

**APLICACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE LA REFRACCIÓN
SÍSMICA EN LA OBTENCIÓN DE MODELOS DEL ESTRATO SOMERO EN EL
ÁREA DEL CATATUMBO Y SU EFECTO EN LA IMAGEN SÍSMICA.**

DANY RUEDA SERRANO

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

2009

**APLICACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE LA REFRACCIÓN
SÍSMICA EN LA OBTENCIÓN DE MODELOS DEL ESTRATO SOMERO EN EL
ÁREA DEL CATATUMBO Y SU EFECTO EN LA IMAGEN SÍSMICA”.**

DANY RUEDA SERRANO

Proyecto de grado para optar al título de Geólogo

Director

Ph.D. GERMAN YURI OJEDA

Codirectores

Ph.D. WILLIAM MAURICIO AGUDELO

Ms.C. SAUL GUEVARA OCHOA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS

ESCUELA DE GEOLOGÍA

BUCARAMANGA

2009

A Dios por darme vida, sabiduría y fortaleza para afrontar los momentos difíciles de mi carrera.

A mi madre que por su apoyo, ayuda y sacrificio incondicional puede lograr este sueño.

A mi padre por darme un ejemplo responsable y honesto para ser una mejor persona.

A mi hermano por su amistad, compañía y batalla en los momentos difíciles.

A mi tío Arquímedes que en paz descansa por su amistad y colaboración.

PAGINA DE AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a:

A WILLIAM M. AGUDELO, SAUL GUEVARA, GERMAN Y. OJEDA y YAQUELINE FIGUEREDO por su valioso aporte en mi formación como profesional.

A mis compañeras NATALIA GARCIA y ALEXANDRA PLATA que de una u otra forma contribuyeron para la elaboración de esta tesis.

A CARLOS C. PIEDRAHITA ESCOBAR, ALFREDO TADA y ANDRES CALLE por su colaboración en el ICP.

A JOSE FERNANDO GAMBOA y JORGE MONSEGNY por aceptar la evaluación de mi tesis.

A la Universidad Industrial de Santander, a todos mis profesores que me brindaron su conocimiento para mi formación como geólogo y a mis compañeros de clase por hacer agradable las salidas.

Al Instituto Colombiano del Petróleo por abrirme sus puertas.

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|--|----|
| LISTA DE ANEXOS | 14 |
| RESUMEN | 15 |
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| OBJETIVOS | 4 |
| 1. GENERALIDADES..... | 5 |
| 1.1. LOCALIZACIÓN GEOGRaFICA | 5 |
| 1.2. METODOLOGÍA | 6 |
| 1.2.1. Estrategia de seguimiento..... | 6 |
| 1.2.2. Recolección de la información..... | 6 |
| 1.2.3. Análisis de la información recopilada..... | 6 |
| 1.2.4. Caracterización del estrato somero..... | 6 |
| 1.2.5. Aprendizaje de los métodos de refracción utilizados en el trabajo de investigación..... | 7 |
| 1.2.6. Aprendizaje de los Software utilizados en el trabajo de investigación..... | 7 |
| 1.2.7. Programación de los algoritmos para modelar capas de baja velocidad..... | 7 |
| 1.2.8. Procesamiento de los datos sísmicos realizado en PROMAX..... | 8 |
| 1.2.9. Interpretación sísmica..... | 10 |
| 1.2.10. Entrega de resultados..... | 10 |
| 2. MEDICIÓN UPHOLE O MINI VSP..... | 11 |
| 2.1. ANTECEDENTES | 12 |
| 2.2. VENTAJAS..... | 14 |
| 2.3 MÉTODOS DE ADQUISICIÓN DE LOS DATOS..... | 16 |
| 2.4 INTERVALO DE MUESTREO..... | 17 |
| 2.5 INTERPRETACIÓN | 18 |
| 2.6 INTERPRETACIÓN Y CORRELACIÓN LITOLÓGICA CON EL MODELO DE VELOCIDADES UPHOLE..... | 18 |
| 3. MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE REFRACCIÓN SÍSMICA | 22 |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DE LA LÍNEA SÍSMICA..... | 24 |
| 3.2 PRIMEROS ARRIBOS | 24 |
| 3.3 MÉTODO RECÍPROCO GENERALIZADO (GRM)..... | 27 |
| 3.4 MÉTODO DE SUAVIZADO ESTÁTICO (GRM SSM)..... | 32 |
| 3.5 MÉTODO PLUS-MINUS..... | 33 |
| 3.6 DELAY TIME..... | 35 |
| 3.7 DIMINISHING RESIDUAL MATRICES (DRM)..... | 36 |
| 4. RESULTADOS métodos de refracción:..... | 38 |
| Modelo del estrato somero..... | 38 |
| 4.1 MÉTODO RECÍPROCO GENERALIZADO (GRM)..... | 38 |
| 4.1.1 Estaciones 1602 hasta 1701..... | 38 |
| 4.1.2 Estaciones 1701 hasta 1797..... | 41 |
| 4.1.3 Estaciones 1797 hasta 1896..... | 44 |

| | |
|--|-----|
| 4.2 MÉTODO DE SUAVIZADO ESTÁTICO (GRM SSM)..... | 47 |
| 4.2.1 Estaciones 1602 hasta 1701..... | 47 |
| 4.2.2 Estaciones 1701 hasta 1797..... | 50 |
| 4.2.3 Estaciones 1797 hasta 1896..... | 54 |
| 4.3 MÉTODO PLUS-MINUS..... | 58 |
| 4.3.1 Estaciones 1602 hasta 1701..... | 58 |
| 4.3.2 Estaciones 1701 hasta 1797..... | 60 |
| 4.3.3 Estaciones 1797 hasta 1896..... | 62 |
| 4.4 MÉTODOS DRM, STD Y GRM CONTENIDOS EN PROMAX..... | 64 |
| 5. ESTÁTICAS DE REFRACCIÓN..... | 66 |
| 5.1 MÉTODO RECÍPROCO GENERALIZADO (GRM)..... | 70 |
| 5.1.1 Estaciones 1602 hasta 1896..... | 70 |
| 5.2 MÉTODO DE SUAVIZADO ESTÁTICO (GRM SSM)..... | 72 |
| 5.2.1 Estaciones 1602 hasta 1896..... | 72 |
| 5.3 MÉTODO PLUS-MINUS..... | 73 |
| 5.3.1 Estaciones 1602 hasta 1896..... | 73 |
| 5.4 MÉTODOS DRM, STD Y GRM CONTENIDOS EN PROMAX..... | 76 |
| 6. APLICACION DE LAS CORRECCIONES ESTÁTICAS, IMÁGENES APILADAS, MIGRACIÓN Y SU INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL | 78 |
| 6.1 APLICACIÓN DE LAS CORRECCIONES ESTÁTICAS..... | 78 |
| 6.1.1 Estáticas de elevación | 78 |
| 6.1.2 Método Disminución de Matrices Residuales (DRM)..... | 79 |
| 6.1.3 Método Delay Time (DLT) | 80 |
| 6.1.5 Plus-Minus..... | 83 |
| 6.1.6 Método de Suavizado Estático (GRM SSM)..... | 84 |
| 6.2 APLICACIÓN DE ESTÁTICAS RESIDUALES | 85 |
| 6.3 MIGRACIÓN EN TIEMPO POST-APILADO | 86 |
| 6.4 INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA ESTRUCTURAL | 87 |
| 7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS | 89 |
| 8. CONCLUSIONES..... | 92 |
| BIBLIOGRAFÍA | 95 |
| ANEXOS | 102 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Tiempos de primeros arribos del uphole 3..... | 18 |
|--|----|

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Porción de una sección apilada (a) sin, y (b) con corrección de estáticas que minimizan el efecto del estrato somero. Yilmaz, O. (2001) | 3 |
| Figura 2. Cuenca Catatumbo (03), localización y límites. B.S.M.F. Bucaramanga-Santa Marta Fault System..... | 5 |
| Figura 3. Grafica de un estudio uphole con los receptores en la superficie: (a) litología; (b) disposición en campo con un receptor y 20 fuentes identificadas; (c) grafica tiempo-profundidad; (d) grafica de velocidad intervalo. | 11 |
| Figura 4. Diagrama esquemático de la disposición en campo en un estudio uphole con la fuente en la superficie y receptores en el pozo..... | 17 |
| Figura 5. Graficas de tiempo-profundidad, tiempo-velocidad y tiempo-aceleración para los datos de la TABLA 1, siguiendo el método de aceleración MA. | 20 |
| Figura 6. Interpretación de los datos del uphole 3 representando cuatro capas geológicas y su correspondiente perfil litológico. | 20 |
| Figura 7. Refracción de ondas planas a través de una interfase horizontal ($V_2 = 2V_1$). Variables: q_1 es el ángulo incidente y q_2 es el ángulo refractado, Δt es la separación del frente de onda. | 23 |
| Figura 8. Sección derecha del <i>shot gather</i> 151. | 26 |
| Figura 9. Sección izquierda del <i>shot gather</i> 176. | 27 |
| Figura 10. Modelo con la superficie horizontal y un refractor altamente irregular. | 29 |
| Figura 11. Modelo representativo de la trayectoria de los rayos refractados desde la fuente ubicada en A, hasta el receptor Y y desde la fuente ubicada en B, hasta el receptor X. Se observa como los rayos emergen desde el punto G'..... | 29 |
| Figura 12. Se puede apreciar que el valor optimo corresponde a una separación $XY = 20$ m. | 30 |
| Figura 13. Se observa que el valor optimo que mejor define la geometría del refractor corresponde a una separación $XY=20$ m..... | 30 |
| Figura 14. Perfil del refractor calculado de la grafica tiempo Vs profundidad usando una separación $XY = 20$ m. | 32 |
| Figura 15. La separación final, es el promedio de los tiempos-profundidad calculados con un rango de valores XY de 0 a 30 m. | 33 |
| Figura 16. En la grafica, se puede ver la migración lateral de tres irregularidades cercanas a la superficie, señaladas por líneas que se cruzan entre sí y como estas irregularidades desaparecen con el promedio de los tiempos-profundidad, calculados con un rango de valores XY de 0 a 10 m. | 33 |
| Figura 17. Trayectoria de rayos para un perfil de refracción inverso ilustrando el método Plus Minus..... | 34 |
| Figura 18. Ilustración del método Plus-Minus..... | 35 |
| Figura 19. Ilustrando el método Delay Time. Tomado de Sheriff 1995..... | 36 |
| Figura 20. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1602 a 1701..... | 39 |

| | |
|---|----|
| Figura 21. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 90 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos correspondientes a la Figura anterior. El valor optimo es XY=0 m..... | 39 |
| Figura 22. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 90 m, derivados de los datos de velocidad correspondientes a la figura anterior..... | 40 |
| Figura 23. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM..... | 41 |
| Figura 24. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1701 a 1797..... | 41 |
| Figura 25. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 105 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos correspondientes a la figura anterior..... | 42 |
| Figura 26. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m a 90 m, derivados de los datos de velocidad correspondientes a la figura anterior..... | 43 |
| Figura 27. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM..... | 43 |
| Figura 28. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1797 a 1896..... | 44 |
| Figura 29. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m a 105 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos propios de la figura anterior..... | 45 |
| Figura 30. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 90 m..... | 46 |
| Figura 31. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM..... | 46 |
| Figura 32. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m a 90 m. La última curva corresponde al valor promedio de las separaciones XY..... | 47 |
| Figura 33. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1602 a 1701 aplicando el método GRM SSM..... | 48 |
| Figura 34. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m a 105 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos propios de la figura anterior. El valor optimo es XY=15 m..... | 48 |
| Figura 35. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m a 90 m, derivados de los datos de tiempo-velocidad anteriores..... | 49 |
| Figura 36. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM SSM..... | 50 |
| Figura 37. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 30 m. El valor optimo es XY=promedio..... | 51 |
| Figura 38. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 60 m, derivados de los datos de tiempo-velocidad. La última curva corresponde al valor promedio de las separaciones XY..... | 51 |
| Figura 39. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1701 a 1797 aplicando el método GRM SSM..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 40. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 105 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos. El valor optimo es XY=15 m..... | 52 |
| Figura 41. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 90 m, derivados de los datos de tiempo-velocidad. | 53 |
| Figura 42. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM SSM. | 54 |
| Figura 43. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 60 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos. El valor optimo es XY=promedio... .. | 55 |
| Figura 44. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 90 m, derivados de los datos de tiempo-velocidad. La última curva corresponde al valor promedio de las separaciones XY. | 55 |
| Figura 45. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1797 a 1896 aplicando el método GRM SSM..... | 56 |
| Figura 46. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 105 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos. El valor optimo es XY=15 m..... | 56 |
| Figura 47. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 90 m, derivados de los datos de tiempo-velocidad. | 57 |
| Figura 48. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM SSM. | 58 |
| Figura 49. Análisis de tiempo MINUS, para calcular la velocidad del refractor. .. | 59 |
| Figura 50. Análisis de tiempo PLUS, utilizados para calcular la profundidad del refractor..... | 59 |
| Figura 51. Modelo del estrato somero obtenido por el método PLUS-MINUS. ... | 60 |
| Figura 52. Análisis de tiempo MINUS, para calcular la velocidad del refractor. . | 61 |
| Figura 53. Análisis de tiempo PLUS, utilizados para calcular la profundidad del refractor..... | 61 |
| Figura 54. Modelo del estrato somero obtenido por el método PLUS-MINUS. ... | 62 |
| Figura 55. Análisis de tiempo MINUS, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos, para calcular la velocidad del refractor..... | 63 |
| Figura 56. Análisis de tiempo PLUS, utilizados para calcular la profundidad del refractor..... | 63 |
| Figura 57. Modelo del estrato somero obtenido por el método PLUS-MINUS. ... | 64 |
| Figura 58. Velocidad del refractor. (Abajo) Velocidad del refractor situado entre las estaciones 1600 a 1900, correspondiente al área de estudio..... | 65 |
| Figura 59. Topografía y profundidad del refractor. (Abajo) Profundidad del refractor localizado en el área de estudio entre las estaciones 1600 a 1900..... | 65 |
| Figura 60. Calculo de corrección de estáticas referentes a un <i>datum</i> con la fuente o los receptores en superficie. Variables: Z_A es el espesor de la capa meteorizada en A, V_w es la velocidad de meteorización, E_A es la elevación de la fuente o receptor en A, E_d es la elevación del <i>datum</i> , y V_r es la velocidad de reemplazamiento..... | 67 |
| Figura 61. Calculo de estáticas referentes a un <i>datum</i> con la fuente o receptor entre la capa meteorizada. Variables como en la Figura anterior. | 69 |

| | |
|--|-----|
| Figura 62. Perfil de corrección total de estáticas para los receptores llevadas a un <i>datum</i> cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método GRM en las estaciones 1602 a 1896..... | 71 |
| Figura 63. Perfil de corrección total de estáticas para las fuentes llevadas a un <i>datum</i> cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método GRM en las estaciones 1602 a 1896..... | 71 |
| Figura 64. Perfil de corrección total de estáticas para los receptores llevadas a un <i>datum</i> cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método GRM SSM en las estaciones 1602 a 1896..... | 72 |
| Figura 65. Perfil de corrección total de estáticas para las fuentes llevadas a un <i>datum</i> cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método GRM SSM en las estaciones 1602 a 1896..... | 73 |
| Figura 66. Perfil de corrección total de estáticas para los receptores llevadas a un <i>datum</i> cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método Plus Minus en las estaciones 1602 a 1896..... | 74 |
| Figura 67. Perfil de corrección total de estáticas para las fuentes llevadas a un <i>datum</i> cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método Plus Minus en las estaciones 1602 a 1896..... | 75 |
| Figura 68. Corrección de estáticas asociada a receptores, obtenidas por los métodos DRM, STD Y GRM contenidos en el software, entre las estaciones 1600 a 1900 (Abajo)..... | 76 |
| Figura 69. Corrección de estáticas relacionada a las fuentes, obtenidas por el software con los métodos DRM, STD Y GRM, entre las estaciones 1600 a 1900 (Abajo)..... | 77 |
| Figura 70. Sección sísmica apilada sin corrección del efecto del estrato somero. | 79 |
| Figura 71. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas) por el método DRM. | 80 |
| Figura 72. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas) por el método <i>Delay Time</i> DLT..... | 81 |
| Figura 73. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas).. | 82 |
| Figura 74. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas) por el método GRM programado en Matlab. | 83 |
| Figura 75. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas) por el método <i>Plus-Minus</i> | 84 |
| Figura 76. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas) por el método <i>GRM SSM</i> | 85 |
| Figura 77. Aplicación de estáticas residuales al modelo de estáticas de GRM de la (Figura 72)..... | 86 |
| Figura 78. Sección migrada con el método <i>Kirchhoff</i> | 87 |
| Figura 79. Sección sísmica interpretada estructuralmente en la que se aprecia la falla Tasajero y asociada a ella un pliegue de tipo <i>Synclinal fault-bend fold</i> | 88 |
| Figura 80. Columna estratigráfica generalizada del Bloque Uribante (sin escala). | 104 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|--|-----|
| ANEXO A. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL..... | 102 |
| ANEXO B. SEUDOCODIGOS EN MATLAB CORRESPONDIENTES AL MÉTODO GRM..... | 118 |
| ANEXO C. SEUDOCODIGOS EN MATLAB CORRESPONDIENTES AL MÉTODO GRM SSM..... | 121 |
| ANEXO D. SEUDOCODIGOS EN MATLAB CORRESPONDIENTES AL MÉTODO PLUS-MINUS..... | 125 |

RESUMEN

Titulo: APLICACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE LA REFRACCIÓN SÍSMICA EN LA OBTENCIÓN DE MODELOS DEL ESTRATO SOMERO EN EL ÁREA DEL CATATUMBO Y SU EFECTO EN LA IMAGEN SÍSMICA¹

Autor: Dany Rueda Serrano²

Palabras Claves: Estrato somero, estáticas, GRM, GRM-SSM, plus minus, DLT, DRM y refracción sísmica

La variabilidad y los bajos valores de velocidad del estrato somero tienen un gran efecto en los tiempos de propagación sísmicos. Corregir el efecto causado por el estrato somero permite una mejor imagen, mejorando la respuesta de apilamiento.

Este efecto es muy grande y muy difícil de mitigar en áreas montañosas de Colombia, debido a la variación topográfica y a los espesores de la capa meteorizada. El estudio de las propiedades geológicas del estrato somero y el registro directo de los tiempos de propagación en *downholes* pueden ayudar a evaluar y calibrar el estrato somero y las velocidades de apilamiento.

Un pozo de 60 m. de profundidad fue muestreado y equipado con receptores a fin de mejorar la adquisición *downhole* sobre una exploración sísmica en la cuenca Catatumbo (NE Colombia) una región con complejidades topográficas y estructurales. Las características geológicas del estrato somero fueron determinadas por análisis macroscópico y de laboratorio mostrando óxidos relacionados a la meteorización química. Estos resultados fueron correlacionados con velocidades derivadas de los tiempos de propagación medidos en el *downhole*.

Cinco métodos diferentes para la estimación de el espesor y velocidad del estrato somero fueron evaluados: Disminución de Matrices Residuales (DRM), Delay Time (DLT), Plus-Minus, Método Recíproco Generalizado (GRM), y Método de Suavizado Estático GRM (GRM SSM) todos usan tiempos de llegada por refracción. Los resultados *Downhole* fueron usados para verificar estos modelos. Basados en la imagen de apilamiento, los mejores resultados fueron obtenidos con el método GRM.

La corrección del efecto del estrato somero mejora la respuesta de los reflectores apilados generando más continuidad, reduciendo *cycle skips* en zonas de falla y permitiendo una mejor visualización de las estructuras geológicas. Reducir este efecto adverso puede conducir a una mejor definición del prospecto y, en última instancia a una mejor oportunidad de éxito.

¹ Proyecto de grado, Modalidad Tesis de Investigación

² Facultad de Ingenierías Físico- Químicas, Escuela de Geología. Director, Geólogo Ph.D. Germán Yuri Ojeda Bueno; Codirectores , Ing. Civil Ph.D William Agudelo y Ing. Civil M.Sc Saúl Guevara .

ABSTRACT

Title: APPLICATION OF INTERPRETATION METHODS OF REFRACTIVE SEISMIC IN PROCUREMENT OF THE NEAR SURFACE MODELS IN THE CATATUMBO AREA AND ITS EFFECT ON THE SEISMIC ³

Autor: Dany Rueda Serrano⁴

Key words: Near surface, statics, GRM, GRM-SSM, plus minus, DLT, DRM y seismic refraction.

The variability and low values of near-surface velocity have a large effect in seismic travel times. Correcting the effect caused by the near surface allows better imaging by improving the response of stacking.

This effect is greater and very difficult to mitigate in mountainous areas of Colombia, due to rough topography and the thickness of the weathered layer. The study of the geological properties of the near-surface and direct recording of travel times in downholes can help assess and calibrate near surface and stacking velocities.

One 60 m depth hole were sampled and equipped with receivers to perform a downhole acquisition over a seismic survey in the Catatumbo Area (NE Colombia) a region with topographical and structural complexities. The geological characteristics of the near-surface were determined by macroscopic analysis and laboratory showing oxides related to the tropical chemical weathering. These results were correlated with velocities derived from travel times measured in downholes.

Five different methods for the near-surface thickness and velocity estimation were tested: Diminishing Residual Matrices (DRM), delay time (DLT), Plus Minus, Generalized Reciprocal Method (GRM), GRM-SSM all using refraction arrival times. Downhole results were used to verify these models. Based on the stacked image, the best results were obtained with the GRM method.

Correction of near-surface effect improves the response of the stacked reflectors generating more continuity, reducing cycle skips in fault zones and allowing better visualization of geological structures. Reducing this adverse effect can lead to better prospect definition and, ultimately, to a better chance of success.

³ Degree Work, Research Modalitu

⁴ Engineering Physical- Chemistry Department. Geology School. Geologist Ph.D. Germán Yuri Ojeda Bueno; Director. Civil Engineer Ph.D William Agudelo Co-director; y Civil Engineer M.Sc Saúl Guevara; Co-director

INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente demanda de energía en el país, surgió la necesidad de explorar en áreas de difícil acceso, que por lo general cuentan con topografías y estructuras geológicas complejas, siendo en el pasado áreas poco atractivas para la búsqueda de hidrocarburos.

La calidad de la imagen sísmica obtenida en áreas con estas características tiende a tener una baja relación señal/ruido, y en consecuencia los reflectores no son continuos, dificultando la visualización de las estructuras geológicas. Esto disminuye la posibilidad de realizar una interpretación de la geología de manera precisa y confiable, reduciendo el porcentaje de hallar hidrocarburos.

El procesamiento sísmico en estas zonas reviste también una dificultad mayor que necesita del uso de técnicas más avanzadas que las usadas en zonas de estructura simple. Esta tesis estudia técnicas de análisis de las propiedades sísmicas del estrato somero, cuya baja velocidad y variación de espesor son de los factores que más contribuyen a deteriorar la imagen sísmica en zonas complejas terrestres. Estas técnicas son los métodos de interpretación de refracción sísmica Plus-Minus, GRM, GRM SSM y método directo Uphole o mini VSP.

En el área de la cuenca del Catatumbo, no se ha realizado un trabajo, que describa las características de la capa meteorizada o del estrato somero, y que a partir de ellas junto con interpretación de refracción, trate de atenuar los efectos que esta capa causa a las secciones sísmicas.

Para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación, trabajé con los datos suministrados por la empresa ECOPETROL, la cual en el año 2005, realizó un programa de recolección de datos sísmicos y de pozos Uphole o mini VSP

denominado URIBANTE 2005 2D en la cuenca del Catatumbo, de gran interés exploratorio para la empresa tanto para la obtención de hidrocarburos como para aplicar la información obtenida en otras áreas con características geológicamente similares.

Dada la necesidad que tiene la vicepresidencia de Exploración de ECOPETROL-ICP en el mejoramiento de la imagen sísmica, en zonas como la cuenca del Catatumbo, en el presente trabajo de investigación pretendo caracterizar la capa de baja velocidad o estrato somero, desarrollar y validar métodos de refracción, que permitan más eficazmente, reducir el efecto causado por las capas meteorizadas.

El tratamiento de estas capas es importante, pues tienen una alta tasa de absorción de la energía y a menudo actúan como un dispersor de ésta. Tullos & Reid (1969) midieron una atenuación de 13 dB por ciclo, en el tope de 3 m de un *loam* (roca sedimentaria detrítica incoherente, de granos sueltos, con proporción equilibrada de partículas de arena, limo y arcilla). La baja velocidad y los cambios rápidos en velocidad tienen un gran efecto desproporcionador en los tiempos de propagación. Para minimizar este efecto se realiza una corrección de estáticas como lo explico en el capítulo 7. Una vez se reduce el efecto causado por la capa meteorizada, se logra mayor continuidad de reflectores en la imagen apilada, como se muestra en la Figura 1.

También procede como un filtro *low-pass* dificultando la obtención de datos de alta frecuencia, a menos que, para adquisiciones sísmicas realizadas con dinamita, se coloque la fuente, y en algunos casos los geófonos, debajo de la capa meteorizada. Las características de la capa meteorizada también afectan el tipo de propagación *ground roll* que ocurre principalmente en esta capa. De cualquier manera, si una fuente profunda es usada y es localizada debajo de la capa meteorizada, la cantidad de *ground roll* generado es sustancialmente reducido.

Si la interfase entre la base de la capa meteorizada y el tope de la capa de roca fresca infrayacente corresponde a un contraste significativo en impedancia acústica, esta interfase puede actuar como un generador de múltiplos, o ser responsable por la generación de reflexiones fantasma (*ghost*), Van Melle y Weatherburn (1953).

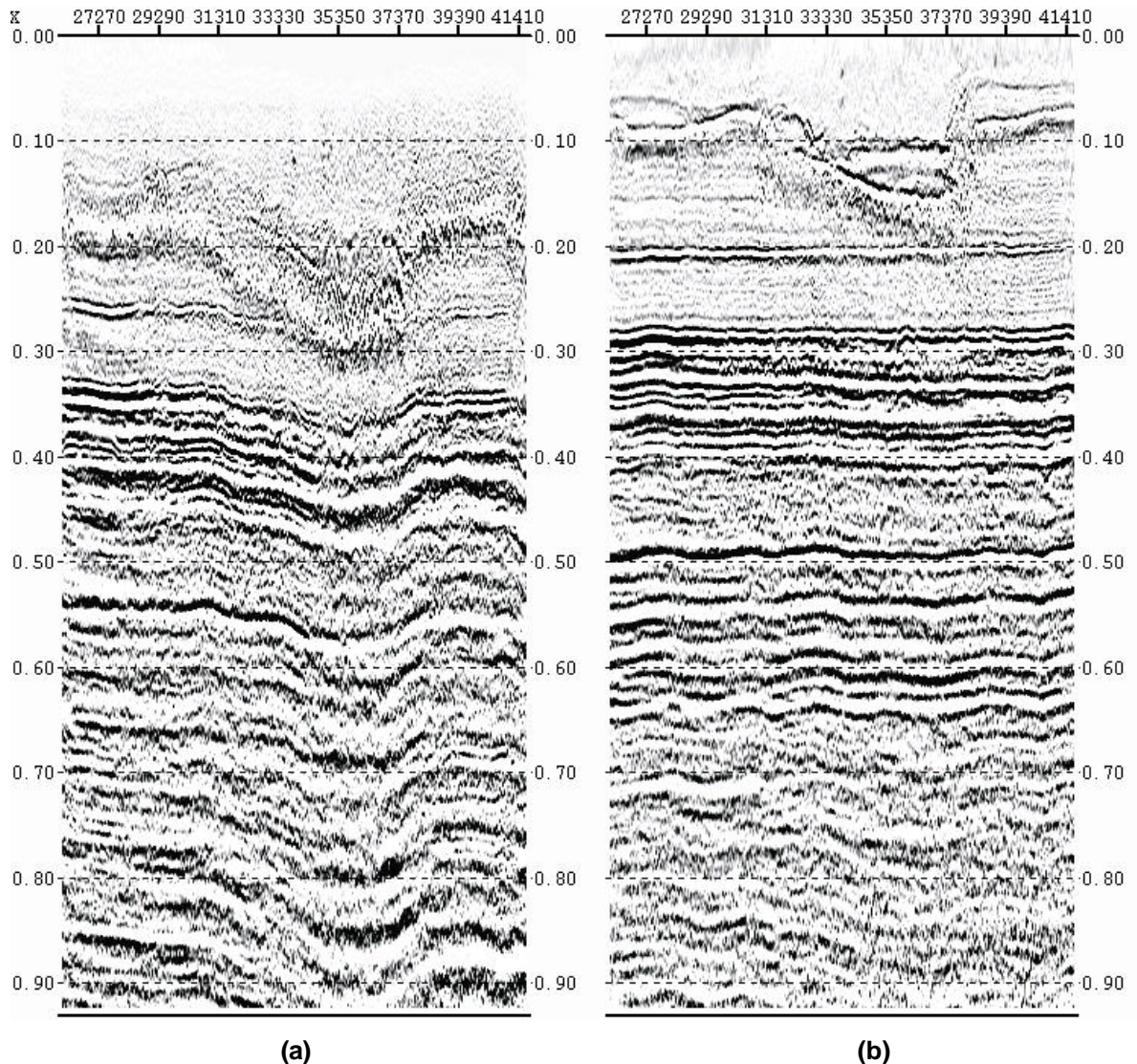


Figura 1. Porción de una sección apilada (a) sin, y (b) con corrección de estáticas que minimizan el efecto del estrato somero. Yilmaz, O. (2001)

OBJETIVOS

OBJETIVOS GENERALES

- Mejorar la imagen sísmica del subsuelo con el fin de reducir la incertidumbre en la exploración de la cuenca del Catatumbo (Bloque Uribante).
- Contribuir al conocimiento geológico sobre la cuenca del Catatumbo (Bloque Uribante).

Objetivos específicos

- Determinar la velocidad y espesor del estrato somero a partir de métodos de refracción contenidos dentro del software PROMAX.
- Entender por medio del diseño de códigos en la herramienta MATLAB los métodos RECIPROCO GENERALIZADO (GRM), (GRM SSM) y PLUS-MINUS que permiten obtener la velocidad y el espesor del estrato somero. Para el primer método comparar su solución con la obtenida en el software PROMAX.
- Relacionar los resultados de los métodos de refracción con los obtenidos del análisis de primeros arribos en adquisición mini-VSP y con la descripción macroscópica de los ripios de pozo somero.
- Lograr una buena imagen de los reflectores de una línea del proyecto URIBANTE 2005 2D mediante pruebas de parámetros y evaluaciones cualitativas de procesamiento sísmico.
- Realizar la interpretación geológica sobre una línea del proyecto URIBANTE 2005 2D, procesada con los resultados de los métodos mencionados anteriormente.

1. GENERALIDADES

1.1. LOCALIZACIÓN GEOGRAFICA

La Cuenca del Catatumbo es la porción Colombiana de la Cuenca Maracaibo, una cuenca petrolera supergigante que representa aproximadamente el dos por ciento (2%) de las reservas de hidrocarburos del mundo. Sus límites al norte y el oriente son el borde geográfico con Venezuela; por el sur limita con las rocas Cretácicas de la Cordillera Oriental y, por el occidente con las ígneas y metamórficas del macizo de Santander Figura 2. Información general en: Mann et al., 2006; Talukdar and Marcano, 1994; Yurewicks et al., 1998, Alfonso and Mondragón, 2000.

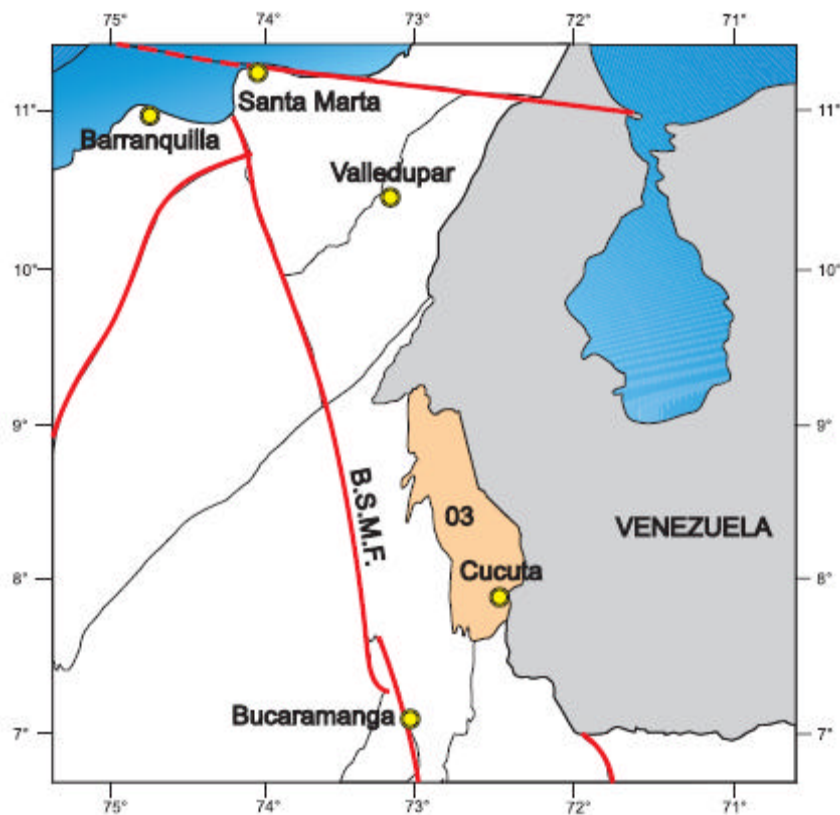


Figura 2. Cuenca Catatumbo (03), localización y límites. B.S.M.F. Bucaramanga-Santa Marta Fault System. Tomado de Barrero *et al.*(2007).

1.2. METODOLOGÍA

1.2.1. Estrategia de seguimiento. Con el fin de llevar un control sobre los avances del trabajo de investigación, se acordó con los coordinadores fijar un día a la semana para presentar cada una de las tareas asignadas y poder cumplir con los objetivos trazados.

1.2.2. Recolección de la información. La información utilizada para el desarrollo del presente trabajo de investigación es la correspondiente al programa URIBANTE 2005 2D consignada en los archivos de la base de datos de ECOPETROL-ICP, en la que se encuentra información de datos sísmicos, información de la cartografía y la geología, la cual fue complementada con salidas de campo al área de estudio.

1.2.3. Análisis de la información recopilada. En esta etapa del procesamiento se verifico que los archivos en digital, correspondieran con el reporte del observador entregado por la compañía que realizo la adquisición, posteriormente se realizo la conversión de los datos al formato que se uso durante el proceso y se verifico que la información estuviera completa.

1.2.4. Caracterización del estrato somero. Para obtener el espesor y velocidad de la capa meteorizada o del estrato somero, se realizo una visita a CORPONOR, para conseguir información acerca de la precipitación y temperatura media anual del área de estudio, a fin de obtener la intensidad y tipos de meteorización que allí pudieran presentarse, además, se hizo un estudio geológico, que incluyo una visita a campo para recolectar muestras de afloramientos y buzamientos de las capas cercanas al lugar de la adquisición sísmica. También se contó con ripios extraídos de la perforación de 2 pozos Uphole o mini VSP, sobre una de las líneas del programa sísmico URIBANTE 2005 2D, los cuales tienen una profundidad de 60 m. y a los cuales se les realizo un análisis macroscópico y composicional de la roca que compone al estrato somero, en el que se incluyo un análisis mineralógico

por difracción de rayos X (DRX). Para conocer la velocidad del estrato somero, se registraron datos de tiempo, obtenidos de cada uno de los pozos mini VSP o Uphole, además de, utilizar datos de tiempo de primeros arribos, para aplicar el método de refracción GRM y GRM SSM.

1.2.5. Aprendizaje de los métodos de refracción utilizados en el trabajo de investigación. Los métodos de refracción nos permiten obtener la geometría de los refractores y su velocidad, además, del espesor y velocidad de las capas meteorizadas. Información con la cual corregimos el retardo en tiempo y mejoramos la calidad de la imagen sísmica. Los métodos utilizados para dicho fin son:

- Método (DRM).
- Método (DLT).
- Método Reciproco Generalizado (GRM).
- Método de Suavizado Estático (GRM SSM).
- Método PLUS-MINUS.
- Medición UPHOLE.

1.2.6. Aprendizaje de los Software utilizados en el trabajo de investigación. Para el procesamiento de los datos sísmicos se utiliza PROMAX, y para obtener el modelo de la capa meteorizada mediante métodos de refracción, que no están contenidos dentro de los paquetes de software que existen en el ICP-ECOPETROL, fue necesario aprender MATLAB, con el fin de crear programas que realizaran el tratamiento de los datos sísmicos de acuerdo a los algoritmos contenidos en los métodos de refracción.

1.2.7. Programación de los algoritmos para modelar capas de baja velocidad. El objetivo de modelar las capas de baja velocidad o meteorizadas es para corregir los efectos que causan en la sísmica y poder obtener una imagen de

excelente calidad. Los algoritmos para tal efecto corresponden a los contenidos en los métodos de refracción GRM, GRM SSM y PLUS-MINUS.

1.2.8. Procesamiento de los datos sísmicos realizado en PROMAX. Se realiza de acuerdo a los siguientes pasos:

- **Reformateo.** Consiste en convertir el formato de grabación de la empresa que realizó la adquisición a un formato para desarrollar el procesamiento.
- **Edición.** En esta fase se editan trazas ruidosas, trazas con polaridad invertida, se eliminan señales con mono frecuencia y registros malos.
- **Geometría.** Consiste en relacionar las posiciones (coordenadas X, Y, Z) de las fuentes con el posicionamiento de los correspondientes receptores activos (tendido sísmico). Es imprescindible conocer las posiciones de los puntos donde se toman datos así como de la fuente que origina la señal sísmica.
- **Corrección por divergencia esférica.** Se aplica una función de ganancia con el objeto de compensar las pérdidas de energía de las ondas sísmicas a través del subsuelo, bien sea por transmisión, dispersión esférica, entre otros.
- **Aplicación de estáticas de campo.** Se elimina el retardo que sufre la onda sísmica al atravesar la capa meteorizada (corrección vertical en tiempo), también se llevan los datos a un plano de referencia o *datum*. Cuando el *datum* seleccionado es el nivel del mar la corrección generalmente es negativa.
- **Deconvolución.** Es un proceso matemático que reduce, elimina o cambia la forma de cada ondícula emitida por la fuente llevándola lo más posible a un *spike*.
- **Ordenamiento por CMP.** Es el ordenamiento por punto medio común, se ordenan las trazas sísmicas en grupos que tengan un mismo punto medio fuente-receptor. Se aplica antes del apilamiento.

- **Análisis de velocidades.** Se determinan las funciones de velocidad en función del tiempo, en varias familias CMP a lo largo de la sección sísmica, que al serles aplicadas en la corrección NMO, logra que cada una de las reflexiones provenientes de diferentes distancias fuente-receptor, elimina el efecto del offset.
- **CORRECCIÓN NMO.** Es una corrección hiperbólica dependiente de la velocidad que se le aplica a los datos sísmicos con la finalidad de horizontalizar los eventos, paso indispensable antes del apilamiento.
- **Estáticas residuales.** Es la determinación de desplazamiento en tiempo a ser aplicados sobre las trazas de una familia CMP, para mejorar el alineamiento horizontal de los eventos a fin de obtener un mejor apilamiento.
- **Mute.** Se refiere a la eliminación del efecto del estiramiento de la señal sísmica, debido a la corrección NMO.
- **Apilado.** Es la suma de trazas pertenecientes a una misma familia CMP, para obtener una sola traza que simula la adquisición Zo (información sísmica donde las fuentes y los receptores comparten una localización común). Al graficar todas las trazas que resulten de este proceso se obtiene una sección sísmica apilada.
- **Aplicación de filtros.** Los filtros atenúan ruidos cuyas frecuencias están fuera del espectro de las señales. Este proceso también puede ser aplicado al principio del procesamiento al nivel de registros. La aplicación de estos filtros en los registros, ayuda, o facilita, el análisis de velocidad. Pero no se recomienda guardar los registros filtrados, para evitar la pérdida de la información.
- **Migración.** Es el proceso mediante el cual se mueven los eventos buzantes a su verdadera posición en el subsuelo y se colapsan las difracciones.

1.2.9. Interpretación sísmica. Para lograr este objetivo se tuvo en cuenta información del subsuelo, la geología de superficie e información de pozos perforados aledaños, y la información de los uphole perforados sobre la línea de interés, información que nos facilitó la correlación de las formaciones y nos dio una aceptación coherente en la interpretación.

1.2.10. Entrega de resultados. Al concluir todo el proceso se obtuvo nueva información acerca de las ventajas de los métodos de refracción para modelar el estrato somero que podrá ser evaluada por los expertos, al igual que un modelo estructural de la zona de interés. Teniendo en cuenta la dificultad en el procesamiento de datos sísmicos con características geológicas como las que tenemos en la cuenca del Catatumbo, los resultados entregados incluyen información concreta sobre nuevas metodologías para resolver problemas debido a estáticas de refracción.

2. MEDICIÓN UPHOLE O MINI VSP.

Las correcciones estáticas requieren una cuantificación de las capas cercanas a la superficie, incluyendo variaciones laterales de espesores y velocidades. La combinación de la información geológica e información de velocidad por estudios de refracción, por ejemplo, son usados para construir una imagen cercana a la superficie. Debido a que las mediciones uphole nos dan información a cortas distancias, hacemos interpolaciones entre uphole cercanos y combinarlos con métodos de refracción GLI, Tomografía, GRM, GRM SSM, ABC, y Plus-Minus, entre otros, para lograr un modelo del estrato somero.

En la Figura 3, se representa un diagrama simplificado de un estudio de uphole y sus resultados en el que se incluye la litología, la disposición del arreglo de los receptores y la fuente en campo, las graficas de tiempo-profundidad ajustadas por mínimos cuadrados e intervalos de velocidad. La profundidad del pozo va desde decenas de metros hasta 500 m.

