

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

# **DEFINICIÓN DE LAS RELACIONES ENTRE PARÁMETROS GEOFÍSICOS EN POZOS DISPONIBLES A LO LARGO DE LA LÍNEA 4 DEL METRO DE CARACAS.**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. José Cavada

TUTOR INDUSTRIAL: Dr. Michael Schmitz

Proyecto presentado ante la Ilustre  
Universidad Central de Venezuela  
Para optar al Título de  
Ingeniero Geofísico

Por el Br. Alvis Leandro Campos Valderrama

Caracas, julio de 2004.

## DEDICATORIA

A mis padres Héctor y Maritza.

A mi hermana Militza.

A “la nena”.

## AGRADECIMIENTOS

Mis más sinceros agradecimientos...

A “La casa que vence las sombras” Universidad Central de Venezuela, por haberme permitido alcanzar la meta de ser un profesional.

Un especial agradecimiento a mi tutor industrial Dr. Michael Schmitz, por su gran apoyo y enseñanza y mi tutor académico Ing. José Cavada, ya que desde comienzos de mi carrera impartió sus conocimientos en mi formación como profesional y colaboró en gran manera en la culminación de este trabajo.

A mis padres por su infinito apoyo.

A FUNVISIS por darme la oportunidad de desarrollar este trabajo.

A los ingenieros Javier Sánchez y Víctor Rocabado, por el apoyo y ayuda prestada en la realización de este trabajo.

A las compañías TRX Consulting y Centeno – Rodríguez & Asociados, por apoyarme y orientarme con información imprescindible relacionada con la técnica de GPR y SPT respectivamente.

A INTEVEP, ya que facilitó el martillo de pozo.

A mis compañeros en FUNVISIS, Ricardo, Jesús Alberto, Jozsef, Marianela, Román, Pedro y Roberto y a mis amigas Nanvir y Liz.

A “la nena” a pesar de su ausencia.

Campos V., Alvis L.

## DEFINICIÓN DE LAS RELACIONES ENTRE PARÁMETROS GEOFÍSICOS EN POZOS DISPONIBLES A LO LARGO DE LA LÍNEA 4 DEL METRO DE CARACAS.

**Tutor Académico: Prof. José Cavada. Tutor Industrial: Dr. Michael Schmitz.**  
**Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y**  
**Geofísica. Año 2004, 288 p.**

**Palabras Claves:** Geofísica, Geotecnia, “Ground Penetration Radar”, Sísmica, “Standard Penetration Test”.

### **Resumen.**

En las exploraciones del subsuelo que realiza la industria de la construcción en el Valle de Caracas, se aplican generalmente métodos geotécnicos a fin de obtener la resistencia del suelo a la penetración; el método geotécnico más empleado en Venezuela es el denominado Prueba de Penetración Normal (“Standard Penetration Test” o SPT). En la construcción de la línea 4 del Metro de Caracas en la ciudad de Caracas, se realizaron mediciones de SPT para medir la resistencia del suelo a la penetración, y de radar de pozo para obtener información somera del subsuelo en la que se puede inferir la geometría de las estructuras presentes y la estratigrafía del mismo.

Sabiendo que las ondas de corte pueden ocasionar graves daños a las estructuras, es de suma importancia conocer cuáles son las velocidades de las ondas de corte a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas. En este estudio se localizaron pozos abiertos en los que se habían efectuado previamente los ensayos de radar de pozo, en los cuales se realizaron mediciones sísmicas de pozo (“downhole”, “crosshole” y tomografía sísmica de pozo), éstas se correlacionaron con la respuesta del SPT obtenidas en pozos cercanos. Por último, se llevaron a cabo mediciones sísmicas en superficie (refracción y reflexión 2D). Estudios previos realizados en Caracas reportan en la sísmica, de dos a cuatro capas; mediciones de velocidades de ondas “P”, mediciones y estimaciones de velocidades de ondas “S”.

En este trabajo a partir de las mediciones sísmicas de pozo se obtuvieron de dos a tres capas; para los primeros 30 metros de profundidad se registraron velocidades promedio para las ondas “P” entre 1063 – 1969 m/s, para las ondas “S” entre 378 – 679 m/s y con éstas se determinó la razón de Poisson dinámico para cada metro de profundidad.

La sísmica de refracción arrojó tres capas con velocidades de ondas “P” ubicadas entre los 569 – 1925 m/s y velocidades de ondas “S” en el orden de los 127 – 389 m/s. La sísmica de reflexión no tuvo buena resolución, por lo que no se pudieron interpretar pliegues, fallas o contrastes litológicos laterales. Las técnicas empleadas se compararon y correlacionaron. Se generaron relaciones  $N_{SPT} - V_s$  y  $N_{60}$

–  $V_s$  para los pozos con mediciones SPT y para la línea 4 del Metro de Caracas en general. Por último se realizó un mapa de velocidades promedio mínimas de ondas de corte a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTOS .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABLAS .....	xvi
1. INTRODUCCIÓN .....	01
1.1 Enunciado del problema .....	01
1.2 Objetivos .....	05
1.2.1 Objetivo general .....	05
1.2.2 Objetivos específicos .....	05
1.3 Justificación .....	05
2. MARCO TEÓRICO .....	07
2.1 Trabajos previos .....	07
2.2 Geología de la región de Caracas .....	11
2.2.1 Morfología de la región de Caracas .....	11
2.2.2 Geología de Caracas .....	12
2.2.3 Condiciones del suelo en el valle de Caracas .....	15
2.2.3.1 Condiciones del suelo en la zona centro-norte de la ciudad ...	15
2.3 Sísmica de refracción .....	23
2.3.1 Tipos de ondas .....	24
2.3.2 Tipo de tendido .....	25
2.3.3 Trayectorias de ondas y relaciones distancia- tiempo .....	25
2.4 Sísmica de reflexión .....	30
2.4.1 Reflexión en superficies de separación horizontales .....	32
2.5 Sísmica de pozos .....	33
2.5.1 “Downhole” .....	35
2.5.2 “Crosshole” .....	36
2.5.3 Tomografía .....	39

2.6 Radar de penetración de suelo .....	41
2.6.1 Radar de pozo .....	42
2.7 Prueba de Penetración Estándar (SPT o “Standard Penetration Test) .....	44
2.7.1 Principales factores de corrección .....	46
2.7.2 Energía incidente de referencia (60%) .....	48
2.7.3 Influencia del nivel de esfuerzos .....	48
3. METODOLOGÍA .....	52
3.1 Sísmica de pozos .....	52
3.1.1 Adquisición .....	52
3.1.1.1 “Downhole” .....	52
3.1.1.2 “Crosshole” .....	61
3.1.1.3 Tomografía sísmica de pozos .....	64
3.1.2 Procesamiento .....	64
3.2 Sísmica de superficie .....	70
3.2.1 Adquisición .....	70
3.2.1.1 Tendidos de refracción .....	70
3.2.1.2 Tendido de reflexión .....	74
3.2.2 Procesamiento .....	74
3.3 Radar de pozo o “Borehole” Radar GRP .....	80
3.4 “Standard Penetration Test” o SPT .....	81
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	87
4.1 “Downhole” .....	87
4.2 “Crosshole” .....	119
4.3 Tomografía .....	121
4.4 Sísmica de refracción .....	122
4.5 Sísmica de reflexión .....	128
4.6 Integración de los métodos .....	130
4.6.1 Avenida San Martín .....	131
4.6.2 Avenida Lecuna .....	168
4.6.3 Distribuidor Mohedano .....	193

4.6.4 Relaciones $N_{SPT} - V_s$ y $N_{60}$ a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas .....	200
4.6.5 Mapa de las velocidades promedio mínimas de ondas “S” a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas .....	204
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	205
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	208
APÉNDICE A .....	216
APÉNDICE B .....	268
APÉNDICE C .....	285



## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01. Ubicación del valle de Caracas .....	03
Figura 02. Mapa de la ubicación de la línea 4 del Metro de Caracas .....	04
Figura 03. Estaciones del Metro de Caracas, en donde se visualiza la línea 4 .....	04
Figura 04. Superficie topográfica del lecho de roca en el Valle de Caracas .....	11
Figura 05. Mapa de espesores de sedimentos en el valle de Caracas .....	14
Figura 06. Perfil del suelo en la zona Centro – Norte de Caracas .....	16
Figura 07. Sección 01 en la zona de Capitolio .....	18
Figura 08. Sección 02 en la zona de Capitolio .....	18
Figura 09. Sección 03 realizada entre Capitolio y el Museo de Bellas Artes .....	19
Figura 10. Sección 04 realizada entre Capitolio y el Museo de Bellas Artes .....	19
Figura 11. Sección 05 realizada entre Capitolio y el Museo de Bellas Artes .....	20
Figura 12. Sección 06 realizada entre Capitolio y el Museo de Bellas Artes .....	20
Figura 13. Sección 07 realizada entre el Museo de Bellas Artes y Plaza Venezuela	21
Figura 14. Sección 08 realizada entre el Museo de Bellas Artes y Plaza Venezuela	21
Figura 15. Sección 09 realizada entre el Museo de Bellas Artes y Plaza Venezuela	22
Figura 16. Sección 10 realizada entre el Museo de Bellas Artes y Plaza Venezuela	22
Figura 17. Sección 11 realizada entre el Museo de Bellas Artes y Plaza Venezuela	22
Figura 18. Tendido en línea (“in line”) y reverso .....	25
Figura 19. Representación del fraccionamiento de la onda cabezal al incidir sobre una interfase .....	26
Figura 20. Trayectorias principales de la propagación de ondas .....	27
Figura 21. Visualización de las curvas de los tiempos de viaje de las principales propagaciones de ondas .....	28
Figura 22. Onda reflejada en una sola superficie de separación .....	31
Figura 23. Onda reflejada en múltiples superficies de separación .....	31
Figura 24. Geometría realizada al llevar a cabo un “downhole” .....	36
Figura 25. Geometría realizada al llevar a cabo un “crosshole” .....	37
Figura 26. Ondas de corte visualizadas en un “crosshole” .....	38

Figura 27. Vista de una sección de cruce a partir de dos “crosshole” .....	39
Figura 28. Geometría realizada al llevar a cabo una tomografía de pozo .....	40
Figura 29. Ejemplo de geometría empleada en la adquisición del radar de pozo .....	43
Figura 30. Factor de incidencia $e_1$ en función del mecanismo de liberación del martillo .....	47
Figura 31. Factor de incidencia $e_2$ en función del peso del yunque .....	47
Figura 32. Comparación de mediciones a partir del método “downhole” de velocidad de ondas S y valores SPT .....	49
Figura 33. Correlación de los valores SPT versus velocidad de onda “P” .....	51
Figura 34. Instrumentos empleados durante la adquisición .....	53
Figura 35. Pozos ubicados a lo largo de la Avenida San Martín .....	55
Figura 36. Pozos ubicados a lo largo de la Avenida Lecuna .....	56
Figura 37. Pozos ubicados a lo largo de la Avenida Lecuna .....	57
Figura 38. Pozos ubicados a lo largo de la Avenida Lecuna .....	58
Figura 39. Pozos ubicados en el Distribuidor Mohedano .....	59
Figura 40. Martillo de pozo y bomba de aire .....	62
Figura 41. Registro sísmico en donde se visualiza la llegada de ondas “P” y “S” a partir de un “downhole” .....	65
Figura 42. Ejemplo de gráficos obtenidos a partir de la técnica “downhole” .....	67
Figura 43. Registro sísmico en donde se visualiza la llegada de ondas “P” y “S” a partir de un “crosshole” .....	68
Figura 44. Registro sísmico en obtenido a partir de la tomografía .....	69
Figura 45. Visualización del “shotgun” y un cartucho utilizado .....	71
Figura 46. Geometría del tendido de refracción Río Bravo .....	71
Figura 47. Geometría del tendido de refracción Nuevo Circo .....	71
Figura 48. Ubicación del tendido sísmico de refracción realizado en el Nuevo Circo de Caracas .....	73
Figura 49. Ubicación del tendido sísmico de refracción realizado en la futura estación Parque Central .....	73
Figura 50. Geometría del tendido de reflexión Nuevo Circo .....	74

Figura 51. Marcas de tiempo asignados en un registro sísmico de refracción .....	75
Figura 52. Ejemplo del control de tiempo realizado para un disparo de onda “P” ....	76
Figura 53. Modelo 1D en profundidad realizado para un disparo de onda “P” .....	76
Figura 54. Modelo 2D para ondas “P” .....	77
Figura 55. Esquema de análisis de velocidad por semblanza, hecho por CMP .....	78
Figura 56. Sección sísmica final .....	78
Figura 57. Ejemplo de sección típica arrojada por el radar de pozo .....	80
Figura 58. Relación Vs- Nspt obtenida en Japón por JICA .....	82
Figura 59. Ejemplo de datos geotécnicos suministrados para la correlación .....	83
Figura 60. Gráfico de valores residuales y elipse de confianza .....	86
Figura 61. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo San Vicente 1 .....	88
Figura 62. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo San Vicente 1 .....	88
Figura 63. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo San Vicente 1 .....	89
Figura 64. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo San Vicente 2 .....	90
Figura 65. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo San Vicente 2 .....	90
Figura 66. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo San Vicente 2 .....	91
Figura 67. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Royal .....	92
Figura 68. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Royal .....	92
Figura 69. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Royal .....	93
Figura 70. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Don Martín .....	94
Figura 71. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Don Martín .....	94
Figura 72. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Don Martín .....	95
Figura 73. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Pitter .....	96
Figura 74. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Pitter .....	96
Figura 75. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Pitter .....	97

Figura 76. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Berna.....	99
Figura 77. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Berna.....	99
Figura 78. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Berna .....	100
Figura 79. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Velázquez .....	101
Figura 80. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Velázquez .....	102
Figura 81. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Hotel ABC .....	103
Figura 82. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Hotel ABC .....	103
Figura 83. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Hotel ABC .....	104
Figura 84. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Rocío .....	105
Figura 85. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Rocío .....	105
Figura 86. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Rocío .....	106
Figura 87. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Río Bravo 1 .....	107
Figura 88. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Río Bravo 1 .....	107
Figura 89. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Río Bravo 1 .....	108
Figura 90. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Río Bravo 2 .....	109
Figura 91. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Río Bravo 2 .....	109
Figura 92. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Río Bravo 2 .....	110
Figura 93. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Mohedano 1 .....	112
Figura 94. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Mohedano 1 .....	112
Figura 95. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Mohedano 1 .....	113
Figura 96. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Mohedano 2 .....	114
Figura 97. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Mohedano 2 .....	114

Figura 98. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Mohedano 2 .....	115
Figura 99. Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Mohedano 3 .....	116
Figura 100. Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Mohedano 3 .....	116
Figura 101. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” en el pozo Mohedano 3 .....	117
Figura 102. Registro sísmico al generar ondas “P” con el “crosshole” .....	119
Figura 103. Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “crosshole” .....	119
Figura 104. Registro sísmico al generar ondas “P” con la tomografía .....	121
Figura 105. Registro sísmico de onda “P” en el tendido de refracción Nuevo Circo .....	122
Figura 106. Modelo 2D para ondas “P”. Tendido de refracción Nuevo Circo .....	122
Figura 107. Registro sísmico polarizado de onda “S” en el tendido de refracción Nuevo Circo .....	123
Figura 108. Modelo 2D para ondas “S”. Tendido de refracción Nuevo Circo .....	124
Figura 109. Registro sísmico polarizado de onda “S” en el tendido de refracción Río Bravo .....	125
Figura 110. Modelo 2D para ondas “S”. Tendido de refracción Río Bravo .....	126
Figura 111. Registro sísmico de reflexión 2D .....	128
Figura 112. Perfil en el que se aprecia el $N_{SPT}$ realizado en el pozo P-17 y su respectiva interpretación litológica .....	131
Figura 113. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo San Vicente 1 ...	132
Figura 114. Gráficos de las relaciones $N_{SPT} - V_s$ en el pozo San Vicente 1 .....	133
Figura 115. Gráficos de las relaciones $N_{60} - V_s$ en el pozo San Vicente 1 .....	134
Figura 116. Gráfico de residuos y elipse de confianza en el pozo San Vicente 1 ...	137
Figura 117. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo San Vicente 2 ...	139
Figura 118. Gráficos de las relaciones $N_{SPT} - V_s$ en el pozo San Vicente 2 .....	140
Figura 119. Gráficos de las relaciones $N_{60} - V_s$ en el pozo San Vicente 2 .....	141
Figura 120. Gráfico de residuos y elipse de confianza en el pozo San Vicente 2 ...	145

Figura 121. Perfil en el que se aprecia el $N_{SPT}$ realizado en el pozo SM-105 y su respectiva interpretación litológica .....	146
Figura 122. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Royal .....	147
Figura 123. Gráficos de las relaciones $N_{SPT} - Vs$ en el pozo Royal .....	148
Figura 124. Gráficos de las relaciones $N_{60} - Vs$ en el pozo Royal .....	149
Figura 125. Gráfico de residuos y elipse de confianza en el pozo Royal .....	152
Figura 126. Perfil en el que se aprecia el $N_{SPT}$ realizado en el pozo P-65 y su respectiva interpretación litológica .....	153
Figura 127. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Don Martín .....	154
Figura 128. Gráficos de las relaciones $N_{SPT} - Vs$ en el pozo Don Martín .....	155
Figura 129. Gráficos de las relaciones $N_{60} - Vs$ en el pozo Don Martín .....	156
Figura 130. Gráfico de residuos y elipse de confianza en el pozo Don Martín .....	159
Figura 131. Perfil en el que se aprecia el $N_{SPT}$ realizado en el pozo P-23 y su respectiva interpretación litológica .....	160
Figura 132. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Pitter .....	161
Figura 133. Gráficos de las relaciones $N_{SPT} - Vs$ en el pozo Pitter .....	162
Figura 134. Gráficos de las relaciones $N_{60} - Vs$ en el pozo Pitter .....	163
Figura 135. Gráfico de residuos y elipse de confianza en el pozo Pitter .....	166
Figura 136. Perfil en el que se aprecia el $N_{SPT}$ realizado en el pozo SM-119 y su respectiva interpretación litológica .....	168
Figura 137. Gráficos de las relaciones $N_{SPT} - Vs$ en el pozo Berna .....	169
Figura 138. Gráficos de las relaciones $N_{60} - Vs$ en el pozo Berna .....	170
Figura 139. Gráfico de residuos y elipse de confianza en el pozo Berna .....	172
Figura 140. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Velázquez .....	174
Figura 141. Perfil en el que se aprecia el $N_{SPT}$ realizado en el pozo P-37 y su respectiva interpretación litológica .....	176
Figura 142. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Hotel ABC .....	177
Figura 143. Gráficos de las relaciones $N_{SPT} - Vs$ en el pozo Hotel ABC .....	178
Figura 144. Gráficos de las relaciones $N_{60} - Vs$ en el pozo Hotel ABC .....	179
Figura 145. Gráfico de residuos y elipse de confianza en el pozo Hotel ABC .....	183

Figura 146. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Rocío .....	185
Figura 147. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Río Bravo 1 .....	187
Figura 148. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Río Bravo 2 .....	189
Figura 149. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Mohedano 1 .....	193
Figura 150. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Mohedano 2 .....	195
Figura 151. Interpretación del radar de pozo realizada en el pozo Mohedano 3 .....	197
Figura 152. Relaciones $N_{SPT} - V_s$ y $N_{60} - V_s$ a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas .....	200
Figura 153. Gráfico de residuos y elipse de confianza a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas .....	202
Figura 154. Mapa de velocidades promedio de ondas “S” (para los primeros treinta metros) realizado a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas .....	204

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 01. Velocidad de ondas P y S en base a mediciones sísmicas de refracción ...	08
Tabla 02. Velocidad de ondas S desde 0 a 10 m de profundidad .....	08
Tabla 03. Velocidad de ondas P y S .....	09
Tabla 04. Correlación aproximada entre las velocidades de ondas de corte, Vs con la compacidad y la resistencia a la penetración SPT .....	50
Tabla 05. Información de los pozos “downholes” adquiridos en la Avenida San Martín .....	54
Tabla 06. Información de los pozos “downholes” adquiridos en la Avenida Lecuna .....	60
Tabla 07. Información de los pozos “downholes” adquiridos en el Distribuidor Mohedano .....	61
Tabla 08. Información acerca de la adquisición del “crosshole” .....	63
Tabla 09. Información de interés acerca de los tendidos de refracción .....	72
Tabla 10. Visualización de los pozos en los que se realizaron mediciones de “downhole” y de radar de pozo y los pozos geotécnicos que se correlacionaron .....	81
Tabla 11. Velocidades de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas “downhole” a lo largo de la Avenida San Martín .....	98
Tabla 12. Velocidades de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas “downhole” a lo largo de la Avenida Lecuna .....	111
Tabla 13. Velocidades de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas “downhole” en el Distribuidor Mohedano .....	118
Tabla 14. Velocidades de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas “crosshole” en la futura estación Parque Central .....	120
Tabla 15. Velocidades de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas de refracción a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas .....	127
Tabla 16. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones $N_{SPT} / V_s$ y $N_{60} / V_s$ entre los pozos San Vicente 1 y P-17 .....	135
Tabla 17. Resultados del análisis estadístico en el pozo San Vicente 1 .....	136



Tabla 18. Análisis de varianza en el pozo San Vicente 1 .....	137
Tabla 19. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones $N_{SPT} / V_s$ y $N_{60} / V_s$ entre los pozos San Vicente 2 y P-17 .....	142
Tabla 20. Comparación de las interpretaciones sísmicas entre los pozos San Vicente 1 y 2 .....	143
Tabla 21. Resultados del análisis estadístico en el pozo San Vicente 2 .....	144
Tabla 22. Análisis de varianza en el pozo San Vicente 2 .....	144
Tabla 23. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones $N_{SPT} / V_s$ y $N_{60} / V_s$ entre los pozos Royal y SM-105 .....	150
Tabla 24. Resultados del análisis estadístico en el pozo Royal .....	151
Tabla 25. Análisis de varianza en el pozo Royal .....	151
Tabla 26. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones $N_{SPT} / V_s$ y $N_{60} / V_s$ entre los pozos Don Martín y P-65 .....	157
Tabla 27. Resultados del análisis estadístico en el pozo Don Martín .....	158
Tabla 28. Análisis de varianza en el pozo Don Martín .....	158
Tabla 29. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones $N_{SPT} / V_s$ y $N_{60} / V_s$ entre los pozos Pitter y P-23 .....	164
Tabla 30. Comparación de las interpretaciones sísmicas entre los pozos Don Martín y Pitter .....	165
Tabla 31. Resultados del análisis estadístico en el pozo Pitter .....	166
Tabla 32. Análisis de varianza en el pozo Pitter .....	166
Tabla 33. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones $N_{SPT} / V_s$ y $N_{60} / V_s$ entre los pozos Berna y SM-119 .....	171
Tabla 34. Resultados del análisis estadístico en el pozo Berna .....	172
Tabla 35. Análisis de varianza en el pozo Berna .....	172
Tabla 36. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles en el pozo Velázquez .....	175
Tabla 37. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones $N_{SPT} / V_s$ y $N_{60} / V_s$ entre los pozos Hotel ABC y P-37 .....	180

Tabla 38. Comparación de las interpretaciones sísmicas entre el pozo Hotel ABC y el tendido de refracción Nuevo Circo .....	181
Tabla 39. Resultados del análisis estadístico en el pozo Hotel ABC .....	183
Tabla 40. Análisis de varianza en el pozo Hotel ABC .....	183
Tabla 41. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles en el pozo Rocío .....	186
Tabla 42. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles en el pozo Río Bravo 1 .....	188
Tabla 43. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles en el pozo Río Bravo 2 .....	190
Tabla 44. Comparación de las interpretaciones sísmicas entre los pozos Río Bravo 1, Río Bravo 2, la medición “crosshole” y el tendido de refracción Río Bravo .....	191
Tabla 45. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles en el pozo Mohedano 1 .....	194
Tabla 46. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles en el pozo Mohedano 2 .....	196
Tabla 47. Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles en el pozo Mohedano 3 .....	198
Tabla 48. Comparación de las interpretaciones sísmicas entre los pozos Mohedano 2 y 3 .....	199
Tabla 49. Resultados del análisis estadístico a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas .....	201
Tabla 50. Análisis de varianza a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas .....	201

Caracas, Julio de 2004

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

**“DEFINICIÓN DE LAS RELACIONES ENTRE PARÁMETROS  
GEOFÍSICOS EN POZOS DISPONIBLES A LO LARGO DE LA LÍNEA 4  
DEL METRO DE CARACAS”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Omar Márquez  
Jurado

Prof. Janckcarlos Reyes  
Jurado

Prof. José Cavada  
Tutor Académico

Dr. Michael Schmitz  
Tutor Industrial

# CAPÍTULO 1

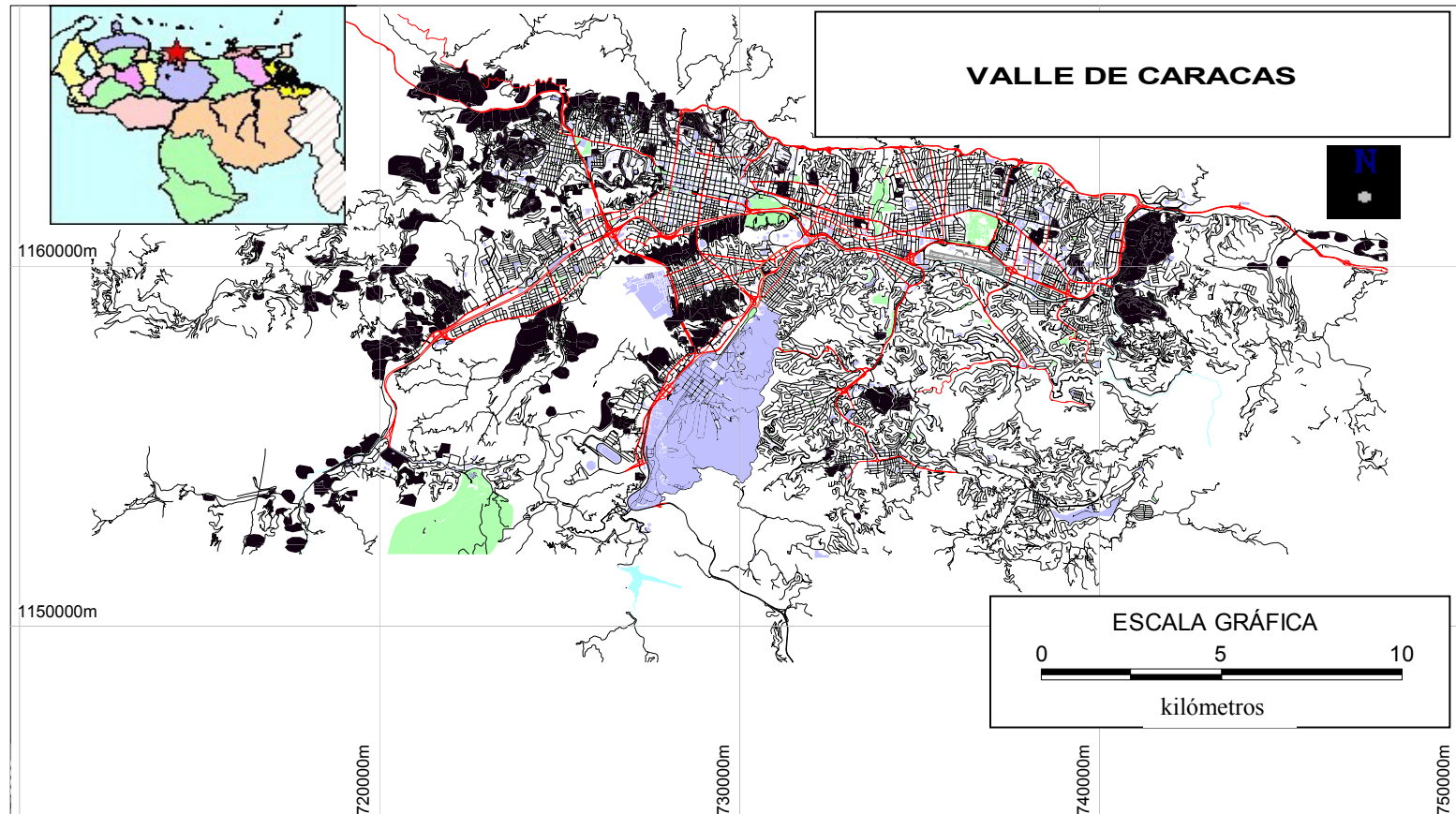
## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Enunciado del problema

En las exploraciones del subsuelo que realiza la industria de la construcción en el Valle de Caracas, se aplican generalmente métodos geotécnicos a fin de obtener la resistencia del suelo a la penetración; el método geotécnico más empleado en Venezuela es el denominado Prueba de Penetración Estándar (“Standard Penetration Test” o SPT). A partir de la aplicación del mencionado método se obtiene información somera del subsuelo, por lo que la misma es empleada en la industria de la construcción. En la construcción de la línea 4 del Metro de Caracas en la ciudad de Caracas (figuras 01, 02 y 03) se realizaron mediciones de SPT y de radar de pozo (por la empresa TRX Consulting). Éste último se aplicó para determinar la ubicación y profundidad de los pilotes de los edificios presentes en el área de construcción y a partir del método de radar se obtiene también información somera del subsuelo, en la que se puede inferir la geometría de las estructuras presentes y la estratigrafía del subsuelo.

