de la zona de estudio.

2.2.1.1 Sistema de fallas con vergencia Occidental

Este sistema ocurre en el sector Oriental del área, está conformado por varios cabalgamientos con dirección principal SW – NE, la inclinación de las fallas es de 30° a 50°, la vergencia es principalmente Nor-Occidental a Occidental, e involucra superposición de escamas de rocas del Jurásico y el Cretácico, sobre la secuencia sedimentaria del Cretácico y el Terciario.

En este sistema las principales fallas son las siguientes:

Falla Villalobos

Es la falla principal del sistema de fallas con vergencia Occidental, tiene una inclinación de 40° a 45°, el trazo de la falla es ligeramente sinuoso, variando su dirección de SSW – NNE desde el sur del área hasta cercanías de la vereda La Petrolera, en donde pasa a una dirección aproximada SW – NE, hasta el sector de Santo Domingo y vuelve a tener una dirección SSW – NNE que mantiene hasta el sector de Palestina al Norte del área (ver Anexo 1). Transporta en su bloque colgante a rocas de la Formación Saldaña y contiene en el bloque yacente a las Formaciones Caballos, Oliní y Monserrate, en el sector de San Eduardo, a la Formación Saldaña en el sector de la vereda Santo Domingo y a la Formación Saldaña y las unidades básales del Cretáceo en el sector de Palestina.

Falla San Eduardo

Esta falla es la más frontal del sistema, en el sector comprendido desde la vereda San Eduardo en el Norte, hasta al Sur de la desembocadura de la Quebrada Cajones en el río

Villalobos, tiene una dirección SW – NE y su inclinación es de 40°. Pone en contacto rocas de las unidades Villeta y Oliní sobre rocas del Terciario pertenecientes a la Formación Pepino.

Falla Guarapas

Esta falla aflora en el sector de Palestina y es la responsable de los alineamientos del río Guarapas entre las veredas Jericó y El Tabor (Geoestudios, 1998), en donde se une a la Falla de Villalobos para seguir como Falla de Guarapas - Villalobos hacia el Norte, tiene una dirección general SW – NE, una inclinación cercana a los 40° e involucra a rocas de la Formación Saldaña.

Falla Los Pinos

Es la falla más Oriental de este sistema de fallas en el área de estudio, su trazo tiene una orientación SSW – NNE hacia el Sur y SWW – NEE en el extremo Nor-Oriental del área, su inclinación es de 35°. Al Sur es el límite entre rocas intrusivas del Batolito de Mocoa en el bloque colgante y rocas de la Formación Saldaña en el bloque yacente, mientras que hacia el Nor-Este solo afecta a rocas volcánicas de la Formación Saldaña.

Falla Palestina

Es una falla derivada de la Falla de Villalobos que corta el flanco Oriental del sinclinal de Palestina, tiene una orientación SW – NE y una inclinación de 35°. El desplazamiento de esta falla no es muy grande ya que pone en contacto a las unidades Saldaña, Caballos y Villeta, sobre estas mismas unidades y sobre la Formación Rumiyaco en el núcleo del sinclinal.

2.2.1.2 Sistema de fallas con vergencia Oriental

Corresponde a un sistema de fallas de cabalgamiento con intensa componente dextro-lateral que aflora en la región Occidental del área de San Gabriel, tiene una vergencia Oriental a Sur-Oriental, los trazos de las fallas son escalonados y van cortando las estructuras del bloque yacente confirmando la asociación de movimientos rumbo-deslizantes con este sistema. Las fallas más frontales del sistema con vergencia Oriental cortan a las fallas del sistema con vergencia Occidental, lo cual sugiere que las primeras son más recientes. A este sistema pertenecen las siguientes fallas:

Falla San Francisco – Yunguillo

Es la falla principal de este sistema, su trazo puede seguirse por todo el sector Occidental del área de estudio y es común ver brechas y foliación en las rocas involucradas en la falla (Maya et al, 2001). Su trazo varía continuamente de dirección, pero se puede simplificar mencionando que al Sur-Oeste de la vereda Buenos Aires su orientación es SWW – NEE y desde este punto hasta el Norte del área pasa a tener una dirección SW – NE. La inclinación de estas fallas es de 30° a 40°.
Transporta desde el noroeste una escama del Batolito de Mocoa colocándola sobre las formaciones Saldaña, Caballos y Villeta al sur de la vereda Buenos Aires, y sobre la secuencia sedimentaria del terciario entre este punto y la quebrada La Babosa; entre la quebrada La Babosa y el río Suacita esta falla pone en contacto neises y migmatítas pertenecientes al Grupo Garzón sobre riolítas y andesitas de la Formación Saldaña; finalmente al Norte del río Suacita la falla de San Francisco Yunguillo, solo afecta a la Formación Saldaña.

Falla San Juan

Esta estructura aflora al Sur-Oeste del área de trabajo, hasta el Sur del río Los Cauchos, dónde se une a la Falla de San Francisco – Yunguillo; presenta una orientación preferencial SWW – NEE y una inclinación de 45°. Su desplazamiento está afectando rocas

metamórficas del Grupo Garzón (pEg) y rocas intrusivas del Batolito de Mocoa, y desplaza el contacto de origen íntrusivo entre estas dos unidades.

Falla Santo Domingo – El Silencio

Es la falla más frontal de este sistema en el sector Nor-Occidental del área de San Gabriel, en algunos sectores se observa como el trazo de esta falla va cortando el trazo de la Falla Villalobos, transporta una franja de rocas de la Formación Saldaña sobre la secuencia de las Formaciones Pepino y Rumiyaco en el sector de San Juan de Villalobos a Santamaría, sobre las unidades Saldaña, Caballos, Villeta y Oliní desde Santamaría hasta el sector del Sinclinal de Palestina en donde se une a la Falla El Carmelo.

Falla el Carmelo

Es la falla más Norte de este sistema, cortando el cierre Norte del Sinclinal de Palestina; presenta una orientación aproximada SWW – NEE y una inclinación de 40°, transporta en su bloque colgante a la Formación Saldaña, sobre las unidades involucradas en el cierre del Sinclinal de Palestina (Saldaña, Caballos, Villeta y Oliní).

2.2.1.3 Sistema de fallas de rumbo

Algunas evidencias geométricas sugieren la existencia de un sistema de estructuras rumbo-deslizantes dextrolaterales. Estos rasgos fueron observados al Sur de San Juan de Villalobos, afectando a las unidades del Terciario involucradas en los plegamientos del sector de la quebrada Cajones; tienen orientación SEE–NWW, su inclinación es alta, lo que se deduce por sus trazos rectos en el terreno, el movimiento de las fallas es sinestral, desplazan a las Formaciones Pepino y Rumiyaco, y por su orientación podrían corresponder a fallas ***antitéticas*** de un sistema de ***cupla dextrolateral***.

2.2.1.1 Pliegues

En la zona central formada por la convergencia de los dos sistemas principales de fallamiento se observa la ocurrencia de varios pliegues, cuyos ejes en general son sub-paralelos con los trazos de las fallas de vergencia Occidental y son cortados por los trazos más frontales del sistema con vergencia Oriental, de Sur a Norte los mayores pliegues son los siguientes:

Sinclinal de Cajones

Aflora al Sur y Sur-Este de San Juan de Villalobos. Es un pliegue asimétrico, disarmónico, sus flancos son subparalelos con su flanco Nor-Occidental volcado al Este, su plano axial tiene una inclinación de 53° al NW, el eje de la estructura sigue una dirección aproximada SW – NE hasta estrellarse con la Falla de San Francisco – Yunguillo; en sus flancos afloran las Formaciones Rumiyaco y Pepino inferior y en su núcleo está la Formación Pepino medio.

Anticlinal de Cajones – La Babosa

Este anticlinal aparece el Sur de San Juan de Villalobos hasta el río Los Cauchos en el Norte, fue formado por la propagación de una falla ciega, que no aflora pero se deduce (Geoestudios, 1998). Es una estructura disarmónica, con sus flancos subparalelos, su plano axial está inclinado 60° al NW y su eje está orientado SSW – NEE.

Sinclinal de la Petrolera

Aparece en la vereda del mismo nombre, es un pliegue simétrico, con el eje en dirección SW – NE y su plano axial casi vertical; muestra en sus flancos al Grupo Oliní y en el núcleo a la Formación Monserrate, su flanco Occidental es cortado por la Falla de Santo Domingo – El Silencio.

Sinclinal de Palestina

Es el plegamiento más importante observado en el área de San Gabriel, ocupa una extensión desde la vereda El Tabor al Sur hasta la vereda El Carmelo, al Norte y desde la Falla Santo Domingo - El Silencio al Oeste hasta el río Guarapas y la falla del Guarapas – Villalobos al Este. Es un sinclinal levemente asimétrico, la dirección del eje es SSW – NNE, con el plano axial casi vertical, involucra desde rocas del Jurásico hasta la Formación Rumiyaco que se encuentra en el núcleo de la estructura, sus flancos se hallan replegados y limitados por los trazos más frontales de los sistemas de fallas con vergencias contrarias.

2.3 GEOLOGÍA HISTORICA

La historia geológica del Bloque San Gabriel es la misma del Valle Superior del Magdalena ya que forman parte de la misma estructura geosinclinal pre-cretácea. Su zócalo está constituido por rocas pre-cámbricas y terrenos metamórficos paleozoicos.
La síntesis evolutiva del Bloque se hace a partir del Cretáceo, período en que se empieza a gestar la historia petrolera del país.
Durante el Paleozoico Inferior (Cámbrico-Ordovícico) la cuenca presenta las características de una cuenca divergente de tipo continental marginal de relleno, donde se presenta depositación de shales negros, calizas y areniscas cuya área de aporte fue el Escudo Guayanés.

Como producto de la Orogenia Caledoniana, los sedimentos Cámbrico-Ordovícicos sufren metamorfismo, el cual es más pronunciado hacia el Oeste (Cordillera Central) y en efecto, disminuye notablemente hacia el Este, encontrándose sedimentos sin metamorfizar; también como producto de dicha orogenia, la Cordillera Central adquiere desde ese entonces el carácter de zona parcialmente emergida y como tal, se convirtió en fuente de sedimentos para la cuenca.

El Paleozoico Superior comienza en el Devónico Medio con la transgresión de un mar cuyos sedimentos cubren indistintamente rocas metamórficas e intrusivas del Pre-Cámbrico o del Cámbrico-Ordovícico (Cediel et al, 1980)

Movimientos tectónicos de finales del Paleozoico levantan el área, la cual es sometida a una fuerte erosión, especialmente el área ocupada por la ancestral Cordillera Central, con la correspondiente depositación de una gruesa secuencia de sedimentos continentales para posteriormente subsidir permitiendo una rápida y corta transgresión en el Triásico Superior y Jurásico.

El origen del Valle Superior se remonta al Mesozoico temprano, cuando en medio de un paisaje erosional (Cediel 1980), por efectos de fallamiento normal se produjo la subsidencia de una franja tectónica (o graben) limitada por las Cordilleras Central y Oriental. Dicha estructura se desarrolló sobre un basamento de migmatítas, esquistos y filitas, cubierto por sedimentos paleozoicos de tipo miogeosinclinal.

Durante el Triásico Inferior y superior la sedimentación (capas rojas de espesor muy variable: Formación Luisa y calizas fosilíferas: Formación Payande, no alcanzó el extremo sur de la cuenca que se encontraba elevada por el inicio del levantamiento de la Cordillera Central, lo que impidió la entrada del mar durante este periodo.

A finales del Triásico y comienzos del Jurásico se presenta una intensa actividad volcánica, en esencia explosiva, ocurre una ampliación del área receptora de materiales, tendencia que continúa hasta el fin de la sedimentación de la Formación Saldaña, cuando cesó la subsidencia, se colmató la cuenca y se extinguió el vulcanismo.
Siguió luego un período erosivo que se extendió hasta el Cretácico pre-Aptiano.

A finales del Aptiano, la región fue ligeramente plegada y erodada e inmediatamente después el mar avanzó nuevamente y produjo la depositación de los clásticos de la Formación Caballos en aguas poco profundas. La transgresión marina continuó avanzando y

se depositó la Formación Villeta. A finales del Cretáceo se produce la regresión paulatina del mar, depositándose en estas condiciones la Formación Monserrate.

En el Terciario Inferior se inicia una fase de compresión que levanta desigualmente las Cordilleras Central y Oriental y algunos sectores del mismo Valle Superior. A lo largo de las fallas antiguas, y produce la reactivación tectónica, que por su carácter compresivo, ocasiona fallamiento de tipo inverso. Como consecuencia de ello, se retira el mar y la región del Valle Superior se convierte en una franja de cuencas intramontanas.

El levantamiento de las cordilleras continúa durante el Terciario Superior, la sedimentación continental prosigue en el Valle Superior, dando lugar a la acumulación del Grupo Rumiyaco, Pepino y Guacacayo en el área de San Gabriel.
En el Mioceno Superior-Plioceno, la compresión alcanza su máxima intensidad causando plegamiento, levantamiento y erosión del grupo en algunas zonas de Sur del Valle Superior.

En el Plio-Pleistoceno las Cordilleras Central y Oriental alcanzan sus alturas actuales.
La Orogenia Andina comienza a evidenciarse con los movimientos diastróficos del Eoceno Medio y alcanza su paroxismo en el Mioceno con el levantamiento definitivo de la Cordillera Oriental. La historia geológica de la región finaliza con suaves levantamientos en las Cordilleras Central y Oriental durante el Pleistoceno y Holoceno dando lugar a depositación de conglomerados en el valle y la formación de distintos niveles de terrazas.

3. ADQUISICIÓN SISMICA

Los estudios sísmicos son, en la actualidad, el método más empleado para el conocimiento de las estructuras geológicas que forman el subsuelo. El objetivo de estos estudios es obtener una representación de las estructuras que permanecen bajo la superficie, mediante el análisis de las características de propagación del sonido a través de ellas.

3.1 DEFINICIÓN.

La exploración sismológica está compuesta por tres etapas principales:

1. Adquisición sísmica.
2. Procesamiento de la información adquirida.
3. Interpretación de la información procesada.

La adquisición sísmica es la primera de las tres etapas, se basa en la generación, propagación y recepción de las ondas acústicas, cuya velocidad cambia a través de los diferentes materiales que conforman el subsuelo. Las mediciones realizadas sobre diversos medios han permitido establecer que esa velocidad de propagación varía en las rocas entre 2.000 y 6.000 m/seg, como término de comparación se menciona el hecho de que en el agua la velocidad de propagación de este tipo de ondas es del orden de 1.400 m/seg.

Esencialmente el método consiste en provocar vibraciones en un punto determinado del área a explorar usando una pequeña carga de explosivo o un vibrador (Figura 7). A lo largo de una línea se sitúan grupos de geófonos (registradores de ondas), separados entre sí de 15 a 30 m. La función de los geófonos es captar las vibraciones y convertirlas a diferencias de voltaje, para ser posteriormente digitalizadas, visualizadas y grabadas en el equipo de registro.

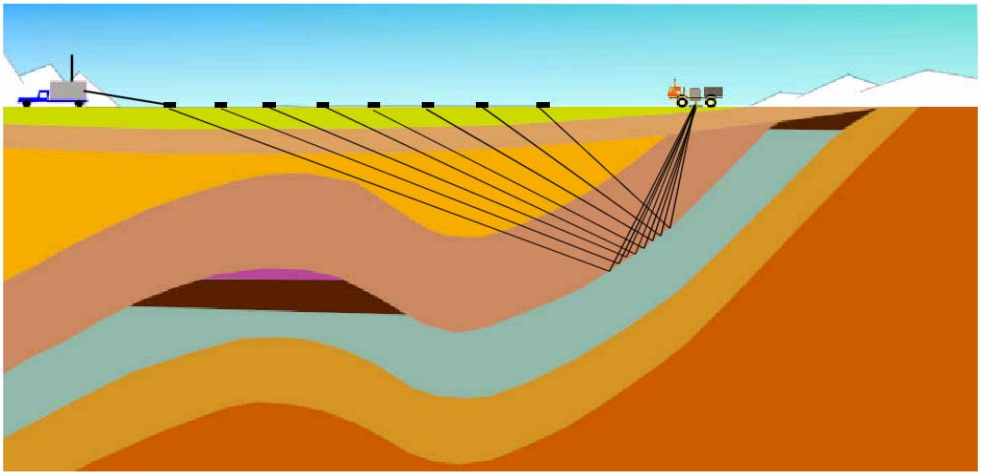


Figura 7. Generación, propagación y registro de ondas en una adquisición sísmica.

El objetivo de un proceso de adquisición es obtener una imagen bidimensional 2D o tridimensional 3D, del subsuelo dependiendo del estudio, mediante el empleo de materiales y equipos especiales, estos Incluyen las fuentes de energía (explosivos) que generan las ondas y los detectores de movimiento o presión (geófonos) colocados sobre la superficie, encargados de recibir las ondas procedentes del subsuelo, (Figura 8).

Figura 8. Fuente y receptor en la adquisición sísmica.

Dicha señal es amplificada y registrada digitalmente y luego procesada de manera preliminar para luego ser enviada al contratista del proyecto quien la examina y procesa de manera más completa para dejarla, adecuada para una interpretación geológica, (Figura 9, Olaya et al 2000).

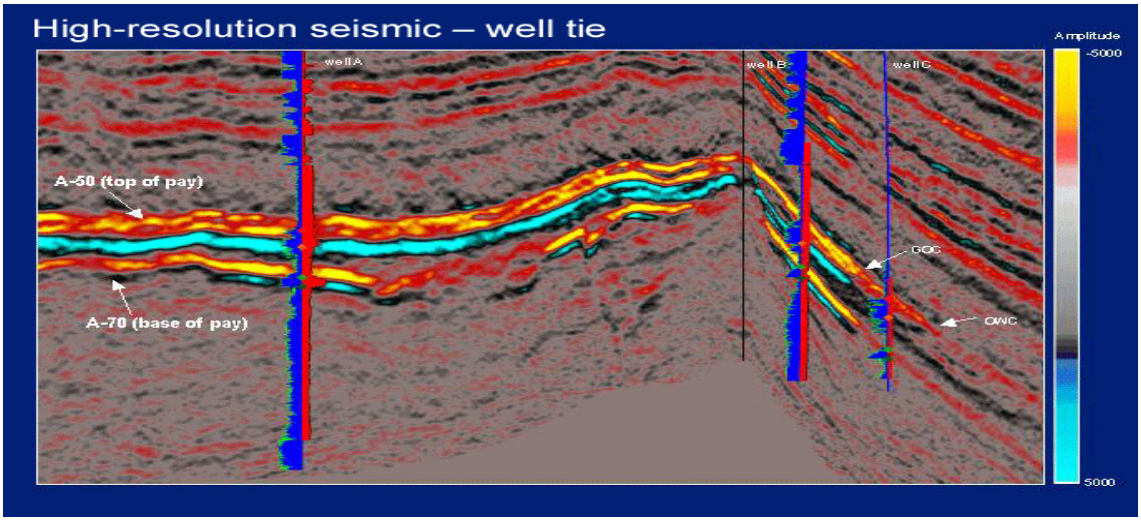


Figura 9. Sección sísmica de alta resolución.

Las secciones sísmicas son de gran utilidad en la exploración de hidrocarburos y una adecuada interpretación de la información adquirida colabora eficazmente en la identificación de: (a) Zonas saturadas, potencialmente productoras de hidrocarburos. (b) Estructuras geológicas y distribución de las rocas en el subsuelo. (c) Límites de las formaciones geológicas. (d) Trampas estructurales y estratigráficas. (e) Límites de yacimientos productores, (Figura 10)

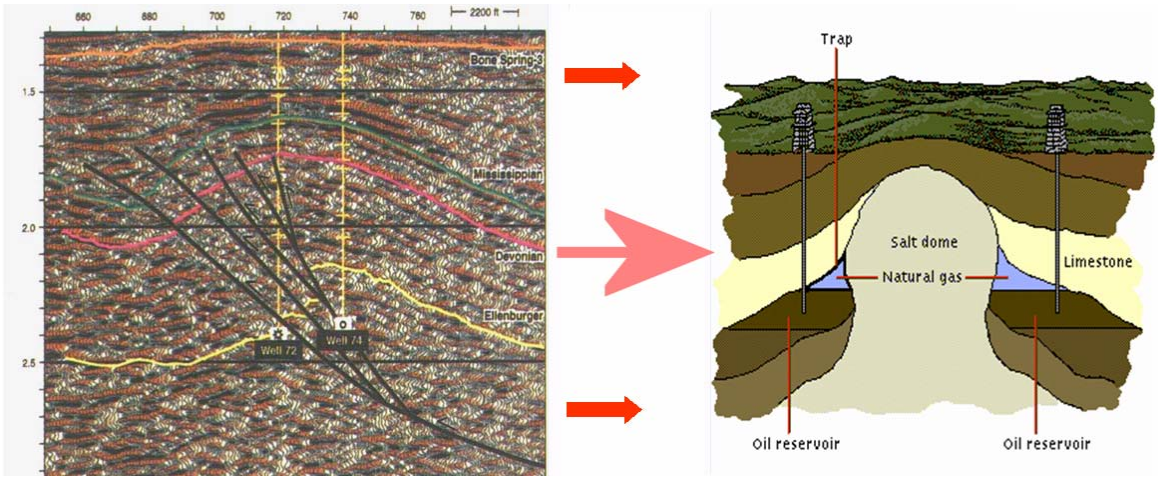


Figura 10. Interpretación y modelo geológico a partir de una sección sísmica.

3.2 ETAPAS DE UNA ADQUISICIÓN SÍSMICA.

La adquisición sísmica se desarrolla en cuatro etapas principales: topografía, perforación registro y restauración.

3.2.1 Topografía.

Esta labor consiste en trazar las líneas en campo con el uso de equipos topográficos. La topografía puede ser de varios tipos por ejemplo, de tiempo real, esto es por triangulación satelital, o convencional, con el uso de los tradicionales teodolitos, miras y prismas (Figura 11).

Los grupos de topografía encargados de georeferenciar las líneas sísmicas por lo general están compuestos por siete u ocho personas. La georeferenciación de puntos consiste en asignar coordenadas planas a los puntos de energía sísmica y a los puntos de recepción de ondas. Es decir sobre la línea se marcan puntos con estacas de color blanco y rojo, las estacas de color blanco indican los puntos de recepción y las estacas de color rojo los puntos de generación o de tiro que son conocidos con el nombre de ***Shot Points*** ó ***SP's***.

Figura 11. Actividades de topografía.

3.2.2 Perforación.

En esta etapa son perforados pozos de tres y media pulgadas con profundidades de 15 a 30 metros, sobre las estacas rojas niveladas por la topografía. En estos huecos es depositado el material fuente de energía, generalmente dinamita, aunque por razones de seguridad industrial y de orden publico, sobre todo en Colombia, se está optando por el uso de materiales más estables como el Indugel o Sismigel. La Figura 12 muestra el equipo y las actividades realizadas.

Los trabajos de perforación son realizados con equipos manuales portátiles en grupos de cinco o seis personas.

Figura 12. Actividades de perforación.

3.2.3 Registro.

Durante está etapa son plantados en la línea los receptores de las ondas llamados geófonos que se encuentran conectados por medio de cajas de baterías y ***Busters Box*** que amplifican la señal recibida. Una vez regado el material por la línea las fuentes son activadas y las ondas recibidas por los geófonos quienes las envían a través de los cables a la unidad central de registro conectada a la línea, esta unidad se encarga de compilar y almacenar las ondas recibidas y generar una primera imagen del subsuelo (Figura 13).

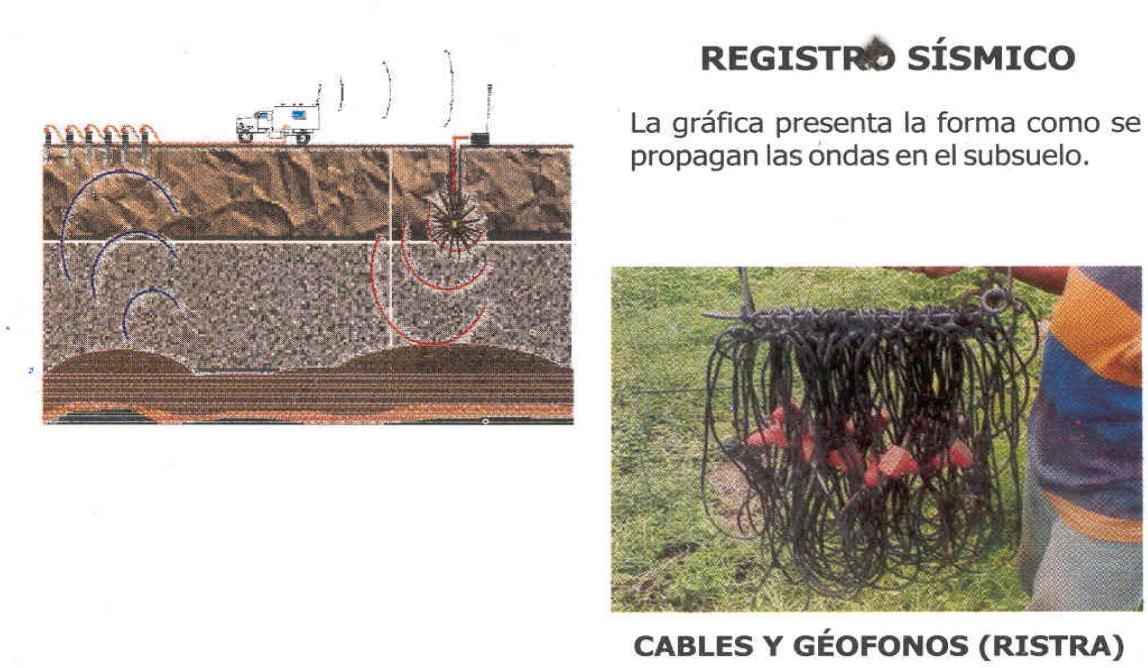


Figura. 13. Actividades de registro.

3.2.4 Restauración.

En la última etapa son recogidas las estacas, cables, geófonos, y elementos utilizados en la operación, son reparados los pasos y puertas sobre los cercos de alambre y restaurados los puntos de perforación, con el fin de dejar el área en las mismas condiciones iniciales.

3.3 DESCRIPCION GEOLOGICA DE LA LÍNEA SG-2002-1840.

La línea SG-2002-1840 se encuentra localizada entre las coordenadas 660.000 - 680.000 N y 745.000 – 760.000 E.

Presenta una topografía abrupta, formada por colinas suaves hacia las estacas mayores, parte Sur-Este, y laderas de fuerte pendiente y verticales hacia las estacas menores, parte Nor-Oeste, donde afloran las rocas Jurásicas del Stock de Mocoa y de la Formación Saldaña. Las elevaciones topográficas varían entre 1.625 y 2.550 m.s.n.m.

Climatológicamente es una zona húmeda con una red de drenajes dendríticos a sub-paralelos de caudal moderado, cuyos nacimientos se encuentran hacia las partes más altas y con zonas de recarga hacia las partes medias.

Geológicamente atraviesa de manera superficial al Grupo Garzón en un 5.9 % de su extensión, al Batolito de Mocoa en un 40.8 %, a la Formación Saldaña en un 34.4 %, y a la secuencia Cretácica en un 2.6%. El restante 16.3% se encuentra sobre depósitos recientes, (ver anexo B).

Durante la realización de los pozos hacia el norte, sobre el stock de Mocoa, se perforó una capa de saprolitas de 15 metros altamente alteradas por los factores climáticos del área. En los pozos perforados hacia el centro de la línea se reconocieron, shales grises y oscuros, lutitas color verde y areniscas de grano fino color amarillo de las Formaciones Cretácicas, donde se presentaron los mayores problemas para lograr la profundidad deseada, debido al derrumbamiento de las arenas intercaladas con capas arcillosas, las cuales colapsaban al retirar la tubería de perforación.

Geomorfológicamente la zona al Nor-Oeste de las estaca 1350 presenta relieves abruptos en formas de V y drenajes sub-paralelos, y la zona central al Sur-Oriente de la estaca 1450 relieves deprimidos y colinas onduladas con drenajes sub-dendríticos a sub-paralelos.

Estructuralmente es una zona de convergencia de importantes sistemas de fallas de donde predomina el estilo compresional dominado por pliegues de cabalgamiento. Se observan fallas locales hacia el Sur-Oeste de las estacas 1480-1490, que ponen en contacto la formación Saldaña del Jurásico con las formaciones estratiformes del Cretáceo.

3.4 ADQUISICIÓN DE LA LINEA SG-2000-1840

Como se mencionó en los capítulos anteriores la línea SG-2002-1840 hace parte del programa sísmico San Gabriel 2D, (Figura 14), registrado a finales de 2002 y durante los primeros seis meses de 2003. Esta línea fue la segunda línea de registro y de ella se derivó un nuevo patrón de carga para las demás líneas del programa.

Fue de vital importancia para la continuidad del proyecto por que en ella se realizaron tres sets para pruebas de carga, donde se concluyó que la cantidad de material empleado en los ***shot points*** no era adecuado para la adquisición de datos en el Batolito de Mocoa y en la Formación Saldaña (Becerra et al, 2003).

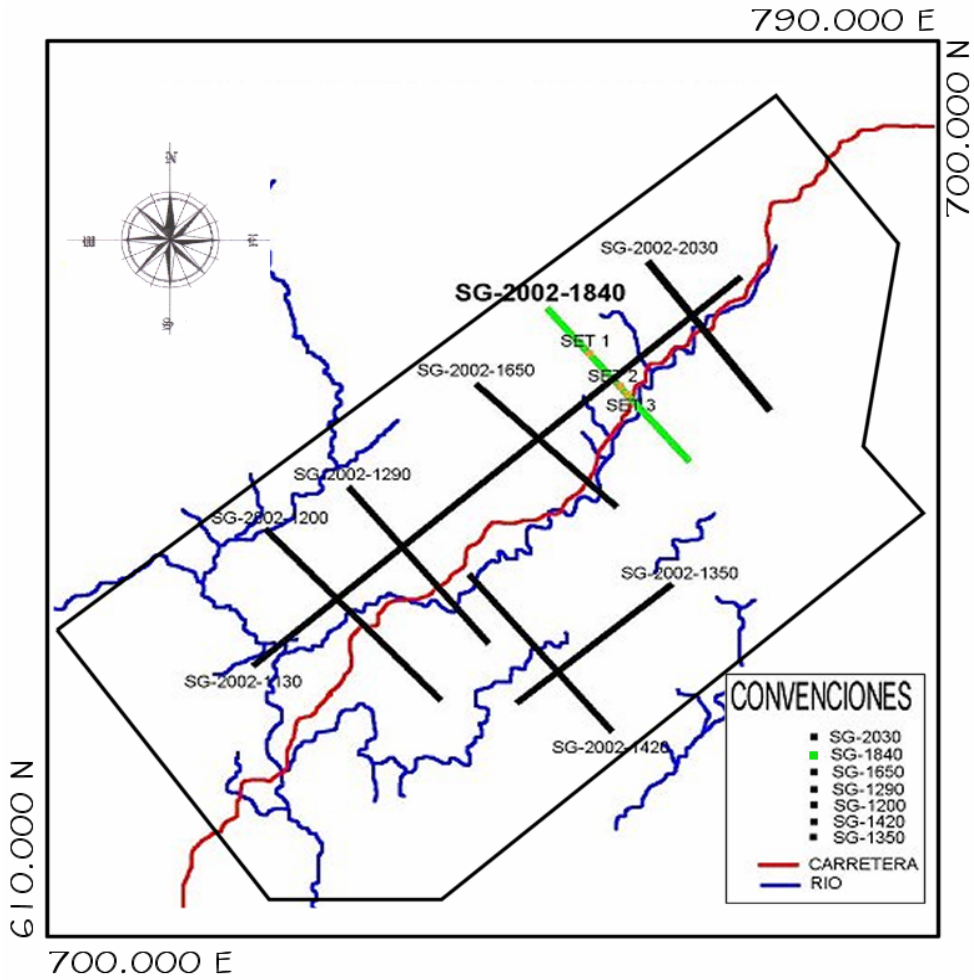


Figura 14. Mapa de la localización de las líneas y pruebas experimentales en el programa San Gabriel 2D.

La Tabla 2 resume los parámetros técnicos generales tenidos en cuenta para adquisición de la línea SG-2000-1840. Estos parámetros fueron pre-establecidos por la interventoría técnica de ECOPETROL.

PARAMETRO	CANTIDAD
Intervalo entre Receptores	18 m
Intervalo entre fuentes	72 m
Profundidad del pozo	14 m
Profundidad tope de carga	10.1 m
Tamaño de la carga	6300 gr
Total de pozos	278
Número de fulminantes por pozo	2
Total canales activos	600
Cubrimiento del subsuelo (FOLD)	60
Longitud de grabación	7 s
Intervalo de muestreo	2 s

Tabla 2. Parámetros técnicos de adquisición de la línea SG-2002-1840.

3.4.1 Etapa de Nivelación y referenciación (Topografía).

Las labores de corte y nivelación de puntos de tiro y receptores comenzaron con cuatro grupos de topografía, el primero de enero y terminaron el quince de Enero. El rendimiento en el corte de la línea fue bajo, debido a la presencia fuertes de pendientes, verticales, vegetación espesa (*bosques primarios*), factores climáticos y restricciones ambientales para la ubicación y construcción de helipuertos, (Figura 15).

Figura 15. Corte y nivelación de la línea SG-2002-1840. La imagen muestra una trocha tipo "abierta".

Los puntos de tiro se nivelaron cada 72 metros, mientras que los puntos receptores cada 18 metros, (Figura 16). Esta labor se realizó asignando coordenadas planas a cada punto mediante topografía convencional (Figura 17) y nivelando cotas variadas a distancias fijas con ayuda de portaprismas y bastones (Figura 18).

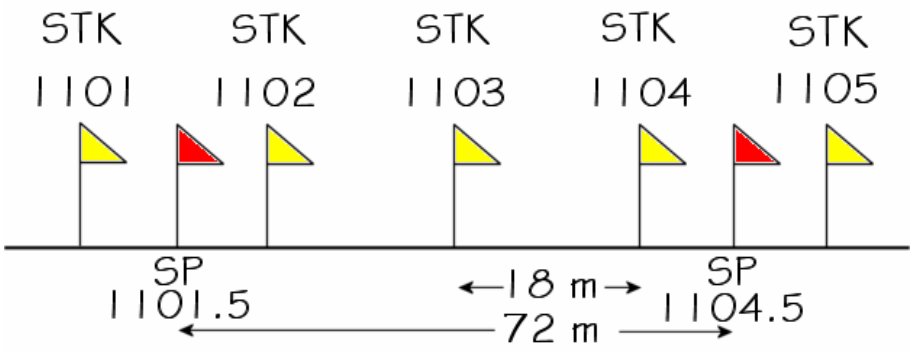


Figura 16. Relación de distancias entre estacas receptoras y Shot points en la línea SG-2002-1840.

Figura 17. Topografía convencional usada en el programa San Gabriel 2D.

La apertura de trocha en todos los casos no superó 1.2 metros de ancho y el diámetro máximo para el corte de vegetación no excedió los 10 cm de diámetro, no se ubicaron puntos de tiro a menos de 100 metros de nacederos o fuentes de agua.

Figura 18. En esta imagen también se observa la apertura de una trocha tipo túnel.

3.4.1.1 El papel geológico durante la topografía.

En esta etapa se evaluó la estabilidad del terreno a lo largo de la línea, con el fin de prevenir deslizamientos durante el registro, se identificaron sitios de interés ambiental

(nacederos, manantiales, cuerpos de agua, cañadas) que pudieran afectarse por las labores de perforación y se realizó un estricto control de calidad a las distancias entre receptores y fuentes. Por último se reubicó y niveló cualquier punto que pudiese alterar de alguna manera los aspectos ambientales y los atributos geofísicos durante el registro.

3.4.2 Etapa de perforación y carga

La perforación de los pozos se llevó a cabo entre el 5 y el 22 de Enero con once grupos de perforación, cada uno de 6 personas, taladros marca "General" (Figura19) y pistolas neumáticas marca "Ingersoll Rand" (Figura 20). Ambos sistemas de perforación con aporte de aire, suministrado por compresores marca "Sullair" y "Wolkswagen", (Figura 21).

Figura 19. Taladros de perforación "General 8.5"

Se perforaron en total 278 pozos, 269 con profundidad promedio de 14 metros y 9 pozos con profundidad de 5 metros. Hubo dificultad para lograr la profundidad de algunos de ellos en la Formación Saldaña, debido a su alto fracturamiento, que producía pérdidas de aire por lo que se reducía la salida de ripios desde el pozo. Se presentó también dificultad para la cargada de algunos de los pozos debido al derrumbamiento de las arenas en la zona circundante al río Villalobos y el encuellamiento producto del hinchamiento de algunos elementos arcillosos dentro de las zonas perforadas en la Formación Villeta, lo que impedía la penetración libre de la tubería de perforación y de los explosivos; no

obstante se perforó y cargó a las profundidades programadas con excepción de los 9 pozos cercanos al río, los cuales se cargaron con 2100 gramos cada uno y se registraron con un patrón de 3X1 (detonación de tres pozos por disparo).

Figura 20. Pistola Neumática "Ingersoll Rand "de perforación.

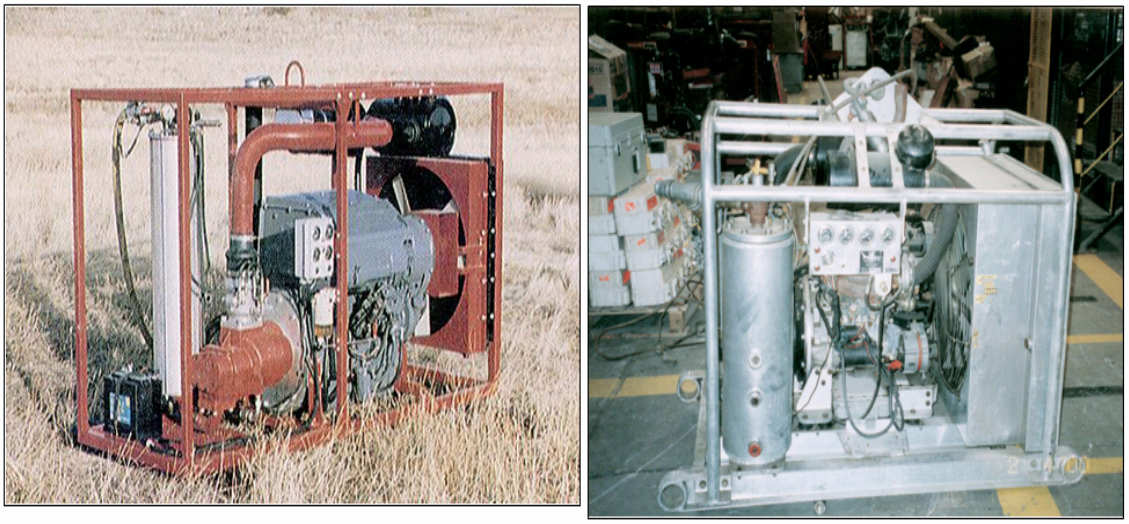


Figura 21. Compresores utilizados en la perforación de la línea SG-2002-1840.

Al igual que en la nivelación durante la perforación también se utilizan algunos accesorios como son tubería, mangueras, brocas y martillos neumáticos, (Figura 22). La Figura 23 esquematiza el enlace entre las herramientas y el trabajo de perforación, etapa que demandó mayor tiempo y esfuerzo durante un proceso de adquisición en el Bloque San Gabriel.

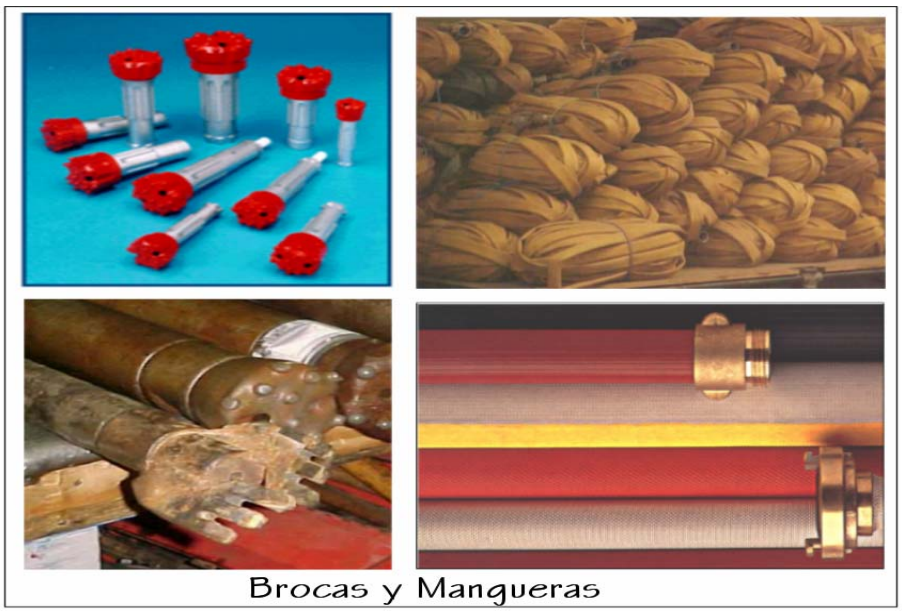


Figura 22. Accesorios utilizados en la perforación de los pozos

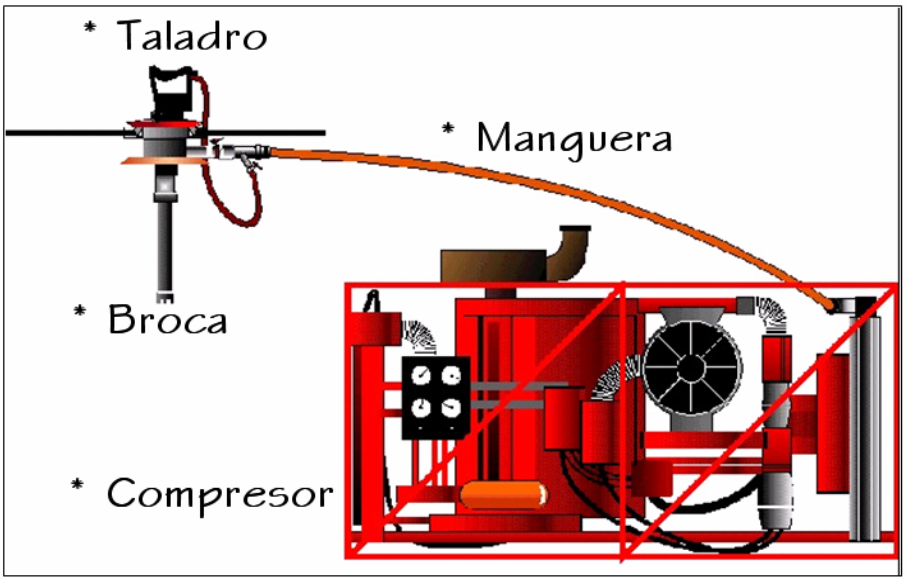


Figura 23. Enlace entre las diferentes herramientas de perforación.

El cargado y tapado de los pozos se ejecutó inmediatamente terminado el pozo, para ello se unían 7 tubos de 2 ½ pulgadas de diámetro, con 900 gramos de Sismigel (Figura 24) y se introducían al pozo (Figura 25).

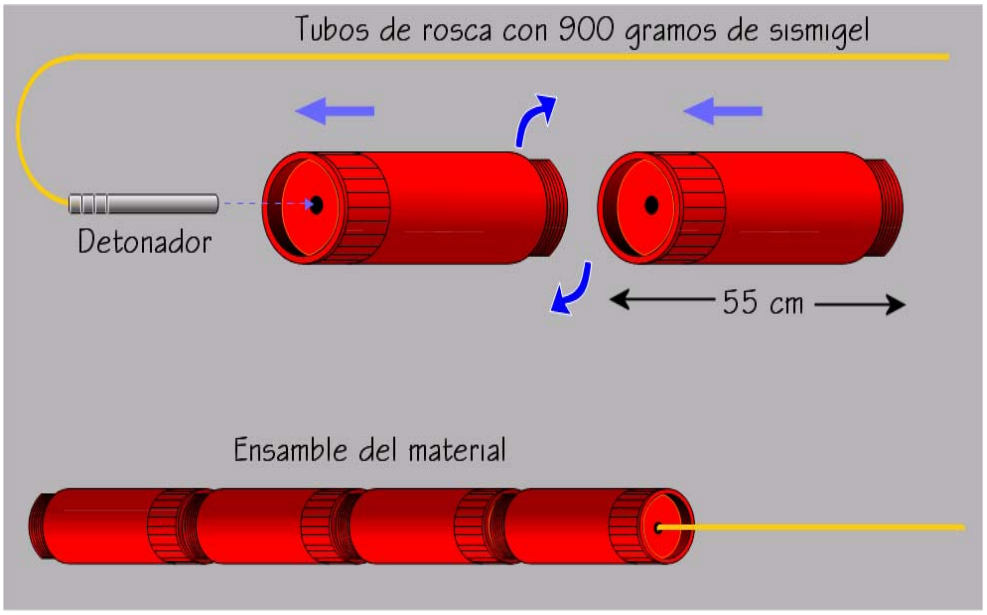


Figura 24. Material empleado en los puntos de tiro durante el programa de registro en San Gabriel 2D

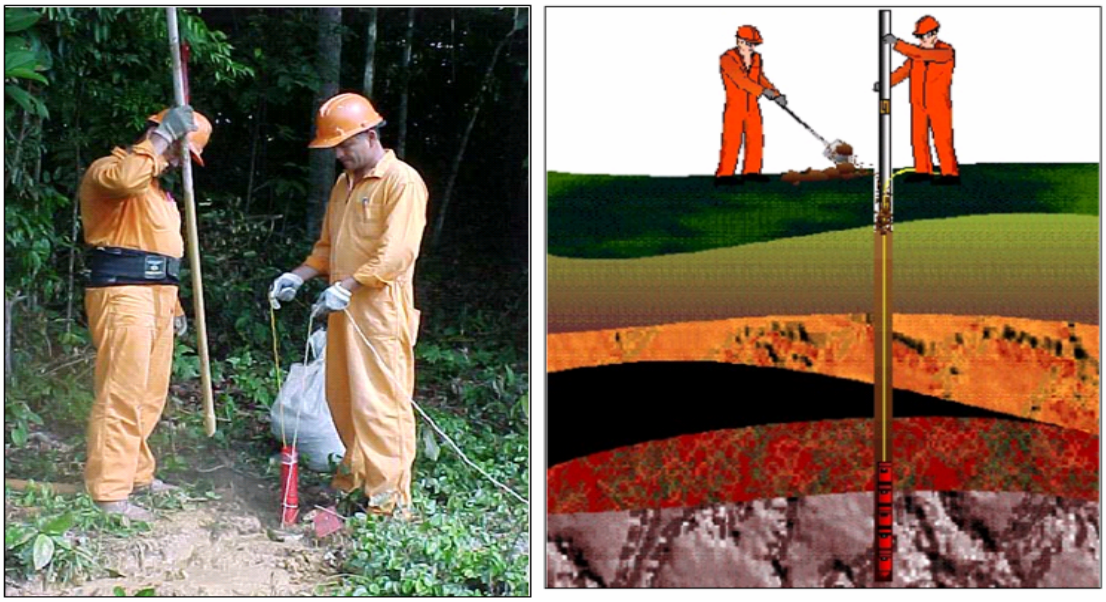


Figura 25. Introducción de cargas en pozo.