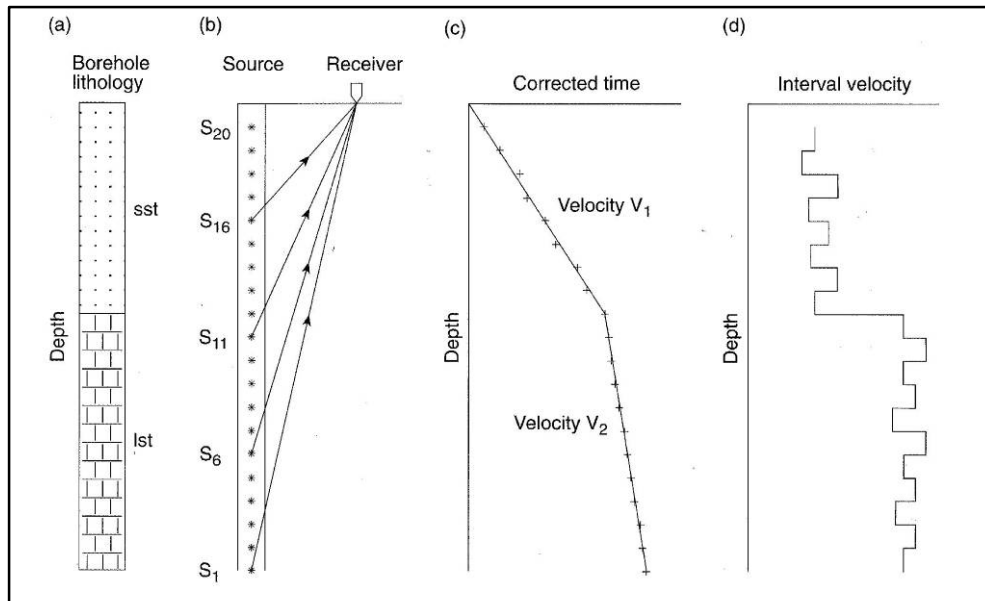


Figura 3. Grafica de un estudio uphole con los receptores en la superficie: (a) litología; (b) disposición en campo con un receptor y 20 fuentes identificadas; (c) grafica tiempo-profundidad; (d) grafica de velocidad intervalo. Tomado de Cox, M. (1999).

En este capítulo aplico una metodología publicada por Rueda, D. *et al.* (2007) a fin de cuantificar las capas cercanas a la superficie, denominada Método de Aceleración **MA**, el cual consiste en modelar la propagación de la onda, por medio de los tiempos de primeros arribos picados de la traza en función del tiempo, mediante un ajuste por mínimos cuadrados a fin de calcular los sectores donde ocurre la máxima y mínima aceleración, puntos en los cuales existe un cambio en la velocidad pero no necesariamente corresponde a un cambio litológico. Los detalles serán explicados en la sección 2.2..

El método es útil para definir las interfases de manera más precisa, pues puede tomar los límites de las capas en puntos intermedios a los datos haciéndolo más cercano a la realidad, identifica capas de poco espesor que sin la ayuda litológica no es posible. Para conseguir los resultados, utiliza criterios diferentes a lo planteado hasta ahora por los distintos autores como, por ejemplo, Geldart *et al.* (2004), quienes solo siguen la tendencia lineal de los datos a la hora de definir las interfases, por lo tanto, es un referente a los distintos modelos que podamos tener generados de esta manera.

La cantidad de mediciones Uphole o mini VSP, se debe hacer de acuerdo al tamaño del área, ubicándolos preferiblemente en las intersecciones de las líneas sísmicas; la profundidad del muestreo debe ser suficiente para tener una buena colección de tiempos de primeros arribos a fin de definir adecuadamente cada capa geológica, en este caso se utilizaron 60 m. y el intervalo de muestreo para mediciones digitales debe ser suficientemente pequeño para captar señales de alta frecuencia.

2.1. ANTECEDENTES

A principio de los años 40's se propuso un modo para obtener información cercana a la superficie o del estrato somero, el cual consistía en la perforación de un pozo

y en la medición de velocidades con un estudio de uphole de acuerdo con Hoover & Schaeffer (1942).

Woods (1952), manifiesta que “después del primer tiro, el mismo lugar no está más allí”, es decir, la naturaleza de la roca a los alrededores de la carga es cambiada con la ejecución de la fuente. Dos procedimientos operacionales para evaluar directamente velocidades del estrato somero fueron reportadas por White & Sengbush (1953).

Meissner (1961), señaló que los tiempos de viaje de un estudio uphole adquiridos usando un rango de *offsets* podían ser usados para construir un diagrama de frentes de onda, una técnica algunas veces llamada técnica *Meissner* o método uphole Sheriff (1991).

Patterson (1964), mostró que los tiempos son influenciados por el tamaño de la carga, con tamaños de carga muy grandes se conduce a tiempos anómalos. Sheriff & Geldart (1982, 1995), mencionan la capacidad de adquirir información del estrato somero usando *shotholes* con dinamita, una técnica primero utilizada en 1931.

Stümpel *et al.* (1984), reporto una técnica alternativa para la adquisición de los datos en la cual las fuentes fueron localizadas en una superficie plana cerca al limite de un acantilado y los receptores fueron posicionados bajo la cara del escarpe (también en Meissner *et al.*, 1985).

Baker & Winbow (1988), sugirieron que los segundos arribos deberían ser usados en vez de los primeros, en la presencia de zonas invadidas por el lodo de perforación con espesores considerables o un pequeño contraste de velocidad.

Sheriff (1991), definió a un estudio de uphole como: “Primero sucesivas fuentes variando con la profundidad en un pozo perforado, con la finalidad de determinar las velocidades de las formaciones cercanas a la superficie, los espesores de la meteorización, y algunas veces las variaciones de la calidad del registro con la profundidad de la fuente y segundo algunas veces una cuerda de geófonos es colocada en un pozo del orden de los 60.96 m de profundidad para medir los tiempos de viaje verticales de una fuente superficial cercana”.

De acuerdo con e.g., Kragh *et al.*, (1991), los procesos de perforación perturban el subsuelo cercano al pozo, pudiendo retardar los arribos próximos a un receptor por varios milisegundos.

Pocos estudios uphole han sido registrados y procesados como VSP o *reverse VSP* (RVSP), que a menudo se conocen como *hole to surface surveys*, es decir, que además de utilizar la información de los tiempos de primeros arribos, también se utiliza la información de la energía reflejada de varias interfases ambas sobre y bajo el receptor en el pozo, según e.g., Suyama *et al.*, 1987; Naville *et al.*, 1992; Skvortsov *et al.*, 1992; Neilson & Gendzwill, (1993).

De acuerdo con Geldart *et al.* (2004), “los datos son aproximados por series de línea recta y las velocidades determinadas de la pendiente de estas líneas. Los espesores son determinados en la base de las capas por los cambios abruptos de velocidad”.

2.2. VENTAJAS

Los uphole son muy importantes para determinar de manera directa y confiable espesores de meteorización y velocidades de las formaciones cercanas a la superficie. Con una medición de este tipo podemos tener información acerca de la litología y el nivel freático en el momento de la adquisición, permitiéndonos hacer

ajustes precisos al modelo de velocidades. Estas velocidades pueden ser comparadas o reemplazadas para obtener mejores resultados en métodos de refracción como GRM o GLI.

Dado que en la vida práctica nos podemos encontrar en la situación, que para una misma medición uphole podamos generar varios modelos y todo esto debido a que en muchas ocasiones no se realiza un buen muestreo litológico que permita definir las interfases por que los intervalos de muestreo son mayores a 10 m en profundidad, o también porque se pasa por alto medir el nivel freático, factor muy importante ya que después del nivel freático podemos tener un cambio en la velocidad de más de 700 m/s. Lo anterior es reiterado “según Cox. M. (1999), la grafica de tiempo-profundidad es después interpretada y los intervalos de velocidad son estimados para las capas identificadas. Esto es a menudo un procedimiento subjetivo o personal, y diferentes interpretaciones, frecuentemente, pueden ser hechas de una serie de datos”, a esto, le podemos agregar la manera como en la actualidad se trabaja, tal como lo plantea Geldart *et al.* (2004), que al parecer no es la manera más correcta ya que permite muchos errores, pues el simple hecho de mirar el cambio brusco en la tendencia lineal de los datos no puede ser suficiente para tomar una decisión a la hora de generar un modelo de velocidades.

Después de obtener la grafica tiempos de arribo contra profundidad, el siguiente paso es determinar las velocidades y espesores de las capas involucradas. La velocidad intervalo (V_{int}) puede hallarse midiendo el tiempo que tarda en llegar de la fuente al receptor. Tanto la profundidad del receptor (h) y el tiempo (t) son medidos, la velocidad intervalo puede ser calculada como $V_{int} = (h_2 - h_1)/(t_2 - t_1)$.

La información geológica es útil en decidir donde se localiza finalmente una interfase. Aunque un cambio en la geología casi siempre de un cambio en la

velocidad, es decir, el paso de shale a calizas, por ejemplo. No siempre todo cambio en la velocidad corresponde necesariamente a un cambio en la litología. Podemos tener una sola capa de arenisca que solo contenga agua a la mitad de su profundidad, en cuyo cambio en la saturación de agua habrá un cambio en la velocidad. Por esta razón, es muy importante conocer el nivel freático.

Viendo la importancia que tiene el modelo de velocidades para el hallazgo de espesores de meteorización y velocidades de las formaciones cercanas a la superficie, con más razón si una de las aplicaciones es para la corrección de estáticas a fin de obtener buenas imágenes sísmicas, la creación del Método de Aceleración **MA**, busca disminuir el grado de incertidumbre a la hora de tomar una decisión y acertar más en un modelo cercano a la realidad que brinde excelentes resultados. Este método calcula el espesor y velocidad de las capas, teniendo en cuenta los cambios en la aceleración de la onda.

2.3 MÉTODOS DE ADQUISICIÓN DE LOS DATOS

Hay dos métodos básicos de conducción en una adquisición uphole. El primero consta de varias fuentes dentro del pozo y uno o más receptores en superficie Figura 3b., y el segundo de fuentes cercanas a la superficie y receptores dentro del pozo Figura 4, este último a veces es conocido como método *downhole*.

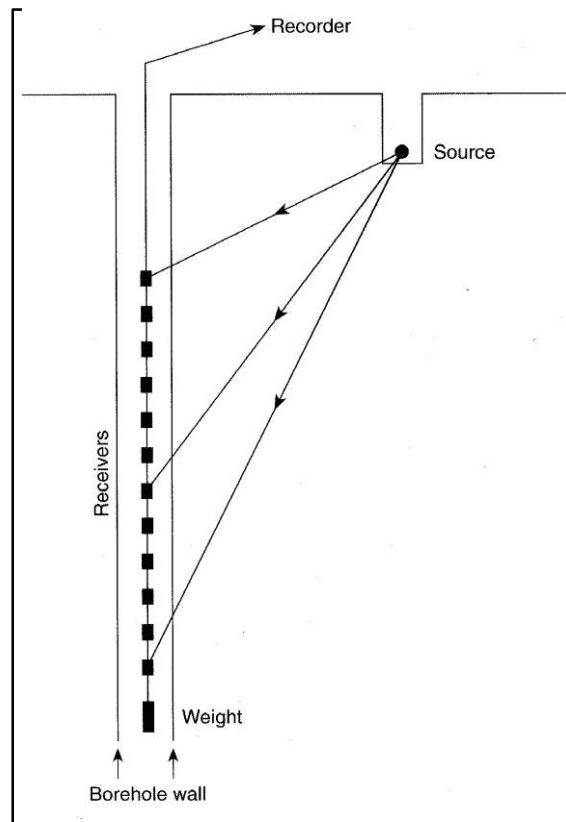


Figura 4. Diagrama esquemático de la disposición en campo en un estudio uphole con la fuente en la superficie y receptores en el pozo. Tomado de Cox, M. (1999).

2.4 INTERVALO DE MUESTREO

Es necesario considerar tres aspectos:

- El muestreo sobre el área y a lo largo de alguna línea.
- La profundidad de muestreo.
- El intervalo de muestreo para mediciones que son registradas digitalmente.

Otro factor que impacta en el espaciamiento de los uphole es el método usado para interpolar las capas entre uphole con el objetivo de definir el modelo cercano a la superficie a fin de calcular las correcciones del *datum* estático. A menudo son usados los diseños de refracción pero su interpretación requiere de adecuados controles de velocidad bajo el refractor. Esta información en muchos casos es

proporcionada por los uphole, además indican la necesidad de más uphole en áreas donde ocurren rápidas variaciones laterales en cercanías a la superficie.

2.5 INTERPRETACIÓN

Los principales componentes de interpretación son:

- Picar los primeros arribos de cada profundidad.
- Aplicar algunas correcciones necesarias a estos tiempos (*corrección geométrica*) Cox. M. (1999).
- Graficar los datos y estimar las velocidades y espesores de las capas identificadas. Figura 3.c.

2.6 INTERPRETACIÓN Y CORRELACIÓN LITOLÓGICA CON EL MODELO DE VELOCIDADES UPHOLE.

Aquí aplicó la metodología propuesta por Rueda, D. *et al.* (2007) el Método de Aceleración MA.

Tabla 1. Tiempos de primeros arribos del uphole 3.

| PROFUNDIDAD DE LA FUENTE (m) | TIEMPO (ms) |
|---------------------------------|----------------|
| 1.0 | 5.6 |
| 1.9 | 6.0 |
| 2.8 | 6.4 |
| 3.7 | 6.9 |
| 4.6 | 9.4 |
| 5.5 | 10.0 |
| 8.5 | 10.5 |
| 11.5 | 12.2 |
| 14.5 | 14.3 |
| 17.6 | 15.1 |
| 20.7 | 17.6 |

| | |
|-------------|-------------|
| 23.7 | 18.9 |
| 29.2 | 21.4 |
| 34.5 | 24.4 |
| 40.0 | 26.4 |
| 45.5 | 28.8 |
| 51.5 | 30.4 |
| 56.5 | 32.7 |
| 60.0 | 33.4 |

En este análisis no se tiene en cuenta la tendencia lineal de los puntos, sino se propone tener en cuenta el cambio en la aceleración de la onda, el cual marcará la ubicación de la interfase. A diferencia de las anteriores interpretaciones en este caso nosotros podemos determinar una interfase en la mitad de dos puntos y obtener las velocidades promedio más adecuadamente.

Trabajando con los datos de la TABLA 1, el siguiente paso es definir como se propaga la onda a través de las capas, para ello se debe crear una ecuación que se ajuste a todos los datos lo más fiel posible. De acuerdo con la Figura 5 (esquina inferior izquierda), la ecuación que mejor se ajusta a los datos es una ecuación polinómica de octavo grado cuyo coeficiente de correlación es de 0.9937, seguidamente hallamos la velocidad producto de la derivada de la ecuación de ajuste Figura 5 (esquina superior derecha), y calculamos finalmente cada una de las interfaces derivando nuevamente la ecuación y hallando los puntos máximos y mínimos de la aceleración, lo cual en estos puntos nos estará indicando que se está pasando de una interfase a otra, es decir, a una capa con mayor o menor velocidad según sea el caso. Figura 5 (esquina inferior derecha). En la Figura 5, nosotros podemos observar que de izquierda a derecha la aceleración disminuye, pasa de 0.436 m/ms² a 0.101 m/ms², mientras la velocidad en este mismo sentido aumenta. Después de obtener los puntos en donde la interfase cambia, nos retrocedemos nuevamente a la gráfica de los datos y calculamos la velocidad promedio y sus espesores.

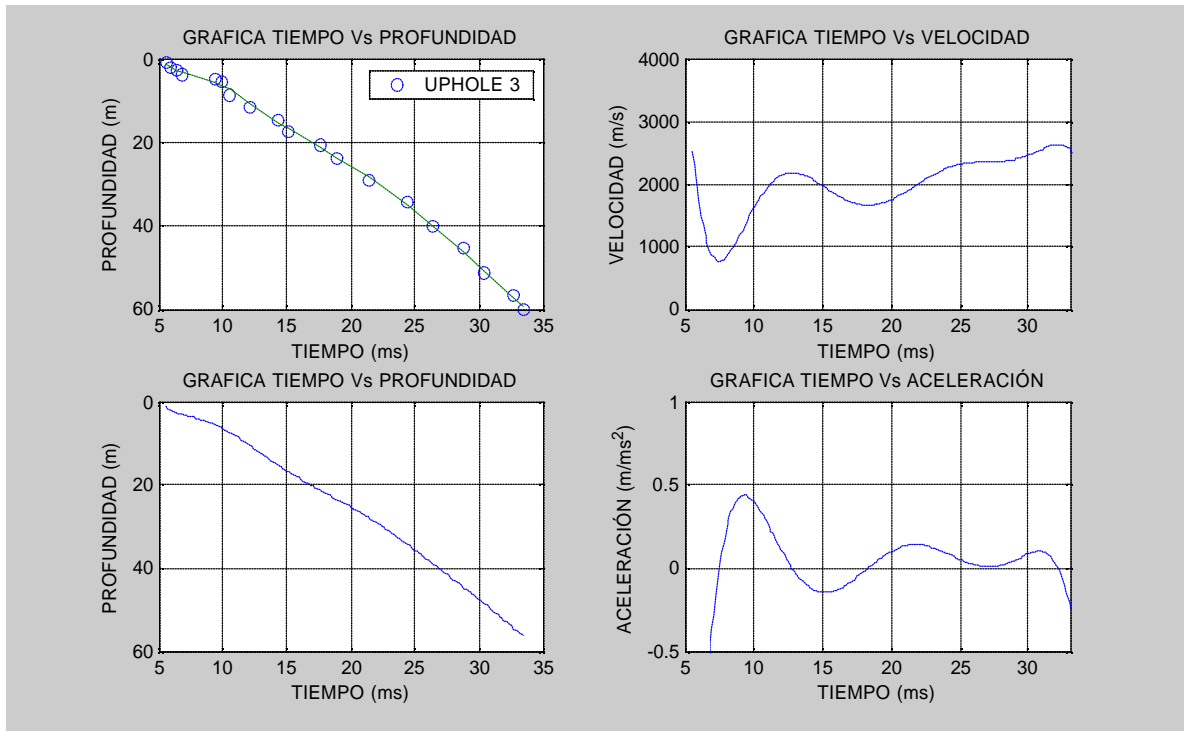


Figura 5. Graficas de tiempo-profundidad, tiempo-velocidad y tiempo-aceleración para los datos de la TABLA 1, siguiendo el método de aceleración MA.

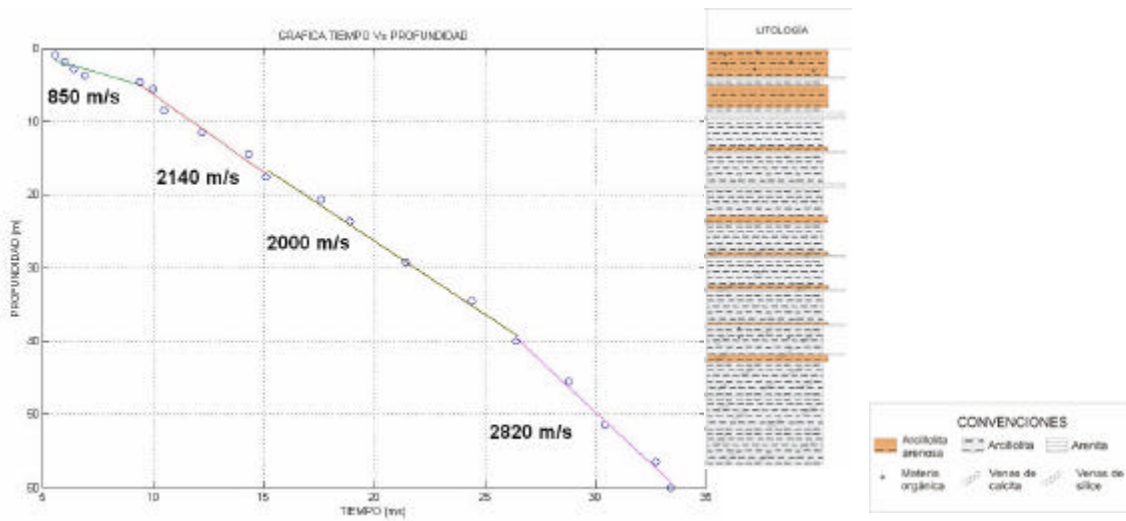


Figura 6. Interpretación de los datos del uphole 3 representando cuatro capas geológicas y su correspondiente perfil litológico.

En la Figura 6, la primera capa tiene una profundidad de 5 m y una velocidad de 850 m/s, su litología predominante corresponde con arcillolitas arenosas rojas y amarillas, a demás, esta capa contiene material orgánico. Los minerales muestran que estas rocas sufrieron meteorización química García, N. (2007). Debido a que la roca original es rica en arcillas y óxidos de hierro, los tipos de meteorización presente son la hidrólisis, hidratación y la oxidación.

La segunda capa se da a una profundidad de 5-18 m, presenta una velocidad de 2140 m/s. El contenido de arenisca en este sector es mucho mayor y solo hasta esta profundidad predominan las arcillolitas arenosas de color rojo y desaparece la presencia de materia orgánica.

La tercera capa es la mejor definida su profundidad se encuentra entre los 18-39 m, y su velocidad es de 2000 m/s. Como característica litológica presenta un alto contenido de arcillolitas grises (60%), a demás, se empieza a observar la presencia de venas de calcita contenidas en las arcillolitas grises.

La cuarta capa se encuentra ubicada a una profundidad de 39-60 m y su velocidad es de 2820 m/s. Esta compuesta por arcillolitas grises y venas de calcita, reaparece la presencia de materia orgánica en el intervalo de 40-50 m

Se puede observar una correlación entre los datos de tiempo uphole 3 y la variación en porcentaje de los componentes litológicos de la Figura 5. En García, N. (2007) se pueden identificar las características litológicas del uphole 3. Estos resultados son correlacionables con los datos de velocidades del uphole en mención.

3. MÉTODOS DE INTERPRETACIÓN DE REFRACCIÓN SÍSMICA

En un medio homogéneo, el principio de *Huygens'* menciona que “Todo punto en un frente de onda puede ser considerado como la fuente de una onda secundaria y que un frente de onda posterior es la envoltura tangente a todas las ondas secundarias” Sheriff, (1991). Así, cuando una onda incidente golpea una interfase separando dos medios, cada punto de incidencia sirve como la fuente de una onda reflejada en el mismo medio y como la fuente de una onda refractada en el segundo medio. La velocidad del medio determina la velocidad en la cual las ondas viajan y por lo tanto la distancia entre frentes de onda sucesivos.

La Figura 7, muestra una serie de frentes de ondas incidentes golpeando una interfase horizontal entre dos medios. La construcción de varios frentes de onda entre la capa superior es mostrada, iniciando para un tiempo t con un incremento de Δt . La distancia entre estos frentes de onda es $V_1\Delta t$, donde V_1 es la velocidad en el medio superior y V_2 la velocidad del medio inferior dos veces mayor que la velocidad del medio superior.

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

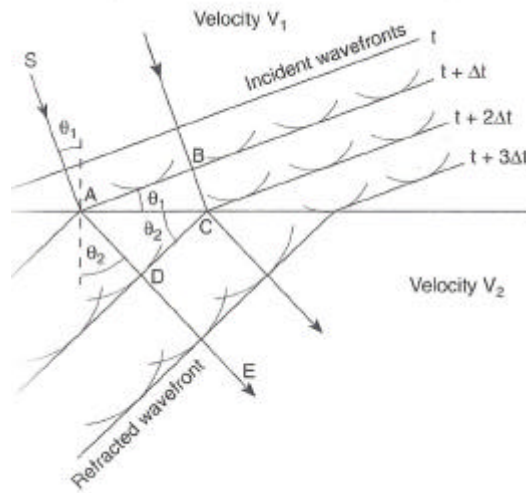


Figura 7. Refracción de ondas planas a través de una interfase horizontal ($V_2 = 2V_1$). Variables: q_1 es el ángulo incidente y q_2 es el ángulo refractado, Δt es la separación del frente de onda. Tomado de Cox M. (1999).

El principio de esta ley es:

$$\frac{\sin q_1}{\sin q_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad 1$$

Donde q_1 es el ángulo de incidencia, q_2 es el ángulo de refracción, V_1 es la velocidad en el primer lado y V_2 es la velocidad del refractor.

Cuando el frente de onda refractado es perpendicular a la interfase, que es cuando $q_2 = 90^\circ$, el rayo refractado en efecto viaja a lo largo de la interfase entre los dos medios. El correspondiente ángulo incidente q_1 es llamado el *ángulo crítico* (q_c) y es definido como

$$\sin q_c = \frac{V_1}{V_2} \quad 2$$

Para que la (Ecuación 2) sea válida, la velocidad en el medio más inferior V_2 debe ser más grande que aquella en el medio más superior V_1 .

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA LÍNEA SÍSMICA

La línea U-2005-1040 se encuentra localizada entre las coordenadas 1394096.18-1380713.92 N y 1164522.83-1190615.82 E. Su topografía es abrupta en la parte central y Sur-Este. Las elevaciones varían entre 114.77 y 957.13 m.s.n.m. La zona cuenta con climas de tipo muy húmedo a semi-árido.

El área seleccionada tiene una amplia variedad de desafíos cercanos a la superficie para el procesamiento sísmico. La topografía va desde llanuras Cuaternarias consistiendo en depósitos aluviales gruesos de arcillas, arenas y gravas polimícticas del Río Zulia, que cubren el núcleo del sinclinal de mismo nombre y del Río Pamplonita, hasta abruptas en la parte central y Sur-Este, caracterizada por pendientes que varían de fuertemente ondulada a escarpada en algunos sectores donde afloran las areniscas de la Formación Mirador y una morfología escalonada debido a la Formación Carbonera.

Existen dos Uphole o mini VSP con profundidades de 60 metros, los cuales se encuentran ubicados sobre la línea sísmica en las estaciones 1756,5 y 2487,5, la línea sísmica considerada aquí es de 30 km de largo con un tendido simétrico. Los intervalos entre disparos son de 60 m y entre canales los intervalos son de 15 m. La distancia, Offset, fuente-receptor de 7.5 m a 5055 m.

La fuente de energía es SISMIGEL, la cantidad de carga es 4500 gr, la profundidad del pozo es 42/15 ft. El registro se realizó a través del equipo SERCEL 408, tipo telemétrico 24 bit, en formato de cinta SEG D, cuyo medio de grabación es cartucho 3490 E y el medio de disparo es por medio de radio. La longitud de registro es de 7 seg y la tasa de muestreo es de 2 ms.

3.2 PRIMEROS ARRIBOS

El primer paso en toda interpretación por refracción, para el estrato somero u objetivos profundos, es revisar y picar los datos. La fase de revisión es concerniente con un análisis de los datos a ser picados, semejante como el intervalo *offset* o intervalos a ser usados en la interpretación, que dependen de la profundidad del refractor de interés.

La adquisición sísmica de alta resolución proporciona la oportunidad de usar *source gathers* para interpretar primeros arribos. Una alta relación señal ruido permite precisar el picado de primero arribos, resultando en horizontes continuos y bien enfocados en las secciones en tiempo según Bridle *et al.* (2003).

El primer refractor es picado al lado derecho del disparo, y los mismos receptores son picados en el lado izquierdo del otro disparo. Los pares de *source-gather* son picados para construir un efectivo *mini-spreads* para los métodos GRM, GRM SSM y Plus-Minus, ilustrado por un tendido de fuentes sísmicas recíprocas en Figuras 8 y 9.

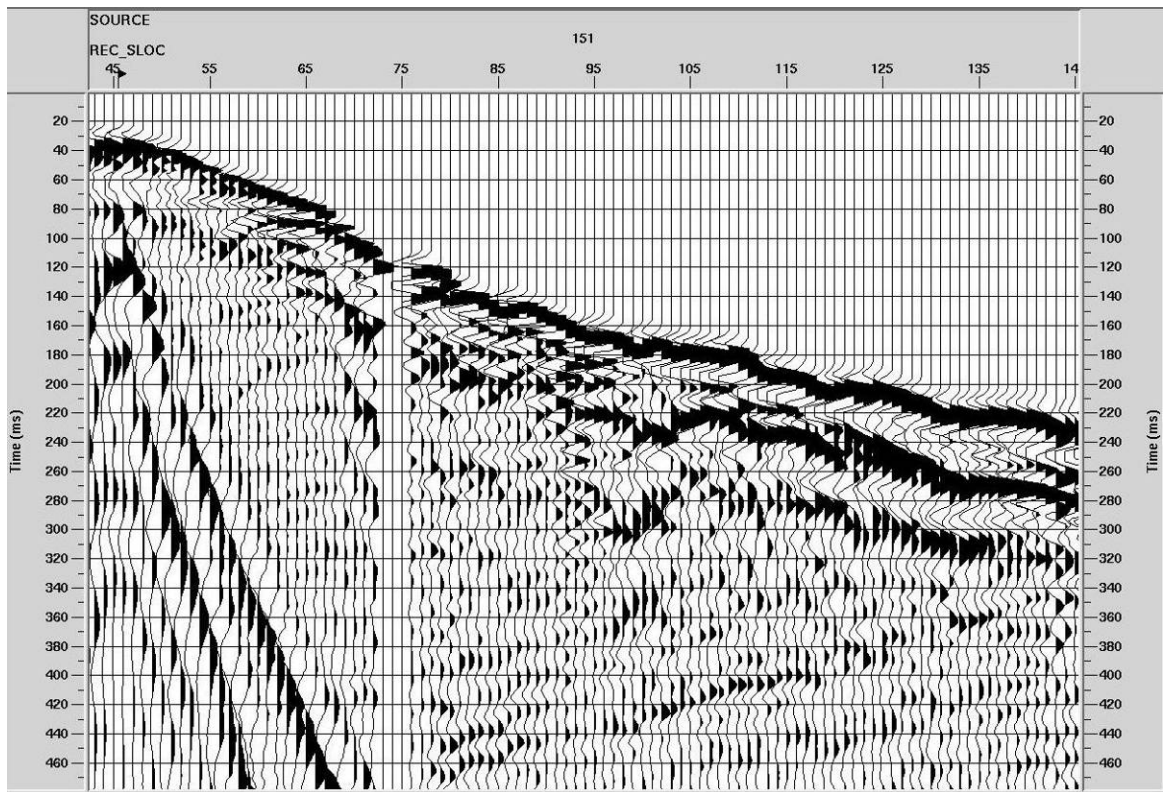


Figura 8. Sección derecha del *shot gather* 151.

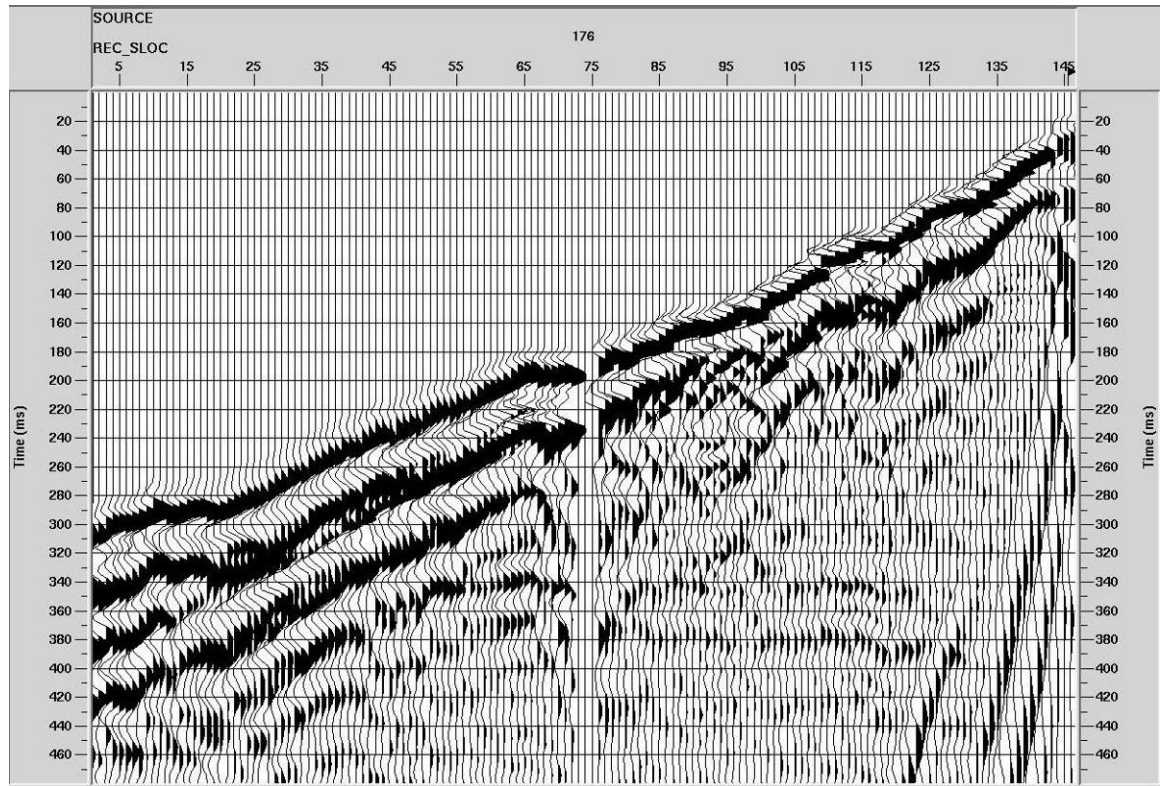


Figura 9. Sección izquierda del *shot gather* 176.

Usando solo los buenos disparos, los espesores y velocidades de las capas pueden ser calculados de sus pendientes y tiempos intercepto de acuerdo con Bridle *et al.* (2003). Si llegamos a derivar las velocidades teniendo en cuenta solo uno de los lados del tendido, ellas deben ser solo un estimado cuando hay capas inclinadas según Cunningham (1974). En esta investigación los *source gathers* han sido interpretados para un modelo de dos capas. La base de la capa superficial define la base de la meteorización.

3.3 MÉTODO RECÍPROCO GENERALIZADO (GRM). El GRM (Método Recíproco Generalizado) publicado por Palmer, D. (1980,1981), es una técnica utilizada para delinear interfases refractantes onduladas, con datos de refracción de una línea sísmica consistiendo de tiempos de viaje directos y tiempo de viaje invertidos. Tiene la ventaja de combinar muchos de los mejores rasgos de los métodos individuales.

El método utiliza dos fuentes denominadas A y B, a demás de, dos geófonos localizados en X y Y para captar los tiempos de arribo de refracción. La distancia que los separa la denominamos *distancia XY*. Se basa en los tiempos-profundidad y valores de la función de la velocidad obtenida de los tiempos directos e inversos de arribos de diferentes separaciones XY de los geófonos a lo largo del perfil de refracción. El tiempo recíproco de ambas direcciones de disparo también es requerido en el cálculo.

El GRM combina los aspectos de migración de el método *Delay Time* publicado por Barry (1967), con la simplicidad de los cálculos del método recíproco de Hawkins (1961) gracias a que uno de los valores XY está asociado con arribos de aproximadamente el mismo punto en el refractor, el cual denominamos el *valor óptimo de XY*.

Para verificar que el método funciona correctamente calcule el modelo sintético del refractor mostrado en la (Figura 10). el cual tiene una superficie horizontal y un refractor altamente irregular con buzamientos en las superficies inclinadas de aproximadamente 18°. El valor óptimo XY se da cuando las localizaciones de los receptores X y Y, corresponden a 2 rayos emergentes desde un mismo punto G' en el refractor (Figura 11). Sabemos que es el valor óptimo XY, cuando la función de análisis de la velocidad t_v (Ecuación 3) cuya pendiente, es igual al inverso de la velocidad aparente del refractor (Ecuación 4), es más recta entre una serie de funciones de velocidad t_v , derivadas de diferentes valores de distancias entre X y Y, es decir, el valor óptimo XY corresponde a la línea más recta en la grafica tiempo vs velocidad (Figura 12) y a la línea que mejor define la geometría del refractor en la función generalizada tiempo-profundidad t_G (Figura 13).

$$t_v = \frac{1}{2}(t_{AY} - t_{BX} + t_{AB}), \quad 3$$

$$\frac{d}{d_x} t_v = 1/V'_n. \quad 4$$

$$t_G = [t_{AY} + t_{BX} - (t_{AB} + XY/V'_n)]/2 \quad 5$$

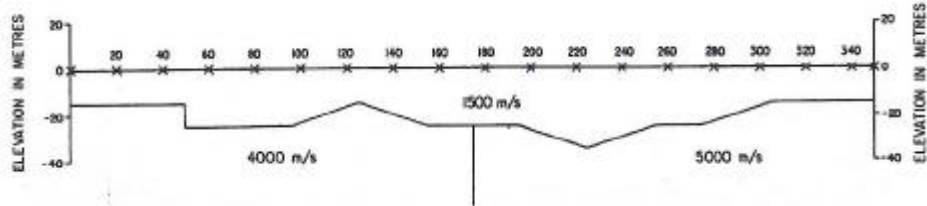


Figura 10. Modelo con la superficie horizontal y un refractor altamente irregular. Tomado de Palmer, D. (1986).

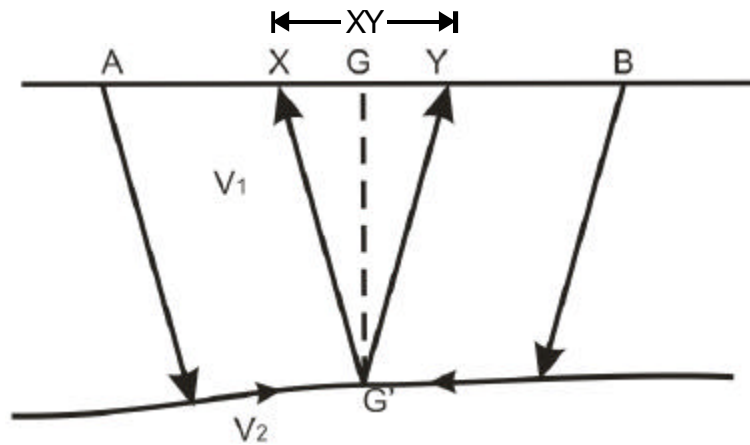


Figura 11. Modelo representativo de la trayectoria de los rayos refractados desde la fuente ubicada en A, hasta el receptor Y y desde la fuente ubicada en B, hasta el receptor X. Se observa como los rayos emergen desde el punto G'. Modificado de Cox, M. (1999).

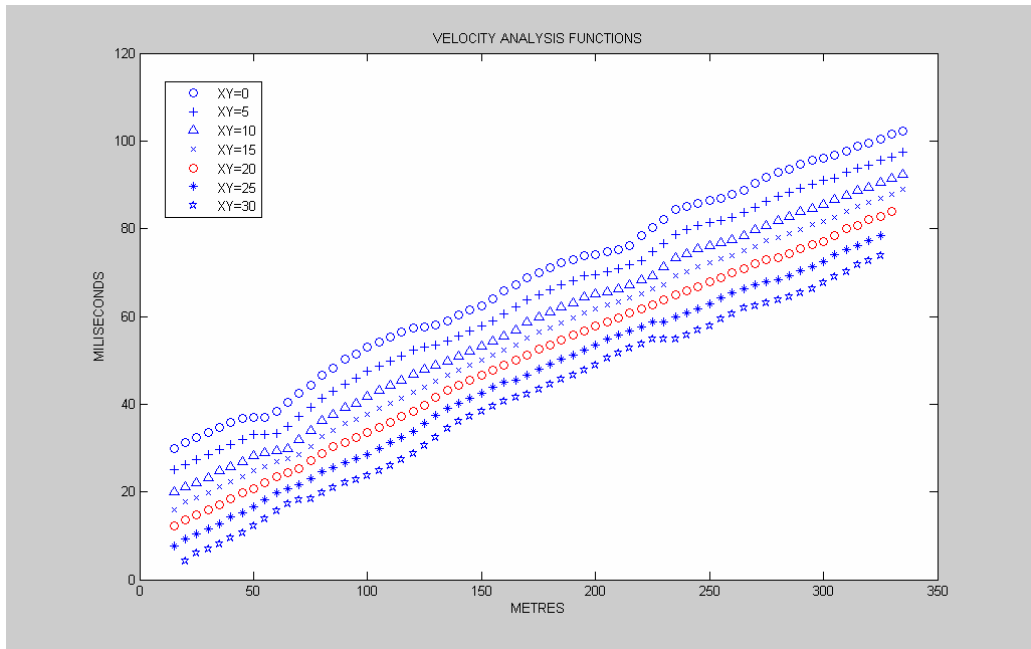


Figura 12. Se puede apreciar que el valor optimo corresponde a una separación XY = 20 m.

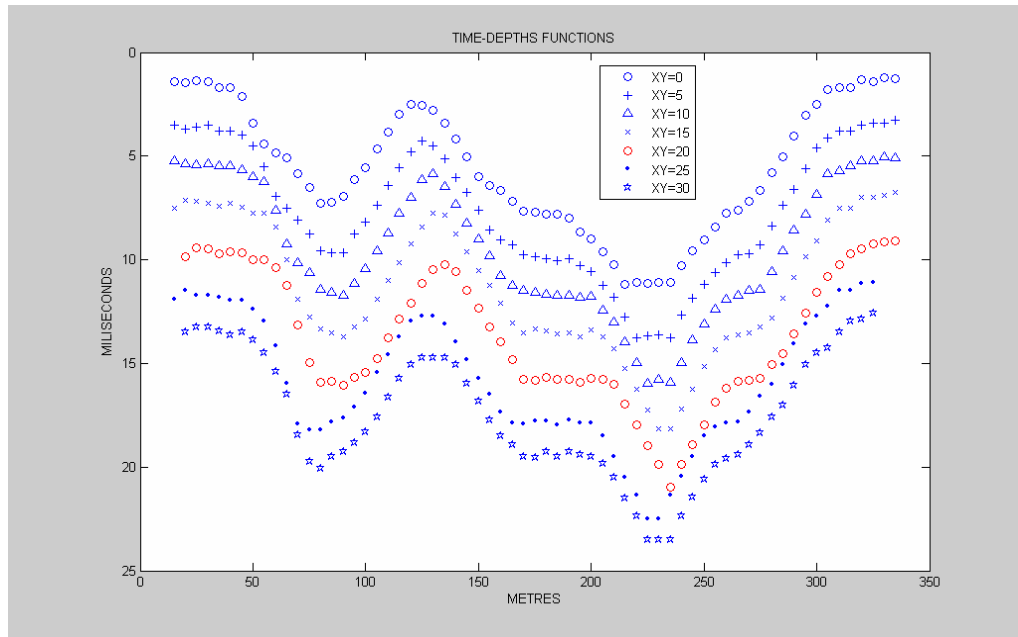


Figura 13. Se observa que el valor optimo que mejor define la geometría del refractor corresponde a una separación XY=20 m.