En el estudio del área presente a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas no se aplicó ningún tipo de medición sísmica, por lo que se desconoce el comportamiento del subsuelo al existir una propagación de ondas sísmicas. Sabiendo que las ondas de corte o cizallamiento pueden ocasionar graves daños a las estructuras, es de suma importancia conocer cuáles son las velocidades de las ondas de corte. Con el fin de establecer relaciones entre los diferentes parámetros y conocer las propiedades sísmicas en la zona se localizaron los pozos abiertos en los que se habían realizado los ensayos de radar de pozo, se aplicaron mediciones sísmicas de pozo (“downhole”, “crosshole” y tomografía sísmica de pozo) y se obtuvo información de mediciones de SPT en pozos cercanos, en combinación con mediciones sísmicas en superficie. Por otro lado la aplicación de diversas técnicas de

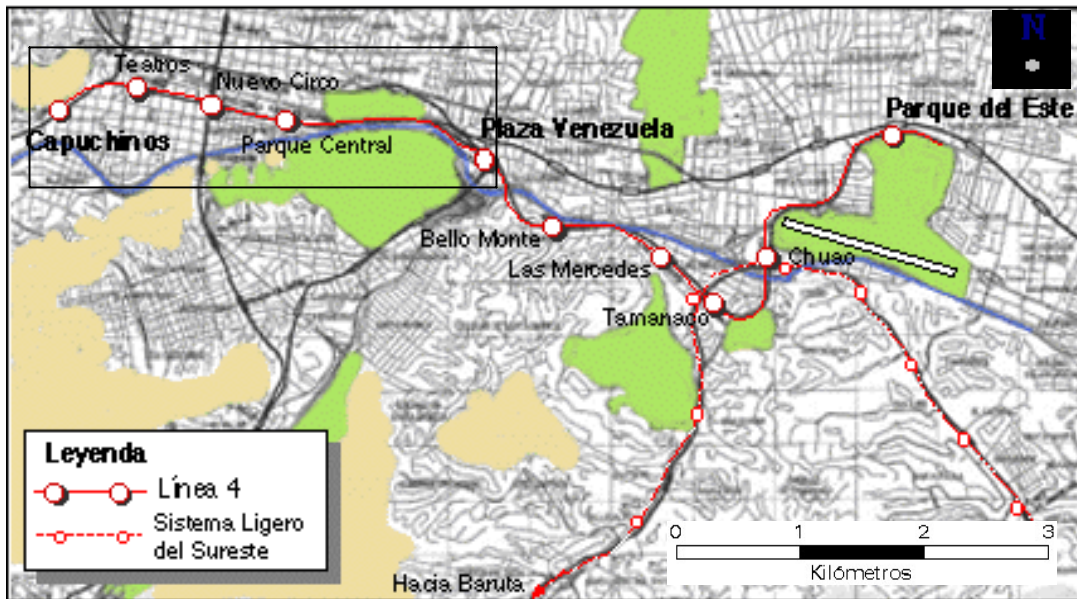
sísmica de pozo permitirá mejorar la interpretación de la sísmica de superficie. La correlación entre el radar de pozo, la prueba de penetración estándar y los métodos sísmicos empleados a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas facilitará la interpretación estructural y estratigráfica del área, así como también generará mayor detalle de las características del subsuelo en las cercanías de los pozos.



**Figura 01.** Ubicación del valle de Caracas.

(Los mapas presentados poseen coordenadas UTM, ubicados en la zona 19 y referenciados al datum Canoa).

**LINEA 4: Capuchinos-Plaza Venezuela-Parque del Este**



**Figura 02.** Mapa de la ubicación de la línea 4 del Metro de Caracas (Tomado de <http://www.analitica.com/archivo/vam1997.07/sxxi3.htm>).



**Figura 03.** Estaciones del Metro de Caracas, en donde se visualiza la línea 4. Denotada por el color rojo. (Tomado de <http://www.metropla.net/am/cara/caracas.htm>).

## **1.2 Objetivos**

### 1.2.1 Objetivo general:

- Obtener las velocidades de las ondas de corte en las inmediaciones de la línea 4 del Metro de Caracas mediante mediciones sísmicas.

### 1.2.2 Objetivos específicos:

- Obtener información del subsuelo mediante exploraciones sísmicas en el área de estudio (sísmica de superficie y sísmica de pozos).
- Interpretar las mediciones de sísmica de pozo y en superficie (en torno a la línea 4 del Metro de Caracas).
- Comparar el alcance de la sísmica de superficie y la sísmica de pozo.
- Comparar las resoluciones obtenidas mediante los diferentes métodos sísmicos (refracción, reflexión 2D, “downhole”, “crosshole” y tomografía).
- Generar mapas de las propiedades geofísicas presentes en la línea 4 del Metro de Caracas.
- Correlacionar parámetros geotécnicos (SPT) y geofísicos (velocidad de ondas de corte) donde sea posible.

## **1.1 Justificación**

La aplicación de los métodos geofísicos a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas, permitirá investigar las características del subsuelo, a manera de obtener información acerca de las estructuras presentes, así como también de la litología en el área de estudio. A partir de la integración de los métodos geofísicos (sísmica y radar de pozo) se pueden definir con mayor certeza las características del subsuelo. Por otro lado, la realización del estudio geofísico permitirá relacionar las respuestas obtenidas a través de la sísmica, el radar de pozo y SPT, de manera tal que se pueda llevar a cabo una comparación entre estas mediciones y estimar las similitudes y diferencias entre ambos métodos, ya que en Venezuela en el área de la construcción se toma



básicamente la información aportada por estudios geotécnicos y se deja a un lado a los métodos geofísicos. Por medio de este proyecto se podría visualizar la eficacia de los métodos geofísicos aplicados a la industria de la construcción. En otro orden de ideas, es pertinente indicar que la información obtenida a partir del estudio de las velocidades de ondas de corte o de cizallamiento, da una idea del riesgo sísmico que puede estar presente en un área determinada; de lo anterior se infiere que la obtención de las velocidades de las ondas de corte aporta información importante relacionada con la estabilidad sísmica a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas en este estudio en particular entre las estaciones Capuchinos y Plaza Venezuela, lo que está enmarcado en el contexto del estudio de microzonificación sísmica de Caracas.

La relación obtenida entre los valores de ondas de corte y los valores SPT ha sido utilizado para corroborar los parámetros utilizados en el estudio sobre “El Plan Básico de Prevención de Desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas” realizado actualmente por la cooperación técnica japonesa JICA en Caracas.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 Trabajos previos**

A partir del sismo de Caracas en 1967 se consideró la importancia de la realización de estudios de las condiciones locales del suelo en el Valle de Caracas y en el Litoral Central, por lo que el Ministerio de Obras Públicas y la Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo de Caracas de 1967 realizó el estudio de suelo publicado “Segunda Fase del Estudio del Sismo ocurrido en Caracas el 29 de julio de 1967” (FUNVISIS, 1978). En esta publicación se informó sobre los daños generados por el sismo, así como también la ubicación de éstos y la relación entre las propiedades geológicas y geofísicas presentes en el área. También se tomó en cuenta la relación entre la profundidad de los sedimentos y los periodos sísmicos fundamentales de la zona. Para el estudio mencionado anteriormente se efectuaron mediciones sísmicas de refracción y mediciones in situ de velocidades de ondas de cizallamiento en el Litoral Central y en el Valle de Caracas. Por ejemplo en Caraballeda, en donde se registraron los mayores daños en el Litoral Central, se realizaron varios perfiles sísmicos y perforaciones (e.g. Weston INC, 1969; Lineham and Murphy, 1974; FUNVISIS, 1978) y por el hecho de que el sismo de Caracas de 1967 ocasionó mayor destrucción en algunas zonas en comparación a otras, la meta de los estudios realizados es la de determinar la respuesta del suelo generada por el sismo a partir de las características del mismo (efectos de sitio).

La determinación de las velocidades sísmicas y del espesor de sedimentos en la cuenca fueron los objetivos principales en las mediciones realizadas (tablas 01 y 02). A partir de ello se concluyó que las zonas que contenían mayor espesor de sedimentos fueron las más afectadas durante el sismo.

**Tabla 01.** Velocidad de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas de refracción (Weston, 1969).

<b>Localización</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>
<b>Country Club</b>	0	400 - 900	240 – 290
	15 – 20	1500	-----
	40 – 50	1700 – 1850	-----
<b>Parque del Este</b>	0	400 – 500	240
	10 – 12.5	1700 – 1850	-----
<b>La Carlota</b>	0	400 – 900	390
	20 – 32.5	1700 – 1850	-----

**Tabla 02.** Velocidad de ondas “S” desde 0 a 10 m de profundidad (Weston, 1969).

<b>Localización</b>	<b>Vs (m/s) (0 a 5-10 metros)</b>
Los Palos Grandes	180-230 (-3m); 430 (-65m); 480
Parque del Este	240
Aeropuerto La Carlota	390
Tocome	240
Caracas Country Club	240 – 290
Country Club – La Castellana	240 – 290
San Bernardino	570?
La Vega (Urb. Montalbán)	250 – 400
Urbanización La Paz (Parque la Paz)	250 – 400

En cuanto a las mediciones de ruido ambiental, Abeki et al. (1995) realizaron un estudio en la zona de Los Palos Grandes, ya que la misma fue altamente afectada por el sismo de 1967 y determinaron que el espesor de los sedimentos está relacionado con los periodos predominantes del suelo. Luego en 1995, Duval et al. (1998) llevaron a cabo mediciones nuevamente en Los Palos Grandes y también en San Bernardino, ya que esta última zona fue la segunda más afectada durante el

terremoto en Caracas. Como resultado se verificó la relación entre los periodos fundamentales del suelo y el espesor de sedimentos, aunque los espesores de sedimentos no se correlacionaron con las amplificaciones obtenidas durante las mediciones. Posteriormente en julio de 1997, Abeki et al. (1998) y Enomoto et al. (2000) efectuaron nuevas mediciones en el Valle de Caracas, con lo que se obtuvo información de los periodos fundamentales y las amplitudes registradas en el Valle de Caracas.

Los mismos datos fueron analizados por Rocabado (2000) con la finalidad de obtener los periodos fundamentales y amplificación del suelo de la ciudad de Caracas y la relación existente entre la profundidad de sedimentos. Kantak (2001) realizó mediciones de ruido y refracción sísmica poco profundas en el Valle de Caracas (tabla 01). A partir de la integración de datos geofísicos y pozos existentes obtuvo espesores de sedimentos en el Valle de Caracas (tabla 03).

<b>Tabla 03.</b> Velocidad de ondas “P” y “S” (Kantak, 2001).			
<b>Localización</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>
<b>Country Club</b>	0	410 – 700	250 – 400
	0.8 – 1.2	630 – 740	440 – 510
	3 – 7	920 – 960	560 – 570
	11 – 16	1860	-----
<b>Parque del Este</b>	0	360 – 410	240 – 250
	3.3 – 4.5	680	375 – 390
	9.7 – 12.4	1750 – 1770	-----
<b>La Carlota</b>	0	410 – 450	(240 – 265)
	3 – 4.5	795	(468)
	18.5 – 18.6	1750	-----

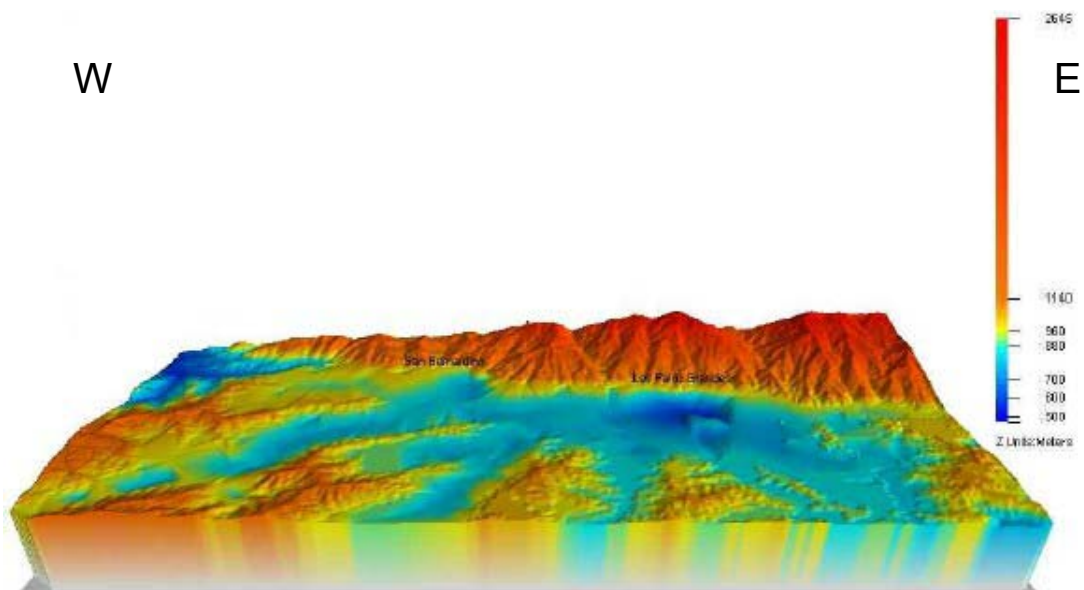
<b>Localización</b>	<b>Profundidad</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>
<b>El Marqués</b>	0	470	(276)
	0 – 4.7	580 – 630	(340 – 365)
	11.8 – 16.3	2200	(1294)
<b>Los Caobos</b>	0	500 – 610	(294 – 359)
	4.4 – 5.8	1030	(606)
<b>Parque del Oeste</b>	0	500 – 670	(294 – 394)
	5.9 – 7.2	2200	(1294)
<b>El Llanito</b>	0	720	-----
	5 - 10	2300	-----

**Nota:** Las velocidades de onda S entre paréntesis fueron estimadas a partir de las ondas P ( $V_p = 1.72 \cdot V_s$ )

## 2.2 Geología de la región de Caracas.

### 2.2.1 Morfología de la región de Caracas.

La región de Caracas se puede dividir en tres áreas, las cuales son la Sierra del Ávila al norte de Caracas, el Valle de Caracas y las cadenas al sur y oeste de Caracas. (figura 04).



**Figura 04.** Superficie topográfica del lecho de roca en el Valle de Caracas. (Kantak, 2001).

La Sierra del Ávila forma parte de la Cordillera de la Costa y separa al Mar Caribe del Valle de Caracas, la montaña más alta es el pico Naiguatá con 2765 metros. El sistema de fallas de San Sebastián que forman parte de la Sierra del Ávila tiene dirección este-oeste, por lo que su rumbo define la línea de costa. La ladera norte es bastante inclinada y es cruzada por diversas quebradas, tales como la quebrada de Tacagua que es la más larga. Las quebradas por lo general son bastantes cortas debido a la proximidad a la costa. Por su parte la ladera sur forma parte de la región norte del Valle de Caracas a lo largo de la falla del Ávila y también es cortada por varias quebradas, como por ejemplo las quebradas Anauco, Chacaíto y el río Tócome, los cuales cortan valles profundos en forma de V (Dengo, 1953).

El Valle de Caracas es una depresión larga y angosta, está situado a una altura de 900 metros con una longitud promedio de 25 kilómetros desde Antímano hasta Petare y en dirección norte-sur posee aproximadamente 4 kilómetros en su parte más ancha (Dengo, 1953). El río Guaire (tributario del río Tuy) atraviesa el valle, en sentido oeste-este y es alimentado por la quebrada de Baruta y el río El Valle. El valle de Caracas es un semigraben originado por movimientos de la corteza a causa de la zona de falla Tacagua – El Ávila que se extienden actualmente a lo largo de la ladera sur del Ávila, hoy en día existen conos aluvionales piemontinos en el frente montañoso, varios de ellos se extienden hacia el valle y se mezclan paulatinamente con los depósitos aluvionales del Guaire (Dengo, 1953). Tiempo atrás este río debió fluir más cerca de la zona de falla y bastante paralelo a la misma (Dengo, 1953). En Petare el Guaire cambia bruscamente de dirección hacia el sur y se transforma de un valle más o menos abierto con espesos aluviones, a una garganta estrecha, en este punto una roca dura sirve como nivel de base temporal que rige la sedimentación aluvional del Valle de Caracas (Dengo, 1951).

Las colinas ubicadas al sur y oeste del valle de Caracas son de menor altura que el macizo del Ávila y sus pendientes son más suaves. Estas colinas poseen elevaciones entre los 1200 y 1400 metros, el rumbo preferencial de la alineación de estas colinas es N60°E siguiendo el rumbo general de la estructura geológica y son cortadas por valles angostos que siguen principalmente esa dirección (Dengo, 1951).

### 2.2.2 Geología de Caracas

En su mayoría el Valle de Caracas se encuentra relleno por sedimentos de material proveniente del Ávila y en menor parte por el material transportado por los afluentes del río Guaire. Debido al origen de estos sedimentos, los mismos son bastante heterogéneos y de carácter lenticular, la litología cambia abruptamente de un lugar a otro, por lo que es muy variada. A lo largo del río Valle y del río Guaire (que ocupa la parte sur de Caracas), se depositaron terrazas, no muy amplias, de poca

anchura. En las antiguas vegas del río Guaire, las terrazas incluyen hasta varios metros de limos arenosos de desborde o capas de lodo, lo que indica grandes inundaciones generadas por el represamiento de las aguas del río Guaire, debido a la gran magnitud de aludes torrenciales. Se pueden encontrar evidencias de esto en Petare, Bello Monte, Plaza Venezuela, Puente Hierro y a lo largo de las quebradas Chapellín (Los Cedros), Chacaíto (Country Club), Tócome (Monte Cristo), (Singer, 1977).

Los sedimentos que se crearon de aludes torrenciales se pueden subdividir en una facies proximal y una distal en los que predominan ciertos tipos de materiales. Esa subdivisión fue la empleada en el mapa “Geología del Cuaternario, Valle de Caracas (parte oriental)”, elaborado por Singer en el año 1974, (Singer, 1977).

La facies proximal caótica se almacenó en casi todo el norte del valle, de la misma manera se acumuló en las zonas de Pedregal, Altamira, San Bernardino, Sabana del Blanco, Los Palos Grandes y Sebucán; esta facies corresponde a formas de explayamiento de materiales de granulometría bastante gruesa, en las que predominan gravas, depositadas por lo general en una matriz arenosa. También se pueden localizar acumulaciones de grava con bloques de hasta varios metros cúbicos. Los depósitos de arcilla y limos son por lo general menos frecuentes, (Singer, 1977).

Más hacia la parte sur, el material proximal caótico enmascara de manera interdigitada a una facies distal fina, en la zona de Santa Eduvigis, Parque del Este, Chacao y La Floresta, las cuales se encuentran dominadas por estas facies. En esas zonas los bloques grandes son menos frecuentes, la granulometría es más fina y el material predomina en estratos delgados de arena gruesa y arenas limosas, los depósitos de limo y arcillas también son muy frecuentes. En lo referente al origen de esta facies, la misma se originó por el transporte de los materiales finos a la parte distal y por efectos del lavado sucesivo de las facies proximal gruesa. De la parte



distal los materiales pasan a los aluviones contemporáneos del represamiento y de las descargas del río Guaire.

El mapa de topografía del tope de roca realizado (Kantak, 2001) indica una disminución general del espesor aluvial hacia el norte, por el hecho que se trata de un semi-graben hundido por un solo lado en contacto con la cordillera (figura 05). La tendencia del hundimiento es tal, que ha sido capaz de neutralizar e incluso de invertir el proceso actual de encajamiento de los ríos en sus propio aluviones. Esto explica que el mecanismo habitual de formación de terrazas escalonadas no haya funcionado en estas regiones y esté reemplazado por mantos aluviales (Singer, 1977).

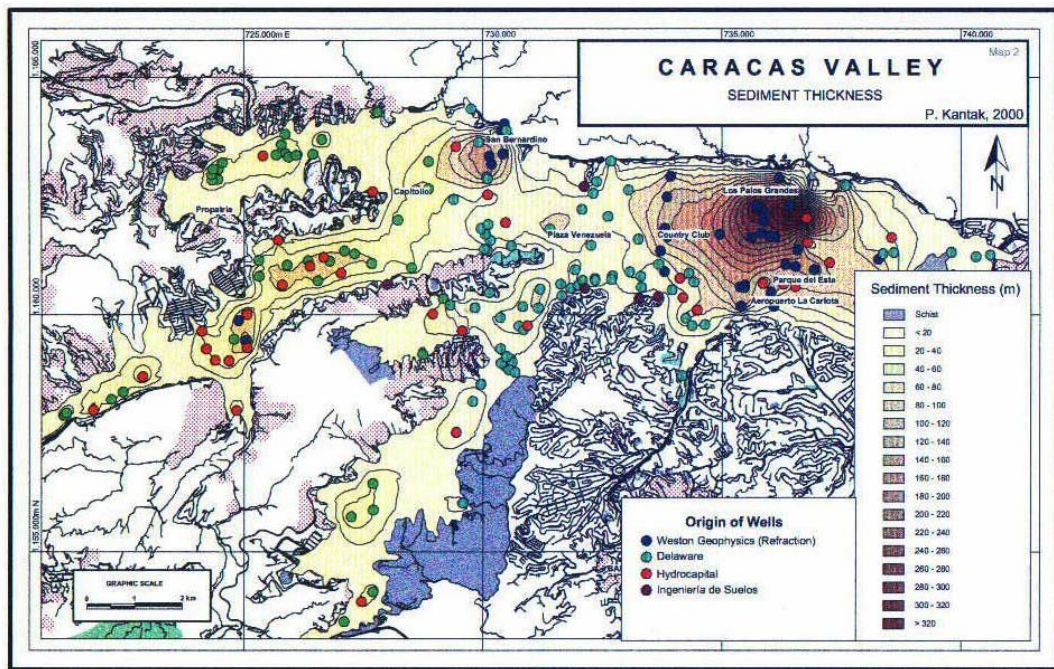


Figura 05. Mapa de espesores de sedimentos en el valle de Caracas. (Kantak, 2001).

### 2.2.3 Condiciones del suelo en el Valle de Caracas.

El proceso de formación de los suelos en el Valle de Caracas se encuentra influenciado por la zona de fallas a lo largo de la ladera del Ávila, el manto del suelo que cubre al valle ha procedido por lo general de las montañas cercanas y en menor grado de la sedimentación aluvional de los ríos y quebradas tributarias del Guaire.

Los rellenos realizados por el hombre cubren grandes áreas del valle hasta profundidades de aproximadamente seis metros. Como se ha descrito anteriormente, los depósitos aluvionales cubren gran parte del Valle de Caracas y van desde gravas que en ocasiones presentan grandes peñones, principalmente en las cercanías de El Silencio, Altamira y Los Palos Grandes, hasta diversas mezclas de arena, limo y arcilla; asimismo, las capas y lentes de suelos predominantemente granulares y arcillosos se intercalan y son discontinuas (Aisiks y Redel, 1975).

#### 2.2.3.1 Condiciones del suelo en la zona centro-norte de la ciudad.

La zona comprende las Parroquias de Altagracia, San José y la Urbanización San Bernardino, las demarcaciones del área son las siguientes: al norte, el pie de la Serranía del Ávila, al sur, la Avenida Urdaneta, al este, la quebrada Canoas y al oeste la Avenida Baralt. El subsuelo consiste esencialmente de suelos aluvionales granulares, por lo general arenas medias arcillosas, gravas arenosas y limosas, con áreas de peñones duros de gneis procedentes del Ávila. En la figura 06 se observa un perfil del suelo con las condiciones de la zona centro – norte de Caracas (FUNVISIS, 1978).

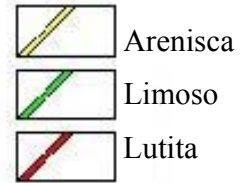
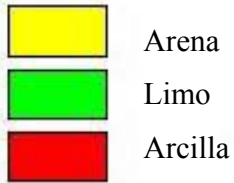
Los niveles estáticos del agua freática se hallan habitualmente entre los 20 y 30 metros de profundidad y el gradiente hidráulico sigue aproximadamente paralelo a la pendiente de la superficie del terreno (FUNVISIS, 1978).

Símbolos	Descripción de los materiales	Veloc.Onda Sism. m/seg.		Módulo de Corte "G" Dynas/cm <sup>2</sup>
		Vp	Vs	
0	Depósito sedimentario aluvial, formado por arenas muy arcillosas, finas a medias y viceversa; plasticidad media, cohesiva a friables. Marrón en tonos amarillentos y grisáceo claro. N = 20	< 400	< 430	< 3.72x10
10	Aluvión formado por peñones y fragmentos de gneiss con matriz areno limosa. Marrón amarillento. N > 100	500		
20	Arcilla arenosa sedimentaria tiesa. Gris y marrón. N = 45			
30	Depósito coluvial formado por peñones y fragmentos de gneiss blando, desintegrable en matriz areno-arcillosa; zonas sin peñones. Muy denso. N > 100 Hasta aquí profundidad explorada con toma de muestras.	1500		3.72x10 <sup>9</sup>
40	? Suelos densos.			
120	? Roca meteorizada dura	4000	480	4.6x10 <sup>9</sup>

Figura 06. Perfil del suelo en la zona Centro – Norte de Caracas. (FUNVISIS, 1978).

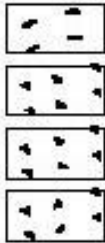
A continuación se observa la leyenda correspondiente a los perfiles ubicados en el tramo oeste de la línea 1 del Metro de Caracas (Kantak, 2001).

**LEYENDA**



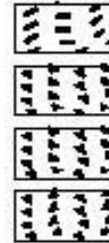
**Fragmentos:**

**< 15%**

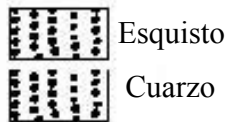


Esquisto  
Gneis  
Anfibolita  
Cuarzo

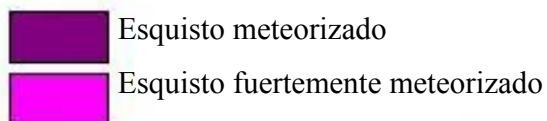
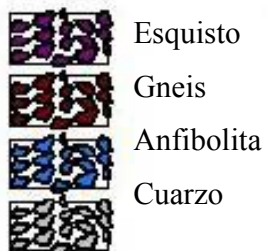
**> 15%**



**Grava:**

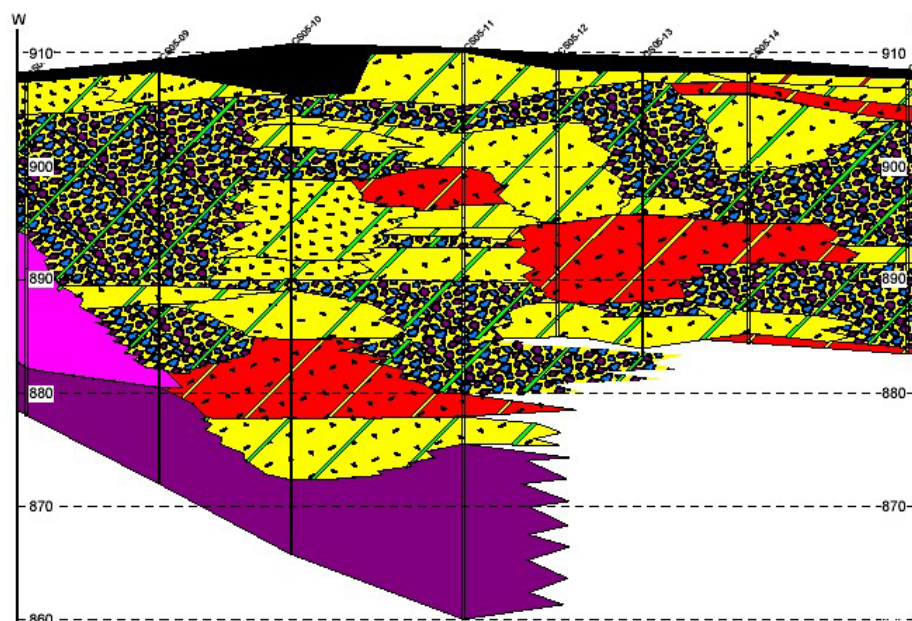


**Conglomerados y cantos rodados.**

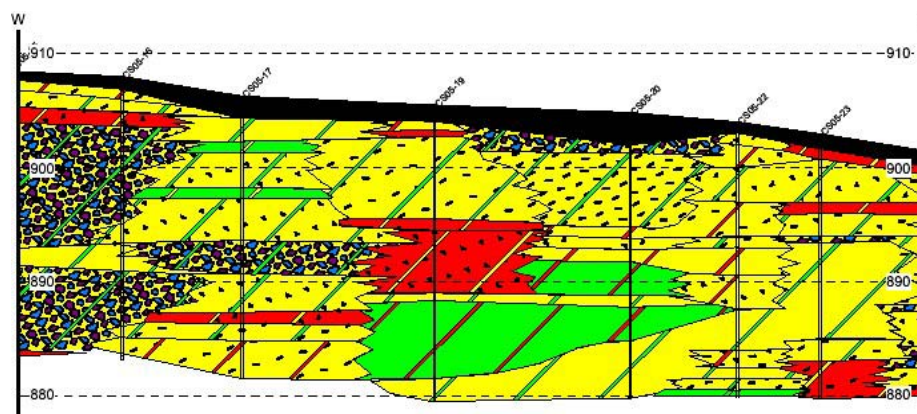


### Secciones 1 y 2 Capitolio.

Las rocas metamórficas desaparecen por debajo de los depósitos de abanicos fluviales. Los sedimentos consisten principalmente de pequeños canales de formas lenticulares, los canales generalmente contienen conglomerados y cantos rodados de anfibolitas, esquistos y cuarzo en una matriz de arena, en la que varía el tamaño de grano. En parte existen arenas limosas libres de fragmentos de rocas y capas de arcillas. En las figuras 07 y 08 se observan perfiles realizados en Capitolio (Kantak, 2001).