Después de verificar con varas patronadas que la profundidad de la carga fuera correcta (Figura 26), el cargapozos procedía a revisar la continuidad del detonador por medio de un galvanómetro y a tapar el hueco con los mismos materiales expulsados durante la perforación, el tapado se realiza tacando y presionando el material cada 20 cm. Por último se dejó el cable de detonación en corto y tapado a 5 cm de la superficie, para evitar accidentes y se colocó la bandera roja encima como señal de ubicación para el disparador.

Figura 26. Revisión de la continuidad y tacado del pozo.

3.4.2.1 El papel geológico durante la perforación y el tacado.

En esta etapa el geólogo asesora a los taladros durante la perforación y está pendiente de que las labores no alteren las condiciones ambientales de la zona perforada, evalúa posibles riesgos geológicos producto de la perforación y el registro. También realiza un estricto control de calidad y verifica que la profundidad del pozo sea la establecida y que las labores de carga y tapado se realicen de forma segura. En caso de que la perforación del pozo no sea satisfactoria o no se pueda culminar, el geólogo evalúa un nuevo sitio de perforación que cumpla con las condiciones ya mencionadas. En algunos casos como en las pruebas de carga, el geólogo examina y describe los ripios de perforación.

3.4.3 Registro

El regado de la línea y plantado de geófonos se realizó durante los días 12 al 22 de Enero con una cuadrilla de trabajo de 22 personas. El material fue probado y chequeado antes de ingresar a la línea, realizando pruebas de resistividad, actividad, frecuencia, ***damping***, polaridad, distorsión y continuidad. El ciclo comenzó plantando las ristras (grupos de 6 geófonos, Figura 27) en las estacas blancas en un arreglo linear, cada geófono se colocó a una distancia de 3 metros uno de otro.

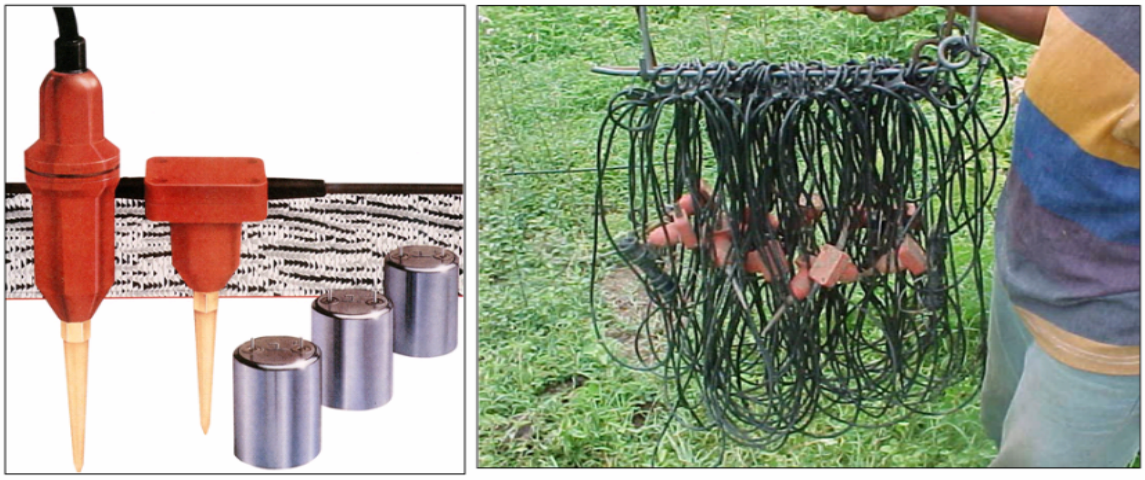


Figura 27. Geófonos y ristras

Las ristras se conectaron al cable principal de registro, el cual tiene una longitud de 50 metros y este a su vez se conectó por medio de cajas amplificadoras de señal (***Búster Box***) y baterías, (Figura 28).

Figura 28. Cables, Búster Box y baterías

El registro de la línea se ejecutó del 22 al 25 de Enero, usando el equipo de registro Sercel SN-388, con un tendido simétrico de 600 canales, compuestos por las ristras de seis geófonos GS-30-CT.

Los parámetros de registro se presentan en la Tabla 3.

PARAMETROS DE REGISTRO	
Equipo de registro	*Sercel SN-388*
Intervalo de disparo	*Fijo*
Intervalo de grupo	*18 m*
Canales	*600*
Canales Auxiliares	*2*
Tendido	*Split spread simétrico*
Ristra	*6 geófonos GS-30-CT*
Espaciamiento de geófonos	*3 m*
Intervalo de muestreo	*2 ms*
Longitud de grabación	*7s*
Filtro de Corte Bajo	*Fuera*
Filtro de Corte Alto	*Fuera*
Filtro Antialias	*0.8 Nyquist, 200 Hz mínima fase*
Pendiente del filtro Antialias	*370 dB/octava*
Tamaños de carga	*9000, 8100, 7200, 6300, 5400 y 4500 gr*
Fuente	*Sismigel*

Tabla 3. Parámetros de registro.

Para el registro se desplazaron a lo largo de la línea dos personas, el Shooter o disparador, encargado de conectar los cables de detonación a un equipo que cargaba la segunda persona (Figura 29). El Shooter realiza el puente entre la carga y la central de instrumentos, desde donde se envía la señal que detona el fulminante y que activa por empatia la carga.

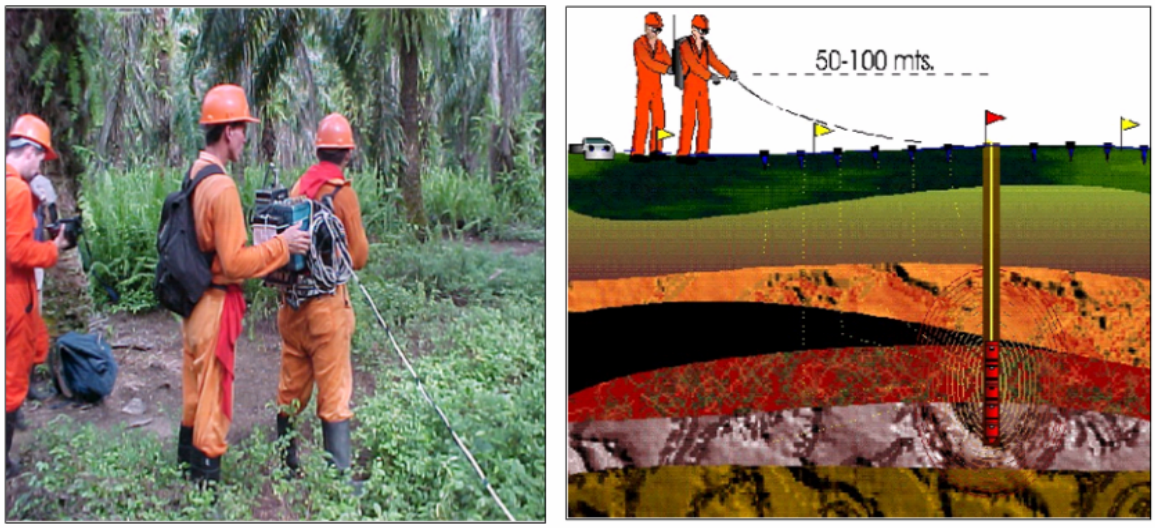


Figura 29. Conexión del cable de detonación para el registro.

Figura 30. Central de instrumentos

La explosión se realizó desde la central de instrumentos, (Figura 30) para garantizar la simultaneidad de la grabación, con lo cual se genera el registro sísmico. (Figura 31).

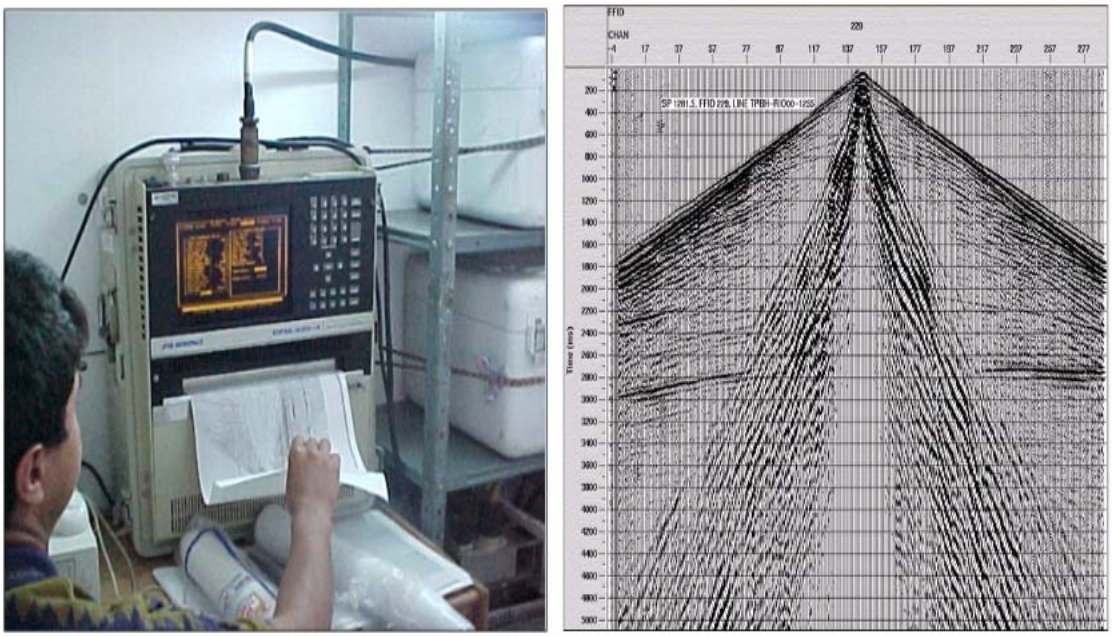


Figura 31. Registro sísmico.

3.4.3.1 El papel geológico durante el registro.

En está fase el geólogo se encuentra supervisando que los atributos geofísicos, no se vean afectados por factores como el ruido, para ello revisa las condiciones generales de la línea antes y durante la detonación de los pozos y si observa cualquier anomalía detiene la adquisición de manera inmediata, hasta que se normalicen las condiciones de registro. En la central de proceso se verifica junto con el observador (persona que maneja los equipos electrónicos) que se generen de manera correcta los registros y que los tiempos de pozo (*up hole time*) sean los reportados por el disparador.

3.4.4 Restauración

Durante la restauración de la línea SG-2002-1840 se retiraron los letreros y las cintas de accesos a las variantes y línea en general, se recogió el estacado y la basura, además se retiró todo el cableado y se desmantelaron los diferentes helipuertos y campamentos construidos durante las fases anteriores; por último se llevó a cabo una arborización en los sitios más afectados. (Figura 32).

Figura 32. Restauración de la línea SG-2002-1840.

3.4.4.1 El papel del geólogo durante la restauración.

En esta fase final el geólogo revisa por última vez las condiciones de la línea y evalúa posibles cambios en las condiciones ambientales, producto de los trabajos, por último supervisa que las labores de recolección de basura y arborización se ejecuten de la mejor manera posible.

4. PROCESAMIENTO SISMICO

El objetivo principal en el procesamiento de información sísmica de reflexión esta en resaltar o enriquecer las señales de reflexión originales y suprimir la energía indeseada como el ruido ambiental aleatorio.

Se debe tener en cuenta que el éxito de un procesamiento depende no solo de la escogencia adecuada de los parámetros pertinentes para los procesos particulares, si no también de la efectividad de las etapas de procesamiento previas.

El analista sísmico se enfrenta diariamente con importantes labores de:

1. Seleccionar una secuencia correcta de pasos de procesamiento para la información de campo bajo consideración.
2. Seleccionar un conjunto apropiado de parámetros para cada paso de procesamiento.
3. Evaluar los resultados obtenidos a partir de cada paso del procesamiento, para de esa manera diagnosticar cualquier problema causado por la inapropiada selección de los parámetros.

Lo anterior es una secuencia bien establecida de estándares para el procesamiento de información sísmica. Las Cuatro etapas principales; estáticas, deconvolución, apilamiento, y migración, generan los fundamentos de la rutina de procesamiento. También existen algunos procesos auxiliares que ayudan a mejorar la efectividad de los procesos principales.

A menudo surgen preguntas como por ejemplo ¿que clase de procesos auxiliares podrían usarse y cuando deberían aplicarse?, ¿si los registros contienen gran abundancia de ruido coherente generado por fuentes, entonces que tipo de filtros pueden usarse?

Otro tipo de preguntas surgen cuando se aplican los procesos, por ejemplo ¿cual es la mejor longitud del operador de deconvolución?, ¿cual debe ser el retardo de predicción?, ¿que tan grande debe ser la apertura cuando se trabaja con migración Kirchhoff?

El procesamiento de datos es una labor compleja que seria imposible de realizar si no se contara con la ayuda de programas y sofisticados computadores.

Para el procesamiento de la línea SG-2002-1840 se empleó el software ProMAX 2D de la de casa Landmark Graphics.

La figura 33 muestra el entorno grafico del paquete, este entorno permite seleccionar las herramientas (lado derecho) que el procesador necesita para transformar la información. La aplicación de estas herramientas, por ejemplo filtros y ganancias se lista en la parte izquierda del entorno, la lista de herramientas se conoce como flujo de procesamiento y la configuración acertada de cada herramienta produce el éxito de un flujo particular. Cada flujo representa un proceso y el procesamiento de una línea sísmica es en general el resultado combinado de múltiples procesos.

PRE-PROCESAMIENTO.

El objetivo del pre-procesamiento es mejorar la información disponible antes de trabajarla en las etapas principales del procesamiento con el fin de reducir el tiempo y de evitar problemas durante la ejecución del proceso.

En esta parte se realizaron una serie de pasos necesarios antes de proceder con la ejecución de los procesos particulares.

4.1 ENTRADA DE DATOS DE CAMPO.

La información de campo fue almacenada por el equipo de registro (Sercel 388) en cintas magnéticas (Imation de 810 MB) en forma multiplexada y bajo el formato SEG -Y. Para el procesamiento de la información por medio del software ProMAX fue necesario copiar los archivos de las cintas de campo, creando una imagen de ellos en el disco de almacenamiento de la estación de trabajo. Posteriormente este archivo en formato SEG -Y se convirtió a un archivo con formato ProMAX. El sistema ProMAX permite visualizar y trabajar con cada una de las trazas sísmicas grabadas en la adquisición dentro de un conjunto de datos al cual llama ***Data Set***.

Este fue el primer conjunto de datos que se generó y a partir del cual se realizaron todos los flujos de procesamiento.

Para el procesamiento de la línea SG-2002-1840 el primer conjunto de datos se llamó "*Raw Data*" (figura 33).

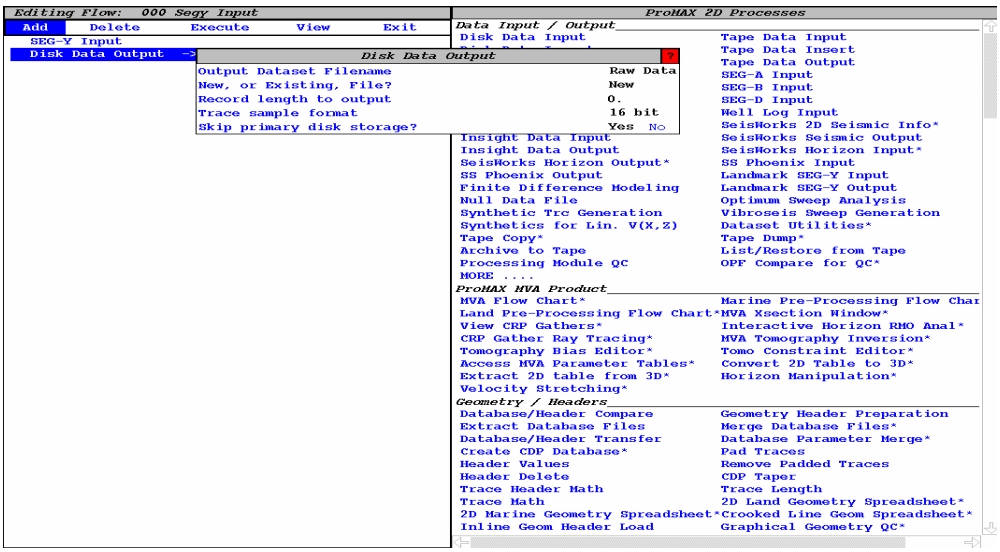


Figura. 33. Flujo para transformar la información del formato SEG-Y al formato ProMAX.

El archivo "Raw Data" contiene los diferentes conjuntos de trazas asociadas a un mismo disparo (***shot gathers***) tal y como fueron registrados en campo, es decir este archivo

contiene ahora la información en bruto, diferenciada únicamente por el número de archivo con el que se registro (Field File ID) y con las correspondientes características de cada disparo como los canales de grabación.

4.2 CAMBIO DEL INTERVALO DE MUESTRO DE 2 MS A 4 MS "REMUESTREO"

Un paso estratégico para reducir el tiempo de procesamiento, mejorar la eficiencia de la estación de trabajo y reducir el espacio necesario en discos duros es el de disminuir el intervalo de muestreo de la información, lo cual se conoce como remuestreo. Sin embargo esta estrategia no puede tomarse a la ligera y simplemente aplicarse, ya que el remuestreo reduce la máxima frecuencia que es posible de controlar, esta frecuencia máxima se conoce como la Frecuencia Nyquist y esta dada por la formula $1/(2\triangle t)$ donde $\triangle t$ es el intervalo de muestreo. Para un intervalo de muestreo de 2ms la frecuencia Nyquist es de 250 Hz, el cual es el intervalo de muestro de la información adquirida en este trabajo por la empresa contratista, para un intervalo de 4 ms la frecuencia Nyquist es de 125 Hz y finalmente para un intervalo de 8 ms, la frecuencia Nyquist es de 62.5 Hz. Según el trabajo de Becerra et al (2003), realizado durante la adquisición de las líneas, la frecuencia media dominante del área de estudio es de 25 Hz, presentándose componentes importantes de la banda de frecuencias utilizables son hasta de 40 Hz, como se observa en la Figura 34. Por lo anterior se realizo un resampleo de 4ms, teniendo en cuenta que las frecuencias afectadas son de escasa importancia en la información y que el procesamiento se reduciría en tiempo y recursos con esta implicación.

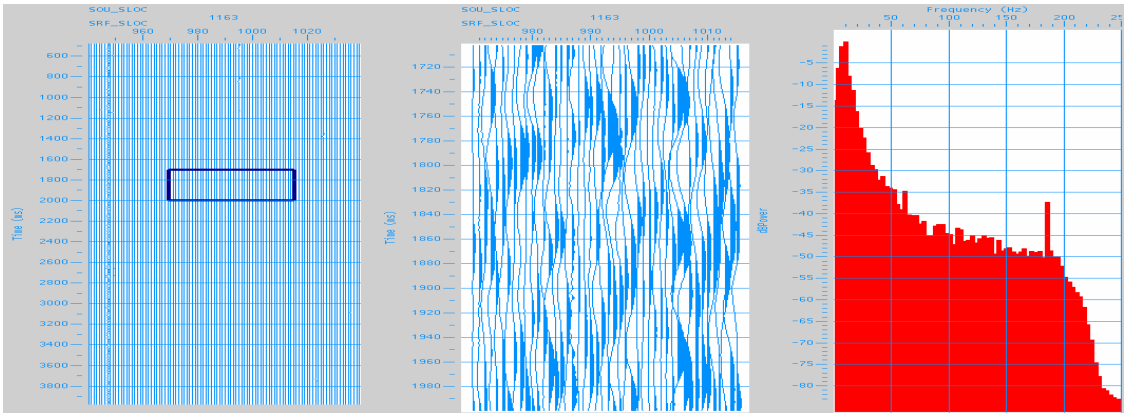


Figura.34. Espectro de frecuencia de la información adquirida en el Bloque San Gabriel.

4.3 APLICACIÓN DE UNA FUNCIÓN DE GANANCIA PARA VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS.

Los shot gathers en bruto que se obtuvieron de la línea muestran disminución drástica en las amplitudes de los diferentes frentes de onda, además presentan el efecto de la atenuación intrínseca durante la propagación a través de las formaciones geológicas. Para esta línea dichas formaciones fueron específicamente el Batolito de Mocoa, el Grupo Garzón, y las Formaciones Saldaña, Caballos, Villeta, Monserrate y Pepino. Como se observa en los ***shot gathers*** de la figura 35, las amplitudes disminuyen drásticamente después de 1.5 seg, esto no significa que no haya reflexiones después de este tiempo sino que su energía es muy débil. La disminución drástica de la energía y la absorción de las altas frecuencias se nota a simple vista.

Este disparo visualiza el campo de ondas generadas en el SP 1237.5 sobre la Formación Saldaña donde es claro que ocurre divergencia esférica en el frente de onda y absorción de las altas frecuencias.

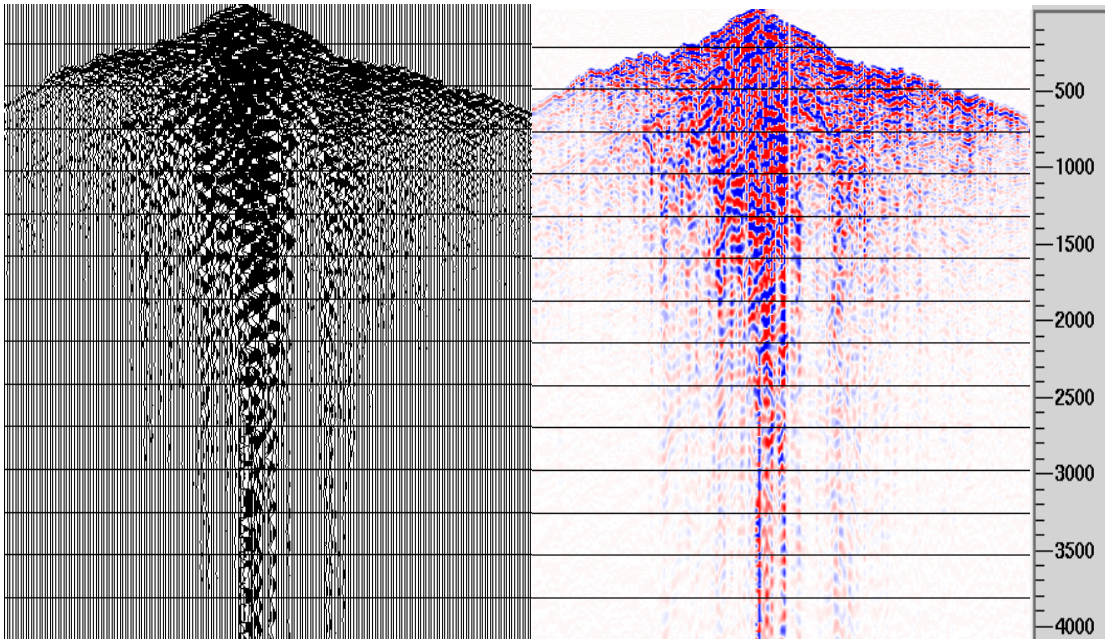


Figura. 35 Disparo sin ganancia en la línea SG-2002-1840. (Izquierda ondiculas, Derecha densidad variable).

Presentando la información de esta manera prácticamente no se observan reflexiones. En el shot gather de la derecha se muestra la información en densidad variable, los colores fuertes (azul y rojo) representan los valores de mayor amplitud. Estos gathers sin función de ganancia alguna, nos muestran uno de los problemas a tratar durante el procesamiento de la información colectada en el Bloque San Gabriel.

La aplicación de la función de ganancia se implementó después de hacer una revisión general de todos los disparos, donde se calificó cualitativamente la relación señal ruido de cada disparo (ver anexo F). Es de resaltar que solo se encontraron dos disparos de buena calidad*[2] en toda la línea. Con el propósito de desplegar y visualizar de una mejor manera la información colectada se aplicó una función de ganancia AGC (Automatic Gain Control) a los disparos de mejor relación señal / ruido. Mediante la aplicación de diferentes longitudes de tiempo para la ventana de muestra, se definió que la longitud más adecuada para la visualización de los disparos era la de 500ms, (figura 36).

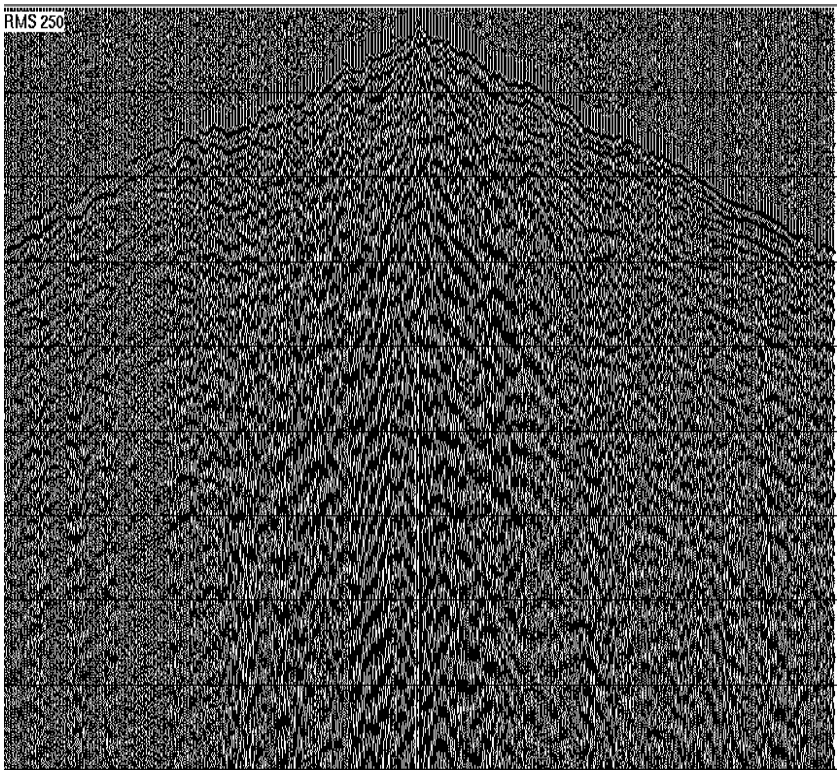


Figura. 36 a. Aplicación de ganancia AGC de 250 ms de longitud para visualización de los datos en bruto.

[2] La calidad se puede tomar de dos maneras, la calidad de la adquisición por parte de la compañía contratista y la calidad de la información en cuanto a la relación señal-ruido, en este libro nos referimos a está última.

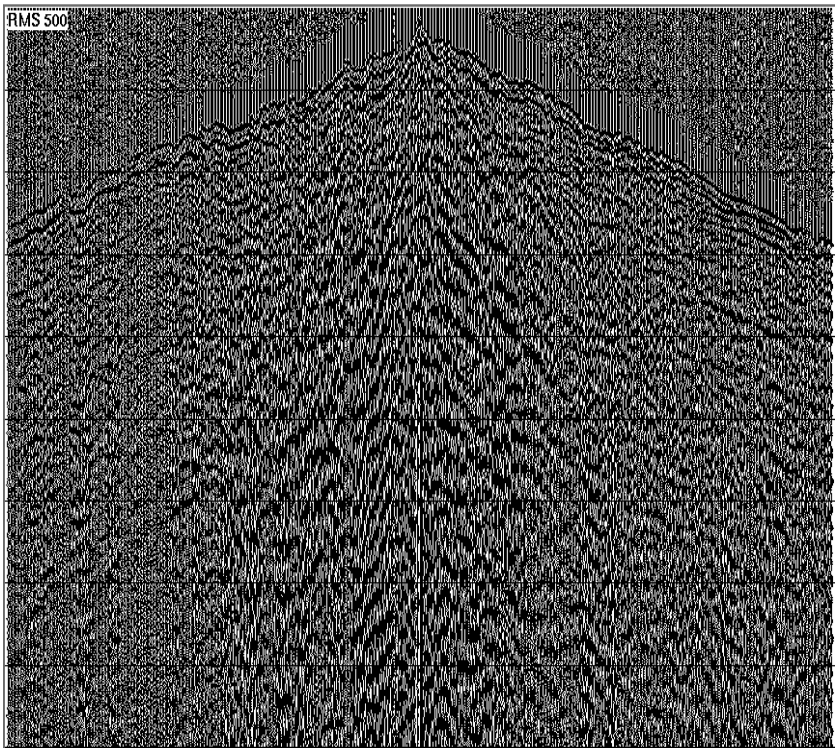


Figura. 36 b. Aplicación de ganancia AGC de 500 ms de longitud para visualización de los datos en bruto.

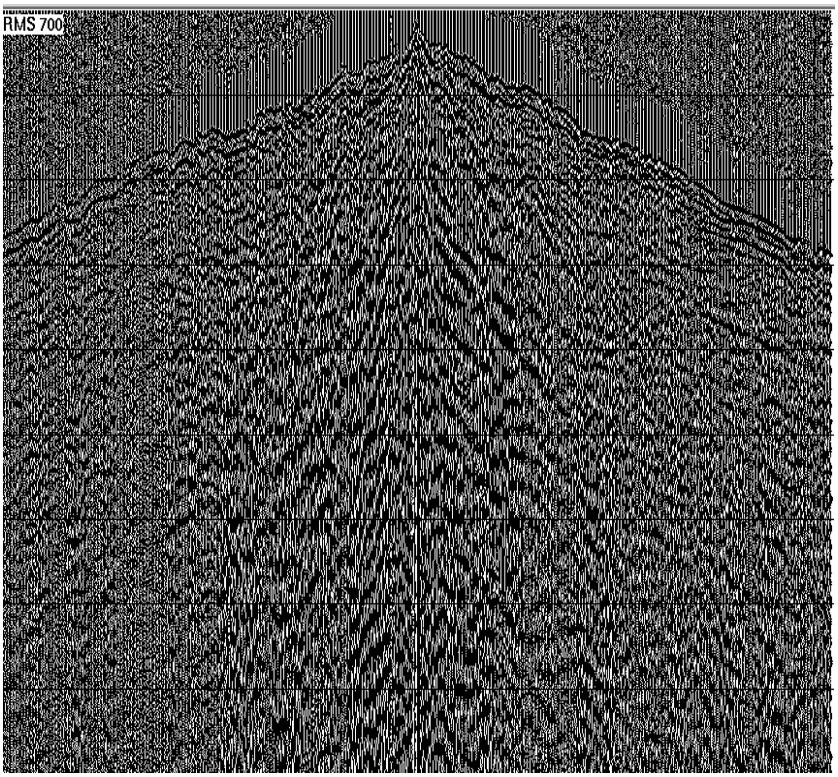


Figura. 36 c. Aplicación de ganancia AGC de 700 ms de longitud para visualización de los datos en bruto.

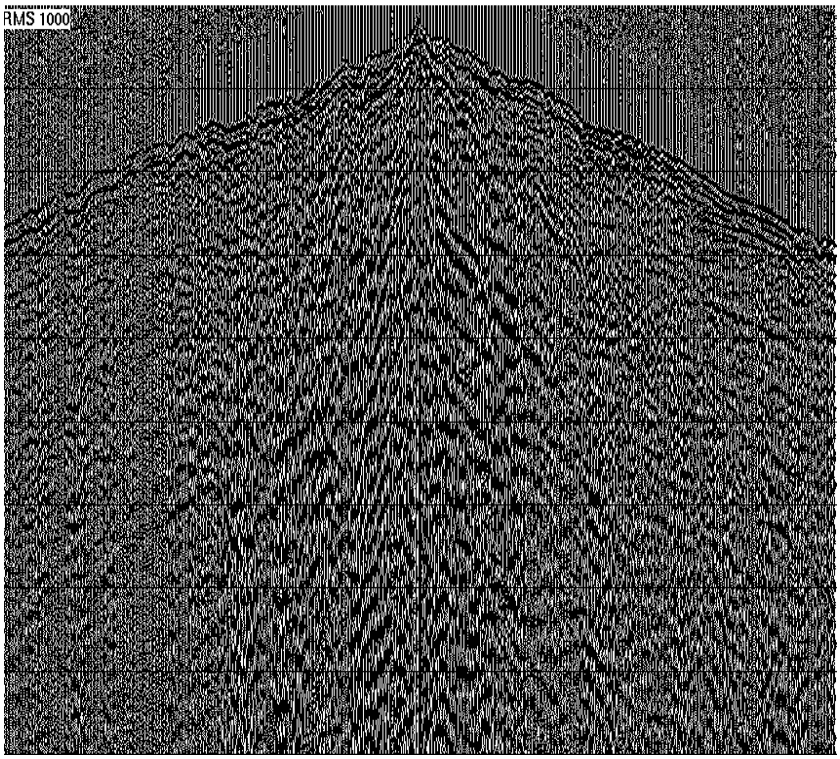


Figura. 36 d. Aplicación de ganancia AGC de 1000 ms de longitud para visualización de los datos en bruto.

Observe que la mejor restitución de amplitudes se da en la figura 36 b, donde se utilizo la ventana de muestra de 500 ms. Los criterios tenidos en cuenta para la escogencia del tamaño fueron el hecho de que con tamaños de ventana mayores a 700 ms se resaltaban más los eventos en profundidad, donde el ruido presente era mayor, y si la ventara era muy pequeña no se distinguían bien los eventos de tiempos someros.

Esta función de ganancia recupera las amplitudes perdidas por la divergencia de frente de onda, sin embargo es de aclarar que con esta función no se recuperan las frecuencias absorbidas por los diferentes tipos de roca ni por el contenido y tipo de fluidos que puedan estar presentes en las mismas. Todas las longitudes de ventana (250, 500, 700 y 1000 ms) utilizadas modifican de manera diferente las amplitudes de la traza, y aunque producen una mejor visualización de los disparos, observe que la relación señal/ ruido (S/N) no mejora, este es otro de los problemas a tratar en el Bloque San Gabriel.

4.4 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN EN BRUTO.

Después de aplicar la función de ganancia se realizó una revisión general de los disparos con el fin de encontrar cualquier anomalía y para generar una idea general de la línea. Esta parte es muy importante ya que es necesario reconocer los disparos con retrazo "***delay***", con grabación incompleta, con actividad sísmica terrestre simultánea y con ruido tipo spike "***spike noise***". Estos son posteriormente analizados con el fin de determinar si deben o no ser parte de la información a procesar. A continuación se presentan algunos ejemplos de los disparos anómalos encontrados durante esta fase.

4.4.1 Disparos con delay

La figura 37 muestra dos disparos de la línea, que fueron registrados de manera consecutiva, el disparo de la izquierda comienza un segundo después que el disparo de la derecha.

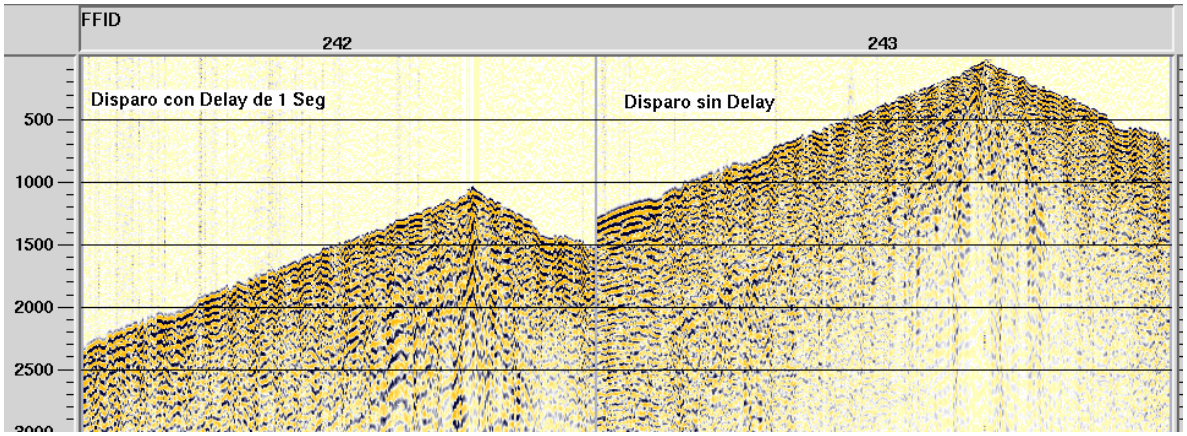


Figura. 37 Disparo con delay de un segundo.

Como se observa en la parte superior de la mitad izquierda, la imagen corresponde al FFID (Field File ID) 242 ó punto de tiro 1725.5, ubicado sobre la formación Saldaña.

La grabación de este disparo se inició un segundo antes del la detonación de la carga debido a un error en la configuración del equipo de registro. Como consecuencia de lo anterior las trazas de este shot gather no pueden tomarse en cuenta para el apilamiento

de la sección, porque contienen información de reflectores desplazados y por consiguiente al adicionarse generarían interferencia destructiva. El lado derecho corresponde al FFID 243 ó punto de tiro 1731.5 donde se observa que el registro inicia simultáneo a la detonación del pozo.

En este gather también se observa la forma triangular característica de la información de campo, lo cual se bebe al aumento de la distancia y se conoce como el efecto ***Linear moveout***.

4.4.2 Disparos con grabación incompleta.

La figura 38 muestra un registro con grabación incompleta. Durante la grabación de este gather se presentó una falla que impidió grabar la información después de 1900 ms.

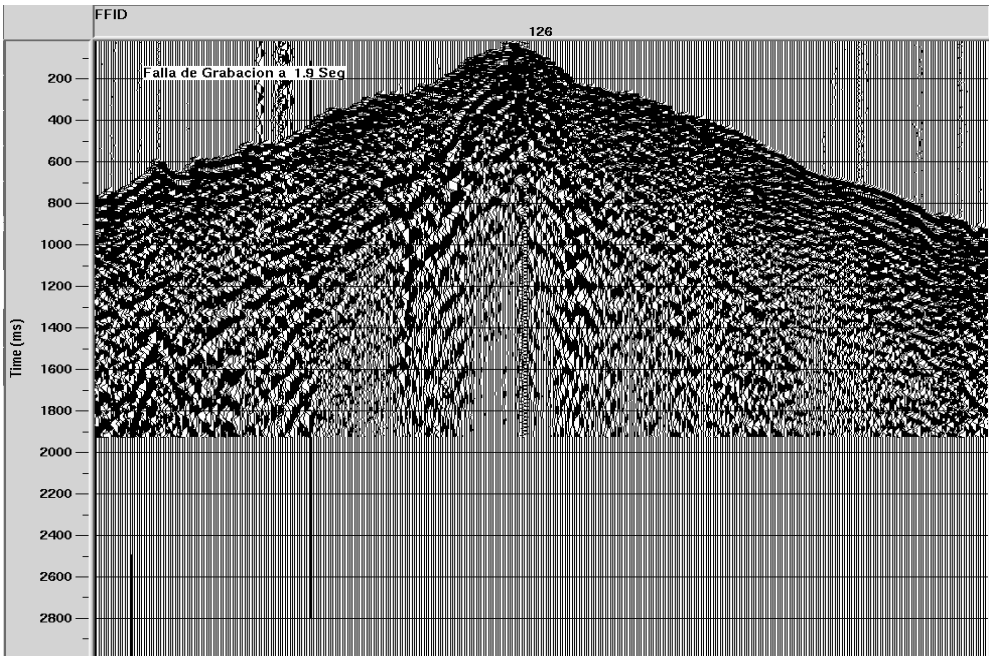


Figura. 38. Disparo con grabación incompleta.

La falla pudo darse por múltiples circunstancias como corte en el suministro de energía en la línea, desconexión del cable principal, ó por una falla directa del equipo. Al igual que en el disparo con Delay este shot y todos los que presenten el mismo problema deben

eliminarse para no producir interferencia destructiva durante el apilamiento. En el análisis de la información en bruto se encontraron cinco disparos con fallas de grabación.

4.4.3 Disparos con interferencia sísmica.

En la figura 39 se aprecia el efecto de la interferencia sísmica en un shot gather. Durante el registro de éste disparo ocurrió un sismo de tierra, es por esto que se observan una serie de reflectores anómalos casi horizontales después de 2.5 segundos.

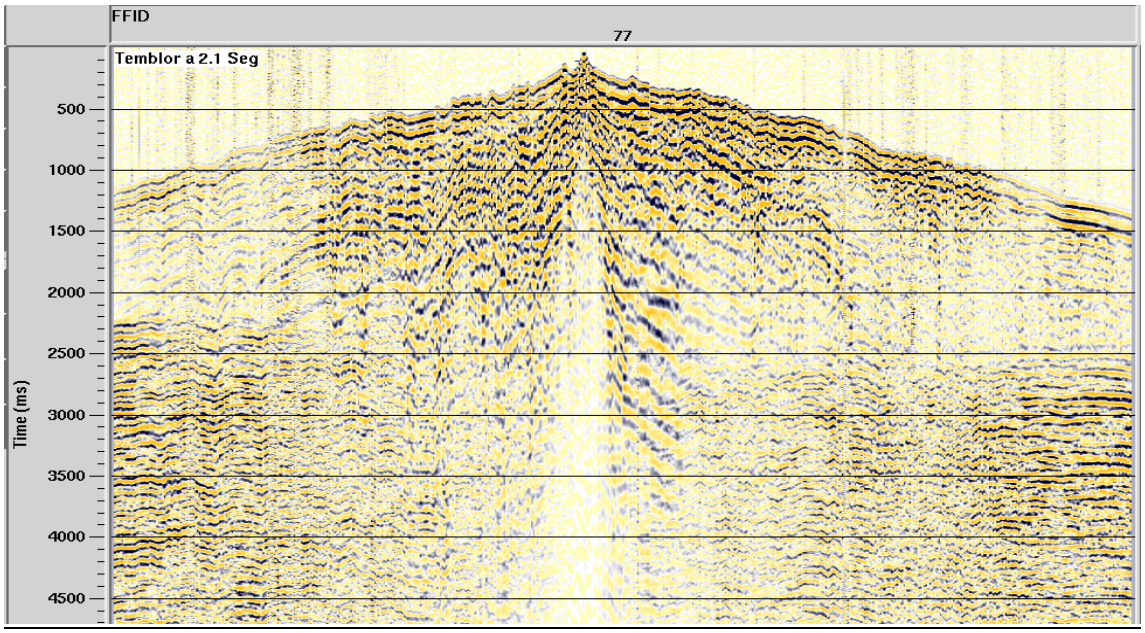


Figura. 39 Disparo con actividad sísmica simultanea.

Observe que estos reflectores no presentan el efecto normal moveout, ya que un temblor de carácter regional produce movimiento en la mayoría de los detectores colocados sobre la línea al mismo tiempo. Por ser este un disparo con reflectores inconsistentes es necesario desecharlo para no producir interferencia destructiva. Este disparo correspondió al punto de tiro 1117.5 sobre la Formación Saldaña.

4.4.4 Disparos con ruido tipo Spike.

La figura 40 muestra la información del El FFID 6 corresponde al punto de tiro 1913.5 ubicado sobre la formación Saldaña. Este disparo presenta ruido tipo spike el cual es aleatorio y de muy rara ocurrencia.

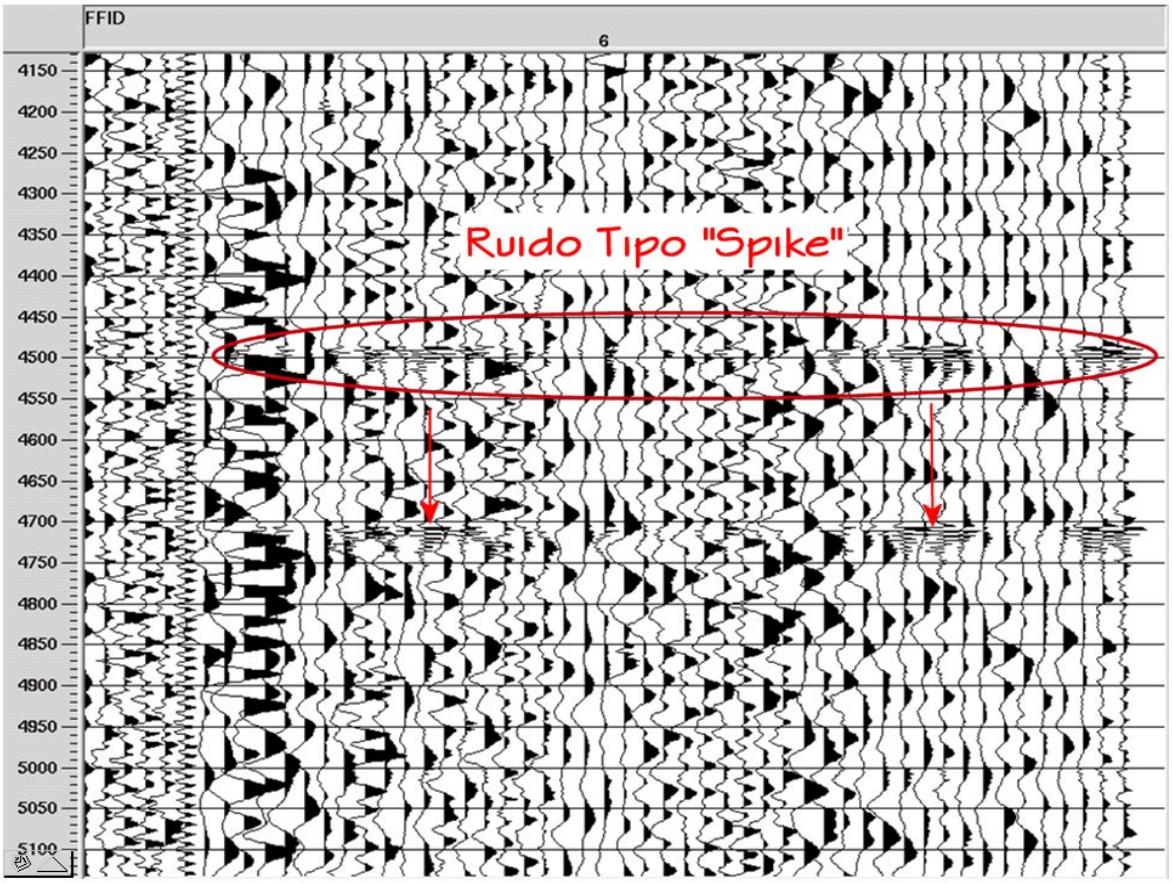


Figura. 40 Disparo con presencia de spikes.