Los espesores son hallados de acuerdo a la (Ecuación 9) después de reemplazar la (Ecuación 5) correspondiente a las curvas de tiempo vs profundidad (Figura 13), y del factor de conversión a profundidad, (Ecuación 6). El método es

relativamente insensible a ángulos de buzamiento del refractor superiores a los 20°, valor que podría presentarse en sectores con elevaciones topográficas, así los cálculos de profundidad para un refractor ondulante son particularmente convenientes, todavía cuando los estratos superpuestos al refractor, tienen gradientes de velocidad, pues, la profundidad puede ser calculada, si se conoce el valor de la velocidad en cada punto, empleando la (Ecuación 7), donde $V(z)$ es la velocidad correspondiente a cada punto en profundidad; V'_n es la velocidad del refractor.

$$V_{jn} \cong V'_n V'_j / [V_n'^2 - V_j'^2]^{1/2} \quad 6$$

$$t_G = \int_0^z \frac{\sqrt{V_n'^2 - V^2(z)}}{V'_n V(z)} \quad 7$$

$$XY = \sum_{j=1}^{n-1} 2Z_{jG} \tan i_{jn} \quad 8$$

$$t_G = \sum_{j=1}^{n-1} \frac{Z_{jG}}{V_{jn}} \quad 9$$

La presencia de capas ocultas puede ser inferida cuando el valor óptimo XY observado en las graficas de tiempo-profundidad y velocidad, difiere del calculado de la sección en profundidad por la (Ecuación 8). El valor óptimo XY, puede ser usado para estimar una velocidad promedio, de las capas situadas encima del refractor, que permita calcular su profundidad (Figura 14).

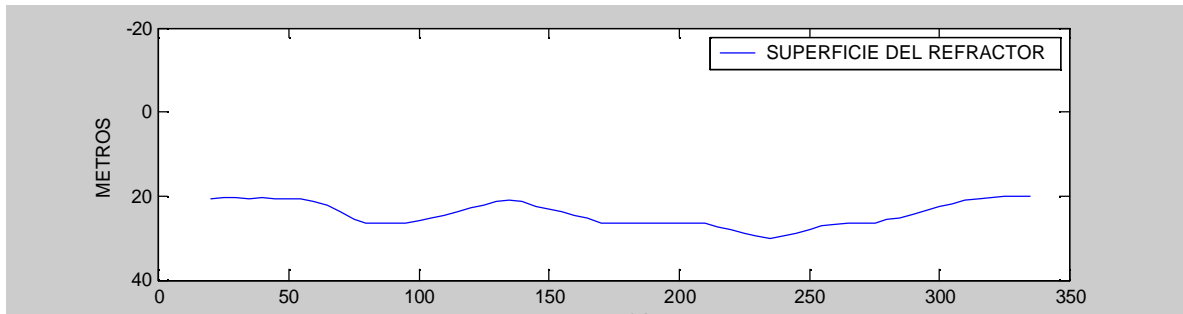


Figura 14. Perfil del refractor calculado de la grafica tiempo Vs profundidad usando una separación XY = 20 m.

3.4 MÉTODO DE SUAVIZADO ESTÁTICO (GRM SSM). Siguiendo el mismo procedimiento que en el método GRM para calcular los tiempos vs velocidad y tiempos vs profundidad. Según Palmer *et al.* (2005), el método GRM SSM genera una corrección de estáticas, suavizadas por la resta del promedio de los tiempos-profundidad calculados con un rango de valores XY, por ejemplo, de 0 a 30 m. de los tiempos-profundidad calculados con un valor de XY = 0 (Figura 15), (donde el valor XY es la separación entre los receptores usados para calcular los tiempos-profundidad). Los tiempos-profundidad para el refractor no varían sustancialmente con la variación de los valores XY, y por lo tanto, un promedio de los tiempos-profundidad, es similar al valor óptimo XY utilizado en el método GRM. De cualquier manera, los tiempos-profundidad para las irregularidades muy cercanas a la superficie migran lateralmente con el incremento de los valores XY y en consecuencia ellas son sustancialmente reducidas con el proceso de promediado (Figura 16). Como un resultado, el perfil promedio de tiempo-profundidad sobre un rango de valores XY (Figura 16), efectivamente corrige las irregularidades cercanas a la superficie.

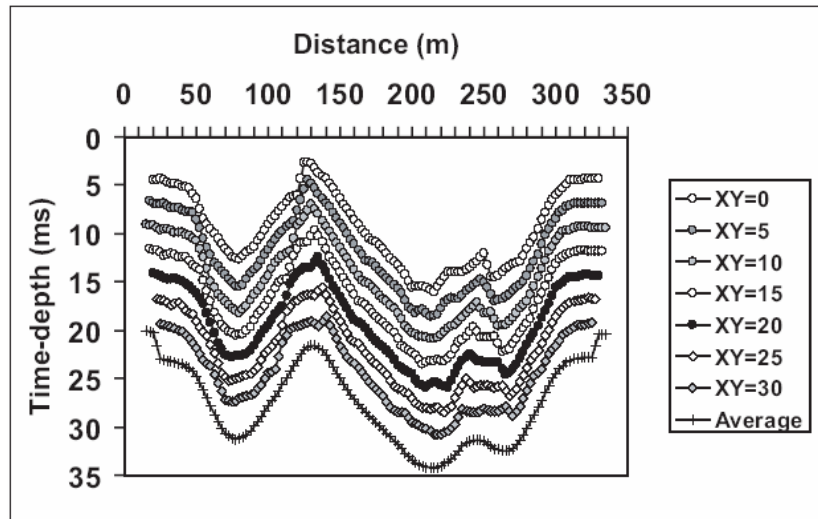


Figura 15. La separación final, es el promedio de los tiempos-profundidad calculados con un rango de valores XY de 0 a 30 m. Tomado de Palmer, D. (2005).

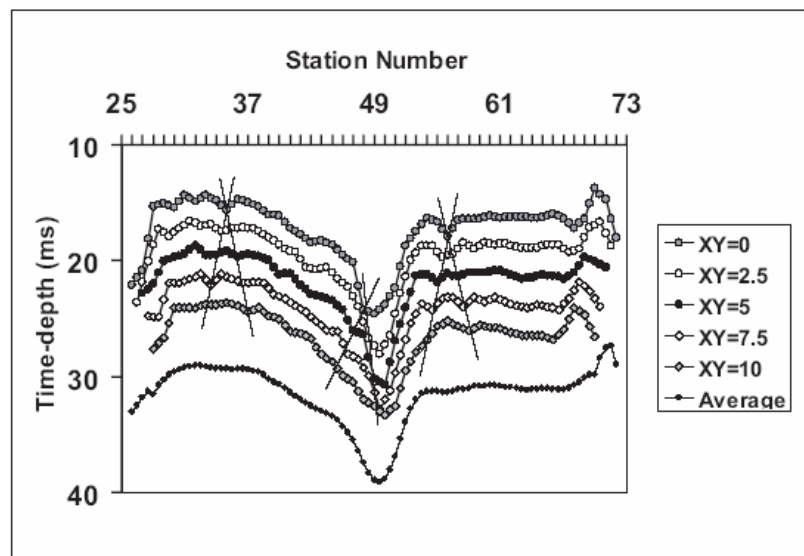


Figura 16. En la grafica, se puede ver la migración lateral de tres irregularidades cercanas a la superficie, señaladas por líneas que se cruzan entre sí y como estas irregularidades desaparecen con el promedio de los tiempos-profundidad, calculados con un rango de valores XY de 0 a 10 m. Tomado de Palmer, D. (2005).

3.5 MÉTODO PLUS-MINUS. Según Hagedoorn (1959), “la visualización e interpretación de procesos sísmicos puede ser llevado a cabo más satisfactorio, simple y comprensiblemente con frentes de onda que con los rayos”.

Thornburgh (1930) introdujo un método para la interpretación de secciones sísmicas de refracción, usando el principio de Huygen's para la construcción de los frentes de onda de dos puntos de disparo simétricos a cada geófono, por trabajo inverso de sus tiempos de llegada observados en la superficie. La trayectoria de los rayos para un perfil de refracción inverso esta representada en (Figura 17).

El patrón de los dos frentes de onda a iguales intervalos de tiempo, obtenidos cuando se lleva a cabo la construcción Thornburgh's, conducen a una aproximación al método "Plus-Minus". Las sumas de los tiempos de viaje de dos puntos de disparo simétricos a cada geófono definidos como el valor "Plus" (Ecuación 11), dan los tiempos relacionados a la profundidad y sus sustracciones definidos como los valores "Minus", (Ecuación 10), dan los tiempos relacionados a las velocidades del refractor. El método extrapola el límite del refractor por las líneas "Plus" y "Minus", (Figura 18). Para pasar de tiempo a profundidad es necesario emplear la (Ecuación 12). Su principal aplicación es justamente para investigaciones de refracción superficial y para determinar correcciones de meteorización para trabajos de refracción y reflexión.

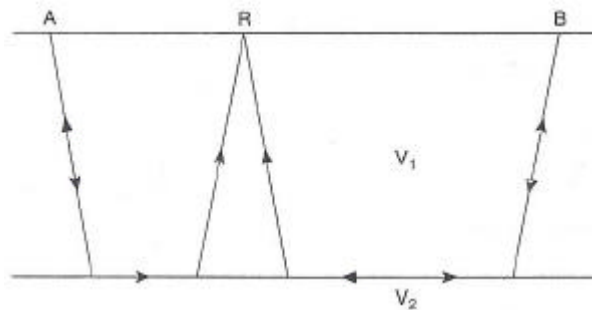


Figura 17. Trayectoria de rayos para un perfil de refracción inverso ilustrando el método Plus Minus. Tomado de Cox M. (1999).

$$(T_A - T_B) \quad 10$$

$$(T_A + T_B - T_{AB}) \quad 11$$

$$Z = 0.5(T_A + T_B - T_{AB}) \frac{V_2 V_1}{\sqrt{V_2^2 - V_1^2}} \quad 12$$

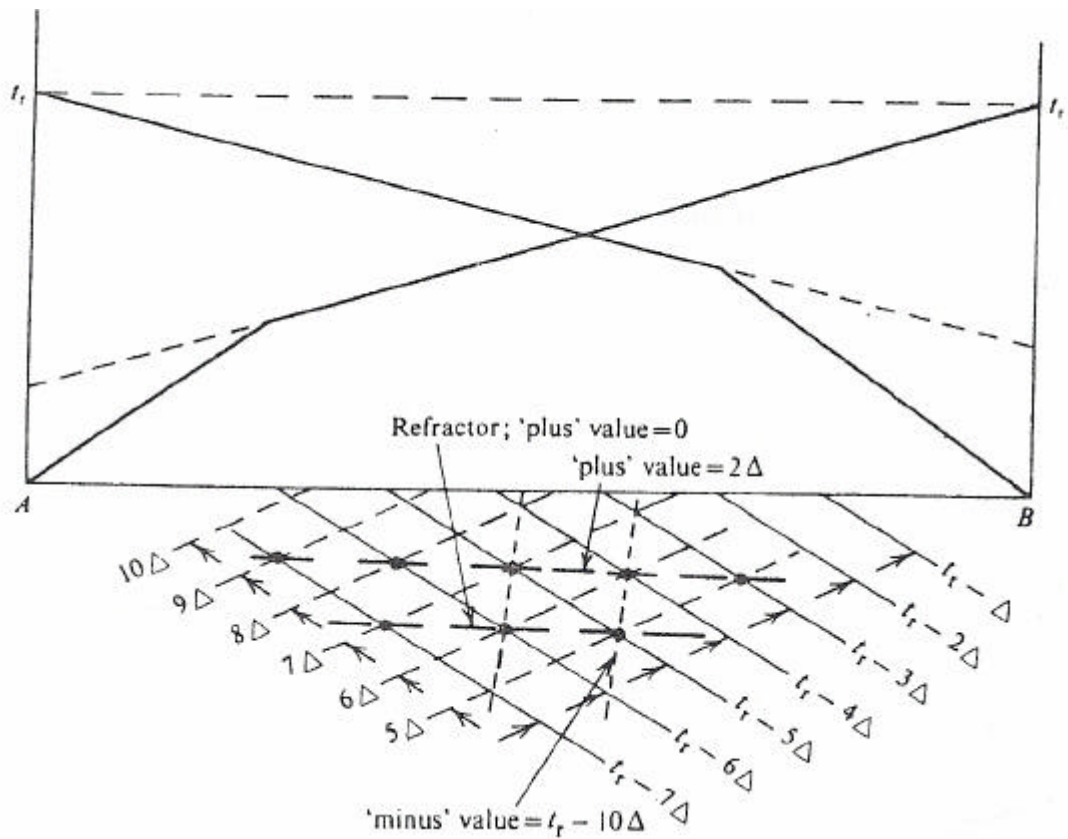


Figura 18. Ilustración del método Plus-Minus. Tomado de Hagedoorn (1959)

3.6 DELAY TIME. Fue introducido por Gardner (1939), es ampliamente usado en interpretación de refracción, principalmente porque varios proyectos basados sobre el uso de tiempos de retraso son menos susceptibles a las dificultades encontradas cuando nosotros intentamos usar las ecuaciones que describen los tiempos de propagación de la refracción en modelos de refractores horizontales, curvados o irregulares de una capa a varias capas o cuando el modelo del refractor es de capas inclinadas o con buzamiento. Asumiendo que los tiempos de refracción han sido corregidos para elevación y meteorización, el *tiempo de retraso* asociado con la trayectoria SMNG en la (Figura 19) es el tiempo de refracción observado en G, t_G , menos el tiempo requerido para que la onda viaje

de P a Q (la proyección de la trayectoria en el refractor) con velocidad V_2 .
Escribiendo d para el tiempo de retraso, tenemos,

$$d = \left(\frac{SM}{V_1} - \frac{PM}{V_2} \right) + \left(\frac{NG}{V_1} - \frac{NQ}{V_2} \right) \quad 13$$

$$d = d_s + d_g \quad 14$$

donde d_s y d_g son conocidos como el *tiempo de retraso de la fuente* y el *tiempo de retraso del geófono* porque ellos están asociados con las porciones de las trayectorias debajo de la fuente y arriba al geófono.

Un valor aproximado de d puede ser encontrado asumiendo que el buzamiento es suficientemente pequeño, es decir, que PQ es aproximadamente igual al offset x . En este caso,

$$d = d_s + d_g \approx t_g - x/V_2 \quad 15$$

Siempre que el buzamiento sea inferior a los 10° , esta relación es suficientemente exacta para muchos propósitos.

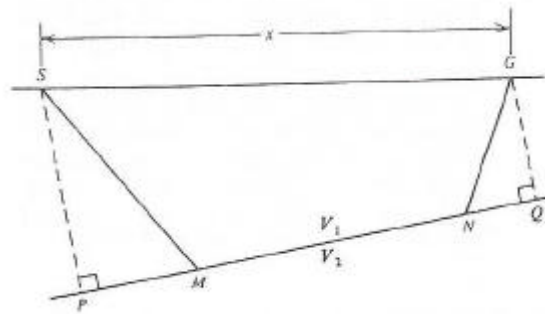


Figura 19. Ilustrando el método Delay Time. Tomado de Sheriff 1995.

3.7 DIMINISHING RESIDUAL MATRICES (DRM).

Gulunay, N. *et al.* (1985), propusieron un método para el caso donde la matriz de las estáticas se asume por ser la suma de los términos fuente y receptor, método que denominaron (DRM).

En estáticas de refracción, la matriz que se descompone son los tiempos de primeros arribos. El problema es descomponer los tiempos de retraso consistentes con la superficie entre los tiempos de retraso fuente y receptor.

4. RESULTADOS MÉTODOS DE REFRACCIÓN: MODELO DEL ESTRATO SOMERO

Los modelos siguientes muestran el espesor y las velocidades de la capa somera, como las incongruencias que se puedan presentar producto de la imprecisión en el tiempo de llegada de los primeros arribos, debido a efectos de la topografía, al ruido y a la falta de cobertura en los extremos de la línea. El Offset utilizado para el calculo de los métodos es de 1.5 Km.

4.1 MÉTODO RECÍPROCO GENERALIZADO (GRM).

4.1.1 Estaciones 1602 hasta 1701. Con la información de primeros arribos obtenidos de la línea sísmica de interés (Figura 20), se hallaron los tiempos-velocidad de la (Figura 21) con la aplicación de la (Ecuación 3) y (Ecuación 4) con los que se calcularon las variaciones laterales de velocidad en el refractor utilizando para ello como valor optimo la separación XY de 0 m. En ella se puede apreciar que hay dos rectas entre las distancias 0 m. a 990 m y 990 m. a 1500 m con velocidades de 2780 m/s y 2938 m/s.

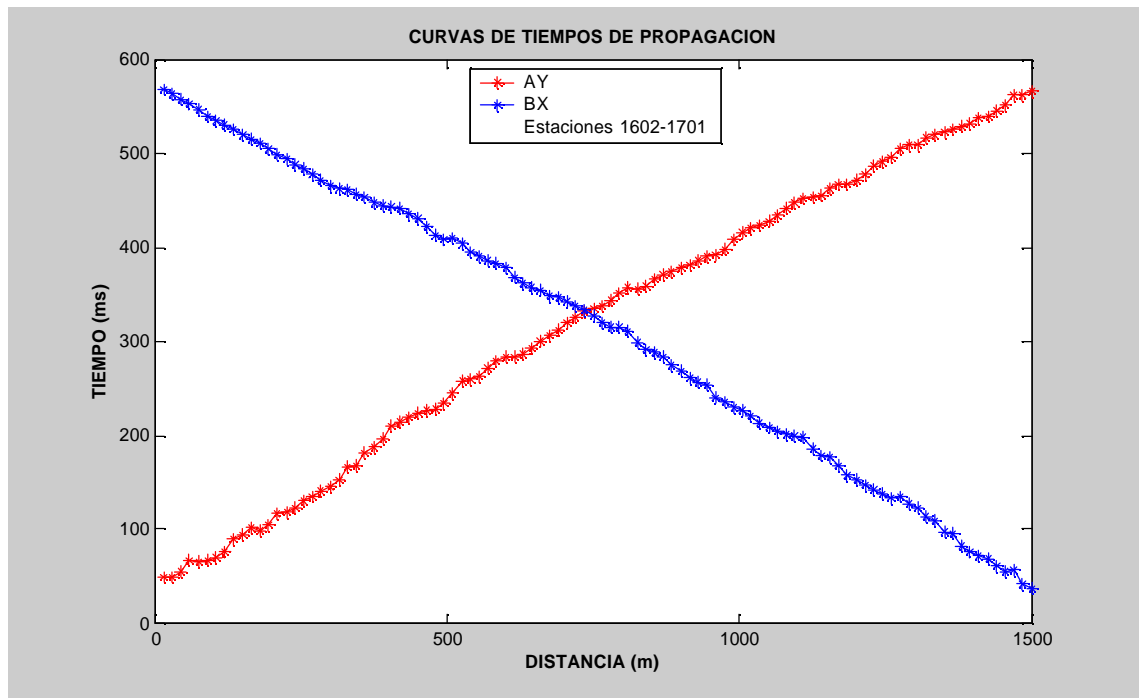


Figura 20. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1602 a 1701.

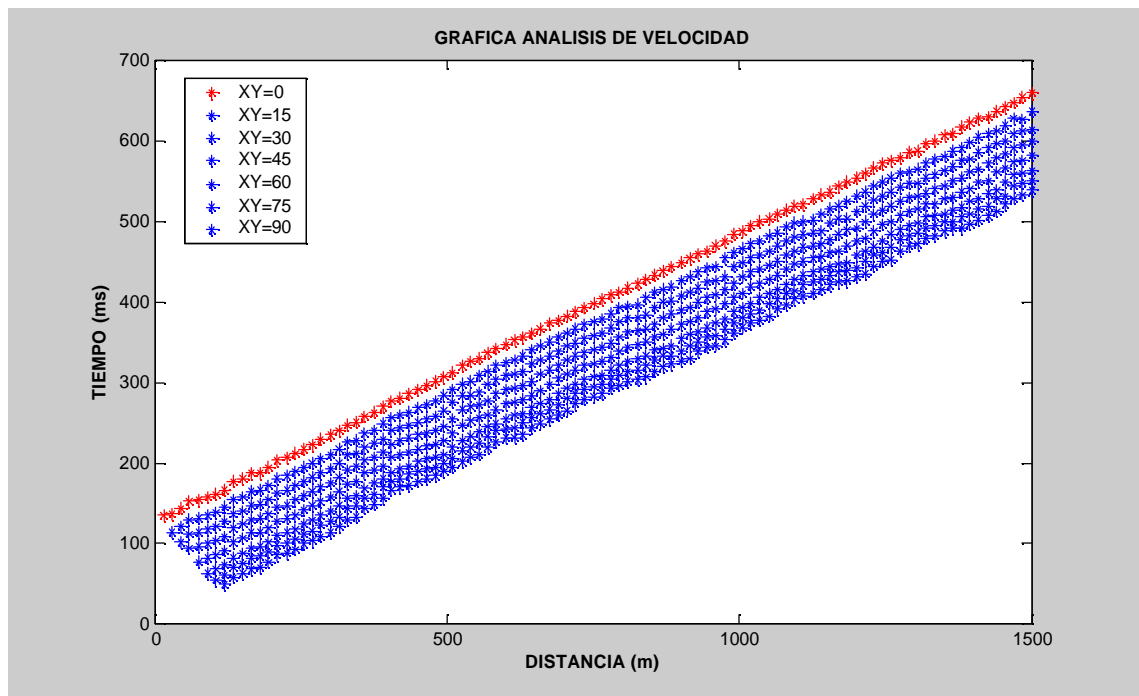


Figura 21. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 90 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos correspondientes a la Figura anterior. El valor óptimo es XY=0 m.

El siguiente paso fue calcular los tiempos correspondientes a la profundidad, ecuación 5, (Figura 22), utilizando la información obtenida de la (Figura 21), en esta figura se aprecia que el valor $XY=0$ m es el que mejor define la superficie del refractor. Con esta información se halló la velocidad de la capa somera y la profundidad del refractor.

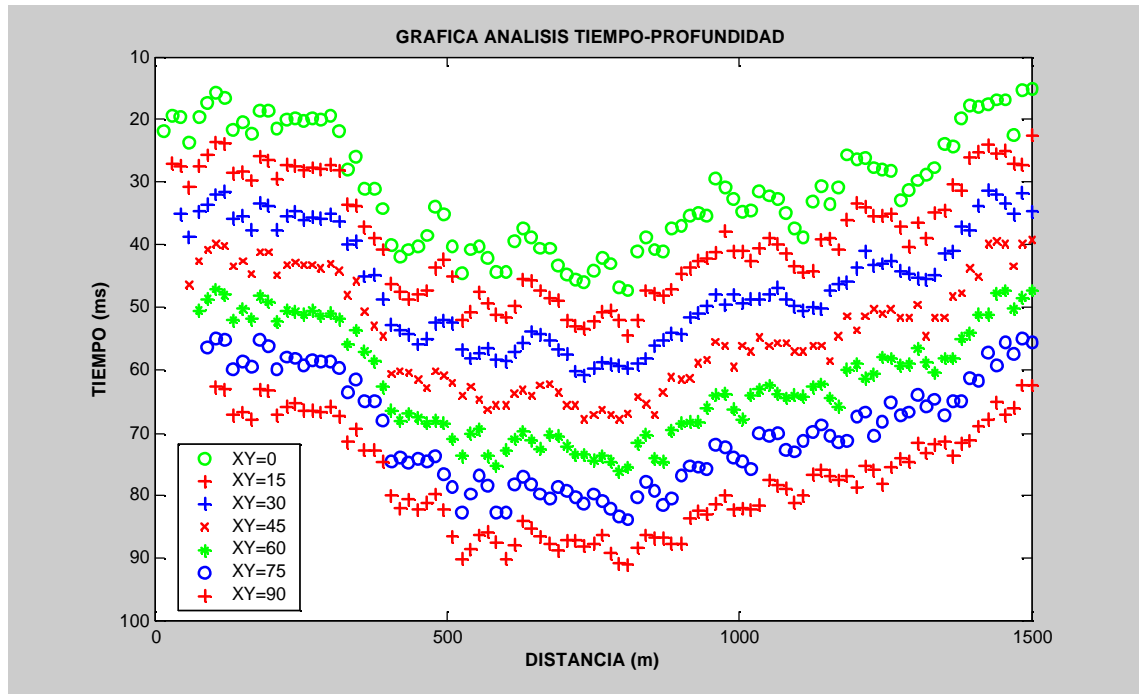


Figura 22. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 90 m, derivados de los datos de velocidad correspondientes a la figura anterior.

Finalmente se obtuvo el modelo de capas someras (Figura 23). La capa de baja velocidad varía lateralmente desde 931 m/s hasta 640 m/s con un espesor de 20m a 30 m. El refractor posee variaciones laterales en velocidad correspondientes a 2780 m/s hasta la estación 1650, una velocidad de 2877 m/s desde la estación 1650 a 1666 y una velocidad de 2938 m/s desde la estación 1666 a 1701.

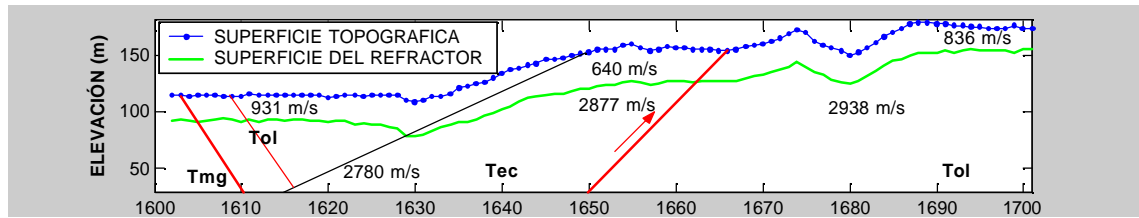


Figura 23. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM.

4.1.2 Estaciones 1701 hasta 1797. Teniendo en cuenta los tiempos de propagación de la (Figura 24), se calcularon los tiempos-velocidad de la (Figura 25) utilizando las ecuaciones 3 y 4, con los que se calcularon las variaciones laterales de velocidad en el refractor utilizando para ello como valor óptimo la separación XY de 15 m. En ella se puede apreciar que hay dos rectas entre las distancias 0 a 990 m y 990 m a 1440 m con velocidades de 2740 m/s y 3186 m/s.

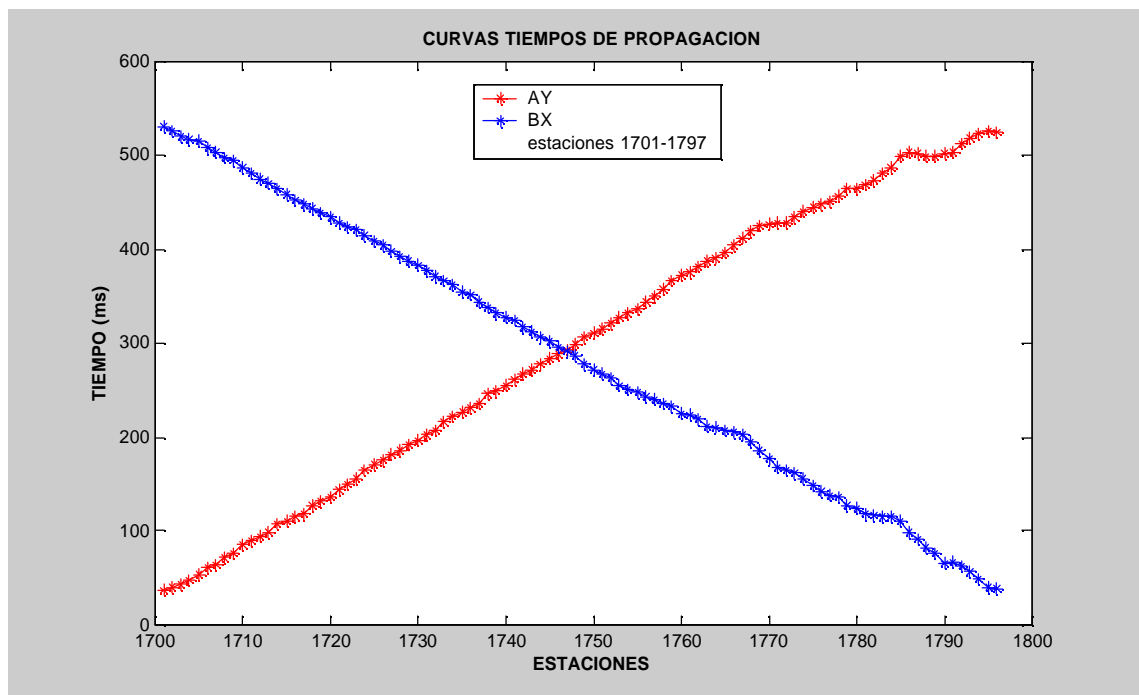


Figura 24. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1701 a 1797.

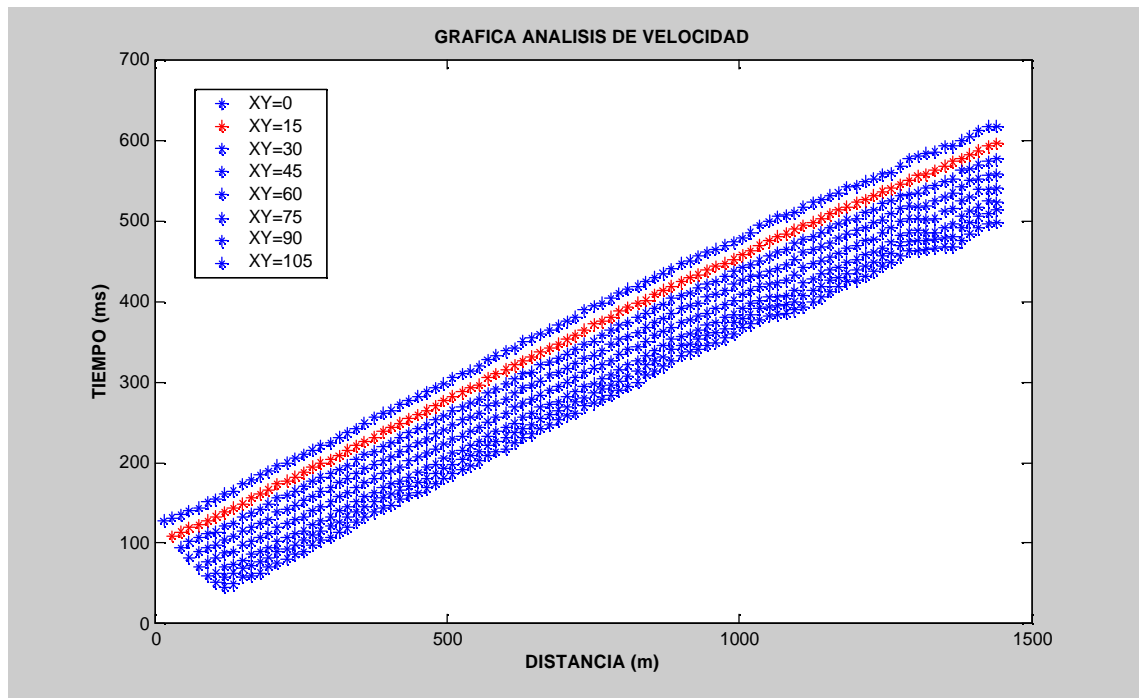


Figura 25. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 105 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos correspondientes a la figura anterior.

Posteriormente se calcularon los tiempos correspondientes a la profundidad, ecuación 5, (Figura 26), utilizando la información obtenida de la (Figura 25), en esta figura se aprecia que el valor XY=15 m es el que mejor define la superficie del refractor. Con esta información se halló la velocidad de la capa somera y la profundidad del refractor.

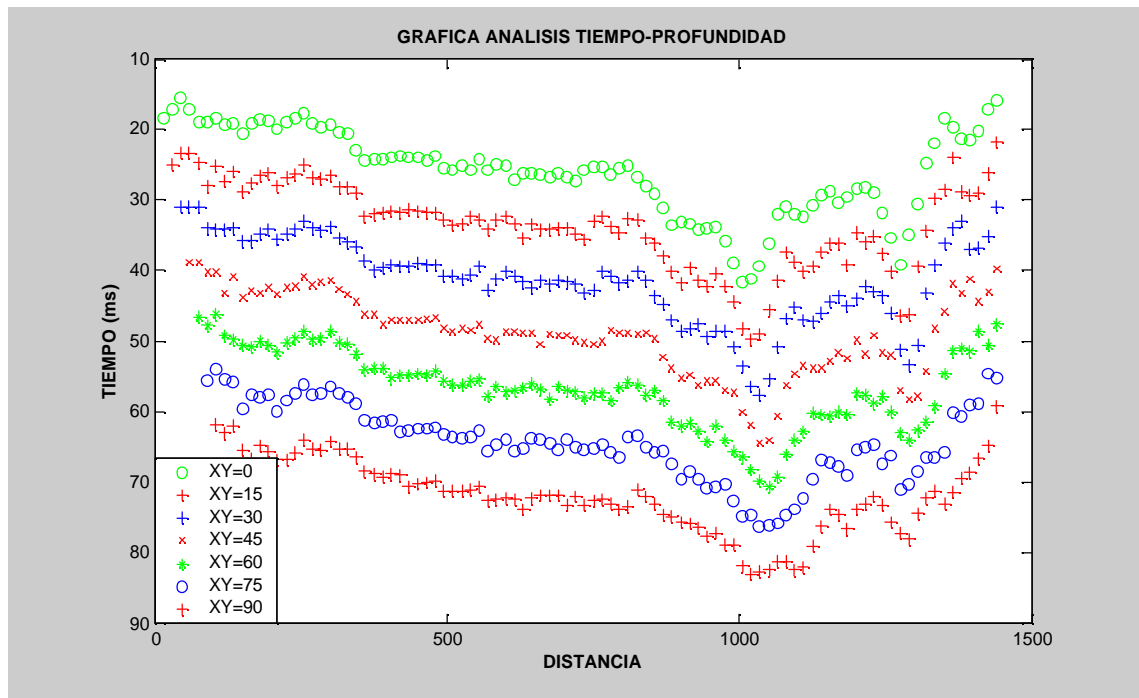


Figura 26. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m a 90 m, derivados de los datos de velocidad correspondientes a la figura anterior.

Finalmente se obtuvo el modelo de capas someras (Figura 27). La capa de baja velocidad o capa meteorizada varía lateralmente desde 917 m/s hasta 625 m/s con un espesor de 21 m a 30 m. El refractor posee variaciones laterales en velocidad correspondientes a 2740 m/s hasta la estación 1767, y una velocidad de 3186 m/s desde la estación 1767 a 1797.

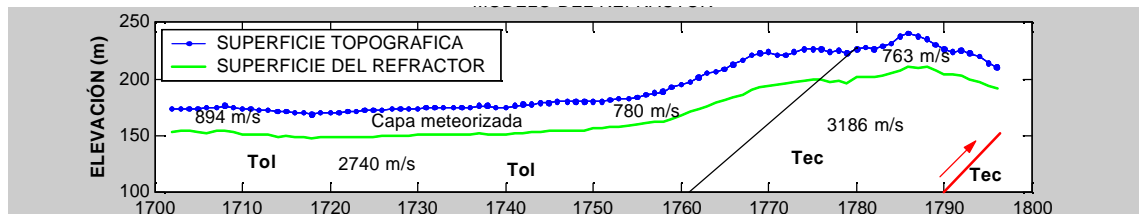


Figura 27. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM.

4.1.3 Estaciones 1797 hasta 1896. A partir de los tiempos de propagación mostradas en la (Figura 28), se obtuvieron los tiempos-velocidad de la (Figura 29), utilizando las ecuaciones 3 y 4, con los que se calcularon las variaciones laterales de velocidad en el refractor utilizando para ello como valor optimo la separación XY de 15 m. Las irregularidades en las curvas son debidas a la irregularidad en la superficie, a pesar de esto, se pueden identificar tres variaciones laterales entre las distancias 0 m a 945 m, 945 m a 1290 m y 1290 m a 1485 m con velocidades de 3029 m/s, 3489 m/s y 2290 m/s respectivamente.

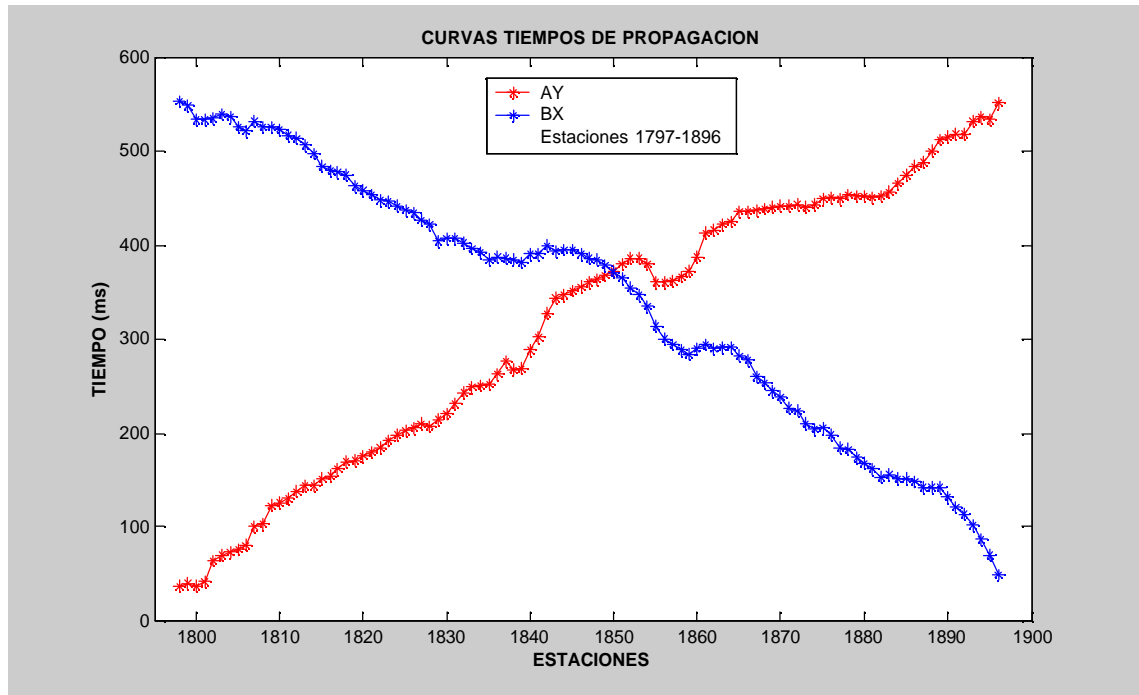


Figura 28. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1797 a 1896.

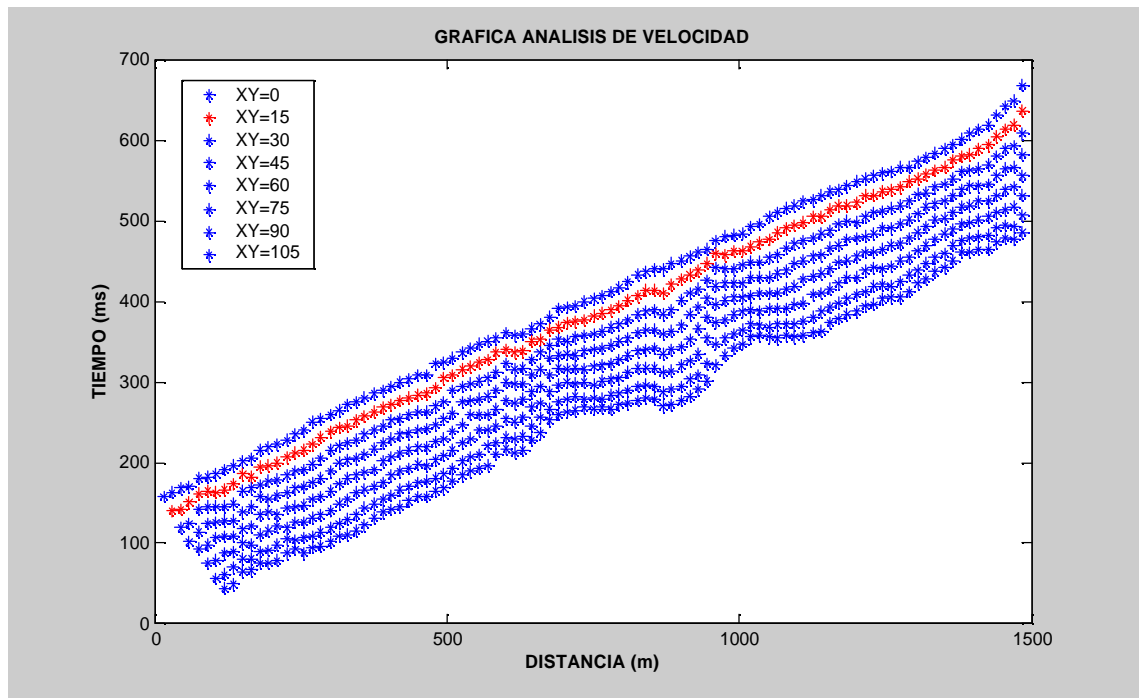


Figura 29. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m a 105 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos propios de la figura anterior.