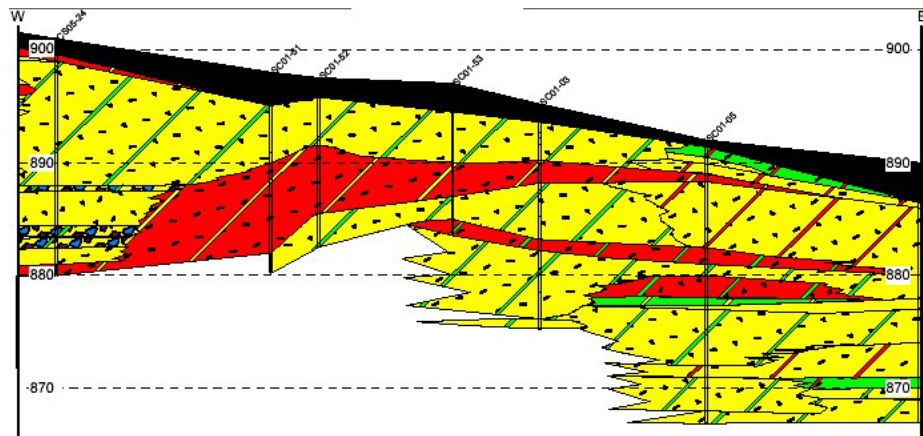
**Figura 07.** Sección 01 en la zona de Capitolio (Kantak, 2001).



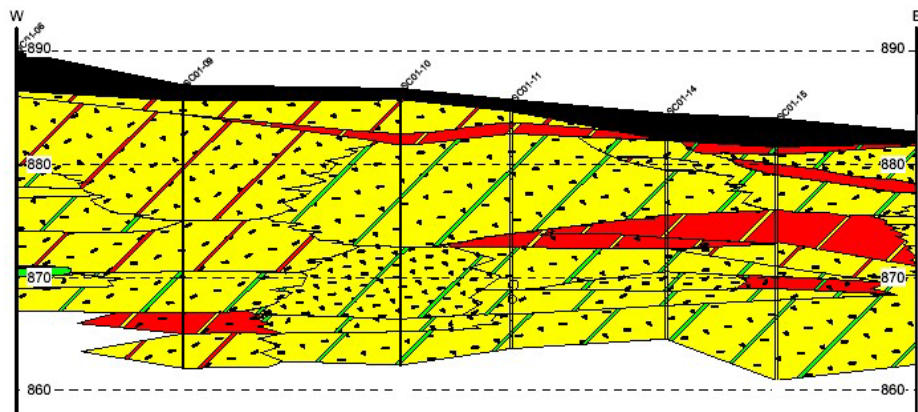
**Figura 08.** Sección 02 en la zona de Capitolio (Kantak, 2001).

Secciones 3 a 6 desde Capitolio hasta el Museo de Bellas Artes.

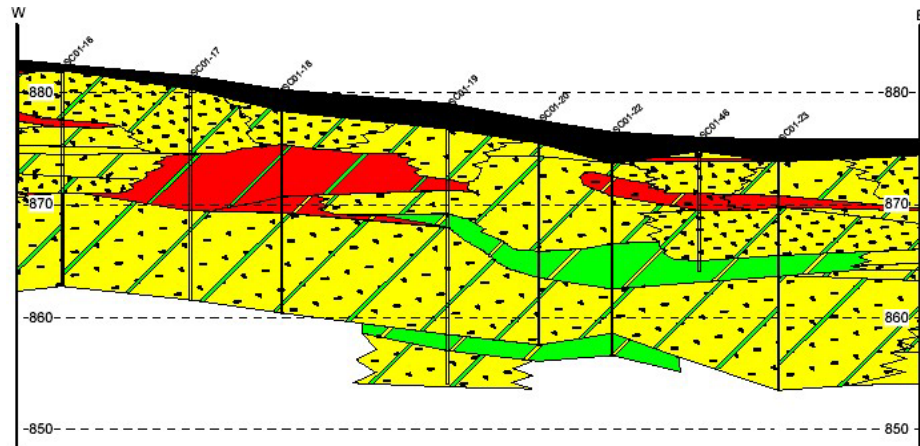
Se observa un cambio claro en la litología y la geometría de las unidades. Por lo general el tamaño de grano es fino entre conglomerados y cantos rodados; se observan pequeños fragmentos de esquisto y cuarzo. La anfibolita desaparece completamente en esta región indicando un cambio de la fuente de las rocas. Las unidades tienen forma lenticular e irregular. También se observan arcillas y limos. La litología y la geometría de las unidades indican a parte de un cambio en la fuente de las rocas la transición hacia un área de abanicos distales. En las figuras 09, 10, 11 y 12 se observan perfiles realizados en esta zona (Kantak, 2001).



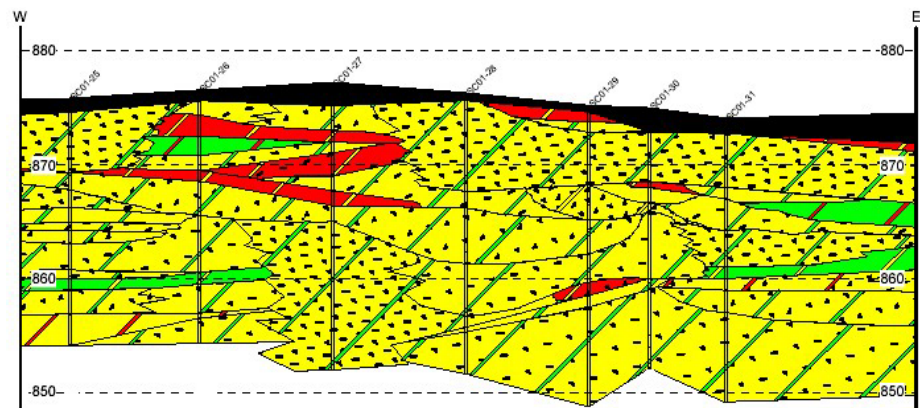
**Figura 09.** Sección 03 realizada entre Capitolio y el Museo de Bellas Artes (Kantak, 2001).



**Figura 10.** Sección 04 realizada entre Capitolio y el Museo de Bellas Artes (Kantak, 2001).



**Figura 11.** Sección 05 realizada entre Capitolio y el Museo de Bellas Artes (Kantak, 2001).

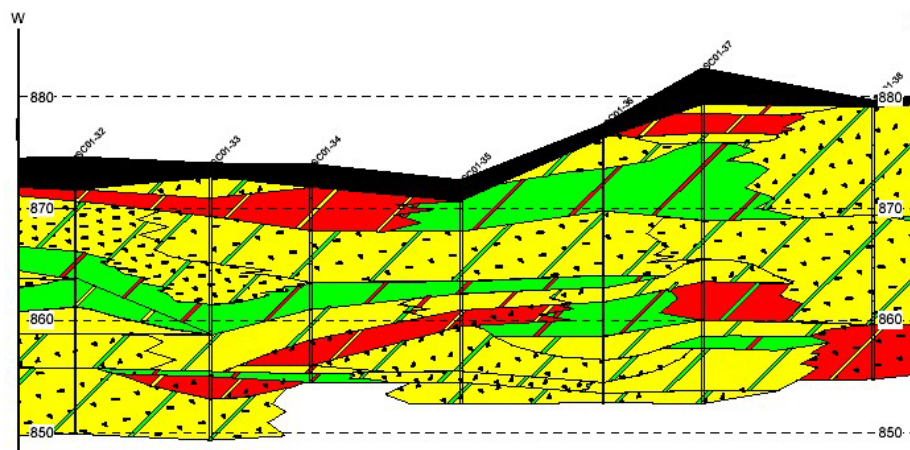


**Figura 12.** Sección 06 realizada entre Capitolio y el Museo de Bellas Artes (Kantak, 2001).

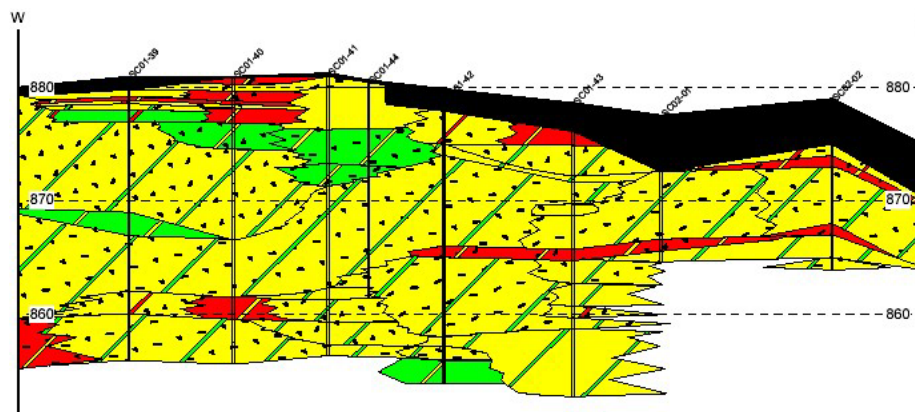
Secciones 07 a 11 desde el Museo de Bellas Artes hasta Plaza Venezuela.

En esta área se pueden observar nuevos cambios, las unidades por lo general están dominadas por arenas y no contienen cantos rodados ni conglomerados, las unidades presentan menos formas lenticulares y se observan muchas capas gruesas (mayores de 5 metros) de arenas limosas y también aumentos en las capas dominantes de arcillas y limos. Las características mencionadas anteriormente muestran la mayor proximidad al río Guaire, y el incremento de sedimentos de depósitos de inundación, los cuales llegan a ser claramente visibles en la sección 09 ya que se observan fácilmente los limos y las arcillas, los cuales se extienden largas distancias de cientos de metros, incluyendo en parte materia orgánica o decoloraciones de materiales orgánicos descompuestos entre las capas de arena y limo anteriormente nombradas;

estas capas tienen unos pocos metros de espesor. Adicionalmente se puede observar en las figuras 16 y 17 una capa bastante extendida de arena limosa sobre la base de las secciones 10 y 11, las cuales contienen arena limosa con alto contenido de esquistos y fragmentos de cuarzo. Los esquistos encontrados entre estos sedimentos están fuertemente meteorizados y descompuestos (Kantak, 2001).

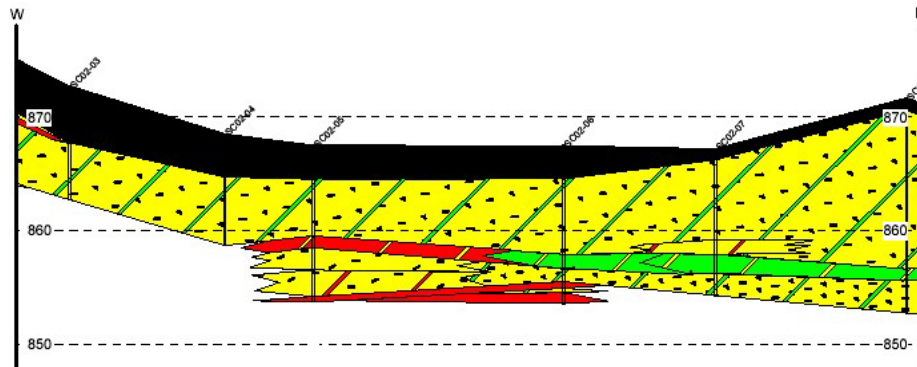


**Figura 13.** Sección 07 realizada entre el Museo de Bellas Artes y Plaza Venezuela (Kantak, 2001).

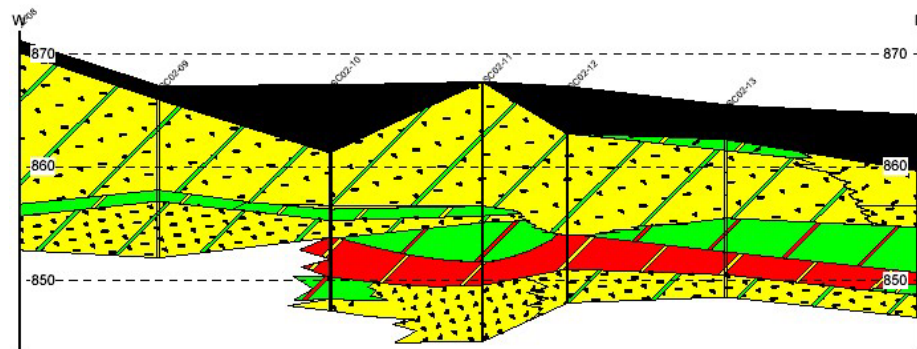


**Figura 14.** Sección 08 realizada entre el Museo de Bellas Artes y Plaza Venezuela (Kantak, 2001).

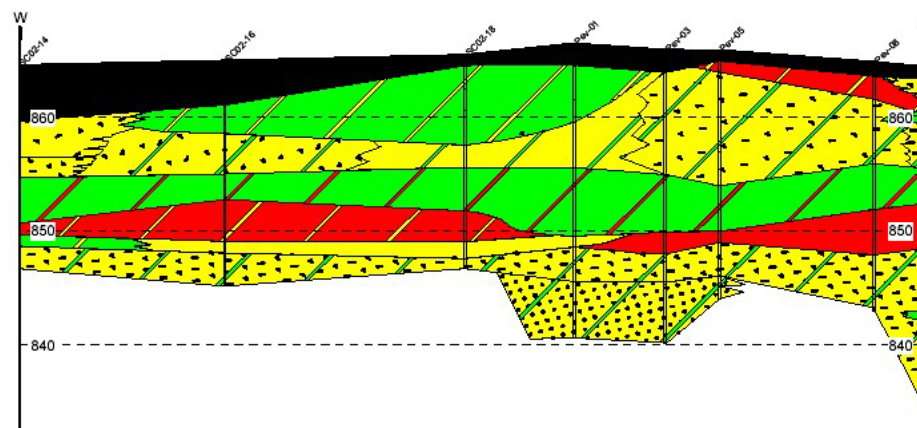




**Figura 15.** Sección 09 realizada entre el Museo de Bellas Artes y Plaza Venezuela (Kantak, 2001).



**Figura 16.** Sección 10 realizada entre el Museo de Bellas Artes y Plaza Venezuela (Kantak, 2001).



**Figura 17.** Sección 11 realizada entre el Museo de Bellas Artes y Plaza Venezuela (Kantak, 2001).

### **2.3 Sísmica de refracción**

Por medio de este método sísmico se realiza un estudio del subsuelo utilizando los tiempos de viajes de ondas críticamente refractadas, llamadas también ondas cabezales o “head wave”. Se debe tomar en cuenta que la adquisición de los datos durante la sísmica de refracción se puede diseñar dependiendo del objetivo a estudiar, por ejemplo para definir estructuras a grandes profundidades o para realizar estudios someros (Cavada, 2000).

En la sísmica de refracción la distancia entre la fuente y los receptores debe ser grande, ya que los rayos refractados se propagan a lo largo de discontinuidades o límites entre capas. Por otro lado la frecuencia dominante para la sísmica de refracción se encuentra entre los 5 a 20 hertz. La característica principal de la sísmica de refracción es la de poder detectar las interfases entre capas litológicas. La mayor aplicación de la sísmica de refracción es la de explorar el subsuelo con fines geotécnicos (interesa la profundidad de la roca inalterada, grado de meteorización, localizar materiales de construcción, grado de fractura o de facilidad de fractura de la roca y evaluación de riesgo sísmico) a profundidades entre 0 y 100 metros o con fines petroleros. La sísmica de refracción es bastante práctica para delimitar la interfase entre medios elásticos con un fuerte contraste de velocidad, como por ejemplo el existente entre el basamento de roca inalterada y el material de recubrimiento que usualmente es aluvional o roca meteorizada. Este método no suele ser muy efectivo para delimitar estratos sedimentarios entre si. También se puede emplear en hidrogeología para ayudar a determinar la continuidad y extensión de los acuíferos (Cavada, 2000).

Los métodos sísmicos de prospección utilizan diversas fuentes para generar ondas sísmicas artificiales en puntos determinados y mediante el análisis de las

llegadas en los geófonos se determina el momento de llegada de la energía refractada o reflejada por las discontinuidades en las formaciones rocosas. Estas técnicas producen perfiles sísmicos de refracción o de reflexión, según el tipo de adquisición empleada. La importancia de la sísmica está referida a las propiedades mecánicas de los materiales del subsuelo, pero son relativamente insensibles a la química presente de los materiales que responde en mayor escala a métodos electro-magnéticos como el “Ground Penetrating Radar” (Steeple, 2000).

### 2.3.1 Tipos de ondas

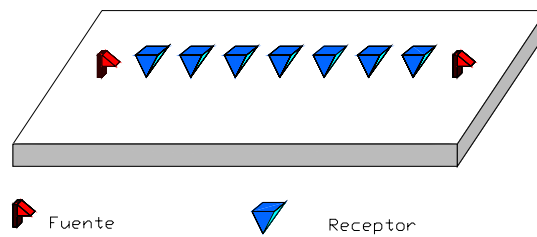
Existen varios tipos de ondas, de las cuales se centrará la atención en las denominadas ondas “P” y ondas “S”, ya que no se encuentran limitadas a una superficie a diferencia de las ondas superficiales (“rayleigh”, “love”, “stoneley”), las cuales penetran muy poco en el subsuelo.

Las ondas “P” u ondas primarias son las ondas corpóreas más rápidas, por lo que llegan primero a los detectores y se transmiten en todas direcciones. Es una onda compresiva, en donde el material rocoso se comprime en la misma dirección de propagación de la onda y posteriormente se expande.

Las ondas “S” u ondas secundarias tienen una relación de velocidad con las ondas “P” próxima a  $V_p = \sqrt{3} V_s$  y no se propagan en fluidos. Son ondas transversales, por lo que el material rocoso ubicado en su trayectoria sube y baja o se mueve lateralmente de forma perpendicular a la dirección de propagación de las ondas. Las ondas “S” se pueden descomponer en dos componentes vectoriales, las cuales son “SV” en donde el movimiento se ubica en un plano vertical y las “SH”, en donde el movimiento se realiza en un plano horizontal.

### 2.3.2 Tipo de tendido

Para realizar la adquisición de los datos de la sísmica de refracción se puede emplear un tendido largo, en el que se encuentran varios receptores y una fuente colocada en uno de los extremos del tendido, este tipo de arreglo se denomina tendido en línea o “in line”, aunque también se pueden colocar una fuente en cada uno de los extremos, denominándose esta última geometría tendido de disparos reversos (figura 18) para el control de los tiempos y las inclinaciones de los estratos. Se colocan más puntos de disparos a lo largo de la línea para el control de los estratos superficiales.

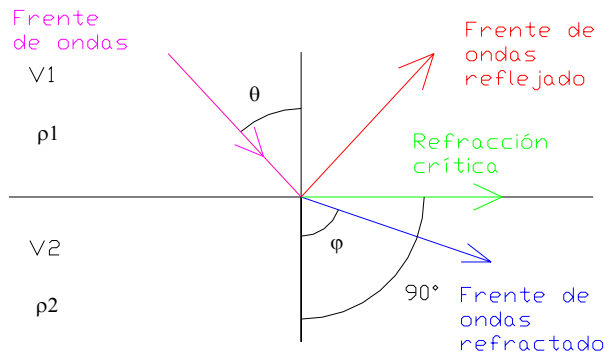


**Figura 18.** Tendido en línea (“in line”) y reverso.

### 2.3.3 Trayectorias de ondas y relaciones distancia – tiempo

Para determinar las velocidades de las capas presentes en el subsuelo es necesario conocer previamente el tiempo de viaje de las fases sísmicas en función de la distancia.

Al incidir un rayo sobre una interfase, se origina una división de la energía creando principalmente un rayo reflejado y otro refractado (figura 19) el ángulo de salida del rayo con respecto a la vertical se rige por la ley de Snell.



**Figura 19.** Representación del fraccionamiento de una onda al incidir sobre una interfase.  $V_1$  y  $V_2$  son las velocidades de cada una de las capas y  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  las densidades respectivas.

La Ley de Snell viene dada por:

$$\frac{\text{Sen}(\theta)}{V_1} = \frac{\text{Sen}(\varphi)}{V_2} = p$$

Donde  $p$  se denomina parámetro de rayo.

$\theta$  = ángulo de incidencia del rayo.

$\varphi$  = ángulo con que se refracta la onda.

$V_1$  y  $V_2$  = Velocidad de la capa superior e inferior respectivamente.

Si se tiene que la velocidad de la segunda capa es superior a la primera, se tiene que  $\theta < \varphi$ , por otro lado si  $\varphi = 90^\circ$ , se presenta el caso de refracción crítica, la misma se asocia a una onda que se desplaza horizontalmente cerca de la interfase; está onda se denomina onda críticamente refractada u onda cabezal:

$$\frac{\text{Sen}(i_c)}{V_1} = \frac{\text{Sen}(90)}{V_2} = \frac{1}{V_2}$$

La onda cabezal transmite energía hacia la capa superior a medida que viaja por la interfase, el ángulo con que se origina esta energía es  $i_c$ , llamado ángulo crítico y viene dado por:

$$i_c = \text{Arcsen}\left(\frac{V_1}{V_2}\right)$$

Se debe tomar en cuenta que si el ángulo crítico es menor que el ángulo de incidencia ( $i_c < i$ ), la energía se reflejará hacia la capa superior, por lo que no se desplazará por la segunda capa.

El tiempo de arribo de la onda directa viene dada por:

$$t = \frac{x}{V_1}$$

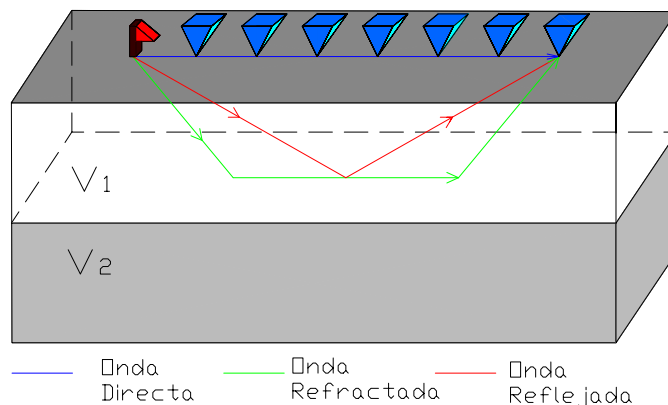
En donde  $x$  es la distancia de recorrido de la onda desde la fuente hasta llegar al receptor.

El tiempo de llegada de la onda refractada viene dada por:

$$t = \left( \frac{r}{V_1} \right) + 2 \frac{d}{V_1} \cos(i_c)$$

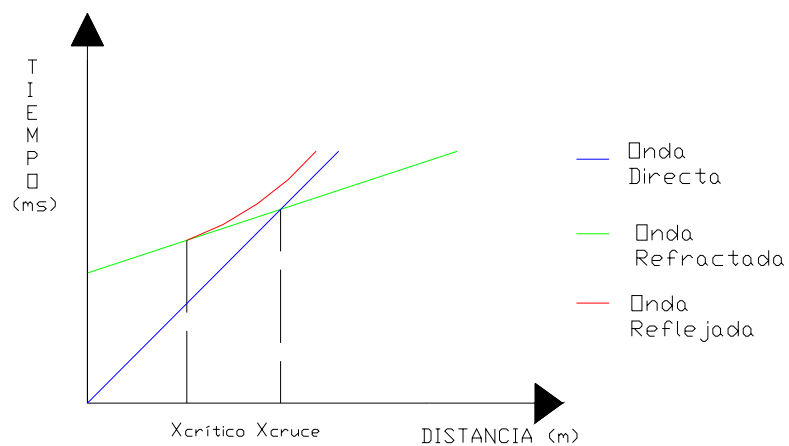
En donde  $r$  es la distancia que recorre la onda en la interfase entre las dos capas y  $d$  es la distancia que viaja la onda desde la primera capa hasta refractarse.

En la figura 20 se observan las trayectorias de las ondas directa (viaja en línea recta desde la fuente hasta el receptor), reflejada y refractada crítica (onda cabezal) en un modelo del subsuelo representado por dos capas horizontales, en donde se supone que  $V_1 < V_2$ .



**Figura 20.** Trayectorias principales de la propagación de ondas.

Al representar gráficamente los datos obtenidos con la refracción sísmica, es conveniente crear una curva utilizando en los ejes de referencia la distancia entre la fuente y los detectores y el tiempo de la primera llegada. Se debe tomar en cuenta el caso en el que a medida que se profundiza se pueda localizar un medio de menor velocidad que el encontrado por encima de él; éste es el caso de la capa de baja velocidad, en donde los rayos siempre son desviados hacia abajo y por lo tanto no pueden propagarse horizontalmente por la interfase que separa a esa capa con la capa superior. Por esta razón no se puede tener información directa de una zona de baja velocidad.



**Figura 21.** Visualización de las curvas de tiempos de viaje de las principales propagaciones de ondas.

En la figura 21 se representan las curvas correspondientes a los tiempos de viaje del modelo representado anteriormente, en donde la onda directa se representa por una recta con pendiente  $dT/dX = p = 1/V_1$ . La curva del tiempo de viaje de la onda críticamente refractada se visualiza por medio de una línea recta cuya pendiente es  $dT/dX = p = 1/V_2$ . Cabe destacar que las ondas refractadas llegan primero que las ondas directas a partir de determinada distancia, ya que el desplazamiento se realiza en una interfase de mayor velocidad, por lo que la onda refractada representaría la primera llegada hasta los receptores desde una cierta distancia denominada distancia de cruce. De manera de poder recibir las ondas refractadas se debe tomar en cuenta

que los receptores se deben colocar a una distancia lo bastante lejos de la fuente, dicha distancia se conoce como distancia crítica ( $X_{\text{crítico}}$ ) y depende del espesor de la capa y del contraste de velocidad. La distancia crítica viene dada por:

$$X_{\text{crítico}} = 2 * d * \tan(i_c)$$

Otra forma de presentarla, es como función de las velocidades presentes en el medio, es decir:

$$X_{\text{crítico}} = \frac{2 * d}{\sqrt{\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 - 1}}$$

Es de interés también la distancia de cruce ( $X_{\text{cruce}}$ ), que no es más que el punto de concurrencia entre las rectas que constituyen la onda directa y la onda refractada, por lo que los receptores que se ubiquen luego de esta distancia recibirán como primera llegada a la onda refractada. Por otro lado los receptores que se localicen entre la distancia crítica y la distancia de cruce detectarán primero la llegada de la onda directa y luego el arribo de las ondas refractadas.

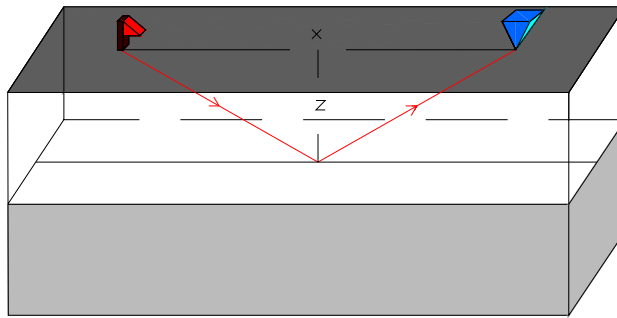


## 2.4 Sísmica de reflexión

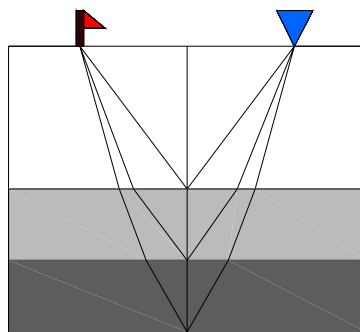
Este método aporta información detallada de la estructura geológica del subsuelo, por lo que puede determinar las profundidades en las que se encuentran las distintas interfases en el subsuelo, las profundidades se obtienen al determinarse los tiempos de recorrido de las ondas sísmicas, originadas a partir de una fuente ubicada en la superficie, las ondas se reflejan a manera de un eco al llegar a formaciones rocosas con propiedades elásticas diferentes, hasta ser detectadas por receptores localizados también en superficie (figura 19). La energía total que transporta la onda incidente es distribuida al momento de producirse fenómenos de reflexión y refracción, la cantidad de energía de cada onda generada depende de las características de ambos medios ( $V_p$ ,  $V_s$  y  $\rho$ ). Se debe tomar en cuenta que la onda “P” incidente puede generar ondas “P” y “S<sub>v</sub>” solamente, por lo que no origina ondas “S<sub>h</sub>”, otra característica importante es el hecho de que el ángulo del rayo incidente de onda “S<sub>v</sub>” es menor que el ángulo incidente de la onda P.

Una de las ventajas de la sísmica de reflexión es la de permitir generar mapas de horizontes a partir de cada punto de disparo. A diferencia de la sísmica de refracción, la de reflexión requiere una longitud de tendido menor para un objetivo a la misma profundidad.

En cualquier interfase en la que se localicen velocidades de ondas diferentes o esté presente un cambio en las propiedades elásticas se originará una reflexión, en la que el ángulo de incidencia será igual al del rayo reflejado hacia la superficie. Para determinar la profundidad de la interfase se toma el recorrido completo, desde la fuente hasta el receptor. En la figura 22 se observa la trayectoria del rayo desde la fuente hasta un receptor al reflejarse la onda en una interfase y en la figura 23 se visualiza la trayectoria de los rayos en varias capas horizontales antes de llegar al receptor.



**Figura 22.** Onda reflejada en una sola superficie de separación. La velocidad permanece constante hasta la superficie reflectante.



**Figura 23.** Onda reflejada en múltiples superficies de separación.

El éxito de la sísmica de reflexión dependerá en gran parte de la existencia de velocidades discretas y/o cambios de densidades en el subsuelo somero, definiéndose así la impedancia acústica. De este modo se podrán identificar entonces discontinuidades caracterizadas por lentes de arena, arcilla o cavidades (Miller et al., 1989).