Como se observa en la imagen el ruido tipo spike es un ruido linear introducido por los equipos de adquisición y originado por las estáticas ambientales. El ruido ***spike*** produce un aumento considerable en la energía de las trazas que afecta, lo cual se aprecia claramente en la imagen por el tamaño de la amplitud en el punto donde el spike intercepta una traza. Este ruido afecta las etapas finales del procesamiento y por lo tanto es muy importante atenuarlo antes de llegar a ellas. Desafortunadamente es un ruido totalmente aleatorio que

se produce en el momento menos esperado de la grabación y que destruye las características de la reflexión por lo tanto este disparo no debe ser tenido en cuenta para etapas como la migración.

PROCESAMIENTO.

4.5 ASIGNACIÓN Y CHEQUEO DE GEOMETRÍA.

El siguiente paso es configurar la geometría de la adquisición, es decir asignar a cada punto de tiro y de recepción, sus coordenadas correspondientes. Para esta labor se necesita contar con los archivos Ukooa, CMB, RPS y SPS, elaborados por la compañía que realiza la adquisición. Estos archivos contienen información referente a la adquisición, (coordenadas, estaciones vivas, canales, estacas desplazadas, tiempo de pozo, observadores, datum sísmico, etc.) También se analiza el reporte del observador para conocer las irregularidades que se hubieran podido presentar durante el registro. El informe del observador, indica el número de canales de cada disparo, así como la primera y la última estación viva. Uno de los datos más importantes de este informe es el concerniente al archivo de grabación de cada disparo, con lo cual el sistema hace la relación entre el FFID y el SIN (source Index Number).

Esta etapa es de suma importancia ya que muchos tipos de problemas en el procesamiento se originan de la configuración incorrecta de la geometría de campo en el sistema de procesamiento. Independientemente del cuidado con que sean escogidos los parámetros de procesamiento, la calidad de una sección apilada puede dañarse severamente por la introducción de una geometría de campo incorrecta.

Como se puede observar en la figura 41 lo primero que hay que hacer es indicarle al sistema de procesamiento el intervalo nominal de receptores y fuentes, el azimut de la línea, la primera y la última estación, los tipos de fuente y las unidades de trabajo.

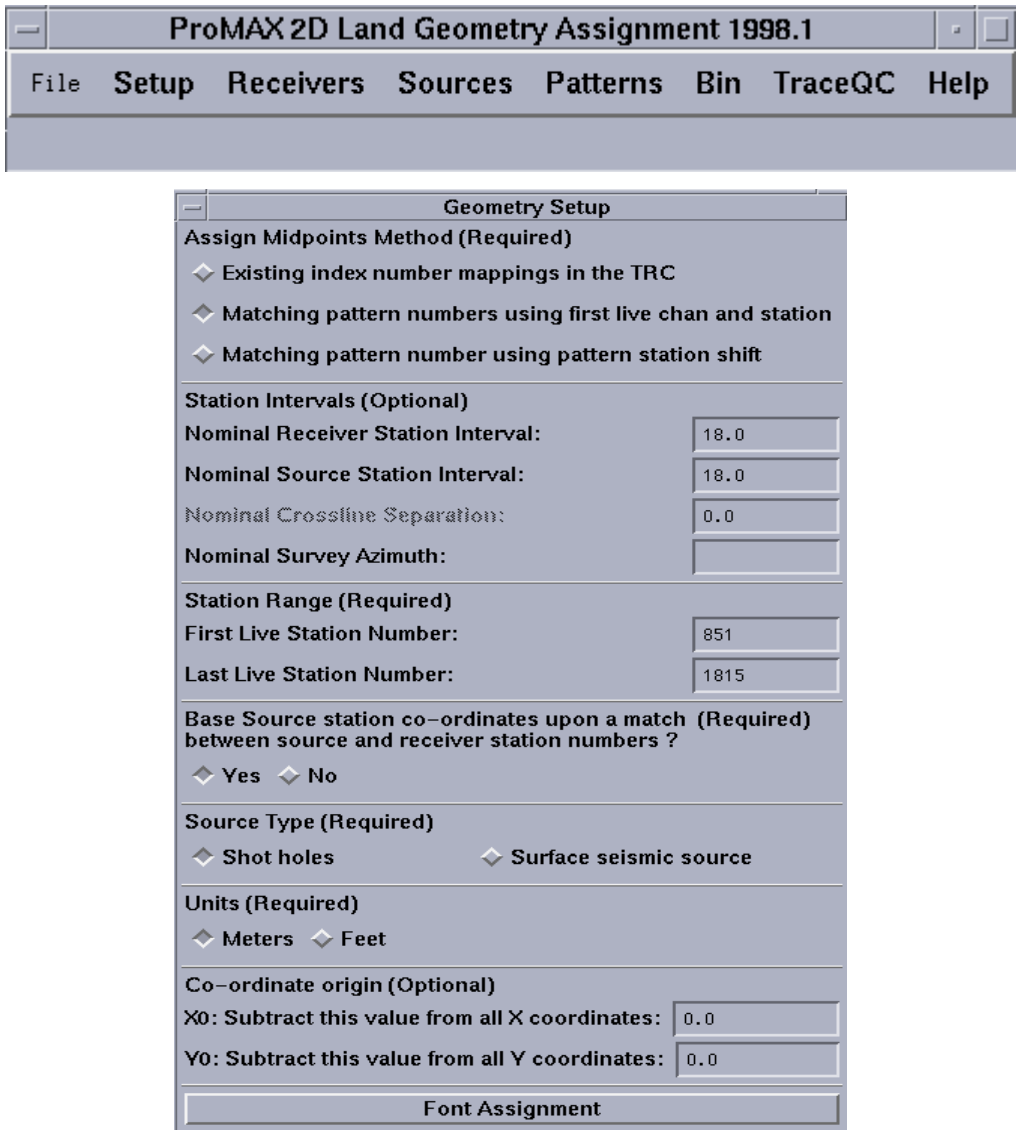


Figura. 41 Configuración de Geometría.

Se continúa con la introducción de los datos de receptores, es decir las coordenadas Norte, Este y la elevación de cada una de las estaciones como se observa en la figura 42.

La entrada de datos se realiza en varias etapas, primero se configura la geometría, después se introducen los datos de receptores, y después los de fuentes, por último se arreglan los patrones y se hace control de calidad a la configuración.

SRF Ordered Parameter File

File Setup Edit View Help

Mark Block	Station	X	Y	Elev	Static
952	1802	765881.9	668564.2	2527.0	0.0
953	1803	765892.6	668549.9	2535.2	0.0
954	1804	765904.5	668536.3	2525.1	0.0
955	1805	765915.4	668522.1	2525.6	0.0
956	1806	765926.7	668508.1	2539.4	0.0
957	1807	765937.8	668493.9	2531.6	0.0
958	1808	765949.0	668479.9	2536.9	0.0
959	1809	765960.0	668465.6	2549.6	0.0
960	1810	765971.8	668452.0	2559.0	0.0
961	1811	765983.3	668438.1	2561.2	0.0
962	1812	765994.9	668424.4	2555.4	0.0
963	1813	766006.4	668410.5	2562.0	0.0
964	1814	766017.7	668396.5	2571.3	0.0
965	1815	766028.9	668382.6	2571.4	0.0

Figura 42 Configuración de receptores.

La introducción de la geometría de fuentes es más delicada. Aquí se interactúa entre varios tipos de archivos (SPS y Observer report) ya que el sistema de procesamiento necesita además de las coordenadas, los números de archivo con los que fue grabado cada disparo (FFID), el tiempo de pozo, la profundidad de cada pozo, el patrón de pozos, el número de canales asociado a cada disparo, y el cubrimiento nominal en canales.

En la Figura 43, se observan algunas de estas características, note que esta fase presenta una mayor complejidad que la fase de configuración de receptores.

SIN Ordered Parameter File

File Setup Edit View Help

Mark Block	Z	FFID	Offset	Skid	Uphole	Hole Depth	Pattern	Num Chn	Shot Fold*	1st Live Sta
1	2331.7	14			13.0	10.1	1	301	301	851
2	2306.7	18			19.0	10.1	1	306	306	851
3	2299.0	19			16.0	10.1	1	307	307	851
4	2276.9	5			20.0	10.1	1	311	311	851
5	2241.0	6			15.5	10.1	1	315	315	851
6	2234.4	7			16.0	10.1	1	319	319	851
7	2234.7	23			20.0	10.1	1	323	323	851
8	2205.1	26			29.0	10.1	1	327	327	851
9	2168.5	28			19.0	10.1	1	331	331	851
10	2156.2	31			16.5	10.1	1	333	333	851
11	2123.9	33			13.0	10.1	1	338	338	851
12	2130.6	37			30.5	10.1	1	345	345	851
13	2132.0	38			25.5	10.1	1	347	347	851
14	2153.7	41			28.5	10.1	1	351	351	851

Figura 43 Configuración de fuentes.

Por último se introducen los patrones de pozo, en este caso la línea solo tiene un patrón, es decir los canales de registro de los pozos con tendido completo son 600, si este valor variara, tendríamos más patrones. Entonces, para un disparo con tendido completo

se introduce el primer canal y se asocia con la estación en superficie correspondiente y luego se introduce el último canal y se asocia con la respectiva estación en superficie. La figura 44 muestra este procedimiento.

PAT Ordered Parameter File

File Setup Edit Help

Mark Block	Pattern	Min Chan	Max/Gap Chan	Chan Inc	Rcvr MinChan	Rcvr MaxChan	Rcvr Inc	Error
1	1	1	600	1	858	1457	1	
2								

Figura 44. Introducción del patrón de pozos.

Con estos procedimientos el sistema de procesamiento calcula automáticamente todos los puntos medios (*Common Depth Point*) en coordenadas X, Y, y Z necesarias para producir los diferentes apilados necesarios durante el procesamiento.

El flujo anterior termina con el respectivo control de calidad y con la visualización de la línea como se muestra en la figura 45.

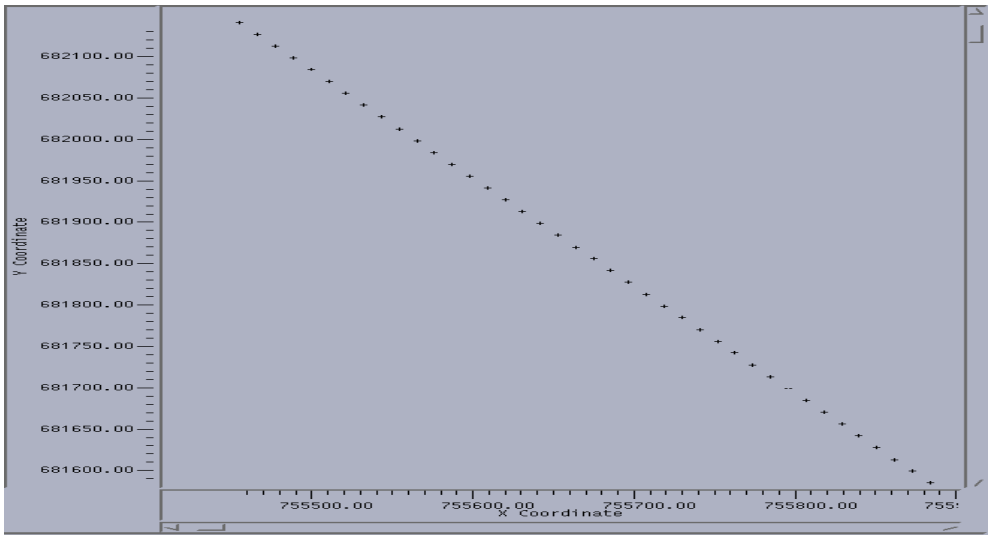


Figura 45. Visualización de los receptores de la línea después de la configuración de la geometría.

La asignación de geometría, permite realizar innumerables cálculos. Por ejemplo, de los datos con geometría se pueden obtener las velocidades de los diferentes eventos

observables en los registros, también con ella se pueden hacer perfiles topográficos, cartas de apilamiento, y calcular el cubrimiento como se muestra en las figuras 46 y 47.

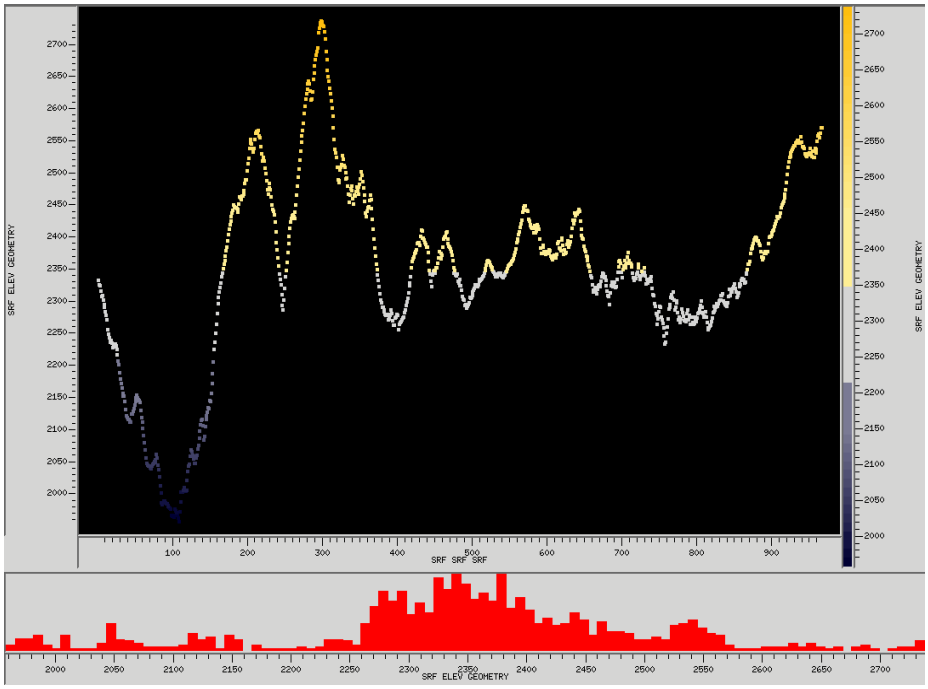


Figura 46 Perfil topográfico de la línea obtenido a partir de la asignación y cheque de geometría.

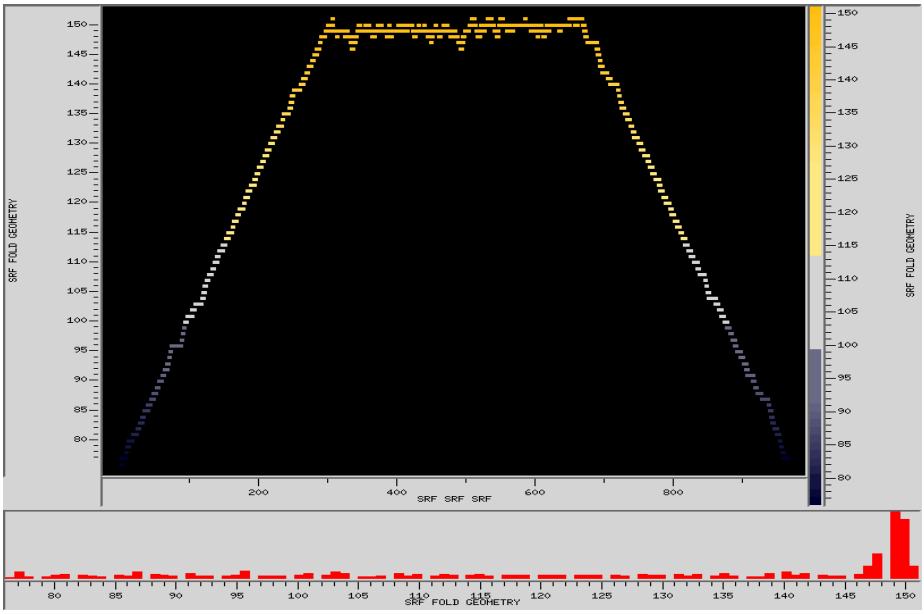


Figura 47. Cubrimiento nominal de la línea.

Al finalizar este proceso generamos un nuevo conjunto de datos llamado "Shot with geometry". A partir de este conjunto de datos podemos generar un apilado bruto,

suponiendo las velocidades de apilamiento aunque no sean las correctas, para darnos una idea del estado general de la línea. La figura 48 muestra el apilado bruto de la línea SG-2002-1840.

Figura 48. Apilado bruto de la línea SG-2002-1840.

Como podemos apreciar en esta imagen, la resolución sísmica es muy pobre, la sección se encuentra inmersa en ruido y a simple vista no se aprecia ningún reflector. Este resultado es típico de la zona y su mejoría constituye el reto principal de este trabajo.

Para comparar el estado de la información observese la figura 49, la cual es un apilado bruto de una zona con mejor respuesta sismica (Llanos Orientales, Colombia). En esta línea sin proceso alguno se ven múltiples reflectores, los cuales pueden seguirse fácilmente. Esta comparación nos permite darnos cuenta de la magnitud del problema a tratar en el Bloque San Gabriel.

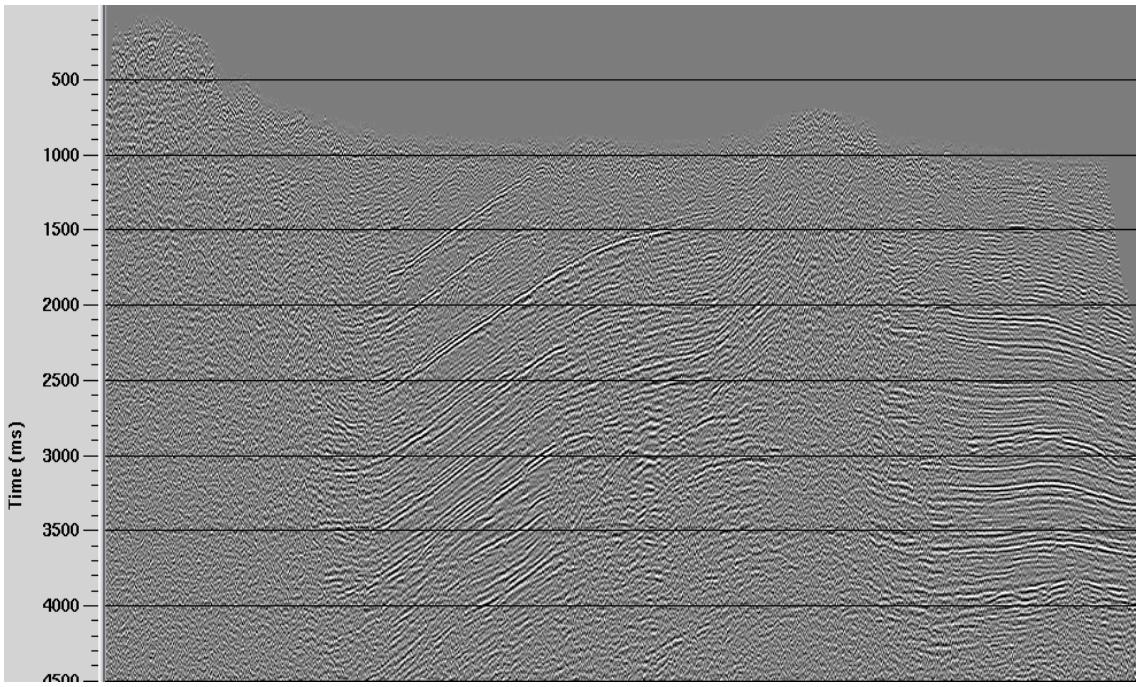


Figura 49. Apilado bruto de una línea sísmica adquirida en una zona geológica no compleja.

4.6 EDICIÓN DE TRAZAS RUIDOSAS, MUERTAS E INVERTIDAS.

Después de todos los pasos anteriores es necesario hacer un examen más meticuloso a todos los disparos. Este paso se puede tomar como un control de calidad riguroso que involucra a cada traza sísmica. Después eliminar los disparos anómalos la línea contiene un total de 267 disparos, cada disparo contiene 600 trazas, lo que da un total de 160200 trazas por revisar. El objetivo de este paso es observar, y marcar cada traza que sea susceptible de quitar ó si es posible de corregir, si se aprecia que una traza es demasiado ruidosa en determinado tiempo, la traza se elimina, si la traza presenta picos o valles donde sus trazas vecinas muestran valles y picos respectivamente, la traza es invertida y se corrige multiplicando sus valores de amplitud por (-1). Las trazas muertas e invertidas, se archivan en una base de datos para que el programa las tenga o no encuenta en los siguientes flujos de procesamiento. La figura 50 muestra una traza ruidosa a la derecha del disparo; observe como las amplitudes a lo largo de la traza son exageradas con respecto a las trazas vecinas. La traza se seleccionada en la figura 51 y se elimina en la figura 52.

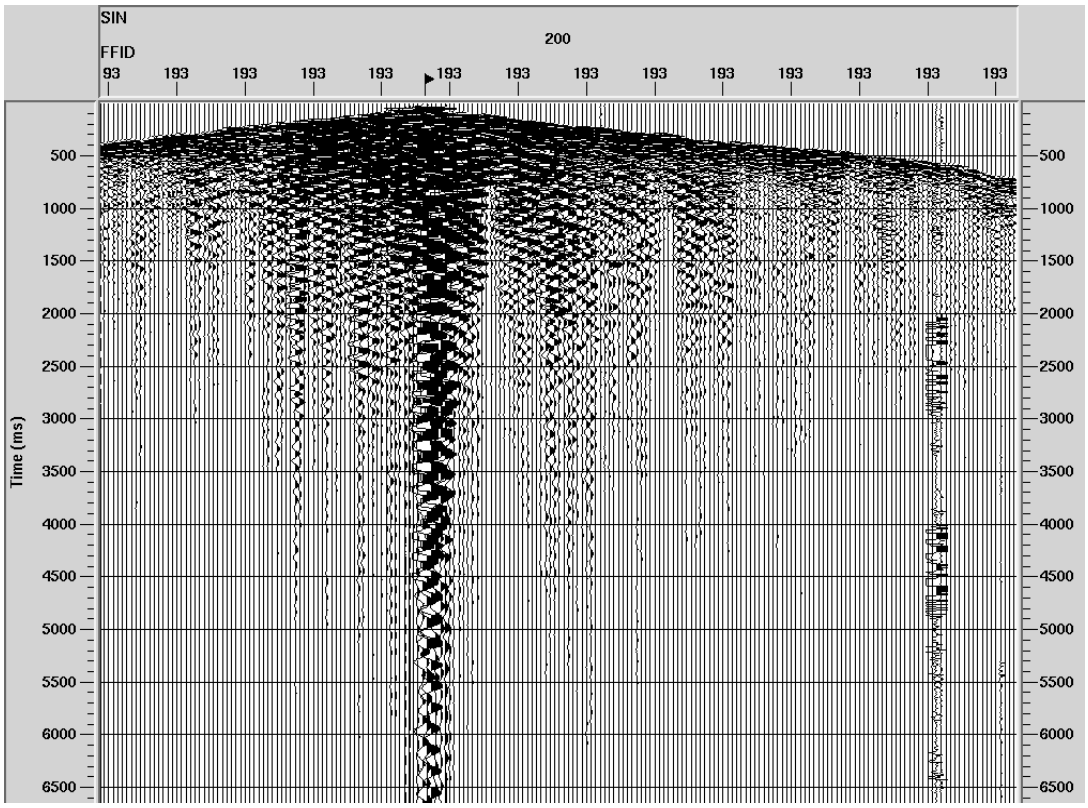


Figura. 50 Ejemplo de una traza ruidosa.

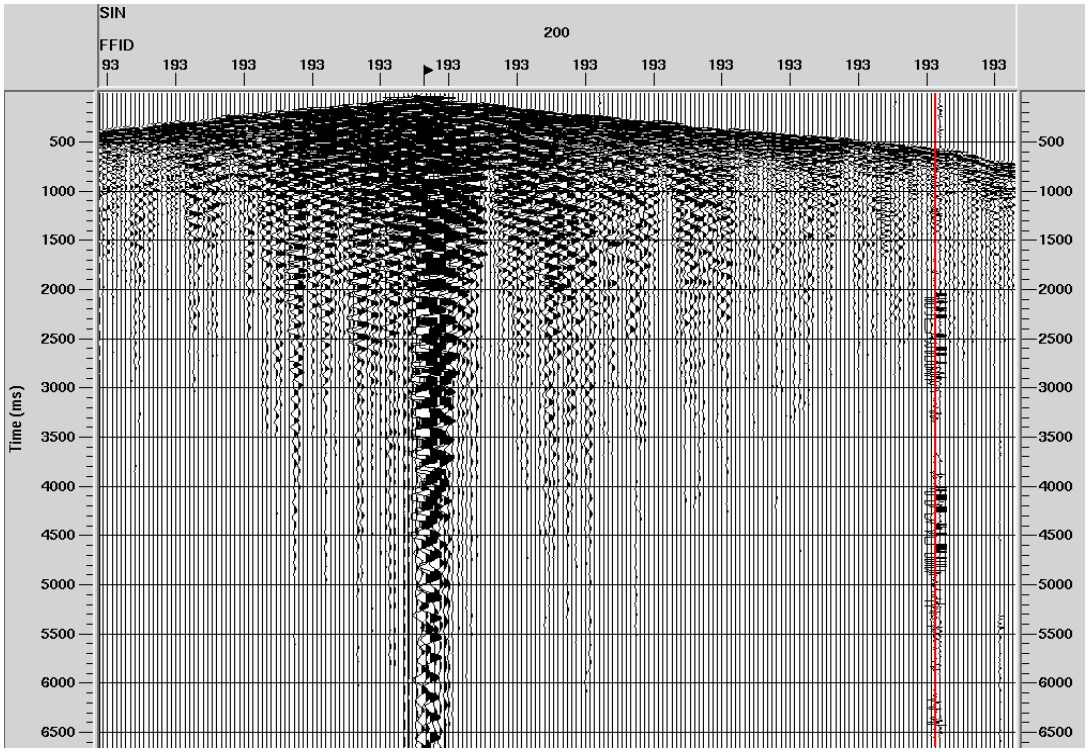


Figura 51. Selección de la traza ruidosa de la Figura 50

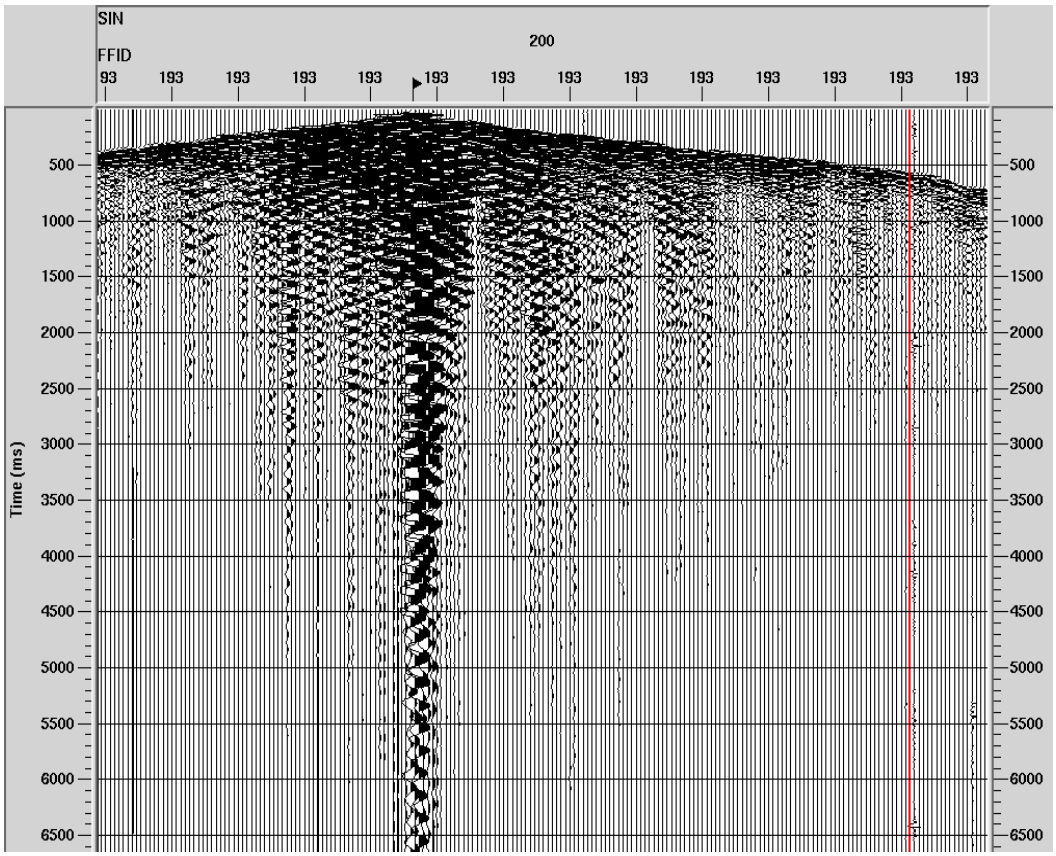


Figura 52. La traza ruidosa de la figura 51 ha sido eliminada, para evitar interferencia destructiva en los siguientes flujos de procesamiento.

Dentro de este flujo también se hace el picado de los primeros arribos, y de las zonas a recortar, por ejemplo para remover la energía de refracción. Es de resaltar que en la adquisición de esta línea no se presentó ninguna traza invertida, lo cual ocurre cuando el grupo de geófonos se conecta con la orientación equivocada.

4.7 PRUEBAS DE FILTRO Y RECUPERACIÓN DE LA VERDADERA AMPLITUD.

4.7.1 Aplicación de filtros

Cuando el pulso producido por la fuente de energía sísmica viaja a través de la tierra este se convuelve con secuencias de reflexiones y también con varios efectos de la tierra y de los instrumentos de registro, lo cuales distorsionan la forma del pulso original de varias maneras antes de que la energía reflejada sea finalmente registrada. De esta manera una traza registrada esta compuesta de una secuencia de reflexiones, de refracciones y varias formas de ruido. (Fisher, 1980). Esta descripción podría definir las características de cada componente y como, cada uno se combina con los otros. Solo cuando esta descripción ó este modelo se ha establecido, se puede procesar una traza para atenuar ó cambiar los componentes indeseados.

4.7.2 Filtros de ruido incoherente

Dentro de este tipo de ruido se encuentran los ruidos aleatorios de baja y alta frecuencia y el ruido ambiental. La primera parte de las pruebas de filtro consiste en analizar el contenido de frecuencias presentes dentro de los disparos sísmicos, de esta manera se aplican diferentes filtros pasa-banda fase cero y se observan que tan coherentes son los eventos dentro de cada banda. El filtrado de frecuencias puede hacerse con filtros de rechazo (**band-reject**), filtros pasa-banda (**band-pass**), filtros de corte bajo (**high-pass**), o filtros de corte alto (**low-pass)**.

Todos estos filtros se basan en el mismo principio: permitir el paso de un determinado contenido de frecuencias. El filtrado pasa-banda es el más usado debido a que suprime de manera efectiva los ruidos aleatorios. Es muy practico ya que la energía de la reflexión sísmica usualmente esta confinada a un ancho de banda aproximadamente de 10 a 70 Hz, con frecuencias dominantes de alrededor de 30 Hz. (Yilmaz, 1988).

Las figuras 53 a 58 muestran un mismo gather de la línea con la aplicación de un filtro pasa-banda de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60 Hz respectivamente. Cada panel contiene solo las frecuencias que estructuran el filtro fase cero aplicado.

El primer panel muestra el disparo con un filtro Band Pass de 0-10 Hz, como se puede observar comparándolo los otros paneles, este presenta la mayor cantidad de eventos coherentes, sin embargo esta apreciación puede ser errónea ya que debido a la fuerte diferencia en velocidad de la capa más superficial también conocida como la capa meteorizada, la energía presente en este panel puede ser energía de múltiples reverberaciones de baja a muy baja frecuencia, observe como en la siguiente imagen la energía coherente disminuye drásticamente con tan solo un filtro pasa-banda de 10-20 Hz. Este panel confirma que gran parte de la energía de baja frecuencia es producto de reverberaciones atrapadas entre la capa meteorizada y capas inferiores debido a los fuertes contrastes de de densidad y velocidad.

En los siguientes paneles los eventos coherentes continúan reduciéndose, al punto que se observa ruido debajo de 1.2 seg en el panel de 20-30 Hz. Este ruido sube a medida que las bandas de frecuencia son mayores. Por ejemplo, el panel de 30 a 40 Hz tiene una señal útil hasta los 0.8 seg mientras que los paneles de 40 a 50 y 50 a 60 tienen señal útil solo hasta 0.5 seg y 0.4 seg respectivamente. Por consiguiente las bandas de señal útil en la zona de trabajo son de frecuencia moderada (15-30 Hz) y se encuentran confinadas a la parte superior de la sección, por lo cual la resolución se reduce drásticamente con los tiempos mayores.

Del análisis anterior se concluye: a) la información útil de la línea 1840 se encuentra alrededor de 0 a 2.5 s, b) En la franja de 0 a 10 Hz se presentan múltiples de baja frecuencias, y c) Después de los 40 Hz la señal registrada es casi totalmente incoherente, compuesta por ruido de alta frecuenta.

Con base en estas observaciones el filtro Band Pass más adecuado para las siguientes etapas de procesamiento esta enmarcado dentro del trapezoide 10-20-30-40 Hz.

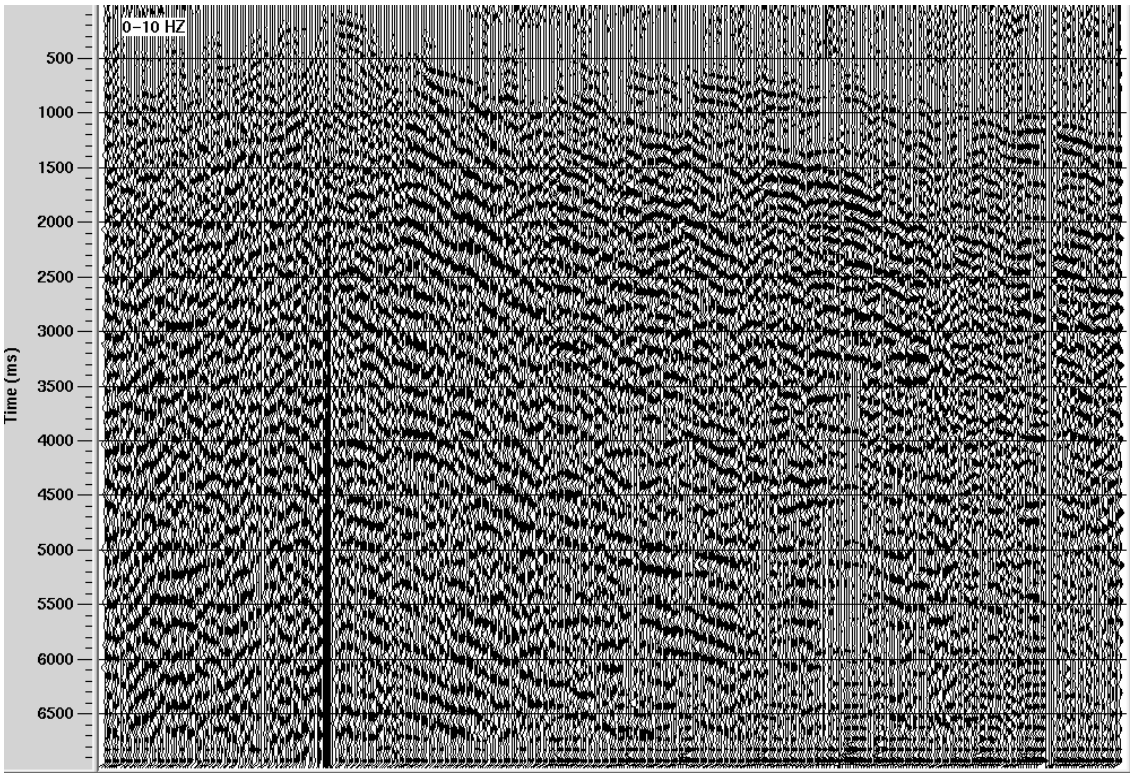


Figura 53. Aplicación de un filtro band pass de 0-10 Hz.

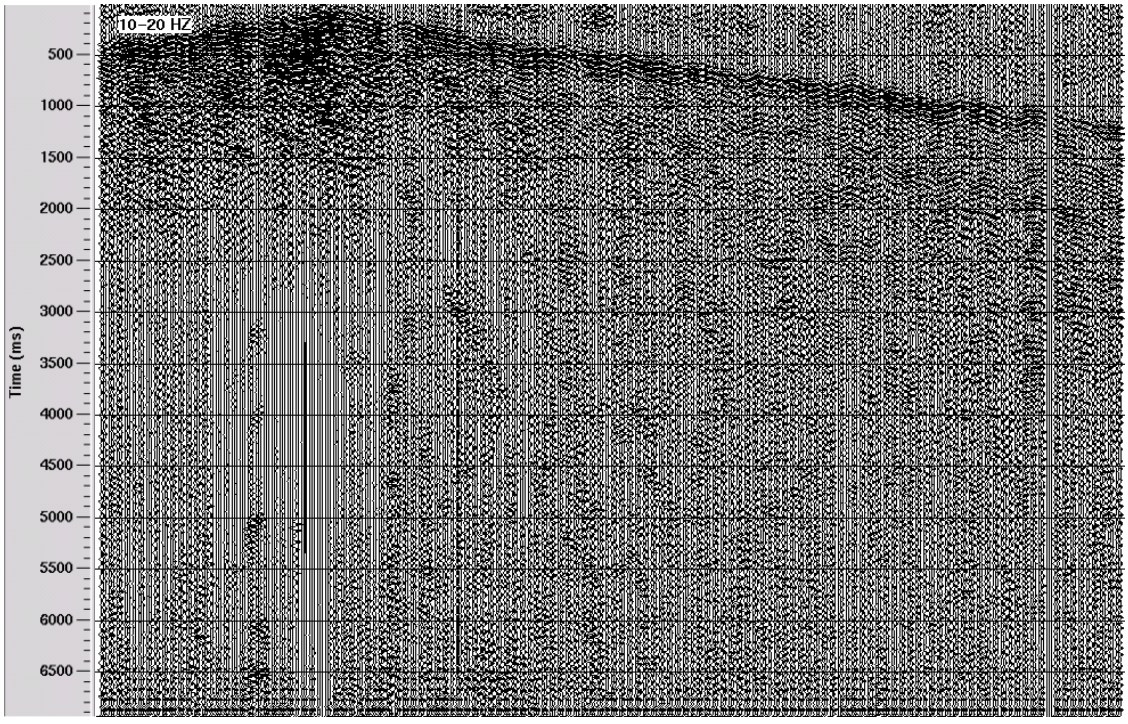


Figura 54. Aplicación de un filtro band pass de 10-20 Hz.

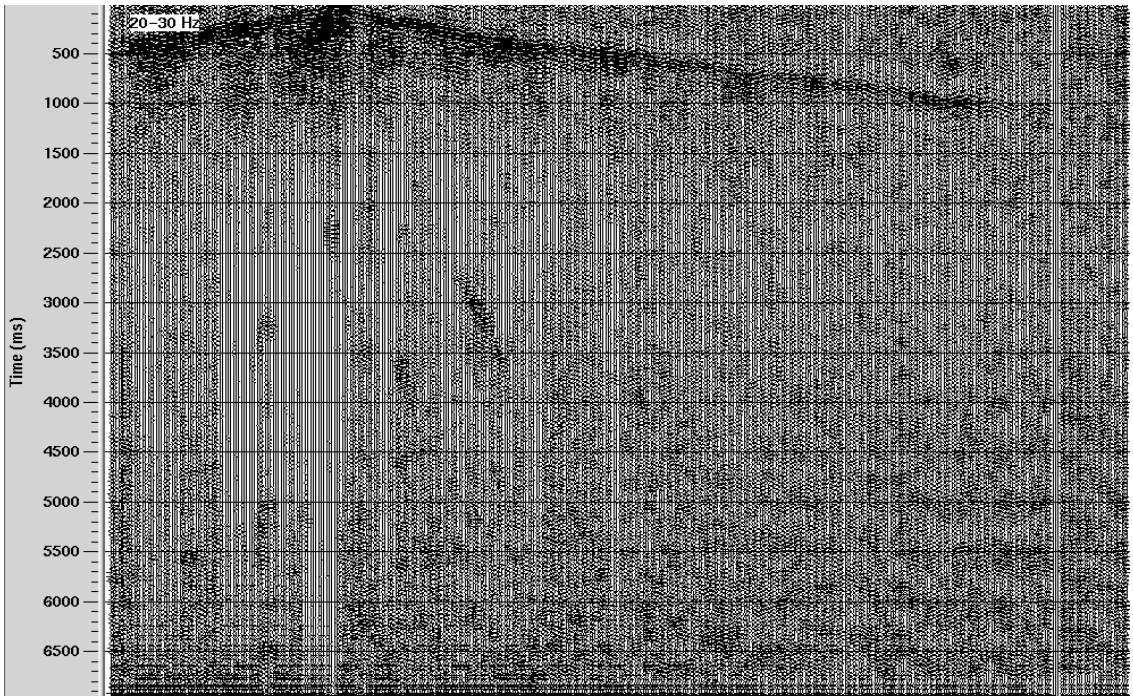


Figura 55. Aplicación de un filtro band pass de 20-30 Hz.

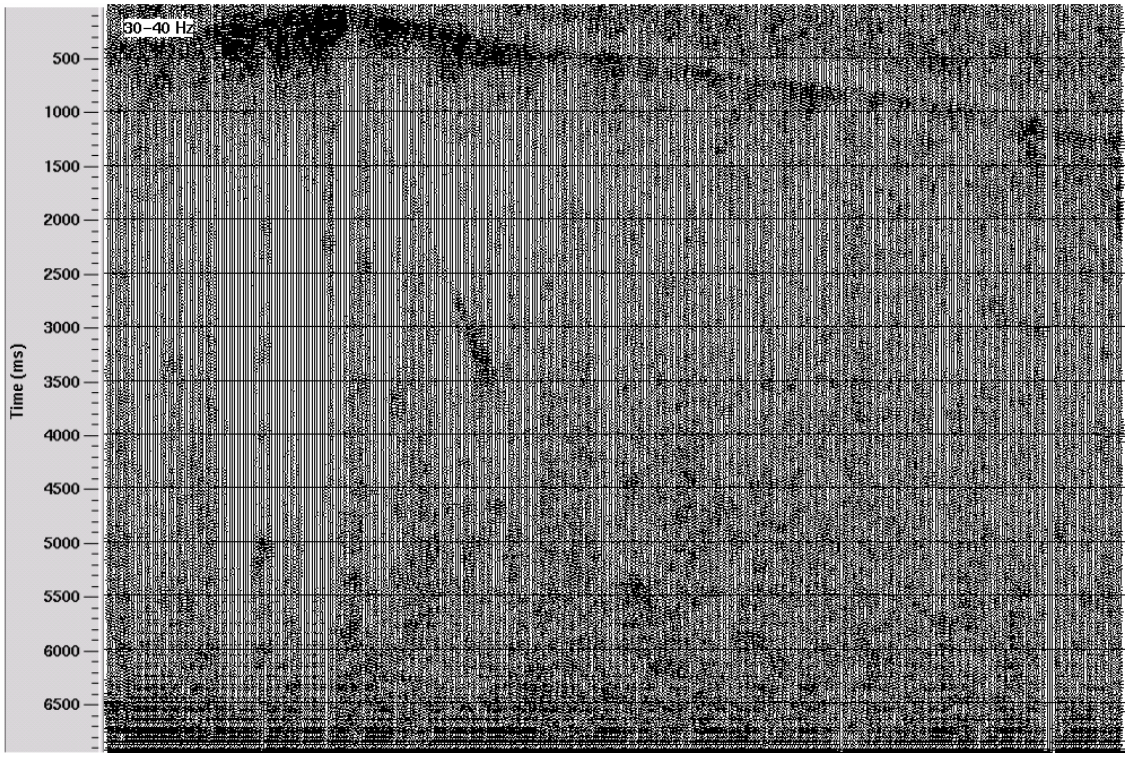


Figura 56. Aplicación de un filtro band pass de 30-40 Hz.