Seguidamente se calcularon los tiempos correspondientes a la profundidad de la capa meteorizada, ecuación 5, (Figura 30), utilizando la información obtenida de la (Figura 29), en esta figura se aprecia que el valor XY=15 m es el que mejor define la superficie del refractor. De acuerdo a la información obtenida de la ecuación 5, se halló la velocidad de la capa somera y la profundidad del refractor.

Finalmente se obtuvo el modelo de capas someras (Figura 31). La capa de baja velocidad o capa meteorizada varía lateralmente desde 477 m/s hasta 1065 m/s con un espesor de 14 m a 47 m. El refractor posee variaciones laterales de velocidad correspondientes a 3029 m/s hasta la estación 1860, una velocidad de 3489 m/s desde la estación 1860 a 1883 y una velocidad de 2290 m/s desde la estación 1883 a 1896.

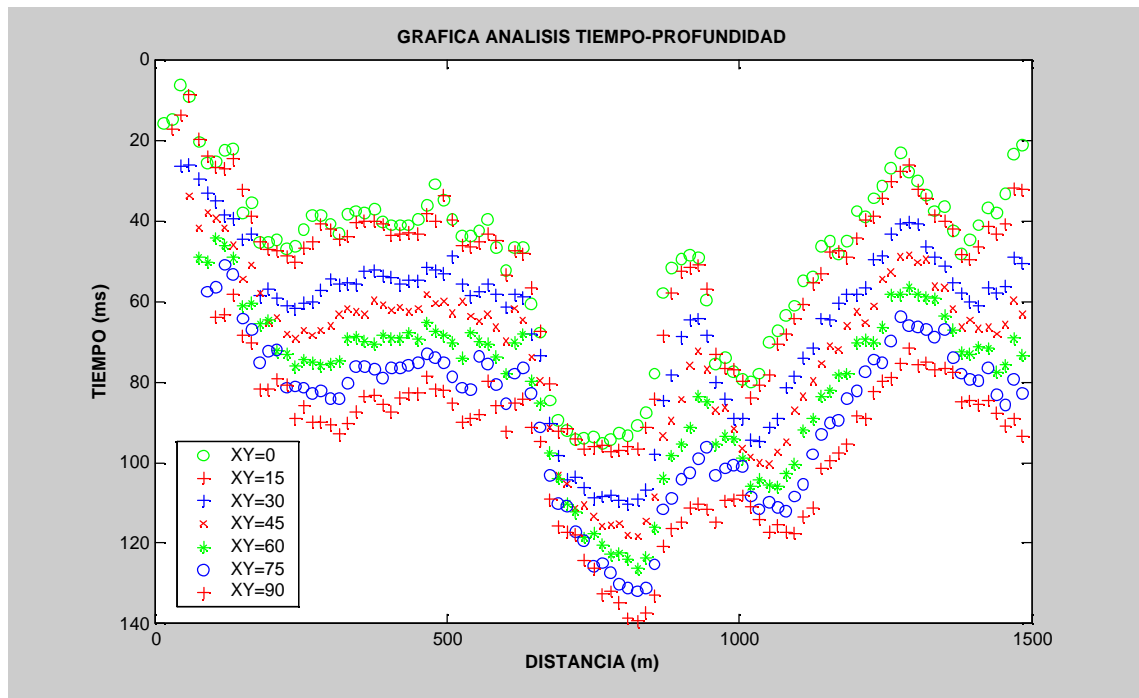


Figura 30. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 90 m.

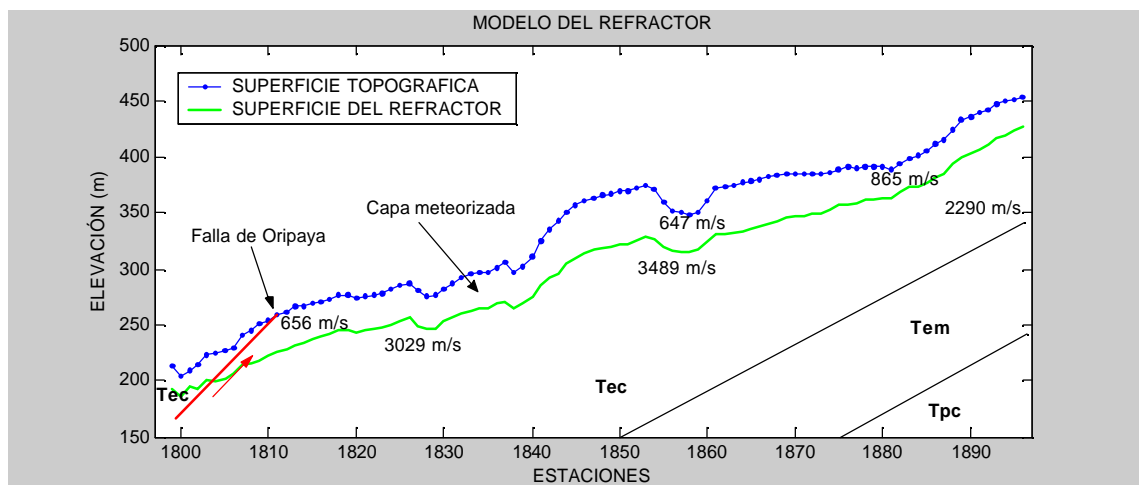


Figura 31. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM.

4.2 MÉTODO DE SUAVIZADO ESTÁTICO (GRM SSM).

4.2.1 Estaciones 1602 hasta 1701. Utilizando la información de los tiempos de propagación mostradas en la Figura 20, y tiempos-velocidad en la (Figura 21), cuyas velocidades son 2780 m/s y 2938 m/s entre las distancias 0 m a 990 m y 990 m a 1500 m, se calcularon los tiempos-profundidad mostrados en la (Figura 32), se promediaron los tiempos de todas las separaciones XY, para restarlos a los tiempos-profundidad de XY=0, y así minimizar las anomalías debido a la superficie. Como se puede ver en la (Figura 33), en los nuevos tiempos de propagación, se minimizaron las anomalías superficiales, y con ellos se calcularon los nuevos tiempos-velocidad (Figura 34), cuyo valor optimo es XY=15 m. Las velocidades obtenidas corresponden a las distancias 0 m a 990 m y 990 m a 1500 m cuyas velocidades son 2783 m/s y 2912 m/s, respectivamente.

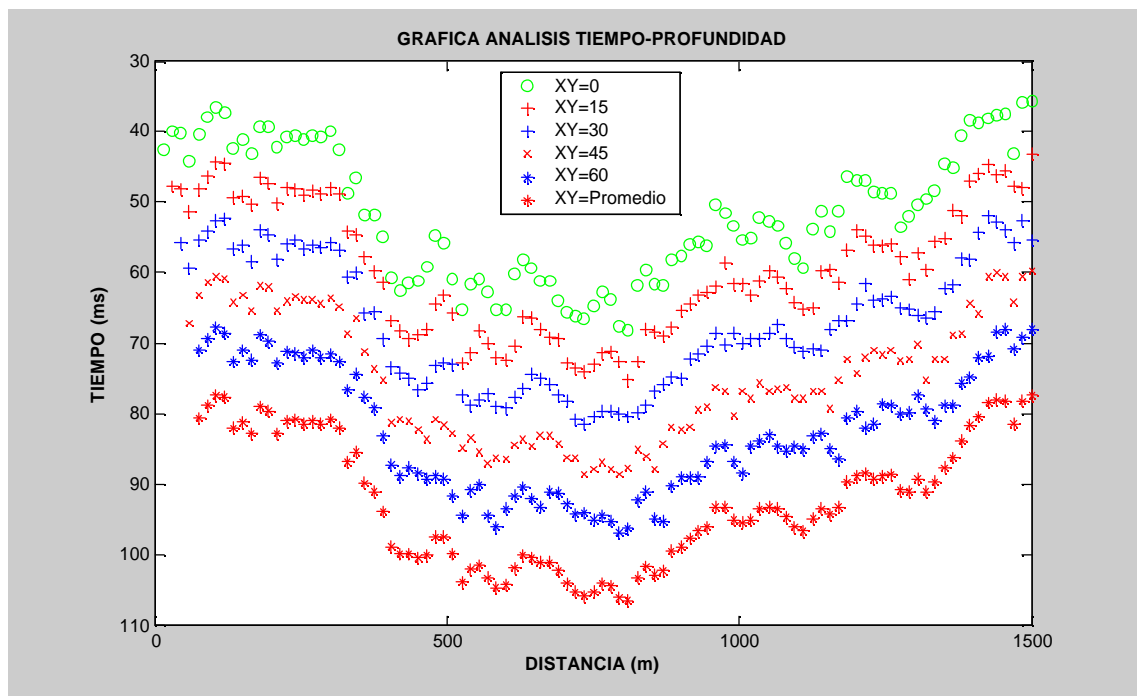


Figura 32. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m a 90 m. La última curva corresponde al valor promedio de las separaciones XY.

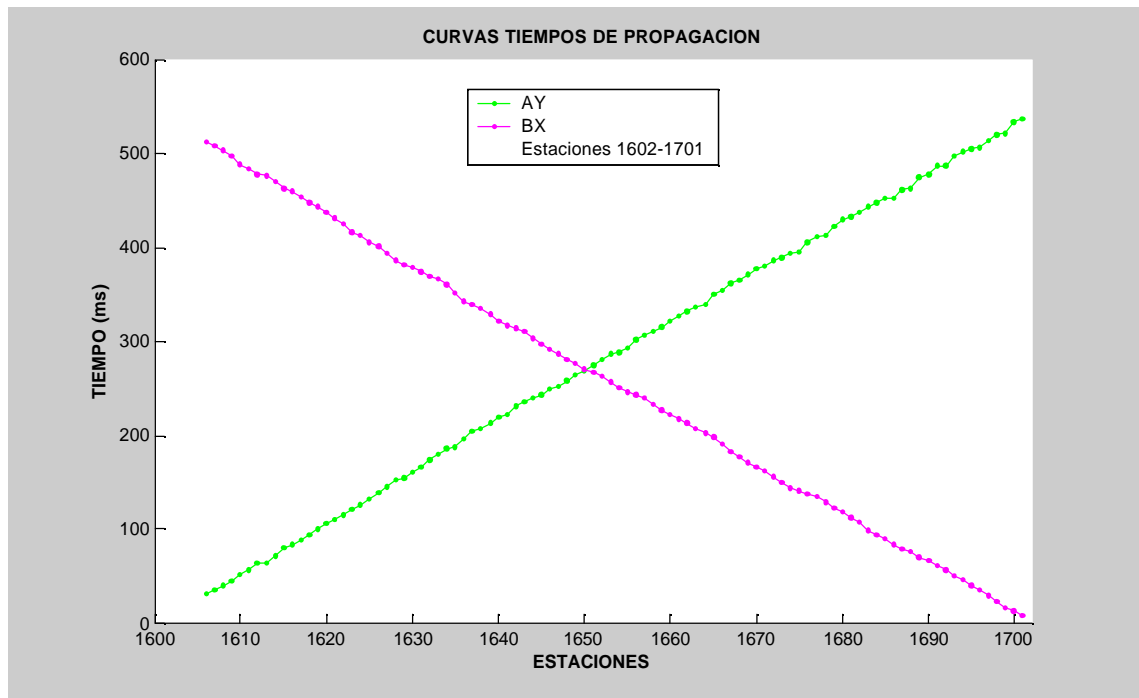


Figura 33. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1602 a 1701 aplicando el método GRM SSM.

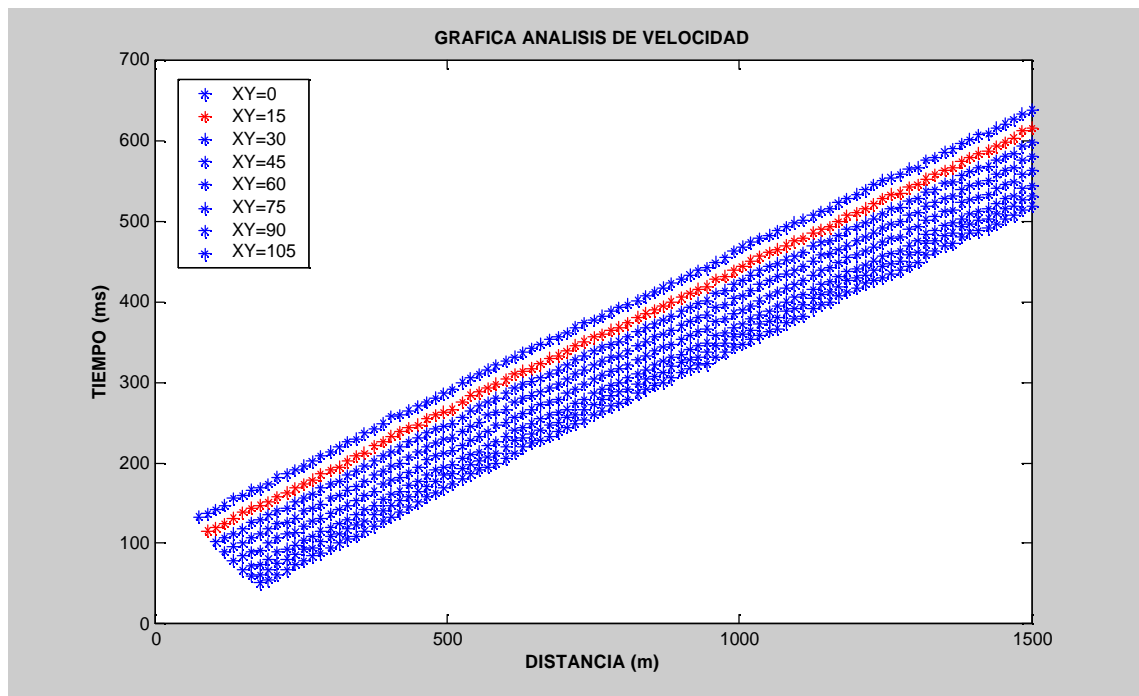


Figura 34. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m a 105 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos propios de la figura anterior. El valor óptimo es XY=15 m.

Consecutivamente se calcularon los tiempos correspondientes a la profundidad de la capa meteorizada, (Ecuación 5), (Figura 35), utilizando la información obtenida de la (Figura 34), en esta figura se aprecia que el valor XY=15 m es el que mejor define la superficie del refractor. A partir de la información obtenida con la (Ecuación 5), se halló la velocidad de la capa somera y la profundidad del refractor.

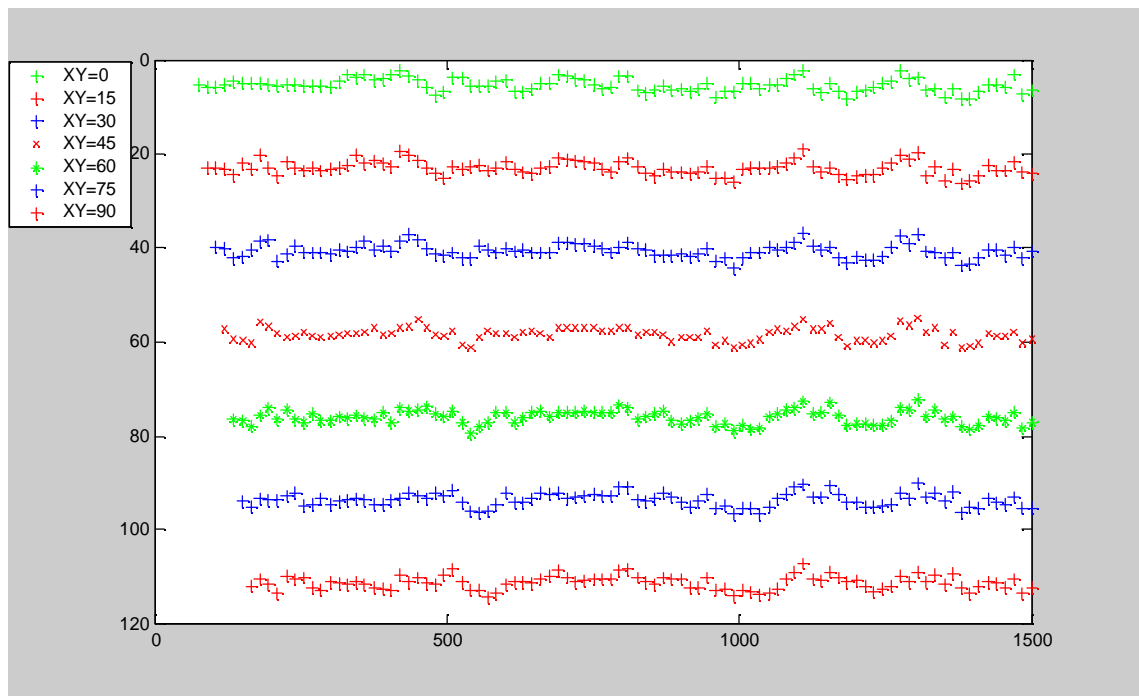


Figura 35. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m a 90 m, derivados de los datos de tiempo-velocidad anteriores.

Finalmente se obtuvo el modelo de capas someras (Figura 36). La capa de baja velocidad o capa meteorizada varía lateralmente desde 1270 m/s hasta 1715 m/s con un espesor de 10 m a 15 m. El refractor posee variaciones laterales de velocidad correspondientes a 2783 m/s hasta la estación 1668, una velocidad de 2912 m/s desde la estación 1668 a 1701.

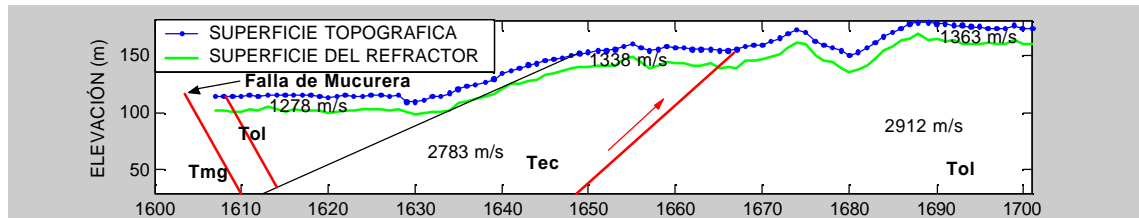


Figura 36. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM SSM.

4.2.2 Estaciones 1701 hasta 1797. Con los datos de tiempos de propagación de la (Figura 24), y con los datos promediados de tiempos-velocidad de la (Figura 37), teniendo en cuenta que las velocidades calculadas son 2726 m/s y 3139 m/s correspondiendo a las distancias de 0 m a 870 m y 870 m a 1440 m. Respectivamente con esta información se calcularon los tiempos-profundidad de la (Figura 38), y con el promedio de los tiempos de acuerdo a las separaciones XY de 0 a 60 m, se restaron a los tiempos-profundidad de XY=0, minimizando las anomalías aportadas por la superficie. Los nuevos tiempos de propagación de la (Figura 39), tienen minimizadas las contribuciones de la superficie, con los cuales se calcularon los tiempos-velocidad de la (Figura 40), el cual tiene como valor óptimo la distancia XY=15 m. Las velocidades de 2759 m/s y 3204 m/s se encuentran entre las distancias 0 m a 990 m y 990 m a 1500 m respectivamente.

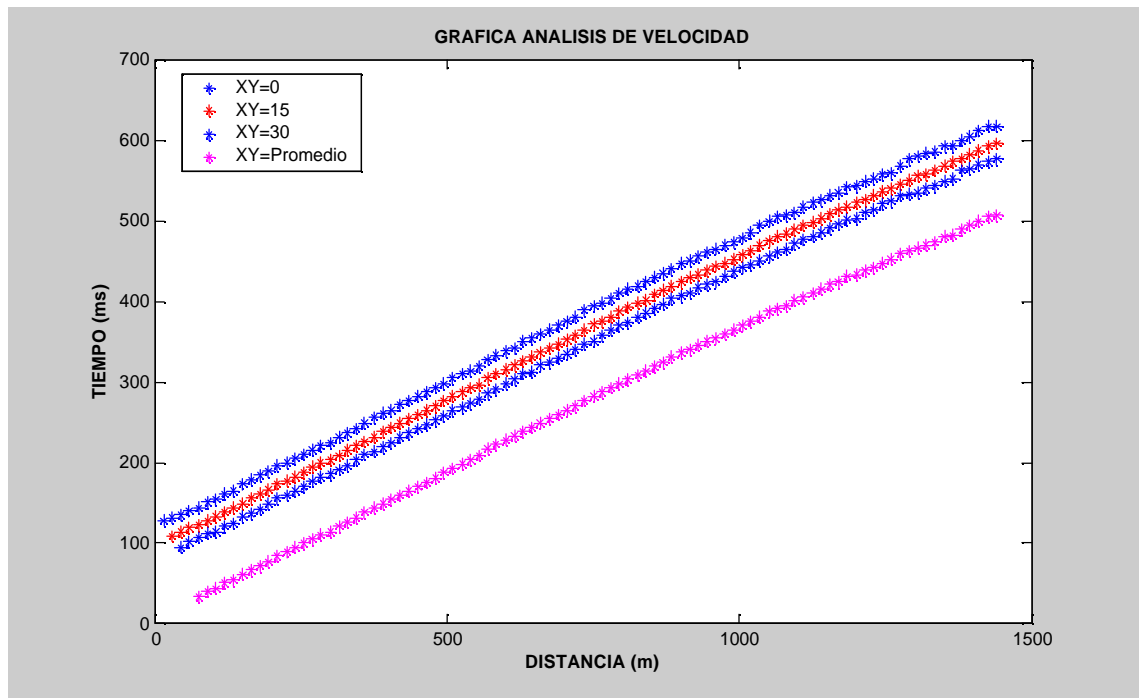


Figura 37. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 30 m. El valor óptimo es XY=promedio.

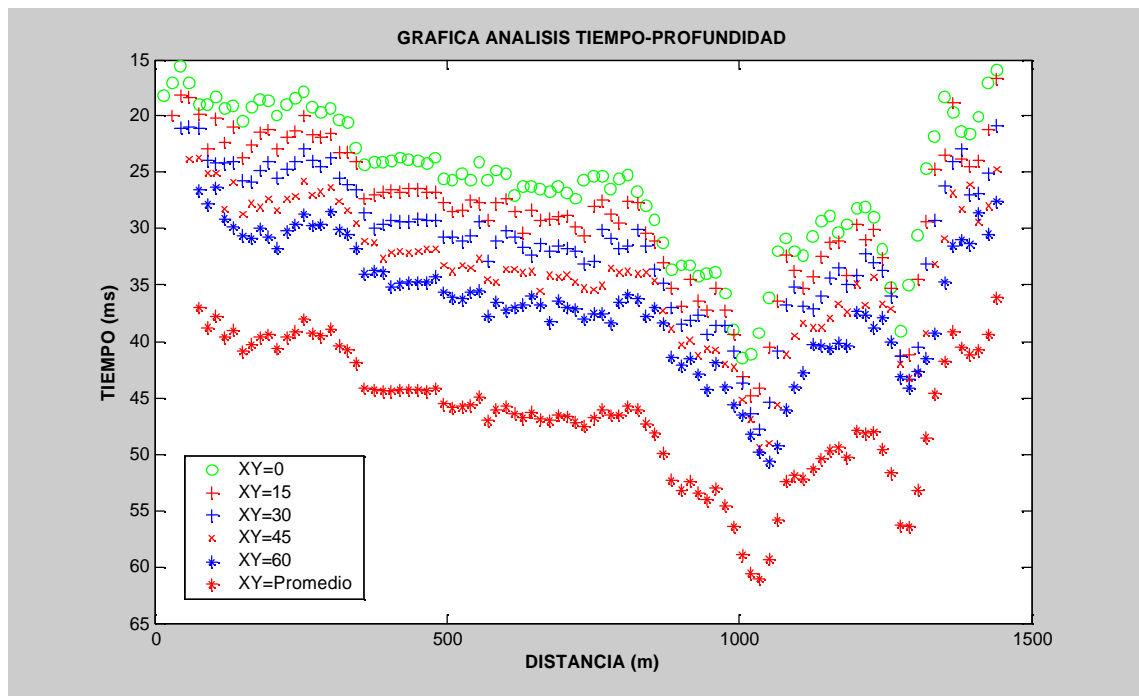


Figura 38. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 60 m, derivados de los datos de tiempo-velocidad. La última curva corresponde al valor promedio de las separaciones XY.

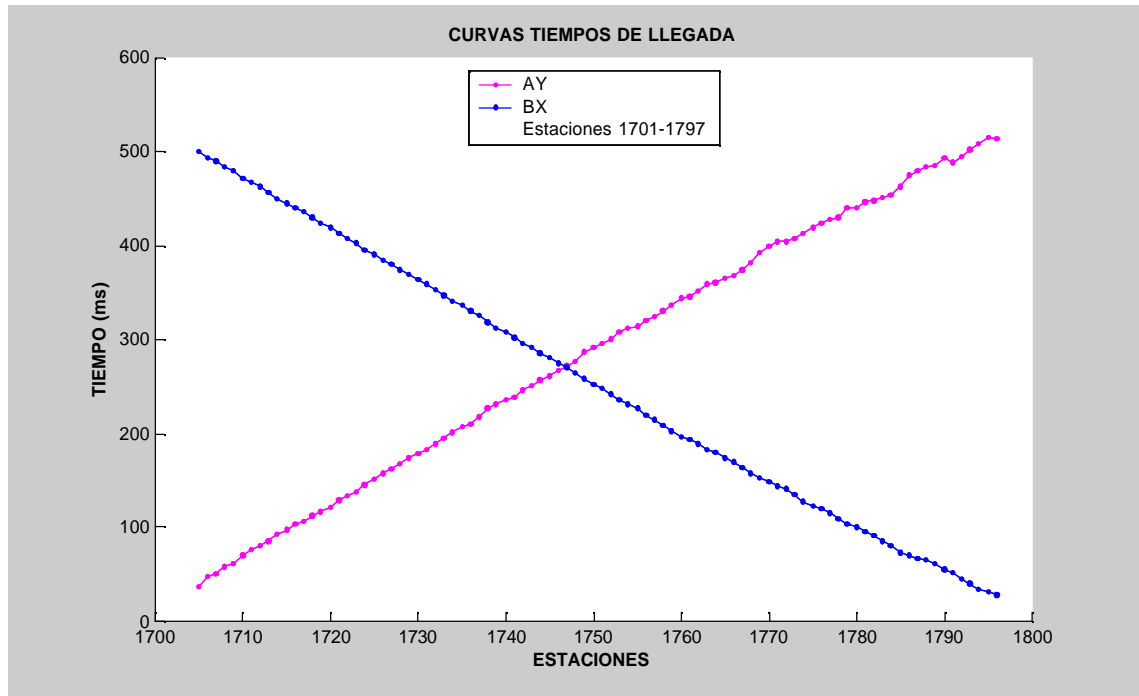


Figura 39. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1701 a 1797 aplicando el método GRM SSM.

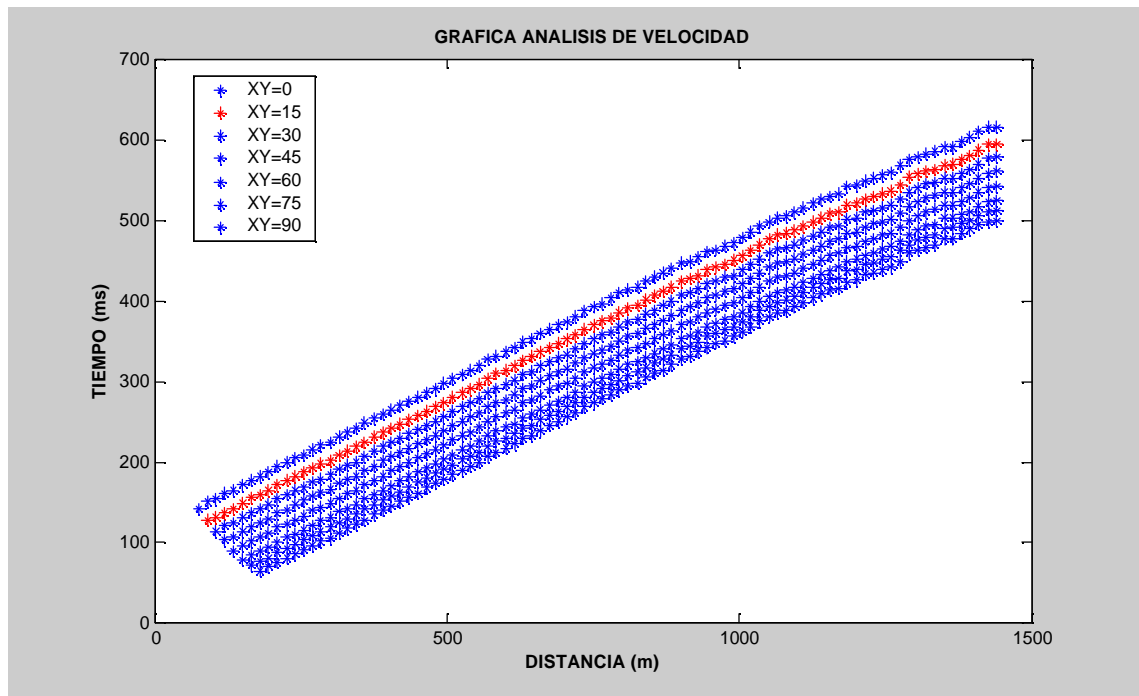


Figura 40. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 105 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos. El valor óptimo es XY=15 m.

Seguidamente se calcularon los tiempos referentes a la profundidad de la capa meteorizada, con la ecuación 5, de acuerdo a la (Figura 41), el valor $XY=15$ m fue escogido para definir la superficie del refractor. Conforme a la información obtenida de la ecuación 5, se halló la velocidad de la capa somera y la profundidad del refractor.

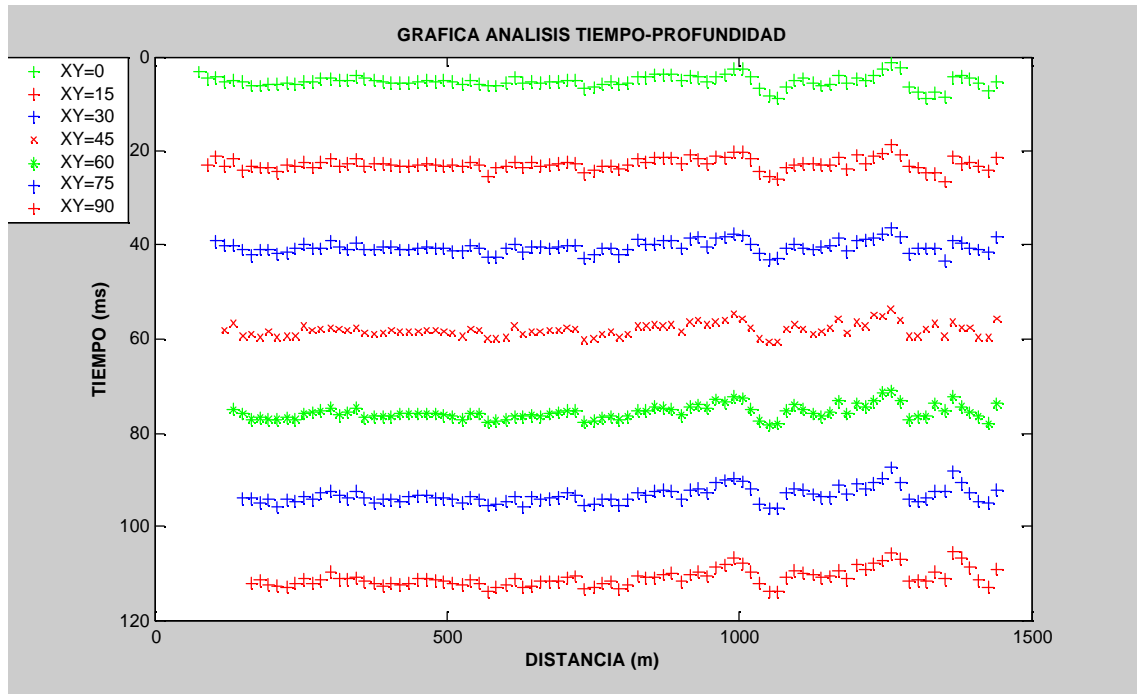


Figura 41. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 90 m, derivados de los datos de tiempo-velocidad.

Finalmente se calculó el modelo de capas someras (Figura 42). La capa meteorizada varía lateralmente desde 1280 m/s hasta 1620 m/s con un espesor de 11 m a 15 m. El refractor posee variaciones laterales de velocidad correspondientes a 2759 m/s hasta la estación 1767, y una velocidad de 3204 m/s desde la estación 1767 a 1797.

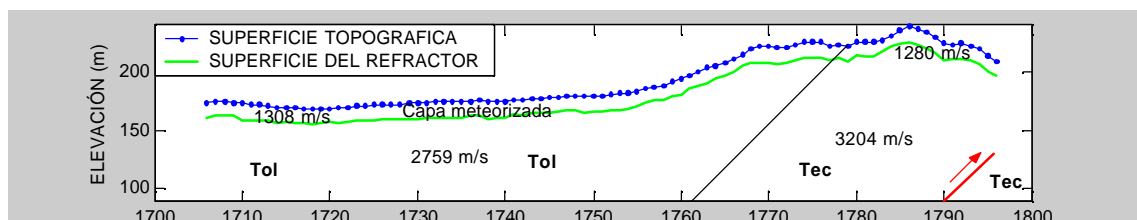


Figura 42. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM SSM.

4.2.3 Estaciones 1797 hasta 1896. A partir de los datos de tiempos de propagación de la (Figura 28), se realizó el cálculo del promedio de las distancias XY de 0 a 60 m, correspondientes a los tiempos-velocidad de la (Figura 43), cuyas velocidades son 3044 m/s hasta una distancia de 990 m y 3287 m/s entre el intervalo de distancia de 990 m a 1440 m. Después se obtuvieron las anomalías debidas a la superficie luego de hacer la resta entre los tiempos-profundidad de acuerdo a la variación $XY=0$, con los tiempos-profundidad de la variación $XY=\text{promedio}$ como se ve en la (Figura 44). En la (Figura 45) se aprecian los tiempos de propagación de la (Figura 28), después de restarles las anomalías calculadas anteriormente.

Los tiempos-velocidad correspondientes a los nuevos tiempos de propagación se aprecian en la (Figura 46). Las velocidades de 2818 m/s, 3149 m/s, 3681 m/s y 2338 m/s se han ubicado entre las distancias 0 m a 375 m, 375 m a 945 m, 945 m a 1200 m y 1200 m a 1485 m, respectivamente.

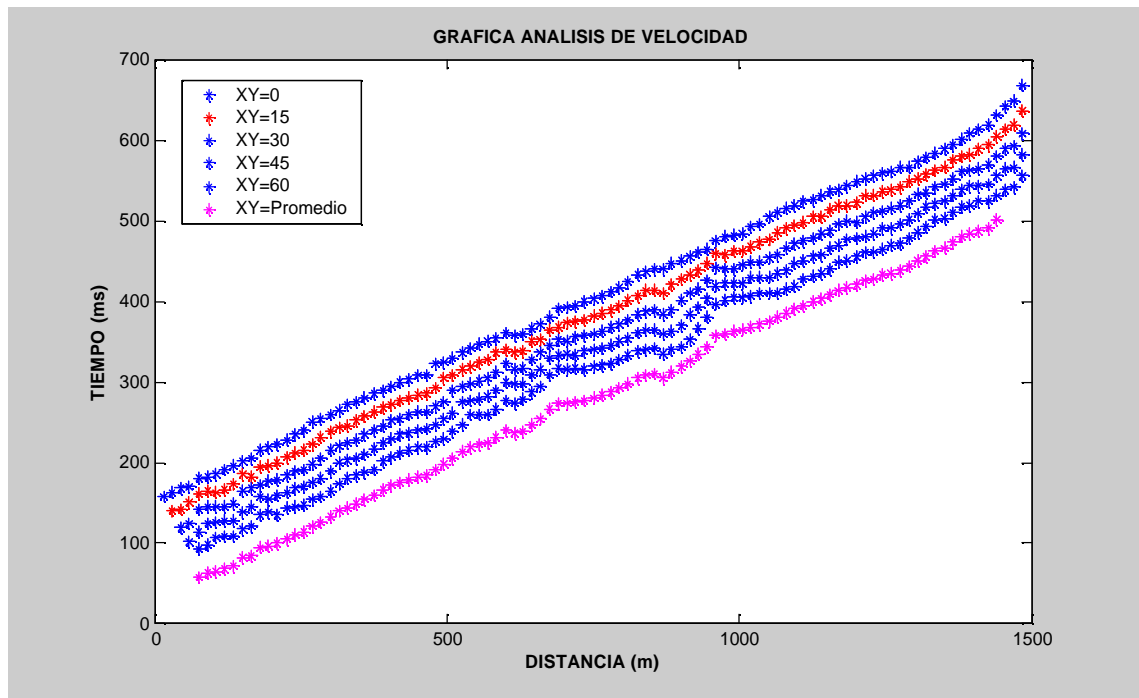


Figura 43. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 60 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos. El valor óptimo es XY=promedio.

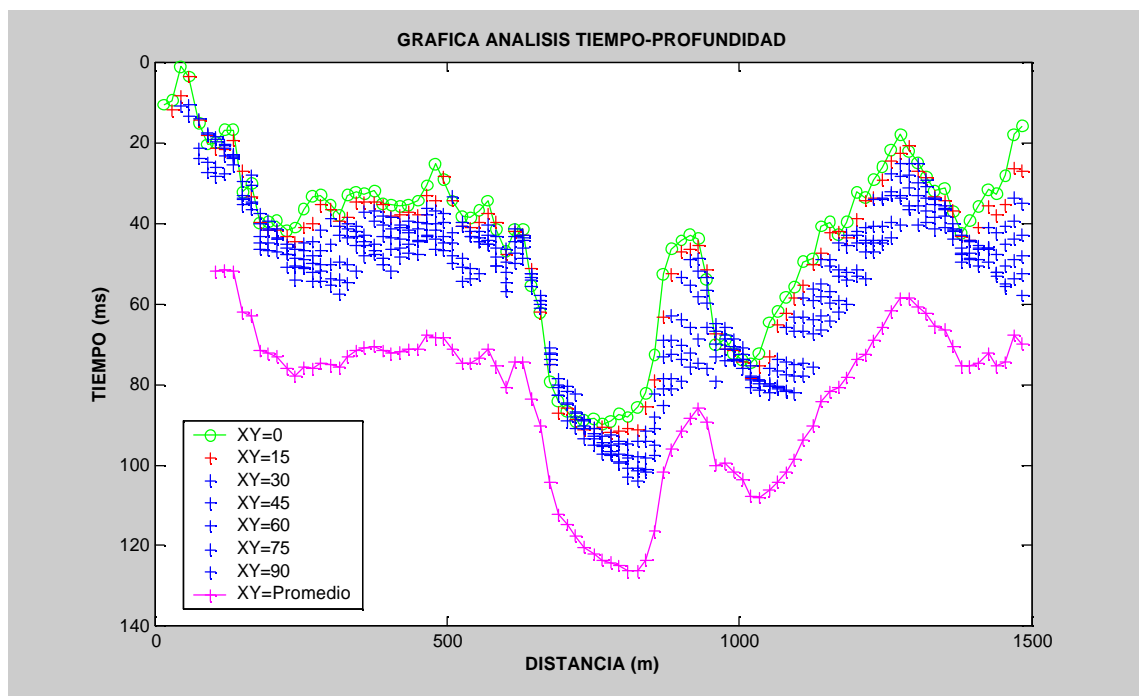


Figura 44. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 90 m, derivados de los datos de tiempo-velocidad. La última curva corresponde al valor promedio de las separaciones XY.

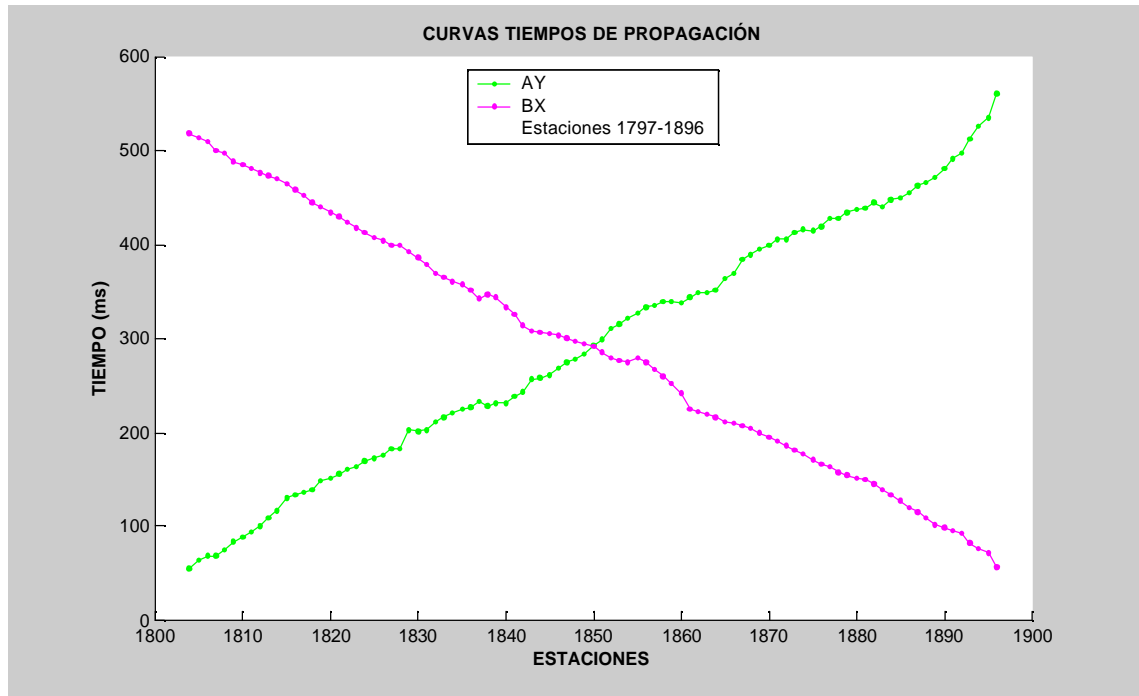


Figura 45. Primeros arribos obtenidos de la línea de interés del programa Uribante 2005 correspondientes a las estaciones 1797 a 1896 aplicando el método GRM SSM.