La información arrojada por la sísmica de reflexión suele presentarse en forma de secciones sísmicas que establecen una especie de radiografía que ofrece las principales estructuras geológicas presentes en el subsuelo, tales como fallas, pliegues, intrusiones, patrones de sedimentación. La sísmica de reflexión se emplea principalmente para ubicar y obtener detalle de estructuras geológicas favorables a contener yacimientos de hidrocarburos a profundidades entre 1000 y 4000 metros;

además es empleado con fines geotécnicos primordialmente en agua, por ejemplo para obtener las características del fondo marino para anclaje de plataformas petroleras o en el tendido de tuberías, en los casos anteriores el método ofrece usualmente una resolución muy buena. La adquisición, procesamiento e interpretación por el método de reflexión son las más complicadas y costosas, pero se considera por lo general el mejor método de exploración geofísica del subsuelo (Cavada, 2000).

#### 2.4.1 Reflexión en superficies de separación horizontales.

En la figura 20 se observa la curva de tiempo de viaje de la onda reflejada representada por el color rojo. El tiempo de viaje de la onda reflejada viene dada por:

$$t_r = \frac{2 * \sqrt{Z^2 + \frac{x^2}{4}}}{V_1}$$

La expresión anterior se obtiene tomando en cuenta que el ángulo reflejado es igual al ángulo de incidencia, lo que implica que la onda se refleje en la interfase a una distancia horizontal  $x/2$  a partir de la fuente hasta el receptor.

Al tomar  $x = 0$ , la onda reflejada se desplaza directamente hacia abajo y hacia arriba, con un tiempo de viaje de:

$$t_r = \frac{2 * Z}{V_1}$$

A medida que  $x$  aumenta,  $t_r$  se incrementa hiperbólicamente. Posteriormente a distancias mayores que el espesor de la capa ( $x \gg Z$ ), el tiempo de arribo para la onda reflejada se aproximará al tiempo de viaje de la onda directa (figura 21).

## 2.5 Sísmica de pozos

La técnica de sísmica de pozos fue concebida a inicios del siglo XX, poco antes de realizarse las primeras experiencias de sísmica de reflexión y por razones tecnológicas se dejó a un lado hasta que fue tomada nuevamente por los geofísicos rusos en los años 60 (Acuña, 1990). Esta técnica proporciona información sísmica, mediante sondas colocadas dentro del pozo, por lo tanto muy cercanas a los cambios litológicos y que se emplean para complementar la información sísmica obtenida en la superficie (Schlumberger, 1984).

La sísmica de pozos mejora la interpretación estructural y estratigráfica de la sísmica de superficie y contribuyen a la disipación de incertidumbre que a menudo limita la comprensión de las secciones sísmicas. Permite calibrar la sísmica de superficie utilizando otra sísmica registrada en el pozo, en la cual se obtiene los mismos tipos de ondas y una propagación similar. Esta técnica quisiera reemplazar la sísmica de superficie en las cercanías del pozo, por una imagen teóricamente mejor, debido a que se capta cerca de los reflectores. Pero, también tiene sus propias limitaciones: el acoplamiento, las imperfecciones de procesamiento, etc.

En la sísmica de pozos para geotecnia se cuenta con una variedad de técnicas, entre las cuales tenemos:

- Registro Sónico.
- “Downhole”.
- “Crosshole”.
- “Uphole”.
- Tomografía.

Los métodos sísmicos tales como el “crosshole”, “uphole” y “downhole” utilizando pozos y polarizando o empleando fuentes en direcciones opuestas han sido usados desde hace algunos años en los Estados Unidos.

Algunas de las diferencias entre la sísmica de superficie y la sísmica de pozo se observa a continuación:

- La trayectoria de la onda en la sísmica de superficie hasta un receptor es el doble de la profundidad a la que éste se encuentra. Por su parte en la sísmica de pozo, la onda sólo recorre la mitad, por lo que se obtiene mayor información de las capas más profundas.
- Al propagarse las ondas sísmicas, se observa el efecto de las reflexiones múltiples. Los mismos son reverberaciones del rayo sísmico en una capa limitada por fuertes contrastes. En la sísmica de superficie se visualiza un mayor número de múltiples, ya que el rayo viaja por cada capa dos veces antes de llegar al receptor. En la sísmica de pozo, los múltiples son menos complejos, debido a que el rayo viaja prácticamente una sola vez por cada capa.

Uno de los métodos más fiables para obtener los módulos de elasticidad es a partir de las velocidades de ondas “P” y ondas “S”, con las siguientes fórmulas:

$$\sigma = \frac{(V_p / V_s)^2 - 2}{2((V_p / V_s)^2 - 1)}$$

$$G = \rho * V_s^2$$

$$E = 2G(1 + \sigma)$$

$$K = \frac{1}{3} * \frac{E}{1 - 2\sigma}$$

En donde:

$V_p$  = velocidad de onda P.

$V_s$  = velocidad de onda S.

$\sigma$  = razón de Poisson (dinámico).

$\rho$  = densidad.

$G$  = módulo de corte.

$E$  = módulo de Young.

$K$  = módulo de volumen.

La razón de Poisson se refiere a la variación del diámetro de un cuerpo con respecto a la elongación del mismo, como respuesta a un esfuerzo perpendicular al diámetro del objeto. El módulo de corte es también conocido como módulo de rigidez, se refiere a la resistencia de un cuerpo ante un esfuerzo de cizalla. El módulo de Young se refiere a la resistencia que opone un cuerpo ante un esfuerzo extensional. El módulo de volumen o módulo de incompresibilidad es la medida de la respuesta de un cuerpo ante un esfuerzo compresional.

La razón de Poisson presenta los siguientes valores típicos para propagación de ondas en baja tensión (Calderón, 2000):

Suelos 0,3 – 0,48

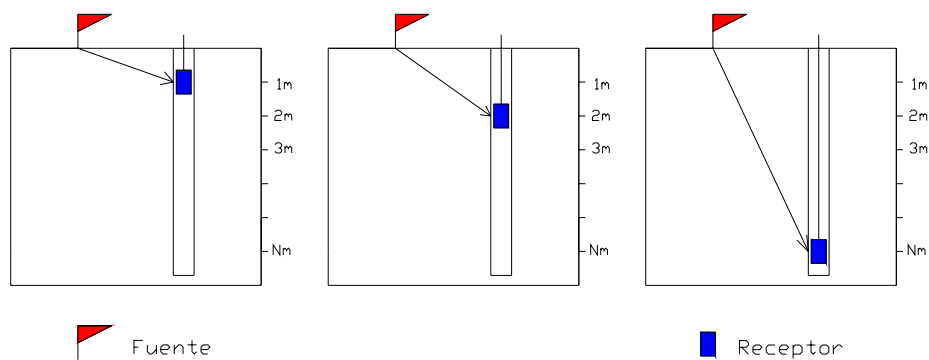
Rocas 0,05 – 0,3

Las técnicas empleadas en este estudio se basan en la aplicación del “downhole”, “crosshole” y tomografía, por lo que sólo se definirán las mismas.

#### 2.5.1 “Downhole”

Se emplea un geófono de pozo de tres componentes, uno de los cuales mide la componente vertical de las ondas y los otros dos la horizontal en dos direcciones

perpendiculares. Se obtiene la velocidad de ondas “P” y “S” y se determinan los parámetros de elasticidad dinámicos como función de la profundidad en el entorno del pozo. Se obtienen tres trazas por estar trabajando con tres componentes. La fuente se ubica en la superficie y puede ser generada por explosivos para las ondas “P” o con la mandarina para ondas “P” y “S”. Se genera una señal y el sensor se baja (cada metro) hasta llegar al final del pozo (figura 24).



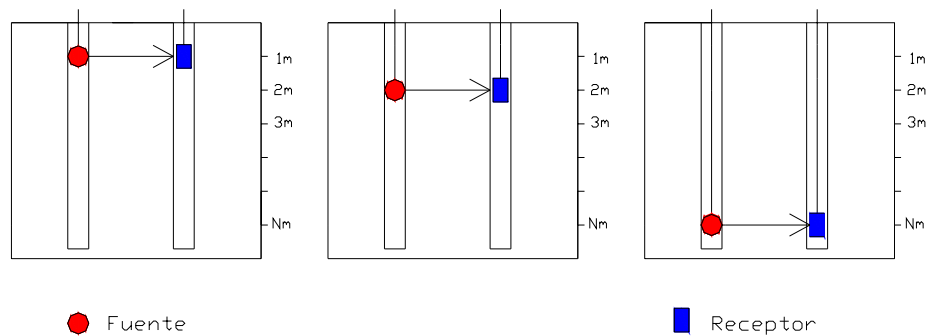
**Figura 24.** Geometría realizada al llevar a cabo un "downhole".

Las aplicaciones del “downhole” se enfocan hacia la geotecnia, con profundidades de exploración entre los cero a cien metros. Esta técnica suele ser bastante efectiva y aumenta el aprovechamiento de la inversión realizada en la perforación. Dos dificultades de este método son: la precisión en la determinación de las primeras llegadas de las ondas para la determinación de velocidades interválicas y el acoplamiento, por lo cual el pozo debe estar revestido (Cavada, 2000).

### 2.5.2 “Crosshole”

Se necesitan por lo menos dos pozos cercanos (de tres a ocho metros de separación) y la trayectoria del viaje de la onda es horizontal. La ventaja es que se conservan las distancias entre la fuente y el receptor, esto permite visualizar el contraste entre la fuente y el receptor y la señal no se atenúa. La medición del tiempo

tiene que ser muy exacta y los instrumentos de medición deben ser especiales para ese tipo de trabajo, ya que la distancia entre la fuente y el receptor es muy corta. Una dificultad es colocar la fuente en el pozo, la misma se genera a través de un martillo de pozo. Para adquirir un “crosshole” se debe colocar el martillo de pozo y el geófono de pozo a la misma profundidad para cada una de las grabaciones, hasta que se haya llegado a la parte más profunda del pozo (figura 25). El geófono de pozo detecta tres componentes vectoriales de las ondas sísmicas. Esta técnica se emplea con frecuencia para objetivos geotécnicos, también se pueden emplear emisores y sensores de radar.

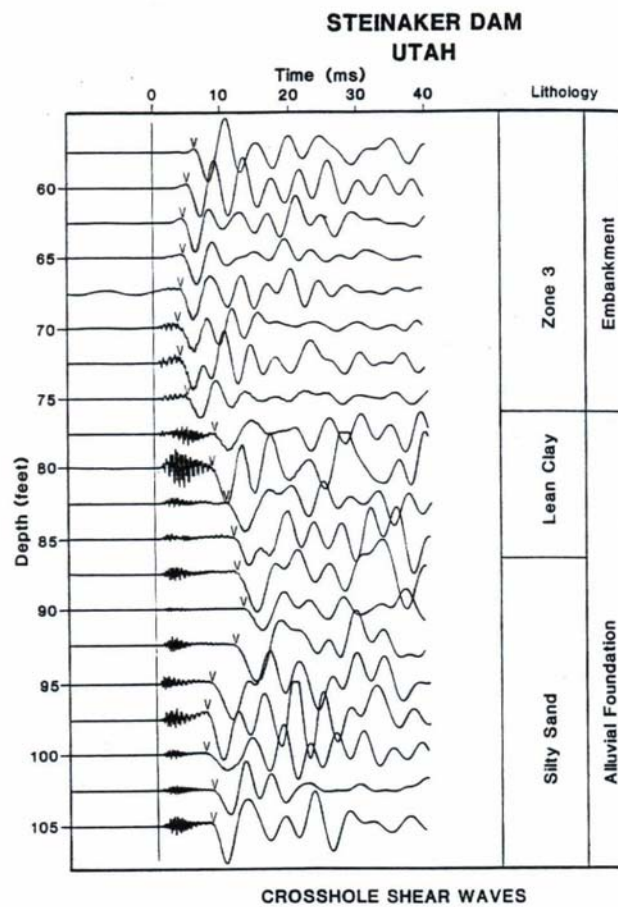


**Figura 25.** Geometría realizada al llevar a cabo un "crosshole".

Una versión de este ensayo denominada “*Shear High Amplitude Wave Propagation Impulse Test*”, SHAWIT (Troncoso, 1965 y Troncoso, 1992), permite determinar la variación del módulo de corte con la deformación.

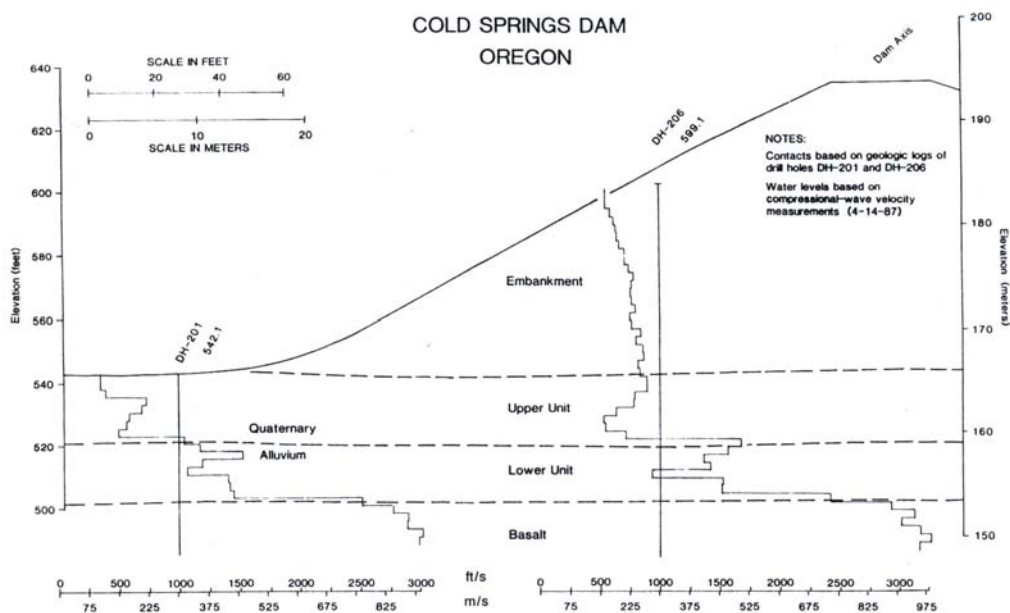
La variación de las ondas de corte en el ensayo “crosshole” en profundidad, se puede correlacionar con registros geológicos de pozos cercanos y ensayos SPT (Sirles, 1988). En la figura 26 se observa la ubicación de las llegadas de las ondas “S” en un estudio realizado en Utah (Estados Unidos), se visualiza la fácil determinación de los tiempos de llegada debido al cambio de amplitud en las ondas.





**Figura 26.** Ondas de corte visualizadas en un “crosshole”, Steinaaker Dam. Utah.  
(Tomado de Sirles y Viksne, 1990).

Al encontrarse varias mediciones de “crosshole” a lo largo de un tendido, se obtiene información de las capas presentes en el subsuelo, a través de la visualización del comportamiento de las ondas de corte. En la figura 27 se observa una sección interpretada a partir de dos mediciones de “crosshole” en Oregon (Estados Unidos).

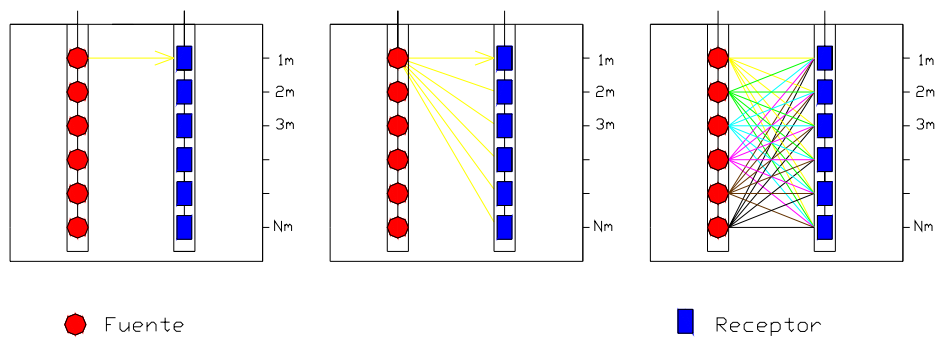


**Figura 27.** Vista de una sección de cruce a partir de dos “crosshole”, Cold Springs Dam, Oregon. (Tomado de Sirles y Viksne, 1990).

### 2.5.3 Tomografía

De la misma manera que el “crosshole” se necesitan de dos a tres pozos alineados. El receptor se baja progresivamente para toda la profundidad y luego se cambia la profundidad de la fuente para realizar una vez más el proceso es decir, se graban registros de diversas combinaciones posibles de profundidades entre fuente y receptores. La fuente se baja hasta lo más profundo para terminar el trabajo (figura 28). El subsuelo se puede discretizar como una matriz y una incógnita puede ser la velocidad de las ondas. Con las ondas se mide la atenuación y el tiempo de llegada. La técnica se debe usar en medios homogéneos donde se busquen zonas anómalas. Este tipo de adquisición se hace frecuentemente en la búsqueda de túneles y en zonas que han sido invadidas por un contaminante, ya que se podría determinar su distribución. Esta técnica tiene aplicaciones en geotecnia y minería; también se puede emplear radar en lugar de ondas sísmicas. La tomografía sísmica permite cartografiar las variaciones laterales en las velocidades sísmicas.

La velocidad de las ondas de corte es un parámetro dinámico del suelo que puede ser obtenido a través de la técnica de imágenes tomográficas, por lo que esta técnica presenta aplicaciones en el campo de la ingeniería civil tales como: determinación de la estratigrafía de perfiles de suelos, determinación de la profundidad de estratos de interés, forma o distribución de algún material en un perfil del suelo, etc. El patrón de radiación de ondas “S” limita la geometría de la prueba, es decir, para receptores localizados sobre o por debajo del nivel de la fuente a un ángulo mayor que  $45^\circ$ , la recepción de ondas “S” más débiles es afectada por la llegada de una fuerte onda “P” producida por la fuente, sumado a la detección de las ondas “S”; por lo que la adquisición de la tomografía se debe realizar hasta que el rayo que une la fuente y el receptor forme un máximo de  $45^\circ$ . En resumen, las imágenes tomográficas de velocidades de las ondas de corte en perfiles de suelos, aportan información complementaria para la caracterización de los mismos (Calderón, 2000).



**Figura 28.** Geometría realizada al llevar a cabo una tomografía de pozo.

## 2.6 Radar de penetración de suelo

El radar de penetración de suelo o GPR por sus siglas en inglés (“ground penetration radar”) es una técnica de investigación geológica somera, la cual ha ganado importancia por sus aplicaciones ambientales y de ingeniería durante los últimos veinte años. Esta técnica es capaz de producir una imagen de alta resolución del subsuelo, similar a la obtenida con la sísmica de reflexión y sus aplicaciones se han demostrado ampliamente a nivel mundial a través de un gran número de estudios.

Al aplicar la técnica de GPR se genera un pulso electromagnético con una frecuencia entre 16 y 2000 MHz, el cual se desplaza a través del subsuelo y al alcanzar interfases en las que exista un contraste en la constante dieléctrica se origina un efecto similar al ocurrido en la sísmica de reflexión al haber un contraste de impedancia acústica, por lo que una parte de la energía es reflejada hacia la superficie y es detectada por el receptor, mientras que otra parte de la energía continúa desplazándose a través del subsuelo hasta llegar a otra interfase.

El GPR es un método que no afecta al medio ambiente, es rápido y de fácil aplicación; permite investigar áreas urbanas utilizando antena blindadas “shielded antennas” (con un rango de penetración entre 5 y 10 metros) y ambientes geológicos usando antenas no blindadas “unshielded antennas” (con un rango de profundidad máximo entre 30 a 60 metros).

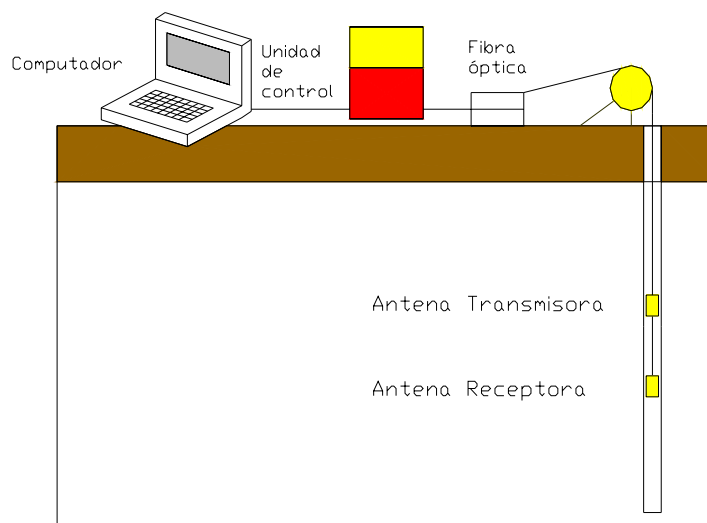
Dentro de las aplicaciones del método se tiene el área de la ingeniería civil, geotecnia, arqueología, aplicaciones geológicas y en estudios del medio ambiente. Algunas aplicaciones específicas se visualizan inmediatamente:

- Detección de utilidades metálicas y no-metálicas (cables, tuberías, etc.)

- Identificación de cavidades y estructuras enterradas (tanques, objetos militares, túneles, etc.)
- Caracterización de sitios industriales y urbanos.
- Inspección y caracterización de construcciones (puentes, muros, etc.)
- Inspección del pavimento de autopistas, pistas de aeropuertos, ferrovías.
- Clasificación del sustrato (estratificación, profundidad del sustrato, etc.) y condiciones de fracturamiento del subsuelo.
- Determinación de espesores en zonas de relleno o aluvional.
- Cartografiado de aguas subterráneas (acuíferos)
- Medio ambiente (cartografiado y delineamiento de terrenos y fluidos contaminados)
- Caracterización de sitios arqueológicos y estudios forenses/seguridad policial.

#### 2.6.1 Radar de pozo

Este método está basado en la medición del tiempo que le toma a un pulso electromagnético de alta frecuencia, viajar desde una antena emisora hasta una antena receptora que se encuentra en la misma sonda, o en una antena receptora colocada a una distancia dada (figura 29). El impulso electromagnético de alta frecuencia se propaga a través de las rocas al ser generado por la antena transmisora, debido al efecto causado por fracturas, cavidades u otros reflectores, la energía se refleja y es captada por la antena receptora, la cual amplifica la señal y se registra el tiempo de llegada del impulso. El tiempo de propagación del impulso electromagnético desde que es generado hasta que es recibido, es empleado para obtener la distancia al objeto reflector. El radar de pozo puede ser utilizado de diferentes modos: reflexión, “crosshole”, superficie-pozo y “directional mode”. Las frecuencias disponibles van desde los 25 MHz hasta los 300 MHz, se debe tomar en cuenta que la decisión sobre cual antena usar depende de la relación entre la resolución y la penetración necesitada y del ambiente a investigar.



**Figura 29.** Ejemplo de geometría empleada en la adquisición del radar de pozo.

La conductividad del suelo y el tipo de roca afectan las ondas de radar, por lo que si la conductividad del subsuelo es mayor a la de un posible receptor, no es posible realizar la exploración, debido a que en medios de alta conductividad no van a aparecer reflexiones.

En las técnicas de “crosshole” y superficie-pozo las mediciones pueden ser realizadas en áreas de “alta” conductividad, porque las reflexiones no son necesarias en estas mediciones. La información geológica de la zona es de suma importancia para evaluar la amplitud de las primeras llegadas, así como también el tiempo de llegada de la onda directa transmitida, no una componente reflejada. Las aplicaciones de radar de pozo incluyen: investigaciones geológicas y de ingeniería, estudios ambientales, investigación en áreas de represa, detección de fracturas y de cavidades, identificación de estructuras subterráneas, investigación de áreas karsticas e investigaciones de capas de sal.

## **2.7 Prueba de Penetración Normal (SPT o “Standard Penetration Test”)**

La prueba de penetración normal o SPT establece la resistencia que tiene el suelo a la penetración de un muestreador circular de acero, el cual a su vez permite realizar una identificación del material presente en el subsuelo a través de la obtención de una muestra perturbada. Cabe destacar que la resistencia a la penetración se puede relacionar con las características del terreno, principalmente en arcillas saturadas y suelos granulares.

Esta técnica consiste en dejar caer un martillo de 63,5 kg (140 libras) de peso sobre una cabeza de hinca, a partir de una altura de 76 cm; la cantidad de golpes necesaria para penetrar 30 cm (1 pie) del total de 45 centímetros penetrados por el toma muestras se denomina resistencia a la penetración  $N_{SPT}$  (la cual es una medida de la compacidad o densidad relativa en suelos granulares y de la consistencia en suelos finos); se debe tomar en cuenta que el descenso se debe a la gravedad y la hinca de apoyo mide 15 centímetros. Uno de los últimos trabajos presentados en el “International Reference Test Procedure” (IRTP, Décourt, 1988), sugiere la forma detallada de realización del ensayo, limita el número de golpes máximo e intenta incluir la influencia de la eficiencia energética del sistema.

El martillo se iza por lo general con ayuda de un mecate de yute ( $\phi$  7/8”) y se dan dos vueltas al tambor del malacate, se aplica un máximo de 30 golpes por minuto, es decir un golpe cada dos segundos.

El extremo superior del sacamuestras se denomina cuchara partida (tiene una longitud de 5 centímetros) y debe tener una válvula sin retorno, con orificios para

expulsar el agua o el aire que pueda entrar al sistema, dicha válvula debe suministrar una barrera para que el agua no altere la muestra mientras es alzado el muestreador.

El ensayo se debe realizar en perforaciones que se encuentren limpias y en suelo no perturbado en el fondo del sondeo; si se emplea agua para la limpieza y avance se debe usar un sistema que permita la descarga lateral del fluido de perforación, restrictivamente 10 cm por encima del extremo del útil cortante (punta del mismo). Se debe impedir la mala práctica de inyectar agua a través del muestreador y tomar la muestra rápidamente en la profundidad deseada.

Las barras más empleadas en Venezuela son del tipo AW, las cuales tienen aproximadamente 20 kg de peso por elemento de 3 metros de longitud; el diámetro de la perforación debe ser el menor posible y estar entre los 63 y 150 milímetros.

Se debe tener especial cuidado en mantener el nivel de agua de perforación por encima del nivel freático al realizar muestreo de arenas y limos, en especial mientras se izan las barras de perforación, lo cual origina un gradiente hidráulico ascendente que ocasiona una disminución en los esfuerzos efectivos, lo que puede inducir la licuación de los materiales en el fondo del sondeo y por consiguiente la pérdida de la muestra.

Otro factor de importancia es considerar la falta de apoyo de la hinca del muestreador al inicio de la prueba, por lo que la cuchara partida debe hincarse hasta penetrar 15 cm en el suelo y se registra el número de golpes requeridos para lograr dicha profundidad. Si los 15 cm no se obtienen en 50 golpes, se interrumpe la hinca, se registra la profundidad de penetración alcanzada y se toma como punto de inicio para el ensayo. Una descripción más detallada de este método está dada en Craig (1987).



El número de golpes realizado puede ser relacionado empíricamente con el modulo de Young's (E) (Beckwith y Hansen, 1981; Seed et al., 1984; Wrench y Nowatzki, 1986) y para densidad relativa (Gibbs y Holtz, 1957; Terzaghi y Peck, 1967).

### 2.7.1) Principales factores de corrección

Al considerar que la energía teórica por caída libre del martillo es:

$$E^* = W_M * h = 63.5kg * 0.76m = 48.26kg * m$$

Entonces las pérdidas de energía necesariamente involucradas en los procedimientos asociados al ensayo, imponen la necesidad de considerar los siguientes factores de eficiencia que afectan el valor  $E^*$ , para así obtener la energía neta  $E_i$  (De Marco, 2002).

$$E_i = e_1 + e_2 + e_3 * E^*$$

En donde:

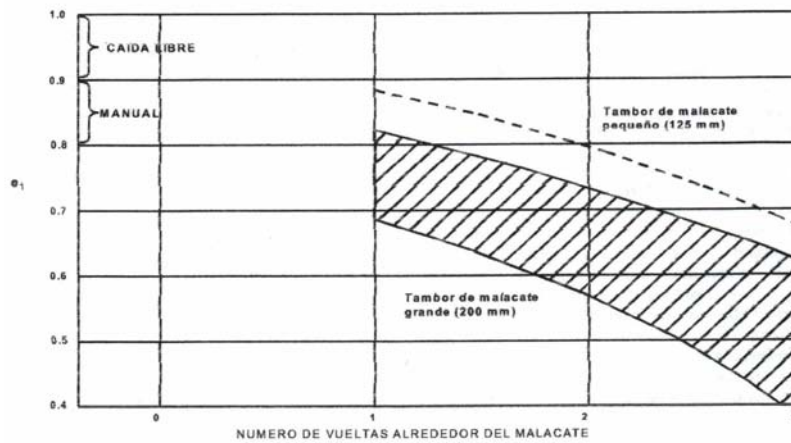
$e_1$ : Eficiencia dada por el método de levantar y soltar el martillo. Es un factor de corrección de energía cinética y es función del número de vueltas del mecate alrededor del tambor del malacate y de su diámetro (Skempton, 1986) (figura 30).

$e_2$ : Eficiencia o pérdida de transmisión de energía del martillo al cabezote (yunque) y que depende básicamente del peso del último. Para esta condición se observa la gráfica correspondiente (Schertmann & Palacios, 1979) (figura 31).