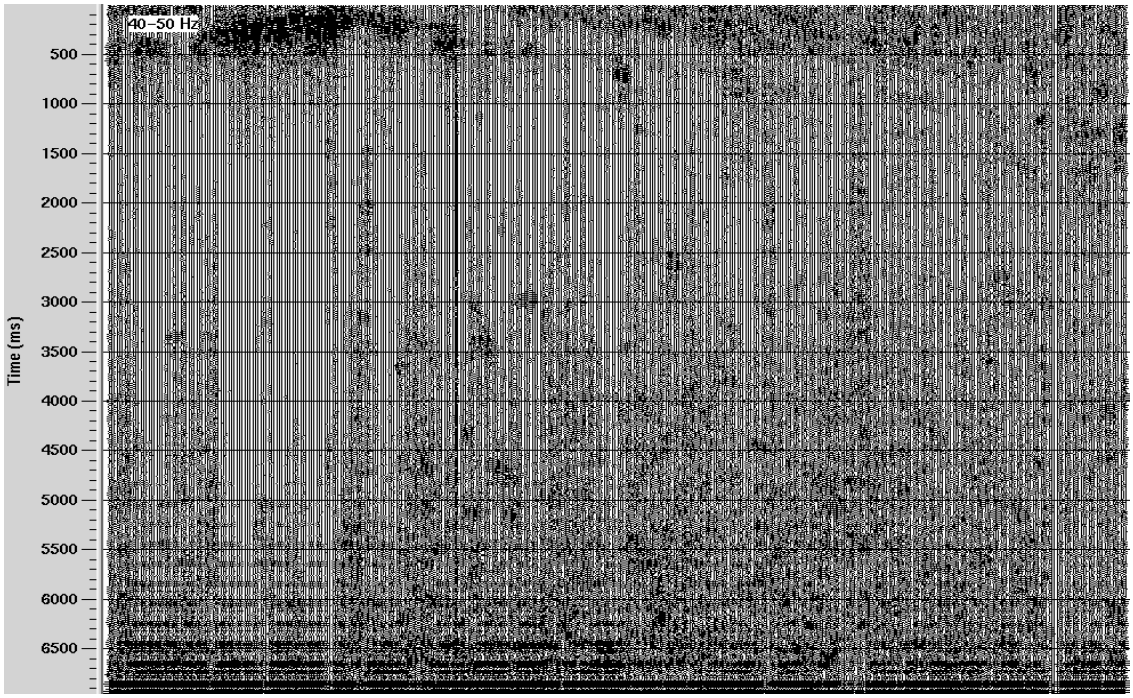


Figura 57. Aplicación de un filtro band pass de 40-50 Hz.

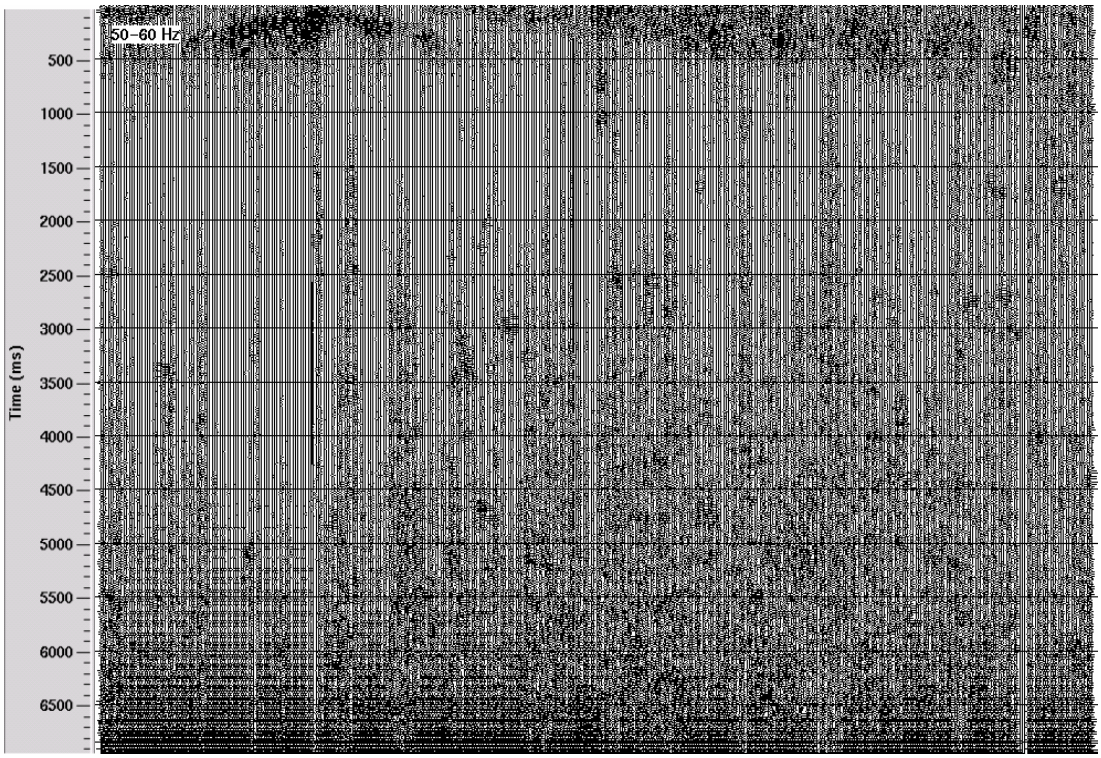


Figura 58. Aplicación de un filtro band pass de 50-60 Hz.

4.7.3 Filtros de ruido coherente.

Este tipo de ruido involucra principalmente al efecto ground roll, las ondas guiadas (**guided waves**), las ondas dispersas lateralmente (**side scattered noise**), las ondas de aire (**air waves**), la interferencia de las líneas eléctricas y a las reflexiones reverberantes que rebotan entre capas y arriban en tiempos posteriores con respecto a una reflexión genuina.

Aunque el filtrado pasa banda también es efectivo con algunos de estos componentes, también falla con algunos otros debido a la gran variedad de frecuencias contenidas por los ruidos coherentes por lo cual es necesario aplicar algunos filtros diferentes al pasa-banda. Esta parte comprende la aplicación de dichos filtros de ruido para mejorar la resolución de los datos e impedir efectos dañinos por la presencia de las frecuencias anómalas de tal manera que se optimice la efectividad de las siguientes fases del procesamiento, como son la deconvolución, el análisis de velocidades, y la migración.

En el examen general de todos los disparos de la línea SG-2002-1840 se detectó la presencia de ruido superficial, ondas dispersas lateralmente y energía de tipo ground roll. Por consiguiente se aplican los procesos de atenuación de ráfagas de aire (**air blast attenuation**) y de atenuación de ondas de ruido superficiales (**surface wave noise attenuation**) presentes en el paquete de procesamiento. Para esto se analizaron estos tipos de ruido, buscando sus velocidades de propagación y sus frecuenciaspara caracterizarlos y atenuarlos. Las herramientas producen un archivo de salida que contiene la nueva información con una mejor relación señal-ruido y sin el ruido observado.

El cálculo de las velocidades de los ruidos se hace de manera sencilla graficando los gathers con ruido y midiendo la velocidad como se muestra en la Figura 59.

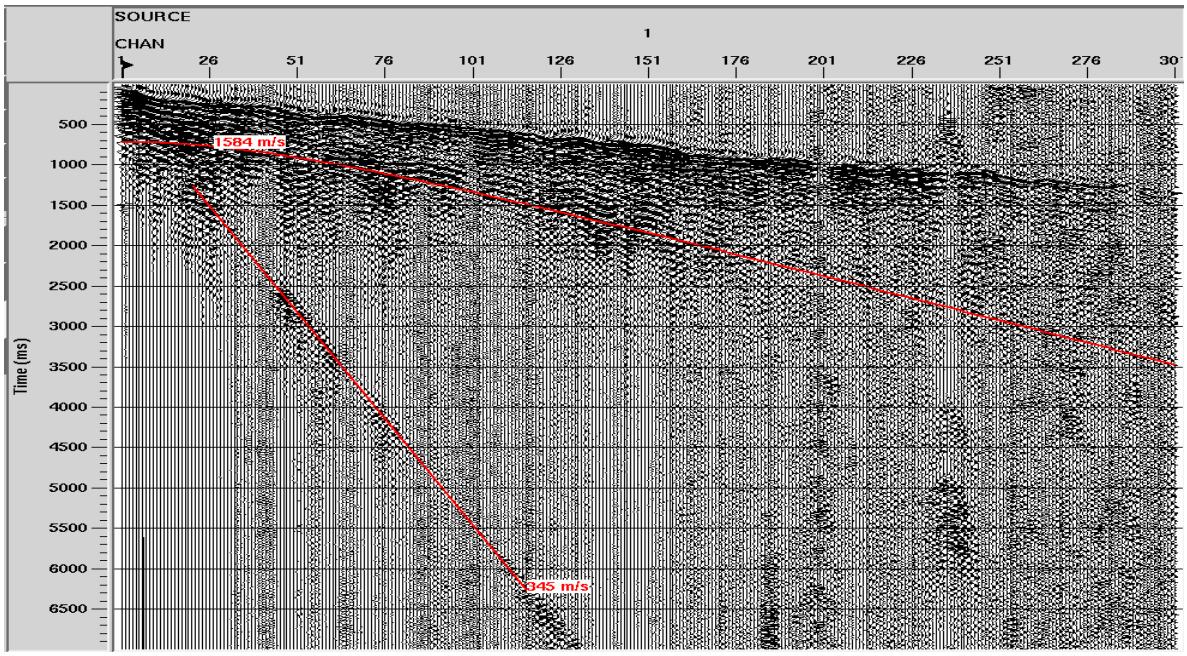


Figura 59. Medición de la velocidad para energía de tipo Air blast (línea Inferior). La hipérbola superior muestra la velocidad de algunas reflexiones someras.

Para el cálculo de las frecuencias de corte se utiliza el espectro de frecuencias, que muestra las frecuencias más altas (Figura 60).

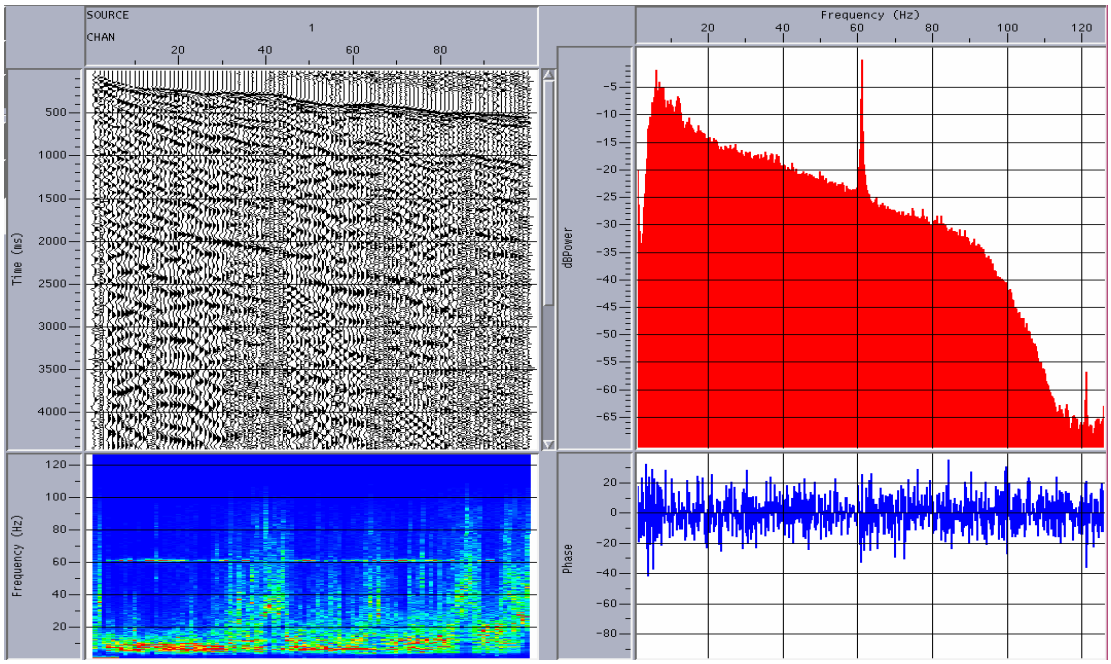


Figura 60. Espectro de frecuencias del disparo.

En los registros de la línea 1840 los ruidos encontrados fueron principalmente de 4 tipos:

1. Ruido ambiental aleatorio: Sonido de quebradas, pasos (hombres ó animales), ruido de gran amplitud y alta frecuencia (taladros de perforación, compresores, helicóptero) movimiento del viento y ruido electrónico producido por los instrumentos de registro (spike noise).
2. Ground Roll de baja frecuencia, gran amplitud y baja velocidad.
3. Ondas de aire: Ocurren cuando el disparo genera una onda de choque en superficie, la cual se desplaza por el corredor de la línea con velocidades entre 300-340 m/s
4. Ruido disperso lateralmente: Caracterizado por arribos de difracciones en forma tabular hacia la parte superior de los registros se observaron dos componentes de frecuencia que viajan con velocidades de 500 y 900 m/s respectivamente
5. Reverberaciones múltiples de baja a muy baja frecuencia

4.7.4 Recuperación de la verdadera amplitud.

Después de definir el filtro más adecuado para trabajar la información, se recuperaron las verdaderas amplitudes de cada traza, perdidas por la divergencia esférica y por la atenuación intrínseca, esta etapa es muy diferente a la de aplicar una función de ganancia ya que aquí se tienen en cuenta las velocidades de las diferentes rocas que se obtienen por medio de perfiles sísmicos verticales en pozos exploratorios cercanos a la línea. Para la línea SG-2002-1840 se consultó el perfil sísmico vertical del pozo "Oso 1" ubicado a 2.5 Km al Sur Oeste de la línea, el cual perforó las formaciones de interés que afloran en el área.

El software ofrece una herramienta que puede usarse separadamente o en combinación, es decir, la información puede corregirse por pérdida de amplitud, o por atenuación inelástica. Las opciones incluyen también correcciones en decibeles/seg y correcciones de energía con respecto al tiempo. Sin embargo al no existir estudios sobre el cambio de estos factores en el área se decidió realizar la recuperación de amplitudes basándose en las

velocidades del pozo "Oso 1" y de los tiempos del modelo geológico elaborado para la línea HSG-99-1610 por Linares (2002), (Figura 61).

La Tabla 4 muestra las velocidades y los tiempos utilizados para la corrección de la divergencia esférica y la recuperación de la verdadera amplitud.

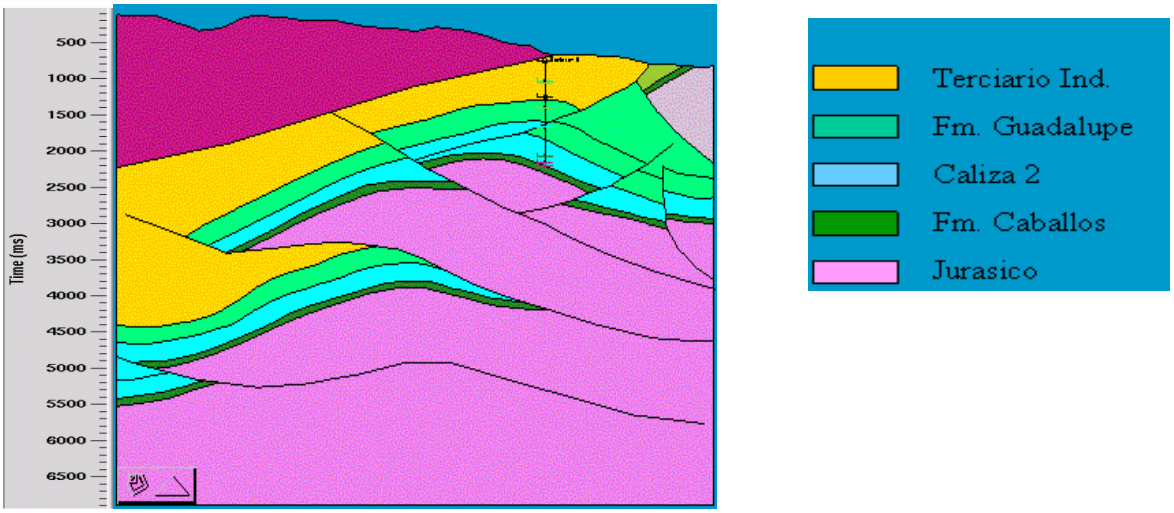


Figura 61. Modelo Geológico para la línea HSG-99-1610 Tomado de Linares, 2002.

Formación	Tiempo (ms)	Velocidad (m/s)
Terciario (Pepino)	0-1800	3398
Monserrate	1800-2600	2944
Villeta	2600-3200	3146
Caballos	3200-4000	3146
Basamento (Saldaña)	4000-7000	4442

Tabla 4. Tabla de velocidades y tiempos utilizados para la recuperación de amplitudes de la línea SG-2002-1840

Después de realizar las pruebas de recuperación de la verdadera amplitud se concluyo que las correcciones hechas mediante la función de ganancia AGC de 500 ms eran más apropiadas para esta zona, por lo cual no se siguió trabajando con la recuperación de amplitudes.

4.8 PRUEBAS DE DECONVOLUCIÓN.

4.8.1 Fundamentos.

La tierra esta compuesta por capas de roca de diferentes litologías y propiedades físicas. Sísmicamente las capas de roca se definen por las densidades y velocidades con las cuales las ondas sísmicas se propagan a través de ellas. El producto de la densidad y la velocidad se conoce como la impedancia acústica. El contraste de impedancia acústica entre capas de rocas adyacentes causa las reflexiones. Por lo tanto la señal sísmica puede considerarse como la convolución de la ondicula fuente con la respuesta de la tierra. Esta respuesta incluye algunos efectos indeseables como reverberaciones, atenuaciones, múltiples, ruidos ambientales y de los instrumentos registro.

El objetivo de la deconvolución es el de estimar la secuencia reflectiva terrestre por medio del diseño y la aplicación de filtros inversos que remueven la ondicula de la fuente y algunos de los componentes indeseados. Después de la deconvolución la información mejora su resolución temporal, debido a que remueve gran parte de la energía de reverberaciones o múltiples y comprime las ondiculas en los *gathers CMP*.

4.8.2 Principios.

La deconvolución es un proceso complejo que involucra varios principios físicos e innumerables cálculos matemáticos. En esta sección se explica la deconvolución de una manera rápida y sencilla sin entrar en el difícil tratamiento físico y matemático. El lector que desee comprender a fondo este concepto puede remitirse a los textos de Claerbout, (1976), Peacock, (1969) ó Yilmaz, 1988.

Como su nombre lo indica la deconvolución se basa en la convolución inversa de la señal registrada, por ello se habla de filtros inversos, los filtros inversos se obtienen básicamente de la aplicación de filtros lineares a cada traza sísmica de un registro.

El filtro inverso convierte a la traza sísmica en una serie de spikes que definen la respuesta impulsiva terrestre.

Para resumir, el filtro inverso calcula el inverso matemático de la traza sísmica. Ese inverso matemático al convolverse con la traza sísmica separa la ondicula fuente y la respuesta impulsiva terrestre. La ondicula fuente se sintetiza en un único pico ó spike y la respuesta reflexiva terrestre se sintetiza en una serie de picos o spikes, donde cada spike representa una reflexión genuina.

4.8.3 Filtrado Inverso

Existen varios tipos de filtros inversos entre estos los más comunes y de fácil manejo están el filtrado inverso de mínimos cuadrados, los filtros Wiener y el filtrado inverso de fase mínima. Independientemente de su modo de trabajo el filtrado inverso toma la información sísmica que presenta superposición de varias reflexiones y las separa identificando las que provienen de reflectores reales.

4.8.5 Metodología y resultados de las pruebas en la línea SG-2002-1840.

Para la deconvolución el analista crea las ventanas de deconvolución es decir las áreas donde esta la mayor cantidad de información o la de mejor calidad, seleccionandolas sobre algunos de los shot gathers de la línea y le indica al software el tipo de deconvolución a utilizar, la longitud de operador, el retardo de predicción (si eligió la deconvolución predictiva), y el nivel de ruido blanco (prewhitening), para la estabilidad numérica de los cálculos. Las ventanas diseñadas se interpolan entre las diferentes localizaciones y el software diseña y aplica los filtros inversos a la información de entrada produciendo un nuevo conjunto de datos. Los nuevos datos pueden apilarse utilizando las funciones de velocidad diseñadas para la función de recuperación de amplitudes. De esta manera se evalúan de forma cualitativa los resultados y se escogen los parámetros mas adecuados para el desarrollo de las siguientes etapas de procesamiento.

Para la realización de la pruebas de deconvolución predictiva y spiking se usa el algoritmo de mínimos cuadrados de Wiener – Levisnon (Yilmaz, 1988).

El tipo de deconvolución, que presento mejores resultados fue la deconvolución predictiva fase mínima, con una longitud de operador de 160 ms, en una distancia de predicción de 24 ms. El porcentaje de ruido blanco (prewhitening) se configuró en 0.1%, ya que es un valor considerado como estándar por Yilmaz, 1988. La figura 62 muestra el apilado conseguido con estos parámetros.

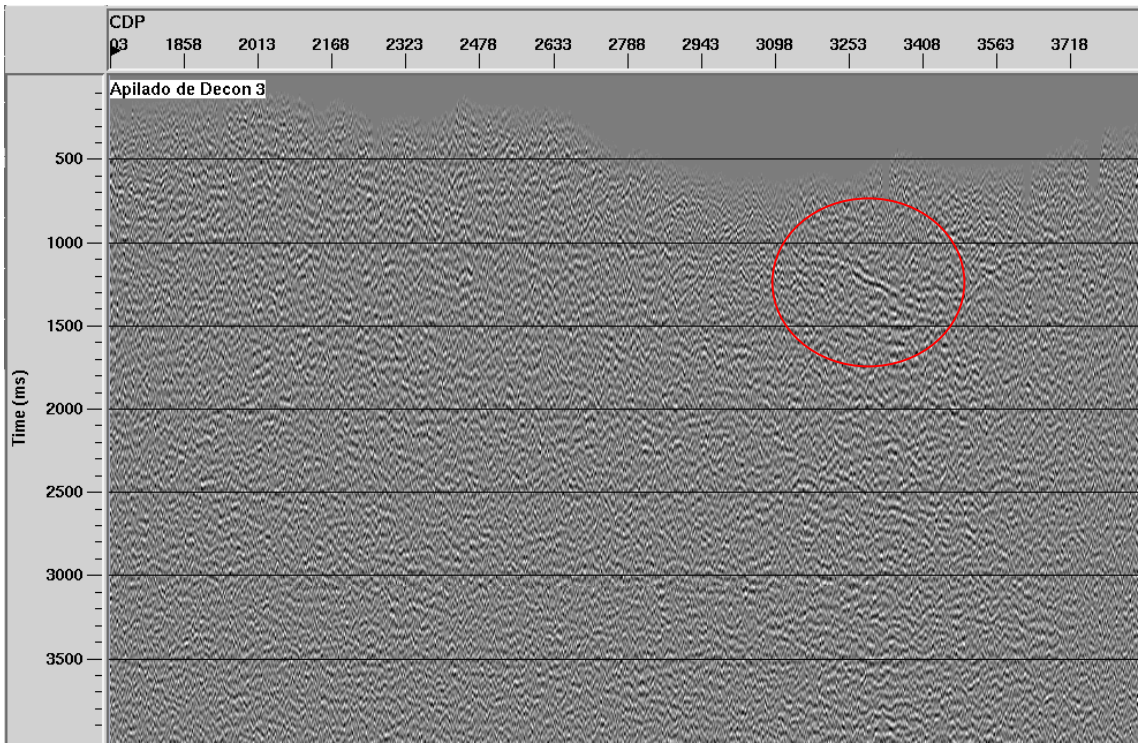


Figura 62. Apilado parcial de la línea SG-2002-1840 después de aplicar deconvolución predictiva (longitud de operador = 160).

Observe que en este apilado se logra observar algunos reflectores hacia la parte derecha de la sección, lo cual es una mejoría si se compara a esta imagen con el apilado de bruto de la figura 48.

Las figuras 63 y 64 muestran dos de los resultados obtenidos durante las pruebas de deconvolución, pero ninguno es mejor que el apilado anterior.

El apilado de la figura 63 se realizó con deconvolución spiking y longitud de operador de 140, en esta deconvolución se mantuvo el porcentaje de ruido blanco en 0.1

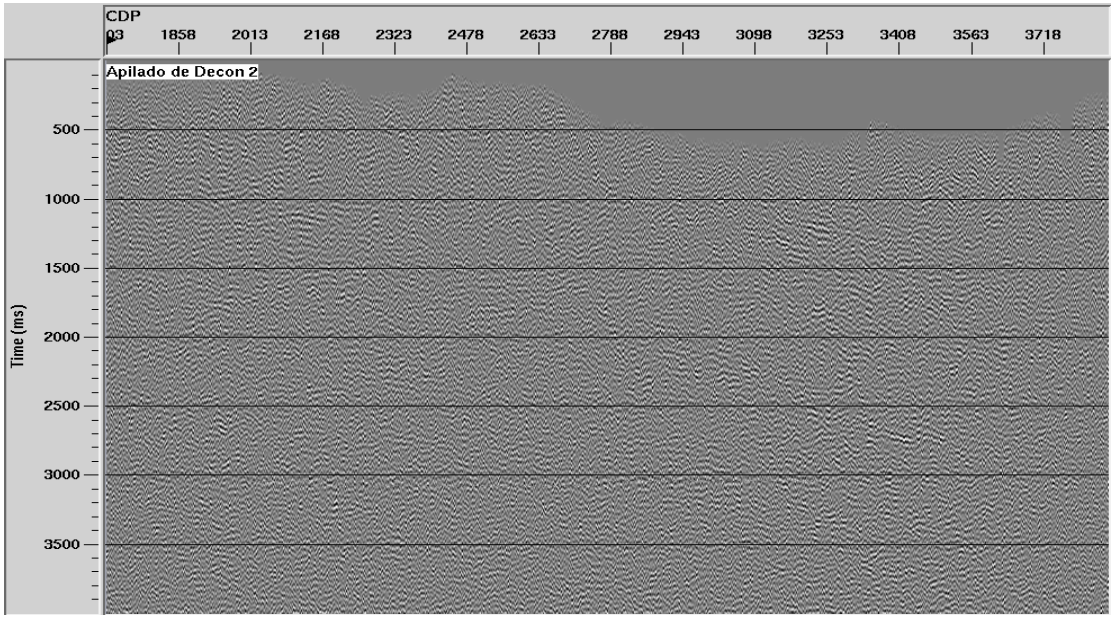


Figura 63. Apilado parcial de la línea SG-2002-1840 después de aplicar deconvolución spiking. (longitud de operador = 140)

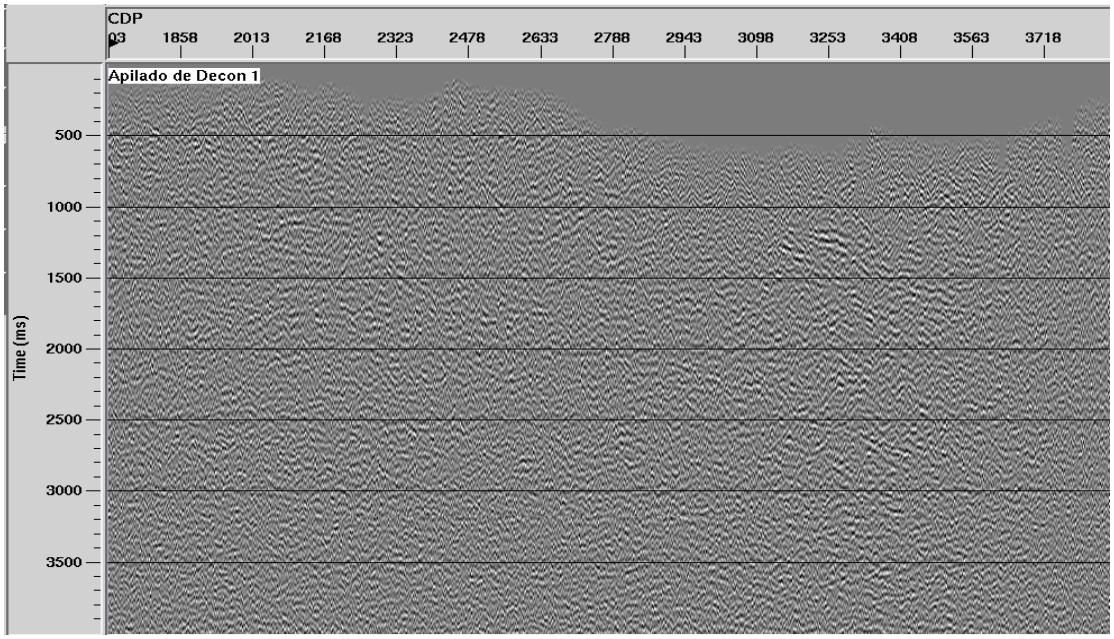


Figura 64. Apilado parcial de la línea SG-2002-1840 después de aplicar deconvolución Predictiva (longitud de operador = 120).

El apilado de la figura 64 se obtuvo realizando deconvolución predictiva con longitud de operador de 120 ms y distancia de predicción de 12 ms. El Porcentaje de ruido blanco fue igual al de los casos anteriores.

Una vez escogido el tipo de deconvolución y sus parámetros más adecuados se continúo con la siguiente etapa de procesamiento.

4.9 CORRECCIONES ESTÁTICAS DE REFRACCIÓN.

4.9.1 Fundamentos.

Las correcciones estáticas tratan de homogenizar la capa superficial o meteorizada, esta capa influencia los tiempos de arribo de las reflexiones debido a los fuertes contrastes de topografía, a sus cambos de espesor y a sus variaciones de velocidad lateral. Las correcciones estáticas calculan una velocidad de reemplazamiento para esta zona y la aplican con el fin de simular condiciones semejantes a las del refractor.
Por consiguiente, las correcciones estáticas representan un desplazamiento de tiempo constante para toda la traza sísmica y se aplican en el dominio del disparo antes de la corrección normal moveout y el apilamiento. (Gómez, 1992). Los métodos principales para calcular las correcciones estáticas son las estáticas de refracción y las correcciones estáticas residuales. Las estáticas residuales son variaciones remanentes que permanecen en la información aun después de las correcciones estáticas de refracción.
Para la estimación de las soluciones estáticas ProMAX 2D presenta tres tipos de soluciones[3] y el analista sísmico escoge la que mejor resultados produce:

1. Matrices residuales decrecientes. (DRM)
2. Método reciproco generalizado (GRM)
3. Tiempos de retrazo. (TD)

[3] Consultar fundamentos matemáticos de las soluciones estáticas de refracción en Yilmaz, 1988.

El paquete ProMAX 2D, genera las soluciones estáticas de refracción a partir del tiempo de picado de los primeros arribos y calcula automáticamente la velocidad de la capa meteorizada mediante los tiempos de pozo (*uphole times*) de los disparos, estos valores se tomaron durante la adquisición y se ingresaron durante la configuración de la geometría. Los tiempos uphole miden el tiempo de viaje de la fuente a la superficie y se usan para corregir los tiempos de reflexión sísmica con respecto al datum sísmico.

Para la serie de análisis preliminares a lo largo de la línea. Se usó un datum de 3000 metros y una velocidad de reemplazamiento de 4000 m/s; velocidad recomendada por el grupo de interpretación del área, para llevar a cabo el amarre de las líneas sísmicas.
El datum de 3000 metros se tomó de la altura inmediatamente superior a la mayor altura presente en la línea o sea 2900 m.

4.9.2 Metodología para corregir las estáticas de refracción en la línea SG-200-1840.

ProMAX 2D permite calcular las estáticas de refracción, de manera interactiva, con el propósito de esquematizar este proceso se presentan los pasos del cálculo de estáticas:

1. Edición del picado de los primeros arribos.
2. Definición de capas meteorizada.
3. Calculo de las velocidades de la meteorizada.
4. Comparación de las soluciones estáticas.
5. Generación del modelo en profundidad de la meteorizada.
6. Elección de la solución estática más apropiada.

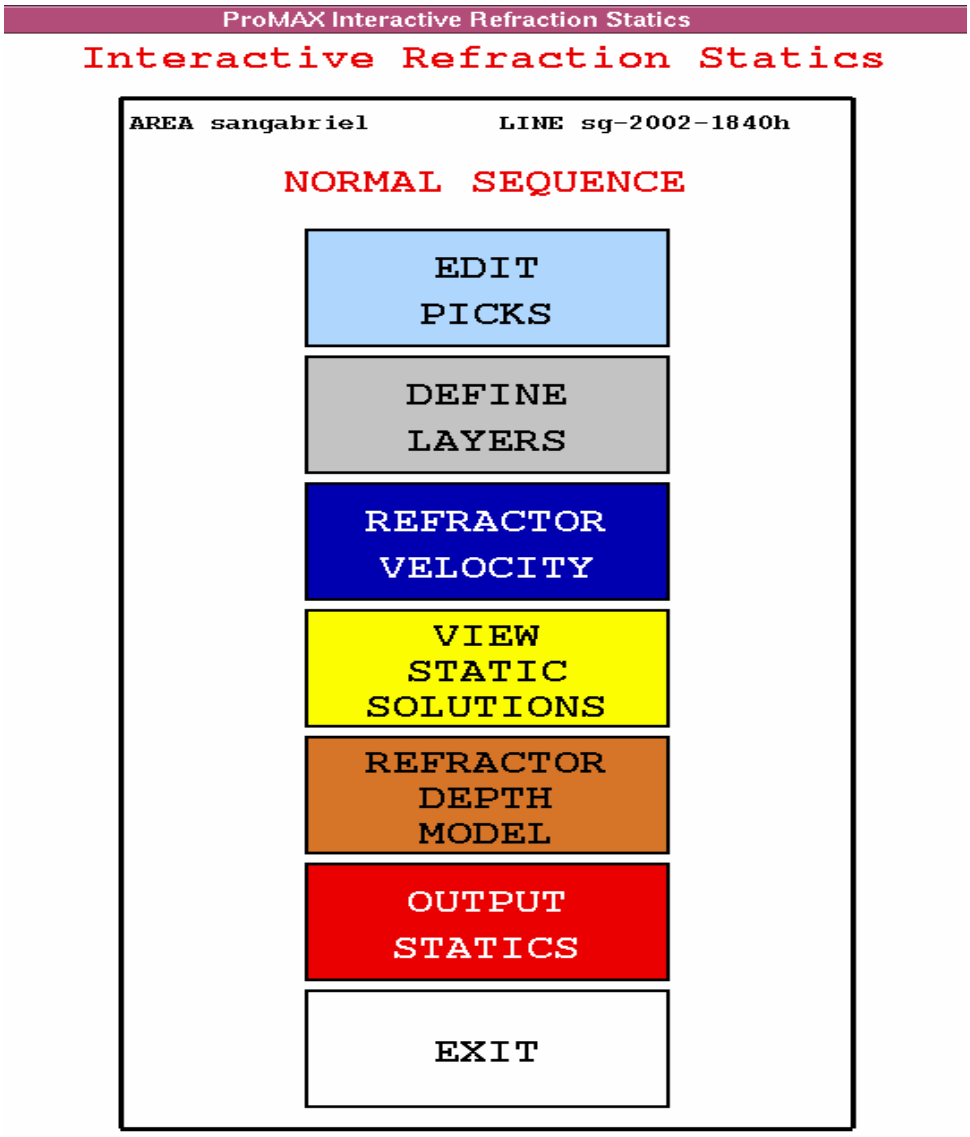


Figura. 65. Lista de los procesos interactivos del sistema de procesamiento para el cálculo de las correcciones estáticas.

4.9.2.1 Edición de picos.

Durante esta etapa el analista revisa el picado de los primeros arribos, para que estos se encuentren de la manera más coherente posible en todos los disparos, es decir compara disparos consecutivos, y revisa que en ellos los arribos sigan un mismo patrón de llegada. Lo anterior produce mayor exactitud en el cálculo de las soluciones estáticas. La Figura 66

muestra en puntos rojos la recepción de los primeros. Este patrón de arribos se debe mantener en los tres disparos consecutivos ya que se dispararon en una distancia relativamente pequeña y por consiguiente la gran mayoría de refracciones provienen del mismo lugar.

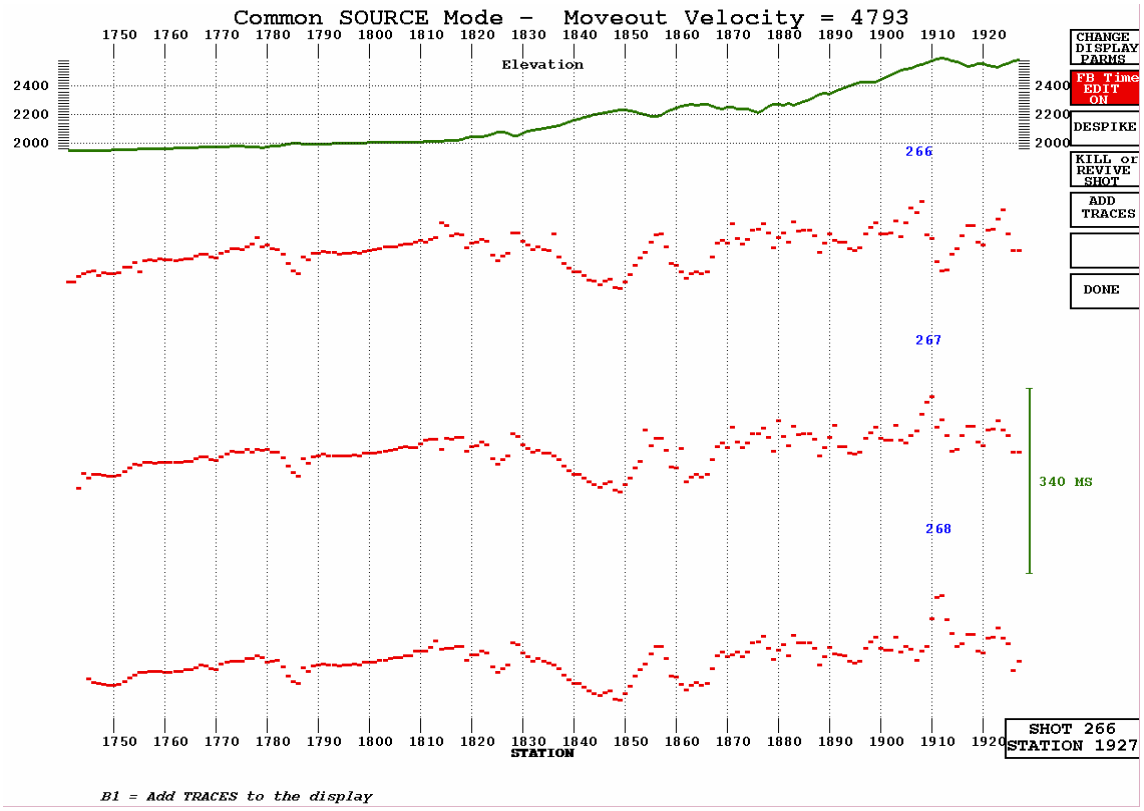


Figura 66. Edición de Picos.

Observe como los picos hacia el lado derecho del tendido pierden aproximación en el tiempo arribo. Este efecto se debe a las variaciones abruptas de la topografía, la cual puede apreciarse en la parte superior de la imagen junto con y el rango de estaciones.

4.9.2.2 Definición de la capa refractora.

En esta parte se le proporciona al software un nivel de referencia para que realice los cálculos de velocidad promedio de la capa refractora. La Figura 67 muestra el rango en tiempo de las variaciones de velocidad obtenidas a partir cálculo de los primeros arribos

en la línea. Para el cálculo de la velocidad dinámica, el procesador debe trazar una línea que representa a la capa refractora, a través de la zona de mayor densidad. La parte superior de la imagen muestra en color azul el tendido hacia la izquierda y en la parte inferior se observa el tendido hacia la derecha. El valor promedio de la velocidad dinámica se obtiene a partir de la pendiente de la línea. Esta velocidad se muestra en la parte superior de la imagen.

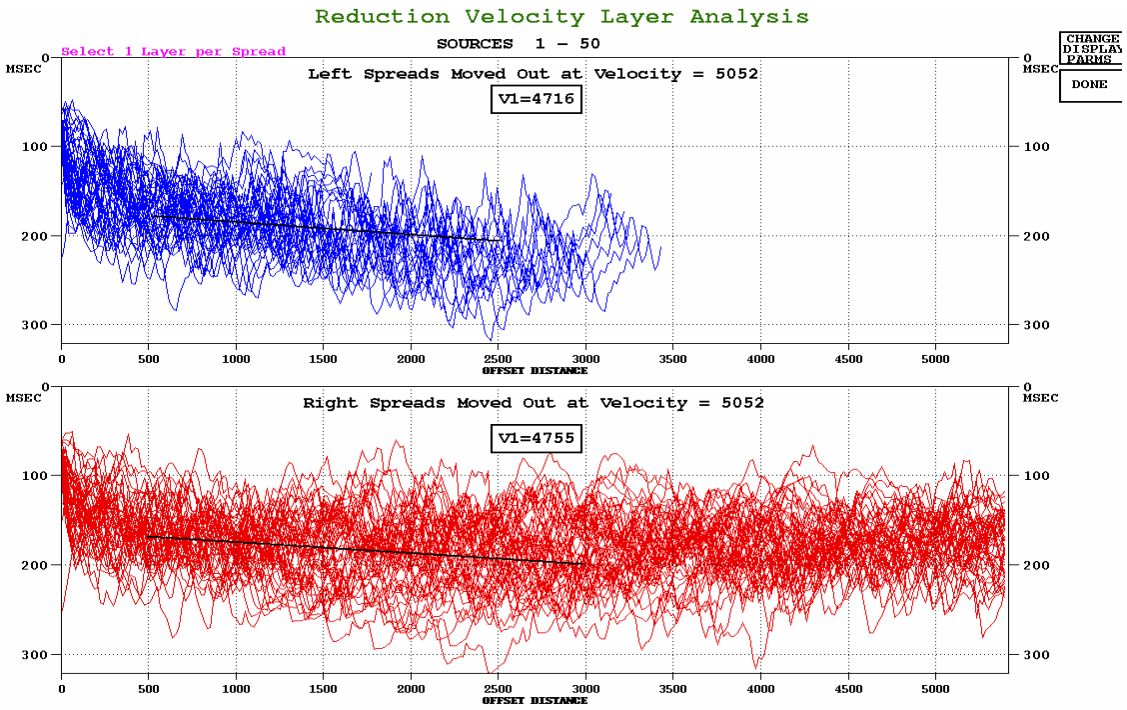


Figura 67. Picado de la capa refractora para la corrección de las estáticas de refracción.

4.9.2.3 Velocidad del refractor.

Teniendo la velocidad de corrección preliminar se procede a obtener la velocidad sísmica de la capa refractora. El sistema calcula la velocidad y despliega una nueva ventana que muestra en negro la velocidad de la capa superficial obtenida de los uphole time y en colores las velocidades del refractor obtenidas mediante los tres métodos mencionados anteriormente. El método DRM genera las soluciones de color rojo, el método GRM las soluciones de color verde y el método DT las soluciones en color azul. La parte inferior de la imagen es un la ampliación del cuadro superior, donde se pueden editar las velocidades

de la capa superficial y del refractor en aquellas zonas donde se presentan incongruencias. Las incongruencias son producto de la imprecisión en el tiempo de llegada de los primeros arribos. Como se dijo la imprecisión se debe a los efectos de topográficos, al ruido y la falta de cobertura en los extremos de la línea.

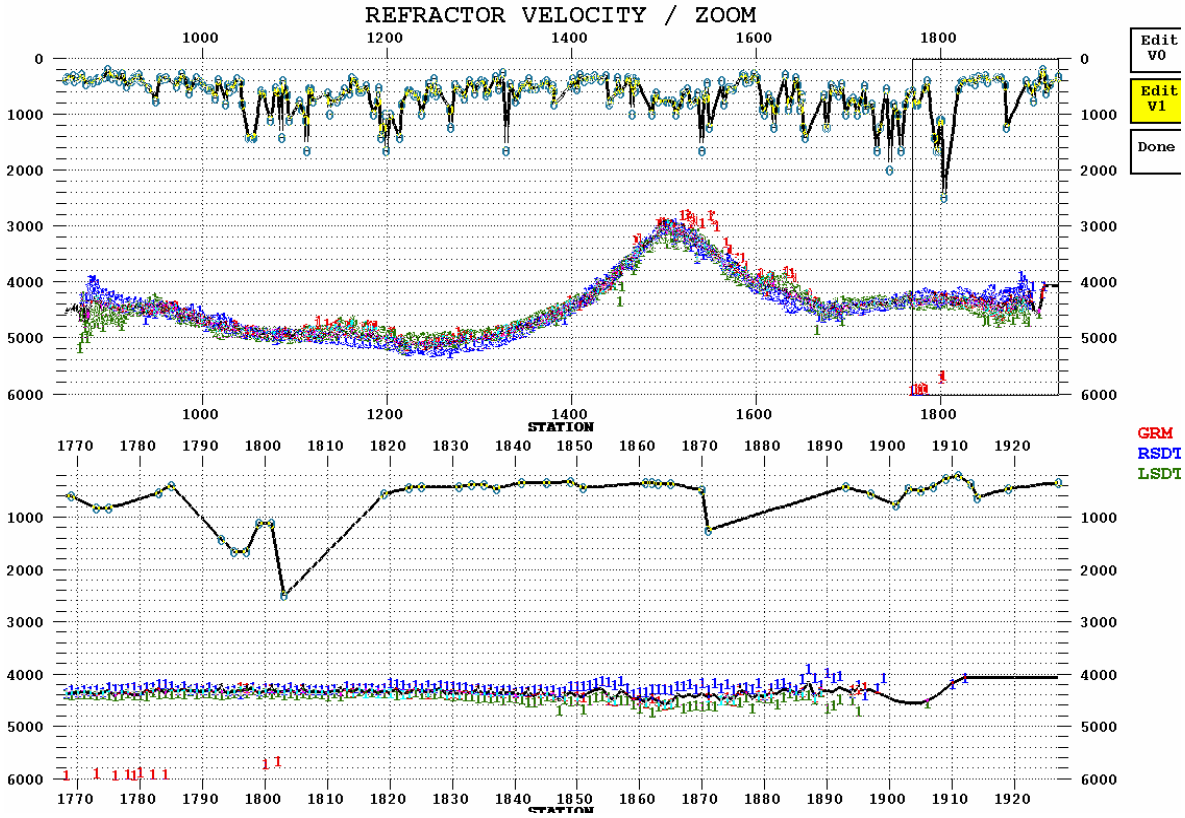


Figura 68. Cálculo de la velocidad de la capa refractora para la corrección de las estáticas de refracción.

4.9.2.4 Visualización de las soluciones estáticas.

En la siguiente fase se observan las soluciones estáticas (Figura 69) obtenidas por los tres métodos y se analiza cual de ellas puede ser la mejor solución dependiendo del grado de exactitud con las otras. En esta parte el analista también puede tratar de mejorar las soluciones de manera interactiva dependiendo de la respuesta que espere obtener.