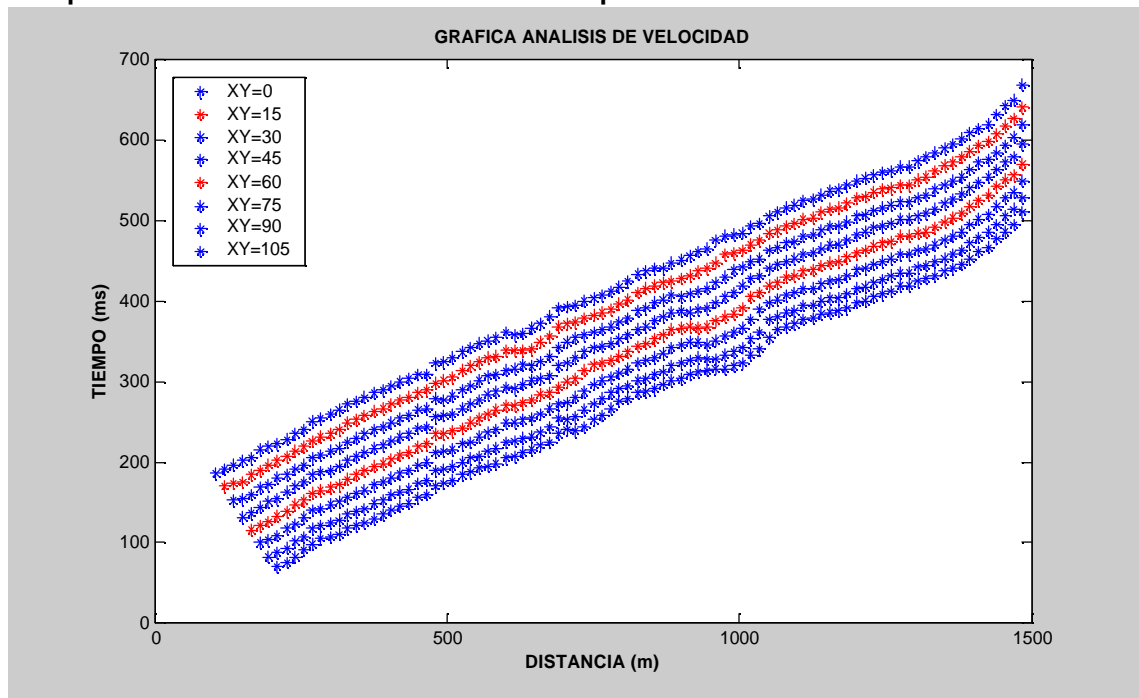


Figura 46. Análisis de velocidades para valores de XY de 0 m. a 105 m, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos. El valor óptimo es XY=15 m.

Consecutivamente se calcularon los tiempos concernientes a la profundidad de la capa meteorizada, con la ecuación 5, de acuerdo a la (Figura 47), el valor XY=15 m fue seleccionado para definir la superficie del refractor. La velocidad de la capa somera y la profundidad del refractor, se hallaron a partir de la información obtenida siendo la (Ecuación 5).

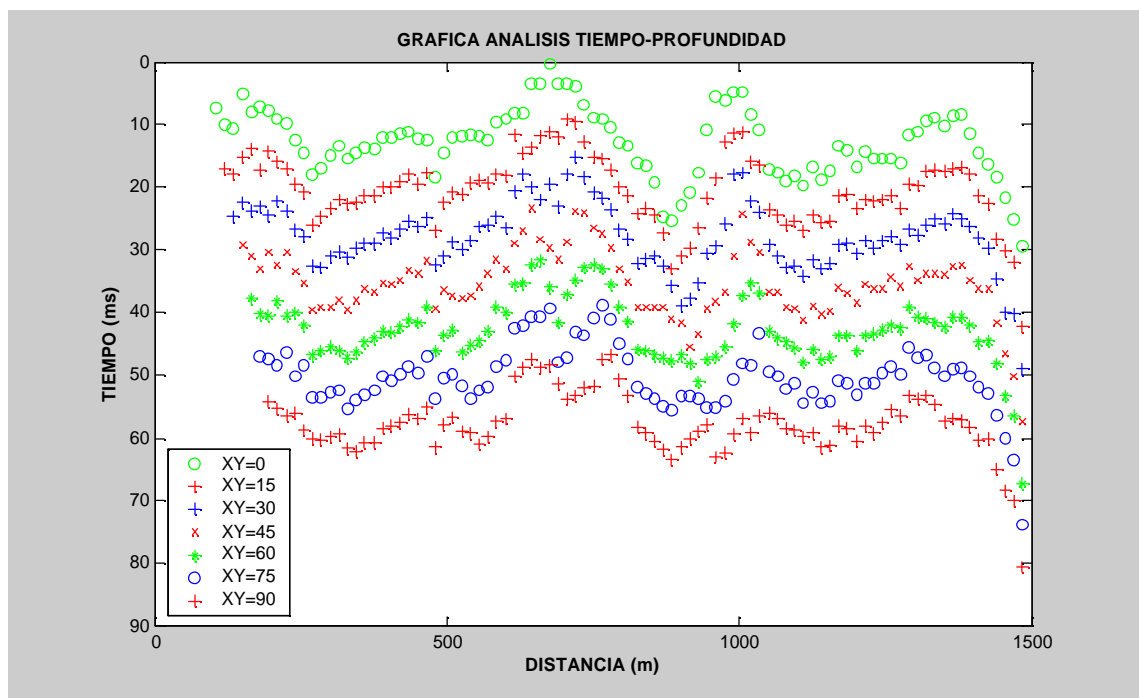


Figura 47. Análisis de tiempos para calcular la profundidad del refractor, con valores de XY de 0 m. a 90 m, derivados de los datos de tiempo-velocidad.

Después se calculo el modelo de capas someras (Figura 48). La capa meteorizada varía lateralmente desde 760 m/s hasta 1854 m/s con un espesor de 10 m a 25 m. El refractor posee variaciones laterales de velocidad de 2818 m/s, 3149 m/s, 3681 m/s y 2338 m/s ubicadas entre las estaciones 1797 a 1822, 1822 a 1860 , 1860 a 1877 y 1877 a 1896, respectivamente.

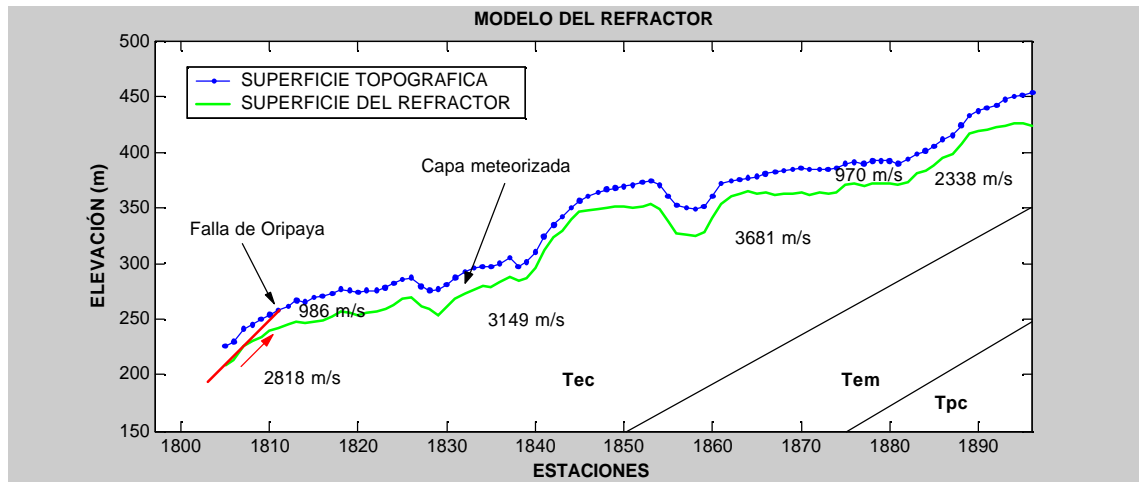


Figura 48. Modelo del estrato somero obtenido por el método GRM SSM.

4.3 MÉTODO PLUS-MINUS.

4.3.1 Estaciones 1602 hasta 1701. Teniendo en cuenta los tiempos de propagación de la Figura 20, se calcularon los tiempos MINUS representados en la (Figura 49) a partir de la (Ecuación 10) obteniendo velocidades en el refractor iguales a 2780 m/s y 2921 m/s correspondiendo a las distancias de 0 m a 990 m y 990 m a 1500 m respectivamente.

Para calcular la profundidad del refractor reemplace en la (Ecuación 12) la velocidad de la capa meteorizada igual a 850 m/s tomada de la medición mini VSP y se calcularon los tiempos PLUS (Ecuación 11) representados en la (Figura 50), junto con la sustitución de la velocidad del refractor calculada anteriormente. El resultado es mostrado en la (Figura 51), la profundidad de la capa meteorizada es de 15 m a 45 m y las velocidades del refractor son de 2780 m/s hasta la estación 1650 m/s y 2921 m/s de la estación 1650 a 1701.

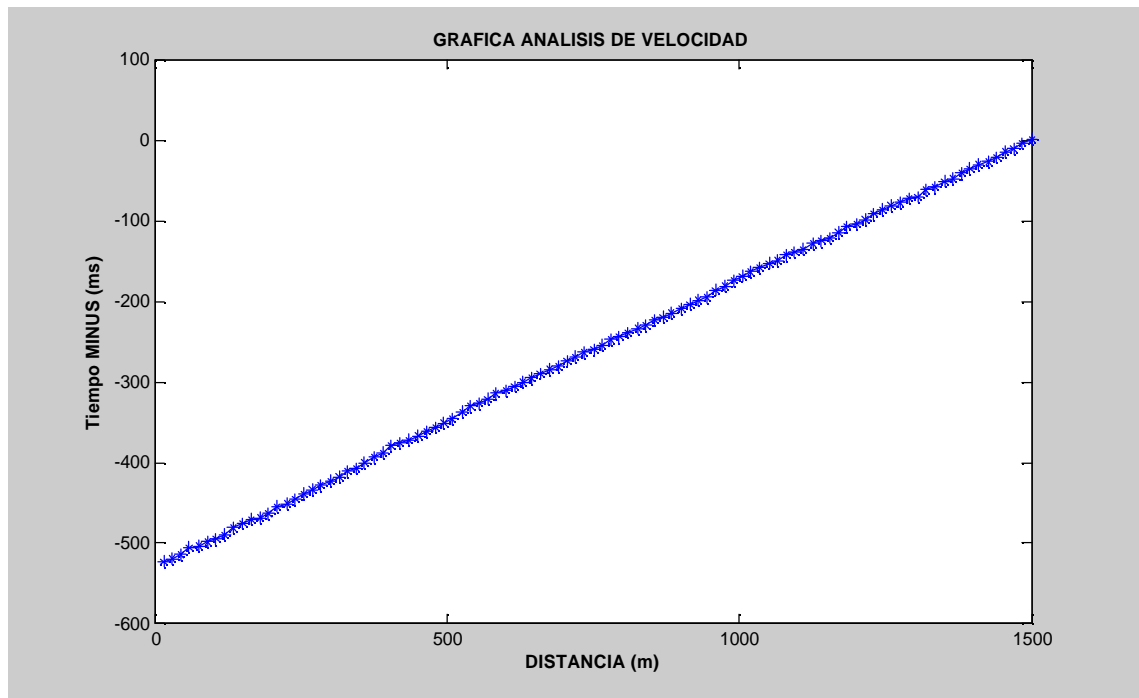


Figura 49. Análisis de tiempo MINUS, para calcular la velocidad del refractor.

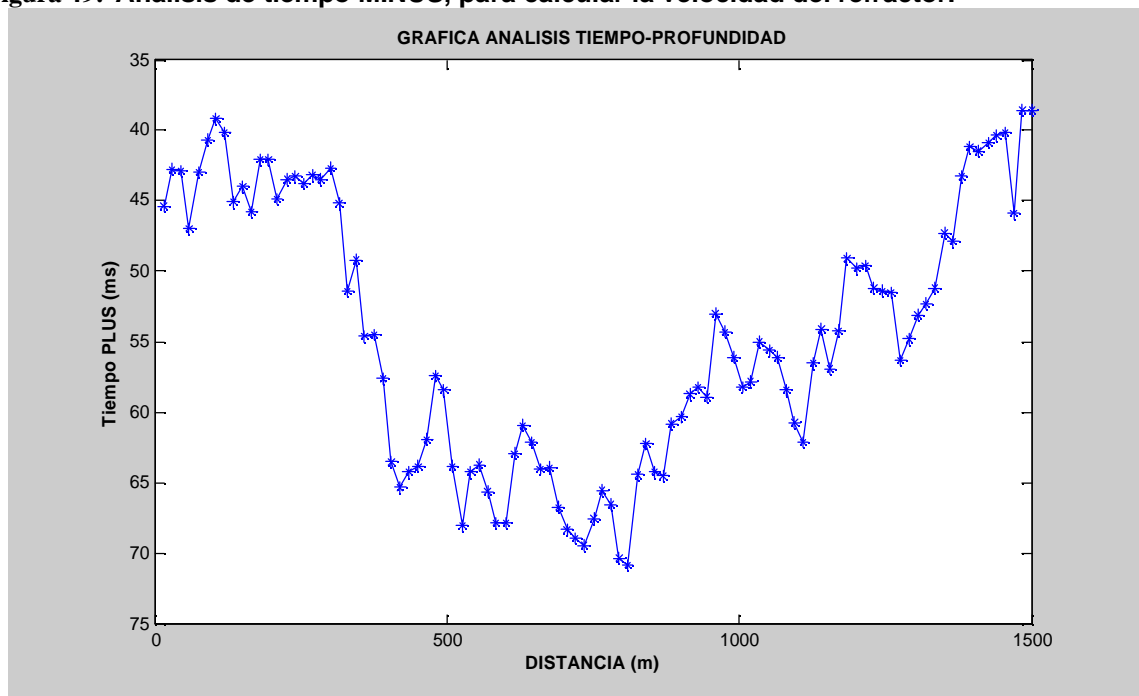


Figura 50. Análisis de tiempo PLUS, utilizados para calcular la profundidad del refractor.

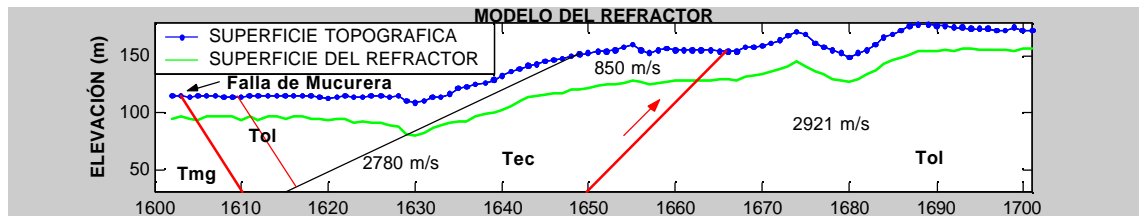


Figura 51. Modelo del estrato somero obtenido por el método PLUS-MINUS.

4.3.2 Estaciones 1701 hasta 1797. A partir de los tiempos de propagación de la (Figura 24), obtuve los tiempos MINUS expresados en la (Figura 52), a partir de la (Ecuación 10) obteniendo velocidades en el refractor iguales a 2741 m/s y 3173 m/s relacionadas con las distancias 0 a 990 m y 990 a 1440 m, respectivamente.

La profundidad del refractor la se calculo con la (Ecuación 12), en la que utilice como velocidad de la capa meteorizada la obtenida de la medición mini VSP igual a 850 m/s, junto con la sustitución de la velocidad del refractor y los tiempos PLUS (Ecuación 11) representados en la (Figura 53),

La (Figura 54) representa el modelo del estrato somero en el que la profundidad de la capa meteorizada es de 16 m a 40 m y las velocidades del refractor son de 2741 m/s hasta la estación 1767 m/s y 3173 m/s de la estación 1767 a 1797.

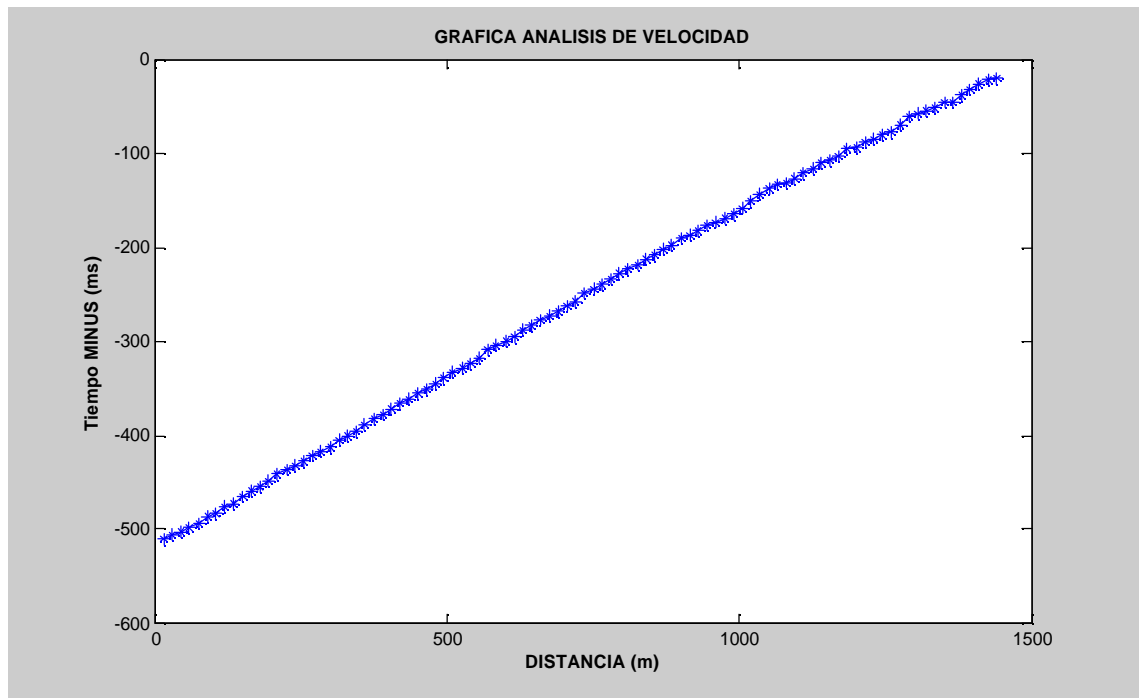


Figura 52. Análisis de tiempo MINUS, para calcular la velocidad del refractor.

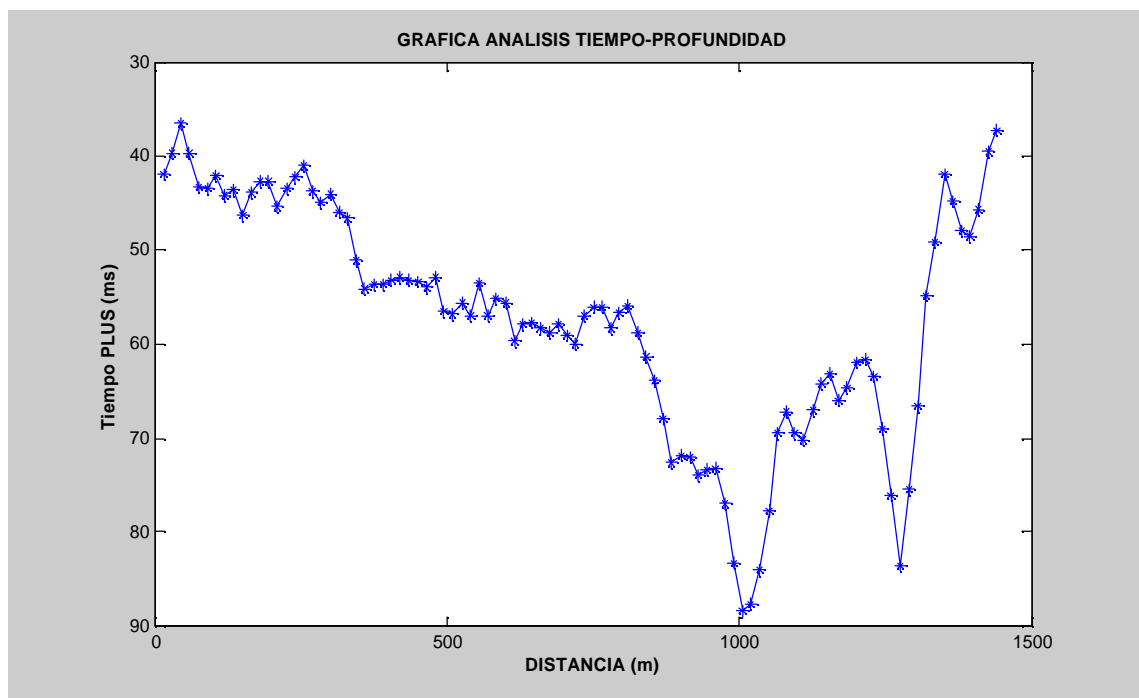


Figura 53. Análisis de tiempo PLUS, utilizados para calcular la profundidad del refractor.

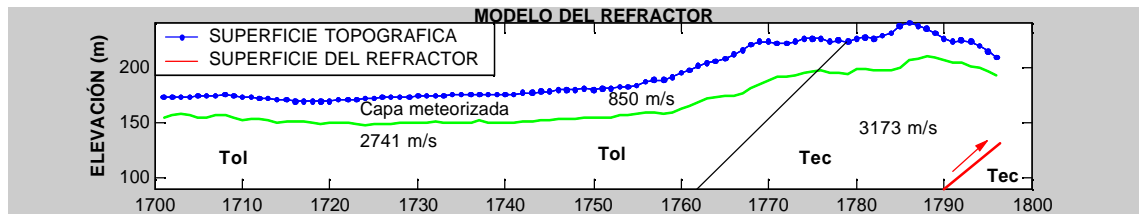


Figura 54. Modelo del estrato somero obtenido por el método PLUS-MINUS.

4.3.3 Estaciones 1797 hasta 1896. Los datos de tiempos de propagación de la (Figura 28), fueron utilizados para obtener los tiempos MINUS representados en la (Figura 55), a partir de la (Ecuación 10) obteniendo velocidades en el refractor iguales a 2835 m/s, 3127 m/s, 3377 m/s y 2338 m/s ubicadas en las distancias 0 a 600 m, 600 a 945 m, 945 a 1290 m y 1290 a 1485 m respectivamente.

Utilizando la (Ecuación 12), se calculo la profundidad del refractor tomando como velocidad de la capa meteorizada la derivada de la medición mini VSP igual a 850 m/s, junto con el reemplazo de la velocidad del refractor y los tiempos PLUS (Ecuación 11) representados en la (Figura 56).

La (Figura 57) representa el modelo del estrato somero en el que la profundidad de la capa meteorizada es de 10 a 86 m y las velocidades del refractor son de 2835 m/s hasta la estación 1837, 3127 m/s de la estación 1837 a 1860, 3377 m/s de la estación 1860 a 1883 y 2338 m/s de la estación 1883 a 1896.

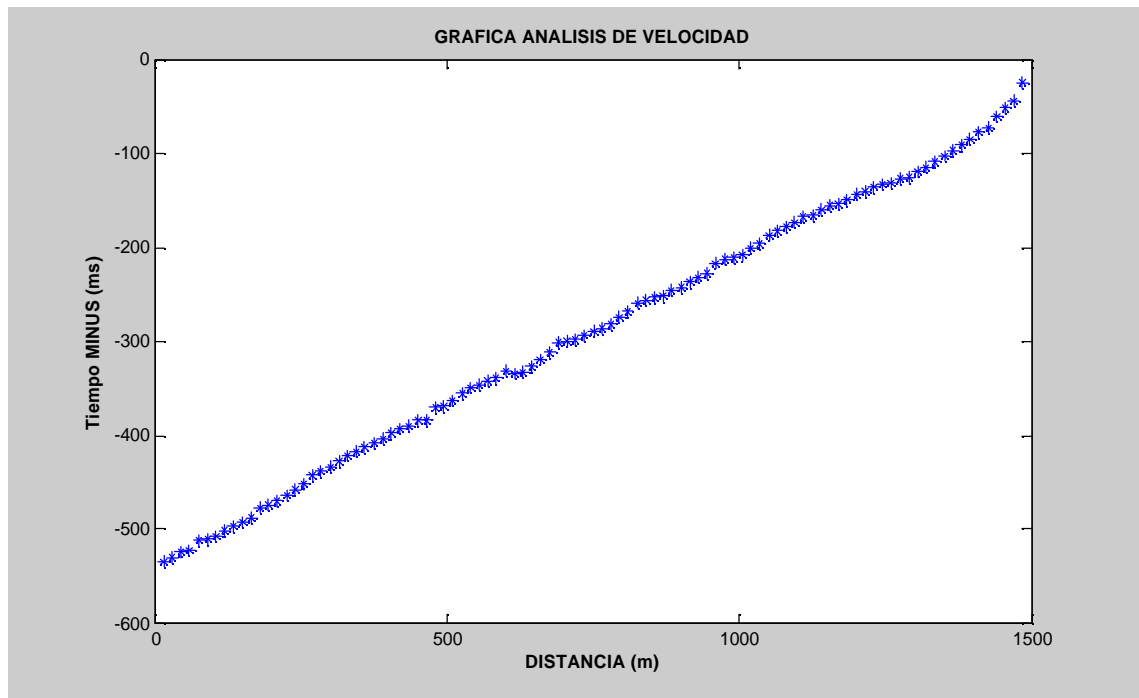


Figura 55. Análisis de tiempo MINUS, derivados de los datos de tiempos de primeros arribos, para calcular la velocidad del refractor.

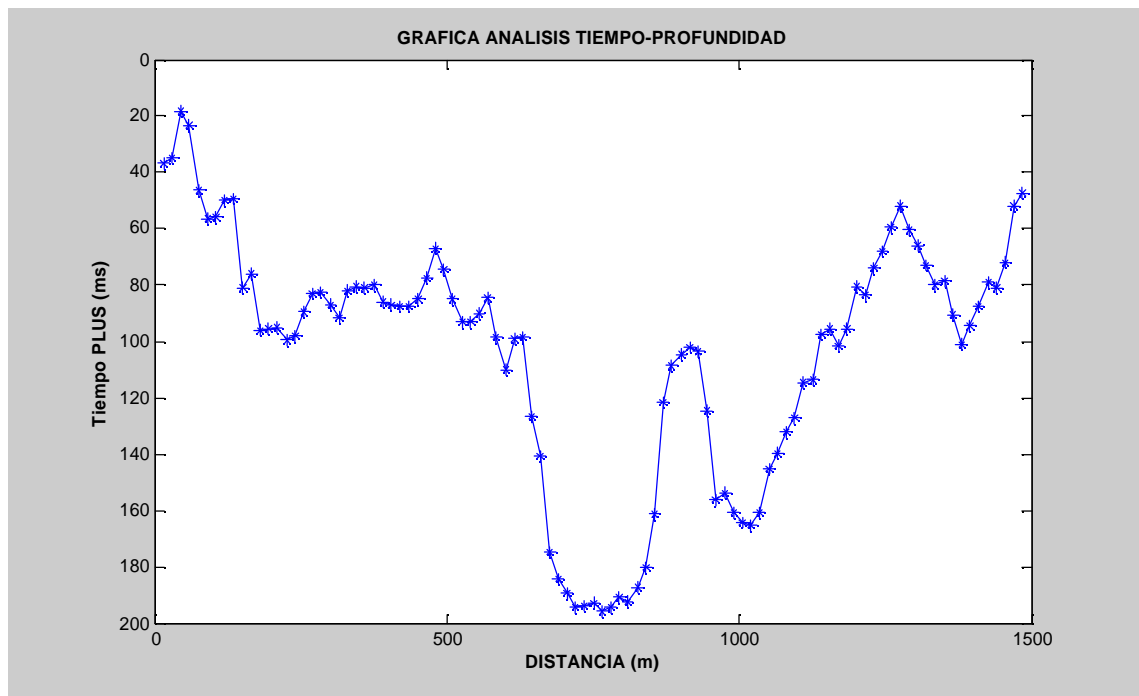


Figura 56. Análisis de tiempo PLUS, utilizados para calcular la profundidad del refractor.

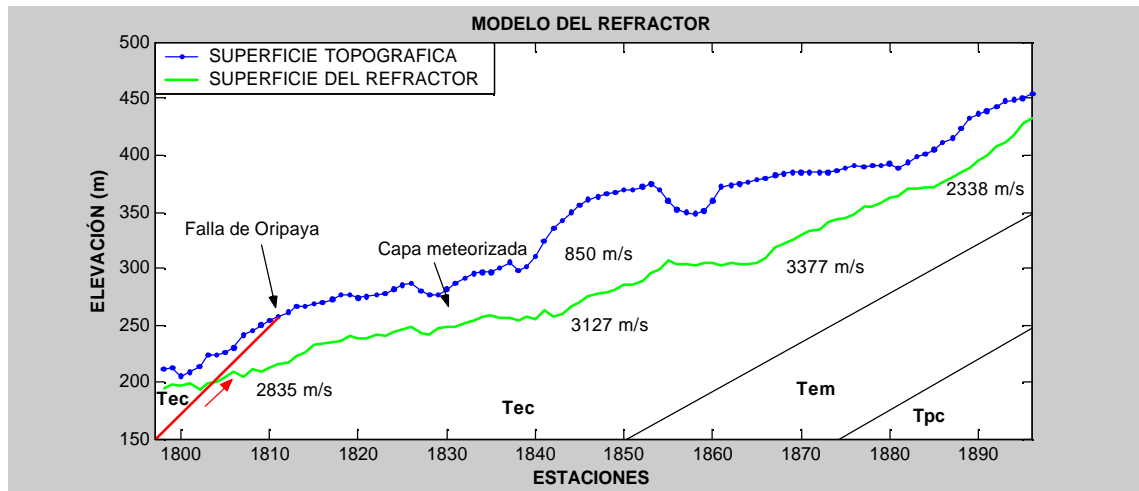


Figura 57. Modelo del estrato somero obtenido por el método PLUS-MINUS.

4.4 MÉTODOS DRM, STD Y GRM CONTENIDOS EN PROMAX

Con los tiempos de primeros arribos obtenidos del picado para todas las fuentes involucradas en las estaciones 1600 a 2650, se determinó que la velocidad del refractor entre las estaciones 1600 a 1900 aumenta de 3250 m/s a 3500 m/s como se muestra en la (Figura 58), para los métodos DRM, STD y GRM.

La profundidad del refractor calculada por los métodos DRM, STD y GRM tuvo diferencias entre ellos. En las estaciones 1620, 1800 y 1840 sus diferencias fueron superiores a 10m. La profundidad del refractor entre las estaciones 1600 a 1900 fue de 60 ± 10 metros como se muestra en la (Figura 59).

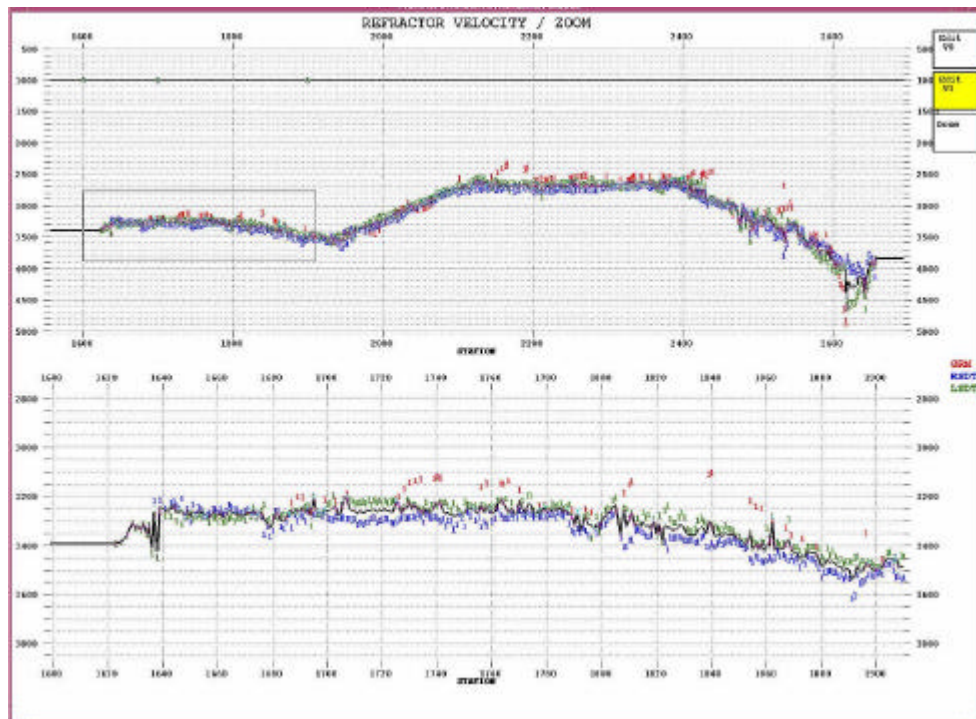


Figura 58. Velocidad del refractor. (Abajo) Velocidad del refractor situado entre las estaciones 1600 a 1900, correspondiente al área de estudio.

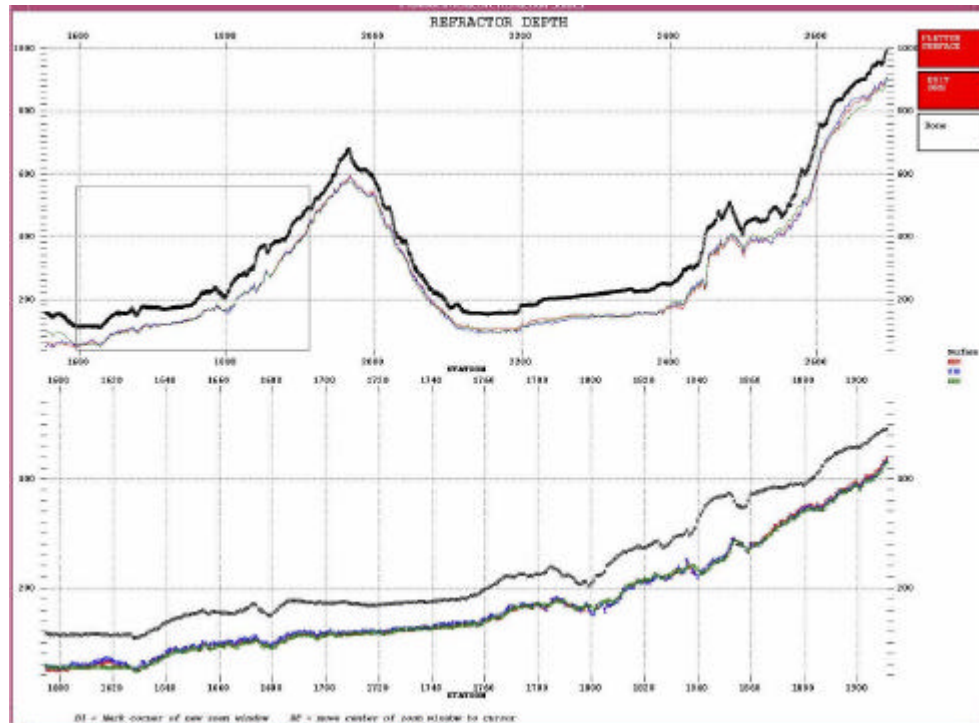


Figura 59. Topografía y profundidad del refractor. (Abajo) Profundidad del refractor localizado en el área de estudio entre las estaciones 1600 a 1900.

5. ESTÁTICAS DE REFRACCIÓN

Los primeros cálculos de correcciones para elevación y variaciones en los espesores de meteorización son llevados a cabo en el campo. Estas *field statics* están basadas en *survey*, *uphole* e información de primeros arribos, y son usadas en procesamiento como la primera estimación. Marsden (1993) reseñó las correcciones estáticas. De acuerdo con Sheriff (1991) la corrección de estáticas está definida como: "Correcciones aplicadas a datos sísmicos para compensar los efectos de variaciones en elevación, espesores de meteorización, velocidad de meteorización o para referenciar a un *datum*". El objetivo es determinar los tiempos de arribo de reflexión que habrían de ser observados si todas las mediciones se hubieran hecho en un plano de referencia o *datum* sin material meteorizado o de baja velocidad. Estas correcciones están basadas en datos de tiempos de pozo, refracción de primeros arribos o suavizado de eventos de reflexión (*smoothing of reflections*).

Su finalidad es reducir el retardo que sufre la onda sísmica al atravesar la capa meteorizada (corrección vertical en tiempo), cuando el *datum* seleccionado es el nivel del mar la corrección generalmente es negativa.

La corrección de estáticas puede ser dividida en dos componentes: la corrección de meteorización para reducir el efecto del estrato somero y la corrección de elevación para mover de la base de estas capas someras arriba (o abajo) al *datum* de referencia. Hay tres escenarios diferentes de adquisición que habrían de ser considerados para el cálculo de la corrección de estáticas a un *datum*:

1. Fuentes o receptores en la superficie;
2. Datos de pozo en el que la base de la fuente (o receptor) se encuentra bajo la base de la capa meteorizada; y
3. Datos de pozo en el que la base de la fuente (o receptor) se encuentra entre la capa meteorizada.

En nuestra línea sísmica los escenarios de adquisición corresponden a los casos 1 y 3.

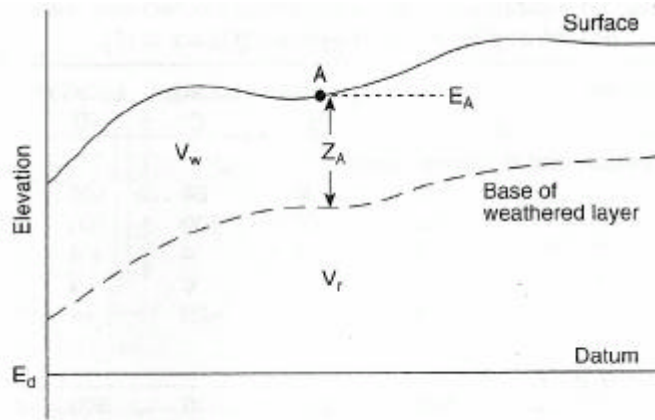


Figura 60. Cálculo de corrección de estáticas referentes a un datum con la fuente o los receptores en superficie. Variables: Z_A es el espesor de la capa meteorizada en A, V_w es la velocidad de meteorización, E_A es la elevación de la fuente o receptor en A, E_d es la elevación del datum, y V_r es la velocidad de reemplazamiento. Tomado de Cox. M., (1999).

Para la corrección de estáticas de fuentes o receptores en superficie, la (Figura 60) muestra un perfil del estrato somero con la localización de una fuente, o receptor, en un punto A. Según Cox. M., (1999) La corrección total de estáticas llevadas a un datum (T_A) es definida por la ecuación:

$$T_A = -t_{Aw} - t_{Ae}, \quad 16$$

donde t_{Aw} es la corrección de meteorización y t_{Ae} la corrección de elevación en el punto A. Usando las variables mostradas en la (Figura 60), la corrección de meteorización se define como el espesor de la capa meteorizada (Z_A) dividida por la velocidad de meteorización ($V_{w(A)}$) en la localización A:

$$t_{Aw} = \frac{Z_A}{V_{w(A)}}, \quad 17$$

sí más de una capa meteorizada está presente, la corrección de meteorización es la suma de las correcciones individuales de las capas calculadas con la ecuación anterior. La corrección de elevación se define como el espesor de la capa

submeteorizada dividida por la velocidad de reemplazamiento o velocidad *datum* (V_r):

$$t_{Ae} = \frac{E_A - Z_A - E_d}{V_r}, \quad 18$$

donde E_A es la elevación de la fuente (o receptor) en A, Z_A es el espesor de la capa meteorizada en A, E_d es la elevación del *datum*, y V_r es la velocidad de reemplazamiento o velocidad *datum*.

Así, la corrección total de estáticas (T_A) definida por la ecuación A, es formada por la suma de las ecuaciones 17 y 18:

$$T_A = - \left(\frac{Z_A}{V_{W(A)}} + \frac{E_A - Z_A - E_d}{V_r} \right) \quad 19$$

Cuando más de una capa meteorizada está presente, el primer termino en la ecuación 19 es repetido con los espesores y velocidades apropiados para cada una de las capas presentes. En el segundo término, el espesor de la capa meteorizada Z_A se refiere a la suma de los espesores de cada capa.

Para los datos de pozo en el que la base de la fuente (o receptor) se encuentra entre la capa meteorizada, el perfil del estrato somero mostrado en la (Figura 61), tiene fuentes localizadas en A y B, un receptor en la superficie localizado en C y un receptor bajo tierra localizado en G.

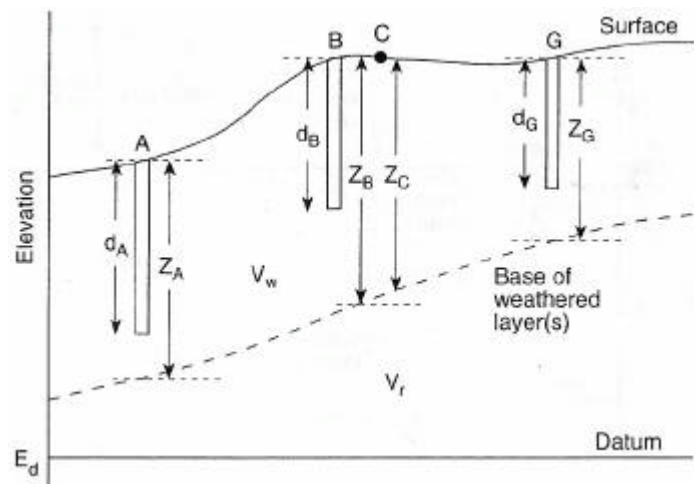


Figura 61. Cálculo de estáticas referentes a un *datum* con la fuente o receptor entre la capa meteorizada. Variables como en la Figura anterior. Tomado de Cox. M., (1999).