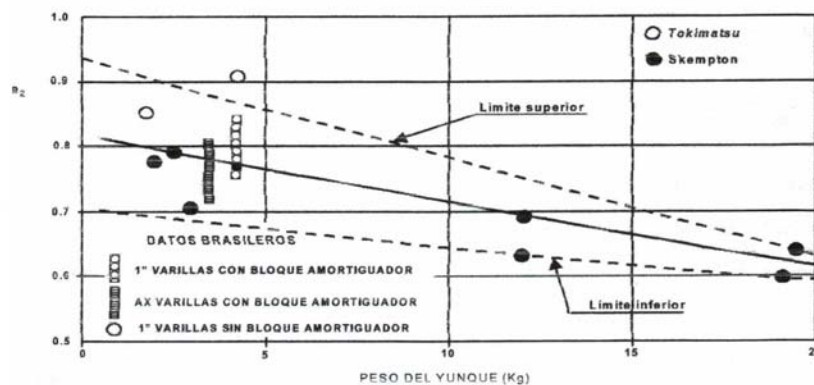
$e_3$ : Eficiencia por longitud crítica del varillaje de perforación. La longitud crítica es aquella para la cual el propio peso de las barras es igual al del martillo (Schertmann & Palacios, 1979). Cuando la longitud del varillaje es menor que la longitud crítica,

debe aplicarse un factor de eficiencia ( $e_3$ ) que depende de la relación ( $m$ ) entre el peso del varillaje y del martillo (De Marco, 2002).

El rango de los factores  $e_1$ ,  $e_2$  y  $e_3$  encontrados en Venezuela se observan en De Marco (2002). Es importante señalar que Décourt et al. (1989) muestra en su tabla de energía de entrega promedio para diversos países, una eficiencia energética para Venezuela del 43%.



**Figura 30.** Factor de eficiencia  $e_1$  en función del mecanismo de liberación del martillo (Tomado de Décourt, 1989).



**Figura 31.** Factor de eficiencia  $e_2$  en función del peso del yunque (cabezote de hinca) (Tomado de Décourt, 1989).

### 2.7.2) Energía incidente de referencia (60%)

A nivel mundial existe la aprobación de que los valores de  $N_{SPT}$  se deben normalizar a una energía estándar, a partir de que Schmertmann y Palacios (1979) probaron que los valores del número de golpes son inversamente proporcionales a la llamada energía de entrega o incidente.

La mayor parte de los ingenieros e investigadores argumentan que para propósitos de comparación, una energía de entrega del 60 % de la energía teórica por caída libre debe ser considerada como referencia ( $N_{60}$ ), y este valor es de la misma manera recomendado en la Norma Venezolana (COVENIN 1756-98, 2001).

En Venezuela el factor (C) por el cual son afectados los valores de  $N_{SPT}$  para referirlos a una energía incidente del 60% viene dado por:

$$N_{60} = N_{SPT} * \frac{42}{60} = 0,7 * N_{SPT}$$

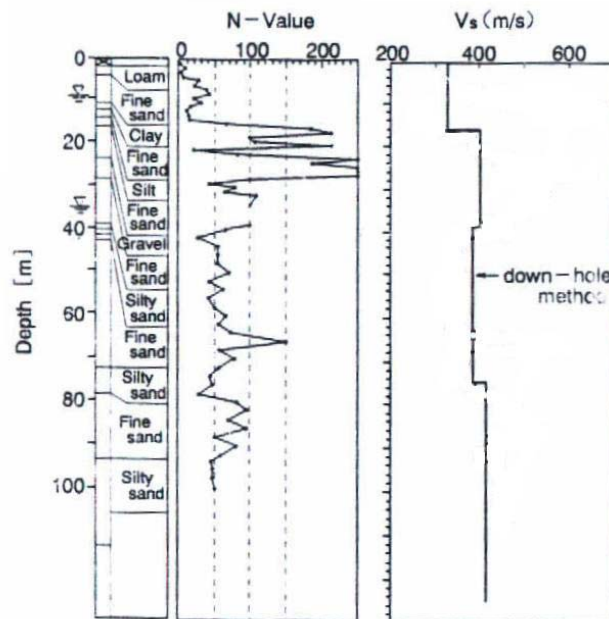
### 2.7.3) Influencia del nivel de esfuerzos

En las arcillas, la resistencia a la penetración es muy poco afectada por la profundidad o por el aumento en la presión de sobrecarga; no obstante en las arenas esta resistencia depende básicamente de la presión de confinamiento. Se han propuesto muchos factores de corrección para tomar en cuenta el efecto de la presión de sobrecarga, en los índices de resistencia a la penetración. Lo más aceptado es normalizar los ya mencionados índices, al valor correspondiente bajo una presión efectiva vertical de 10 t/m<sup>2</sup> (De Marco, 2000).

Se sugiere la utilización del factor  $C_N = (10/\sigma'_{vo})^{0,5}$ , en donde  $\sigma'_{vo}$  es el esfuerzo vertical efectivo a la profundidad del ensayo (para  $\sigma'_{vo} \geq 2,5 \text{ t/m}^2$ ). Por lo que se propone que los valores  $N_{1(60)}$  a tomar en cuenta en la estimación mediante correlaciones del ángulo de fricción ( $\phi$ ), velocidades de transmisión de las ondas de corte ( $V_s$ ), en arenas sean obtenidos a partir de la siguiente expresión:

$$N_{1(60)} = 0,7 * C_N * N_{SPT}$$

En la figura 32 se observa una comparación de la medición de velocidades de ondas “S” (obtenidas a partir del método “downhole”) y el número de golpes realizados en el SPT (Kokusho, 1992).



**Figura 32.** Comparación de mediciones del método “downhole” de velocidad de ondas S y valores de SPT. (Modificado de Kokusho, 1992)

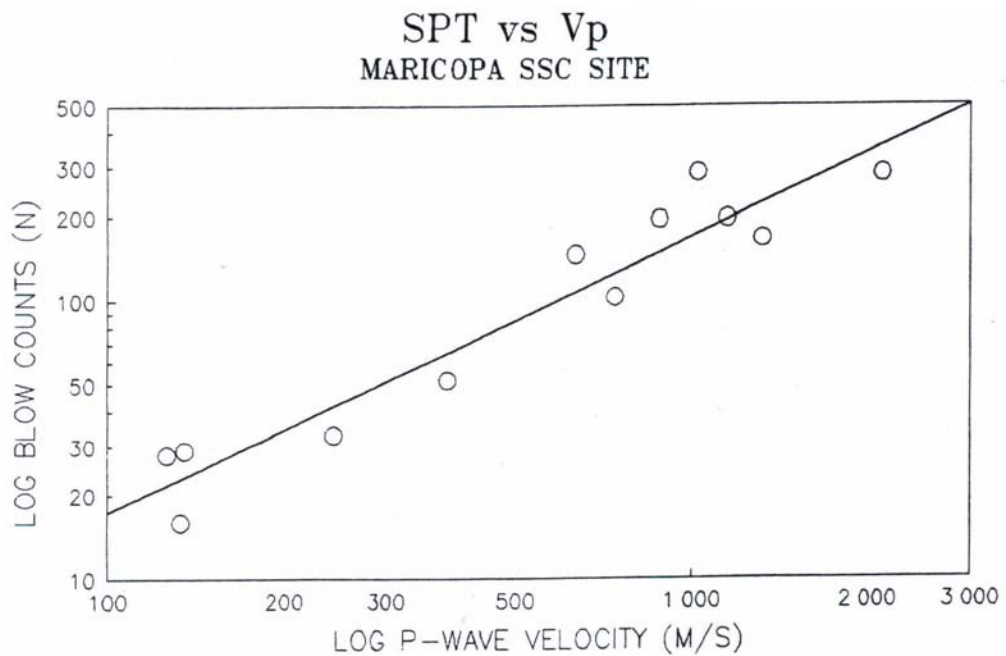
**Tabla 04.** Correlación aproximada entre las velocidades de ondas de corte,  $V_s$  con la compacidad y la resistencia a la penetración SPT. Modificado de Alviar y Penela (1986).

Descripción del material	$N_{1(60)}$	Velocidad promedio de ondas de corte. $V_s$ (m/s)
Roca dura	xxx	$V_s > 700$
Roca blanda	xxx	$V_s > 400$
Suelos muy duros o muy densos (Rígidos)	$N_1(60) > 50$	$V_s > 400$
Suelos duros o densos (Medianamente rígidos)	$20 \leq N_1(60) \leq 50$	$250 \leq V_s \leq 400$
Suelos firmes o medianamente densos (Baja rigidez)	$10 \leq N_1(60) \leq 20$	$170 \leq V_s \leq 250$
Suelos blandos o Suelos (Muy baja rigidez)	$N_1(60) < 10$	$V_s < 170$

Tradicionalmente la velocidad de ondas “S” es el parámetro correlacionado con la prueba SPT. Sykora y Stokoe (1983) dan un resumen de estas correlaciones. Sternberg et al. (1990) obtuvieron una relación en su estudio (Arizona, Estados Unidos), entre la media geométrica del número de golpes de SPT corregidos y la velocidad de ondas P de la siguiente manera:

$$N = 0.1844 * V_p^{0.9875}$$

La alta correlación entre los coeficientes SPT y valores de  $V_p$  encontrados en su estudio indican que las ondas “P” pueden ser utilizadas para predecir la respuesta del SPT, en lugar de emplear las ondas “S”; ya que las ondas “P” son más fáciles de visualizar en las secciones sísmicas. En la figura 33 se visualiza la relación entre el SPT y  $V_p$  encontrada por Sternberg et al, en la misma se puede apreciar un gran número de golpes asociados a bajas velocidades (al compararse con la respuesta arrojada en mediciones similares realizadas en Venezuela).



**Figura 33.** Correlación de los valores SPT versus velocidad de onda “P”.

(Tomado de Sternberg et al, 1990)

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1 Sísmica de pozos**

##### 3.1.1 Adquisición

Para el desarrollo de este proyecto se efectuaron mediciones de sísmica de pozo a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas, desde la estación Capuchinos hasta la estación Plaza Venezuela. Se realizaron mediciones en un total de catorce pozos con la técnica “downhole”, uno con la técnica “crosshole” y una tomografía sísmica de pozos.

##### 3.1.1.1 “Downhole”

Se utilizó un sismógrafo Geometrics Strata View de 48 canales y se colocaron entre uno y dos geófonos de superficie en el tope del pozo, los cuales se emplearon en la adquisición para tener un control de tiempo en los registros, los geófonos de superficie usados fueron geófonos verticales al realizar mediciones de ondas “P” y geófonos horizontales al llevar a cabo mediciones de ondas “S”. Cabe destacar que los geófonos verticales tienen frecuencia natural de 28 hertz y los horizontales poseen frecuencia natural de 30 hertz. Dentro de la perforación se colocó un geófono de pozo de tres componentes, es decir componente vertical, componente longitudinal y componente transversal (figura 34). Se empleó como fuente sísmica el impacto de una mandarria sobre una placa metálica. También se utilizaron una placa metálica y un armazón metálico para generar las ondas “P” y “S” respectivamente.

Para generar la onda “P” la placa metálica se colocó a tres metros de distancia de la cabecera del pozo y en algunos pozos se ubicó 2,2 y 5 metros de distancia debido a la configuración del lugar. Se golpeó con la mandarria. La onda “S” se

generó colocando el armazón metálico a la misma distancia de la cabecera del pozo y realizando golpes en uno o ambos lados del mencionado armazón con la mandarría, con lo que se obtuvieron dos registros polarizados para ondas “S”. Al solapar estos registros se facilita la identificación de las primeras llegadas de las ondas.



**Figura 34.** Instrumentos empleados durante la adquisición. Izquierda: geófono de pozo.  
Derecha: Mandarría y armazón metálico empleado para generar ondas “S”.

Se obtuvieron registros sísmicos (tanto para ondas “P” como para ondas “S”) con intervalos de un metro de profundidad dentro del pozo hasta llegar a la base del mismo. Los pozos estudiados presentaron profundidades máximas entre los 14 y 27 metros.

Se debe tomar en cuenta que el geófono de pozo debe orientarse con respecto al norte geográfico, de manera de tener el mismo sistema de referencia para todos los pozos y también para que las ondas “S” verticales y las ondas “S” transversales se reciban siempre con la misma dirección. Para lograr la orientación del geófono de pozo se emplea un mando que permite fijar el mismo a las paredes del pozo así como también su correcta orientación.

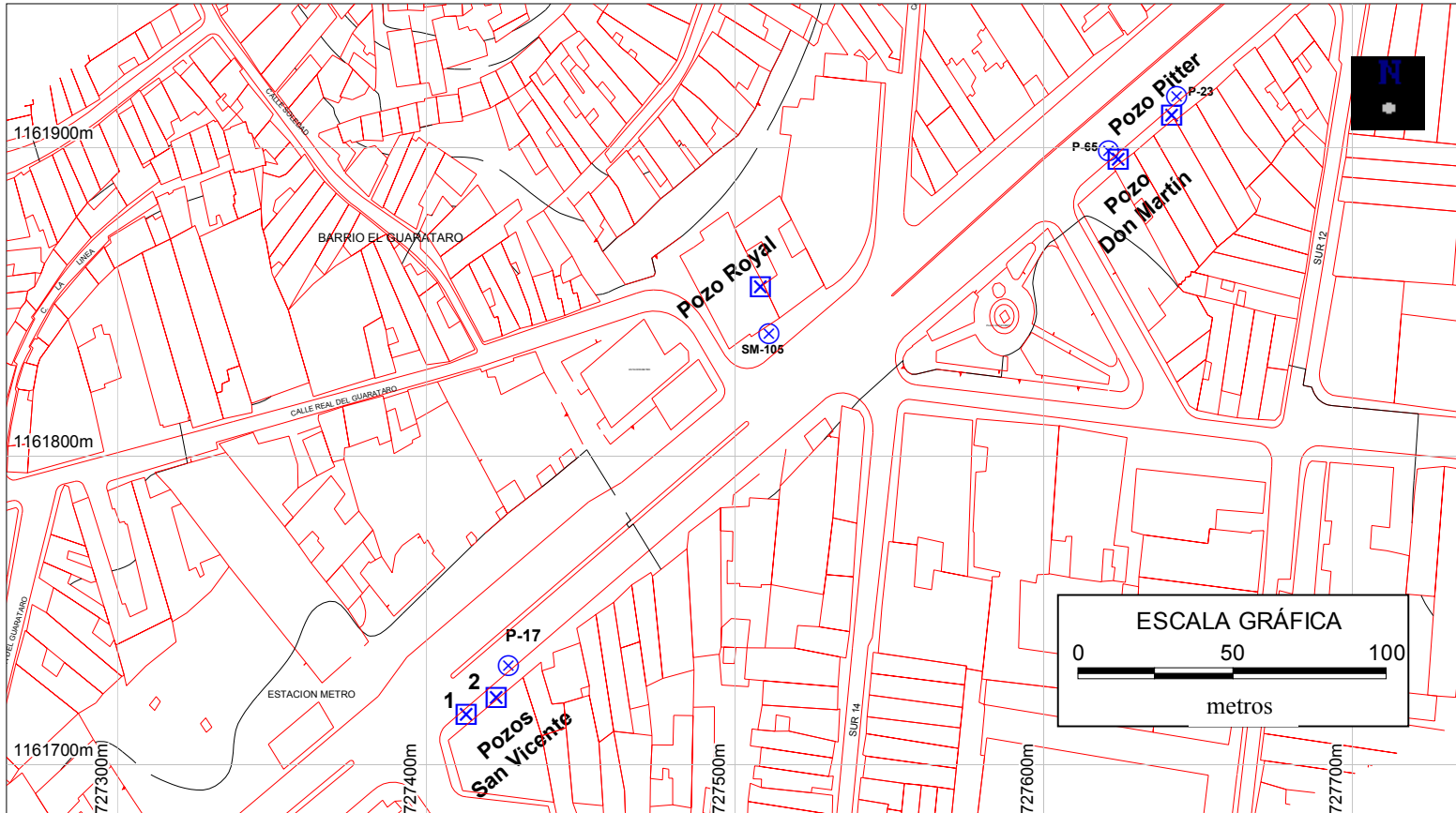


La zona de estudio se dividió de acuerdo a su ubicación geográfica de la siguiente manera:

- Pozos ubicados en la Avenida San Martín (figura 35).
- Pozos ubicados en la Avenida Lecuna (figuras 36, 37 y 38).
- Pozos ubicados en el Distribuidor Mohedano (figura 39).

**Tabla 05.** Información de los pozos “downhole” adquiridos en la avenida San Martín.

<b>Nombre Pozo</b>	San Vicente 1	San Vicente 2	Royal	Don Martín	Pitter
<b>Ubicación</b>	Residencia San Vicente	Residencia San Vicente	Edificio Royal	Residencia Don Martín	Edificio Pitter
<b>Coordenadas UTM. Zona 19, Canoa.</b>	727.209,69; 1.161.350,99	727.209,39; 1.161.356,58	727.305,15; 1.161.489,72	727.421,02; 1.161.530,95	727.438,37; 1.161.545,19
<b>Profundidad</b>	17 metros	19 metros	14 metros	17 metros	14 metros
<b>Tipo de pozo</b>	Con tapa al final	Con tapa al final	Con tapa al final	Con tapa al final	Con tapa al final
<b>Nivel de agua en el pozo</b>	Sin agua	15 metros	4 metros	Sin agua	1 metro
<b>Fecha de adquisición</b>	16/02/2003	16/02/2003	16/02/2003	16/02/2003	16/02/2003
<b>Distancia fuente – pozo</b>	3 metros	3.5 metros	3 metros	4 metros	4 metros
<b>Dirección fuente – pozo</b>	N35°W	N35°W	N35°W	N35°W	N35°W



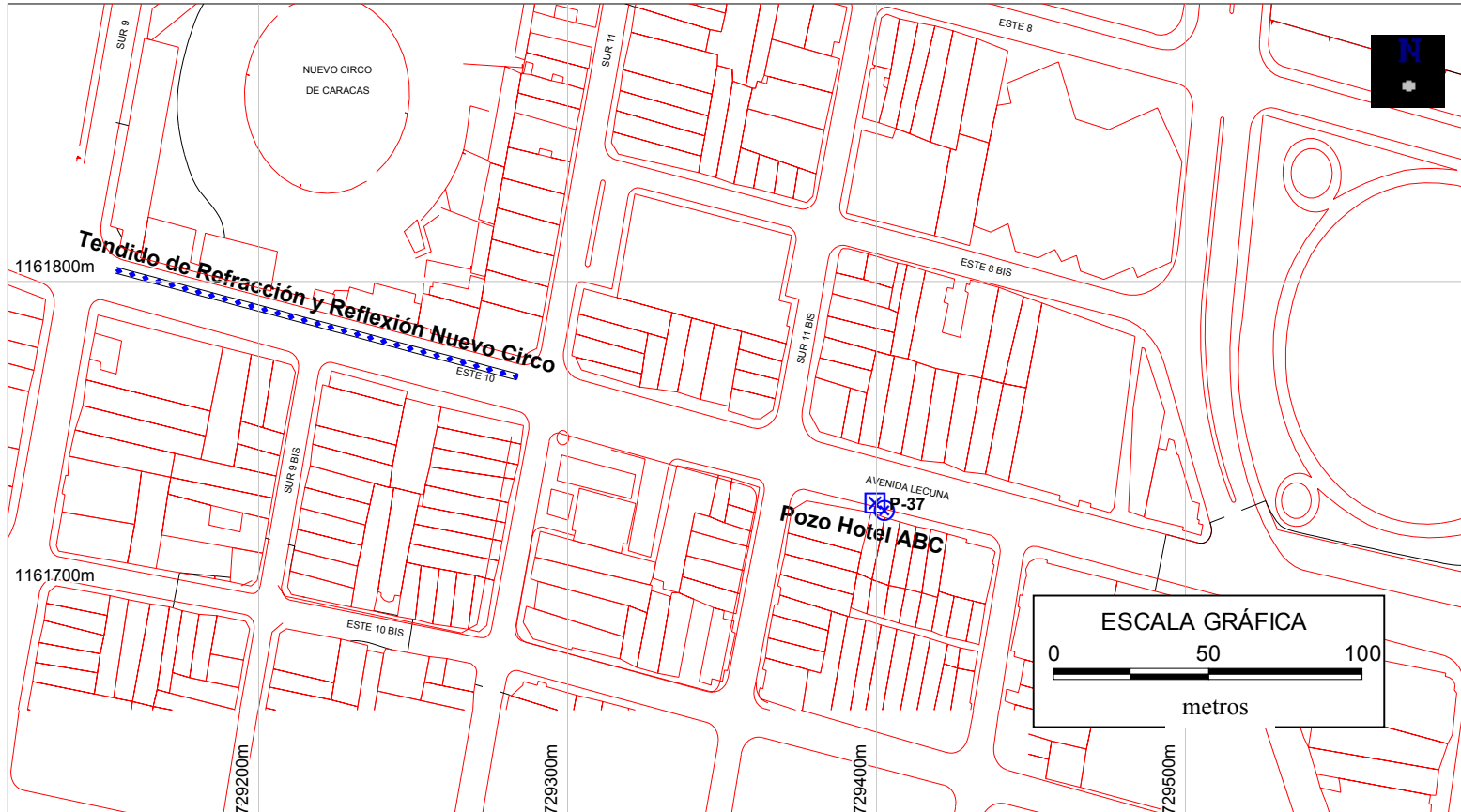
**Figura 35.** Pozos ubicados a lo largo de la Avenida San Martín.

Los cuadrados representan las mediciones “downhole” y radar de pozo; los círculos las mediciones SPT.



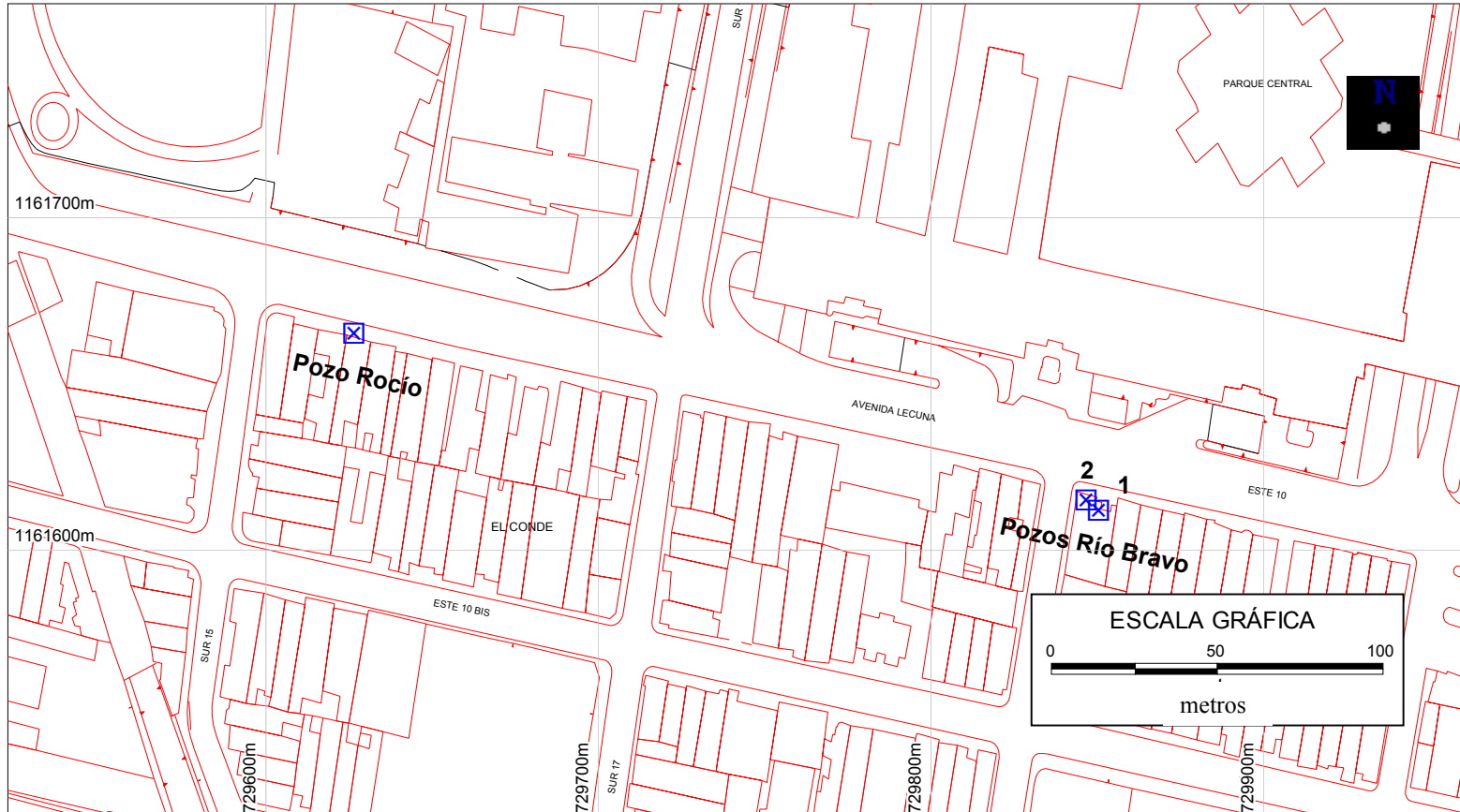
**Figura 36.** Pozos ubicados a lo largo de la Avenida Lecuna.

Los cuadrados representan las mediciones “downhole” y radar de pozo; los círculos las mediciones SPT.



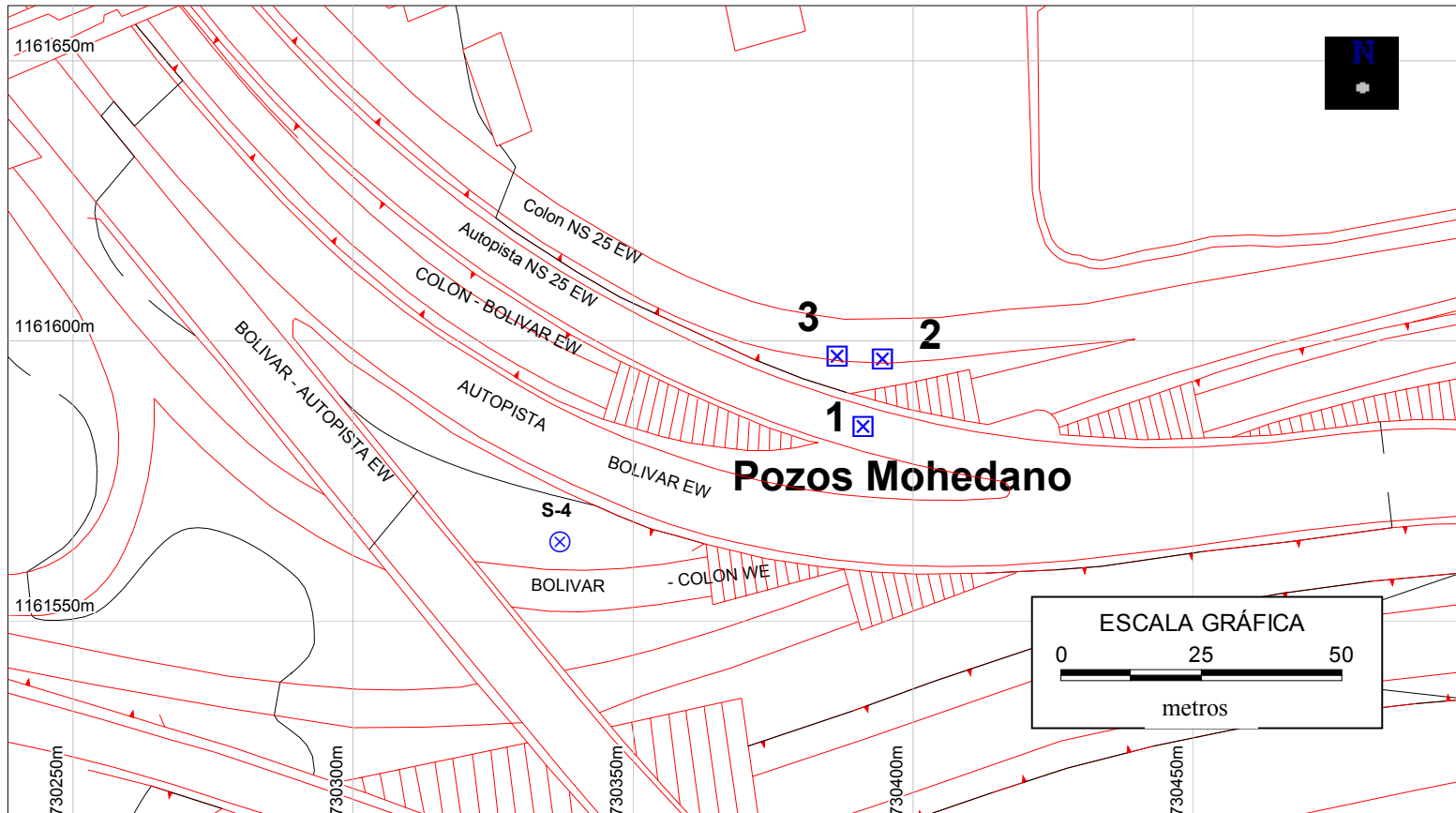
**Figura 37.** Pozos ubicados a lo largo de la Avenida Lecuna.

Los cuadrados representan las mediciones “downhole” y radar de pozo; los círculos las mediciones SPT. También se observa el tendido sísmico de refracción y reflexión realizado en el Nuevo Circo de Caracas.



**Figura 38.** Pozos ubicados a lo largo de la Avenida Lecuna.

Los cuadrados representan las mediciones “downhole” y radar de pozo; en los pozos Río Bravo 1 y 2 se llevó a cabo el “crosshole” y la tomografía. También se observa el tendido sísmico de refracción realizado en las cercanías de Parque Central.



**Figura 39.** Pozos ubicados en el distribuidor Mohedano.

Los cuadrados representan las mediciones “downhole” y radar de pozo; los círculos las mediciones SPT.