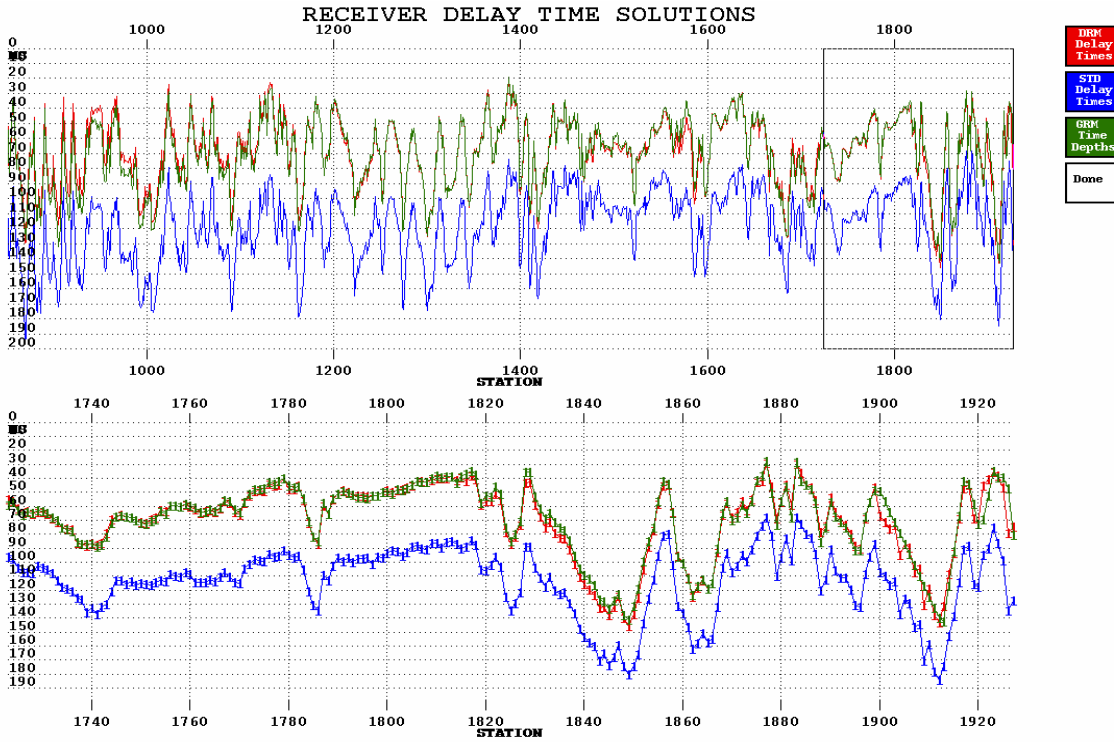


Figura 69. Visualización de las soluciones estáticas obtenidas con los métodos GRM, DRM y DT.

Aprecie la exactitud obtenida por los métodos DRM y GRM.

La solución DRM es usualmente mejor, debido a que es mas apropiada para tenidos simétricos como es el caso de línea de trabajo. Cuando las fuentes se disparan en la base o por debajo de la capa meteorizada, la solución DT, produce mejores resultados por que la ecuación empleada para los cálculos utiliza los tiempos de pozo (*uphole time*). Con estas tres soluciones se realizan pruebas de apilamiento para encontrar cual de ellas produce mejores resultados.

4.9.2.5 Modelo de la capa meteorizada.

Después de los pasos anteriores el sistema de procesamiento produce un modelo de la capa meteorizada a partir de los tiempos uphole y de las velocidades calculadas para cada uno de los tres métodos empleados. En la figura 70 se aprecia el modelo de la capa

meteorizada obtenido en la línea SG-2002-1840. Como se ve, el delineado negro representa la superficie, el rojo la solución por el método DRM, el azul la solución por el método DT y el verde la solución por el método GRM. Esta imagen nos permite analizar de nuevo cuales de las soluciones son congruentes.

Para la línea 1840 se descartó la solución por el método "DT" por que presentaba profundidades poco confiables y se decidió evaluar la respuesta al apilado con las soluciones obtenidas con los métodos DRM y GRM.

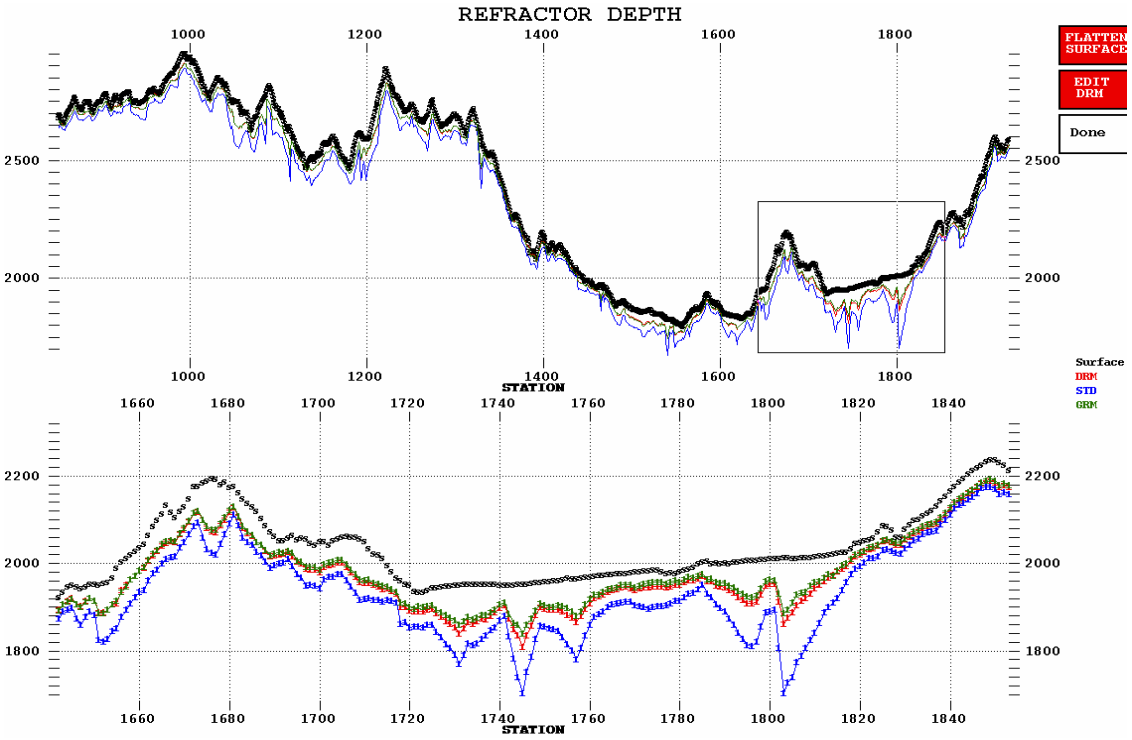


Figura 70. Modelo de la capa meteorizada para la línea SG-2002-1840.

Observe la aproximación entre las soluciones de los métodos GRM y DRM, mientras que la solución del método DT arroja algunas profundidades anómalas para la capa.

4.2.9.6 Elección de la solución más apropiada.

Después determinadas las soluciones se aplicaron a todos los gathers de la línea y se produjeron apilados, donde se concluyó que las mejor respuesta se obtenía utilizando la solución DRM.

Más análisis para las correcciones estáticas se hicieron utilizando velocidades de reemplazamiento superiores pero la respuesta al apilamiento no mejoró.

La Figura 71 muestra el cambio de los gathers corrigiendo los problemas estáticos. El gather de la izquierda es un gather sin corrección y el de la derecha presenta la corrección mediante el método DRM, observe que los eventos se pueden seguir ahora.

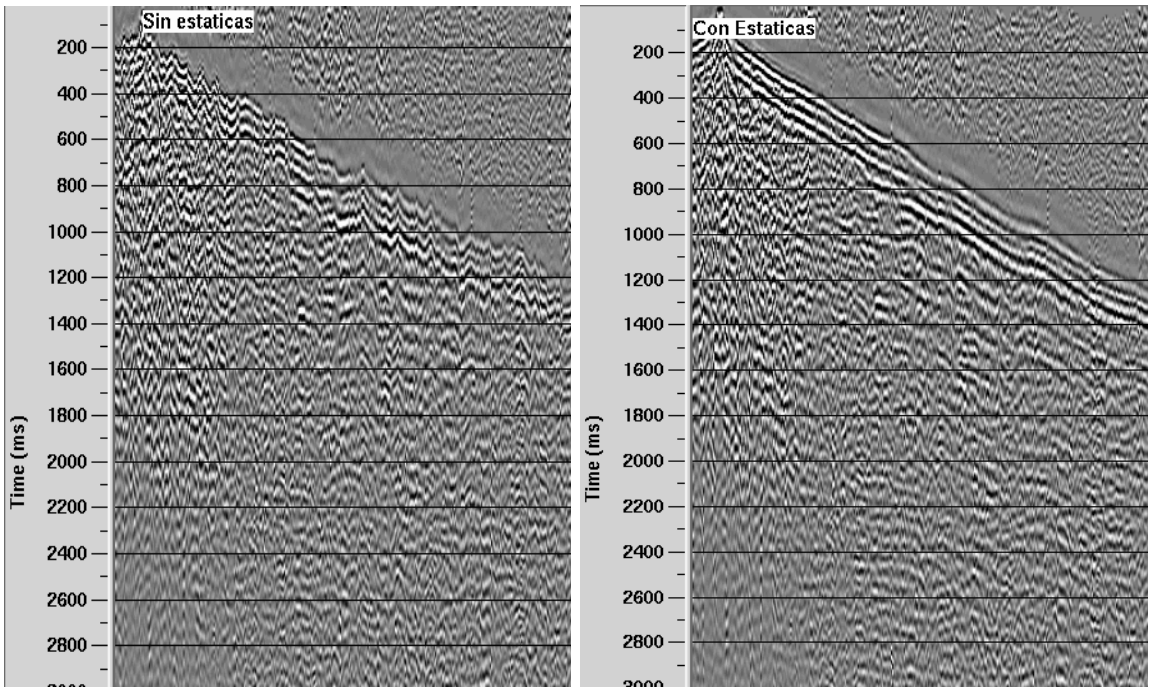


Figura 71. Corrección de las anomalías estáticas. La información sobre el gather CMP de la izquierda presenta variaciones estáticas mientras que en el gather de la derecha se han aplicado las correcciones.

A pesar de que se han corregido las variaciones estáticas sobre el gather de la derecha, obsérvese que aun se presentan variaciones estáticas residuales.

4.10 CORRECCIÓN DEL EFECTO NORMAL MOVEOUT (NMO) y APILAMIENTO DE LA INFORMACION.

4.10.1 Fundamentos.

El efecto NMO se define como la diferencia entre el tiempo de arribo de una reflexión en un offset sobre la fuente o muy cercano a ella (***offset cero***) y el tiempo de arribo de la misma reflexión en un offset lejano.

La Figura 72 muestra un gather CMP de la línea de trabajo donde se aprecia el efecto NMO producto de la distancia fuente - receptor. Cuando el receptor se encuentra cercano a la fuente el tiempo que gasta el rayo en ir hasta el reflector y devolverse al receptor es menor que cuando este se encuentra lejos de la fuente y la trayectoria del rayo tiene que recorrer una mayor distancia, por lo cual su tiempo de arribo es mayor.

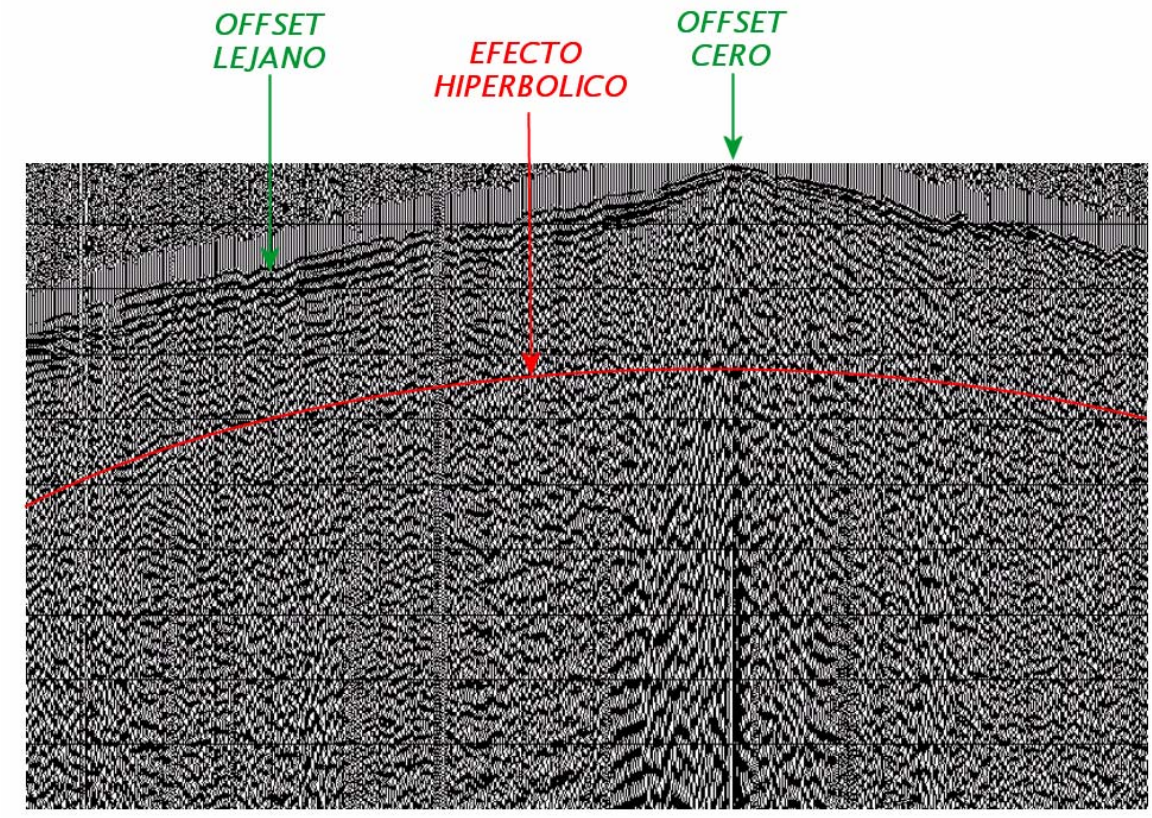


Figura 72. Efecto normal moveout en un CMP gather de la línea SG-2002-1840.

El tiempo de viaje en función del offset a partir de una serie de capas horizontales de igual velocidad esta representado por una hipérbola perfecta (Sengbush, 1986). Esta suposición es el principio del método de corrección del efecto Normal Moveout.

La velocidad que corrige el efecto NMO se llama velocidad de corrección dinámica mas conocida como velocidad normal moveout. Las velocidades NMO reducen los tiempos sísmicos de cada traza a los que se observarían si la fuente y el receptor estuvieran en la misma posición superficial.

4.10.2 Corrección del NMO

Como sabemos las capas en la corteza terrestre no son siempre horizontales y tampoco presentan la misma velocidad y la corrección del efecto NMO necesita suponer un tiempo de viaje hiperbólico a una velocidad constante. Para esto la corrección hiperbólica del efecto NMO solo es valida para offsets cortos.

Con la suposición del tiempo de viaje hiperbólico sobre un tendido corto (***small-spread***), la velocidad NMO para un reflector horizontal, es igual a la velocidad seudopromedio del medio sobre el reflector.

Para calcular la velocidad NMO en este caso se utiliza la siguiente ecuación:

$$T^2_{(X)} = t^2(0) + X^2 / V^2$$

Para un reflector con buzamiento la velocidad NMO es igual a la velocidad del medio dividida por el coseno del ángulo de buzamiento (Yilmaz, 1986), y se obtiene mediante la ecuación:

$$T^2(X)=t^2(0) + X^2\cos^2\phi/V^2, \quad \text{donde } \phi \text{ es el ángulo de buzamiento de la capa}$$

Estas son las ecuaciones básicas para la de corrección del efecto NMO y a partir de ellas se han desarrollado otras, que involucran sin número de variables y que son muy bien desarrolladas por los programas de procesamiento.

Si se utiliza la velocidad NMO adecuada para un reflector (Figura 73a), el efecto se corrige (Figura 73B). Si se usa una velocidad más baja que la velocidad del medio sobre el reflector la hipérbola se sobre corrige (Figura73c) y si se utiliza una velocidad NMO menor entonces el reflector no se horizontaliza completamente (Figura 73d).

Una manera de estimar la velocidad NMO es aplicar diferentes correcciones NMO a un conjunto de gathers CMP (***super gather formation***) usando un rango de valores de velocidad constante. La velocidad que mejor horizontaliza los eventos en el súper gather se toma como la velocidad de corrección del efecto NMO.

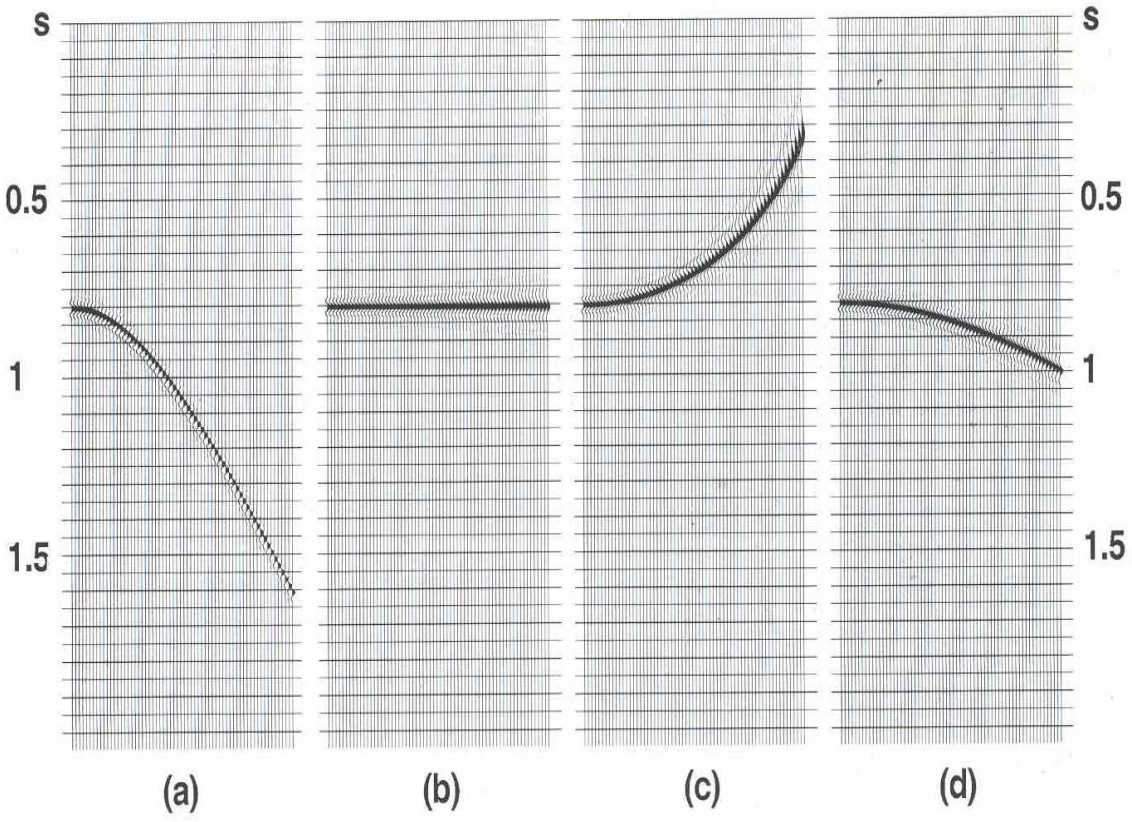


Figura 73. Corrección del efecto NMO para un reflector horizontal.

Sin embargo, como resultado de la corrección NMO sobre los gathers CMP, ocurre una distorsión de frecuencias, particularmente en los eventos más someros y con grandes offsets, lo cual se conoce como el estiramiento NMO. La Figura 74 muestra gather CMP con información real de la línea de trabajo, que muestra el efecto de estiramiento por la corrección del NMO.

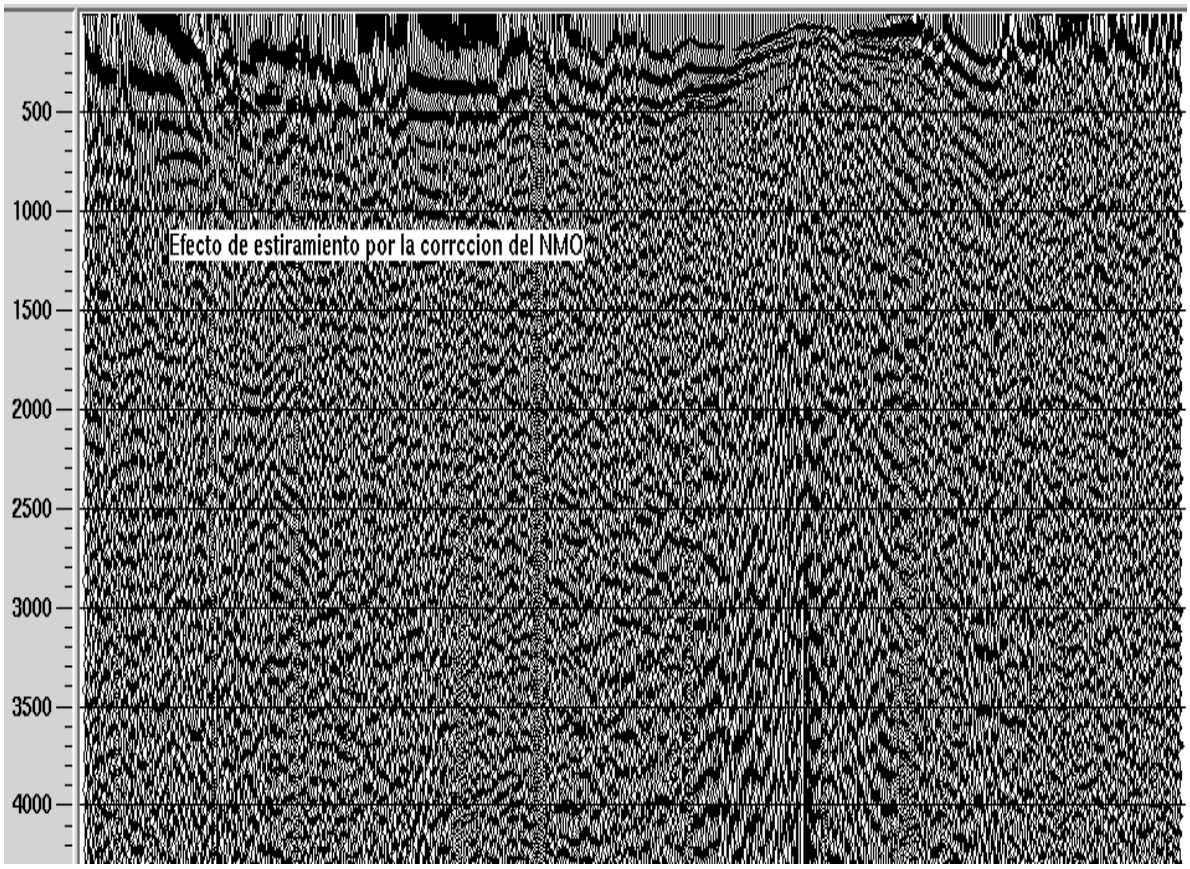


Figura 74. Distorsión de frecuencias en los eventos someros y de gran offset producto de la corrección del efecto NMO, en un CMP gather de la línea SG-2002-1840.

Debido al estiramiento de la ondicula en los offsets lejanos el apilamiento de los gathers CMP daña severamente los eventos más someros lo que es muy preocupante si se analiza que en el Bloque San Gabriel los reflectores de interés estratégico se encuentran en los tiempos someros e incluso aflorando en superficie.

4.10.3 Metodología para la corrección del efecto NMO en la línea SG-2002-1840

Con la ayuda del sistema se generaron los supergathers y se aplicaron las correcciones NMO a partir de campos de velocidad constante. De esta manera se escogió la velocidad que horizontalizaba mejor cada evento. El problema del estiramiento se solucionó cortando (**muting**) las zonas estiradas en los gathers mediante exclusión de las partes superiores. Sin embargo en San Gabriel el muting no puede ser agresivo debido a los reflectores superficiales. Cuando la relación S/N es buena, es preferible silenciar en vez de aceptar alteraciones de frecuencias por el estiramiento, pero si la señal es mala, como ocurre con la línea de interés, es necesario aceptar cantidades de estiramiento para obtener los eventos someros en el apilamiento. Por lo tanto fue necesario durante esta labor ir de atrás hacia delante y viceversa para conseguir las velocidades NMO adecuadas y además ir transformando la zona de muting en los gathers para poder obtener de la mejor manera los eventos someros del Bloque.

4.10.4 Apilamiento.

Hasta aquí todos los flujos de procesamiento se han basado en el dominio del disparo. Para el apilamiento de los gathers CMP el procesamiento de los datos se hace de una manera integrada. Una vez corregidos los tiempos de arribo en los offsets diferentes de cero se comprime el volumen de información sísmica con base a los puntos medios comunes de información (***Common Dept-Points, CDPs***). A este proceso se le llama apilamiento y su resultado es una sección apilada en el dominio de los puntos medios comunes (***CMP Stacked Section***).

Como la corrección del efecto NMO se basa en la suposición del small-spread, los apilados CMP representan pequeñas porciones de una línea sísmica obtenida con velocidades constantes (Yilmaz, 1986).

La Figura 75 muestra un apilado de la línea SG-2002-1840 después de la corrección del efecto NMO. Observe como empiezan a dilucidarse algunos reflectores antes inmersos en el ruido.

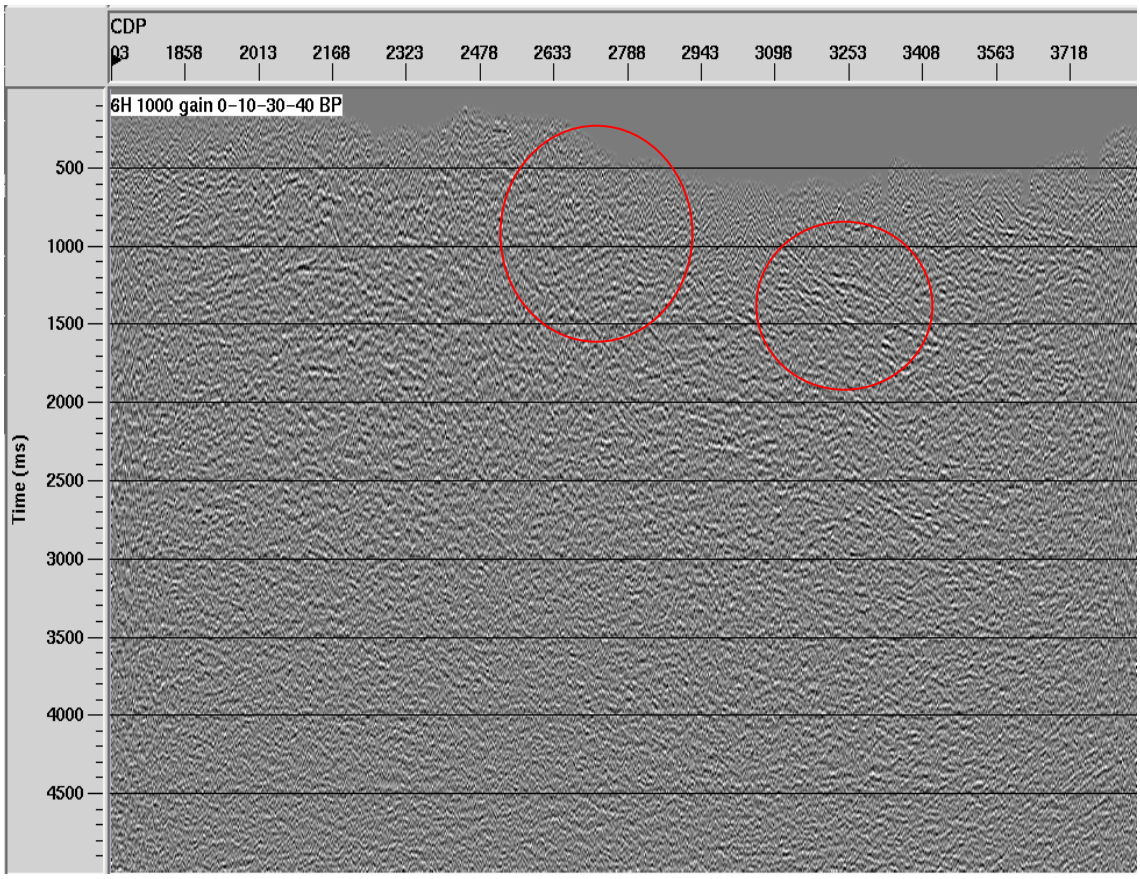


Figura 75. Apilado de la línea SG-2002-1840 después de corregir el efecto NMO.

4.11 ANÁLISIS DE VELOCIDADES APILAMIENTO.

La información sísmica no proporciona medidas directas de velocidad como las que proporciona un registro sónico al medir la velocidad de las ondas sísmicas como una función de la profundidad. Sin embargo una medida indirecta del comportamiento del campo de velocidades en una determinada área de estudio puede realizarse a partir la observación de apilados a velocidad constante de información sísmica, es decir los campos de velocidad pueden derivarse de la información sísmica a partir de las velocidades que producen los mejores apilados de los eventos de interés.

El efecto NMO es la base para determinar las velocidades en la información sísmica, por esto a menudo se consideran equivalentes la velocidad de apilamiento y la velocidad NMO.

Sin embargo existe una gran diferencia entre ellas; la estimación de la velocidad NMO se basa en el tiempo de viaje hiperbólico sobre un tendido corto, mientras que la velocidad de apilamiento se basa en la hipérbola que mejor presenta la información sobre el tendido completo.

Una vez calculadas las velocidades de apilamiento pueden usarse para corregir de nuevo el efecto NMO para alinear mejor las trazas en les gathers CMP y repetir el análisis de velocidades de apilamiento. El segundo análisis es por consiguiente mejor que el primero, lo cual produce una mayor resolución de los eventos sísmicos.

4.11.2 Métodos.

Existen varios métodos para el análisis de velocidades de apilamiento, además los paquetes de procesamiento cuentan con algunas herramientas que simplifican mucho esta labor.

Los tres métodos más conocidos y que se aplican a menudo son:

1. Análisis de velocidades en el plano (t^2-x^2)
2. Método del espectro de velocidades.
3 Método de apilados a velocidad constante. (Constant velocity stack CVS)

En este trabajo se aplicó el método de apilados a velocidad constante (CVS). El método CVS es una técnica alternativa para el análisis de velocidades cuando la relación señal/ruido es mala. La técnica consiste en generar apilados CMP corregidos por NMO usando valores de velocidad constante. Los apilados se despliegan uno al lado de otro en forma de paneles. Siguiendo un evento sísmico en un determinado tiempo a través de los paneles, se identifica a que velocidad se presenta la mejor calidad en la señal. En una tabla se referencia el tiempo, el CDP y la velocidad de apilamiento para así construir las funciones de velocidad de apilamiento.

El método es muy útil para los intérpretes sísmicos quienes en base al conocimiento geológico de la zona pueden reproducir el comportamiento esperado del subsuelo, sin embargo si dicho conocimiento no se incluye en el análisis se pueden cometer errores resaltando eventos que no existe realmente en el subsuelo.

Hay dos consideraciones a tener en cuenta para hacer el análisis con el método CVS

1. El rango de velocidades necesarias para apilar la información
2. El espaciamiento entre velocidades de apilamiento prueba.

En la elección de un rango, la consideración debe basarse en el hecho de que los eventos con buzamiento y las reflexiones usables por fuera de un plano pueden tener velocidades de apilamiento anormalmente altas. La elección del espaciamiento de velocidades constantes, se debe hacer con cuidado, pues la continuidad de un evento es muy sensitiva a los cambios de velocidad en distancias cortas.

4.11.3 Análisis de velocidades de apilamiento de la línea SG-2002-1840.

El análisis de velocidades se realizó en la primera etapa, teniendo en cuenta el amarre de los eventos observables con la información en superficie, de esta manera se consiguió lograr que la información fuera congruente desde el punto de vista estructural. Para la generación de las funciones de velocidad se produjeron un total de 39 apilados en intervalos de 100 m/s con un rango de velocidades de 3000 a 7000 m/s.

Mediante el despliegue y la comparación de los apilados se construyó la tabla con los tiempos, posiciones y velocidades que producían el mejor apilado posible. La figura 76 muestra el despliegue de10 paneles para el análisis de velocidad a 1300 ms en el CDPs 3253. Observe que basándose en la amplitud y continuidad del evento, el mejor apilado se consigue con una velocidad de 4700 m/s. A velocidades menores ó mayores de 4700 m/s el evento pierde amplitud y continuidad desapareciendo gradualmente dentro de la información.

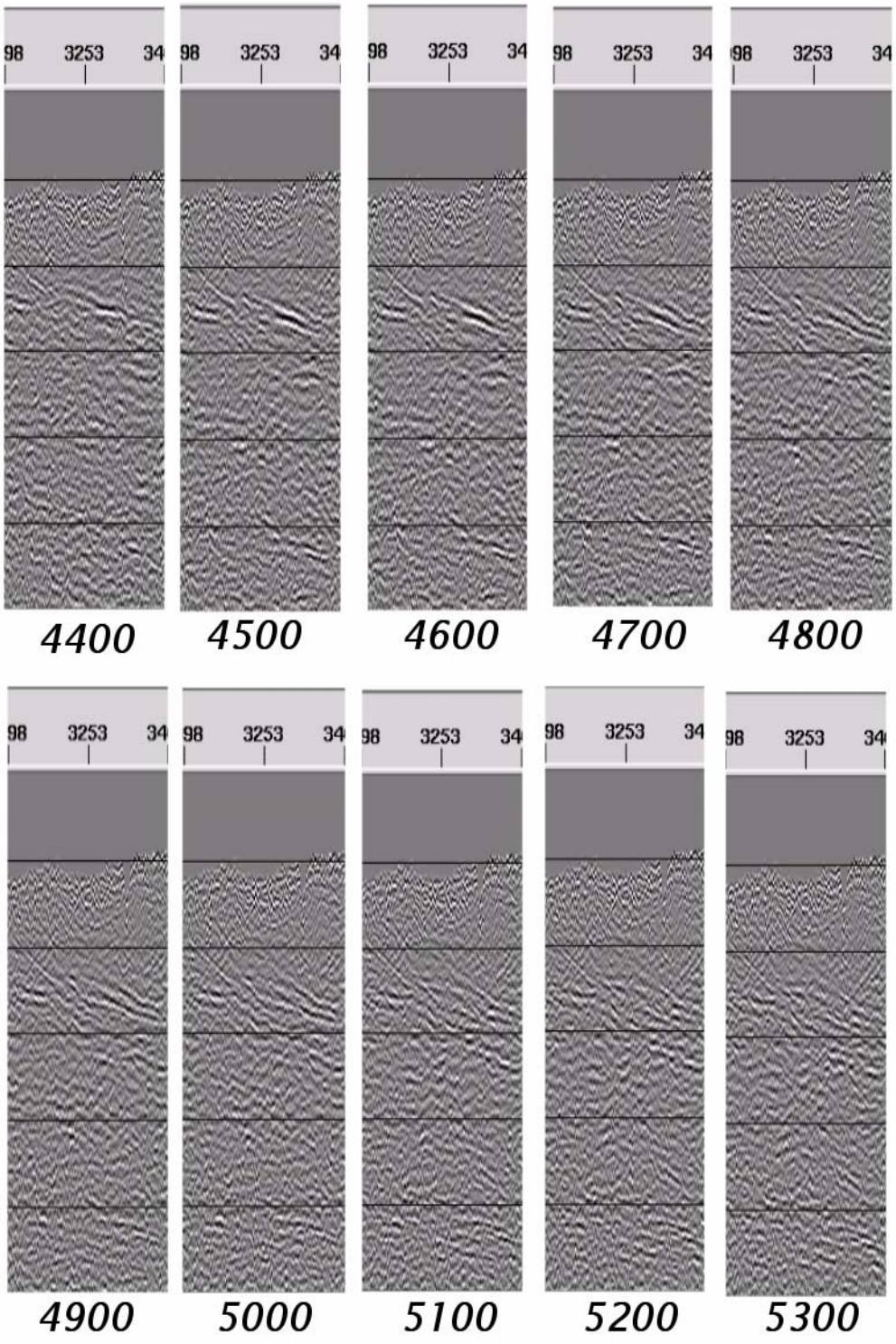


Figura 76. Método (Constant Velocity Stack) para el cálculo de la velocidad de apilamiento de un evento en la línea SG-2002-1840.

Una vez terminado el análisis de los 40 apilados para cada CDP se produjo un diagrama de las velocidades (Figura 77). El diagrama de velocidades muestra en colores a la izquierda el contraste entre las velocidades de apilamiento de la línea y a la derecha la función de velocidad con respecto al tiempo para el CDP 2900. Los colores rojos representan velocidades del orden de 3000 a 4000 m/s, los verdes de 4000 a 5000 y los azules mayores a 5000 m/s, lo que quiere decir que las mayores velocidades de apilamiento se presentan hacia el Este de la línea, justo donde se observan los eventos con mayor buzamiento y donde se presenta la mayor dificultad en el seguimiento de las reflexiones. Esta característica se esperaba debido a la complejidad estructural de la zona (ver anexo B).

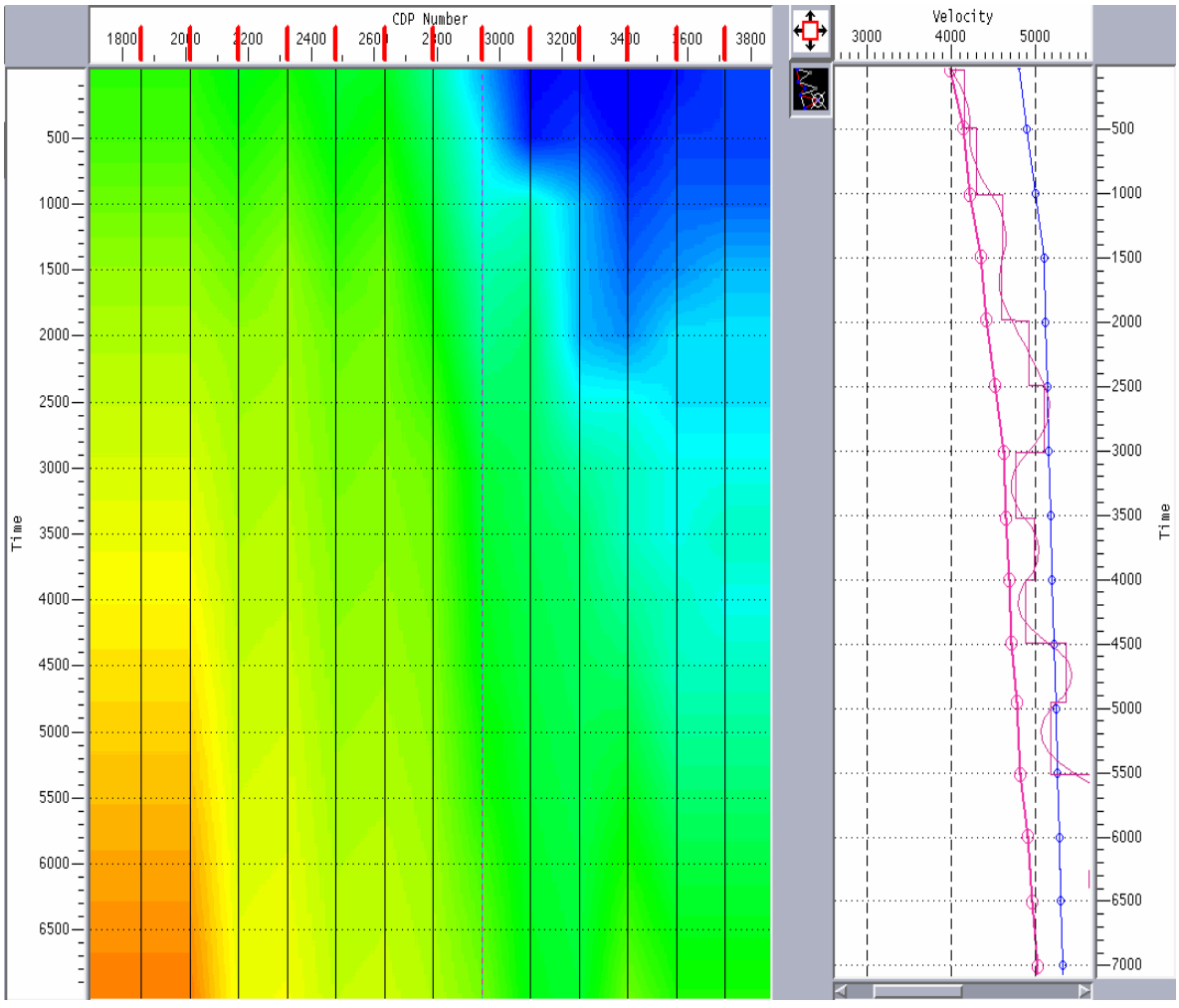


Figura 77. Diagrama de velocidades de apilamiento de la línea SG-2002-1840.

4.12 CALCULO DE ESTÁTICAS RESIDUALES Y APILADO FINAL.

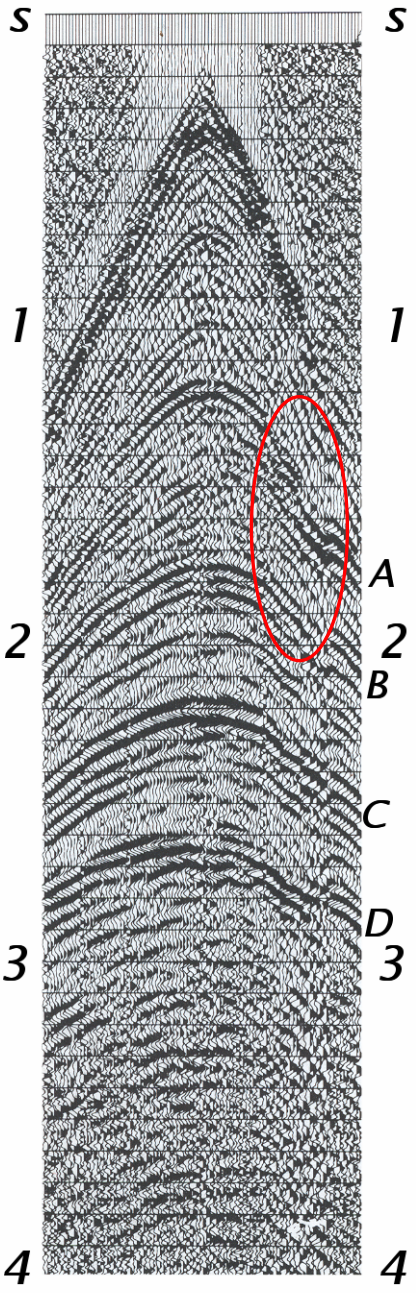


Figura 78. Anomalías estáticas residuales presentes en un gather CMP. Imagen tomada de Yilmaz (1988).

Las anomalías estáticas residuales son distorsiones de pequeña magnitud en los tempos de reflexión de un evento sísmico. Las anomalías residuales se pueden definir como desviaciones a partir de las tendencias hiperbólicas de reflexión. La Figura 78 muestra las variaciones estáticas residuales sobre cuatro eventos sísmicos presentes en un gather CMP.

En esta figura se observa que las trazas hacia la izquierda presentan un moveout hiperbólico razonable, mientras que las trazas de la derecha se alejan notablemente de dicho comportamiento.

Aunque estas distorsiones podrían ser causadas por complejidades estructurales, son más el efecto de las irregularidades en superficie ó cercanas a la superficie. Estas irregularidades son el producto de variaciones rápidas de tres factores:

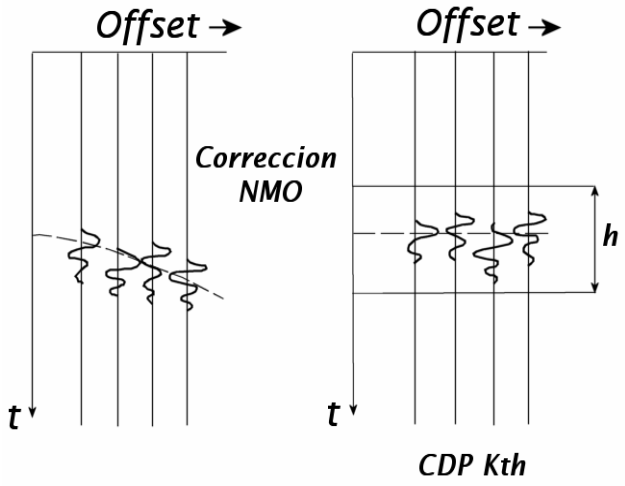
1. Elevación topográfica.
2. Cambios en la base de la capa meteorizada.
3. Variación de la velocidad en la capa meteorizada.

Las correcciones estáticas de refracción corrigen en gran parte el problema de las variaciones estáticas, sin embargo no son totalmente eficientes cuando las variaciones son muy rápidas. Es por esto que estas variaciones reciben el calificativo de residuales.

4.12.1 Estimación de las correcciones estáticas en la línea SG-2002-1840.

Como era de esperarse en esta línea problema, las variaciones estáticas residuales no faltaron, ellas se observaron después de terminadas las correcciones estáticas de refracción (Figura 79).

El método empleado en las correcciones estáticas residuales de la línea SG-2002-1840 se conoce como correcciones estáticas residuales consistentes con la superficie.



Las desviaciones estáticas a partir de una trayectoria hiperbólica perfecta se ilustran en la Figura 79. Después de la corrección NMO, la desalineación de la forma de onda a lo largo de los gather CMP produce un apilado pobre de la traza.

Figura 79. Desviación del tiempo de viaje hiperbólico en un gather corregido por NMO

Para estimar los desplazamientos de tiempo a partir del tiempo de alineamiento perfecto, es necesario producir un conjunto de reflexiones corregidas por NMO. Las reflexiones viajan a través del subsuelo hasta un determinado reflector y regresan a la superficie

La Figura 80 muestra la geometría y la notación necesaria para definir el modelo.

La suposición clave en este modelo es que las estáticas residuales son consistentes con la superficie (Hileman et al, 1968; Taner et al, 1974).