En la localización A, la profundidad de la carga es localizada arriba de la base de la capa meteorizada. Por lo tanto, para la corrección de estáticas de la fuente en esta localización, una corrección de meteorización debe ser calculada de la profundidad de la carga a la base de la capa meteorizada. La corrección de elevación es aplicada normalmente de la base de la capa meteorizada al *datum*. La corrección total de estáticas para la fuente en A ($T_{A(fuente)}$) es definida como

$$T_{A(shot)} = - \left(\frac{Z_A - d_A}{V_{W(A)}} + \frac{E_A - Z_A - E_d}{V_r} \right) \quad 20$$

donde, a demás, de las variables anteriores debemos tener en cuenta que d_A es la profundidad de la carga en A. Cuando más de una capa meteorizada esta presente, el primer término de la ecuación 20, puede ser modificado; los tiempos deben ser calculados para cada capa usando los espesores y velocidades de cada una de ellas. En el segundo término, la variable (Z_A) es el espesor total de todas las capas meteorizadas. Lo mismo debe hacerse para las localizaciones de la fuente en B y la localización del receptor en G porque tanto la carga como el receptor están localizados entre la capa meteorizada. En la ecuación 20 asumimos que la profundidad de la carga es conocida, pero en ocasiones se cometen errores en la medición de dicha profundidad, luego a veces es mejor

emplear una ecuación alternativa para calcular la corrección total de estáticas de la fuente la cual no requiere la profundidad de la carga. La corrección se calcula para una localización en superficie justo encima de la carga y después se ajusta por el tiempo *uphole* ($t_{uh(A)}$), el tiempo de la localización en superficie A hasta la fuente. La corrección de estáticas llevadas a un *datum* en la localización de la fuente A ($T_{A(fuente)}$) es definida como

$$T_{A(shot)} = - \left(\frac{Z_A}{V_{W(A)}} + \frac{E_A - Z_A - E_d}{V_r} \right) + t_{uh(A)}, \quad 21$$

ecuación que se podría aplicar si las cargas se encuentran bajo la capa meteorizada. De la misma manera como se explico anteriormente, si más de una capa meteorizada está presente, el primer término de la ecuación 21, se repite para cada una de las capas que están presentes, y en el segundo término (Z_A) se refiere al espesor total de las capas meteorizadas.

A continuación se observan las soluciones estáticas dadas por los métodos GRM, GRM SSM y Plus-Minus.

5.1 MÉTODO RECÍPROCO GENERALIZADO (GRM).

5.1.1 Estaciones 1602 hasta 1896

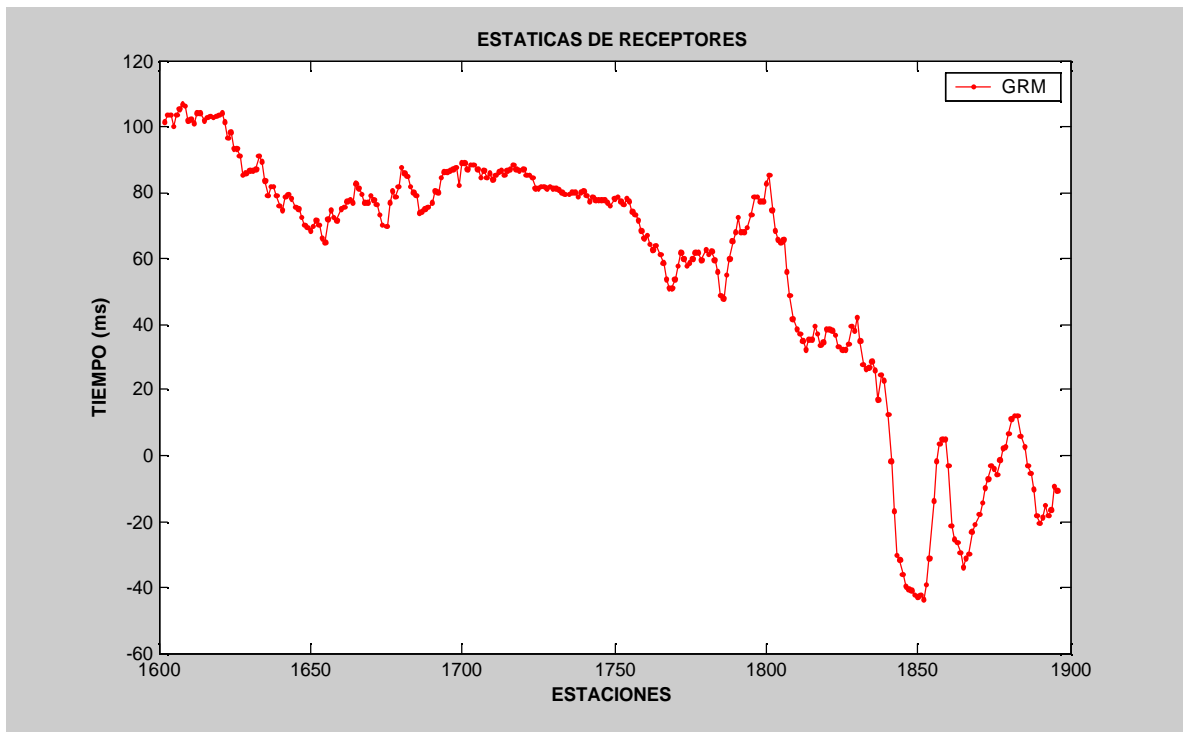


Figura 62. Perfil de corrección total de estáticas para los receptores llevadas a un *datum* cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método GRM en las estaciones 1602 a 1896.

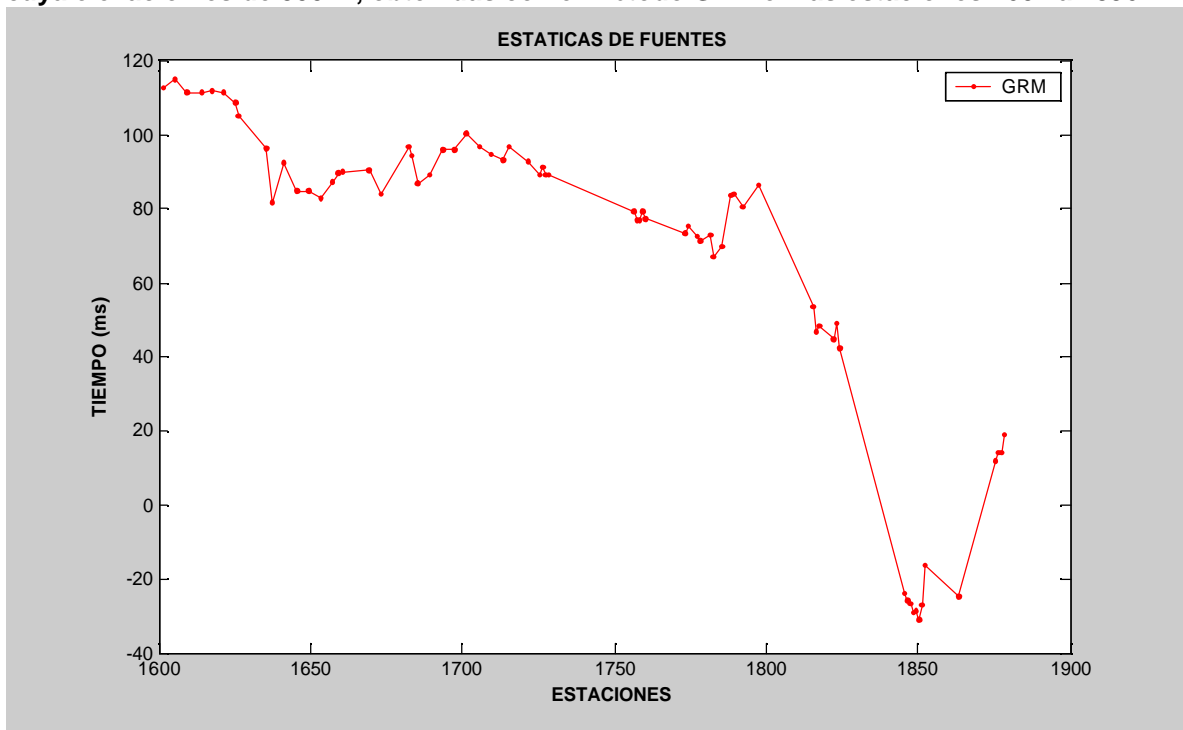


Figura 63. Perfil de corrección total de estáticas para las fuentes llevadas a un *datum* cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método GRM en las estaciones 1602 a 1896.

5.2 MÉTODO DE SUAVIZADO ESTÁTICO (GRM SSM).

5.2.1 Estaciones 1602 hasta 1896

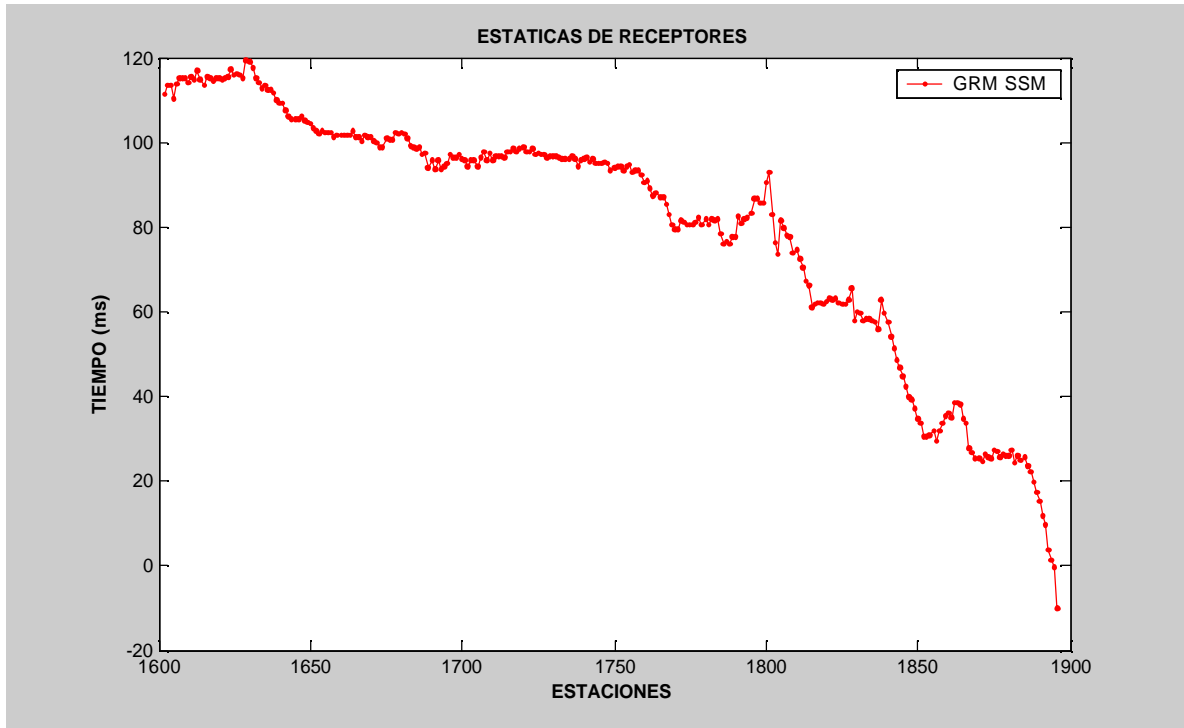


Figura 64. Perfil de corrección total de estáticas para los receptores llevadas a un *datum* cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método GRM SSM en las estaciones 1602 a 1896.

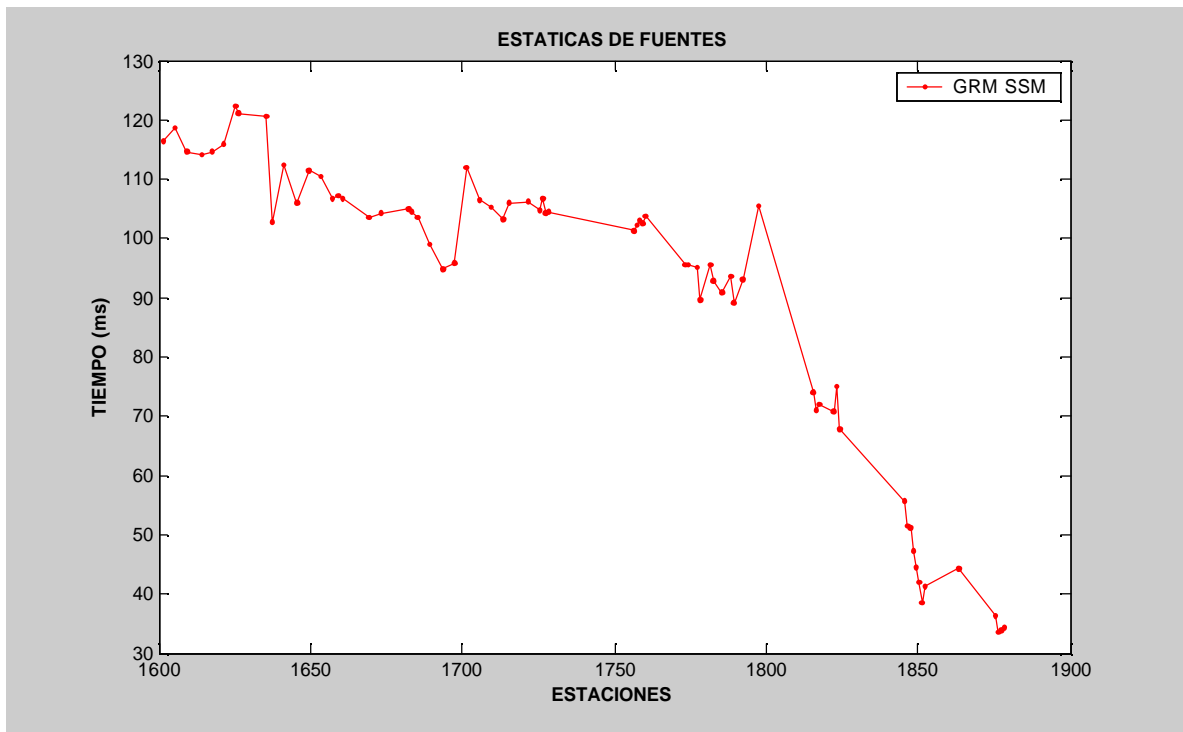


Figura 65. Perfil de corrección total de estáticas para las fuentes llevadas a un *datum* cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método GRM SSM en las estaciones 1602 a 1896.

5.3 MÉTODO PLUS-MINUS.

5.3.1 Estaciones 1602 hasta 1896

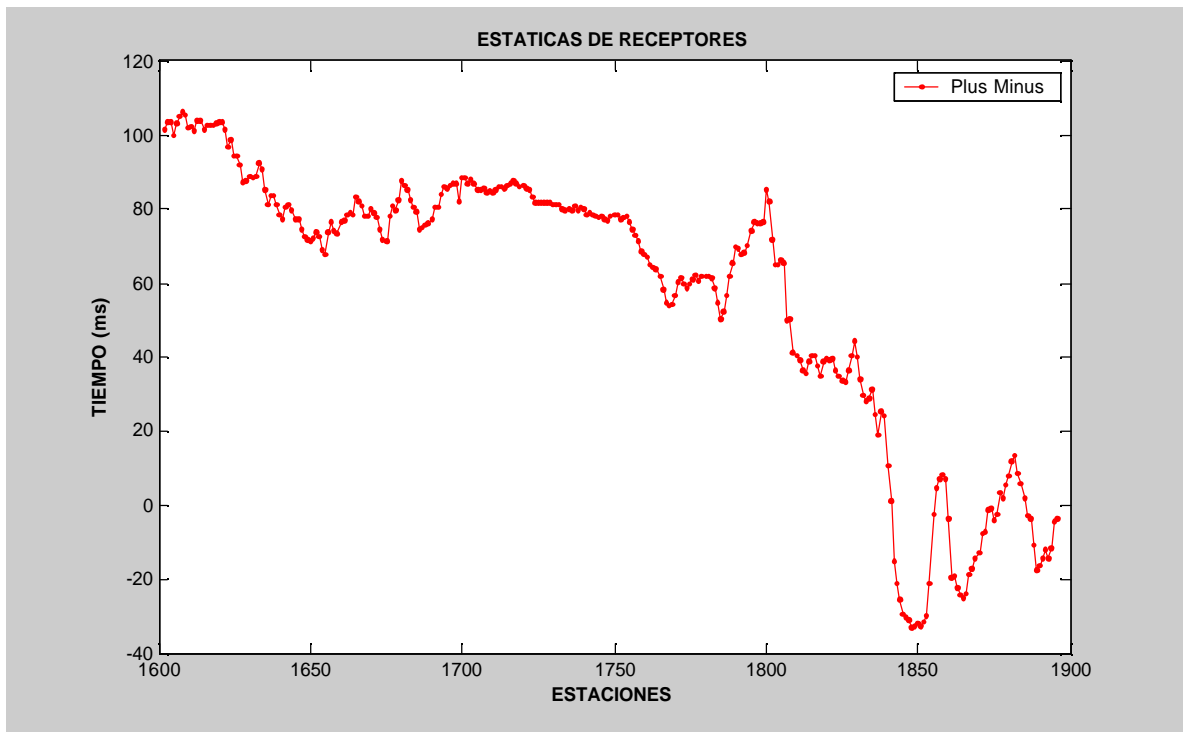


Figura 66. Perfil de corrección total de estáticas para los receptores llevadas a un *datum* cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método Plus Minus en las estaciones 1602 a 1896.

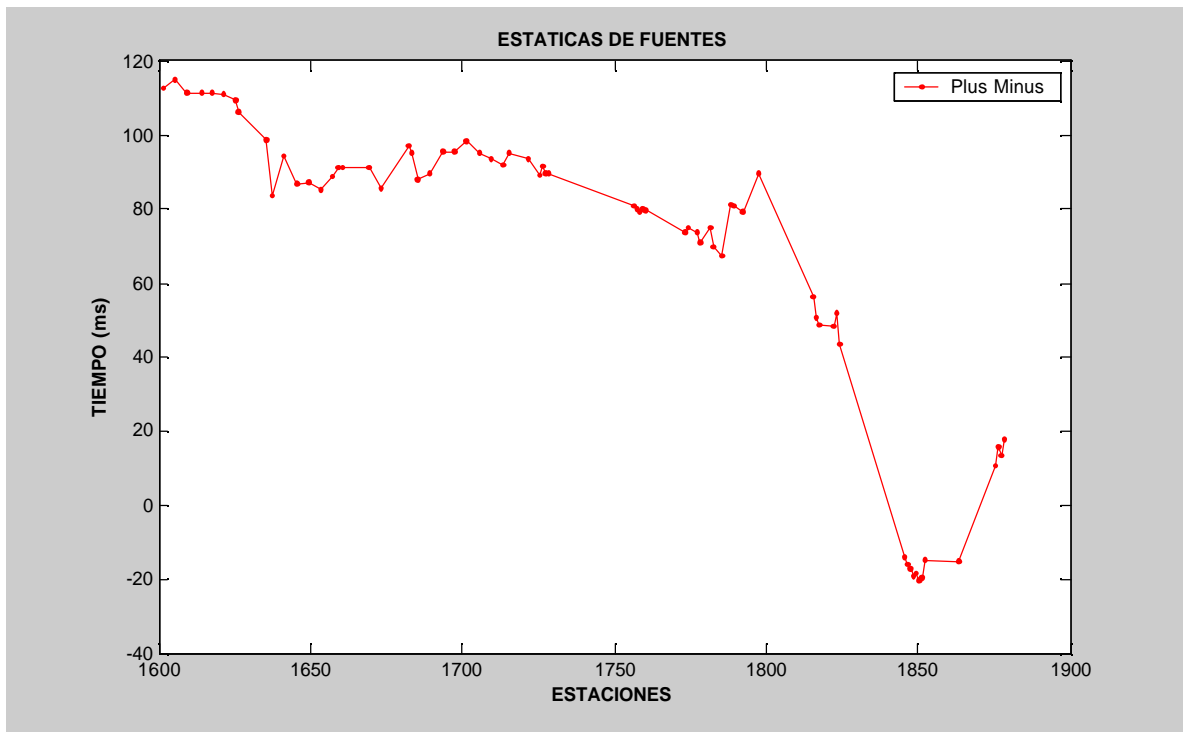


Figura 67. Perfil de corrección total de estáticas para las fuentes llevadas a un *datum* cuya elevación es de 500 m, obtenidas con el método Plus Minus en las estaciones 1602 a 1896.

5.4 MÉTODOS DRM, STD Y GRM CONTENIDOS EN PROMAX

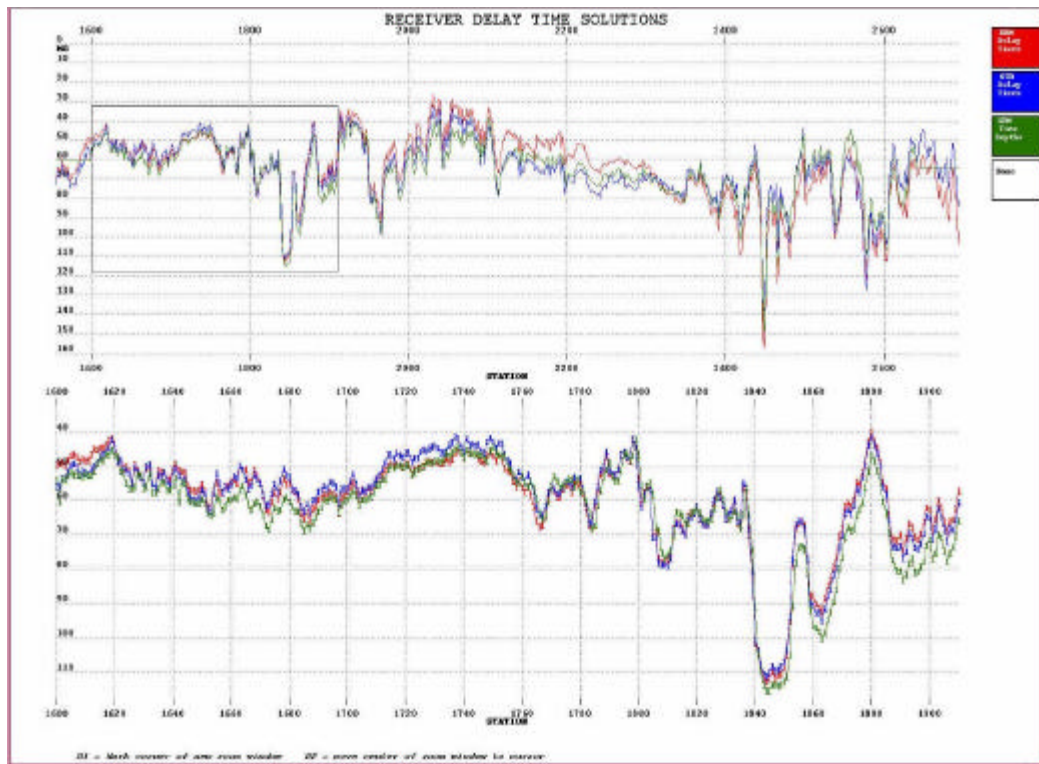


Figura 68. Corrección de estáticas asociada a receptores, obtenidas por los métodos DRM, STD Y GRM contenidos en el software, entre las estaciones 1600 a 1900 (Abajo).

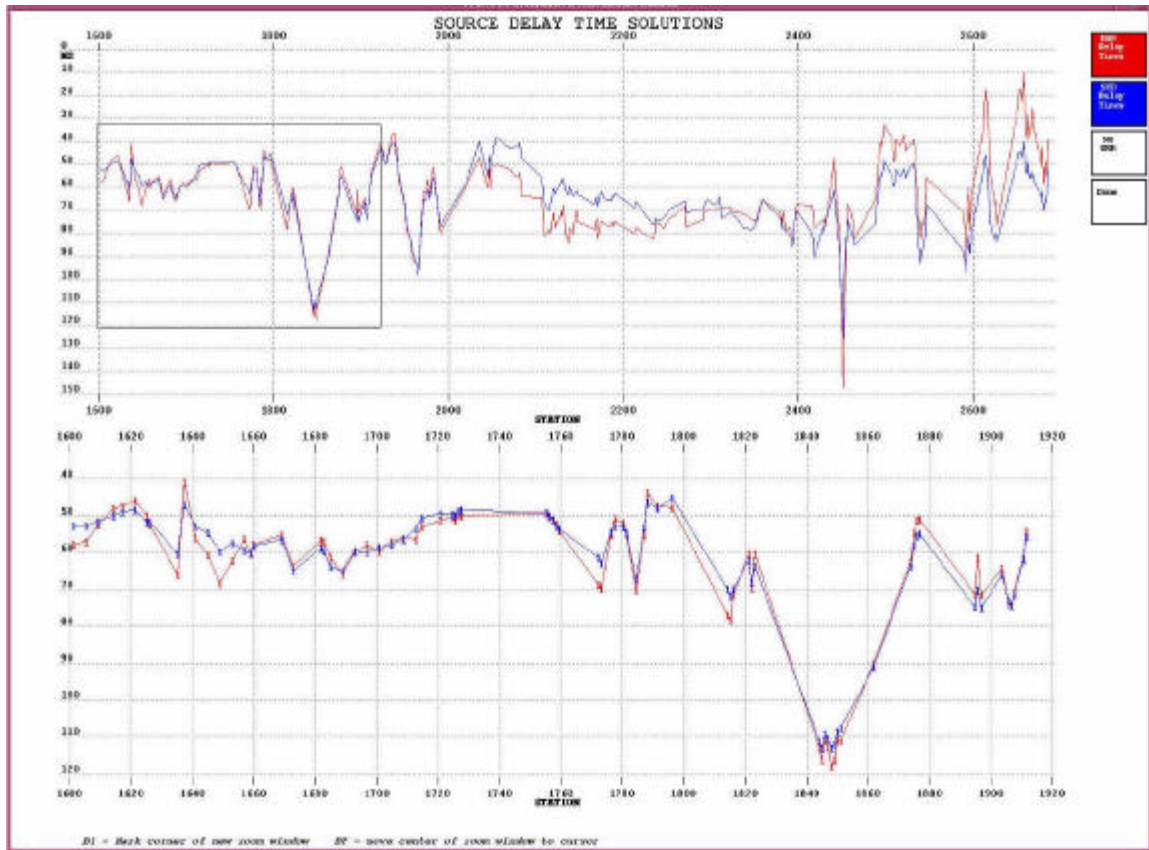


Figura 69. Corrección de estáticas relacionada a las fuentes, obtenidas por el software con los métodos DRM, STD Y GRM, entre las estaciones 1600 a 1900 (Abajo).

6. APLICACION DE LAS CORRECCIONES ESTÁTICAS, IMÁGENES APILADAS, MIGRACIÓN Y SU INTERPRETACIÓN ESTRUCTURAL

6.1 APLICACIÓN DE LAS CORRECCIONES ESTÁTICAS

6.1.1 Estáticas de elevación

La (Figura 70) corresponde a una sección sísmica apilada sin la corrección del efecto del estrato somero pero con corrección de estáticas de elevación, los cambios sísmicos de velocidad a lo largo de la sección indican que el subsuelo no es uniforme en sus características litológicas. La sección sísmica atraviesa una serie de anticlinales y sinclinales, a su vez, de varias fallas inversas. La mayoría de las distorsiones se encuentran asociadas a fallas inversas. La Falla de Mucurera podría ser responsable de la distorsión en las reflexiones cerca de los *SRF_SLOC* 1556 a 1557 junto con el bajo rango de offsets usados para producir el apilado en ese sector. Los eventos que se encuentran entre los tiempos 800 a 1400 ms y entre los *SRF_SLOC* 1600 a 1740 presentan terminaciones o *cycle skips* (terminaciones de los reflectores en los que un patrón en echelon es formado, debido a un mal apilado de los datos como resultado de significativas diferencias en los tiempos de propagación) indicándonos una pobre respuesta del apilado asociado con la variación de la topografía y los cambios laterales de velocidad provocados en esta parte de la sección sísmica por la variación litológica de los estratos y por la Falla de Oripaya. Las partes de la línea sísmica adyacentes a las estaciones en mención sufren menor perturbación debido a que no están afectadas por cambios abruptos en la topografía y presentan menor variación lateral de velocidad, esto es confirmado en la sección apilada. El reflector superficial en la (Figura 70), en un tiempo cercano a 300 ms es continuo, en esta reflexión superficial el intervalo de offsets usado para producir el apilado es limitado. Esto quiere decir que las reflexiones no están mal apiladas debido a la inadecuada corrección de estáticas.

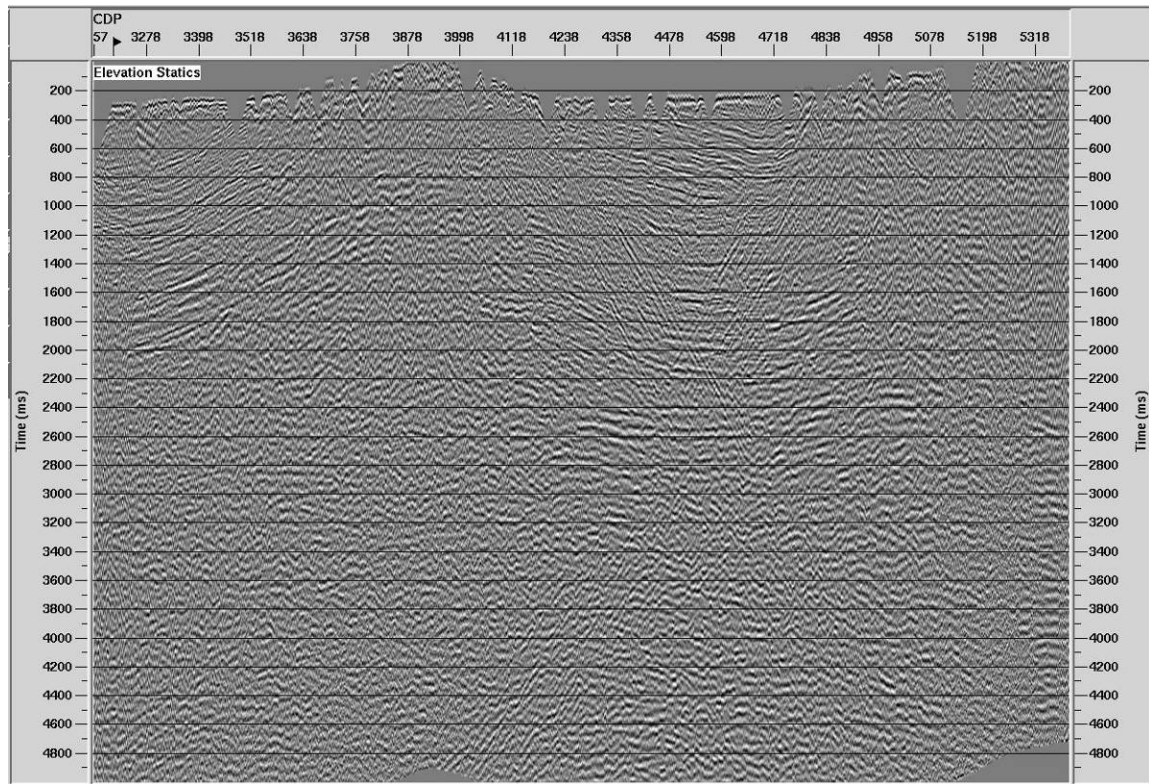


Figura 70. Sección sísmica apilada sin corrección del efecto del estrato somero.

6.1.2 Método Disminución de Matrices Residuales (DRM)

Los reflectores asociados a los flancos del anticlinal conservan su buzamiento y forma en tiempo. Aunque la respuesta del apilado mejoro a la de la (Figura 70), aun se sigue presentando *cycle skips* que no permiten una clara continuidad de los reflectores. Esta sección apilada (Figura 71), es mejor para objetivos profundos de 1000 a 1600 ms pero pierde enfoque en los objetivos más someros con respecto a la corrección de estáticas por elevación. Para la aplicación del método DRM se uso Promax.

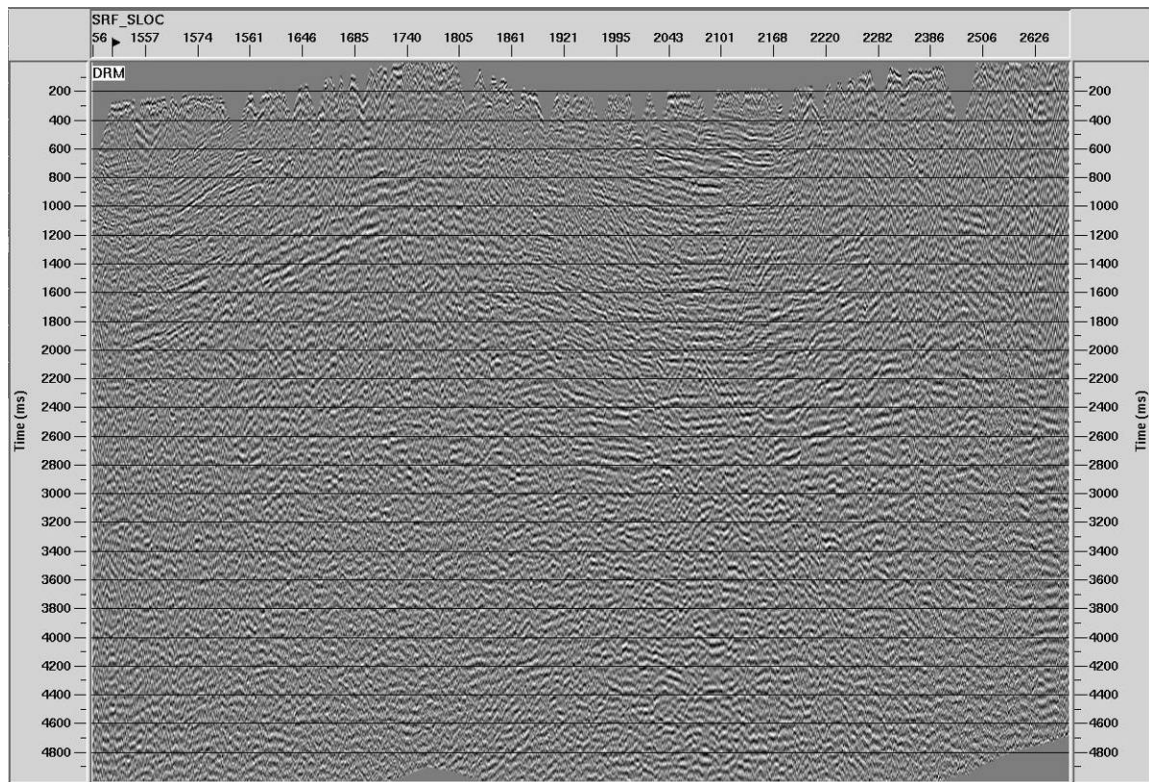


Figura 71. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas) por el método DRM.

6.1.3 Método Delay Time (DLT)

La (Figura 72), presenta una mejor respuesta en el apilamiento aplicando la corrección de estáticas por el método *DLT* con respecto a las Figuras 70 y 71, generando una mayor continuidad de los reflectores en los flancos del anticlinal pero con un buen número de terminaciones o *cycle skips* y sin modificaciones de la estructura en tiempo, a demás, manteniendo un aceptable apilado en el evento más superficial de 300 ms. La implementación del método DLT se realizo en Promax.

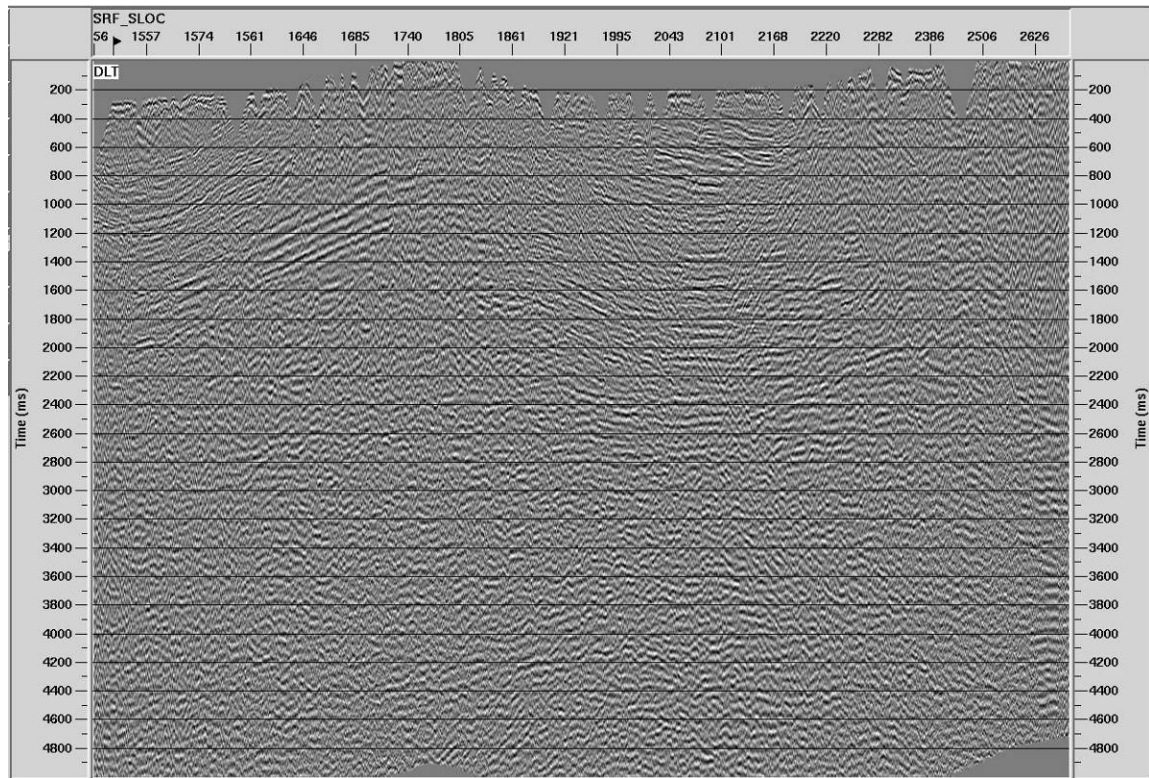


Figura 72. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas) por el método *Delay Time* DLT.

6.1.4 Método Recíproco Generalizado (GRM)

La sección sísmica (Figura 73), con el método GRM implementado en Promax mostró una mejor una respuesta del apilado comparada con los resultados obtenidos con los métodos DRM, DLT y corrección de estáticas por elevación, ya que los reflectores presentaron mayor continuidad o disminución de *cycle skips* en los flancos del anticlinal sin modificaciones de la estructura en tiempo siendo más propicia para eventos profundos, en cambio, el evento superficial de 300 ms presento mayor degradación que la corrección por elevación.

La (Figura 74), corresponde a la sección sísmica apilada con el método GRM que se programo usando la herramienta de MATLAB para la obtención de las velocidades y espesores del estrato somero y su respectiva corrección de estáticas, en ella se puede apreciar que hubo una mejor respuesta de apilado en

la región más profunda del sinclinal la cual está ubicada de 1400 a 1800 ms en los *SRF_SLOC* de 1600 a 1685, cuyos reflectores con ninguno de los métodos anteriores fue posible identificar y los cuales concuerdan con la geometría de la estructura. En el sector más somero se presento disminución del reflector ubicado en un tiempo de 300 ms.

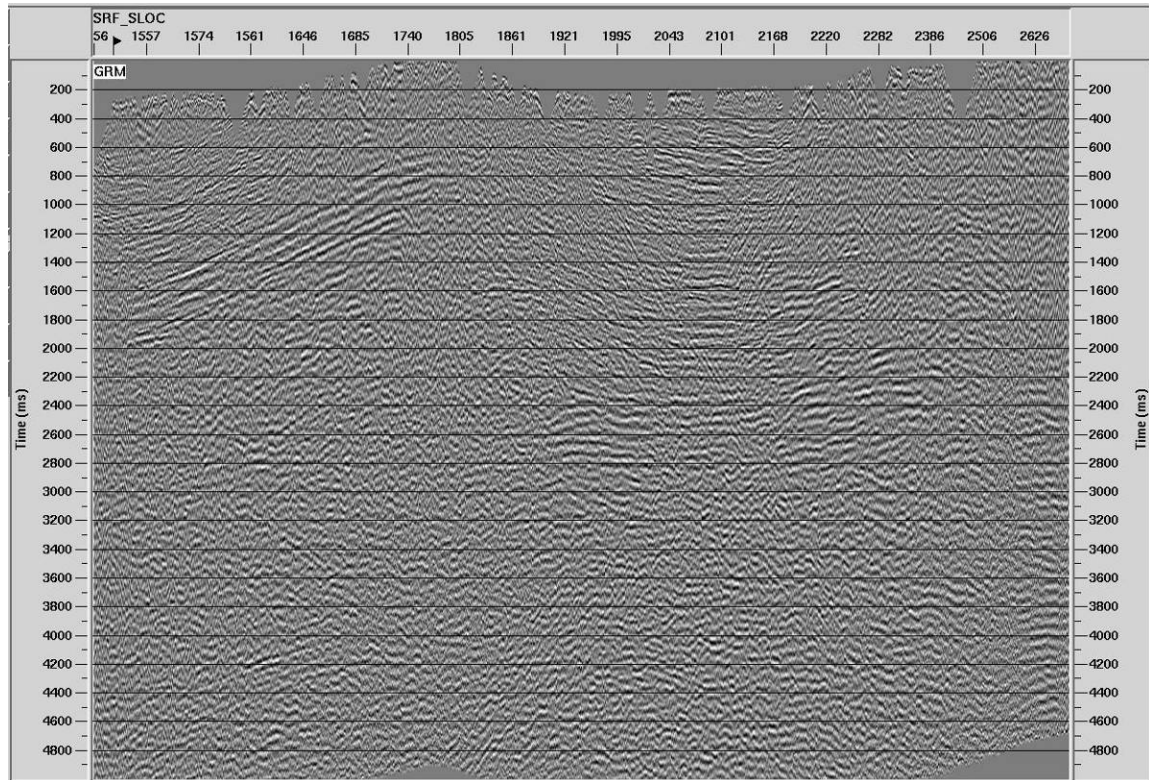


Figura 73. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas).