<b>Tabla 06.</b> Información de los pozos “downhole” adquiridos en la avenida Lecuna.						
<b>Nombre Pozo</b>	Berna	Velázquez	Hotel ABC	Rocío	Río Bravo 1	Río Bravo 2
<b>Ubicación</b>	Edificio Berna	Edificio Galerías Velásquez	Edificio Hotel ABC	Edificio Rocío	Hotel Río Bravo	Hotel Río Bravo
<b>Coordenadas UTM. Zona 19, Canoa.</b>	728.131,90; 1.161.647,79	728.385,04; 1.161.603,24	729.196,47; 1.161.363,04	729.423,33; 1.161.300,13	729.647,30; 1.161.246,90	729.643,49; 1.161.249,90
<b>Profundidad</b>	15 metros	17 metros	22 metros	18 metros	18 metros	19 metros
<b>Tipo de pozo</b>	xxx	Con tapa al final	Con tapa al final	Con tapa al final	Con tapa al final	Con tapa al final
<b>Nivel de agua en el pozo</b>	Sin agua	7 metros	Sin agua	11 metros	Sin agua	Sin agua
<b>Fecha de adquisición</b>	20/02/03	20/02/03	20/02/03	27/02/03	24/01/03	24/01/03
<b>Distancia fuente – pozo</b>	3 metros	3.2 metros	2.8 metros	2.2 metros	5 metros	5 metros
<b>Dirección fuente – pozo</b>	N35°W	N40°E	N25°W	N-S	N20°E	N30°E

<b>Tabla 07.</b> Información de los pozos “downhole” adquiridos en el distribuidor Mohedano.			
<b>Nombre Pozo</b>	Mohedano 1	Mohedano 2	Mohedano 3
<b>Coordenadas UTM. Zona 19, Canoa.</b>	730.187,97; 1.161.219,69	730.191,43; 1.161.231,69	730.183,36; 1.161.232,15
<b>Profundidad</b>	24 metros	27 metros	18 metros
<b>Tipo de pozo</b>	Con tapa al final	Con tapa al final	Con tapa al final
<b>Nivel de agua en el pozo</b>	3 metros	Sin agua	6 metros
<b>Fecha de adquisición</b>	09/02/03	09/02/03	09/02/03
<b>Distancia fuente – pozo</b>	3 metros	3 metros	3 metros
<b>Dirección fuente – pozo</b>	N30°E	N-S	N-S

### 3.1.1.2 “Crosshole”

Se utilizaron los mismos equipos que para la técnica “downhole”, con la diferencia de que en el “crosshole” la fuente se colocó dentro de un pozo cercano al que contiene al geófono de pozo, por lo que en lugar de utilizar una mandarina se empleó un martillo de pozo (figura 40). Para la obtención de los registros sísmicos se apiló cinco veces la señal para cada sentido de los golpes, es decir cinco golpes hacia arriba y cinco golpes hacia abajo, ya que la polarización de los golpes facilita la identificación de las primeras llegadas de las ondas; se obtuvo un total de dos



registros sísmicos para cada metro de profundidad, es decir los registros en los que se golpeó hacia arriba y los registros en los que se golpeó hacia abajo.

El “crosshole” se realizó en las cercanías de Parque Central, en los pozos denominados Río Bravo 1 y Río Bravo 2 (en esos pozos se llevó a cabo mediciones de “downhole”, las cuales se mencionan anteriormente) (figura 38). Se pudo efectuar un sólo estudio “crosshole” debido a la dificultad de encontrar por lo menos dos pozos lo suficientemente cercanos para aplicar la técnica. En el pozo número uno se colocó el martillo de pozo y en el número dos se ubicó el geófono de pozo.

El martillo de pozo posee en uno de sus lados una especie de tripa, que al inflarse permite que el mismo se sujete de las paredes del pozo, por lo que dentro del equipo completo del martillo de pozo se presenta una bomba de aire que tiene como función llenar la tripa del martillo de manera de que no permita el deslizamiento del mismo dentro del pozo al momento de obtener un registro sísmico (figura 40).



**Figura 40.** Izquierda: martillo de pozo.

Derecha: bomba de aire empleada para la colocación del martillo de pozo.

En la tabla siguiente se tiene información de la adquisición del “crosshole” realizado en los pozos Río Bravo 1 y Río Bravo 2.

<b>Tabla 08.</b> Información acerca de la adquisición del “crosshole” (se abrevian los pozos Río Bravo 1 y Río Bravo 2 respectivamente por RB1 y RB2).			
<b>Coordenadas UTM. Zona 19, Canoa. Fuente (RB1)</b>	729.647,30; 1.161.246,90	<b>Coordenadas UTM. Zona 19, Canoa. Receptor (RB2)</b>	729.643,49; 1.161.249,90
<b>Profundidad (RB1)</b>	18 metros	<b>Profundidad (RB2)</b>	19 metros
<b>Tipo de pozo (RB1)</b>	Con tapa al final	<b>Tipo de pozo (RB2)</b>	Con tapa al final
<b>Nivel de agua en el pozo (RB1)</b>	Sin agua	<b>Nivel de agua en el pozo (RB2)</b>	Sin agua
<b>Fecha de adquisición</b>	24/01/03 – 25/01/03 y 08/02/03	<b>Distancia Fuente Receptor</b>	4 metros -
<b>Dirección Fuente Receptor</b>	N60°W -	<b>Ubicación de los pozos</b>	Av. Lecuna. Edif. Hotel Río Bravo

Se debe tomar en cuenta que debido a que la tomografía sísmica se llevó a cabo al mismo tiempo que el “crosshole” (el “crosshole” forma parte de la tomografía sísmica), las mediciones no pudieron totalizarse en un solo día, por lo que las mismas se concluyeron en un total de 3 días y la profundidad total de las mediciones llegaron a 18 metros (máxima profundidad de uno de los pozos).

### 3.1.1.3 Tomografía sísmica de pozos

Se empleó el mismo equipo que en el “crosshole”. En la figura 38 se aprecia la ubicación de los pozos donde se realizó la tomografía y en la tabla 08 se resume información de interés de los pozos involucrados en las mediciones. Anteriormente se mencionó que la adquisición de la tomografía no se realizó completamente en un día, esto debido en gran parte a la cantidad de tiempo que toma posicionar correctamente el geófono y el martillo de pozo, otra de las causas es el cambio de la tripa que posee el martillo de pozo, ya que constantemente se desgastaba y se hacía necesario reemplazarla por otra. La tomografía se realizó hasta una profundidad de 12 metros.

En la tomografía sísmica a diferencia del “crosshole” se realizan mediciones para diversas posiciones de la fuente y del receptor, creando múltiples trayectorias de los rayos (figura 28).

### 3.1.2 Procesamiento.

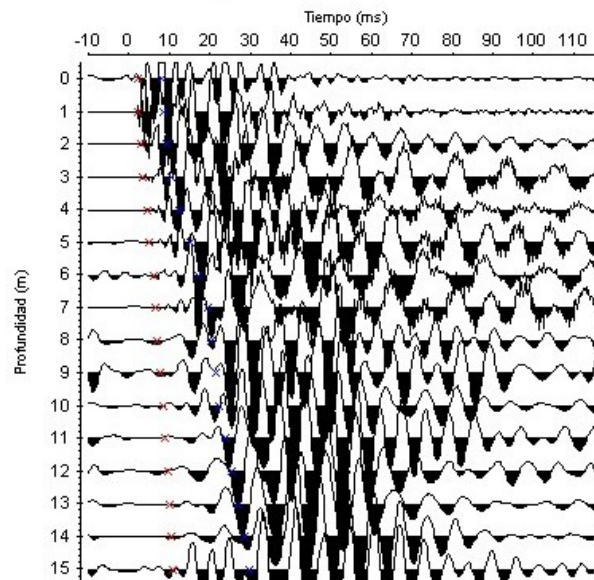
El programa de computadora empleado para el procesamiento de los datos es el REFLEXW versión 3.0, bajo el sistema operativo WINDOWS. Luego de obtenerse todos los datos en campo, se transformaron del formato SEG2 al formato reflexw para que el programa los pudiera emplear.

Para poder realizar el procesamiento de los datos de la sísmica de pozos “downhole” (tanto los generados con la fuente de onda “P”, como para la fuente de onda “S”), se construyeron una a una las secciones sísmicas para cada una de las componentes (vertical, transversal y longitudinal) debido a que el programa no está diseñado para trabajar con registros de sísmica de pozo. La manera de construir las secciones sísmica es la siguiente: se visualizan las trazas en una sola sección, luego se editan las mismas y se seleccionan las trazas correspondientes a cada una de las

secciones, luego se unen y para cada componente en separado se grafican las trazas en su respectiva profundidad.

Se les aplicó una corrección en tiempo a todos los registros (ya que los mismos se comenzaron a grabar diez milisegundos antes del disparo); se aplicó un filtro pasabanda y/o un butterworth a las trazas en las que se observó mucho ruido, luego se corrigieron las amplitudes de todas las trazas de las secciones mediante un filtro denominado subtract-DC-shif.

Se determinaron las primeras llegadas de las ondas “P” y de las “S” en los registros colocando los “picks” en los mismos. Se obtuvieron seis registros en total para cada pozo, es decir tres registros para onda “P” y tres para las ondas “S”, ya que se registraron las componentes vertical, transversal y longitudinal, aunque en determinados pozos se obtuvieron tres registros más debido a la adquisición de ondas “S” con golpes en direcciones opuestas, es decir con registros polarizados, por lo que la cantidad total de registros sísmicos para estos pozos fue de nueve. En la figura 41 se observa un registro sísmico con las llegadas de ondas “P” y “S”.



**Figura 41.** Registro sísmico obtenido a partir de la técnica “downhole” en donde se visualizan las llegadas de ondas “P” (“picks” rojos) y las llegadas de ondas “S” (“picks” azules).

Luego se calculó la velocidad promedio entre la fuente y el receptor considerando una trayectoria recta de los rayos para facilitar los cálculos. La velocidad promedio desde la fuente al geófono viene dada por:

$$v = \frac{l}{t} \quad (3.1)$$

En donde:

v = velocidad promedio.

l = distancia fuente – receptor.

t = tiempo de viaje.

La velocidad interválica, es la velocidad promedio sobre cierto intervalo de la trayectoria de un rayo sísmico, también es llamada Velocidad de Dix (Requena, 2000) y se calcula aproximadamente por la siguiente ecuación:

$$V_{INTERVÁLICA} = \left( \frac{V_B^2 * t_B - V_A^2 * t_A}{t_B - t_A} \right)^{1/2} \quad (3.2)$$

En donde:

V<sub>B</sub> es la velocidad en la capa inferior.

V<sub>A</sub> es la velocidad en la capa superior

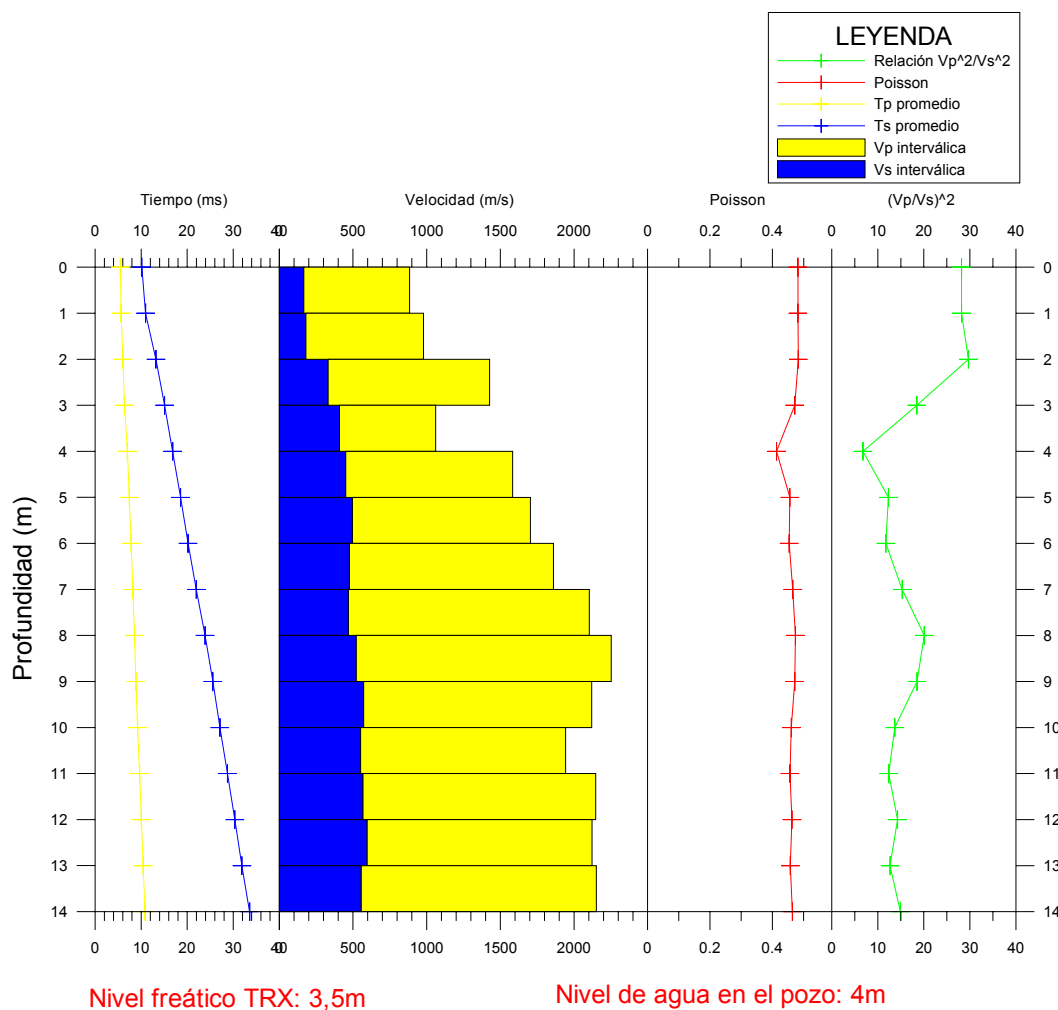
t<sub>B</sub> es el tiempo que tarda la onda en llegar al reflector inferior y devolverse al receptor.

t<sub>A</sub> es el tiempo que tarda la onda en llegar al reflector superior y devolverse al receptor.

Luego de haber calculado la velocidad de onda “P” y “S” se determinó la razón de Poisson ( $\sigma$ ) para cada metro de profundidad, a partir de las velocidades V<sub>p</sub> y V<sub>s</sub>. Las otras constantes elásticas (módulo de corte, módulo de Young y módulo de volumen) no se calcularon debido al desconocimiento de las densidades de los cuerpos rocosos en el área de estudio.

Posteriormente se realizaron gráficos utilizando el programa GRAPHER versión 2.0, en los que se visualiza el tiempo de viaje promedio para las ondas “P” y las “S”, velocidades intervállicas para cada metro de velocidad, para los dos tipos de ondas, se graficó la razón de Poisson y la relación cuadrática  $(Vp/Vs)^2$  (figura 42).

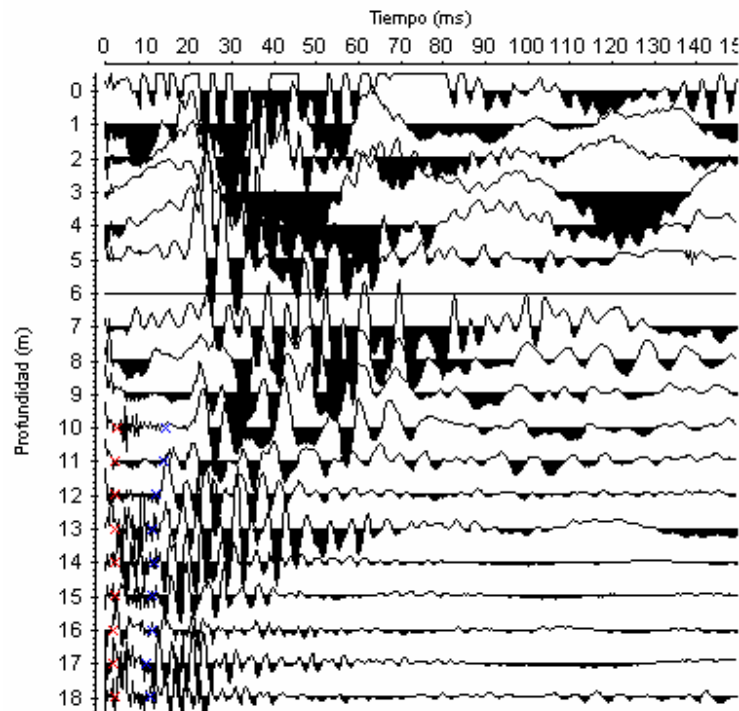
Los cálculos anteriormente mencionados se llevaron a cabo con el programa EXCEL y se realizaron gráficos de las relaciones  $Vs - N_{spt}$  y  $Vs - N_{60}$  para cada uno de los pozos y uno general a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.



**Figura 42.** Ejemplo de gráficos obtenidos a partir de la técnica “downhole” (pozo Royal).

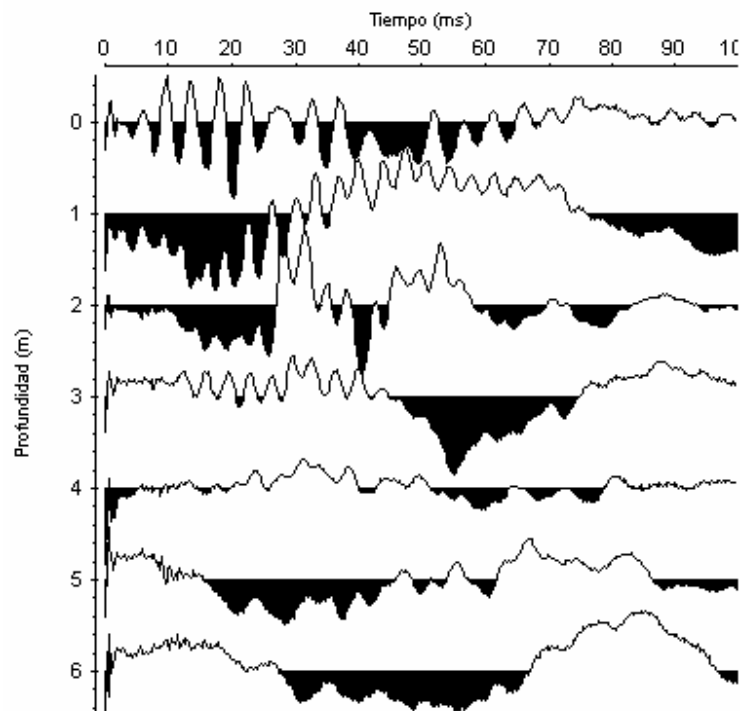
Se realizó un mapa de velocidades de ondas “S”, a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas mediante las velocidades de ondas “S” obtenidas con las mediciones “downhole”, utilizando el programa SURFER 32, bajo el sistema operativo WINDOWS.

En cuanto a lo que respecta al “crosshole”, se importaron los datos al programa REFLEXW y se tuvieron que armar las secciones para cada una de las componentes, se aplicó un filtrado similar de los registros pertenecientes a la técnica “downhole”, se determinaron las primeras llegadas de las ondas “P” y “S” en las trazas en que fue posible (debido a la mala calidad de los datos). También fueron calculados y graficados los mismos parámetros geofísicos obtenidos en la técnica “downhole” por medio del programa EXCEL y GRAPHER 2.0 respectivamente. En la figura 43 se observa un registro sísmico correspondiente a la técnica “crosshole”.



**Figura 43.** Registro sísmico obtenido a partir del “crosshole” en donde se visualizan las llegadas de ondas “P” (“picks” rojos) y las llegadas de ondas “S” (“picks” azules).

En el caso de la tomografía se importaron los datos al programa REFLEXW y se armaron las secciones una por una de la misma manera que el “crosshole”, luego se realizó un filtrado similar al realizado en las dos técnicas anteriores y se visualizaron las primeras llegadas de las ondas “P” y “S” en las trazas en que se hizo posible (debido a la mala calidad de los datos). En la figura 44 se visualiza una sección sísmica típica obtenida a partir de la tomografía.



**Figura 44.** Registro sísmico obtenido a partir de la tomografía (fuente en cero, receptores de 0 a 6 metros de profundidad).

En el apéndice A se visualizan cada uno de los registros obtenidos en la sísmica de pozos, es decir “downhole”, “crosshole” y tomografía.



## 3.2 Sísmica de superficie

### 3.2.1 Adquisición

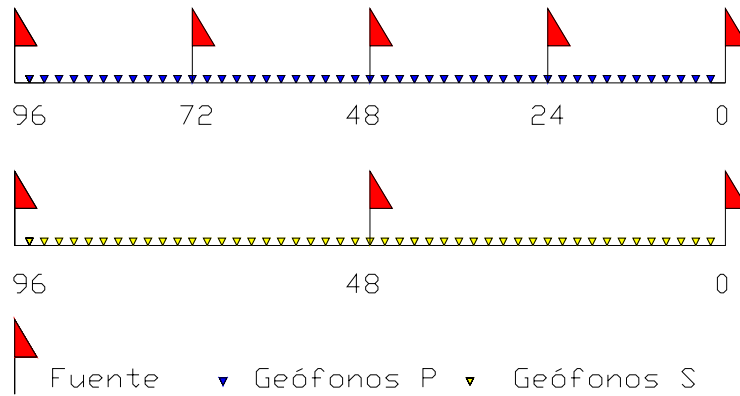
Se realizó la adquisición de dos tendidos sísmicos de refracción, uno de ellos ubicado en las cercanías de Parque Central y el otro en las adyacencias del Nuevo Circo de Caracas. También se llevó a cabo un tendido de reflexión 2D, el cual se ubicó sobre la misma línea empleada en el tendido de refracción del Nuevo Circo.

#### 3.2.1.1 Tendidos de refracción

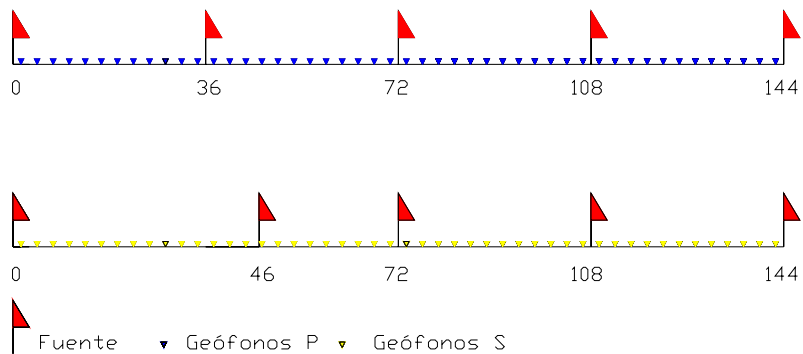
En los registros sísmicos de refracción se empleó un sismógrafo Geometrics Strata View de 48 canales usado también en la sísmica de pozo, geófonos verticales y horizontales, mandarina, placa metálica y un armazón de metal empleado en la generación de las ondas “S”, así como también se utilizó como fuente un “shotgun” para crear las ondas “P”. La distancia entre los receptores fue de 2 metros en el tendido Río Bravo y 3 metros en el tendido Nuevo Circo. En el “shotgun” se emplearon cartuchos de escopeta calibre 12 y pólvora para llenar dichos cartuchos (figura 45), también se usó una palanca para abrir los agujeros en donde se ubicaría el “shotgun”, dichos agujeros tuvieron aproximadamente 50 cm de profundidad; la carga se ubicó en el extremo inferior del “shotgun” y luego de introducirse en el agujero éste se golpeó en la parte superior con una mandarina pequeña de goma para activar el “trigger” y de esa manera comenzar a grabar. Para generar las ondas “S” simplemente se golpeó la plancha metálica ubicada en el armazón con la mandarina en ambos lados para generar registros polarizados de las ondas “S”, en total se apiló cinco golpes por cada lado. En las figuras 46 y 47 se esquematiza la geometría empleada para adquirir los dos tendidos de refracción.



**Figura 45.** Izquierda: Visualización del “shotgun”. Derecha: Colocación de un cartucho en la pieza inferior del “shotgun”.



**Figura 46.** Geometría del tendido de refracción Río Bravo.  
Arriba: Para registrar ondas “P”. Abajo: Para registrar ondas “S”.



**Figura 47.** Geometría del tendido de refracción Nuevo Circo.  
Arriba: Para registrar ondas “P”. Abajo: Para registrar ondas “S”.

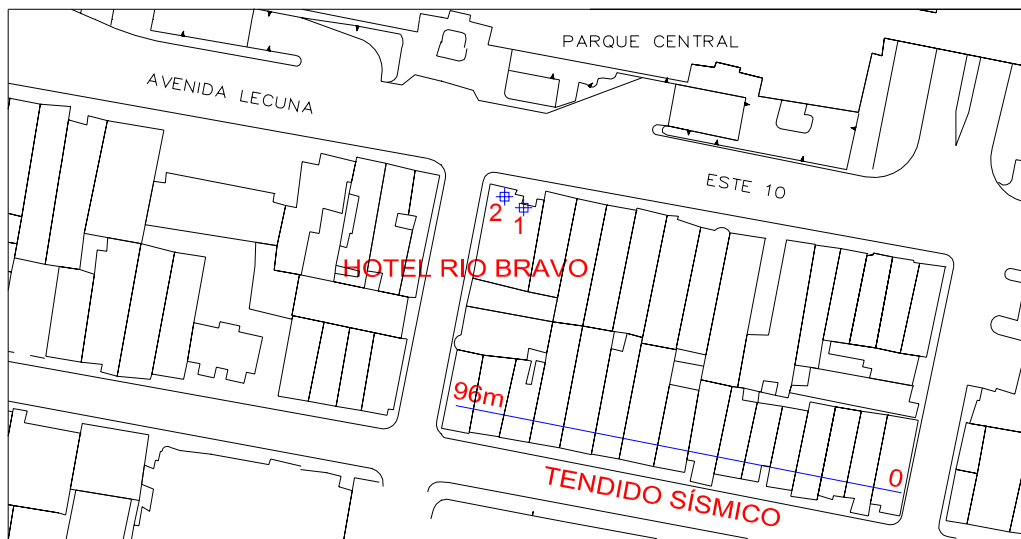
En la tabla 09 se resume la información de interés de los dos tendidos sísmicos de refracción realizados a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.

<b>Tabla 09.</b> Información de interés acerca de los tendidos de refracción.					
<b>Tendido</b>	<b>Rumbo</b>	<b>Apertura entre los geófonos (m)</b>	<b>Distancia de los disparos Onda P (m)</b>	<b>Distancia de los disparos Onda S (m)</b>	<b>Longitud del tendido (m)</b>
Nuevo Circo	N75°W	3	0	0	144
			36	46	
			72	72	
			108	108	
			144	144	
Río Bravo	N75°W	2	0	0	96
			24		
			48	48	
			72		
			96	96	

En las figuras 48 y 49 se observa la ubicación de los tendidos de refracción Nuevo Circo y Río Bravo respectivamente.



**Figura 48.** Ubicación del tendido sísmico de refracción llevado a cabo en el Nuevo Circo de Caracas, la medición se realizó dentro de la futura estación Nuevo Circo aproximadamente a 3 metros de profundidad debajo del nivel de la calle.

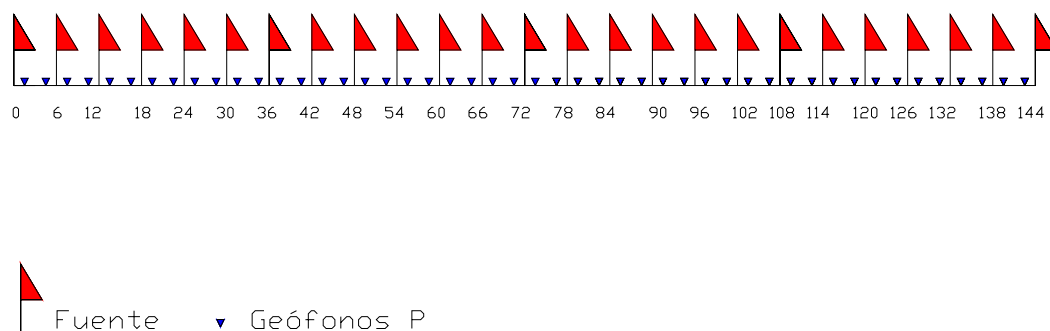


**Figura 49.** Ubicación del tendido sísmico de refracción en la futura estación Parque Central, la medición se realizó dentro de la futura estación Parque Central.

En lo que respecta a la geología de superficie, se observó arcilla limosa color marrón en el tendido de Nuevo Circo y en los extremos del tendido Río Bravo, en el centro de este último tendido se visualizó material de relleno de color rojo.

### 3.2.1.2 Tendido de reflexión

Se utilizó el mismo equipo que en las otras técnicas, es decir el sismógrafo, los geófonos “P” y “S”, el “shotgun”, la palanca para abrir los huecos y los cartuchos de escopetas. El tendido se ubicó en las cercanías del Nuevo Circo de Caracas, empleando el mismo tendido que se usó en la sismica de refracción de esa zona. Para la sismica de reflexión se realizaron disparos cada seis metros, por lo que en total fueron 25 disparos, desde cero hasta 144 metros, con un espaciamiento entre receptores de 3 metros (figura 50). En la figura 48 se observa la ubicación de este tendido.