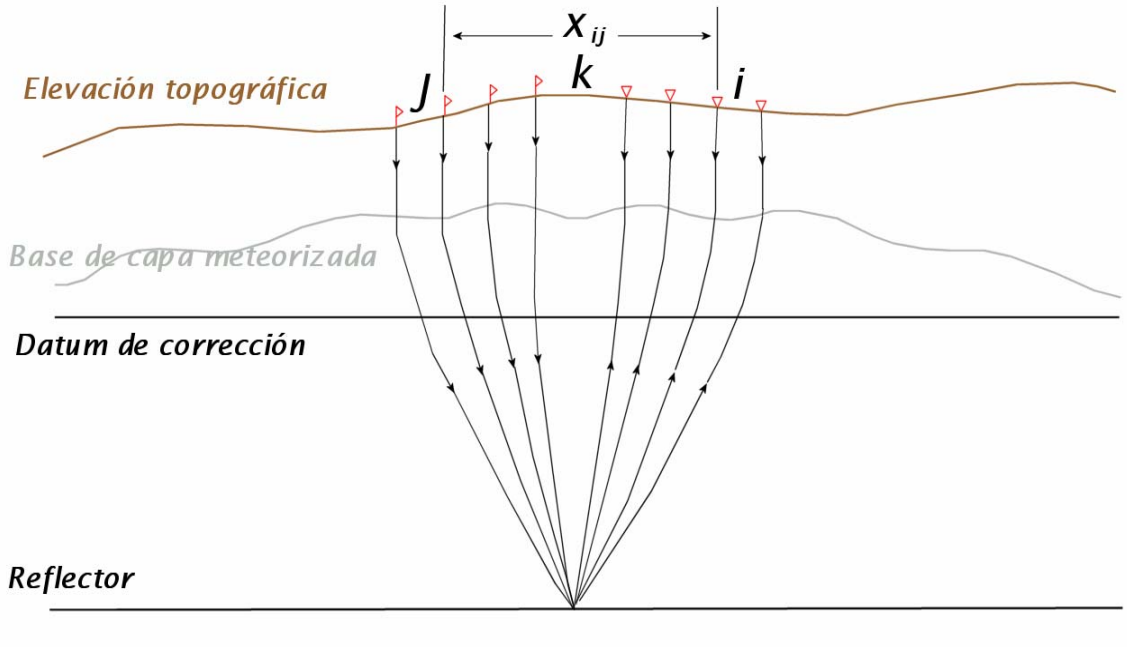


Figura 80. Modelo de estáticas consistentes con la superficie.

Lo anterior significa que los desplazamientos estáticos son desplazamientos de tiempo que dependen solamente de las localizaciones de las fuentes o de las localizaciones de los receptores sobre la superficie y no de la trayectoria de los rayos en el subsuelo. Esta suposición es valida si todas las trayectorias de rayos, independientemente del offset fuente-receptor, son verticales en la capa cercana a superficie. Puesto que la capa meteorizada usualmente es de muy baja velocidad y un refractor hacia la base, por lo general las trayectorias de los rayos son verticales, con lo cual la suposición de los rayos consistentes con la superficie es viable.

Las correcciones estáticas residuales de la línea se hicieron con base a los reflectores que muestra la Figura 81.

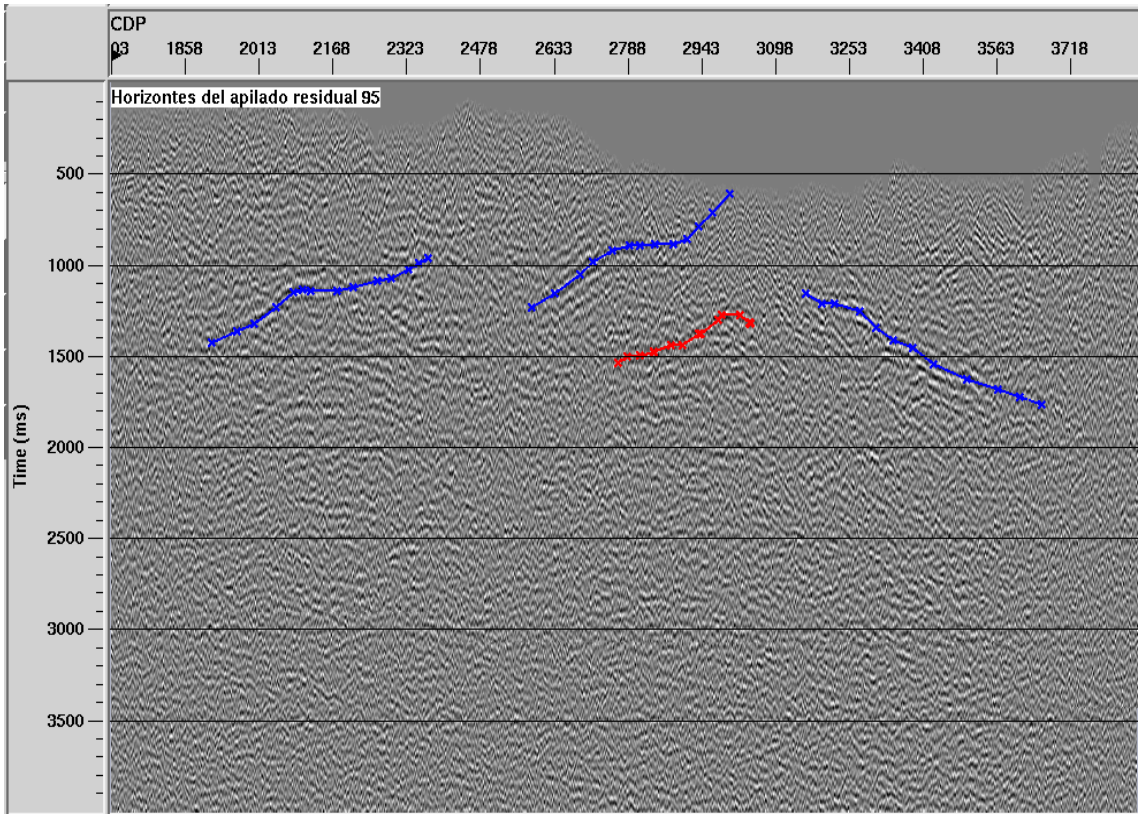


Figura 81. Horizontes para corrección de las estáticas residuales en la línea SG-2002-1840.

Después de calcular y aplicar las correcciones estáticas residuales, se repitió el análisis de velocidades de apilamiento usando nuevamente el método CVS, con el fin de perfeccionar las velocidades de apilamiento. Con lo que se generó el apilado final de la línea (Anexo 3).

4.13. MIGRACIÓN EN TIEMPO POST-APILADO.

4.13.1 Fundamentos.

En áreas estructuralmente complejas, los reflectores con buzamiento pronunciado aparecen sobre las secciones, en posiciones considerablemente alejadas respecto a sus verdaderas posiciones. Para comprender mejor el problema se recurre al ejemplo de una sección registrada con cero-offset. Como se observa en la Figura 82, la reflexión recibida en la posición X, proviene del punto A, pero se pero se grafica en el punto C, donde XC=XA en tiempo doble de transito (TWT). El resultado sobre la sección sísmica muestra que los reflectores se mueven hacia abajo en la dirección del buzamiento y disminuyen el ángulo de buzamiento.

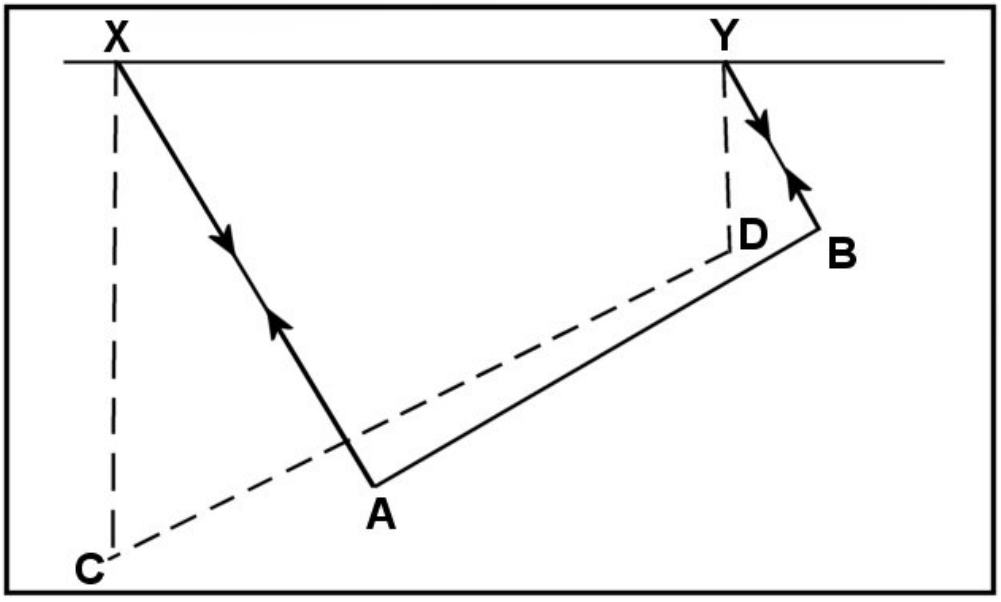


Figura 82. Modelo eventos aparentes en una sección sísmica. Tomada de McQuillin, R. Y Bacón, M. 1984.

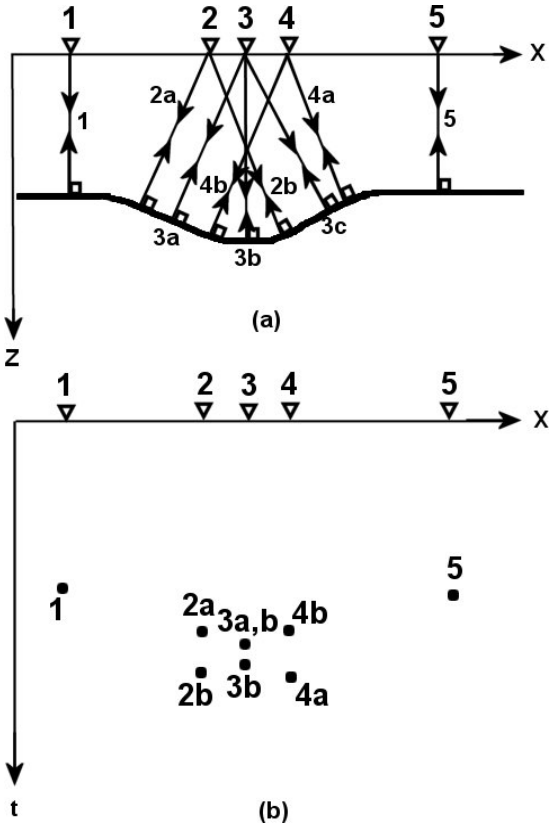


Figura 83. Modelo de reflexión para un reflector sinclinal en profundidad. Tomada de Yilmaz. 1988.

Geometrías más complejas se producen cuando la curvatura de los reflectores excede la del frente de onda incidente. Por ejemplo, observe la Figura 83, las reflexiones en algunos puntos superficiales se originan en mas de un punto bajo la superficie. En las localizaciones 2 y 4 hay dos arribos diferentes y en la localización 3 hay tres arribos diferentes. Uniendo los puntos sobre las trayectorias intermedias se produce una estructura semejante a un corbatín la cual se conoce como ***"Bowtie"**** que hace que la correspondiente sección en TWT sea difícil de interpretar.

El objetivo de la migración es desplazar los puntos de reflexión a sus verdaderas posiciones espaciales.

Como resultado de este proceso los buzamientos de los horizontes se incrementan, ciertas figuras estructurales se definen apropiadamente (caso de los sinclinales), y las ***difracciones*** se colapsan. Por esto la migración es considerada por algunos autores como una forma de deconvolución espacial (Yilmaz, 1988). La sección migrada descubre la realidad estructural si los puntos de reflexión están contenidos en el plano vertical bajo la línea sísmica. Si las reflexiones provienen de planos que no son el vertical, el proceso de migración no resuelve el problema adecuadamente. Solo la migración tridimensional puede generar el verdadero cuadro geológico (Mera 1980).

Idealmente siempre se quiere conseguir una sección en profundidad a partir de una sección apilada. Sin embargo comúnmente la sección migrada se despliega en tiempo. Una razón de esto es que los interpretes prefieren evaluar la valides de las secciones migradas comparándolas con las no migradas. Por lo tanto es preferible tener ambas secciones desplegadas en tiempo.

La migración en tiempo es apropiada cuando existen variaciones suaves de velocidad en profundidad y en extensión lateral. Sin embargo cuando dichos contrastes se tratan de manera inadecuada la migración en tiempo puede producir sobre-migración o sub-migración. La sobre-migración se da cuando a los contrastes de velocidad se les asigna valores muy altos y la sub-migración ocurre cuando a dichos contrastes se trabajan con velocidades muy bajas. En la práctica se usan funciones de velocidad regional para evitar estos efectos ya que la migración requiere de la velocidad media real del área de trabajo. Si se usan velocidades significativamente diferentes entonces la sección migrada puede ser erronea.

4.13.2 Tipos de Migración.

Existen varios tipos de migración pero su aplicación depende de la información a migrar y de los resultados esperados. Cuando hablamos de la información nos referimos a si esta se encuentra apilada o sin apilar, si es información 2D ó 3D y si presenta características de velocidad que permitan ó no la utilización de un tipo de migración particular. Los resultados esperados también condicionan el tipo de migración a realizar, por ejemplo cuando el objetivo de una migración es conseguir una sección en profundidad para realizar un modelamiento estructural ó para ayudar en las labores de perforación de un pozo, se debe recurrir a la migración en profundidad, pero si el objetivo como ocurre en nuestro caso es el de generar una sección que sirva para clarificar el modelo geológico de un área, pues el método de migración apropiado es la migración en tiempo.

La Tabla 5 resume los tipos de migración existentes y las circunstancias necesarias para invocarlos.

TIPOS DE MIGRACION	
Tipo	***Discusión***
Conversión a profundidad post-apilado a lo largo de trayectorias verticales	*Valida estrictamente, solo para velocidades que varían con la profundidad, sin presencia de buzamientos estructurales.*
Migración en Tiempo post-apilado	*Es necesaria cuando la sección apilada contiene difracciones ó buzamientos estructurales. Es valida para variaciones verticales y laterales.*
Migración en profundidad post-apilado	*Necesaria cuando la sección apilada contiene buzamientos estructurales y grandes gradientes de velocidad lateral.*
Migración parcial pre-apilado (DMO)	*Genera un mejor apilado que puede posteriormente ser migrado de nuevo sin embargo solo resuelve problemas de buzamientos conflictivos.*
Migración total pre-apilado	*La salida es una sección migrada pero no produce una sección apilada y a menudo un interprete necesita una sección sin migrar y su correspondiente forma migrada. Por otro lado ofrece una solución estupenda al problema de los buzamientos conflictivos.*
Migración en profundidad pre-apilado	*Es necesaria cuando hay gradientes de velocidad lateral extremadamente fuertes que no pueden tratarse de manera adecuada mediante el apilado.*
Migración 3D en Tiempo post-apilado	*Es el tipo más común de migración 3D, es necesaria cuando el apilado contiene eventos buzantes que están por fuera del plano de adquisición*
Migración 3D en profundidad post-apilado	*Necesaria cuando el problema de la fuerte variación de velocidades laterales, involucra complejidades estructurales en 3D*
Migración 3D en Tiempo pre-apilado	*Necesaria cuando falla la migración parcial preapilado y cuando los apilados contienen secciones cruzadas.*
Migración 3D en profundidad pre-apilado	*Es la más exitosa, pero demanda altísimos costos computacionales y necesita un modelo de velocidades preciso.*

Tabla 5. Tipos de Migración.

Debido a que el objetivo final de este trabajo es generar una sección que aclare la estructura geológica, dilucide los reflectores inmersos en el ruido y ayude al procesamiento de las líneas del Bloque San Gabriel, el tipo de migración apropiado es la migración en tiempo post-apilado. Algunas razones que complementan la escogencia de este tipo de migración son:

a) La limitada información de velocidades, obtenidas con el método de apilados constantes de velocidad discutido en la sección anterior.
b) La facilidad para evaluar la valides de las secciones migradas comparándolas con las secciones apiladas.
c) La presencia de difracciones producto del intenso fallamiento en la zona.
d) Los grandes ángulos de buzamiento que presentan los reflectores de interés.

4.13.3 Métodos de migración en tiempo después del apilado.

Después de escoger el tipo de migración se entra a analizar el método más apropiado para ella. Existen varios métodos de migración en tiempo, la primera técnica desarrollada fue el método de superposición linear que se uso antes del advenimiento de los computadores. Posteriormente se desarrollo la técnica de sumatorias de difracciones, la cual se basa en la sumatoria de amplitudes sísmicas a lo largo de una hipérbola de difracción cuya curvatura esta gobernada por la velocidad del medio. La técnica de sumatoria Kirchhoff introducida después (Scheinder, 1978) es otro método, básicamente igual a la técnica de sumatoria de difracciones con la ventaja, de que aplica correcciones de amplitud y fase antes de la sumatoria. Otra técnica de migración (Claerbout y Doherty, 1972) se basa en métodos de diferencia finita. Después de desarrollados la sumatoria de Kirchhoff y los métodos de diferencia finita, Stolt (1978) introdujo la migración mediante la transformación Fourier.

Independiente del método de migración utilizado, la interpretabilidad de una sección migrada depende de la calidad de la sección apilada, de la relación señal-ruido (S/N) y de las velocidades usadas en la migración.

Los tres métodos de migración en tiempo post-apilado mejor desarrollados hoy en día se resumen en la Tabla 6

TIPOS MAS COMUNES DE MIGRACIÓN EN TIEMPO POST-APILADO	
Tipo	***Discusión***
Migración Kirchhoff	*Trata con efectividad buzamientos de hasta de 90 grados y produce migraciones confiables en presencia de cambios verticales y laterales de velocidad.*
Migración en diferencia-finita	*Con este método resuelve con mayor eficacia los problemas de variación lateral de velocidades pero solo se pueden trabajar con aproximación ángulos hasta de 75 grados.*
Migración en el dominio frecuencia-número de onda	*Al igual que el método Kirchhoff trata buzamientos hasta de 90 grados con buena aproximación pero su uso esta condicionado a zonas con variación de velocidad únicamente en dirección vertical.*

Tabla 6. Tipos de migración en tiempo.

Como se puede apreciar en la tabla anterior el tipo de migración que mejor se adapta a los a las características del Bloque de trajo es el método Kirchhoff, por lo cual ese se adoptó para realización de las pruebas en la línea.

4.13.2.1 Método Kirchhoff.

El método Kirchhoff es una aplicación computacional que opera como filtro a lo largo de muchas trazas. La técnica se describe partiendo del principio de Huygens (Baker 1950).

Los parámetros que comprometen el desempeño y la ejecución de la migración son:

a) El tamaño de la apertura usado en la sumatoria: definiéndolo como la extensión espacial que abarca la trayectoria de sumatoria el cual se mide en términos del número de trazas. La migración con pequeñas aperturas elimina los eventos con mayor pendiente y produce manchas horizontales mientras que grandes aperturas pueden degradar la calidad de la migración más aun en condiciones de baja relación señal/ruido, como es nuestro caso. En la práctica se usa una función de velocidad regional y el buzamiento más pronunciado en el área de servicio para calcular el tamaño de la apertura que puede usarse sobre el set completo de información.

b) Máximo Buzamiento a Migrar: Durante la migración se puede especificar el máximo buzamiento que se quiere migrar en la sección, lo cual es de gran utilidad cuando se quiere suprimir ruido coherente que se presenta con buzamiento de alta pendiente. Limitar el parámetro de buzamiento es una manera de reducir cálculos computacionales. Sin embargo este parámetro debe escogerse con cuidado para que los buzamientos con pendientes de interés en la sección de entrada se preserven en la sección de salida.

c) Las velocidades RMS a utilizar en la migración: La migración Kirchhoff involucra hipérbolas de difracción para la sumatoria, y la curvatura de una hipérbola de difracción está gobernada por una función de velocidad, por lo tanto teniendo determinadas las velocidades RMS en una muestra de tiempo de una traza de entrada, se sobrepone la trayectoria hiperbólica con su ápice en esta muestra de tiempo para que corte las amplitudes correspondientes al mismo evento reflexivo.

4.13.3 Procedimiento para realizar la Migración.

Para poder generar la migración, se utiliza entonces el último de los apilados residuales el cual presenta la mejor visualización de eventos estructurales bajo la línea. Se asume que el apilado es una sección cero offset.

El proceso de migración comienza suavizando las velocidades RMS calculadas con el método de apilados a velocidad constante. Esta labor se realiza, escogiendo el campo de velocidades y limitándolo a una velocidad máxima. Este campo de velocidades se ajusta

después a al datum final de referencia para los trabajos en el Boque, el cual es de 3000 m.s.n.m y posteriormente el campo se convierte a un campo de velocidades intervalicas. Después de obtenido el campo de velocidad, suavizado y ajustado al datum final se procede a calcular el tamaño de apertura apropiado y a estimar los valores de buzamiento límites en el área circundante a la adquisición a partir de la cartografía geológica y a correr el método Kirchhoff.

4.13.4 Resultados Obtenidos.

A continuación se muestran 4 secciones obtenidas cambiando de manera controlada los parámetros prácticos del método Kirchhoff, todos los resultados se obtuvieron aplicando una función de ganancia variable en el tiempo para compensar la perdida de amplitudes por la divergencia del frente de onda y por la atenuación inelástica. También se aplico una función que detecta y edita muestras de spikes y muestras de ruido de gran amplitud acompañada de un filtro pasa-banda configurado a 8-12-25-35 Hz.
En teoría el tamaño de apertura apropiado se calcula con la ecuación:

$$TA = \frac{V^2 \bullet T \bullet \triangle t}{2 \triangle x^2}$$

Donde: V = velocidad promedio regional, T= tiempo de interés, $\triangle x$= Intervalo de trazas, ©= ángulo de buzamiento máximo y $\triangle t = 2 \triangle x \text{Tan}©/V$

No obstante el tamaño que produce el mejor resultado varía en la práctica por la calidad de la información.

Debido a que los reflectores de interés, se encuentran entre 0.5 – 3 seg., presentando buzamientos de hasta de 75° según la cartografía geológica existente, se tomó un tiempo de 1.2. seg, un buzamiento de 65° y una velocidad de reemplazamiento promedio de 4000 m/s para calcular la apertura teórica.

$$TA = \frac{4000^2\ (m/s^2) \bullet 1.2\ (s) \bullet 0.0193\ (s)}{2\ (18)^2} = 600$$

Las Figuras 84, 85, 86 y 87 muestran migraciones realizadas con una apertura muy pequeña (250 trazas), óptima (800 trazas), muy grande (3000 trazas) y teórica (600 trazas) respectivamente.

Observe que la migración realizada con apertura pequeña elimina los eventos con mayor buzamiento sobre la línea y produce un efecto de manchamiento horizontal sobre casi toda la sección.

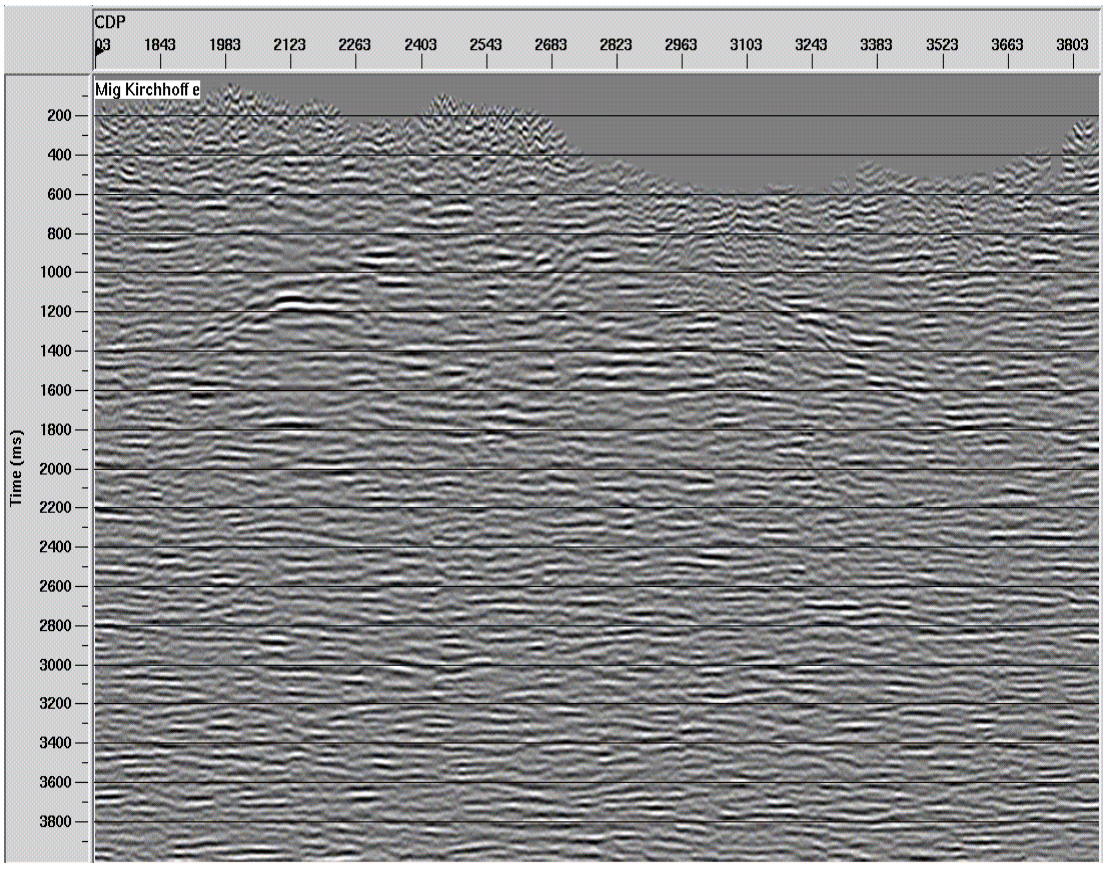


Figura 84. Migración de la línea 1840 con apertura de 250 trazas y buzamiento límite de 65º.

Las manchas horizontales desaparecen gradualmente con el aumento del tamaño de apertura, pero colapsan menos las difracciones, como se puede apreciar en la Figura 85, La migración de gran apertura demanda bastante tiempo y recursos de hardware.

La de apertura grande arrastra ruido y lo disemina sobre la información de mejor calidad degradando así el resultado de la migración después de 1.5 segundos.

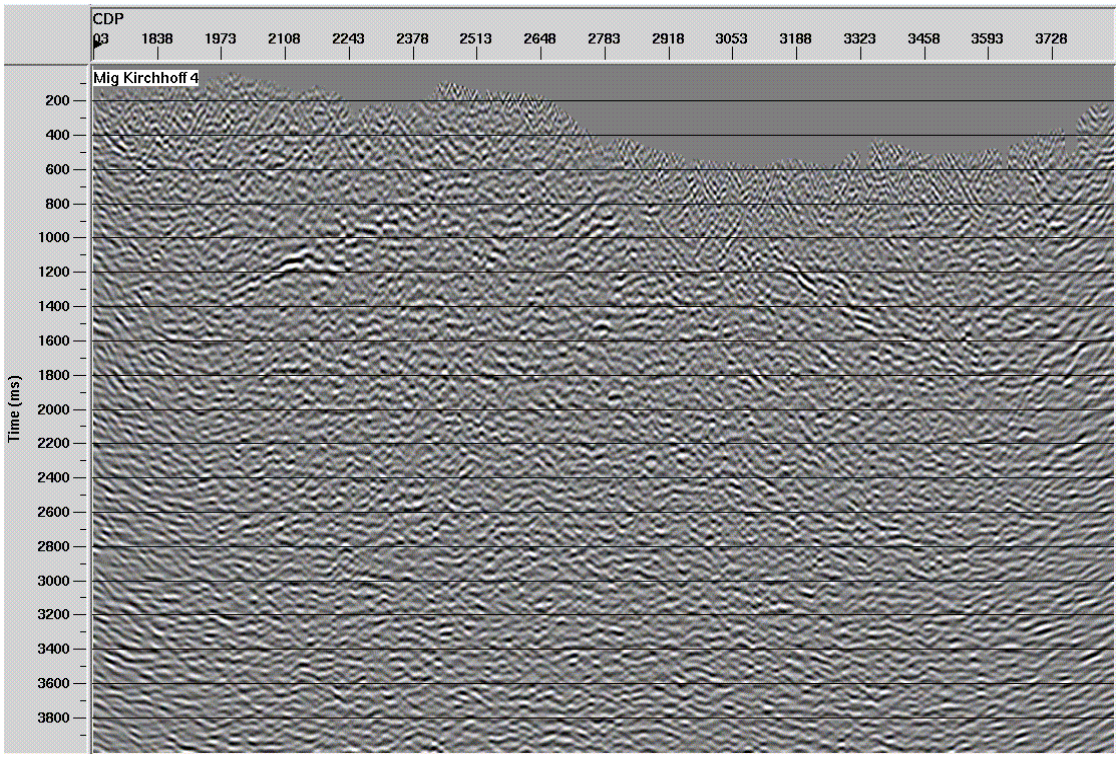


Figura 85. Migración de la línea 1840 con apertura de 3000 trazas y buzamiento límite de 65°

En San Gabriel el efecto de manchamiento se observa aún en las migraciones realizadas con apertura óptima teórica lo cual se debe a la muy baja relación señal/ruido de la información en general.

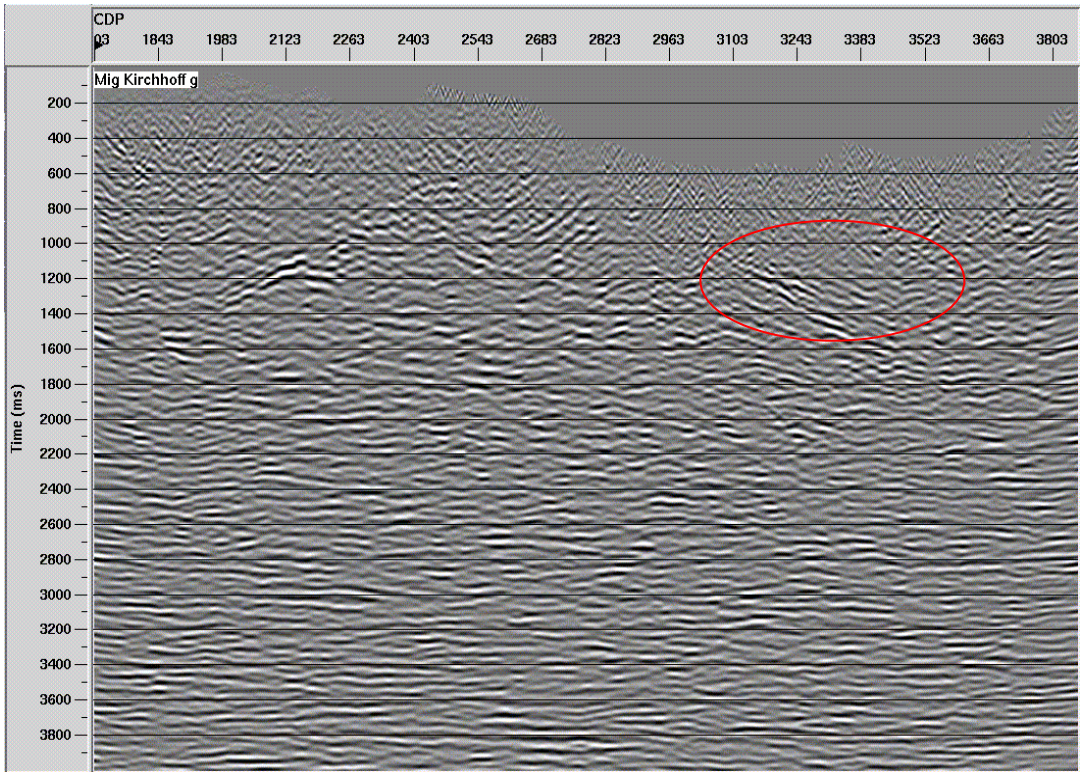


Figura 86. Migración de la línea 1840 con apertura de 800 trazas y buzamiento límite de 60°

La migración de apertura óptima Figura 86 se diferencia de la teórica Figura 87 en tan solo 200 trazas, sin embargo presenta mejor definidos algunos eventos como el correspondiente al CDP 3243 a 1.2 segundos.

Debido a las características particulares de la información en San Gabriel la apertura de la ventana debe ser mayor que la teórica para reducir más el manchamiento horizontal y para definir mejor los reflectores, pero no debe ser muy grande para evitar la degradación de la información. Para los eventos en el Bloque san Gabriel el valor óptimo de apertura media es de 800 trazas.

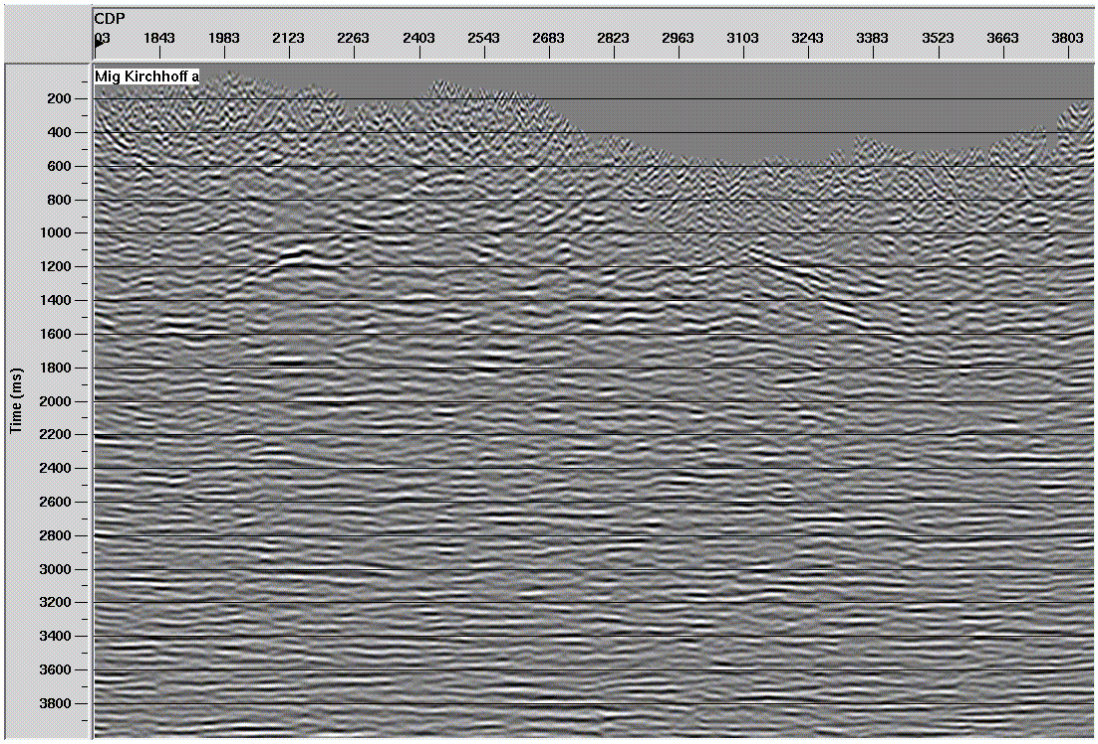


Figura 87. Migración de la línea 1840 con apertura de teórica de 600 trazas y buzamiento límite de 60°

Es de notar que aunque en la realización de la migración se tuvo cuidado y se realizaron múltiples pruebas, la resolución de la sección de salida es menor que la del apilado de entrada. Esta disminución se debe a la gran complejidad estructural de la zona y al fuerte contraste de velocidades verticales y laterales, además a factores como, las formaciones vulcano-sedimentarias e ígneas de los extremos con ausencia de reflectores que aporten energía a la sumatoria y al gran tamaño de la capa meteorizada entre otros.

También se sabe que la migración en 2D no es apropiada para este tipo de información, pero es la única disponible para completar el procesamiento en el Bloque San Gabriel.

5. INTERPRETACIÓN SÍSMICA DE LA LÍNEA SG-2002-1840

En esta sección se describe como se realizó la interpretación de la sección deformada bajo la línea SG-2002-1840. (ver Figura 88)

La interpretación geológica involucró además de la información de subsuelo, la geología de superficie y los topes de las formaciones perforadas en el pozo Oso-1, ubicado a 2.6 Km al Sur-Oeste de la línea. La localización, cercana de este pozo a la línea, facilitó el amarre de las formaciones y le dio una aceptación coherente a la interpretación.

Primero se identificaron y se trazaron los eventos correlacionables a lo largo de la línea a partir de las características de amplitud y luego se hicieron los respectivos amarres con los topes de las formaciones, información obtenida de los registros caliper del pozo y mediante el contorneo local de los buzamientos de las formaciones geológicas perforadas por Oso-1. Para esto se siguió el procedimiento descrito por (Olaya et al, 1991). También se hizo un análisis detallado de las formas de las fallas y se midieron las longitudes de las capas y los espesores de las mismas siguiendo el procedimiento descrito por (Linares, 1998). Por último se tuvo especial cuidado en respetar las normas del balanceo de secciones, es decir verificando que el número de rampas y flats en los bloques yacentes y en los bloques colgantes fuera igual y manteniendo aproximadamente igual las longitudes de los flats a ambos lados de las fallas.

Los principales problemas de la interpretación de la sección sísmica SG-2002-1840 fueron: (A) encontrar las reflexiones correlacionables y (B) localizar las fallas.

El primer problema se da por que las capas que producen las reflexiones en la zona central de la línea, cambian en forma y se repiten con respecto a las reflexiones en las zonas laterales de la línea (ver Figura 87), lo que pareciera indicar que se trata de eventos diferentes. Para mejor detalle ver anexo C

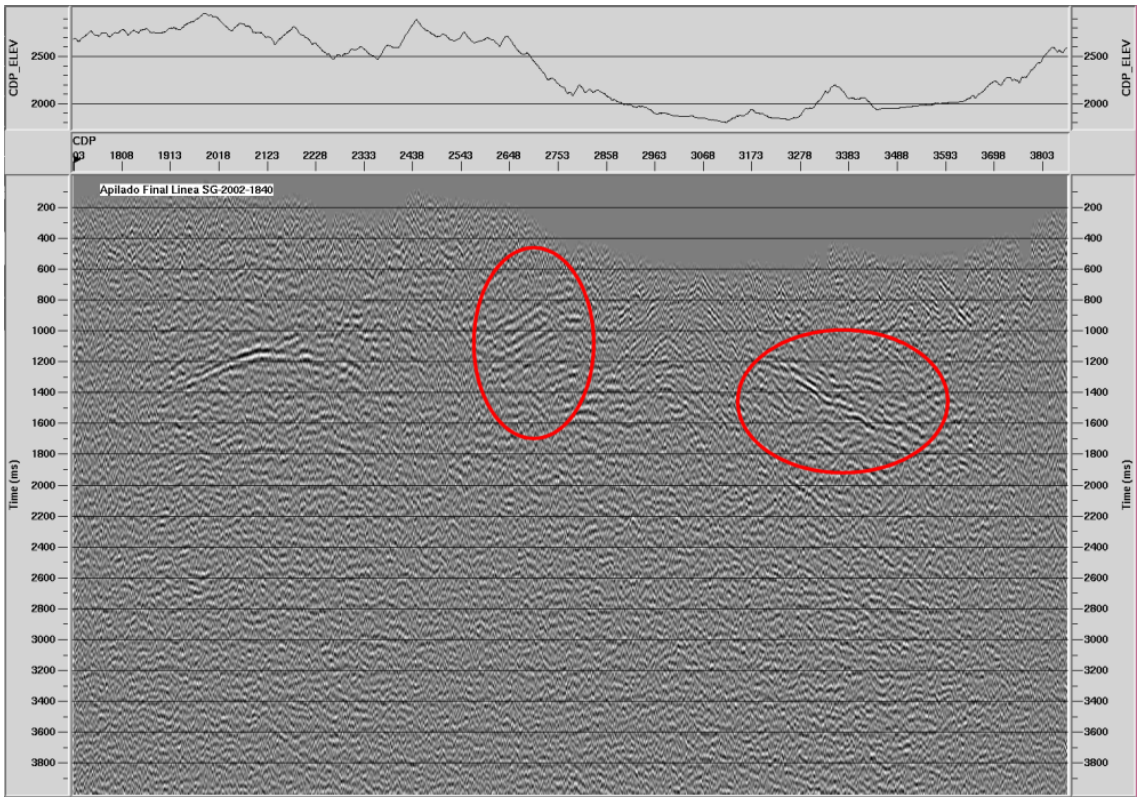


Figura 87. Líneas de reflexión correlacionables y pertenecientes a un mismo evento. (Ver Anexo C)

El segundo problema fue también de bastante cuidado, ya que no solo explicaba la repetición de las reflexiones si no que también debía mantener plausible la interpretación con el modelo geológico y a su vez respetar las normas de balanceo de secciones, con lo cual se podía en últimas describir de manera coherente la sub-superficie geológica de la línea.

La Figura 88 muestra la interpretación realizada en la sección sísmica SG-2002-1840 la cual es geométricamente restaurable a su estado pre-deformado y desde el punto de vista del balanceo de secciones es una sección admisible.

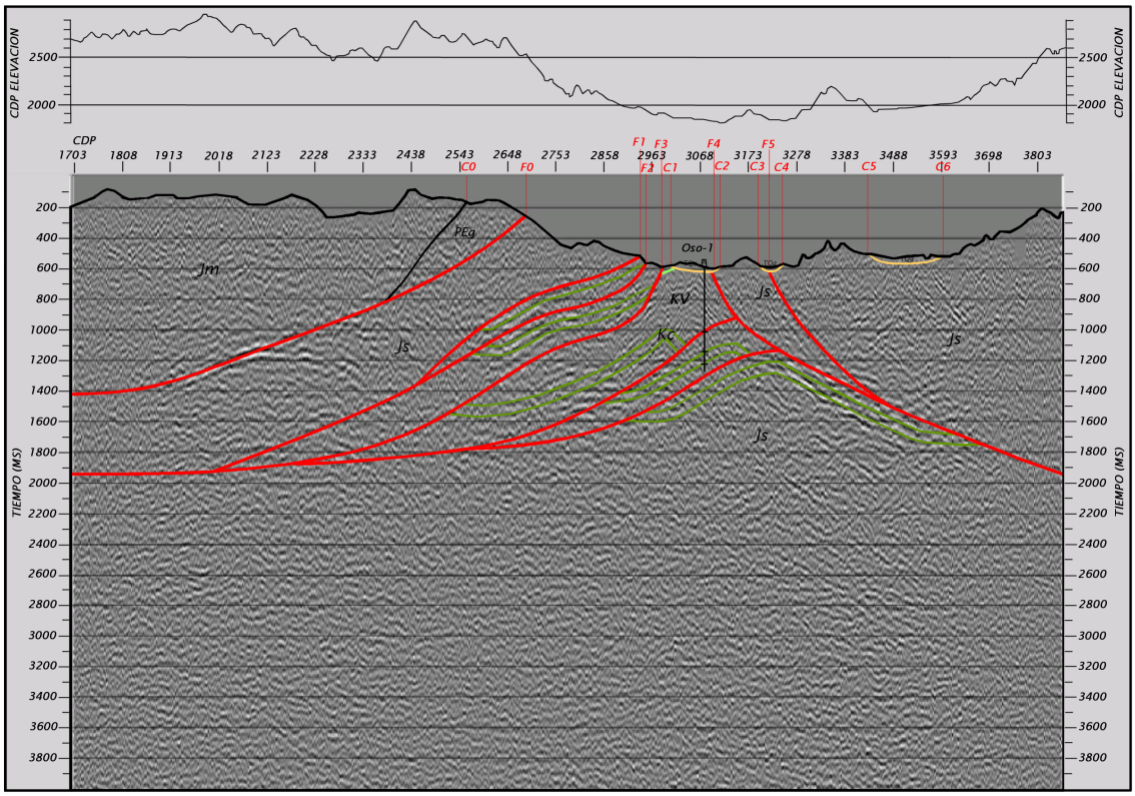


Figura 88. Interpretación sísmica de la sección SG-2002-1840. Para mejor detalle ver anexo D.

5.1 DESCRIPCIÓN DE LA SECCIÓN GEOLÓGICA OBTENIDA DE LA SECCIÓN SÍSMICA SG-2002-1840.

Como se observa en la sección geológica construida a partir de la interpretación sísmica, (Figura 89), los cabalgamientos afectan por igual ambos costados del Bloque San Gabriel. Estructuralmente se observan, múltiples fallas de tipo inverso que convergen hacia el centro de la sección produciendo transporte tectónico opuesto y acortamientos de gran magnitud en toda la secuencia sedimentaria lo que genera una típica zona triangular, donde se aprecia un alto grado de deformación producto de la superposición de los cinturones de cabalgamiento que como característica importante se encuentran nucleados en un mismo despegue dentro del basamento económico. Este despegue produce escamación gruesa de la formación Saldaña y genera no solo la zona triangular central si no también un abanico tectónico imbricado al costado izquierdo de la anterior zona al navegar dentro de las unidades más blandas e incompetentes de la cobertura sedimentaria (Formación Villeta). Cabe anotar que las fallas decapitan a la Formación Villeta, por lo cual ésta

presenta diferencias de espesor y colocan escamas finas de la Formación Caballos sobre la unidad anterior.