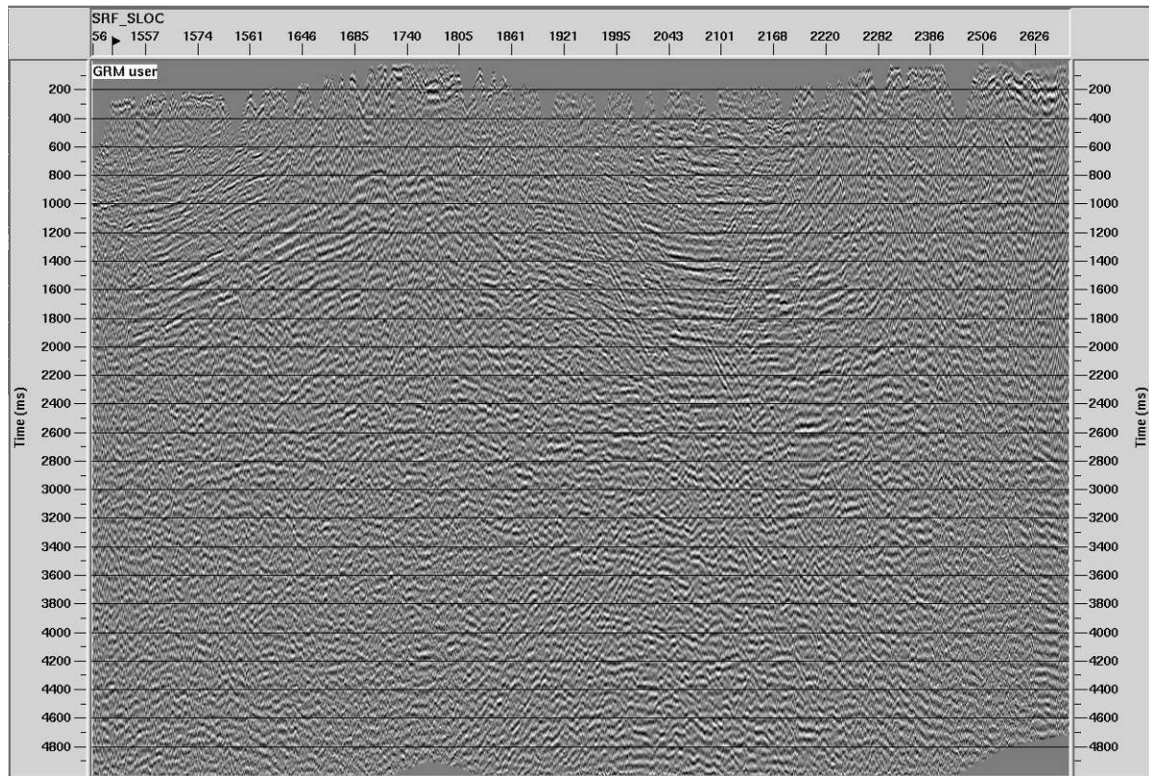


Figura 74. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas) por el método GRM programado en Matlab.

6.1.5 Plus-Minus

La respuesta del apilado (Figura 75), lograda con el método *Plus-Minus* el cual se programo en el software MATLAB, mejoro en las zonas de 1400 a 1800 ms en los *SRF_SLOC* de 1600 a 1685 muy similar al apilado obtenido con el método GRM (Figura 74), permitiéndonos seguir algunos reflectores más profundos, a demás, se mantuvo la continuidad de los reflectores en los flancos del sinclinal y su buzamiento, aunque se perdió enfoque en el horizonte más somero correspondiente a 300 ms.

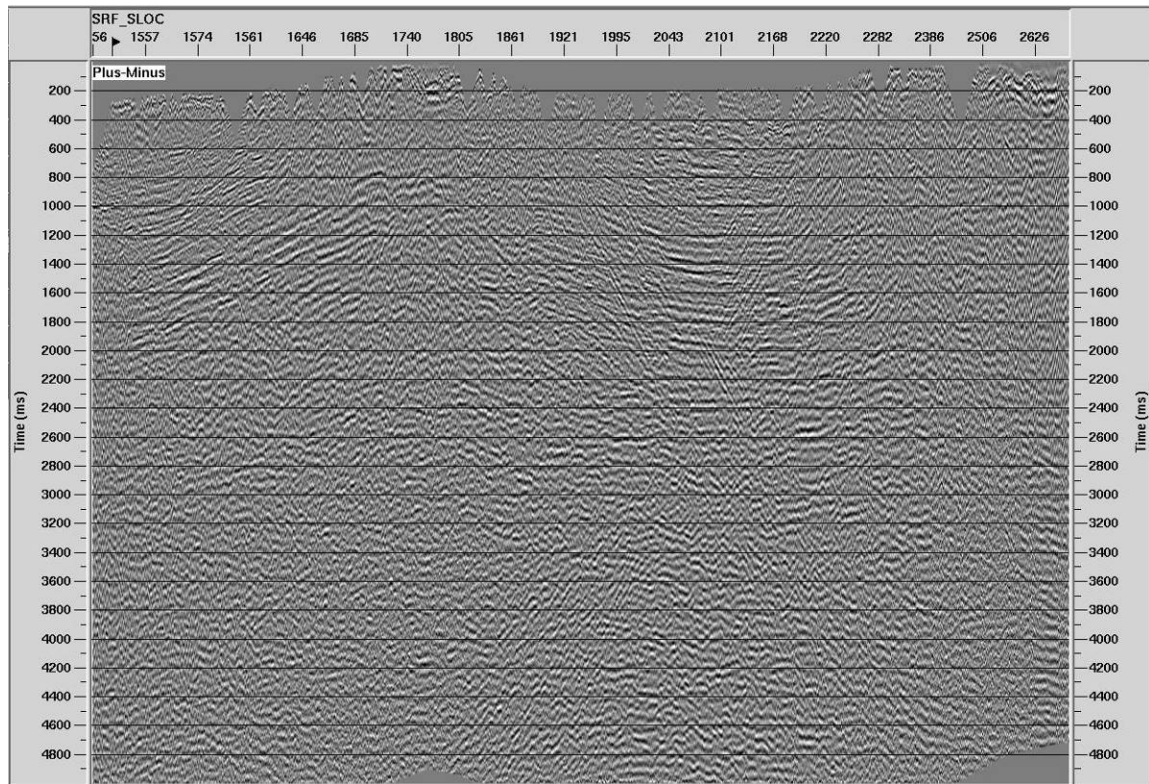


Figura 75. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas) por el método *Plus-Minus*.

6.1.6 Método de Suavizado Estático (GRM SSM)

En la (Figura 76), se observa la respuesta de apilamiento después de aplicar corrección de estáticas con el método *GRM SSM* cuyos algoritmos se programaron en la herramienta MATLAB. Podemos decir que el buzamiento de la estructura se mantiene, a demás, sus reflectores son mejor alineados que los conseguidos con la corrección de estáticas por elevación pero hay un importante grupo de *cycle skips* que no permiten una clara continuidad de los reflectores. El reflector ubicado en un tiempo de 300 ms se ve degradado por lo que la respuesta del apilamiento se ve más favorecida hacia los sectores más profundos.

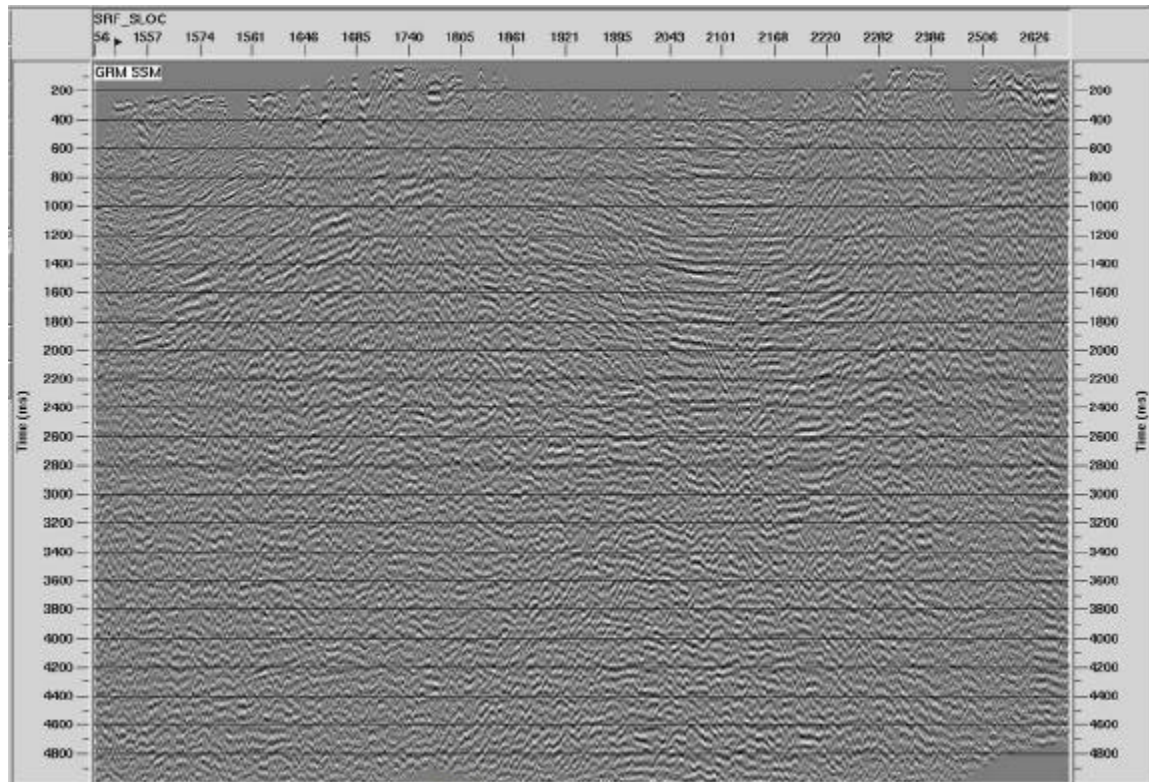


Figura 76. Después de la corrección del efecto del estrato somero (estáticas) por el método *GRM SSM*.

6.2 APLICACIÓN DE ESTÁTICAS RESIDUALES

La corrección de estáticas residuales es definida por Sheriff (1991) como un método de suavizado de datos estáticos asumiendo que patrones de irregularidades de muchos eventos tienen en común como resultado de las variaciones del estrato somero y por consiguiente los cambios de las trazas corregidas estáticamente deben ser tales que se reduzca al mínimo esas irregularidades. Muchos programas de determinación automática de estáticas residuales emplean métodos estadísticos para lograr la minimización.

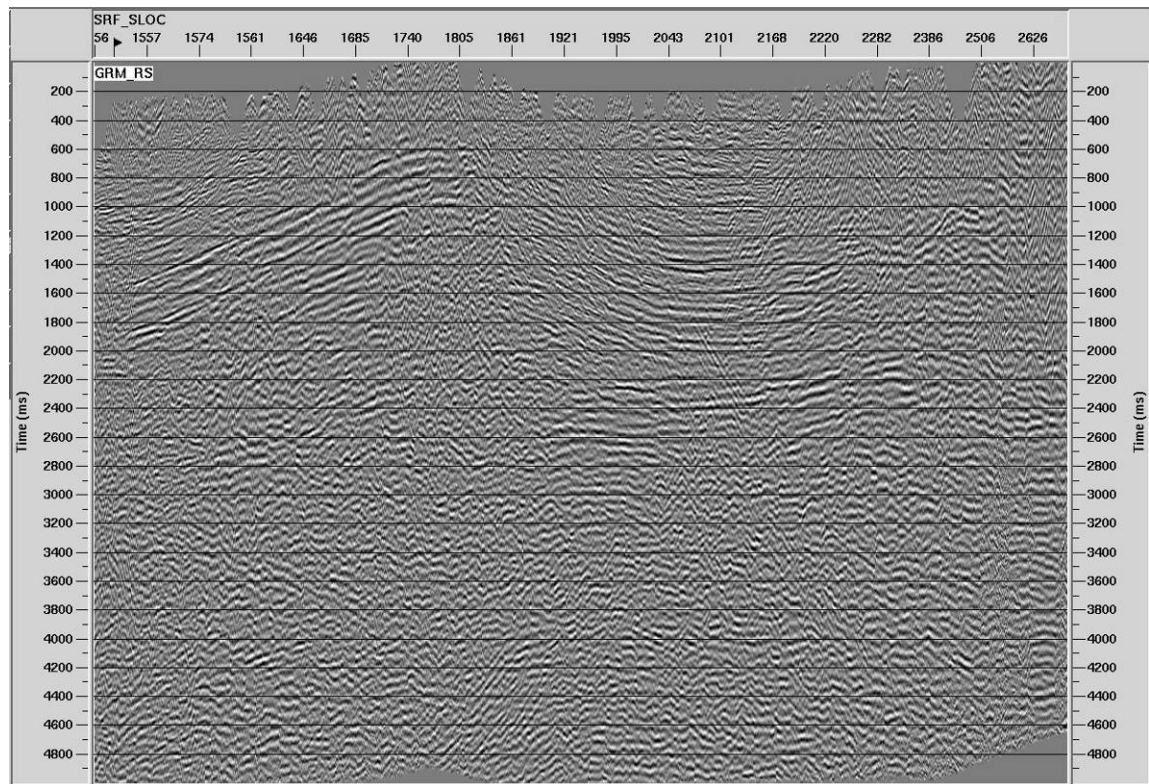


Figura 77. Aplicación de estáticas residuales al modelo de estáticas de GRM de la (Figura 72).

La sección apilada con el método GRM (Figura 73), fue escogida para aplicar corrección de estáticas residuales (Figura 77), y minimizar las irregularidades restantes. Vemos un pobre enfoque de los reflectores en los *SRF_SLOC* 1650 y 1750 hasta los 500 ms, pero se apilan los horizontes alrededor de *SRF_SLOC* 1560 con un tiempo de 2800 ms.

6.3 MIGRACIÓN EN TIEMPO POST-APILADO

Con el objetivo de posicionar los puntos de reflexión de la sección sísmica apilada (Figura 78), en sus verdaderas posiciones espaciales, se migro con el método *Kirchhoff* debido a que trata efectivamente buzamientos de hasta 90 grados y produce migraciones confiables en presencia de cambios verticales y laterales de velocidad, características presentes en nuestra línea sísmica utilizada en esta investigación. Como resultado de la migración, los buzamientos de los horizontes

se incrementan, las estructuras geológicas (sinclinales) se definen apropiadamente y las difracciones se colapsan. Lo ideal sería tener una sección en profundidad, pero como se quiere evaluar la validez de la sección migrada lo mejor es compararla con las secciones no migradas, luego ambas deben estar en tiempo. Después de aplicar estáticas residuales y migrar los eventos se posicionaron apropiadamente.

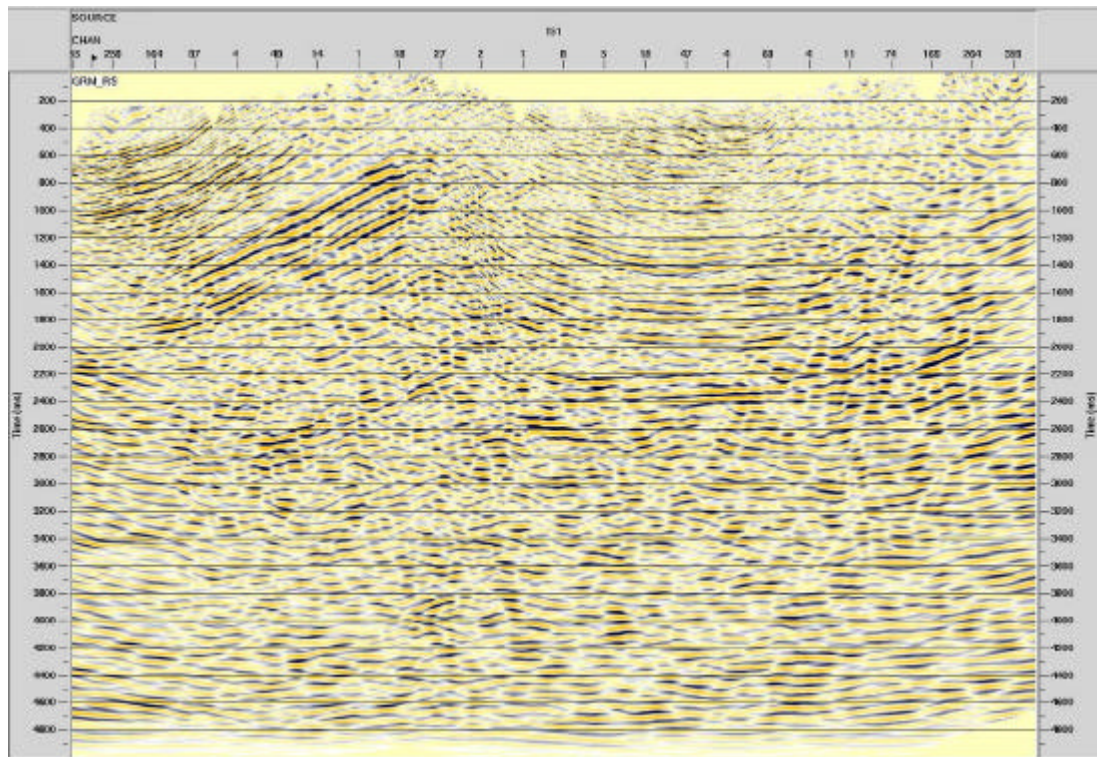


Figura 78. Sección migrada con el método *Kirchhoff*.

6.4 INTERPRETACIÓN GEOLÓGICA ESTRUCTURAL

La clase de pliegue relacionado a la Falla Tasajero corresponde a un *Fault-bend fold* (Suppe 1983). La imagen sísmica, en la (Figura 79), corresponde a una estructura de tipo *Synclinal fault-bend folds* producida por una falla flexionada hacia arriba de manera cóncava, sobre la cual se pliegan los estratos y son trasladados sobre el segmento de falla más superior.

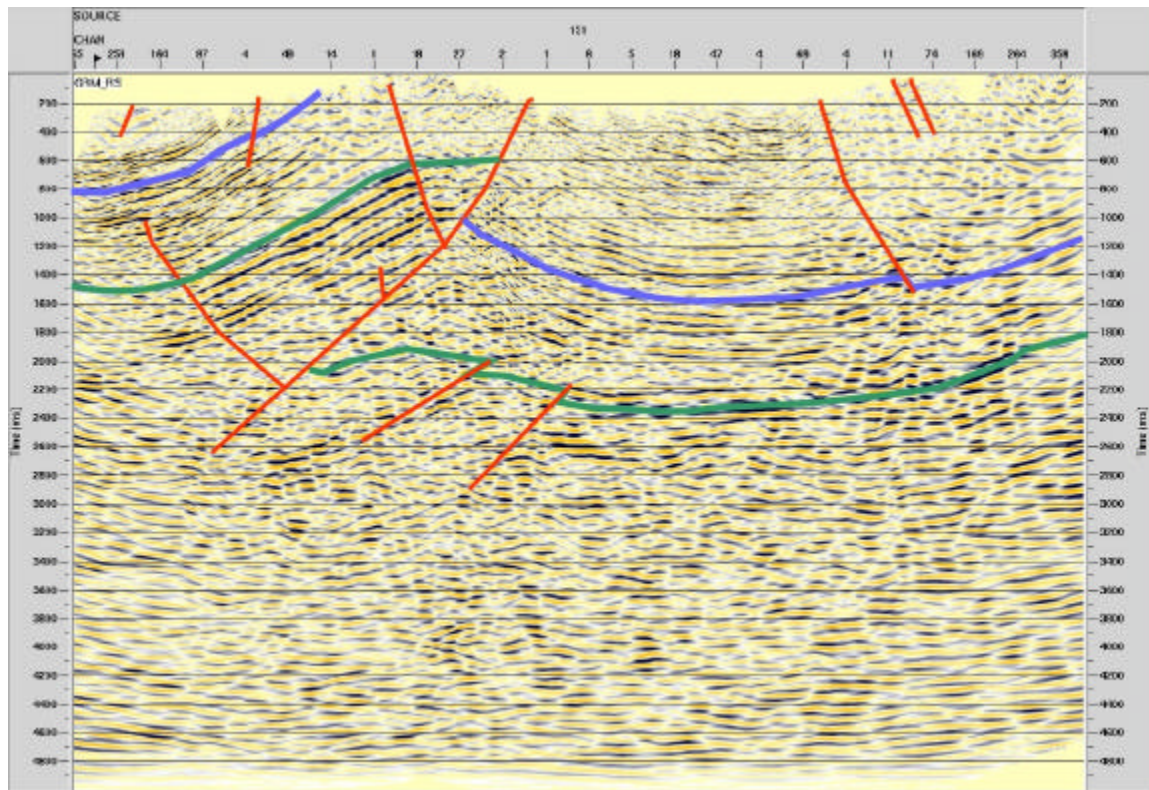


Figura 79. Sección sísmica interpretada estructuralmente en la que se aprecia la falla Tasajero y asociada a ella un pliegue de tipo *Synclinal fault-bend fold*.

7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

A partir de los ripios obtenidos del uphole 3, se determinó que la profundidad de la capa meteorizada es de 15 m. Dado que las muestras se tomaron a un intervalo de 5 m. de profundidad puede ser que la capa meteorizada esté cercana a los 18 m. Existe un margen entre 15 y 20 metros en el que no se tienen muestras litológicas para precisar la profundidad, luego la base de la capa meteorizada es 17.5 ± 2 m. De acuerdo con el método de aceleración MA, existe un punto de inflexión ubicado en 18 m que indica un cambio de interfase el cual podría ser la ubicación de la base de la capa meteorizada. El cambio de velocidad de 850 m/s a 2140 m/s en la misma capa se debe al cambio en la saturación de agua en la roca que según los datos, el nivel freático en el momento de la adquisición de los tiempos uphole estaba ubicado a una profundidad de 5 m.

En los primeros 5 m se aprecian datos anómalos debido a los instrumentos de medida, los cuales registraron tiempos de llegada más rápidos que aquellos que se pueden obtener de acuerdo a las características litológicas como los estratos meteorizados. En este caso lo más conveniente de acuerdo con Cox 1999; Rueda *et al*, 2007, es ajustar la curva a los datos que cumplan con las características de espesor y velocidad de las capas presentes en el modelo de la (Figura 6).

Un modelo de dos capas fue construido a partir de datos procedentes de *source gathers* para modelar la velocidad tanto horizontal como verticalmente de acuerdo con Lawton (1989), los segundos arribos dan una indicación de la velocidad de meteorización, pero examinando los *source gathers* podemos observar claramente que no muestran una única línea recta que pueda ser dibujada para describir el refractor, los tiempos de arribo están enmascarados por grandes tiempos de retraso debido a los espesores en las capas de baja velocidad Figuras 8 y 9. Los primeros arribos fueron picados manualmente de los *source gathers* con el fin de modelar la gran variación del estrato somero, esta es una de las partes que más

consume tiempo en los métodos de refracción. Picar automáticamente no es conveniente para estos casos debido al ruido, a las diferentes características entre disparos, y a la compleja naturaleza de los arribos, algunos de los cuales son eventos *side-swiped* (por ejemplo, difracciones de fallas casi paralelas a la línea o reflexiones para las cuales la línea hace un pequeño ángulo con la dirección de rumbo) de un lado u otro de la línea 2D.

El apilamiento con la aplicación de estáticas derivadas del método DRM produce un pobre enfoque de los reflectores en zonas donde la topografía es plana (Figura 71), que son menos continuos que la corrección de estáticas solo por elevación (Figura 70). Pero en zonas donde la topografía empieza a tener cierta inclinación, la respuesta del apilado es mejor para el DRM que para la corrección de estáticas por elevación simplemente, los reflectores son más continuos.

El DLT mejora sustancialmente la respuesta del apilado en zonas donde la topografía es inclinada, mejorando la continuidad de los reflectores o reduciendo la cantidad de *cycle skips*, pero no mejora el apilado en zonas donde la topografía es casi plana al igual que el método DRM, pues los reflectores no se pueden seguir (Figura 72). Esto es debido a que los cambios laterales de velocidad en la capa meteorizada son muy rápidos en esta porción de la línea sísmica.

El método GRM está implementado en el software comercial Promax. Sin embargo no se tiene acceso al algoritmo y sólo se pueden variar unos pocos parámetros. La sección apilada con el método GRM utilizando el paquete comercial PROMAX da buenos resultados tanto en zonas de baja y alta pendiente topográfica, los reflectores son continuos aún en zonas de cambios laterales de velocidad tanto en la capa meteorizada como en el refractor e irregularidades en la superficie topográfica (Figura 73). El modelamiento de la capa meteorizada que se realizó con el método GRM programado en MATLAB dio una mejor respuesta del apilado en sectores de 800 a 1200 ms, a demás de, enfocar los reflectores

ubicados en un tiempo de 1400 a 1800 ms que con ninguno de los paquetes comerciales se pudieron visualizar (Figura 74).

Dado que en los extremos de los primeros arribos no se tiene información del espesor y velocidad de la capa meteorizada, no se produjo corrección de estáticas y por lo tanto se ven discontinuidades en los reflectores en cercanías a las estaciones extremas 1700, 1800 y 1900 con la utilización del método GRM SSM. Esto es debido a que se promediaron las variaciones de las distancias XY para reducir las contribuciones de las irregularidades topográficas. La reducción de las anomalías superficiales realizadas por el método GRM SSM, (Figura 76), el cual programe en Matlab, aunque ayudo a definir mejor las velocidades del refractor, no mejoro la respuesta del apilado con respecto al método GRM o Plus-Minus, si se tiene en cuenta la perdida de información en las estaciones 1700, 1800 y 1900 debido al promedio de las variaciones de XY para reducir el efecto de las irregularidades de la superficie. Pero si con respecto al DRM, DLT y la corrección de estáticas por elevación en sectores comprendidos entre 2000 y 2400 ms.

Los métodos GRM y Plus Minus programados en MATLAB, dieron un resultado muy similar, cuyas variaciones en tiempo a lo largo de la sección sísmica son menores a 10 ms, Figuras 74 y 75.

Después de la aplicación de los métodos de refracción DRM, DLT, GRM, Plus-Minus y GRM SSM, se aplico estáticas residuales (Figura 77), en ella vemos varios rasgos comunes. En todas las secciones los eventos alrededor de *SRF_SLOC* 1650 y 1750 hasta los 500 ms son pobremente enfocados y con muchos *cycle skips*.

8. CONCLUSIONES

El modelo del estrato somero se caracterizó por presentar grandes contrastes de velocidad, producto del cambio en la composición litológica de la roca madre gracias a las diferentes Formaciones que atraviesa la línea sísmica y a las fallas de la zona que yuxtaponen rocas de baja velocidad frente a rocas de mayor velocidad.

El espesor de la capa meteorizada a partir de los análisis de ripios obtenidos del uphole 3 es de 17.5 ± 2 m., pero con el modelo de velocidades obtenido del picado de tiempos registrados en el uphole 3 se ubica a 18 m.

Los métodos que más se aproximaron al valor real del estrato somero fueron los que se programaron en Matlab, pues el espesor de la capa meteorizada obtenido con los métodos de refracción ejecutados en Promax dio una profundidad de 48 m., mientras con el método GRM programado en Matlab dio 26 m., con el método Plus-Minus fue de 26 m y con el método GRM SSM su espesor fue 12.5 m.

Realizando una comparación del método GRM contenido en el software de procesamiento Promax, con el programado en Matlab, se puede concluir que el cálculo del espesor del estrato somero para el mismo punto sobre la superficie tiene una diferencia de 22 m. La velocidad del refractor calculada con GRM en Promax y GRM programado en Matlab es de 3150 y 2740 m/s respectivamente. Como se puede apreciar, hay una diferencia de 410 m/s. De acuerdo al análisis anterior, el GRM que he programado en Matlab es más aproximado al modelo geológico obtenido con los datos de ripios del uphole 3 y a la velocidad del refractor correspondiente a la Formación León

El método GRM cuyos algoritmos descritos por Palmer, D. (1981) que se implemento en Matlab, brindó mejores resultados debido ha, (a) que las

velocidades del refractor son escogidas de acuerdo a la variación óptima XY, (b) se puede escoger cual es la geometría del refractor más detallada de acuerdo a una variación de distancias XY. Con los algoritmos de GRM en Matlab, se puede controlar esos parámetros, y calcular la velocidad de la capa meteorizada.

La aplicación de estáticas por elevación produjo buenos resultados de apilamiento en áreas donde la superficie topográfica era plana y no presentaba cambios bruscos de variaciones laterales de velocidad en las capas del estrato somero, es decir, entre las estaciones 1650 a 1700. En zonas de mayor complejidad la sección resultante tuvo una pobre respuesta.

El método DRM alineo los reflectores en las zonas de mayor amplitud pero no mejoro la continuidad de los horizontes tanto en los sectores planos ni con relieve, se observaron muchas terminaciones o cycle skips en la línea sísmica.

Con el método DLT los reflectores perdieron enfoque cuando se acercaron a las fallas, sus horizontes se observaron discontinuos aunque disminuyo la cantidad de cycle skips en horizontes de menor y mayor amplitud.

El GRM SSM pudo modelar las velocidades del refractor de manera más confiable pues redujo los artefactos o irregularidades en la superficie que daban como resultado velocidades del refractor de poca credibilidad, la respuesta del apilado fue buena en sectores de alta y baja amplitud excepto en las cercanías a las estaciones 1700, 1800 y 1900, a demás, pudo enfocar en sectores más profundos algunos reflectores que con los anteriores métodos no se logro.

La respuesta del apilado es más óptima con el método grm promax en algunos sectores de la línea, los horizontes presentaron mayor continuidad y mayor enfoque reduciendo la cantidad de cycle skips, en zonas de falla. sin embargo el grm en matlab, al igual que el plus-minus, obtuvieron una mejor respuesta del

apilado para reflectores más profundos, dando mayor claridad en los horizontes cercanos a 1700 ms, conservando la estructura geológica y continuidad en los horizontes más superficiales.

BIBLIOGRAFÍA

Alfonso, C. A., and J. C. Mondragón, 2000, Nuevos Conceptos exploratorios en la Cuenca de Catatumbo, Colombia: VII Simposio Bolivariano Exploración Petrolera en las Cuencas Subandinas, Caracas, p. 382-387.

Baker, L.J., and Winbow, G.A. (1988). Multiple P-wave logging in formations altered by drilling: *Geophysics*, 53, pp. 1207-1218.

Barrero, D., Pardo, A., Vargas, C., Martinez, J. (2007). Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries, and Petroleum Geology, a New Proposal.

Barry, K. M. 1967. Delay time and its application to refraction profile interpretation, *in* Seismic refraction prospecting: A. W. Musgrave, ed., SEG, Tulsa, P. 348-361.

Bridle R., Ley II.R., Al-Homaili M., Maddison B. and Janssen K. 2003. Practical application of implementing a layer model with control from first breaks in Saudi Arabia. 73rd SEG Meeting, Dallas, USA, Expanded Abstracts, 1996–99.

Cooke, R.U. & Doorkamp, J.C. 1990. *Geomorphology in Enviromental Management*. Clarendon Press. Oxford.

Cox, M. (1999). *Static Correction for Seismic Reflection Surveys*. Society Exploration Geophysicists, Tulsa, USA, pp. 103-139.

Cruz, L. E., Alvarez, M. I., Caballero V. M. 2004. *Petrología Sedimentaria: Guías de Laboratorio*.

Cunningham A.B. 1974. Refraction data from single-ended refraction profiles. *Geophysics* 39, 292–301 (errata in. *Geophysics* 39, 918).

García, N. (2007). *Caracterización Geológica y Modelos de Propagación de Ondas del Estrato Somero Aplicado en Datos de Uribante (Cuenca del Catatumbo)*. Bucaramanga, P. 93. Tesis (Pregrado en Geología). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Fisicoquímicas.

Gardner, L. W. 1939. An areal plan of mapping subsurface structure by refraction shooting. *Geophysics*, 4: 247-259.

Geldart, Loyd P. and Sheriff, Robert E. (2004). *Problems in Exploration Seismology and their solutions*. Society Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, USA, pp. 279-281.

Gulunay, N., 1985, A new method for the surface-consistent decomposition of statics using diminishing residual matrices (DRM): 55th Ann. Internat. Mtg., Soc. Expl. Geophys., Expanded Abstracts, 293-295.

Hagedoorn, J.G., (1959). The plus-minus method of interpreting seismic refraction sections: *Geophysical Prospecting*, 7, pp. 158–182.

Hawkins, L. V. 1961. The reciprocal method of routine shallow seismic refraction investigations: *Geophysics*, 26, 806-819.

Hoover, H., Jr., and Schaeffer, H.C. (1942). System for making weathering corrections: United States Patent 2 276 306; (abstract): *Geophysics*, 7, 323.

INGEOMINAS, 1967, *Geología del cuadrángulo G-13, Cúcuta, Bogotá*.

JULIVERT, M., 1968, Lexique Stratigraphique International, Amérique Latine, volume V, Fascicule 4 a, Colombie, (premiere partie), Centre National De La Recherche Scientifique, Paris.

Kragh, J.E., Gouly, N.R., and Findlay, M.J. (1991). Hole-to-surface seismic reflection surveys for shallow coal exploration: *First Break*, 9, pp. 335-344.

Mann, P., A. Escalona, and M. V. Castillo, 2006, Regional geologic and tectonic setting of the Maracaibo supergiant basin, western Venezuela. *AAPG Bulletin*, v. 90, p. 445-478.

Marsden, D. 1993. Static corrections. A review. *The Leading Edge*, 12(1): 43-49 and 12(2): 115-120.

Meissner, R. (1961). Wave-front diagrams from uphole shooting: *Geophysical Prospecting*, 9, pp. 533-543.

Meissner, R., Stümpel H., and Theilen, F. (1985). Shear wave studies in shallow sediments, in Dohr, G.P., Ed., *Handbook of geophysical exploration*, sect. 1, seismic exploration. Vol. 15B, *Seismic shear waves: Part B, Applications: Geophysical Press*, pp. 224-253.

MOJICA, P., 1986, Roca Fosfórica de Sardinata, *Geología Colombiana* No. 15, pp. 155-176, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Naville, C., Verdier, F., Layotte, P.C., and Serbutoviez, S. (1992). Uphole survey digitally recorded and processed as multioffset RVSP's: 54th Mtg., Eur. Assn. *Exploration Geophysics, Abstracts*, pp. 580-581.

Neilson, D.J., and Gendzwill, D.J. (1993). Shallow seismic surveys in pleistocene till and unconsolidated cretaceous sediments, Central Saskatchewan, Canada:

63rd Ann. Internat. Mtg., Society Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, pp. 507-511.

Notestein, F. B., C. W. Hubman & J.W. Bowler, 1944. Geology of the Barco Concession, Republic Of Colombia, South America, Geol. Soc. Am. Bull., 55 (9): 1165-1216.

Palmer, D., 1980. The generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation: Soc. Expl. Geophys.

Palmer, D., 1981. An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation: Geophysics, 46, 1508–1518.

Palmer, D., 1986. An introduction to the generalized reciprocal method of seismic refraction interpretation: Geophysics, p. 104.

Palmer, D., Ramin Nikrouz, and Andrew Spyrou. (2005). Statics corrections for shallow seismic refraction data: Exploration Geophysics 36, pp. 7–17.

Patterson, A.R. (1964). Datum corrections in glacial drift: Geophysics, 29, pp. 957-967.

PDVSA, 2005, Código Estratigráfico de Venezuela.

Peltier, L., 1950. The geographic cycle in periglacial regions as it related to climate geomorphology. Association Geographers, Annals. 40: 214-236.

Ralph Bridle, Nikolai Barsoukov, Mohammad Al-Homaili, Robert Ley and Ameerah Al-Mustafa. 2006. Comparing state-of the art near-surface models of a seismic test line from Saudi Arabia. Geophysical Prospecting, 54, 667–680.

Rueda, D., Calderon, Z. y Agudelo, W. (2007). Propuesta para una nueva metodología en la interpretación de capas y velocidades para datos obtenidos por medio de la medición Uphole. Método de Aceleración (MA). Memorias, XI Congreso Colombiano de Geología, Bucaramanga, Colombia, p. 58.

Sheriff, R.E., and Geldart, L.P. (1982). Exploration seismology, Vol. 1, History, theory and data acquisition: Cambridge Univ. Press.

Sheriff, R. E. (1991). Encyclopedic dictionary of exploration geophysics: Soc. Expl. Geophys.

Sheriff, R.E., and Geldart, L.P. (1995). Data processing. In: Exploration seismology. Cambridge University Press. Cambridge, pp. 275-348.

Skvortsov, A.G., Hunter, J.A., Goriainov, N.N., Burns, R.A., Tsarov, A.M., and Pullan, S.E. (1992). High-resolution shear-wave reflection techniques for permafrost engineering applications: new results from Siberia: 62nd Ann. Internat. Mtg., Society Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts, pp. 382-384.

Stümpel, H., Kähler, S., Meissner, R., and Milkereit, B. (1984). The use of seismic shear waves and compressional waves for lithological problems of shallow sediments: Geophysical prospecting, 32, pp. 662-675.

Suppe, J. (1983). Geometry and kinematics of fault bend folding. *Am. J. Sci.*, 283: 684-721.

Suyama, K., Imai, T., Ohtomo, H., Ohta, K., and Takahashi, T. (1987). Delineation of structures in alluvion and diluvion using SH-wave reflection and VSP methods,

in Danbon, S.H., and Domenico, S.N., Eds., Shear wave exploration: Society Exploration Geophysicists., pp. 165-179.

Talukdar, S., and F. Marcano, 1994, Petroleum systems of the Maracaibo Basin, Venezuela, in L. Magoon and W. Dow, eds., The petroleum system-From source to trap: AAPG Memoir 60, p. 463-481.

Thornburgh, H. R. (1930). Wave-front Diagrams in Seismic Interpretation, Bull. Am. Assoc. Petroleum Geologists, Vol. 14, No. 2.

Tullos, F. N., and Reid, A. C., 1969, Seismic Attenuation of Gulf Coast sediments: Geophysics, 34, 516-528. Reprinted, 1981, *in* Toksöz, M. N., and Jhonston, D. H., Eds., Seismic wave attenuation: Soc. Expl. Geophys., 271-283.

Van Melle, F.A. and Weatherburn, K. R. (1953). Ghost reflections caused by energy initially reflected above the level of the shot: Geophysics, 18, 793-804.

White, J.E., and Sengbush, R.L. (1953). Velocity measurements in near-surface formations: Geophysics, 18, 54-69.

Woods, J.P. (1952). Up-hole times: Geophysics, 17, pp. 229-235.

Yilmaz, Ö. (1988). Seismic data processing. Stephen Doherty Editor. U.S.A. p.530.

Yilmaz, Ö. (2001). Seismic data processing. Stephen Doherty Editor. U.S.A. p.530.

Yurewicks, D.A., D.M. Advocate, H.B. Lo, and E.A. Hernandez, 1998, Source Rocks and Oil Families, Southwest Maracaibo Basin (Maracaibo Basin, Catatumbo Subbasin), Colombia: AAPG Bulletin, v. 82, n. 7, p. 1329-1352.

ANEXOS

ANEXO A. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL.

El Bloque Uribante se ubica en la parte más oriental de la cuenca del Catatumbo en límites con Venezuela; las rocas que se encuentran en la zona, son sedimentos depositados desde el Aptiano (Grupo Uribante) hasta el reciente, siendo más frecuentes y ampliamente distribuidas las rocas del Terciario, específicamente las que abarcan desde el Paleoceno (Formación Los Cuervos) superior hasta el Mioceno (Formación Guayabo).

Espacialmente, las rocas más antiguas se encuentran en los extremos sur oriental y sur occidental del bloque, como núcleo de estructuras anticlinales y las rocas más recientes hacia la parte central, como núcleo de estructuras sinclinales. De igual manera, gran parte de la zona central del área del proyecto se encuentra cubierta por sedimentos cuaternarios, en su gran mayoría aluviales de los ríos principales (Zulia, Pamplonita y Guaramito), en las cuales se ha desarrollado un intenso y extenso cultivo de arroz.

Estas rocas se ven afectadas por grandes pliegues tanto sinclinales como anticlinales siendo más frecuentes los segundos, aun cuando el rasgo estructural más grande e importante es el Sinclinal del Zulia. Igualmente se encuentran numerosas fallas, la mayoría de las cuales presenta un rumbo aproximado Norte – Sur, dentro de las cuales se destacan las de Aguardiente, González, Tasajero y Ricaurte, todas de tipo inverso, con vergencias predominantemente al oriente.

A.1 ESTRATIGRAFÍA

En el área de influencia de las líneas sísmicas del programa Uribante 2D 2005, se encuentran unidades que van desde el Cretáceo Inferior hasta el Cuaternario diferenciándose tanto por rasgos geomorfológicos como por contrastes litológicos.

A continuación se reseña cada una de las unidades con descripciones de campo y se complementa con una breve reseña bibliográfica (de acuerdo a la nomenclatura sugerida por Notestein en (1944) para la Concesión Barco). En la (Figura 80) se presenta la columna estratigráfica generalizada del Bloque Uribante.

Las unidades más antiguas se encuentran en los extremos sur oriental (sector de San Faustino) y sur occidental (Anticlinal de Aguardiente) del Bloque, donde fallas inversas ponen en contacto rocas cretácicas sobre rocas más recientes; en la zona del Cerro Tasajero la secuencia sedimentaria no presenta fallamiento y se diferencian rocas de la Formación Catatumbo (Ksct) en contacto normal con las rocas terciarias de la Formación Barco (Tpb) en el eje del Anticlinal de Tasajero.