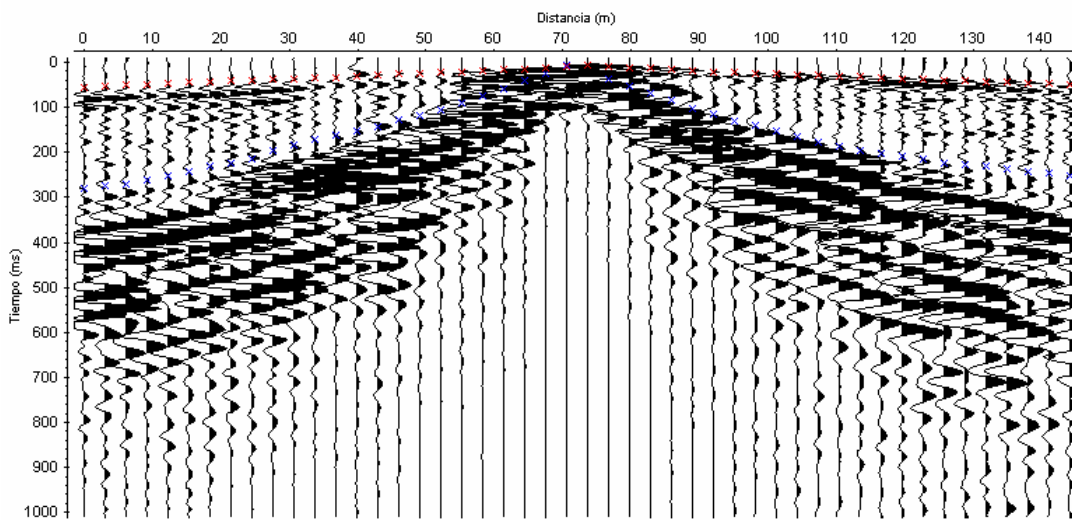


**Figura 50.** Geometría del tendido de reflexión Nuevo Circo.

### 3.2.2 Procesamiento.

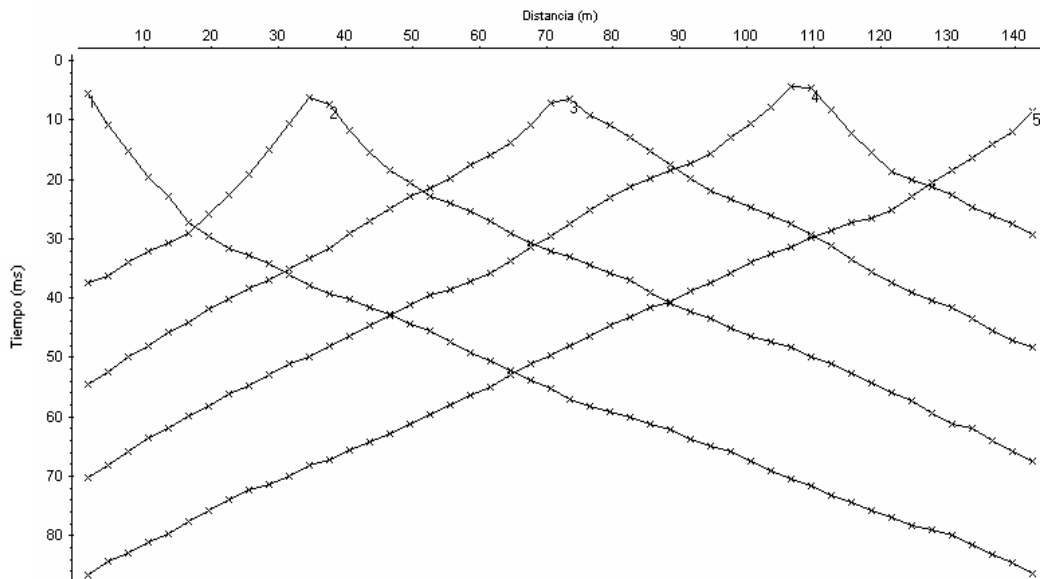
En lo que respecta a los tendidos sísmicos de refracción, se empleó el programa REFLEXW versión 3.1 para procesar los datos. Para eliminar el ruido de las trazas se experimentó con varios filtros, como por ejemplo el filtro DC, filtro fk,

filtro pasabanda, filtro butterworth o filtro notch, de manera de poder visualizar las primeras llegadas de las ondas con mayor facilidad. Se obtuvieron las primeras y segundas llegadas de las ondas (ondas “P” y “S” respectivamente) a partir de la visualización de las trazas, y se colocaron las marcas de los tiempos de primera llegada en cada uno de los disparos que conforman los tendidos (figura 51).



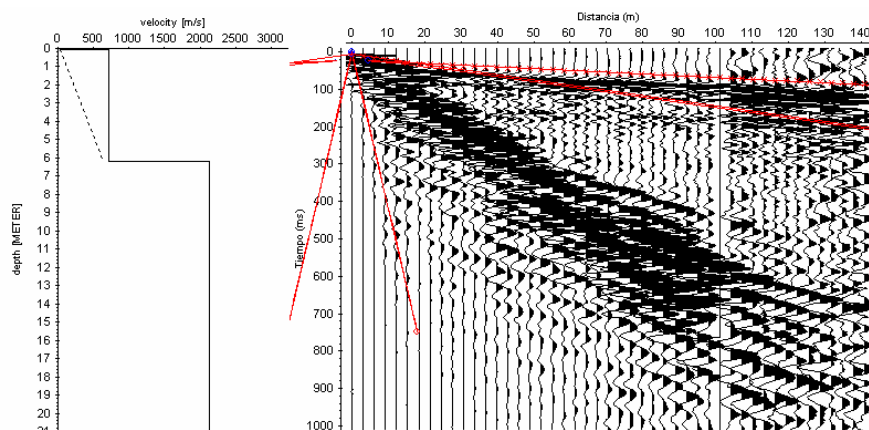
**Figura 51.** Marcas de tiempo asignados a la primera (color rojo) y segunda llegada de las ondas (color azul) en un registro sísmico de refracción (fuente a 72 metros).

Luego de haber ubicado las marcas de tiempo se realizó un control de tiempos de llegadas tomando en cuenta cada uno de los disparos pertenecientes a los tendidos, para ello se visualizan las dromocrónicas en un mismo gráfico y se procedió a verificar y corregir los tiempos. En la figura 52 se observan las dromocrónicas obtenidas en un control de tiempo de las ondas.



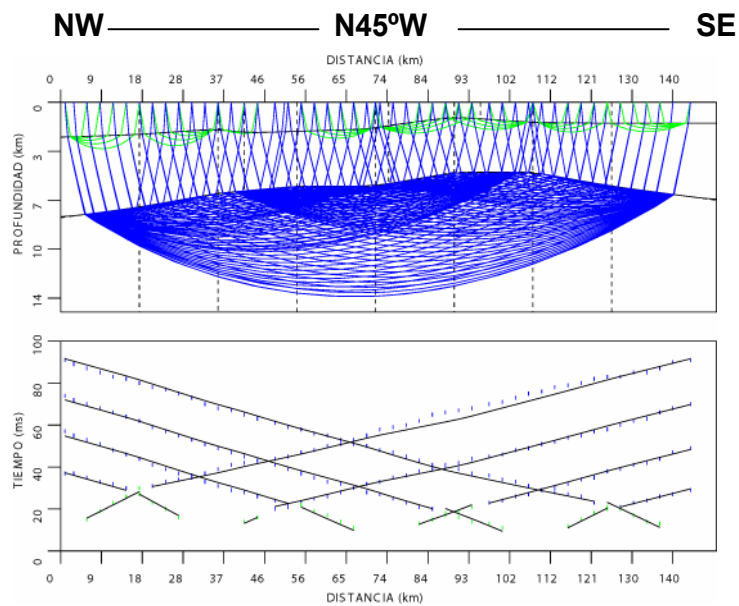
**Figura 52.** Ejemplo de un control de tiempo, en este caso para las marcas de tiempo de ondas “P” del perfil Nuevo Circo.

Posteriormente se realizaron modelos 1D para cada uno de los disparos, de manera de obtener profundidades y velocidades aparente del medio así como también obtener una idea de la disposición de las capas en el subsuelo para luego realizar los modelos 2D del mismo. En la figura 53 se observa un modelo 1D para uno de los disparos.



**Figura 53.** Visualización del modelo 1D de profundidad, en donde se aprecian dos capas en el perfil Nuevo Circo (ondas “P”).

Por último se realizó el modelado 2D del subsuelo, mediante el programa RAYINVR (bajo sistema UNIX), el mismo permite la variación de la profundidad y la velocidad de las capas (figura 54). Para realizar el modelo se toman en cuenta todos los disparos del tendido que se esté procesando y se modifican los valores de velocidad y profundidad hasta ajustarse en cada uno de los disparos.



**Figura 54.** Modelo 2D para ondas “P” para el tendido de refracción Nuevo Circo.

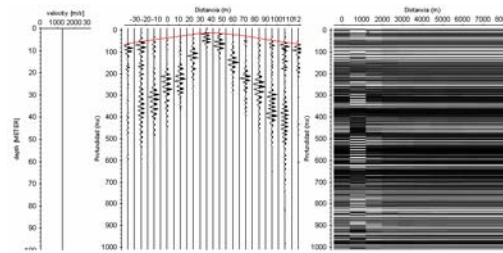
En lo concerniente al tendido de reflexión 2D se empleó el programa REFLEXW versión 3.1., los disparos fueron importados al programa de forma independientemente, de manera que el mismo pudiera trabajar con ellos, se realiza un archivo de texto con extensión .LST en la carpeta ASCII que crea el programa y luego el mismo se abre para colocar todos los disparos juntos.

Se verificó la geometría del perfil en el programa, se eliminaron las trazas que no tenían información o que presentaron gran cantidad de ruido, luego se realizaron varias pruebas con diversos filtros (filtro notch, filtro Butterworth, filtro “subtract mean”) para mejorar las secciones sísmicas.



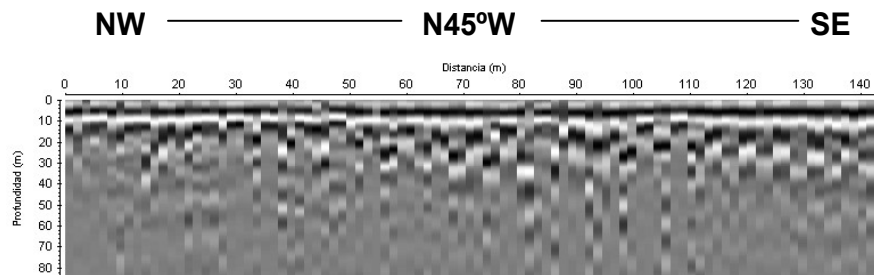
Luego se realizó una supresión en la parte inferior para eliminar el efecto causado por las ondas superficiales y de esta manera poder visualizar con mayor exactitud las ondas reflejadas.

Posteriormente se llevó a cabo el análisis de velocidades por semblanza, hecho por CMP “common mid point” para la realización del modelo (figura 55).



**Figura 55.** Esquema de análisis de velocidad por semblanza, hecho por CMP “common mid point” para la realización del modelo. Velocidad promedio de la primera capa: 1200 m/s.

Luego de realizado el análisis de velocidad se procedió a construir el modelo 2D, apilando y aplicando NMO “Normal Move Out”. Posteriormente se aplicó una corrección de estática para compensar la influencia de la capa de baja velocidad cercana a la superficie y a las diferencias topográficas de elevación entre los receptores y las fuentes. Para obtener información de los reflectores ubicados a una mayor profundidad se aplicó una ganancia automática “AGC Gain”. Por último se realizó la conversión tiempo – profundidad en la sección sísmica para obtener la sección final (figura 56).



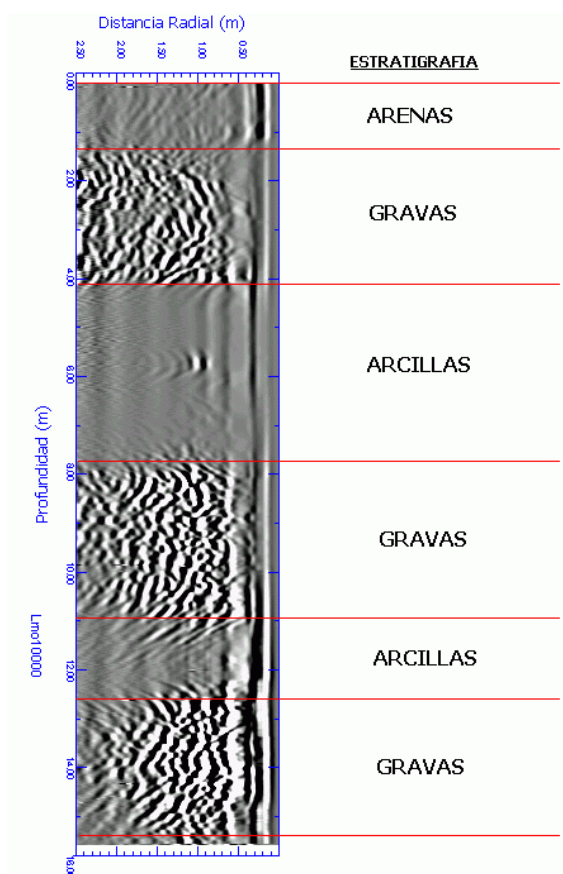
**Figura 56.** Sección sísmica final obtenida al realizar el procesamiento del tendido de reflexión Nuevo Circo.

En el Apéndice B se observan los registros, control de tiempo, modelos 1D y modelos 2D generados con la sísmica de refracción, así como también secciones sísmicas obtenidas en las etapas del procesamiento de la sísmica de reflexión 2D.

### 3.3 Radar de pozo o “Borehole radar” GPR

La compañía TRX Consulting (compañía de servicios y de consultaría en ciencias de la tierra) proporcionó los datos de radar de pozo, los cuales se realizaron para determinar la ubicación y geometría de los pilotes de los edificios ubicados a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.

La mencionada compañía suministró las secciones de radar obtenidas para cada uno de los pozos y las interpretaciones estratigráficas de los mismos. Sólo el Pozo Berna fue facilitado sin la correspondiente interpretación estratigráfica. En la figura 57 se observa la respuesta arrojada por el GPR y la correspondiente interpretación estratigráfica.



**Figura 57.** Ejemplo de sección típica arrojada por el radar de pozo y su interpretación estratigráfica (realizada por la compañía TRX Consulting).

### 3.4 “Standard Penetration Test” o SPT

Los datos geotécnicos fueron suministrados por la compañía CENTENO – RODRÍGUEZ & ASOCIADOS, los mismos fueron el número de golpes realizados para avanzar un metro de profundidad y la interpretación estratigráfica del subsuelo (la misma fue realizada a partir de núcleos de roca). Esta información se usó para realizar la correlación de los datos obtenidos mediante la geofísica y la geotecnia (en este caso a partir del SPT); cabe destacar que los datos geotécnicos no pertenecen a los pozos investigados con métodos geofísicos, sino que se tomaron de pozos que estuvieron a una distancia prudente para llevar a cabo la correlación. Se correlacionaron siete pozos en total, en la tabla 10 se observa la información de interés de los pozos geotécnicos.

<b>Tabla 10.</b> Listado de los pozos en los que se realizaron mediciones de “downhole” y de radar de pozo y los pozos geotécnicos que se correlacionaron.		
<b>Pozos con mediciones geofísicas y sus coordenadas UTM</b>	<b>Pozos con mediciones de SPT y sus coordenadas UTM</b>	<b>Distancia aproximada entre los pozos</b>
Pozo San Vicente 1 (727.209,69; 1.161.350,99)	P-17 (727.223,36; 1.161.366,71)	20 metros
Pozo San Vicente 2 (727.209,39; 1.161.356,58)	P-17 (727.223,36; 1.161.366,71)	10 metros
Pozo Royal (727.305,15; 1.161.489,72)	SM-105 (727.307,79; 1.161.474,49)	15 metros
Pozo Don Martín (727.421,02; 1.161.530,95)	P-65 (727.417,90; 1.161.533,81)	4 metros
Pozo Pitter (727.438,37; 1.161.545,19)	P-23 (727.439,97; 1.161.551,42)	5 metros
Pozo Berna (728.131,90; 1.161.647,79)	SM-119 (728.119,94; 1.161.659,62)	15 metros
Pozo Hotel ABC (729.196,47; 1.161.363,04)	P-37 (729.199,49; 1.161.360,38)	4 metros

La ubicación de los pozos con mediciones geofísicas y geotécnicas se observan en las figuras 35, 36, 37 y 39.

El número de golpes  $N_{SPT}$  realizado en los pozos geotécnicos, se puede relacionar con la velocidad de las ondas de corte  $V_s$ , por lo que se generaron gráficos tomando en cuenta estos dos parámetros. La velocidad de las ondas de corte empleada fue la interválica obtenida de los “downholes”. Esto se llevó a cabo para tener una idea del comportamiento de la velocidad de corte en función del número de golpes realizados por el SPT en la región de Caracas. En la figura 58 se visualiza la relación entre estos parámetros en Japón obtenidos por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA).

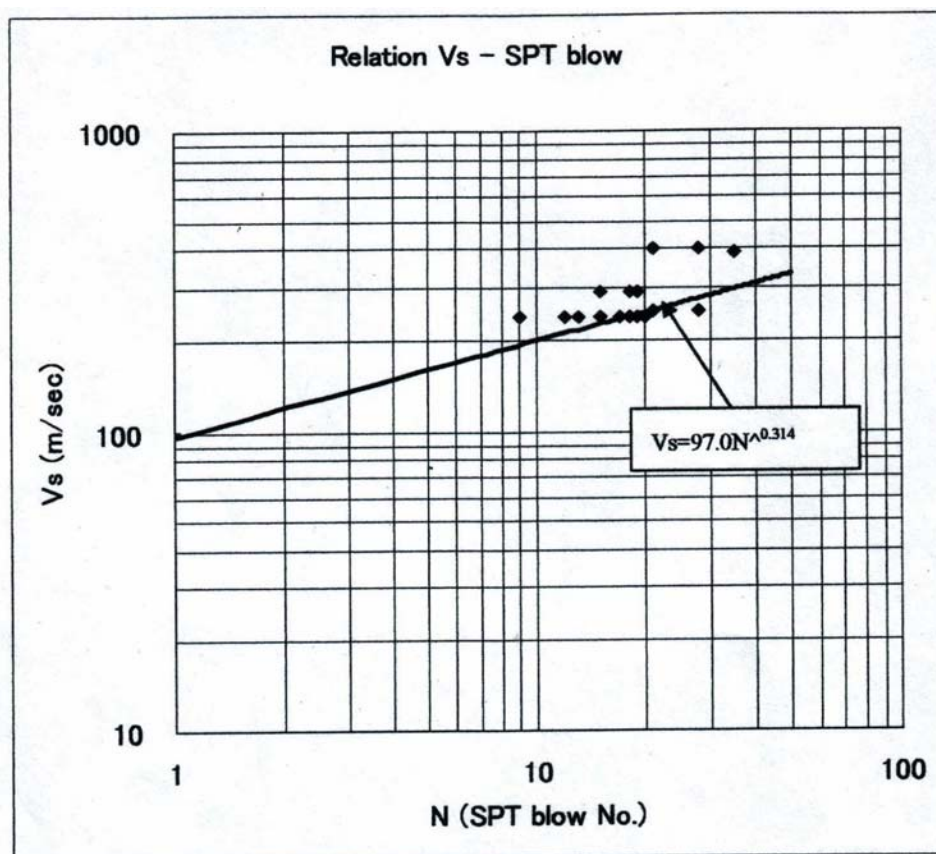
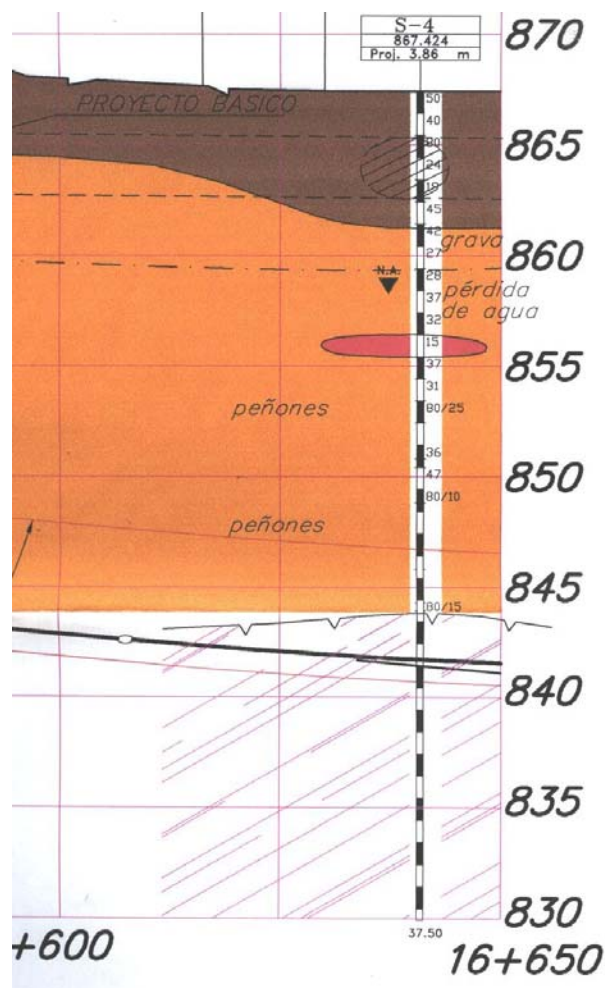


Figura 58. Relación  $V_s - N_{SPT}$  obtenido en Japón por JICA (2003).

Este tipo de gráfico se realizó para cada uno de los pozos con mediciones sísmicas que pudieron ser correlacionados con pozos geotécnicos, se tomaron en cuenta las mediciones de velocidades de corte para cada metro de profundidad y el

número de golpes  $N_{SPT}$  para penetrar esa misma distancia. Luego de determinar la cantidad de capas en el subsuelo en los pozos con mediciones “downhole” se realizaron otros gráficos similares, en los que se obtuvo la relación del promedio de las velocidades de ondas de corte y el promedio del número de golpes  $N_{SPT}$  para cada una de las capas obtenidas. En la figura 59 se observa un ejemplo de uno de los pozos geotécnicos facilitados.



**Figura 59.** Ejemplo de los datos geotécnicos suministrados para la correlación (Pozo S-4 ubicado en el distribuidor Mohedano).

Posteriormente se realizó la corrección de los datos geotécnicos a  $N_{60}$  para obtener gráficos de la relación  $N_{60} - V_s$  para cada pozo y una relación general a lo

largo de la línea 4 del Metro de Caracas. La relación  $N_{SPT} - V_s$  se facilitó a la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) para incorporarla al estudio que están realizando en la ciudad de Caracas. La corrección por  $N_{1(60)}$  no se efectuó debido a la falta de información referente al esfuerzo vertical efectivo a la profundidad de ensayo ( $\sigma'_{vo}$ ).

Se debe tomar en cuenta que las relaciones obtenidas se pueden aplicar a estudios en donde se ha llevado a cabo correctamente la técnica de SPT, ya que en la práctica depende de la empresa, por lo tanto en la interpretación. Se mencionó anteriormente que existen ciertos factores de corrección para el “Standard Penetration Test”, tales como las vueltas del mecate alrededor del tambor, peso del yunque, etc., por lo que se debe tomar en cuenta cumplir con las normas establecidas para este tipo de ensayo; otros factores que alteran la respuesta del SPT son: uso de una cuchara partida bien afilada, mecate en buen estado, altura a la que se deja caer el yunque, peso del mismo, peso de las barras a utilizar etc. La eficiencia energética empleada en Venezuela al realizar un ensayo de SPT es de 43% (Décourt, 1989); sin embargo al no trabajar bajo las normativas este valor de energía va a variar.

La compañía CENTENO – RODRIGUEZ & ASOCIADOS aseguró que las pruebas empleadas en éste estudio cumplieron con todas las normas establecidas, por lo que las relaciones obtenidas pueden utilizarse para cualquier estudio de SPT realizado correctamente.

A las relaciones  $N_{SPT}$  obtenidas se les realizó un análisis estadístico (por medio del programa SYSTAT 10, bajo sistema WINDOWS) para comprobar que tan aceptable fueron; ya que las mencionadas relaciones deben cumplir con tres condiciones:

1) Tienen que ser válidas; es decir que los ensayos deben estar hechos bajo el mismo patrón (condición indispensable). Las mediciones SPT fueron realizadas bajo las

normas establecidas y las mediciones de ondas “S” fueron obtenidas bajo la misma metodología, por lo que se cumple con esta condición.

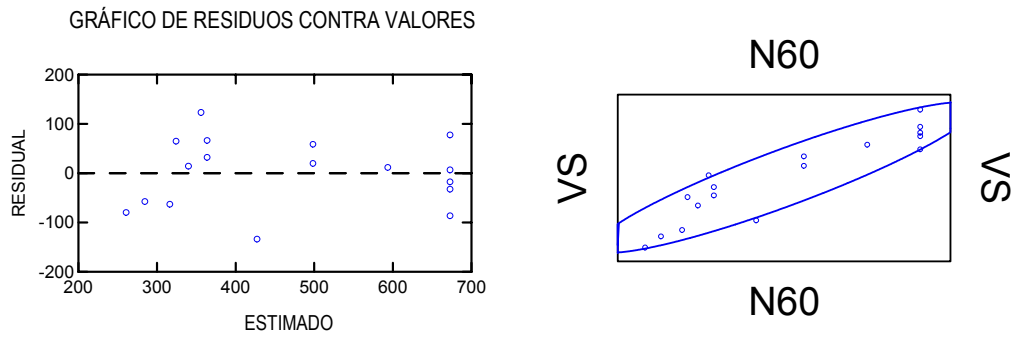
2) Tienen que ser confiables, por lo que se tiene que establecer que confianza es aceptable, puede estar relacionada con el número de ensayos efectuados (perfectible). De los catorce pozos con mediciones “downhole” sólo se pudieron correlacionar siete con mediciones SPT.

3) Generalidad. Las relaciones deben ser aplicables preferiblemente a nivel mundial (esta condición no es estricta, pero es deseable). Las relaciones obtenidas se pretenden aplicar a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.

A partir de las últimas dos condiciones mostradas previamente, se concluye que se debe realizar un estudio estadístico para determinar si la cantidad de datos relacionados son suficientes para lograr una relación  $N_{60} - V_s$  satisfactoria. Debido a esto se realizó el análisis, a partir del mismo se obtuvo un coeficiente de correlación para cada pozo y se comparó la probabilidad de obtener mediciones poco confiables con una probabilidad de 0,05 %, de esta manera se determinó si la relación fue satisfactoria. Adicionalmente se obtuvo la gráfica de residuos y la elipse de confianza para los pozos (figura 60). De la misma manera se analizó estadísticamente la relación  $N_{60} - V_s$  a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.

Para confirmar la precisión de las relaciones  $N_{60} - V_s$ , la compañía CENTENO – RODRIGUEZ & ASOCIADOS realizó una comparación estadística relacionando los pozos entre sí, de esta manera obtuvo información acerca de las varianzas y pendientes de las rectas de ajuste; en el caso de existir una buena correlación de los pozos, se procedió a obtener la ecuación de la recta de mejor ajuste común a ambos pozos.





**Figura 60.** Izquierda: Gráfico de valores residuales obtenidos en el pozo Don Martín.  
 Derecha: Elipse de confianza obtenida en el pozo Don Martín.

En el apéndice C se observan todas las comparaciones y resultados del análisis estadístico, entre los pozos de la línea 4 del Metro, realizados por la compañía CENTENO – RODRÍGUEZ & ASOCIADOS.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS Y ANÁLISIS

#### 4.1 “Downhole”

Se detallan todos los resultados para cada medición “downhole”, se muestran los mejores registros sísmicos en los que se observan las primeras llegadas de ondas “P” y “S”, se calcularon ciertos parámetros y fueron graficados (tiempo promedio para onda “P” y “S”, velocidades interválicas de ondas “P” y “S”, coeficiente de poisson y la relación  $\frac{V_p^2}{V_s^2}$ , la leyenda común para cada pozo es

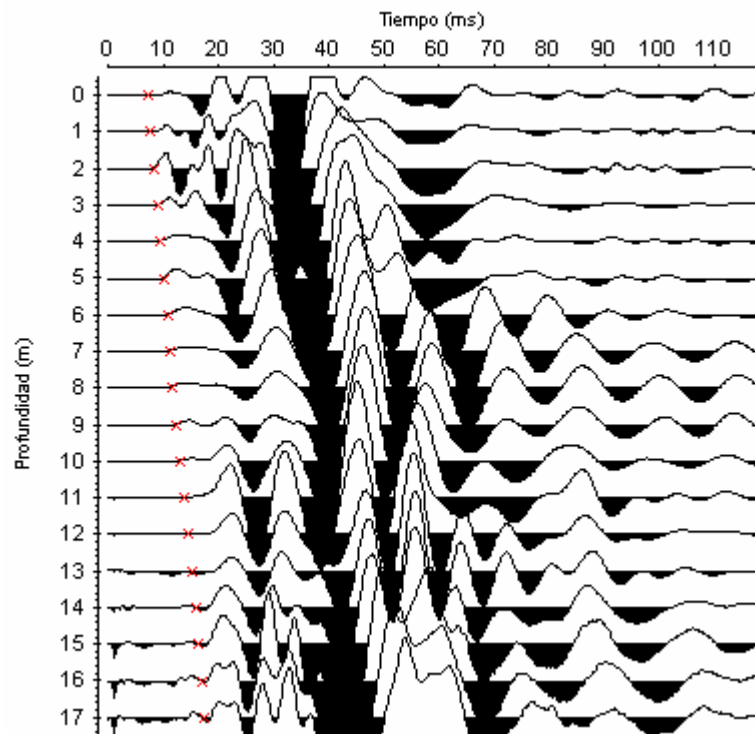
la siguiente:

<b>LEYENDA</b>	
—+—	Tp promedio
—+—	Ts promedio
■	Vp interválica
■	Vs interválica
—+—	Poisson
—+—	Relación $(V_p/V_s)^2$

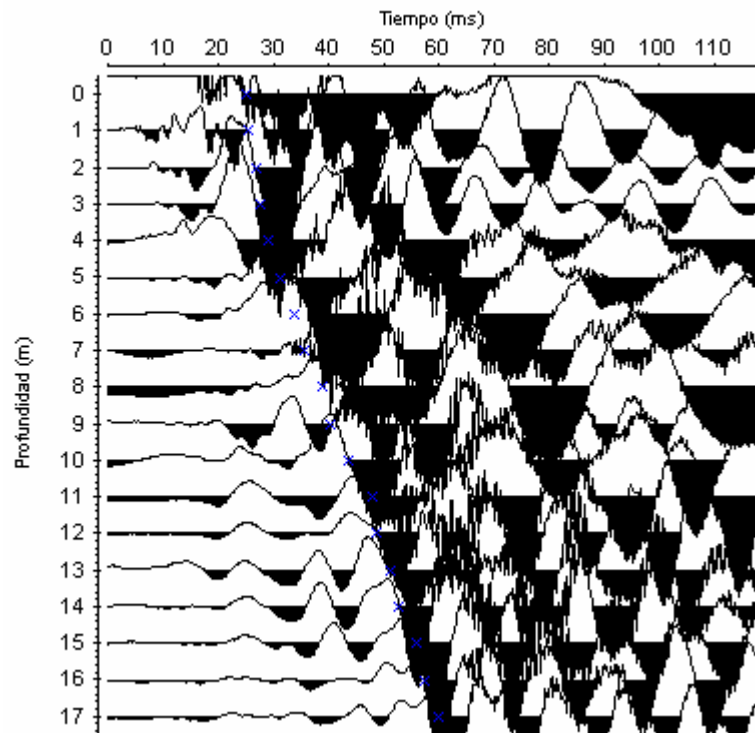
Para realizar la interpretación de cada uno de los pozos, se tomó en cuenta la magnitud de las velocidades interválicas tanto para ondas “S” como para ondas “P” (partiendo de las “S”, ya que las mismas a diferencia de las ondas “P” no se encuentran influenciadas por el fluido que pueda contener la roca) y como ayuda adicional se observó el coeficiente de poisson en cada pozo.