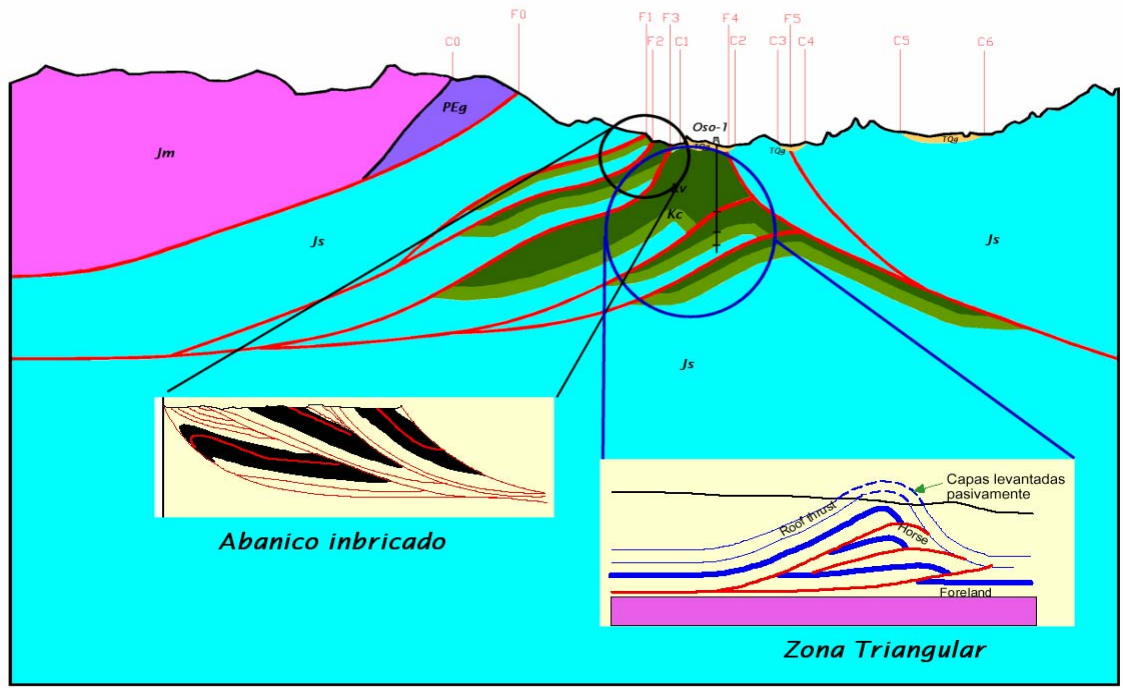


Figura 89. Sección geológica de la línea SG-2002-1840. Para mejor detalle ver Anexo E.

La zona triangular se compone principalmente pliegues tipo Fold-Bend-Fold en profundidad cuyas geometrías son asimétricas, con limbos dorsales alargados y frontales cortos, ambos con fuerte pendiente.

El sinclinal reportado en la cartografía de la zona central se interpreta como el producto del corte abrupto de las fallas inversas de vergencia contraria con la superficie.

Por último se observa que las fallas con vergencia Oriental se presentan en mayor cantidad dominando la parte Occidental del área, mientras que las fallas de ante-país con vergencia Occidental dominan la parte Oriental y son menores en cantidad.

De acuerdo al amarre con geología se presenta una falla de gran magnitud con vergencia Nor- Este en el extremo Oeste del área, que cabalga en su bloque alto con la formación de mayor edad de la zona y con basamento cristalino sobre los sedimentos de la Formación Saldaña.

5.2 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

Las Figuras 90 y 91 muestran dos secciones geológicas construidas a partir de las líneas sísmicas, HSG-99-1870, ubicada 4 Kilómetros al norte y HSG-99-1800, ubicada 4 Kilómetros al Sur de la línea sísmica SG-2002-1840, (Ver anexo A).

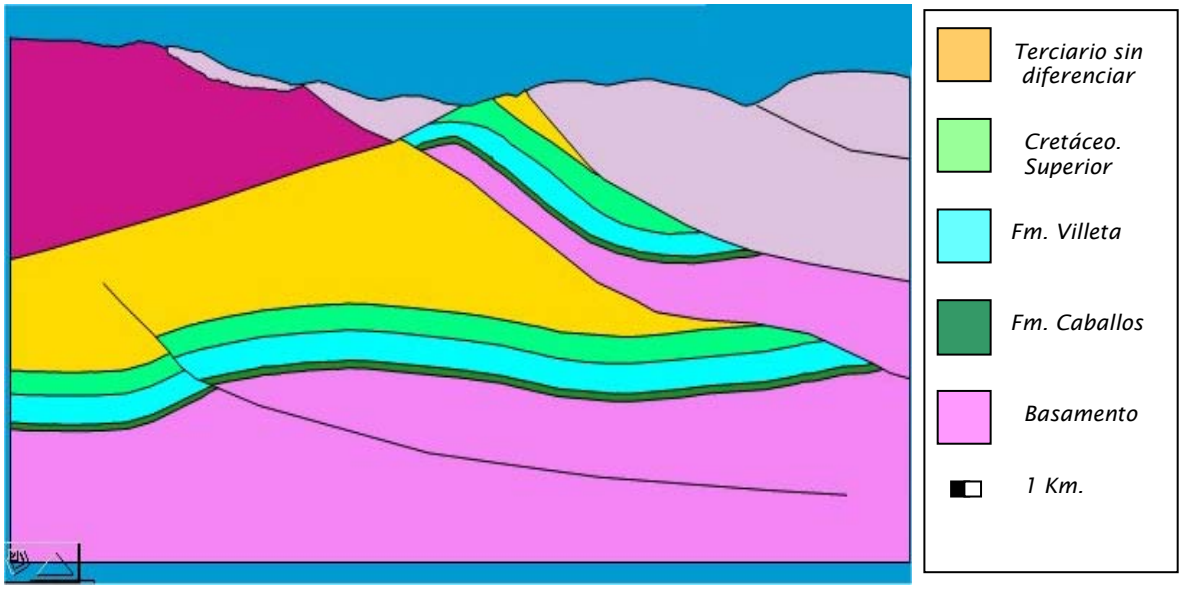


Figura 90. Sección Geológica de la línea HSG99-1870 ubicada 4 Km al Norte de la línea SG-2002-1840.

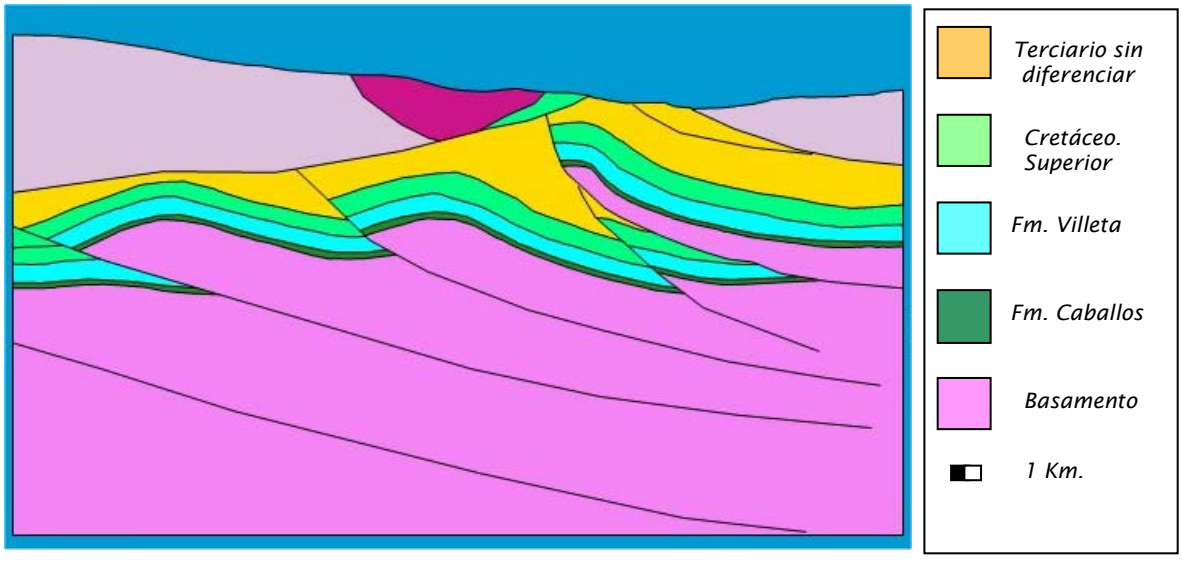


Figura 91. Sección Geológica de la línea HSG99-1800 ubicada 4 Km al Sur de la línea SG-2002-1840.

Ambas secciones son de la misma longitud que la sección SG-2002-1840 y fueron utilizadas para realizar el modelamiento estructural del Bloque San Gabriel (Linares, 2003), por lo cual representan el modelo Geológico de subsuelo que maneja ECOPETROL para el área.

Como se aprecia en las imágenes, para ECOPETROL la geología del bloque está constituida por estructuras anticlinales asimétricas de poca longitud de onda asociadas a fallas de vergencia Nor-Oeste. Solo se aprecia una falla de vergencia contraria que cabalga a las secuencias estratiformes y coloca sobre ellas a rocas cristalinas y metamórficas.
Estas secciones se generaron a partir de las secciones interpretadas de las Figuras 92 y 93 y como se puede concluir analizándolas, presentan varias diferencias con respecto a la sección generada en este trabajo y algunos problemas que merecen atención. Estos son:

1. La vergencia de algunas de las fallas en las secciones no concuerda con la vergencia de las fallas en la cartografía, (Ver anexo 1), lo cual puede deberse al mapa empleado para el amarre.
2. El espesor de las formaciones terciarias es demasiado grande y durante la perforación del pozo Oso-1 no se reporto, por lo cual el espesor en las secciones no corresponde al espesor real.
3. La sección HSG-99-1800 (ver Figura 91) muestra 5 fallas de basamento no asociadas a un mismo despegue mientras que la sección HSG-99-1870 (ver Figura 90) muestra solo 2, lo cual es poco probable en una distancia de 8 Kilómetros ya que en el Bloque San Gabriel la mayoría de estructuras tiene carácter regional, especialmente las fallas de cabalgamiento.
4. La sección HSG99-1800 presenta una grave incongruencia respecto a la cuña aflorante de la Formación Caballos, pues desde el punto de vista del balanceo de secciones dicha cuña no pudo haber llegado a ese sitio.
5. La sección HSG99-1800 no balancea respecto a rampas y flats
6. De acuerdo a los espesores conocidos en el área (Mejía et al, 2000), y a las unidades aflorantes en la secciones superficie las unidades cretácicas de la línea HSG99-1800 deberían estar estructuralmente mas altas (Linares, 2001).

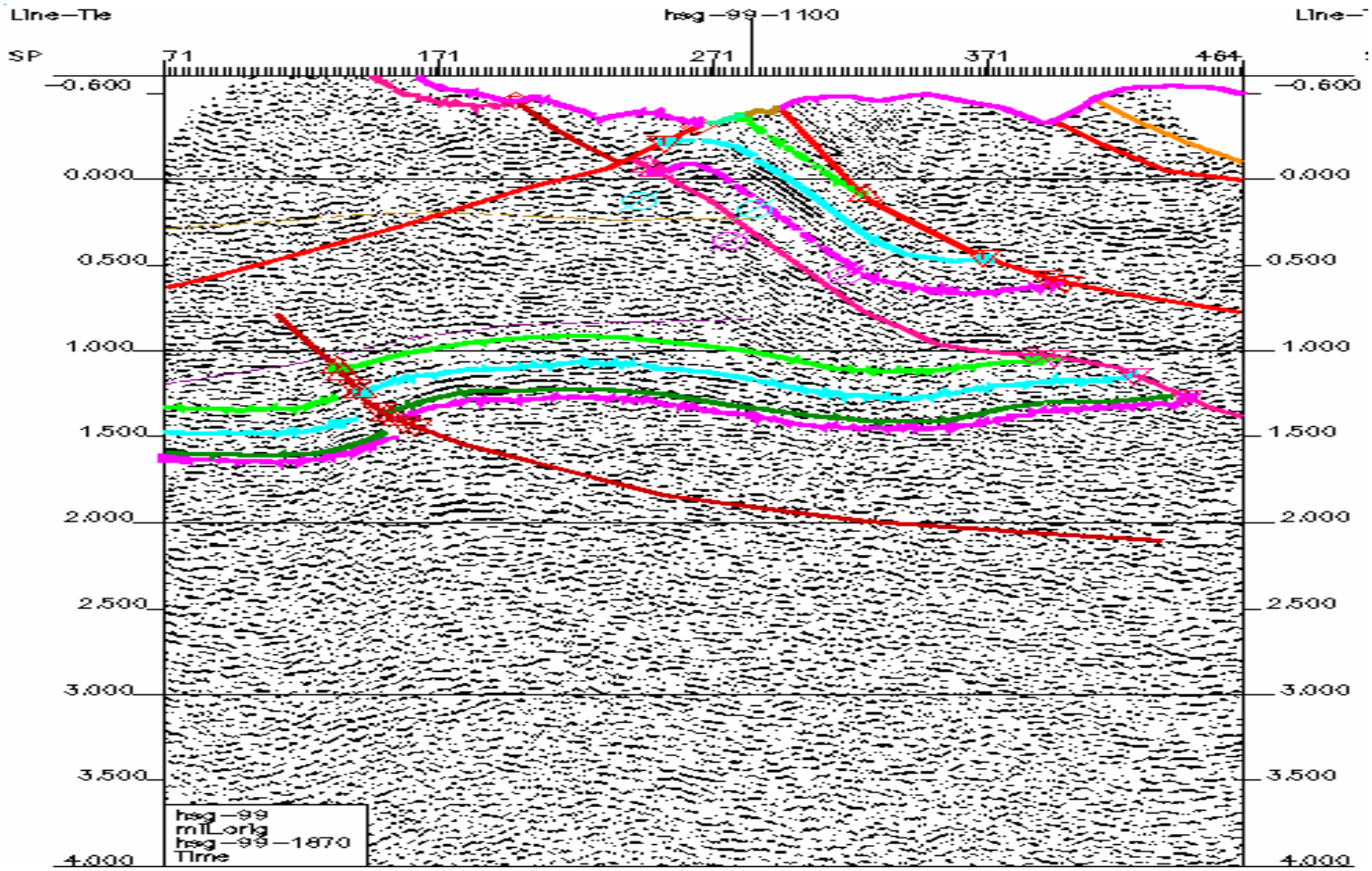


Figura 92. Sección sísmica interpretada de la línea HSG99-1870.

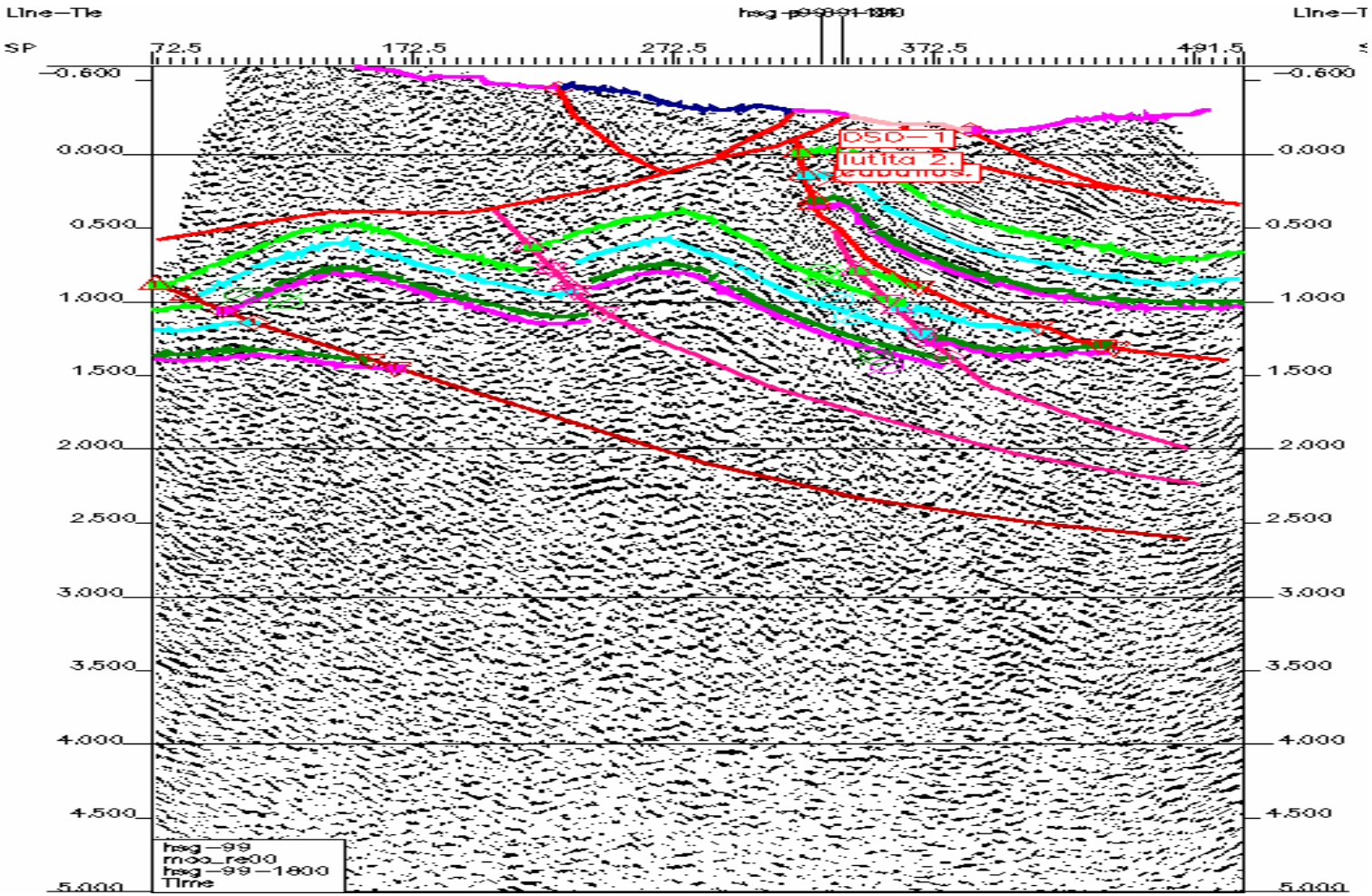


Figura 93. Sección sísmica interpretada de la línea HSG99-1800.

Los problemas anteriores pueden deberse a la falta de resolución en las imágenes sísmicas o a problemas de múltiples, reverberaciones y artefactos que generan eventos ficticios en los tiempos mayores.

En ambas secciones se aprecia un estilo de cabalgamiento-plegamiento, sin embargo esta interpretación no es congruente con la imagen de subsuelo obtenida en este trabajo la cual se encuentra en medio de estas dos secciones como se aprecia en el anexo1.

La imagen obtenida del procesamiento de la línea SG-2002-1840 y su posterior interpretación (Figura 88), presenta una configuración geológica, bastante diferente a la manejada por ECOPETROL y confirma las descripciones estructurales planteadas por Maya et al, 2001, acerca de la presencia de una zona triangular limitada por fallas inversas de vergencia contraria y sobre los sistemas de fallamiento que componen el tren estructural general de la zona.

De acuerdo a lo anterior y teniendo en cuenta que las trampas petrolíferas a lo largo del Valle Superior del Magdalena son ante todo trampas de tipo estructural que involucran a las formaciones cretácicas, se aprecia la importancia de los resultados obtenidos a partir del procesamiento detallado de la información sísmica adquirida en el Bloque, dado que se estaría entrando a manejar no solo características estructurales antes no tenidas en cuenta que podrían estar explicando algunas de las razones de la falta de éxito en las perforaciones realizadas en el área.

La definición correcta de este tipo de estructuras, como las observadas en la línea SG-2002-1840, (ver Figura 88) puede ser un factor determinante para el éxito de un prospecto exploratorio, por lo cual se debería reprocesar y reinterpretar de nuevo la sísmica de la zona de la misma manera como se realizó este trabajo es decir integrando de manera rigurosa la información geofísica, estructural y estratigráfica con el fin de generar un modelo geológico final del área que sea congruente y veraz, lo que permitiría proceder a tomar decisiones basadas en la realidad y no en la incertidumbre, ya que con este tipo

de diferencias es imposible encontrar hidrocarburos en un área tan compleja como lo es el Bloque San Gabriel.
Lo anterior también podría llevar a plantear estudios post-mortem de los pozos Oso-1, Pantera-1 y Esnaga -1, ya que las razones de que estos pozos hubieran sido definidos como no productores podrían encontrarse en este tipo de incongruencias geológicas.

La razón de las incongruencias no radica solamente en la interpretación de las secciones sísmicas, sino en la veracidad de los eventos observables producto del procesamiento de los datos, pues un interprete se basa en el conjunto de eventos que observa en la sección y en su conocimiento geológico del área, pero si de antemano al hecho de que los eventos observables en las secciones sísmicas sean escasos y de mala calidad se le suma el hecho de no tener claro el modelo geológico pues se elevan las posibilidades de no acertar en los prospectos exploratorios y de no conseguir el éxito en la tan anhelada búsqueda de los hidrocarburos.

Esta experiencia y sus resultados nos hace reflexionar sobre el trabajo que falta por hacer en el Bloque y en la mayoría de las zonas complejas de nuestro territorio, además resalta la necesidad de integrar a un más los conocimientos geofísicos, geoquímicos, petrográficos, estratigráficos, estructurales y generales de las zonas que se manejan muchas veces por aparte.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La información sísmica adquirida en el Bloque San Gabriel es en términos de relación señal/ruido de muy mala calidad, lo anterior dificulta de gran manera todas las etapas de procesamiento sísmico y por consiguiente la interpretación estructural del área.

- La información se caracteriza por la escasa presencia de reflectores y de información coherente. Adicionalmente la información útil se presenta solo en los primeros segundos de grabación y por lo general es la convolución de múltiples reverberaciones de baja frecuencia con ruidos aleatorios de alta frecuencia que deben suprimirse mediante diferentes tipos de filtros antes de iniciar las etapas principales de procesamiento.

- Los factores que afectan la calidad de la señal sísmica son: la variable y abrupta topografía, el fuerte contraste de velocidades de las rocas que configuran el subsuelo, las altas y cambiantes velocidades de la capa meteorizada bajo la superficie y la compleja geología del subsuelo

- A partir del análisis detallado de todos los factores que afectaban la calidad de la sísmica y con la realización de múltiples pruebas, se pudo mejorar la información sísmica del Bloque San Gabriel con técnicas convencionales durante la deconvolución, el análisis de velocidades y apilado sísmico. Sin embargo la migración 2D en tiempo no produjo una solución satisfactoria, y disminuyo la resolución obtenida con las etapas anteriores. No obstante para la interpretación se pueden utilizar las secciones apiladas pues la migración en tiempo no produce cambios de importancia en los eventos observados.

- Para poder contrarrestar la mala resolución de la información sísmica en el Bloque, no solo es necesario realizar un procesamiento convencional como el expuesto en este trabajo, sino recurrir a técnicas de procesamiento más sofisticadas como la migración pre-apilado en profundidad, técnica que demanda más tiempo pero que puede producir muy buenos resultados.

- Se recomienda revisar los modelos de velocidades empleados en el procesamiento de las líneas sísmicas del área mediante la técnica de apilados a velocidad ya que esta técnica fue la herramienta de mayor utilidad en el mejoramiento de la imagen de la línea SG 2002-1840.

- El procesamiento y la interpretación de los datos de reflexión sísmica en el Bloque debe hacerse de manera simultánea, con el fin de validar los resultados de las etapas de procesamiento y ayudar a la correcta escogencia de los parámetros para cada una de ellas.

- El procesador que trabaje en la información del Bloque San Gabriel debe tener excelentes conocimientos sobre la estratigrafía y la geología estructural del sur del país, ya que algunos de los errores observados en las interpretaciones de las líneas parte de errores en el procesamiento, errores que son el producto de la falta de integración de dichos conocimientos con la geofísica.

- El subsuelo del Bloque San Gabriel es un área, donde los finos detalles de geometría estructural son desconocidos, por lo tanto, si se quiere progresar en este aspecto, se recomienda la adquisición de información sísmica 3D, ya que la adquisición de líneas en dos dimensiones no es lo suficientemente aproximada y tampoco es apropiada para estas zonas de geología tan compleja.

- La imagen obtenida del Bloque San Gabriel, permitió realizar una interpretación sísmica viable y congruente con las normas del balanceo de secciones. La interpretación es congruente con el modelo geológico recientemente planteado para el Bloque en el trabajo de Maya et al, 2001. Sin embargo este modelo aun no ha sido probado por medio sísmica o de perforaciones y la imagen manejada para la exploración de prospectos en la zona, es muy diferente. Por lo tanto se recomienda revisar el modelo geológico del área, a partir del reprocesamiento de la sísmica existente bajo este enfoque estructural y utilizando las técnicas aquí empleadas, con ello y con la imagen de la línea SG-2002-1840, se podría explicar la falta de éxito exploratorio en el prospecto OSO-1.

- Este estilo estructural representa un potencial no convencional que de concretarse haría del Bloque San Gabriel un área más atractiva desde el punto de vista exploratorio por la posibilidad de múltiples repeticiones de la secuencia cretácica.

BIBLIOGRAFÍA

- BADLEY, M. 1985. Practical seismic interpretation. International human resources development. Boston, USA. 270 p.

- BAKER, B. COPSON, E. 1950. The Mathematical Theory of Huygens' Principle. Oxford, England. En http://scienceworld.wolfram.com/physics/info-entries.html

- BARRIO, C. COFFIELD, D, 1992. Late cretaceous stratigraphy of the Upper Magdalena Basin. Journal of South American Earth Sciences. Vol. 5.

- BECERRA, S. MEDINA, H. 2003. Reporte sobre pruebas sísmicas realizadas en el Bloque San Gabriel, Piedemonte Occidental de la cordillera Oriental en el extremo Sur-Oeste del Valle Superior del Magdalena. Pitalito, Colombia. 40 p. Inédito.

- BELTRAN, M. GALLO, J. 1968. Guide book to the Geology of the Neiva sub-basin. Upper Magdalena Basin. Colombian Society of Petroleum Geologist and Geophysics.

- CACERES, C. 2000. Caracterización de los reservorios cretáceos "Formación Monserrate y Formación Caballos" del Valle Superior del Magdalena para la ubicación de un área de exploración. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

- CEDIEL, F. MOJICA, J. MACIA, C. 1980. Definición estratigráfica del Triásico en Colombia. Formaciones Luisa, Payande y Saldaña. P. 73-104. Bogotá, Colombia.

- CLAERBOUT, J. 1976. Fundamentals of geophysical data processing: McGraw -Hill

- CLAERBOUT, J. DOHERTY, S. 1972. Downward continuation of moveout-corrected seismograms: Geophysics, 46, 741-768

- COLETTA. B. HEBRARD, F. 1990. Estilos tectónicos y estructuras de la corteza del Oeste de la Cordillera Oriental en Colombia. Paris, Francia. p. 81-100.

- ETAYO, S et al. 1994. Estudios geológicos del Valle Superior del Magdalena. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá Colombia.

- FISHER, R. 1980. An intermediate course of instruction in the geophysics of seismic data processing. Dallas-Texas, USA. 856 p.

- FREITAS, M. 2001. Las victimas del Saldaña: exploración subthrust en el Valle Superior del Magdalena - casos históricos y el camino hacia el futuro. Braspetro – Colombia.

- GAZDAG, J. 1978. Wave-equation migration by phase shift: Geophysics, 43, 1342-1351.

- GEOESTUDIOS. 1998. Mapa Geológico de Colombia, Plancha 430 y 412 Mocoa-San Juan de Villalobos. Escala 1:100.000. Memoria explicativa. Bogotá. Ministerio de Minas y Energía.

- GUEVARA, S. SALINAS, T. PIEDRAHITA, C. 2002. Efectos de las capas someras alta velocidad en los datos sísmicos aplicados a la detección de hidrocarburos. Instituto Colombiano del Petróleo. Bucaramanga.

- GOMEZ, L. SANABRIA N. 1992. Procesamiento y análisis geológico de las velocidades de apilamiento de la línea sísmica Catatumbo 77-c. Industrial de Santander Bucaramanga, Bucaramanga.

- GROSSE, E. 1926. Acerca de la Geología del sur de Colombia, Huila y alto Caquetá. Compilación de estudios geológicos oficiales de Colombia. T.III. Bogotá 16, 326- 358.

- HIGGS, R. 2001. Sedimentological literature review, Caballos & Monserrate Formations, Upper Magdalena Basin, Colombia: implications for petroleum exploration in Acevedo – San Gabriel Blocks. Talisman Oil & Gas Ltda.

- HILEMAN, J.1968. Automated static correction: Geophysics Prospectum. 16, 326- 358.

- HUBACH, E. 1955. Unidades geológicas y geográficas del Departamento del Cauca. Servicio Geológico Nacional. Informe 1107, p1-9.

- IRVING, E. 1971. La evolución de los andes más septentrionales de Colombia. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras. Boletín de Geología. V. XIX 89p

- KENNETH, H.1987. Reflection seismology. Wiley Inter science Editors. New York U.S.A. 300p.

- LEON, L. PADILLA, L. MARULANDA, N. 1973. Geología de recursos minerales y geoquímica de la parte NE del departamento del Cauca. Ingeominas.

- LINARES, R. 1998. Geología estructural en cinturones de cabalgamiento. Instituto Colombiano del Petróleo. Bucaramanga Inédito

- LINARES, R. 2003. Modelamiento estructural en el Área de San Gabriel - VSM. Instituto. Colombiano del Petróleo.

- LOMBO, C. LOPEZ, G. 2001. Prospecto Compadre 1. Instituto. Colombiano del Petróleo.

- MACIA, C. MOJICA, J. COLMENARES, F. 1985. Consideraciones sobre la importancia de la paleo-geografía y alas áreas de aporte pre-cretáceas en la prospección de hidrocarburos en el Valle Superior del Magdalena. Geología Colombiana, V. 14.

- MAYA, L. COLMENARES, F. RONCANCIO, J. SANTAMARIA, L. TOVAR, D. PARRA, M. MORA, A. 2001. Cartografía geológica de un sector del área de San Gabriel. Informe inédito. ECOPETROL.

- McQUILLIN, R. BACON, M. 1984. An introduction to seismic interpretation. Gulf Publishing Company. Houston-Texas USA. 290 p.

- MEJÍA, H. y DIEDERIX, H. 1993. Mapa geológico del sur del departamento del Huila (Escala 1:100.000): Memoria Explicativa. En: Revista Ciprés. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 14 (1): 1-36. Bogotá.

- MEJIA, E. GARCIA, E. 2000. Determinación de la posibilidad de éxito exploratorio (POS) para estructuras en el Valle Superior del Magdalena (VSM). Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

- MERA, R. 1980. Curso de diseño de parámetros para adquisición de datos sísmicos V-2 y 3. Bucaramanga, Colombia. 48 p.

- NELSON, W. 1957. Contribución a la geología de las Cordilleras Central y Oriental de Colombia. Líes de Geol.

- OLAYA, I. 2000. Curso de interpretación sísmica básica. Instituto Colombiano del Petróleo. Bucaramanga.

- PEACOCK, K. TREITEL, S. 1969. Predictive deconvolution – theory and practice: Geophysics, 34, 155-169

- POLO. M, VENCE. E. 2000. Determinación de áreas prospectivas de hidrocarburos en el extremo Sur - Oeste del Valle Superior del Magdalena. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga.

- OLHOVICH, M. 1959. Curso de sismología aplicada. Editorial Reverte. Niágara, México. 382 p.

- SHERIFF, R. GELDART, L. 1991. Exploración sismológica. Noriega Editores. Madrid, España. 274p.

- RESSETAR R, Barrio. C. 1990. Investigaciones en la concesión Pitalito, Sur Oeste de Colombia. Instituto de Ciencias y Recursos de la Tierra. USA. 234 p.

- SCENEIDER, D.1978. Integral formulation of migration in two and three dimensions: Geophysics, 43, 49-76.

- SENGBUSH R. 1986. Petroleum exploration: a quantitative introduction. Boston USA. 233 p.

- STOLT, R. 1978. Migration by Fourier transform: Geophysics, 43, 23-48.

- TOUSSAINT, F. RESTREPO, J 1976). Modelos orogénicos de tectónica de placas en los andes colombianos . Boletín de ciencias de la tierra, Facultad de ciencias de la universidad Nacional de Medellín. 47p.

- TANER, M. T. KOEHLER, F. ALHILALI, K.1974. Estimation and correction of near-surface time anomalies: Geophysics, 41, 441-463.

- TANER, M. T. KOEHLER, F., 1969, Velocity spectra digital computer derivation and application of velocity functions: Geophysics, 39, 859-881.

- UJUETA. G. 1999. La Cordillera Oriental colombiana no se desprende de la Cordillera Central. Geología Colombiana Vol. 45, No 24, p. 3- 25.

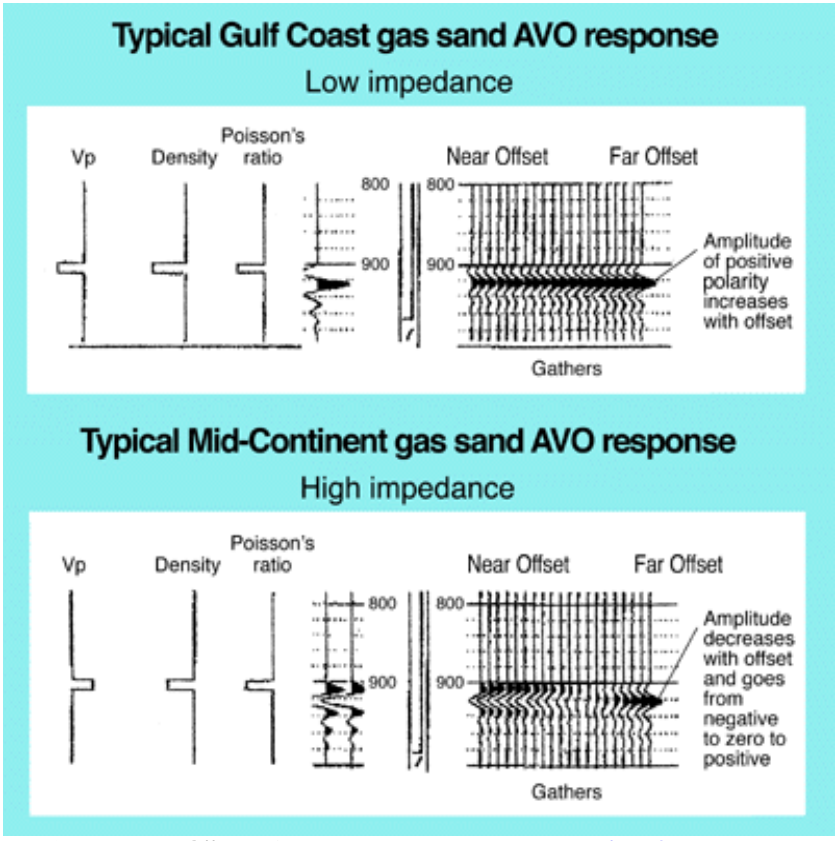
- VAN DER WIEL, A.M. 1991. Uplift and Volcanism of the SE Colombian Andes in Relation to Neogene Sedimentation in the Upper Magdalena Valley, Thesis, Department of Soil Science and Geology, Wageningen Agricultural University.

- VERGARA, L. GUERRERO, J. PATARROLLO, P. SARMIENTO, G. 1995. Comentarios acerca de la nomenclatura estratigráfica del cretáceo inferior del Valle Superior del Magdalena. Geología Colombiana, V. 19.

- YILMAZ, Ö. 1988. Seismic data processing. Stephen Doherty Editor. U.S.A. 530 p.

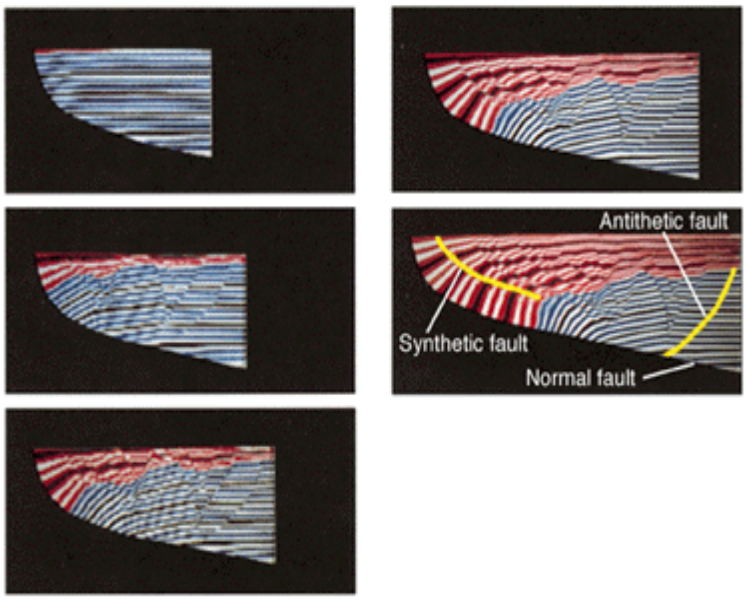
GLOSARIO

Amplitud versus Offset: Variación en la energía sísmica con el cambio de distancia entre puntos de tiro y receptores, lo cual indica diferencias en litología y contenido de fluidos por encima o por debajo del reflector.



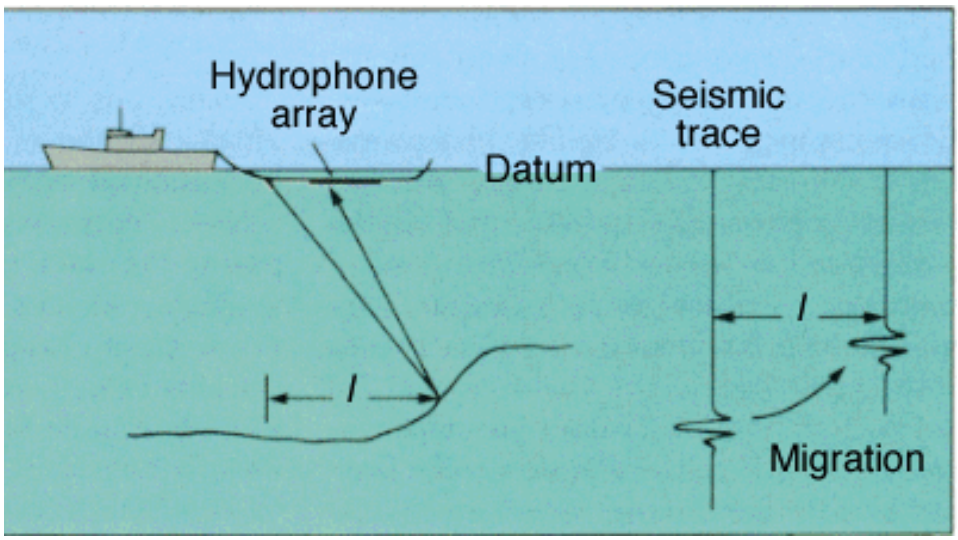
Amplitud vs. Offset. Tomada de www.schlumbergeroilfieldGlossary.htm

Antithetic fault: Es una falla secundaria de menor escala, usualmente una de un set, cuyo desplazamiento es opuesta a su mayor y asociada synthetic fault. Las fallas sintéticas y antitéticas se forman en zonas exenciónales de fallamiento normal.



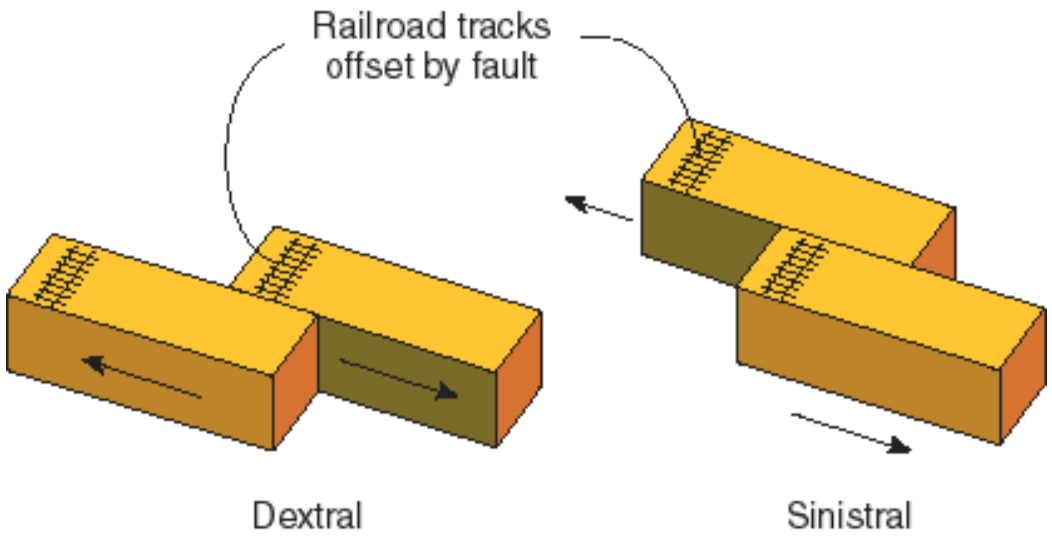
Esquema de fallas sintéticas y antitéticas tomada de www.schlumbergeroilfieldGlossary.htm

Band-pass filter: Filtro que permite el paso de una banda de frecuencias, suprimiendo las que estén fuera de los límites deseados por el procesador.
Bosque: Área cubierta por una asociación de árboles, arbustos y plantas.
Bosque Primario: Bosque aún no intervenido por el hombre.
Bosque Secundario: Bosque intervenido por el hombre.
Bowtie: Es un evento cóncavo hacia arriba en la información sísmica, producido por un foco de enterramiento y corregido por una apropiada migración de la información. El enfocamiento de la onda sísmica produce tres puntos de reflexión sobre el evento, por la localización superficial. El nombre se origina por la apariencia en forma de corbatín del evento en la información sin migrar. Los sinclinales o las depresiones, generalmente generan bowties.
Busters Box: Es una caja amplificadora de las señales digitales que se conecta a la línea sísmica para compensar la perdida de energía por la resistencia del cable.
CMP common mid point sorting: Organización de la información sísmica en punto medios comunes.
CDP common depth point sorting: Organización de la información sísmica en puntos comunes en profundidad.
Common-Offset: Trazas que tienen el mismo offset
Damping: Es una prueba que se realiza a todos los geófonos empleados en una adquisición, con el fin de evaluar su correcta oscilación y vibración
Datum: Es un valor conocido y convenido, como por ejemplo la altura de referencia para medir el nivel del mar. A partir de el se estiman y corrigen algunos valores. En la información sísmica, el término se refiere a una superficie plana arbitraria con respecto a la cual se realizan correcciones y sobre la cual las fuentes y receptores se suman para minimizar los efectos de la topografía y de las capas someras de baja velocidad.



El nivel del ara es típicamente el Datum de referencia para realizar los cálculos de la sísmica marina. Tomado de www.schlumbergeroilfieldGlossary.htm

Delay Shot: Es un disparo sísmico que ha sido disparado algún tiempo después de la grabación magnética.
Decollement: Es una falla superficial paralela a la estratificación que separa a rocas deformadas arriba de la falla a partir las rocas sin deformar bajo la falla. Los decollement son típicos en regiones bajo compresión como los piedemontes.
Dextral Fault Pertenece al grupo de las fallas de rumbo. Su desplazamiento lateral ocurre hacia la derecha a lo cual el bloque a lo largo de la falla se mueve hacia la derecha. Si el movimiento es hacia la izquierda la falla se describe sinestral la rotación en el sentido de las manecillas del reloj o en espiral también se considera destral.



Esquema de las fallas sintéticas y antitéticas. Tomada de www.schlumbergeroilfieldGlossary.htm

Difracción: Es un tipo de evento producido por la dispersión radial de una onda dentro de nuevos frentes de onda después de que la onda se encuentra con una discontinuad como una falla, una inconformidad o un cambio abrupto en los tipos de rocas. Las difracciones se presentan como eventos hiperbólicos sobre una sección sísmica.

Dip: Magnitud de la inclinación de un plano con respecto a la horizontal.

Dip filtering: Filtro que actúa sobre eventos que presentan ángulo con respecto a una línea horizontal, un dip filtering es eficaz para filtrar ondas de dispersión ó también ruido tipo ground roll.

Dip Moveout: Diferencia entre los tiempos de arribo o tiempos de viaje de una onda reflejada medidos por los receptores en dos localizaciones diferentes, esto se produce cuando los reflectores se encuentran buzando.

Field record: Registro de campo.

Fold: Cubrimiento total de un punto durante una adquisición sísmica.

Es una medida de la redundancia para información sísmica punto medio común, igual que la distancia entre receptores que registran un determinado punto de información ó un determinado bien y se adicionan durante el apilamiento para producir una sola traza. Valores típicos de Fold para adquisiciones sísmicas modernas están en el rango de 60 a 240 para servicios 2D y de 10 a 120 para servicios 3D. El Fold para servicios 2D puede calcularse dividiendo el número de canales sobre 2 y multiplicándolo por el intervalo de grupo dividido por el intervalo de tiro es decir:

$$FOLD = (\#\ de\ canales / 2) * (\triangle STK / \triangle SP)$$

Full-Fold: Cobertura total.

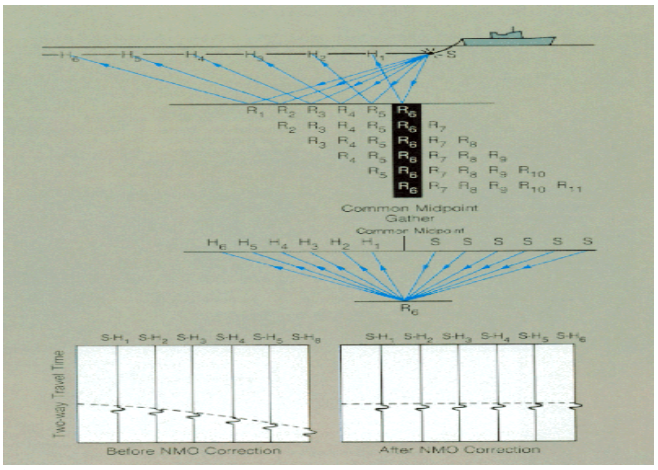
Gathers: Es un despliegue de trazas sísmicas que comparten parámetros de adquisición tales como puntos medios comunes, receptores comunes o fuentes comunes.

Ground roll: Tipo de onda dispersiva que se propaga a lo largo de la superficie, es de baja frecuencia y de gran amplitud. Típicamente, el ground roll es suprimido en campo mediante el arreglo de los receptores.