A.1.1 Grupo Uribante (Kiu). Deriva su nombre del Río Uribante en Venezuela, es la más antigua del Bloque, se divide en tres Formaciones que de base a tope son: Tibú, Mercedes y Aguardiente. Su primera referencia en Colombia corresponde a Notestein et al (1944), en la Geología de la Concesión Barco.

En el Bloque Uribante esta unidad presenta afloramientos en el sector de San Faustino, en el carretable que conduce al corregimiento de Ricaurte, donde es posible identificar las dos Formaciones superiores de la unidad formando una estructura anticlinal, hacia el núcleo predominan las intercalaciones de calizas, lodolitas y areniscas de la Formación Mercedes, con muy pocos afloramientos y en los flancos areniscas cuarzosas muy fracturadas correspondientes a la Formación Aguardiente.

En el sector occidental, en la Loma de Astilleros, aunque se encuentran afloramientos de las tres Formaciones, es la Formación Aguardiente la que presenta mejor y más extensa exposición, con areniscas de cuarzo, localmente glauconíticas, las cuales presentan estratificación cruzada.

El espesor de la unidad, de acuerdo a observaciones de campo y datos del pozo Cerro González -1, es de 550 metros. La edad asignada a esta unidad es Aptiano – Albiano.

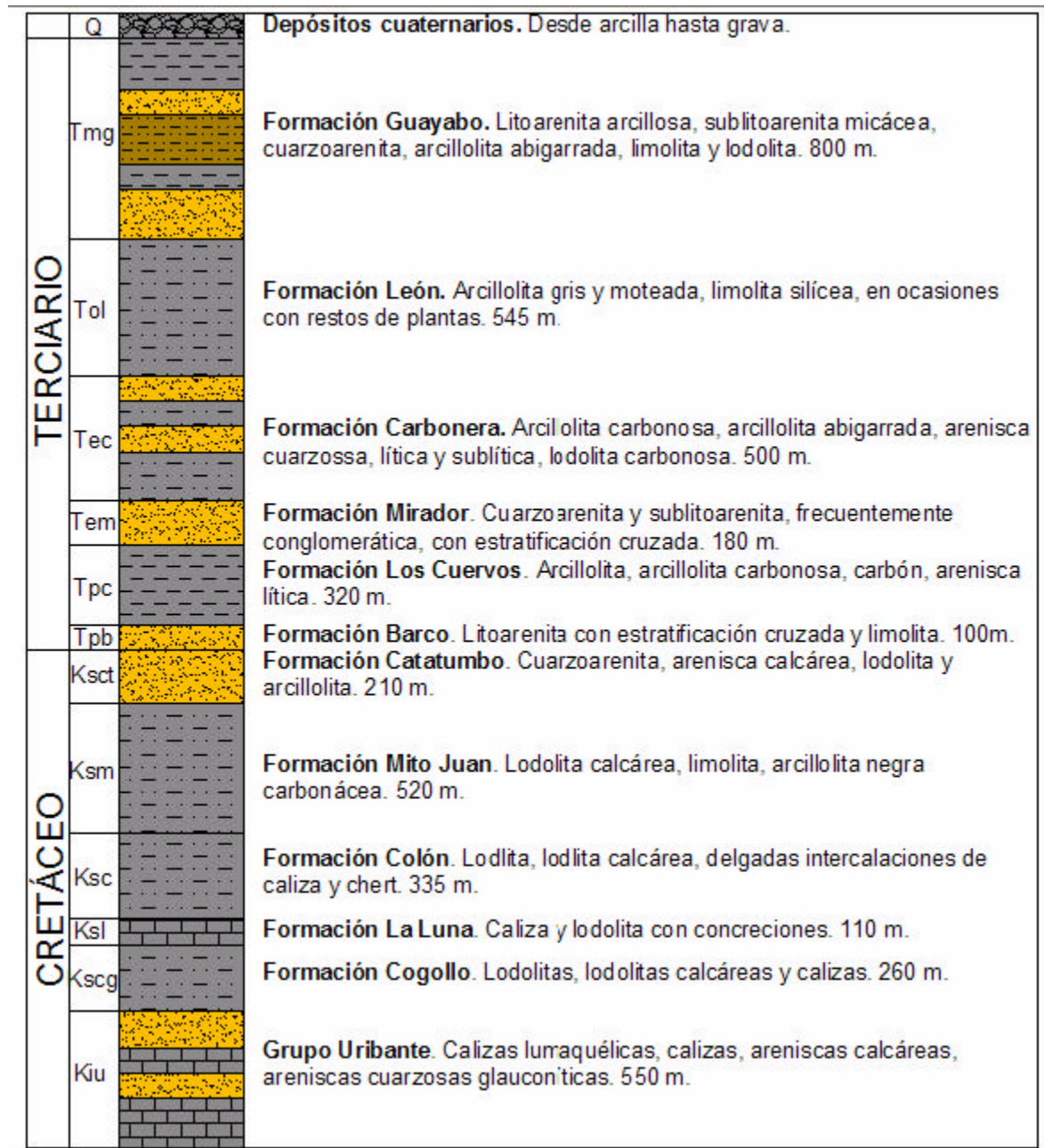


Figura 80. Columna estratigráfica generalizada del Bloque Uribante (sin escala). Tomada de ECOPEL (2005).

A.1.2 Formación Cogollo (Ksc). La referencia original fue dada por Garner (1926, en Julivert, 1968) y redefinida por Notestein et al (1944), refiriéndose a una sucesión de “shales” localmente bituminosos con intercalaciones de calizas.

En el Anticlinal de Aguardiente se encuentran expuestas las intercalaciones de lodolitas, lodolitas calcáreas y calizas en contacto concordante con las cuarzoarenitas de la Formación Aguardiente de la Grupo Uribante; dado que en esta unidad predominan los sedimentos blandos se genera una expresión geomorfológica suave, permitiendo diferenciarla de las unidades tanto infra como suprayacentes.

Debido a que el término Formación Cogollo puede ser confundido con el Grupo Cogollo de la Serranía de Perijá, en 1967 se sugiere abandonar el uso de Formación Cogollo proponiendo utilizar el nombre Formación Capacho. Su espesor, de acuerdo a la perforación en el pozo Cerro González – 1 es de 260 metros. Aunque la fauna es escasa, actualmente se le asigna edad Cenomaniano.

A.1.3 Formación La Luna (Ksl). Inicialmente propuesta como Formación por Garner (1926), deriva su nombre de la Quebrada La Luna en la Serranía de Perijá, Estado Zulia, Venezuela. Esta Formación aflora en la Vereda San Miguel, en la vía que de la zona conocida como la Y conduce al municipio de Sardinata y en el Río San Miguel; en esta zona muestra una sucesión de lodolitas y lodolitas calcáreas con concreciones, calizas y calizas lumaquéticas en capas que alcanzan los 2 metros de espesor, presenta impregnación de hidrocarburo, así como delgados niveles fosfáticos y de chert, estos niveles fosfáticos, con alta presencia de Apatito, pueden ser explotables Mojica, (1986). Esta unidad muestra pendientes abruptas y en general una morfología moderadamente escarpada lo que permite una adecuada delimitación.

Alcanza un espesor de 110 m, con base en los datos de campo y los suministrados por las perforaciones del pozo Cerro González al norte de la zona. Aun cuando los únicos fósiles recolectados en esta unidad son de edad Coniaciano; Schwarck Anglade (1956 en Léxico Estratigráfico de Venezuela) y Mojica (1986) asignan una edad Turoniano a Coniaciano y en la Concesión Barco, la Formación La Luna es posterior al Turoniano Superior.

A.1.4 Formación Colón (Ksc). El nombre Colón deriva de Venezuela y fue introducido en la literatura por Liddle en 1928 bajo la forma de “Colon Shale”, el nombre es tomado del Anticlinal del Colón en el estado de Táchira así como del Distrito de Colón en el estado de Zulia Venezuela.

Localizada en la parte centro occidental del área, por la vía que conduce al municipio de Sardinata, siendo en el Río San Miguel, al sur de la desembocadura de la Quebrada Los Venados, donde mejor se expone su litología, la cual consta principalmente de intercalaciones de lodolitas y lodolitas calcáreas, negras con concreciones de 5 a 10 cm de diámetro, con delgados niveles de calizas y chert. Presenta una morfología baja, diferenciándose bien de la Formación La Luna, sin embargo es difícil trazar en campo su contacto superior con la Formación Mito Juan, debido a su morfología y litología similares.

Con base en los análisis de campo y los datos proporcionados por el pozo Cerro González esta unidad posee un espesor de 335 m. La edad asignada para esta Formación es Maastrichtiano. Según Sellier De Civrieux (1952 en Léxico Estratigráfico de Venezuela) la parte inferior de la Formación Colón es del Campaniano Superior - Maastrichtiano Inferior.

A.1.5 Formación Mito Juan (Ksm). El término Mito Juan fue publicado por primera vez por Garner (1926, en Julivert 1968), en el Caño Mito Juan, cerca de la

frontera colombiana en la parte sur de Colón (Estado Zulia). Se ubica en el núcleo del Anticlinal de Aguardiente y se extiende hacia el occidente, aflorando en el Río San Miguel al norte de la desembocadura de la Quebrada Los Venados y en la Quebrada La Leche, donde se observan intercalaciones de lodolitas calcáreas y limolitas esporádicamente calcáreas, arcillolitas negras carbonáceas dispuesta en laminas con nódulos ferruginosos que alcanzan los 20 cm de diámetro. Genera una morfología suave al igual que La Formación Colon, su límite se ubica por el cambio en la coloración de los sedimentos los cuales pasan de negros y grises oscuros a claros, adicionalmente se evidencia una disminución del contenido calcáreo así como un aumento en el espesor de las capas de limolitas y arcillolitas en la Formación Mito Juan. Su contacto superior es mejor definido morfológicamente debido a los escarpes un poco mas pronunciados de la Formación Catatumbo.

Posee en promedio 520 m de espesor de acuerdo con observaciones de campo y registros del pozo Cerro González al norte de la zona. Su edad es Maastrichtiano.

A.1.6. Formación Catatumbo (Kst). Descrita por primera vez por Notestein et al (1944) en la Geología de la Concesión Barco, el nombre procede del Río Catatumbo, en el Dpto. de Norte de Santander. Esta Formación se localiza en el núcleo del Anticlinal de Aguardiente y se extiende hacia el occidente, siendo cortada por la línea U-2005–1065 en sus estacas menores, allí se observan limolitas arenosas, intercaladas con sublitoarenitas que eventualmente muestran estratificación cruzada, adicionalmente en algunos sectores se diferencian arcillolitas levemente calcáreas de colores claros. Esta unidad presenta ligeras impregnaciones de hidrocarburo.

Hacia la parte sur oriental, se encuentra aflorando en el núcleo del Anticlinal de Tasajero donde se aprecian intercalaciones de lodolitas y arcillolitas, con cuarzoarenitas, areniscas calcáreas con fragmentos de peces y fosfatos,

adicionalmente calizas en capas delgadas, hacia el tope se observa glauconita con restos de plantas. Aun cuando no genera grandes escarpes su morfología es ligeramente más fuerte que la de la Formación Mito Juan, de la cual también se diferencia por la presencia de delgados niveles de areniscas cuarzosas y sublitoarenitas; su contacto superior es evidenciado tanto morfológicamente como litológicamente, ya que los paquetes de areniscas aumentan y los de lodolitas disminuyen, lo que hace que las pendientes de la Formación Barco sean mayores.

El espesor de esta Formación es de aproximadamente 210 m y se acepta una edad del Maastrichtiano para ella.

A.1.7. Formación Barco (Tpb). Originalmente definida y publicada por Notestein et al. (1944) en la Geología de la Concesión Barco, frontera colombo venezolana, su nombre procede de la sección tipo situada en el flanco oriental del Anticlinal de Petrólea.

La Formación Barco aflora en los extremos Occidental y sur oriental del Bloque Uribante. En el primero aflora haciendo parte del Anticlinal de Aguardiente en la zona sur del Filo El Guayabo, mostrando litoarenitas con cemento ferruginoso, las cuales exhiben estratificación cruzada en paquetes gruesos, que se intercalan con capas delgadas de limolitas; se aprecian igualmente pequeños niveles de limolitas con nódulos ferruginosos. En el segundo se aprecian sublitoarenitas con matriz arcillosa y estratificación cruzada en capas gruesas.

En la zona occidental, a diferencia de la suroriental, la Formación Barco genera escarpes moderados que contrastan con la forma suave de la unidad infrayacente (Formación Catatumbo). Su contacto superior es definido por la aparición de las arcillolitas con materia orgánica y la disminución en el espesor y frecuencia de las capas de arenisca en la Formación Los Cuervos.

El espesor de esta unidad es de aproximadamente 100 m. La edad de esta Formación es Paleoceno Inferior, edad considerada, porque la Formación Barco suprayace la Formación Catatumbo, la cual posee fauna del Cretáceo Superior.

A.1.8. Formación Los Cuervos (Tpc). Publicada originalmente por Notestein et al. (1944) en la Geología de la Concesión Barco, el nombre de esta Formación procede de la Quebrada Los Cuervos, afluente del Río Catatumbo, donde tiene su sección tipo. Tiene una amplia distribución en el Bloque Uribante, especialmente en la zona nor-occidental y sur-oriental y cuenta con buenas exposiciones en toda el área.

Específicamente se ubica en la vía que conduce a la vereda La Unión, en el Cerro González donde se encuentra en contacto fallado con la Formación Carbonera, tanto al este como al oeste. Al norte se encuentra en contacto normal con la Formación Mirador. Hacia el sur del Cerro González, en el sector conocido como El Tablazo, tiene gran extensión de su área y está en contacto concordante con las Formaciones tanto infra como suprayacentes. Hacia el suroriente del Bloque, en el Cerro Tasajero, hace parte del Anticlinal del mismo nombre, en contacto fallado con la Formación Guayabo al este. En estas áreas afloran principalmente intercalaciones de arcillolitas, arcillolitas carbonosas, y mantos de carbón, con capas delgadas de sublitoarenitas micáceas con gran contenido de materia orgánica.

Dada la continuidad lateral y la calidad de los mantos de carbón, sobre esta Formación se ubican numerosas minas de este mineral. El espesor de esta Formación es de alrededor de 320 metros. Su edad corresponde al Paleoceno Superior - Eoceno Inferior.

A.1.9. Formación Mirador (Tem). Originalmente referenciada por Garner (1926 en Julivert 1968) en Venezuela, fue introducida en Colombia por primera vez por Notestein et al. (1944) en la Geología de la Concesión Barco. Su nombre se deriva

del Cerro Mirador en la parte superior del Río Lora, al sur del Distrito de Perijá, Estado de Zulia, en Venezuela.

La Formación Mirador aflora principalmente en las áreas noroccidentales y surorientales del Bloque Uribante. En el área noroccidental aparece en tres zonas diferentes, siendo la más oriental la que se observa en el núcleo del Anticlinal de González, donde posee contactos normales con la Formación Carbonera, a excepción de la parte occidental donde se encuentra cabalgando sobre esta misma Formación; en el Cerro González, junto al pozo Cerro González 1 de Ecopetrol, se muestra como una franja alargada en contacto fallado hacia el norte con la Formación Carbonera y hacia el este cabalgando sobre una pequeña cuña de si misma; hacia el este y oeste sus contactos son concordantes con la Formación Los Cuervos. Se distingue también cerca de la vereda El Guamo, formando un gran escarpe que se prolonga hacia el este fuera de los límites del Bloque, con contactos normales tanto con la Formación Los Cuervos como con la Formación Carbonera, a excepción de la parte suroriental donde cabalga sobre esta última.

En el área suroccidental, en San Faustino, especialmente por la vía que conduce a Ricaurte se aprecia una faja alargada en sentido noreste-suroeste, fallada contra la Formación Guayabo y normal con la Formación Carbonera; adicionalmente hace parte del núcleo del Anticlinal de Tasajero junto al cerro del mismo nombre con un contacto fallado hacia el oriente con la Formación Guayabo.

En ambas áreas la Formación Mirador está compuesta principalmente por cuarzoarenitas muy limpias que van desde grano muy fino hasta conglomeráticas, llegando a diferenciarse conglomerados cuarzosos de gránulos y guijos finos; en algunos afloramientos el contenido de cuarzo disminuye levemente y se alcanzan a percibir sublitoarenitas, todas en capas gruesas que en algunas ocasiones se

intercalan con capas delgadas de arcillolitas abigarradas plásticas. Estas rocas exhiben frecuente estratificación cruzada y trazas de materia orgánica.

Dada la composición de esta unidad, se caracteriza por presentar fuertes escarpes que hacen fácil su delimitación con otras formaciones. Su espesor es de 180 m y se le ha asignado una edad Eoceno Inferior – Medio, siendo discutido ese rango en la actualidad.

A.1.10. Formación Carbonera (Tec). Mencionada por primera vez por Notestein et al. (1944) en la Geología de la Concesión Barco. El nombre deriva de la Quebrada Carbonera, afluente del Río Zulia, en el flanco oriental del Anticlinal de Petrólea su sección tipo se halla 12 km al NW en dicha quebrada en Puerto Villamizar, en el Río Zulia.

Es la unidad que mayor distribución tiene dentro del Bloque Uribante, ya que se encuentra en ambos flancos del sinclinal de Zulia, mostrando contactos tanto fallados como normales con las demás unidades del área.

En el flanco occidental hacia el norte se aprecia, en el caserío Remolino, como una cuña que descansa de manera conforme sobre la Formación Mirador y sobre la cual cabalgan las rocas de la Formación Los Cuervos, seguidamente forma un gran faja con dirección norte – sur que atraviesa todo el bloque y que se encuentra al oeste en contacto fallado (Falla Aguardiente) con todas las rocas de la secuencia sedimentaria cretácea (Grupo Uribante, Formaciones Cogollo, La Luna Colón, Mito Juan y Catatumbo) y unidades terciarias como las Formaciones Barco, Los Cuervos, Mirador y la parte inferior de la Formación Carbonera. Los contactos orientales de dicha faja son normales en la parte sur con la Formación León y fallados al norte con la Formación Mirador, donde hace parte de los flancos del Anticlinal de González donde cabalga sobre sí misma.

En el flanco oriental del Sinclinal de Zulia, se identifica haciendo parte del núcleo de Anticlinal de La Mucurera donde cabalga sobre la Formación León en el flanco oriental de dicho anticlinal. También se encuentra en el caserío Oripaya cabalgando sobre sus rocas más recientes, las cuales hacen parte del flanco occidental del Anticlinal de Tasajero; en este anticlinal el flanco oriental se encuentra fallado (Falla Tasajero) con las rocas de la formación Guayabo.

La litología que representa a la Formación Carbonera en este Bloque son intercalaciones de arcillolitas carbonosas, arcillolitas abigarradas, lodolitas carbonosas y areniscas cuarzosas, líticas y sublíticas; las capas de las litologías más finas son gruesas mientras que el espesor de la capas de arenisca es de delgado a medio encontrándose esporádicas capas gruesas hacia la base en contacto con la Formación Mirador; también, aun cuando no es muy frecuente, se hayan capas de calizas y areniscas calcáreas en capas muy delgadas. Esta Formación posee, al igual que la Formación Los Cuervos, abundantes mantos de carbón, sin embargo, su calidad no es tan alta como la de los ubicados en esta última por lo que es menos frecuente la minería.

Genera una morfología escalonada, debido a las intercalaciones que posee diferenciándose de las unidades con que limita. El espesor de esta unidad es de 500 m. Aun cuando no está bien definida la edad de esta unidad y varia de un sitio a otro, se reconoce como Eoceno Medio - Oligoceno Inferior, el cual se discute en la actualidad.

A.1.11. Formación León (Tol). La primera publicación realizada para esta Formación es de Notestein et al. (1944) en la Geología de la Concesión Barco. Su nombre procede de la Quebrada León, afluente del Río Zulia, en la parte oriental del Anticlinal de Petrolea, al NW de Puerto Villamizar.

La Formación León aflora en la parte noroccidental del Bloque Uribante, haciendo parte del flanco oriental del Anticlinal de González, en contacto concordante con las Formaciones Carbonera y Guayabo; aparece también en la parte occidental del Sinclinal de Zulia como una franja alargada en sentido norte – sur aproximadamente, en contacto concordante con la Formación Carbonera, sin embargo cubierto en algunas partes por los depósitos cuaternarios del Río Zulia.

En el flanco sur oriental del Bloque aflora formando el Anticlinal de La Mucurera, con contactos infra y suprayacentes normales; esta unidad también hace parte del Anticlinal de Tasajero siendo cortada en la parte occidental de este por el cabalgamiento que genera sobre ella la Formación Carbonera. La zona más oriental en la que aflora es San Faustino exponiéndose mejor sobre la vía a Ricaurte donde se halla en contacto normal con la Formación Carbonera y fallado con las rocas cretácicas de la Grupo Uribante.

Esta unidad se caracteriza por su granulometría fina, mostrando arcillolitas de colores grises y moteados, limolitas síliceas algunas con restos de plantas y materia orgánica. Pequeñas intercalaciones de lodolitas grises con areniscas sublíticas en capas delgadas y esporádicamente medias son observables en esta Formación aun cuando no predominan en toda el área. Los afloramientos de esta unidad son escasos y frecuentemente alterados; sin embargo es diferenciable por la morfología suave que genera.

A.1.12. Formación Guayabo (Tmg). La primera referencia que de la Formación Guayabo se tiene es la dada en la Geología de la Concesión Barco por Notestein et al. (1944). El nombre de esta unidad deriva del Cerro Guayabo en el Distrito de Colón (Venezuela).

Aflora en el flanco oriental del Sinclinal de González en contacto concordante con la Formación León. Tiene una gran extensión en la región oriental del Bloque,

haciendo parte del Anticlinal de la Mucurera donde, hacia el flanco este, se falla sobre si mismo; en esta parte se alarga hacia el norte hasta cerca del caserío de Agua Clara. También hace parte del Anticlinal de Tasajero donde es cortado al oeste por el cabalgamiento que hace sobre él la Formación León, así como por depósitos cuaternarios. Se ubica adicionalmente en el sector suroriental del Bloque cubierto en parte por los depósitos recientes del Río Pamplonita donde, hacia el oeste, se aprecia fallado sobre casi la totalidad de la secuencia sedimentaria terciaria (Formaciones Los Cuervos, Mirador, Carbonera y León). Hacia el este, en San Faustino, es cabalgado por la Formación Mirador.

En general está en una Formación predominantemente arenosa, sin embargo, también se aprecian paquetes de arcillolitas y limolitas abigarradas y rojizas plásticas; está principalmente compuesta por litoarenitas arcillosas, sublitoarenitas micáceas, cuarzoarenitas con bioturbación y en menor cantidad subarcosas. Se aprecian en menor cantidad intercalaciones de lodolitas, limolitas, cuarzoarenitas y sublitoarenitas con fragmentos de plantas y troncos carbonizados. En la parte sur del Anticlinal la Mucurera presenta procesos de erosión fuertes evidenciados por el continuo carcavamiento de esta formación.

El espesor de esta Formación en general es de 800 m. Sin embargo, este espesor es aproximado, ya que no se observó en ningún lugar el tope de esta unidad. Aunque la edad de la Formación Guayabo en la Concesión Barco queda imprecisa la mayoría de autores se inclinan por una edad del Mioceno, pero sin bases paleontológicas para asegurarlo.

A.1.13. Depósitos Cuaternarios (Q). Los sedimentos recientes que se distribuyen más ampliamente en la zona, son los depósitos aluviales del Río Zulia, que cubren el núcleo del sinclinal de mismo nombre y del Río Pamplonita y Guaramito que cubren la parte oriental del Bloque Uribante, en menor proporción los aluviales correspondientes al río San Miguel en parte noroccidental del bloque.

Hacia el flanco oriental del Sinclinal de Zulia se diferencian paquetes gruesos de arcillas, arenas y gravas polimícticas, en estas últimas se aprecian rellenos de canal y estratificación cruzada; aunque están compuestas principalmente por fragmentos de rocas sedimentarias se encuentran también guijos y cantos de rocas cristalinas tanto ígneas como metamórficas.

A.2 GEOLOGIA ESTRUCTURAL

El Bloque Uribante se localiza en el extremo más oriental de la cuenca sedimentaria de del Catatumbo. La parte de esta cuenca que corresponde con el Bloque Uribante, se caracteriza por una serie de pliegues, principalmente anticlinales con ejes de dirección Norte – Sur, y fallas de cabalgamiento también con rumbos preferenciales Norte – Sur pero con buzamientos variados hacia el este y oeste.

La estructura principal de la zona es el Sinclinal de Zulia, la cual corresponde con un pliegue de dirección NE-SW que se ubica en la parte central del bloque, cuyo núcleo se encuentra cubierto por los depósitos aluviales del río del mismo nombre. Oeste a este los pliegues más importantes son:

A.2.1 Anticlinal de Aguardiente. Se ubica en la parte Suroccidental del bloque, con dirección N – S y un cabeceo hacia el Norte; afecta principalmente la secuencia sedimentaria cretácea y es limitado al este por una falla de cabalgamiento (Falla de Aguardiente).

A.2.2 Anticlinal de González. Se encuentra localizado en la parte Noroccidental del área de estudio, con dirección preferencial N – S, es una estructura con cabeceo hacia el Sur, truncada hacia el oeste por cabalgamientos sucesivos de las rocas del terciario.

A.2.3 Anticlinal La Mucurera. Estructura de eje N –S localizada en la parte centro sur del Bloque, que expone en su núcleo las rocas de la Formación Carbonera; presenta el flanco oriental fallado por el cabalgamiento de la Formación Guayabo sobre rocas de esta misma unidad.

A.2.4 Anticlinal de Tasajero. Se ubica en el extremo suroriental del área con dirección preferencial N – S, posee una leve inclinación hacia el W, con ambos flancos fallados, se encuentra en el cerro que le da su nombre y afecta toda la secuencia terciaria, incluyendo la Formación Catatumbo del Cretáceo Superior.

A.2.5 Falla de Aguardiente. Localizada en el extremo occidental del Bloque Uribante, es la falla más importante de la zona, ya que atraviesa la totalidad del área, en sentido Norte – Sur, con buzamiento hacia el oeste, levanta la totalidad de la secuencia Cretácea y parte de la Terciaria, para ponerla en contacto con las rocas terciarias de la Formación Carbonera. Hacia el sur cerca a la Loma de Astilleros cambia de rumbo hacia el oeste y pone en contacto al Grupo Uribante con la secuencia Terciaria.

A.2.6 Falla González. Se extiende cerca del caserío El Remolino, hacia la parte más Noroccidental del bloque, con rumbo NW – SE y buzamiento hacia el este, hace cabalgar la Formación los Cuervos sobre las rocas de la Formación Carbonera.

A.2.7 Falla de Tasajero. Con rumbo N – S como las demás estructuras del área, afecta el flanco oriental del anticlinal del mismo nombre, y hace que la secuencia terciaria se falle contra la Formación Guayabo.

A.2.8 Falla de Ricaurte. Localizada en la parte más oriental del bloque, cerca al límite con Venezuela y al corregimiento de Ricaurte, pone en contacto rocas del

Cretáceo Inferior (Grupo Uribante) con rocas del Terciario Superior (Formación León).

ANEXO B. SEUDOCODIGOS EN MATLAB CORRESPONDIENTES AL MÉTODO GRM

```
load 'shots151176.txt'
```

```
x=shots151176([1:100],5)*15; %Distancia superficial offset x106
```

```
ay=shots151176([1:100],2); %ay106
```

```
bx=shots151176([1:100],4); %bx154
```

```
ab=566.87; %Tiempo desde 'a' hasta 'b'
```

```
ay1=shots151176([2:100],2);ay2=shots151176([3:100],2);ay3=shots151176([4:100],2);ay4=shots151176([5:100],2);ay5=shots151176([6:100],2);ay6=shots151176([7:100],2);ay7=shots151176([8:100],2);
```

```
bx1=shots151176([1:99],4);bx2=shots151176([1:98],4);bx3=shots151176([1:97],4);bx4=shots151176([1:96],4);bx5=shots151176([1:95],4);bx6=shots151176([1:94],4);bx7=shots151176([1:93],4);
```

```
x1=shots151176([2:100],5)*15;x2=shots151176([3:100],5)*15;x3=shots151176([4:100],5)*15;x4=shots151176([5:100],5)*15;x5=shots151176([6:100],5)*15;x6=shots151176([7:100],5)*15;x7=shots151176([8:100],5)*15;
```

```
%Tv=función análisis de velocidad (2)
```

```
Tv=(ay-bx+ab)/2+105; Tv1=(ay1-bx1+ab)/2+90; Tv2=(ay2-bx2+ab)/2+75;
```

```
Tv3=(ay3-bx3+ab)/2+60; Tv4=(ay4-bx4+ab)/2+45;
```

```
Tv5=(ay5-bx5+ab)/2+30; Tv6=(ay6-bx6+ab)/2+20; Tv7=(ay7-bx7+ab)/2+10;
```

```
%Tv8=(ay8-bx8+ab)/2+30; Tv9=(ay9-bx9+ab)/2+20;
```

```
%Tv10=(ay10-bx10+ab)/2+10;
```

```
%Tv1=(ay1-bx1+ab)/2;
```

```
%Tv1=(bx1-ay1+ab)/2; %Utilizado para invertir las llegadas segun el metodo "butterfly adjustment".
```

```

Tvx=Tv([5:100],:);
Tv1x=Tv1([4:99],:);
Tv2x=Tv2([3:98],:);
Tv3x=Tv3([2:97],:);
Tv4x=Tv4([1:96],:);
%Tvxx=(ay-bx+ab)/2; Tgxxx=Tgxx([5:100],:);% Utilizado para restar XY=0.
xx=shots151176([5:100],5)*15;
Tvtotal = [Tvx,Tv1x,Tv2x,Tv3x,Tv4x];
Tvpromedio = mean(Tvtotal,2)-90;

plot(x,Tv,'r*');
hold on;
plot(x1,Tv1, '*');plot(x2,Tv2, '*');plot(x3,Tv3, '*');plot(x4,Tv4, '*');plot(xx,Tvpromedio, 'm*');
;%plot(x5,Tv5, '*');plot(x6,Tv6, '*');plot(x7,Tv7, '*');hold off
title('GRAFICA ANALISIS DE VELOCIDAD')
xlabel('DISTANCIA (m)')
ylabel('TIEMPO (ms)')
legend('XY=0','XY=15','XY=30','XY=45','XY=60','XY=75','XY=90')
% $\frac{d}{dx}(Tv_5)=1/V'n$ .  $t=0.22762*x+10.709$ . Luego  $V'n=1/0.28701=2.843$ ;
%XY=20 (6). Ajuste lineal de XY=20.

A=Tv([50:66]); %A y B fueron creados para calcular las velocidades de
%2780 m/s para A=Tv([4:66]) y 2938 m/s para A=Tv([66:96]); 2877 m/s para
A=Tv([50:66]) derivadas de (6)
B=shots151176([50:66],5)*15;
%plot(B,A,'rx');
title('GRAFICA ANALISIS DE VELOCIDAD')
xlabel('DISTANCIA (m)')
ylabel('TIEMPO (ms)')
%legend('4904.4 m/s')

```

%s_static176=15.47; % calculadas de la funcion de analisis de velocidad
A=Tv1([4:66]).

%s_static201=16.258; %A=Tv1([66:93])

ANEXO C. SEUDOCODIGOS EN MATLAB CORRESPONDIENTES AL MÉTODO GRM SSM

```
load 'shots151176.txt'
```

```
%x=shots151176([1:96],5)*15; %Distancia superficial offset x106
```

```
%ay=shots151176([1:96],2); %ay106
```

```
%bx=shots151176([1:96],4); %bx154
```

```
%ab=527.3; %Tiempo desde 'a' hasta 'b'
```

```
%ay1=shots151176([2:96],2);ay2=shots151176([3:96],2);ay3=shots151176([4:96],  
2);ay4=shots151176([5:96],2);ay5=shots151176([6:96],2);ay6=shots151176([7:96],  
2);ay7=shots151176([10:96],2);
```

```
%bx1=shots151176([1:95],4);bx2=shots151176([1:94],4);bx3=shots151176([1:93],  
4);bx4=shots151176([1:92],4);bx5=shots151176([1:91],4);bx6=shots151176([1:90],  
4);bx7=shots151176([1:87],4);
```

```
%x1=shots151176([2:96],5)*15;x2=shots151176([3:96],5)*15;x3=shots151176([4:9  
6],5)*15;x4=shots151176([5:96],5)*15;x5=shots151176([6:96],5)*15;x6=shots1511  
76([7:96],5)*15;x7=shots151176([10:96],5)*15;
```

```
%Tv=función análisis de velocidad (2)
```

```
%Tv=(ay-bx+ab)/2+110; Tv1=(ay1-bx1+ab)/2+90; Tv2=(ay2-bx2+ab)/2+75;
```

```
Tv3=(ay3-bx3+ab)/2+60; %Tv4=(ay4-bx4+ab)/2+45;
```

```
%Tv5=(ay5-bx5+ab)/2+30; Tv6=(ay6-bx6+ab)/2+20; Tv7=(ay7-bx7+ab)/2+10;
```

```
%Tv8=(ay8-bx8+ab)/2+30; Tv9=(ay9-bx9+ab)/2+20;
```

```
%Tv10=(ay10-bx10+ab)/2+10;
```

```
%Tv=(ay-bx+ab)/2+110; Tv1=(ay1-bx1+ab)/2+90; Tv2=(ay2-bx2+ab)/2+75;
```

```
Tv3=(ay3-bx3+ab)/2+60; %Tv4=(ay4-bx4+ab)/2+45;
```

```

%Tv5=(ay5-bx5+ab)/2+30;   Tv6=(ay6-bx6+ab)/2+20;   Tv7=(ay7-bx7+ab)/2+10;
%Tv8=(ay8-bx8+ab)/2+30; Tv9=(ay9-bx9+ab)/2+20;
%Tv10=(ay10-bx10+ab)/2+10;

%Tvx=Tv([4:93],:);
%Tv1x=Tv1([3:92],:);
%Tv2x=Tv2([2:91],:);
%Tv3x=Tv3([1:90],:);

%xx=shots151176([2:91],5)*15;
%Tvtotal = [Tvx,Tv1x,Tv2x];
%Tvpromedio = mean(Tvtotal,2)-49;

%plot(x,Tv,'*');
%hold      on;      plot(x1,Tv1,'r*');plot(x2,Tv2,'*');plot(xx,Tvpromedio,'m*');hold
off;%plot(x4,Tv4,'*');plot(x5,Tv5,'*');plot(x6,Tv6,'*');plot(x7,Tv7,'*');
title('GRAFICA ANALISIS DE VELOCIDAD')
xlabel('DISTANCIA (m)')
ylabel('TIEMPO (ms)')
legend('XY=0','XY=15','XY=30','Promedio','XY=60','XY=75','XY=90')
%d/dx(Tv5)=1/V'n.  t=0.22762*x+10.709. Luego V'n= 1/0.28701 = 2.843;
%XY=20 (6).  Ajuste lineal de XY=20.

%A=Tvpromedio([66:90]);  %A y B fueron creados para calcular las velocidades
de
%2746 m/s para A=Tv1([4:66]) y 3222 m/s para A=Tv1([66:90]) derivadas de (6)
%B=shots151176([66:90],5)*15;
%plot(B,A,'rx');
title('GRAFICA ANALISIS DE VELOCIDAD')
xlabel('DISTANCIA (m)')

```

```

ylabel('TIEMPO (ms)')
%legend('4904.4 m/s')
grid

%NUEVOS ANALISIS DE VELOCIDAD CON LOS DATOS PROMEDIADOS.
%load 'corregidos151176.txt';
xx=shots151176([5:100],5)*15;
aayy=aay([1:96],:);
bbxx=bbx([1:96],:);
ab=544.61;           %Tiempo desde 'a' hasta 'b'. ab=527.45, tiempo reciproco
promedio de los shots151176.

ay1=aay([2:96],:);ay2=aay([3:96],:);ay3=aay([4:96],:);ay4=aay([5:96],:);ay5=aay([6:
96],:);ay6=aay([7:96],:);ay7=aay([8:96],:);

bx1=bbx([1:95],:);bx2=bbx([1:94],:);bx3=bbx([1:93],:);bx4=bbx([1:92],:);bx5=bbx([1:
91],:);bx6=bbx([1:90],:);bx7=bbx([1:89],:);

x1=shots151176([6:100],5)*15;x2=shots151176([7:100],5)*15;x3=shots151176([8:1
00],5)*15;x4=shots151176([9:100],5)*15;x5=shots151176([10:100],5)*15;x6=shots
151176([11:100],5)*15;x7=shots151176([12:100],5)*15;

%Tv=función analisis de velocidad (2)
Tv=(aayy-bbxx+ab)/2+110;   Tv1=(ay1-bx1+ab)/2+90;   Tv2=(ay2-bx2+ab)/2+75;
Tv3=(ay3-bx3+ab)/2+60;   Tv4=(ay4-bx4+ab)/2+45;
Tv5=(ay5-bx5+ab)/2+30;   Tv6=(ay6-bx6+ab)/2+20;   Tv7=(ay7-bx7+ab)/2+10;
%Tv8=(ay8-bx8+ab)/2+30; Tv9=(ay9-bx9+ab)/2+20;
%Tv10=(ay10-bx10+ab)/2+10;
plot(xx,Tv,'*');

```

```

hold on;
plot(x1,Tv1,'r*');plot(x2,Tv2,'*');plot(x3,Tv3,'*');plot(x4,Tv4,'*');plot(x5,Tv5,'*');plot(x6,
Tv6,'*');plot(x7,Tv7,'*');hold off
title('GRAFICA ANALISIS DE VELOCIDAD')
xlabel('DISTANCIA (m)')
ylabel('TIEMPO (ms)')
legend('XY=0','XY=15','XY=30','XY=45','XY=60','XY=75','XY=90','XY=105')

```

```

A=Tv1([66:87]); %A y B fueron creados para calcular las velocidades de
%2783 m/s para A=Tv1([2:66]) y 2912 m/s para A=Tv1([66:87]) derivadas de (6)
B=shots151176([66:87],5)*15;
plot(B,A,'rx');

```

ANEXO D. SEUDOCODIGOS EN MATLAB CORRESPONDIENTES AL MÉTODO PLUS-MINUS

```
load 'shots151176.txt'
```

```
x=shots151176([1:100],5)*15; %Distancia superficial offset x106
```

```
ay=shots151176([1:100],2); %ay106
```

```
bx=shots151176([1:100],4); %bx154
```

```
ab=527.3; %Tiempo desde 'a' hasta 'b'
```

```
ay1=shots151176([2:96],2);ay2=shots151176([3:96],2);ay3=shots151176([4:96],2);
```

```
ay4=shots151176([5:96],2);ay5=shots151176([6:96],2);ay6=shots151176([7:96],2);
```

```
ay7=shots151176([10:96],2);
```

```
bx1=shots151176([1:95],4);bx2=shots151176([1:94],4);bx3=shots151176([1:93],4);
```

```
bx4=shots151176([1:92],4);bx5=shots151176([1:91],4);bx6=shots151176([1:90],4);
```

```
bx7=shots151176([1:87],4);
```

```
x1=shots151176([2:96],5)*15;x2=shots151176([3:96],5)*15;x3=shots151176([4:96],
```

```
5)*15;x4=shots151176([5:96],5)*15;x5=shots151176([6:96],5)*15;x6=shots151176(
```

```
[7:96],5)*15;x7=shots151176([10:96],5)*15;
```

```
%Tv=función analisis de velocidad (2)
```

```
%Tv=(ay-bx+ab)/2+110; Tv1=(ay1-bx1+ab)/2+90; Tv2=(ay2-bx2+ab)/2+75;
```

```
Tv3=(ay3-bx3+ab)/2+60; Tv4=(ay4-bx4+ab)/2+45;
```

```
%Tv5=(ay5-bx5+ab)/2+30; Tv6=(ay6-bx6+ab)/2+20; Tv7=(ay7-bx7+ab)/2+10;
```

```
%Tv8=(ay8-bx8+ab)/2+30; Tv9=(ay9-bx9+ab)/2+20;
```

```
%Tv10=(ay10-bx10+ab)/2+10;
```

```
Tv=(ay-bx-ab)/2+0; %T- PLUS-MINUS. V2=2.837
```

```
Tvm1=Tv([1:99],:);
```

```

Tvm2=Tv([2:100],:);
DTv=-Tvm1+Tvm2;
V2=2*15./DTv;

%Tv1=(ay1-bx1+ab)/2;
%Tv1=(bx1-ay1+ab)/2; %Utilizado para invertir las llegadas segun el metodo
"butterfly adjustment".

plot(x,Tv,'*-');
%hold on;
plot(x1,Tv1,'r*');plot(x2,Tv2,'*');plot(x3,Tv3,'*');plot(x4,Tv4,'*');plot(x5,Tv5,'*');plot(x6,
Tv6,'*');plot(x7,Tv7,'*');hold off
title('GRAFICA ANALISIS DE VELOCIDAD')
xlabel('DISTANCIA (m)')
ylabel('TIEMPO (ms)')
legend('XY=0','XY=15','XY=30','XY=45','XY=60','XY=75','XY=90')
%d/dx(Tv5)=1/V'n. t=0.22762*x+10.709. Luego V'n= 1/0.28701 = 2.843;
%XY=20 (6). Ajuste lineal de XY=20.

A=Tv([66:100]); %A y B fueron creados para calcular las velocidades de
%2780 m/s para A=Tv([4:66]) y 2921 m/s para A=Tv1([66:100]) derivadas de (6)
B=shots151176([66:100],5)*15;
plot(B,A,'rx');
title('GRAFICA ANALISIS DE VELOCIDAD')
xlabel('DISTANCIA (m)')
ylabel('TIEMPO (ms)')
%legend('4904.4 m/s')
%s_static176=15.47; % calculadas de la funcion de analisis de velocidad
A=Tv1([4:66]).
%s_static201=16.258; %A=Tv1([66:93])

```