Growth fault: Es un tipo de falla normal que se desarrolla y continúa durante la sedimentación. Las fallas de crecimiento son muy comunes en el golfo de México y en otras áreas donde la corteza subside rápidamente

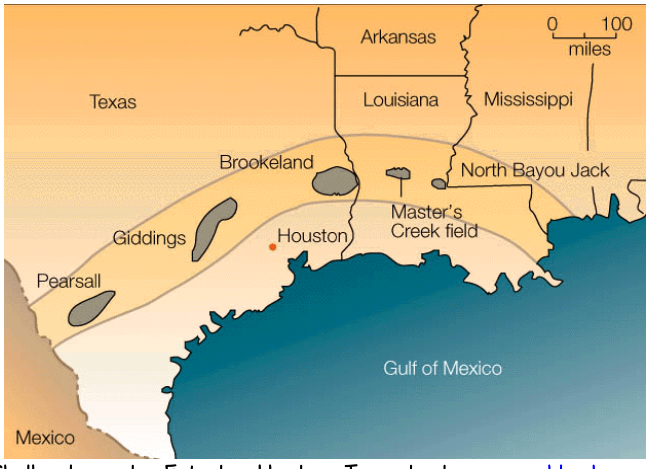
Huygens principle: Cada punto de un frente de ondas primario se comporta como una fuente de ondículas secundarias esféricas tales que el frente de onda primario en algunos tiempos posteriores es envuelto por estas ondículas. Más aún las ondículas avanzan con una velocidad y frecuencia igual al de la onda primaria en cada punto en el espacio. El principio de Huygens fue modificado ligeramente por Fresnel para explicar por que no se forman ondas traseras y Kirchhoff demostró que el principio puede derivarse a partir de la ecuación de onda. (http://scienceworld.wolfram.com/physics/info-entries.html)

Normal moveout: Es el efecto producido por la separación entre receptores y fuentes sobre el tiempo de arribo de una reflexión de un evento no bufante. Una reflexión típicamente arriba primero a los reflectores que están más cerca de la fuente. El offset entre la fuente y otros receptores induce un retardo en el tiempo de arribo de una reflexión superficie horizontal en profundidad. Graficando los tiempos de arribo de una reflexión versus el offset tiene una forma hiperbólica.



Esquema del efecto Normal moveout. Tomada de www.schlumbergeroilfieldGlossary.htm

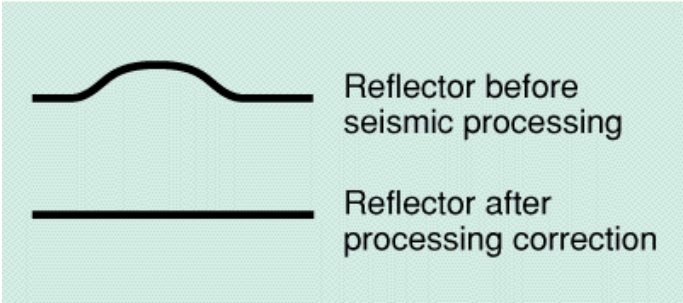
Normal moveout correction: correcciones dinámicas.
Observer report: Reporte realizado por la persona (observer) que detona y registra cada pozo adjuntando en él información pertinente a cada disparo, por ejemplo si durante el disparo se presento un temblor, ó si durante el registro ocurrió algún ruido aleatorio.
Offset: Distancia entre fuentes y receptores en una adquisición de información sísmica.
Overthrust: Es una falla de compresión que tiene un componente de desplazamiento lateral relativamente grande.
Play: Es un modelo conceptual para el estilo de acumulación de hidrocarburos usado por los exploracionistas para el desarrollo de prospecto en una cuenca ó región. La siguiente figura exhibe un escenario exploratorio ó play. Es un área importante para aprender acerca de los reservorios fracturados y que incluye varios campos de considerable tamaño.



Mapa del Play de Chalk al sur de Estados Unidos. Tomada de www.schlumbergeroilfieldGlossary.htm

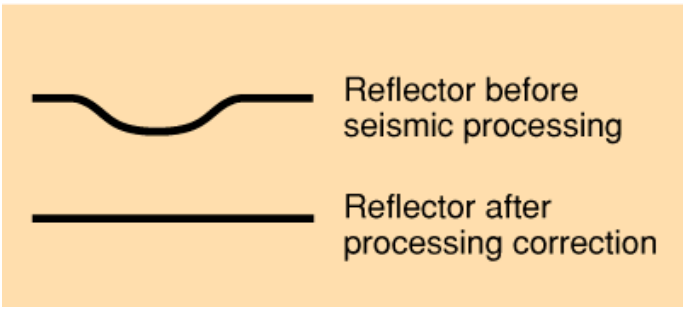
Prewhitening: preblanqueamiento, es ruido blanco que hay que adicionar antes de la deconvolución para asegurar estabilidad numérica.
Pull-Ups: Es un fenómeno relacionado a las velocidades sísmicas de los estratos, donde una capa de alta velocidad sísmica (una capa de sal ó una roca ígnea) está cubierta por una

capa rocosa de menor velocidad lo que causa que en la imagen sísmica aparezca un alto estructural.



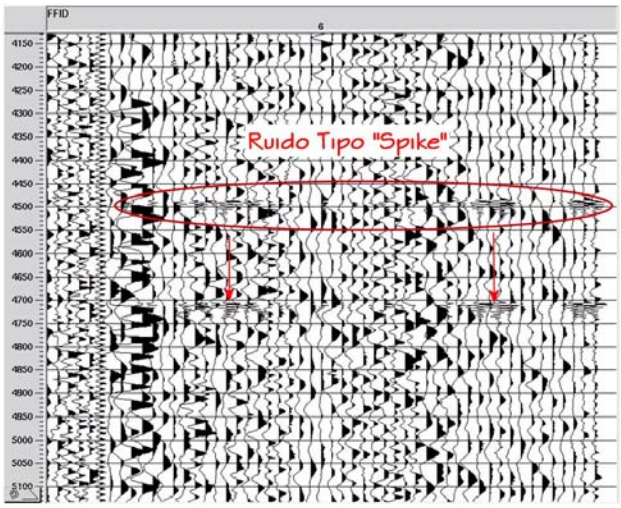
Esquema del efecto Push-Ups. Tomada de www.schlumbergeroilfieldGlossary.htm

Push-Down: Es un fenómeno relacionado a las velocidades sísmicas de los estratos, donde una capa de baja velocidad (shales ó areniscas) está cubierta por una roca de alta velocidad causando que en la imagen sísmica aparezca un bajo estructural. Las acumulaciones de hidrocarburos pueden generar push – Downs debido a que sus velocidades sísmicas son menores que las de las rocas.



Esquema del efecto Push-Down. Tomada de www.schlumbergeroilfieldGlossary.htm

Rastrojo: Área intervenida, trabajada y abandonada.
Record: En información sísmica este término se refiere a la energía detectada y medida por un receptor y generada por una fuente. Los registros de ruido (Noise record) se toman en ausencia de fuentes sísmicas (Source seismic).
Reverse fault: Es un tipo de falla formada cuando el hanging wall del bloque fallado se mueve hacia arriba a lo largo de la superficie de la falla con relación al football. Tales movimiento se pueden presentar donde la corteza terrestre se encuentra comprimida. Todas las fallas inversas son thrust fault y algunas veces cuando el desplazamiento es grande se llaman overthrust. En este tipo de fallas por lo general el ángulo de buzamiento es menor de 45°.
Ringy: Efecto de resonancia.
Source: Es el dispositivo ó fuente que produce energía para la adquisición de información sísmica tales como pistolas de aire, cargas explosivas ó vibradores.
Spike: Es una ondicula que se caracteriza por la síntesis in-fase de todas las frecuencias desde la frecuencia cero hasta la frecuencia Nyquist.
Spike noise: Tipo de ruido electrónico, producido por los equipo de registro debido a condiciones estáticas ambientales.



Ruido tipo spike.

Spread: Es el patrón geométrico de los grupos de geófonos con relación a las fuentes sísmicas. La salida a partir de una sola fuente se registra simultáneamente por el spread durante la adquisición.
Smiles: Formas semi-circulares en forma de sonrisas que aparecen en las secciones migradas y son el efecto de la migración de ruido tipo spike
Spiking: Es el proceso de comprimir la ondicula fuente efectiva contenida en una traza sísmica a un spike.
Stacking: Apilamiento.
Shear wave: Frente de ondas inelásticas en el cual las partículas oscilan perpendiculares a la dirección de propagación. Las ondas Shear son generadas por la mayoría de fuente sísmicas terrestres, pero no por las pistolas de aire.
Shot: Disparo, fuente.
Shotpoint: Punto de disparo, punto de tiro, punto fuente.
Shot record: Registro de un disparo.
Stacking chart: Carta de apilamiento.
Strike: Es el azimut de la intersección de un plano con una superficie horizontal.
Sub-Thrust fault: Es un tipo de falla inversa en la cual el plano de falla tiene un buzamiento no muy pronunciado típicamente menor a 45° el bloque superior "***hanging wall***" se desliza sobre la superficie de la falla, relativo al bloque yaciente ó "***foot wall***" En casos de considerable movimiento lateral, la falla se describe como una falla overthrust. Las fallas thrust ocurren en áreas de compresión bajo la corteza.
Top muting: Es el borrado de la parte más somera de una línea sísmica para prevenir la degradación de la información producto de la corrección del normal moveout.
Receiver: Receptor.
Trough: Valle de una ondicula sísmica.
Uphole time: Tiempo de pozo medido en el registro sísmico
Wavelet: Ondicula.
Wiener shaping Filter: Filtro moldeador de Wiener
Zero offset data: Información sísmica donde las fuentes y los receptores comparten una localización común.

ANEXOS

Qa	DEPOSITOS ALUVIALES
Qc	COLUVIONES
TQg	FORMACION GUACACALLO
Tps	FORMACION PEPINO SUPERIOR
Tpm	FORMACION PEPINO MEDIO
Tpi	FORMACION PEPINO INFERIOR
KTr	FORMACION RUMIYACO
Km	FORMACION MONSERRATE
Ko	GRUPO OLINI
Kv	GRUPO VILLETA
Kc	FORMACION CABALLOS
Jss	FORMACION SALDAÑA ESTRATIFICADA
Js	FORMACION SALDAÑA VOLCANICA
Jm	BATOLITO DE MOCOA
pEg	GRUPO GARZON

- RUMBO Y BUZAMIENTO DE CAPAS INCLINADAS
- RUMBO Y BUZAMIENTO DE CAPAS INVERTIDAS
- RUMBO Y BUZAMIENTO APARENTE O MEDIDO A DISTANCIA
- RUMBO Y BUZAMIENTO DE FOLIACION O BANDEAMIENTO DE ROCAS METAMORFICAS
- RUMBO Y BUZAMIENTO DE CLIVAJES
- RUMBO Y BUZAMIENTO DE FOLIACION O BANDEAMIENTO APARENTE O MEDIDOS A DISTANCIA
- RUMBO Y BUZAMIENTO DE CLIVAJES APARENTES O MEDIDOS A DISTANCIA
- RUMBO Y BUZAMIENTO DE DIACLASAS
- FALLA INVERSA O DE CABALGAMIENTO
- FALLA INVERSA O DE CABALGAMIENTO INFERIDA
- FALLA INVERSA O DE CABALGAMIENTO CUBIERTA
- FALLA DE RUMBO
- CONTACTO GEOLOGICO
- CONTACTO GEOLOGICO DISCORDANTE
- ESTRUCTURA ANTICLINAL
- ESTRUCTURA SINCLINAL
- ESTRUCTURA ANTICLINAL INVERTIDA
- ESTRUCTURA SINCLINAL INVERTIDA

ESCALA 1:50.000
0 2
KM

760.000 E
765.000 E
770.000 E
775.000 E
780.000 N
685.000 N
680.000 N
675.000 N
670.000 N
665.000 N
660.000 N
655.000 N
650.000 N
755.000 E
750.000 E
745.000 E
740.000 E
735.000 E
730.000 E

HSG99-1870
SG-2002-1840
HSG99-1800
Oso-1

N
W
E
S

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER U.I.S

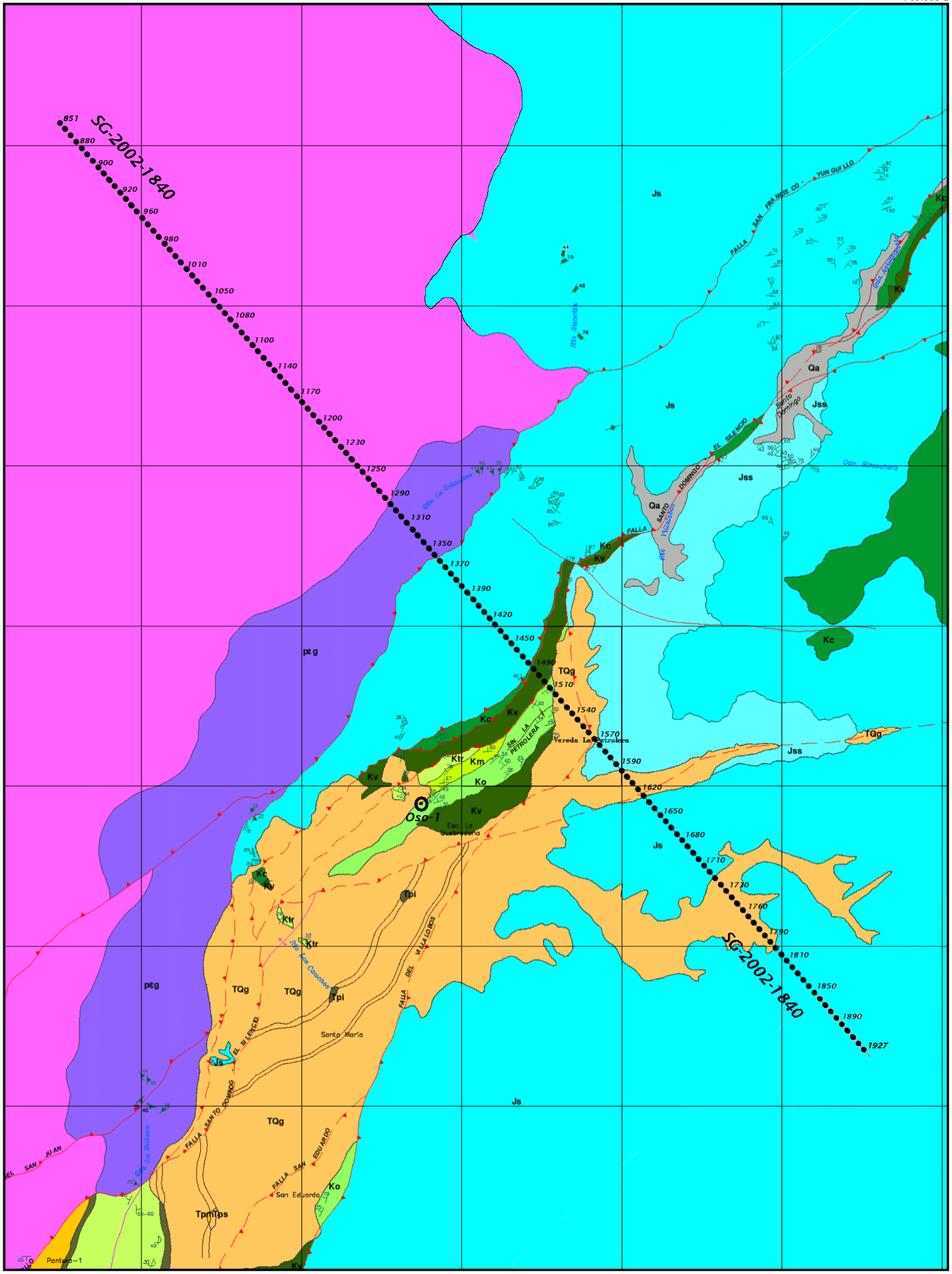
EMPRESA COLOMBIANA DE PETROLEOS ECOPETROL ICP

MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN DE SUBSUELO EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL, BLOQUE SAN GABRIEL

MAPA GEOLÓGICO

AUTORES L. MAYA D. TOVAR	F. COLMENARES L. SANTAMARIA	M. PARRA A. MORA	ESCALA 1:50.000
MODIFICO H.MEDINA	FECHA JULIO 2004		ANEXO A

BASE TOPOGRAFICA TOMADA DE ECOPETROL, 1999



Qa	DEPOSITOS ALUVIALES
Qc	COLUVIONES
TQg	FORMACION GUACACALLO
Tps	FORMACION PEPINO SUPERIOR
Tpm	FORMACION PEPINO MEDIO
TPi	FORMACION PEPINO INFERIOR
KTr	FORMACION RUMIYACO
KM	FORMACION MONSERRATE
KO	GRUPO OLINI
KV	GRUPO VILLETA
KC	FORMACION CABALLOS
Jss	FORMACION SALDAÑA ESTRATIFICADA
Js	FORMACION SALDAÑA VOLCANICA
Jm	BATOLITO DE MOCOA
pEg	GRUPO GARZON

- 15 RUMBO Y BUZAMIENTO DE CAPAS INCLINADAS
- 12 RUMBO Y BUZAMIENTO DE CAPAS INVERTIDAS
- 22 RUMBO Y BUZAMIENTO APARENTE O MEDIDO A DISTANCIA
- 40 RUMBO Y BUZAMIENTO DE FOLIACION O BANDEAMIENTO DE ROCAS METAMORFICAS
- 80 RUMBO Y BUZAMIENTO DE CLIVAJES
- 35 RUMBO Y BUZAMIENTO DE FOLIACION O BANDEAMIENTO APARENTE O MEDIDO A DISTANCIA
- 32 RUMBO Y BUZAMIENTO DE CLIVAJES APARENTES O MEDIDOS A DISTANCIA
- 67 RUMBO Y BUZAMIENTO DE DIACLASAS
- FALLA INVERSA O DE CABALGAMIENTO
- FALLA INVERSA O DE CABALGAMIENTO INFERIDA
- FALLA INVERSA O DE CABALGAMIENTO CUBIERTA
- FALLA DE RUMBO
- CONTACTO GEOLOGICO
- CONTACTO GEOLOGICO DISCORDANTE
- ESTRUCTURA ANTICLINAL
- ESTRUCTURA SINCLINAL
- ESTRUCTURA ANTICLINAL INVERTIDA
- ESTRUCTURA SINCLINAL INVERTIDA

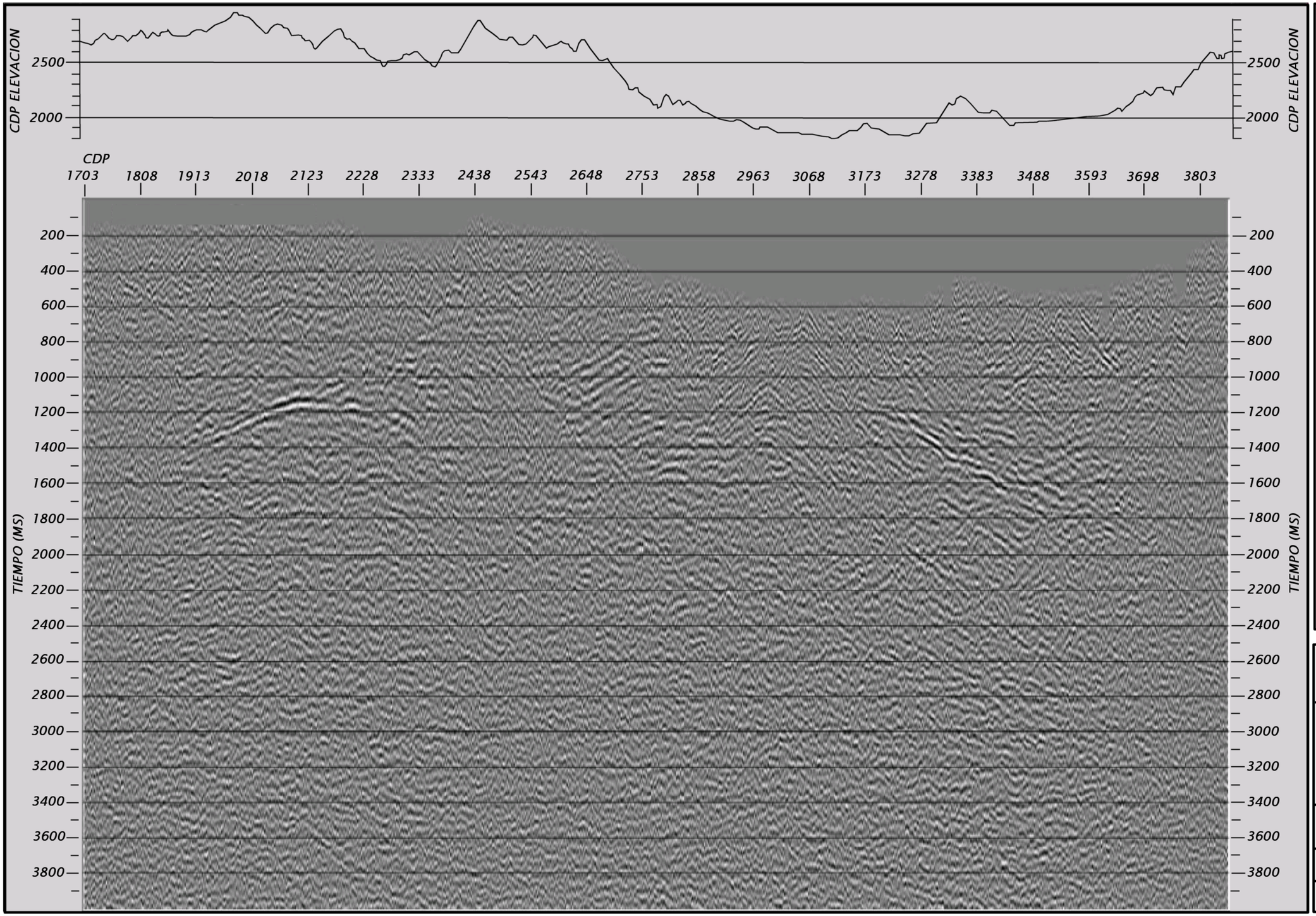
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER U.I.S
EMPRESA COLOMBIANA DE PETROLEOS ECOPETROL ICP

MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN DE SUBSUELO EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL, BLOQUE SAN GABRIEL

MAPA GEOLOGICO

AUTORES	L. MAYA F. COLMENARES M. PARRA D. TOBAR L. SANTAMARIA A. MORA	ESCALA 1:25000	ANEXO B
MODIFICO	H. MEDINA	FECHA JULIO DE 2004	

BASE TOPOGRAFICA TOMADA DE ECOPETROL, 1999



SECUENCIA DE PROCESAMIENTO

PROCESADO POR: HERACLIO MEDINA
JULIO DE 2004

1. Cambio de formato:

   SEG-D a formato PROMAX

2. Remuestreo :2 ms a 4 ms.

3. Control Automático de Ganancia AGC

   Tipo : Mean
   Longitud del Operador :500 ms

4. Eliminación de disparos anómalos

5. Asignación y chequeo de geometría

6. Edición de trazas ruidosas, muertas e invertidas

7. Pruebas de filtro y recuperación de la verdadera amplitud

   Filtro Pasa-Banda:

   Dominio : Frecuencia
   Valores de frecuencia : 10-20-30-40

   Recuperacion de amplitudes (TAR)

   Divergencia Esférica
   Atenuación Inelástica

8. Deconvolución:

   Tipo : Predictiva
   Longitud del operador : 160 ms
   Distancia de predicción : 24 ms
   Preblanqueamiento : 0.1%

9. Estáticas de Refracción

   Método : Matrices residuales decrecientes

10. Coreccion NMO y Apilado

11. Analisis de Veocidades 1

    Metodo : CVS

12. Correcciones estáticas Residuales

13. Analisis de Velocidades 2

    Método : CVS

14. Migracion en tiempo

    Método : Kirchhoff
    Apertura media : 800 Trazas

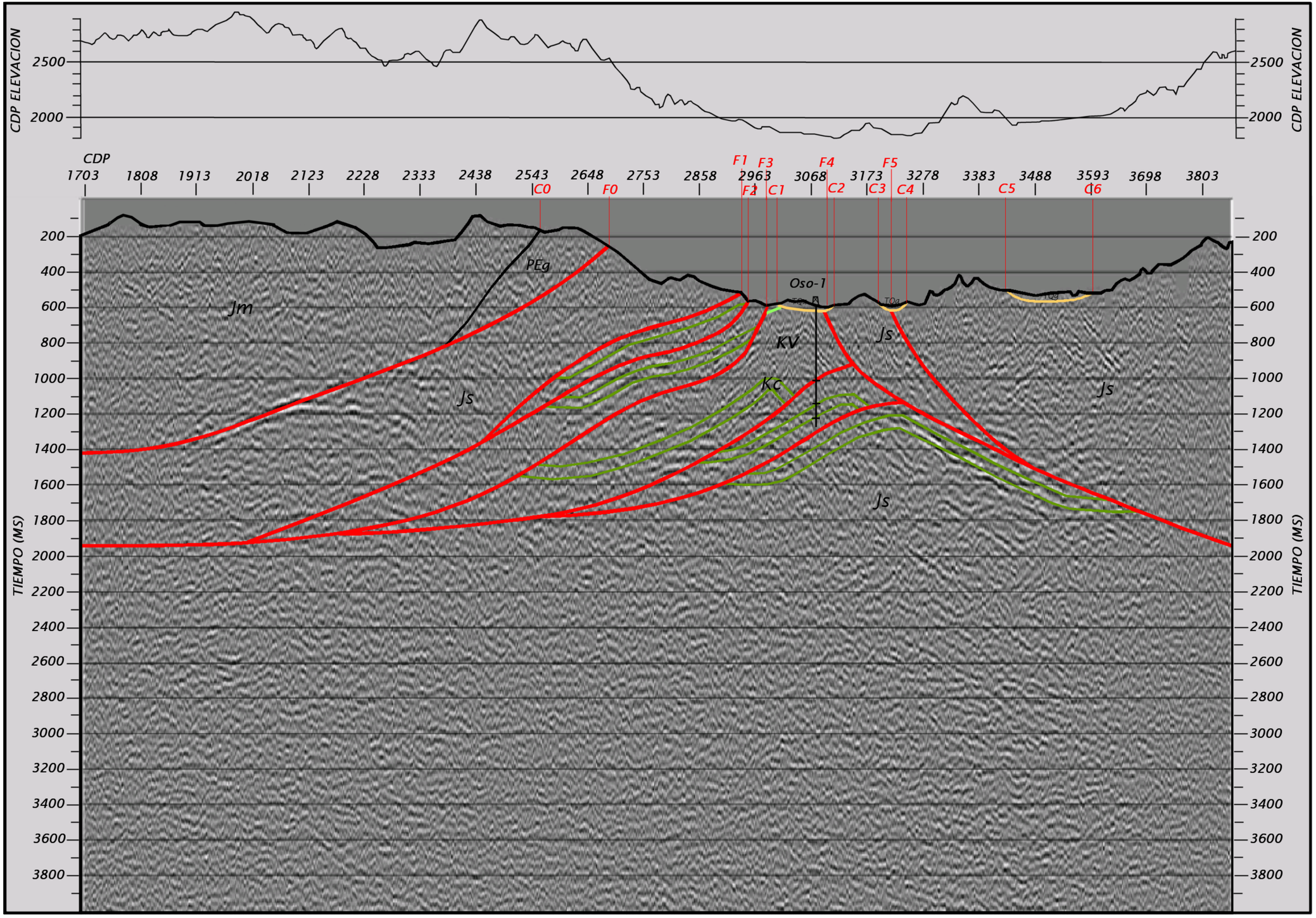
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER U.I.S

EMPRESA COLOMBIANA DE PETROLEOS ECOPETROL ICP

MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN DE SUBSUELO EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL, BLOQUE SAN GABRIEL

APILADO FINAL DE LA LINEA SG-2002-1840

AUTOR:	ESCALA:	ANEXO
HERACLIO MEDINA T.	1:25000	C
FECHA: JULIO DE 2004	BASE TOPOGRAFICA TOMADA DE ECOPETROL, 1999	



Qa DEPOSITOS ALUVIALES
Qc COLUVIONES
TQg FORMACION GUACACALLO
Tp FORMACION PEPINO
KTr FORMACION RUMIYACO
Km FORMACION MONSERRATE
Ko GRUPO OLINI
Kv FORMACION VILLETA
Kc FORMACION CABALLOS
Js FORMACION SALDAÑA
Jm BATOLITO DE MOCOA
PEg GRUPO GARZON

F0 = FALLA SAN FRANCISCO - YUNGUILLO
F1 = SHORT CUT
F2 = SHORT CUT
F3 = FALLA SANTO DOMINGO - EL SILENCIO
F4 = FALLA VILLALOBOS
C0 = CONTACTO JM-PEG
C1 = CONTACTO KO - TQG
C2 = CONTACTO TQG - JS
C3 = CONTACTO JS - TQG
C4 = CONTACTO TQG - JS
C5 = CONTACTO JS - TQG
C6 = CONTACTO TQG - JS

CORDENADAS DE LA LINEA

Estaca inicial
746.234 E
677.893 N

Estaca Final
758.894 E
663.234 N

N

ESCALA 1:25.000
0 2

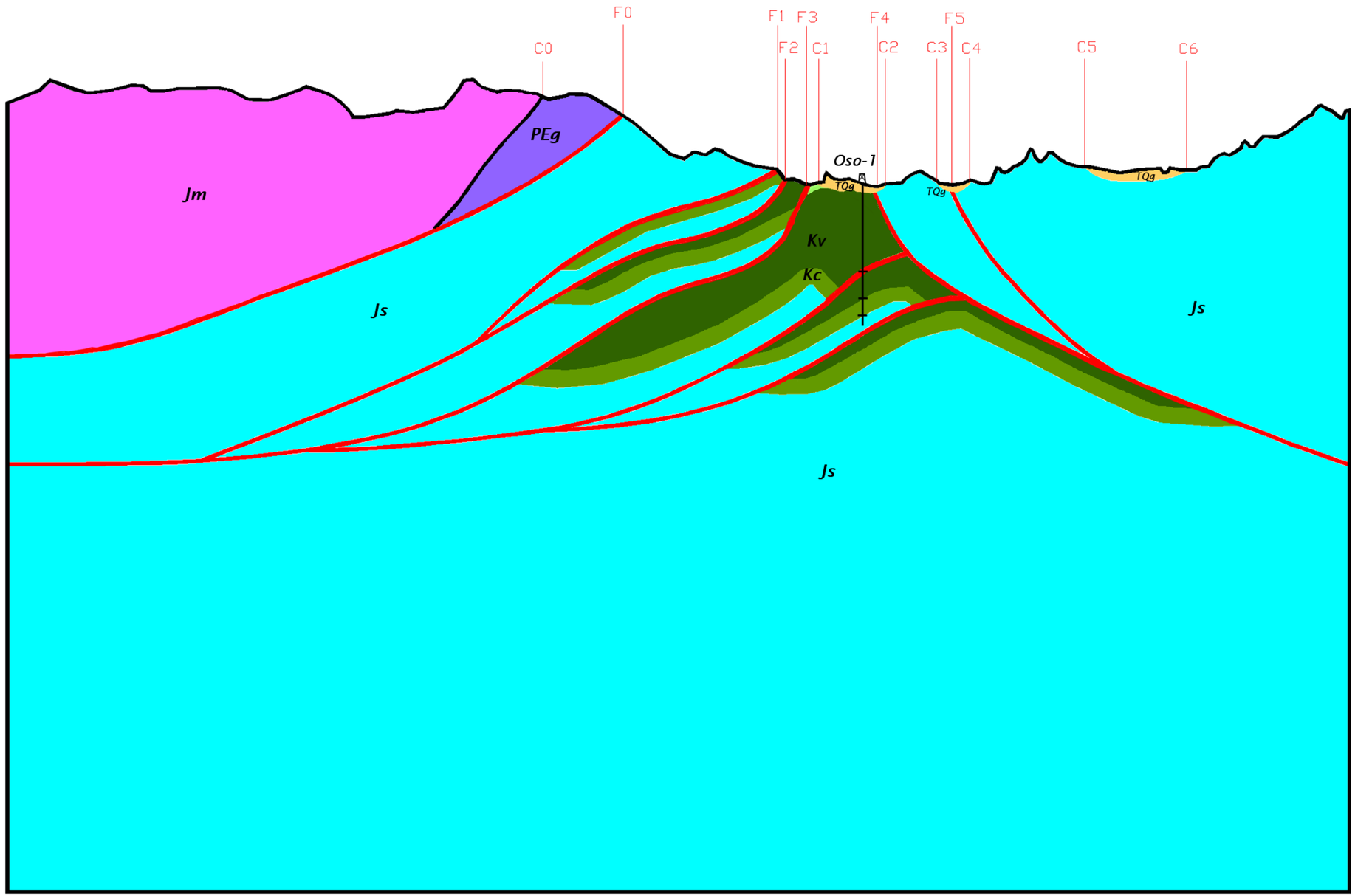
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER U.I.S

EMPRESA COLOMBIANA DE PETROLEOS ECOPETROL ICP

MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN DE SUBSUELO EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL, BLOQUE SAN GABRIEL

INTERPRETACIÓN SÍSMICA DE LA LINEA SG-2002-1840

AUTOR:	ESCALA:	ANEXO
HERACLIO MEDINA T.	1:25000	D
FECHA: JULIO DE 2004	BASE TOPOGRAFICA TOMADA DE ECOPETROL, 1999	



Qa DEPOSITOS ALUVIALES
Qc COLUVIONES
TQg FORMACION GUACACALLO
Tp FORMACION PEPINO
KTr FORMACION RUMIYACO
Km FORMACION MONSERRATE
Ko GRUPO OLINI
Kv FORMACION VILLETA
Kc FORMACION CABALLOS
Js FORMACION SALDAÑA
Jm BATOLITO DE MOCOA
PEg GRUPO GARZON

F0 = FALLA SAN FRANCISCO - YUNGUILLO
F1 = SHORT CUT
F2 = SHORT CUT
F3 = FALLA SANTO DOMINGO - EL SILENCIO
F4 = FALLA VILLALOBOS
C0 = CONTACTO JM-PEG
C1 = CONTACTO KO - TQG
C2 = CONTACTO TQG - JS
C3 = CONTACTO JS - TQG
C4 = CONTACTO TQG - JS
C5 = CONTACTO JS - TQG
C6 = CONTACTO TQG - JS

CORDENADAS DE LA LINEA

Estaca inicial
746.234 E
677.893 N

Estaca Final
758.894 E
663.234 N

N

ESCALA 1:25.000
0 2

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER U.I.S

ECOPETROL — IGP

MEJORAMIENTO DE LA IMAGEN DE SUBSUELO EN EL PIEDEMONTE OCCIDENTAL DE LA CORDILLERA ORIENTAL, BLOQUE SAN GABRIEL

SECCION GEOLOGICA DE LA LINEA SG-2002-1840

AUTOR:	ESCALA:	ANEXO
HERACLIO MEDINA T.	1:25000	E
FECHA: JULIO DE 2004	BASE TOPOGRAFICA TOMADA DE ECOPETROL, 1999	

SIN	SP	Formación	Calidad
1	852	Stock de Mocoa	Muy mala
2	854	Stock de Mocoa	Muy mala
3	860	Stock de Mocoa	Muy mala
4	862	Stock de Mocoa	Muy mala
5	866	Stock de Mocoa	Muy mala
6	870	Stock de Mocoa	Muy mala
7	874	Stock de Mocoa	Muy mala
8	878	Stock de Mocoa	Muy mala
9	882	Stock de Mocoa	Muy mala
10	886	Stock de Mocoa	Muy mala
11	888	Stock de Mocoa	Muy mala
12	894	Stock de Mocoa	Muy mala
13	898	Stock de Mocoa	Muy mala
14	902	Stock de Mocoa	Muy mala
15	906	Stock de Mocoa	Muy mala
16	910	Stock de Mocoa	Muy mala
17	914	Stock de Mocoa	Muy mala
18	918	Stock de Mocoa	Muy mala
19	924	Stock de Mocoa	Muy mala
20	926	Stock de Mocoa	Muy mala
21	928	Stock de Mocoa	Muy mala
22	930	Stock de Mocoa	Muy mala
23	932	Stock de Mocoa	Muy mala
24	934	Stock de Mocoa	Muy mala
25	942	Stock de Mocoa	Mala
26	950	Stock de Mocoa	Mala
27	954	Stock de Mocoa	Muy mala
28	957	Stock de Mocoa	Muy mala
29	961	Stock de Mocoa	Muy mala
30	972	Stock de Mocoa	Muy mala
31	974	Stock de Mocoa	Muy mala
32	976	Stock de Mocoa	Muy mala
33	978	Stock de Mocoa	Muy mala
34	982	Stock de Mocoa	Muy mala
35	986	Stock de Mocoa	Muy mala
36	990	Stock de Mocoa	Muy mala
37	994	Stock de Mocoa	Muy mala
38	998	Stock de Mocoa	Muy mala
39	1001	Stock de Mocoa	Muy mala
40	1006	Stock de Mocoa	Muy mala
41	1010	Stock de Mocoa	Muy mala
42	1014	Stock de Mocoa	Muy mala
43	1018	Stock de Mocoa	Muy mala
44	1026	Stock de Mocoa	Mala
45	1028	Stock de Mocoa	Muy mala
46	1030	Stock de Mocoa	Muy mala
47	1031	Stock de Mocoa	Muy mala
48	1034	Stock de Mocoa	Muy mala
49	1038	Stock de Mocoa	Muy mala
50	1042	Stock de Mocoa	Muy mala

SIN	SP	Formación	Calidad
51	1044	Stock de Mocoa	Muy mala
52	1050	Stock de Mocoa	Muy mala
53	1052	Stock de Mocoa	Muy mala
54	1054	Stock de Mocoa	Muy mala
55	1056	Stock de Mocoa	Muy mala
56	1064	Stock de Mocoa	Muy mala
57	1066	Stock de Mocoa	Muy mala
58	1074	Stock de Mocoa	Muy mala
59	1080	Stock de Mocoa	Muy mala
60	1082	Stock de Mocoa	Muy mala
61	1086	Stock de Mocoa	Muy mala
62	1088	Stock de Mocoa	Muy mala
63	1090	Stock de Mocoa	Muy mala
64	1092	Stock de Mocoa	Muy mala
65	1094	Stock de Mocoa	Muy mala
66	1106	Stock de Mocoa	Muy mala
67	1108	Stock de Mocoa	Muy mala
68	1112	Stock de Mocoa	Muy mala
69	1114	Stock de Mocoa	Muy mala
70	1116	Stock de Mocoa	Muy mala
71	1118	Stock de Mocoa	Muy mala
72	1120	Stock de Mocoa	Muy mala
73	1136	Stock de Mocoa	Muy mala
74	1138	Stock de Mocoa	Muy mala
75	1140	Stock de Mocoa	Muy mala
76	1146	Stock de Mocoa	Muy mala
77	1152	Stock de Mocoa	Muy mala
78	1154	Stock de Mocoa	Muy mala
79	1160	Stock de Mocoa	Muy mala
80	1162	Stock de Mocoa	Muy mala
81	1166	Stock de Mocoa	Muy mala
82	1170	Stock de Mocoa	Muy mala
83	1174	Stock de Mocoa	Muy mala
84	1178	Stock de Mocoa	Muy mala
85	1186	Stock de Mocoa	Muy mala
86	1190	Stock de Mocoa	Muy mala
87	1192	Stock de Mocoa	Muy mala
88	1194	Stock de Mocoa	Muy mala
89	1196	Stock de Mocoa	Muy mala
90	1198	Stock de Mocoa	Muy mala
91	1200	Stock de Mocoa	Muy mala
92	1204	Stock de Mocoa	Muy mala
93	1214	Stock de Mocoa	Muy mala
94	1216	Stock de Mocoa	Muy mala
95	1223	Stock de Mocoa	Muy mala
96	1226	Stock de Mocoa	Muy mala
97	1230	Stock de Mocoa	Muy mala
98	1234	Stock de Mocoa	Muy mala
99	1238	Stock de Mocoa	Muy mala
100	1242	Stock de Mocoa	Muy mala

SIN	SP	Formación	Calidad
101	1246	Stock de Mocoa	Muy mala
102	1250	Stock de Mocoa	Muy mala
103	1252	Stock de Mocoa	Muy mala
104	1254	Stock de Mocoa	Muy mala
105	1256	Stock de Mocoa	Muy mala
106	1268	Stock de Mocoa	Muy mala
107	1270	Stock de Mocoa	Muy mala
108	1274	Maciso de Garzon	Muy mala
109	1278	Maciso de Garzon	Muy mala
110	1282	Maciso de Garzon	Muy mala
111	1284	Maciso de Garzon	Muy mala
112	1290	Maciso de Garzon	Muy mala
113	1296	Maciso de Garzon	Muy mala
114	1298	Maciso de Garzon	Muy mala
115	1302	Maciso de Garzon	Muy mala
116	1306	Maciso de Garzon	Muy mala
117	1308	Maciso de Garzon	Muy mala
118	1310	Maciso de Garzon	Muy mala
119	1318	Maciso de Garzon	Muy mala
120	1322	Maciso de Garzon	Muy mala
121	1326	Maciso de Garzon	Muy mala
122	1330	Maciso de Garzon	Muy mala
123	1334	Maciso de Garzon	Muy mala
124	1340	Maciso de Garzon	Muy mala
125	1342	Maciso de Garzon	Muy mala
126	1346	Maciso de Garzon	Muy mala
127	1350	Maciso de Garzon	Muy mala
128	1354	Saldaña	Muy mala
129	1356	Saldaña	Muy mala
130	1358	Saldaña	Muy mala
131	1362	Saldaña	Muy mala
132	1370	Saldaña	Muy mala
133	1372	Saldaña	Muy mala
134	1374	Saldaña	Muy mala
135	1378	Saldaña	Muy mala
136	1380	Saldaña	Muy mala
137	1381	Saldaña	Muy mala
138	1382	Saldaña	Muy mala
139	1400	Saldaña	Muy mala
140	1402	Saldaña	Eliminado
141	1406	Saldaña	Muy mala
142	1410	Saldaña	Muy mala
143	1414	Saldaña	Muy mala
144	1418	Saldaña	Muy mala
145	1422	Saldaña	Muy mala
146	1426	Saldaña	Muy mala
147	1432	Saldaña	Muy mala
148	1438	Saldaña	Muy mala
149	1441	Saldaña	Mala
150	1442	Saldaña	Mala

SIN	SP	Formación	Calidad
151	1450	Saldaña	Muy mala
152	1451	Saldaña	Muy mala
153	1454	Saldaña	Muy mala
154	1462	Saldaña	Muy mala
155	1464	Saldaña	Muy mala
156	1466	Saldaña	Muy mala
157	1468	Saldaña	Muy mala
158	1469	Saldaña	Muy mala
159	1470	Caballos	Mala
160	1471	Caballos	Mala
161	1488	Caballos	Regular
162	1490	Villeta	Regular
163	1492	Villeta	Regular
164	1494	Villeta	Regular
165	1504	Villeta	Regular
166	1506	Monserrate	Regular
167	1510	Monserrate	Regular
168	1514	Monserrate	Regular
169	1518	Monserrate	Regular
170	1522	Monserrate	Regular
171	1526	Pepino	Regular
172	1530	Pepino	Bueno
173	1534	Pepino	Bueno
174	1538	Pepino	Regular
175	1542	Pepino	Regular
176	1544	Pepino	Regular
177	1546	Pepino	Regular
178	1548	Pepino	Mala
179	1550	Saldaña	Mala
180	1564	Saldaña	Muy mala
181	1566	Saldaña	Muy mala
182	1570	Saldaña	Mala
183	1574	Saldaña	Regular
184	1576	Saldaña	Regular
185	1586	Saldaña	Muy mala
186	1588	Saldaña	Muy mala
187	1590	Saldaña	Muy mala
188	1594	Saldaña	Muy mala
189	1598	Saldaña	Muy mala
190	1602	Saldaña	Muy mala
191	1608	Pepino	Regular
192	1610	Pepino	Regular
193	1614	Pepino	Regular
194	1618	Pepino	Regular
195	1620	Pepino	Regular
196	1622	Pepino	Regular
197	1632	Saldaña	Muy mala
198	1636	Saldaña	Mala
199	1638	Saldaña	Mala
200	1644	Saldaña	Muy mala

SIN	SP	Formación	Calidad
201	1646	Saldaña	Muy mala
202	1648	Saldaña	Muy mala
203	1650	Saldaña	Muy mala
204	1651	Saldaña	Muy mala
205	1652	Saldaña	Muy mala
206	1654	Saldaña	Muy mala
207	1674	Saldaña	Muy mala
208	1676	Saldaña	Muy mala
209	1678	Saldaña	Muy mala
210	1682	Saldaña	Muy mala
211	1684	Saldaña	Muy mala
212	1686	Saldaña	Muy mala
213	1690	Saldaña	Mala
214	1694	Saldaña	Muy mala
215	1698	Saldaña	Mala
216	1702	Saldaña	Mala
217	1706	Saldaña	Mala
218	1710	Saldaña	Muy mala
219	1714	Saldaña	Muy mala
220	1718	Saldaña	Mala
221	1719	Pepino	Regular
222	1726	Pepino	Regular
223	1732	Pepino	Regular
224	1734	Pepino	Regular
225	1735	Pepino	Regular
226	1742	Pepino	Regular
227	1746	Pepino	Regular
228	1750	Pepino	Regular
229	1754	Pepino	Regular
230	1758	Pepino	Regular
231	1762	Pepino	Regular
232	1766	Pepino	Regular
233	1770	Pepino	Regular
234	1774	Pepino	Regular
235	1776	Pepino	Regular
236	1784	Pepino	Mala
237	1786	Pepino	Muy mala
238	1794	Pepino	Regular
239	1796	Pepino	Regular
240	1798	Pepino	Regular
241	1800	Pepino	Regular
242	1802	Pepino	Regular
243	1804	Pepino	Mala
244	1820	Saldaña	Muy mala
245	1824	Saldaña	Muy mala
246	1826	Saldaña	Muy mala
247	1832	Saldaña	Muy mala
248	1834	Saldaña	Muy mala
249	1836	Saldaña	Muy mala
250	1838	Saldaña	Muy mala

SIN	SP	Formación	Calidad
251	1842	Saldaña	Muy mala
252	1846	Saldaña	Muy mala
253	1850	Saldaña	Muy mala
254	1852	Saldaña	Muy mala
255	1862	Saldaña	Muy mala
256	1863	Saldaña	Muy mala
257	1864	Saldaña	Muy mala
258	1866	Saldaña	Muy mala
259	1871	Saldaña	Muy mala
260	1872	Saldaña	Muy mala
261	1894	Saldaña	Muy mala
262	1898	Saldaña	Muy mala
263	1902	Saldaña	Muy mala
264	1904	Saldaña	Muy mala
265	1906	Saldaña	Muy mala
266	1908	Saldaña	Muy mala
267	1910	Saldaña	Muy mala
268	1912	Saldaña	Muy mala
269	1914	Saldaña	Muy mala
270	1915	Saldaña	Muy mala
271	1920	Saldaña	Muy mala
272	1928	Saldaña	Muy mala