En las figuras 61 – 103 se observan registros sísmicos con los tiempos de llegada de ondas “P” y “S” y los parámetros geofísicos obtenidos en cada uno de los pozos adquiridos con las técnicas “downhole” y “crosshole”. En la figura 104 se observa un registro sísmico obtenido en la tomografía. En las tablas 11, 12 y 13 se observan las velocidades de ondas “P” y “S” obtenidas a lo largo de la avenida San Martín, avenida Lecuna y distribuidor Mohedano respectivamente y en la tabla 14 se observan las velocidades de ondas “P” y “S” obtenidas con el “crosshole”.

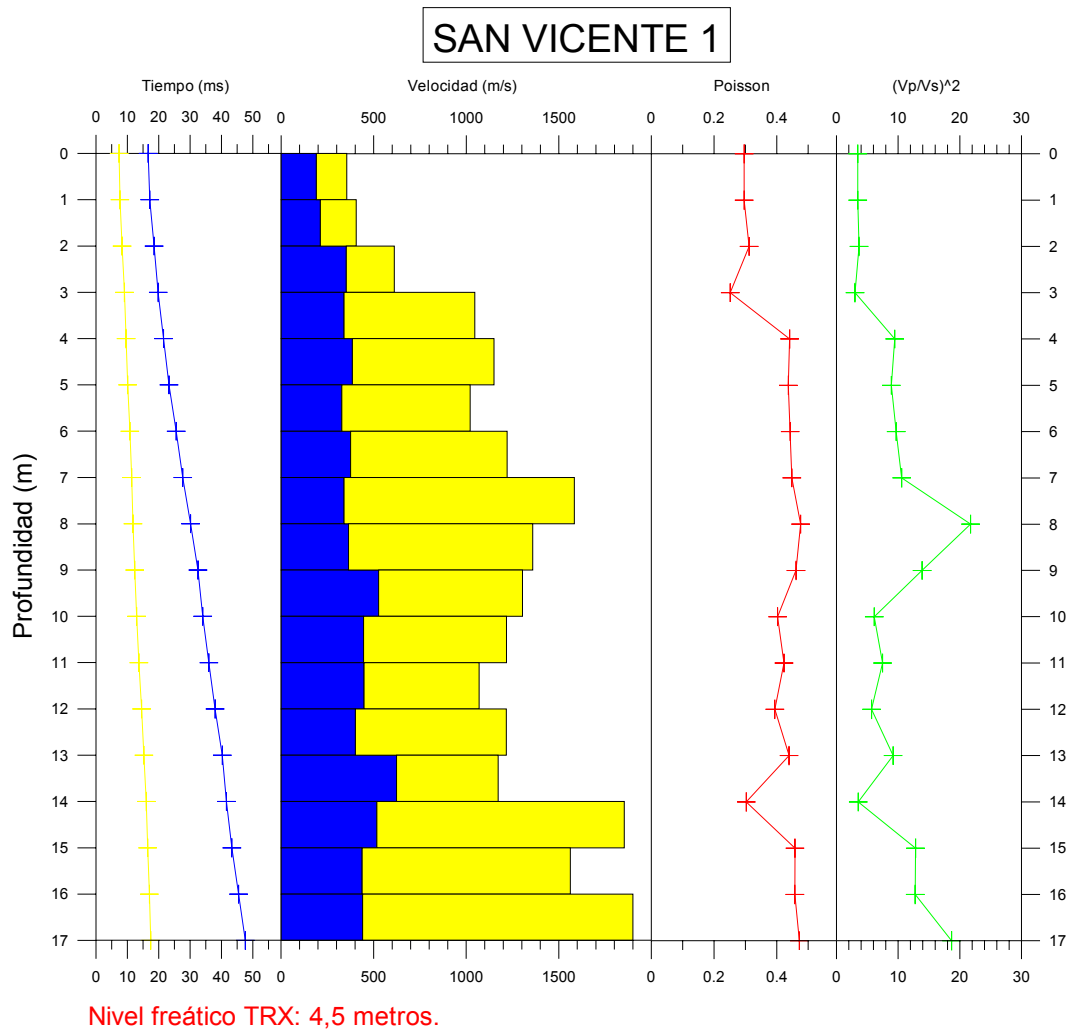
## Pozo San Vicente 1



**Figura 61.** Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo San Vicente 1 (registro de componente vertical).



**Figura 62.** Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo San Vicente 1 (registro de componente longitudinal).



**Figura 63.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo San Vicente 1.

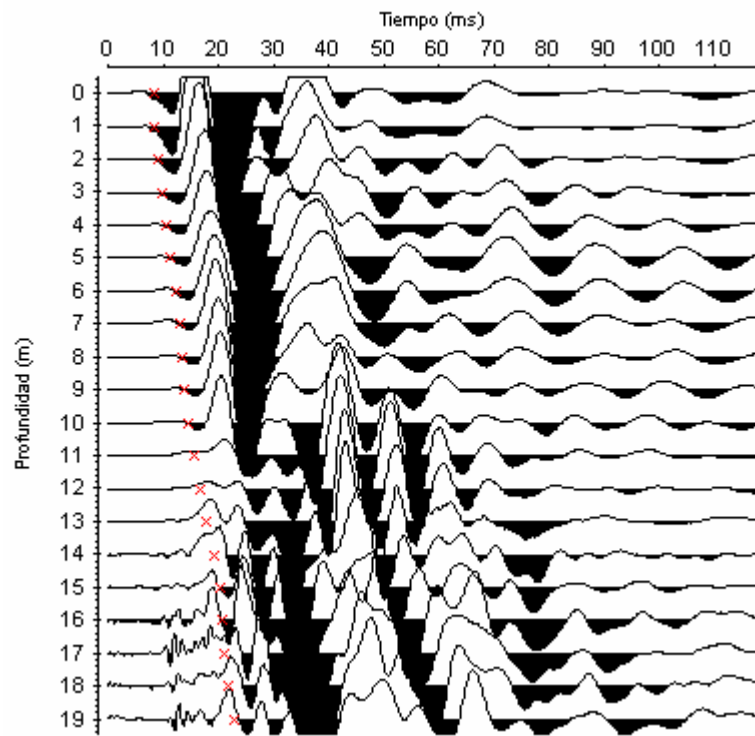
Se interpretaron tres capas en el subsuelo:

Capa 1; de cero a cinco metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $355 \leq V_p \leq 1149$  m/s y  $191 \leq V_s \leq 385$  m/s .

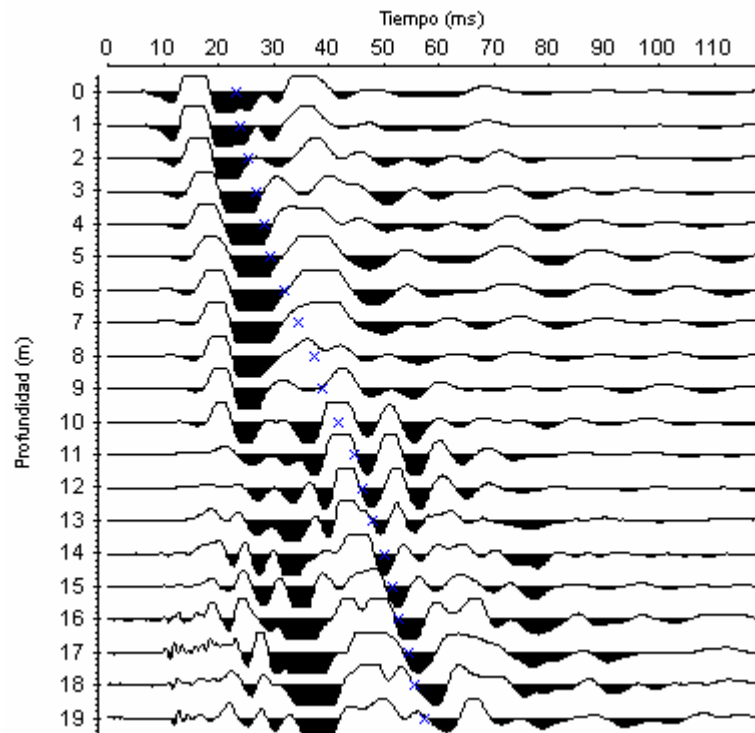
Capa 2; de cinco a trece metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1021 \leq V_p \leq 1584$  m/s y  $328 \leq V_s \leq 526$  m/s .

Capa 3; de trece a diecisiete metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1172 \leq V_p \leq 1900$  m/s y  $437 \leq V_s \leq 623$  m/s .

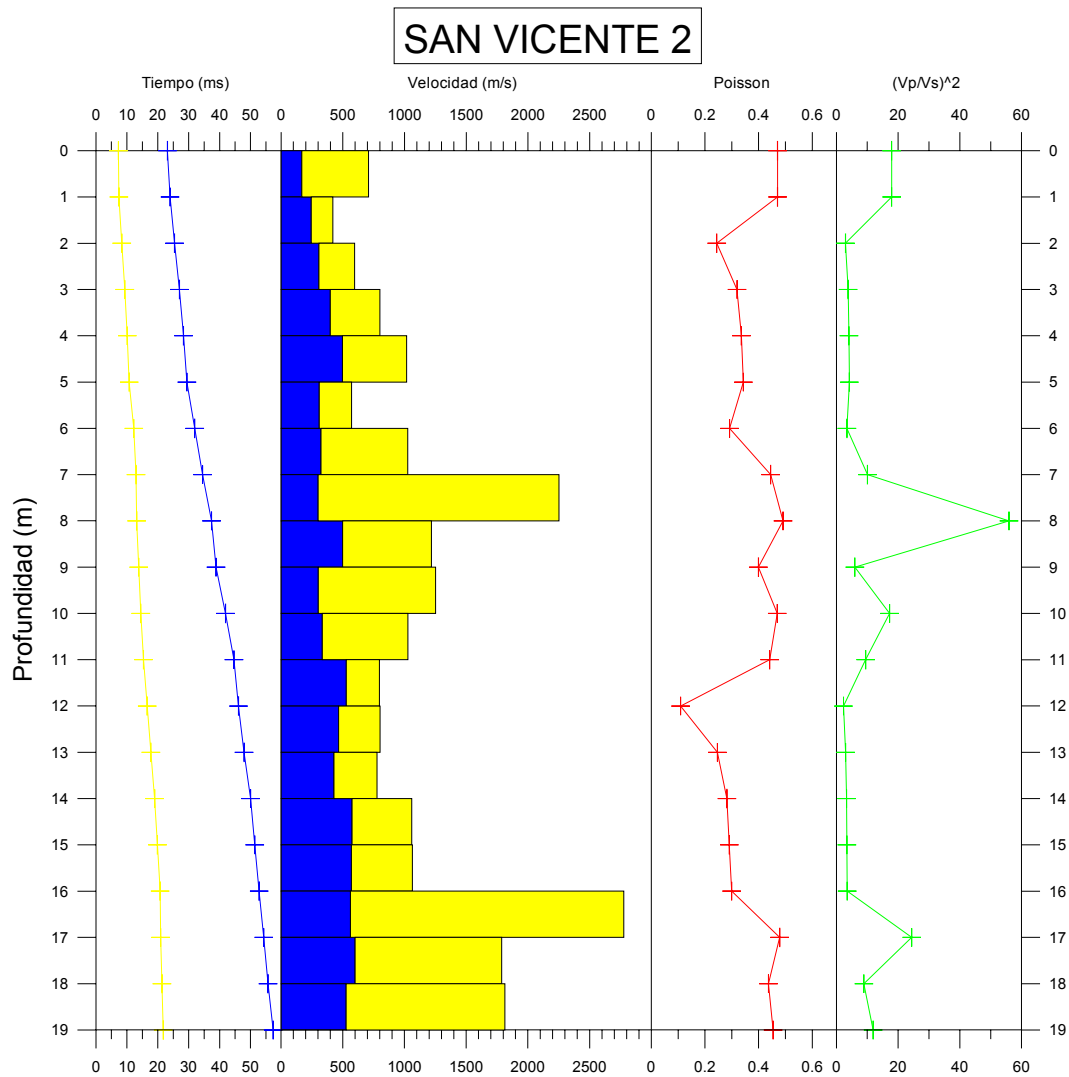
## Pozo San Vicente 2



**Figura 64.** Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo San Vicente 2 (registro de componente vertical).



**Figura 65.** Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo San Vicente 2 (registro de componente vertical).



Nivel freático TRX: 4,4 metros.

Nivel de agua en el pozo: 15 metros.

**Figura 66.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo San Vicente 2.

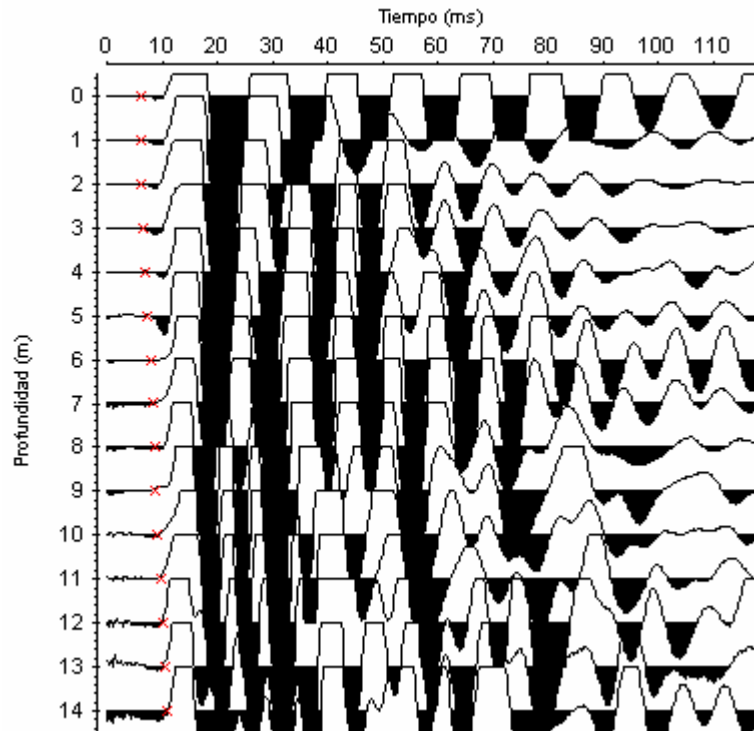
Se interpretaron tres capas:

Capa 1; de cero a cinco metros de profundidad, con velocidades entre  $419 \leq V_p \leq 1017$  m/s y  $167 \leq V_s \leq 497$  m/s .

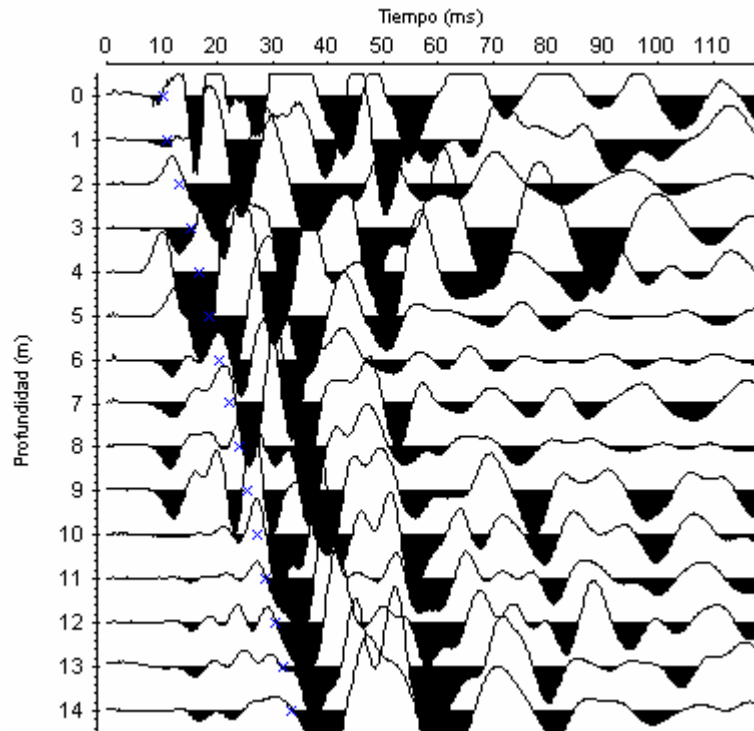
Capa 2; de cinco a catorce metros de profundidad, con velocidades entre  $571 \leq V_p \leq 2251$  m/s y  $301 \leq V_s \leq 528$  m/s .

Capa 3; de catorce a diecinueve metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1059 \leq V_p \leq 2776$  m/s y  $526 \leq V_s \leq 599$  m/s .

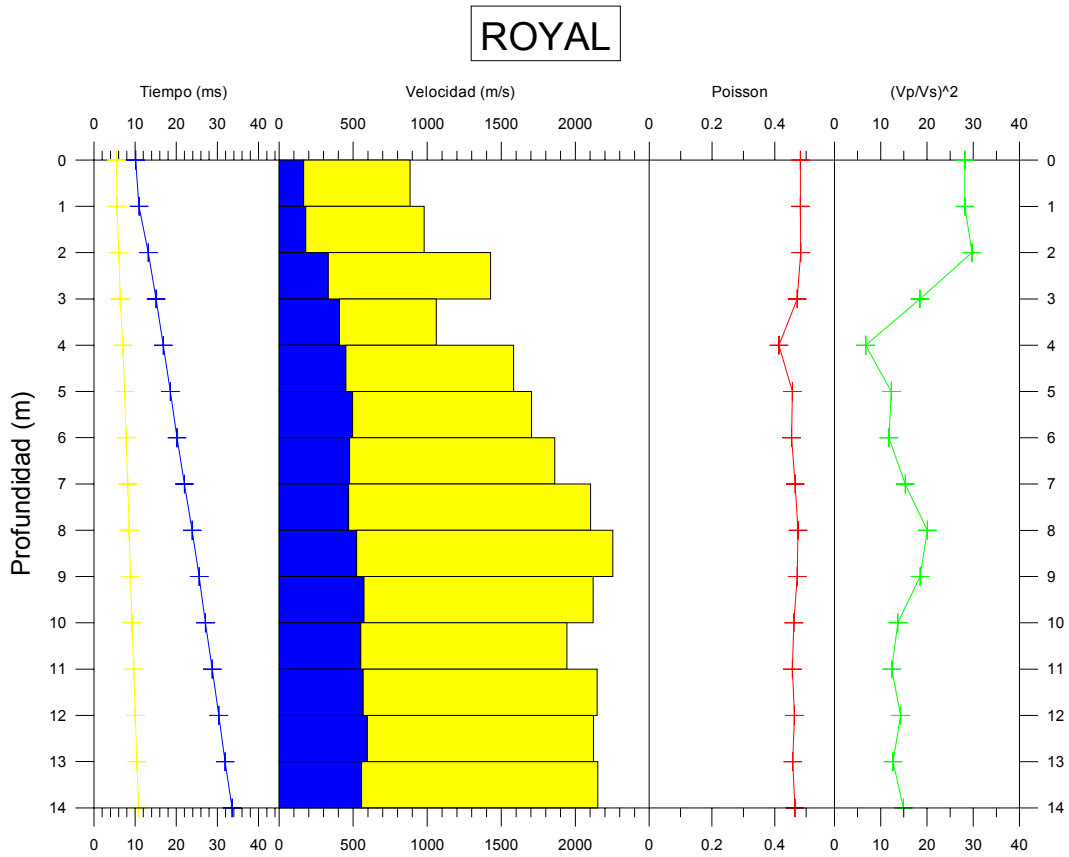
## Pozo Royal



**Figura 67.** Tiempos de llegada de ondas "P" en el pozo Royal  
(registro de componente vertical).



**Figura 68.** Tiempos de llegada de ondas "S" en el pozo Royal  
(registro de componente longitudinal).



Nivel freático TRX: 3,5 metros.

Nivel de agua en el pozo: 4 metros.

**Figura 69.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Royal.

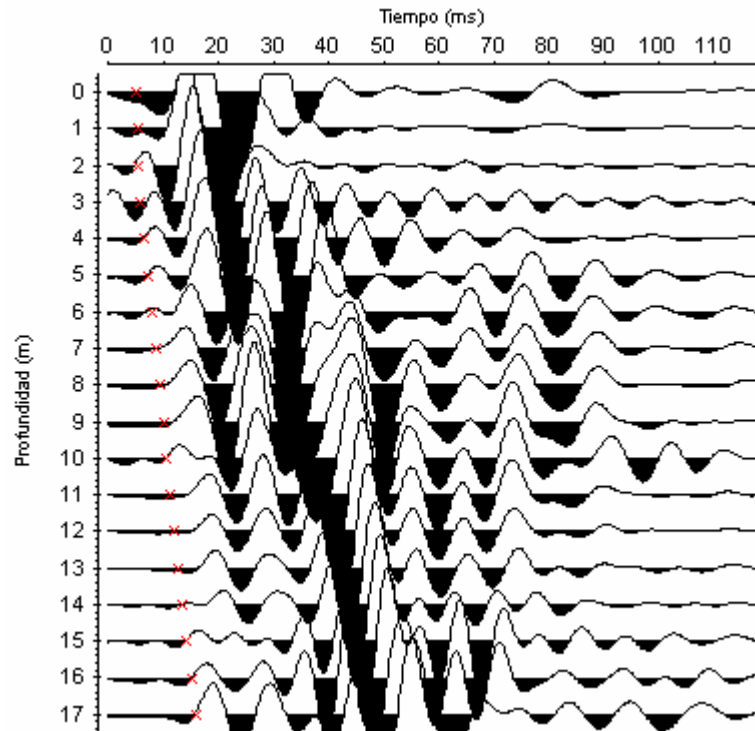
Se interpretaron dos capas en el subsuelo:

Capa 1; de cero a seis metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $884 \leq V_p \leq 1704$  m/s y  $166 \leq V_s \leq 497$  m/s .

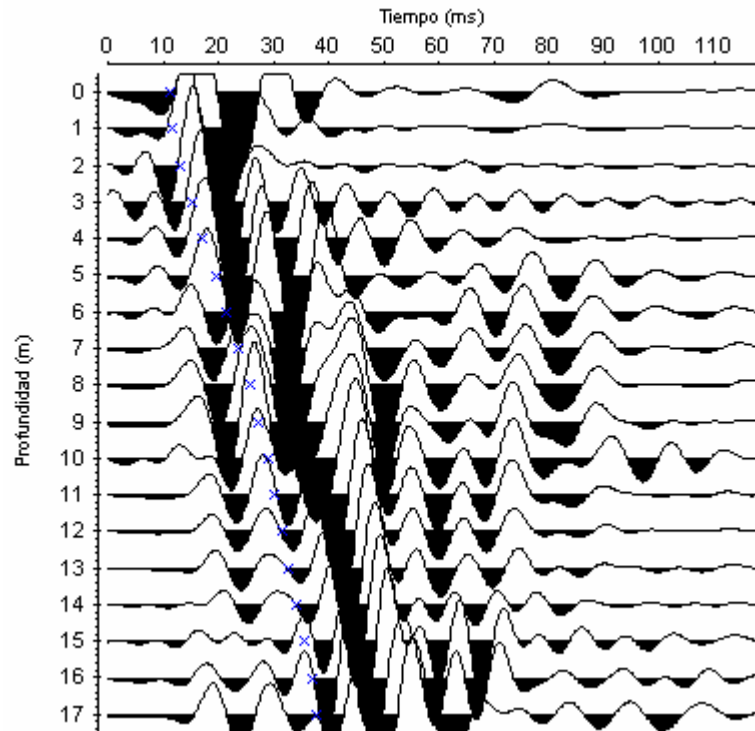
Capa 2; de seis a catorce metros de profundidad, con velocidades entre  $1861 \leq V_p \leq 2252$  m/s y  $469 \leq V_s \leq 596$  m/s .



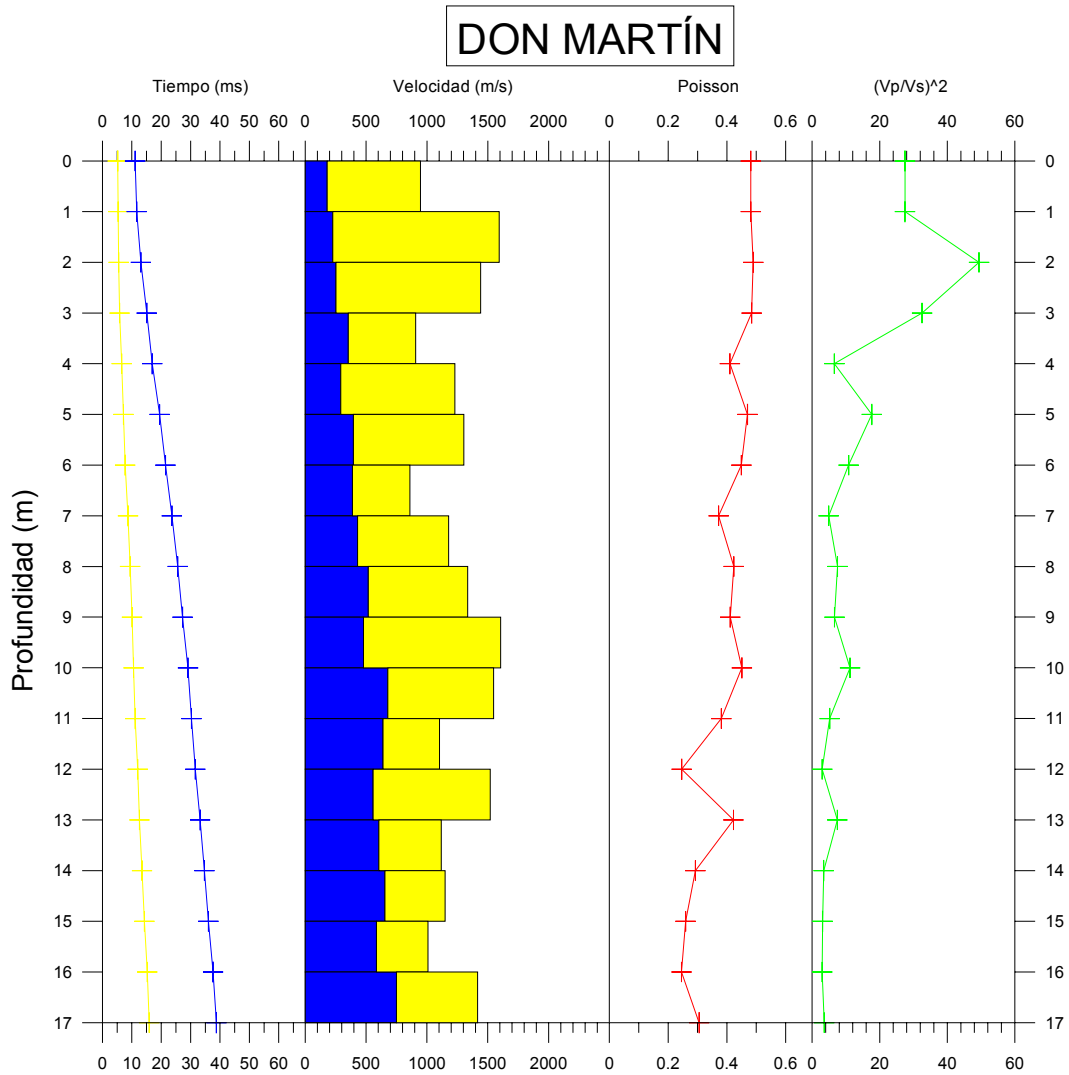
## Pozo Don Martín



**Figura 70.** Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Don Martín (registro de componente vertical).



**Figura 71.** Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Don Martín (registro de componente vertical).



**Nivel freático TRX: 6 metros.**

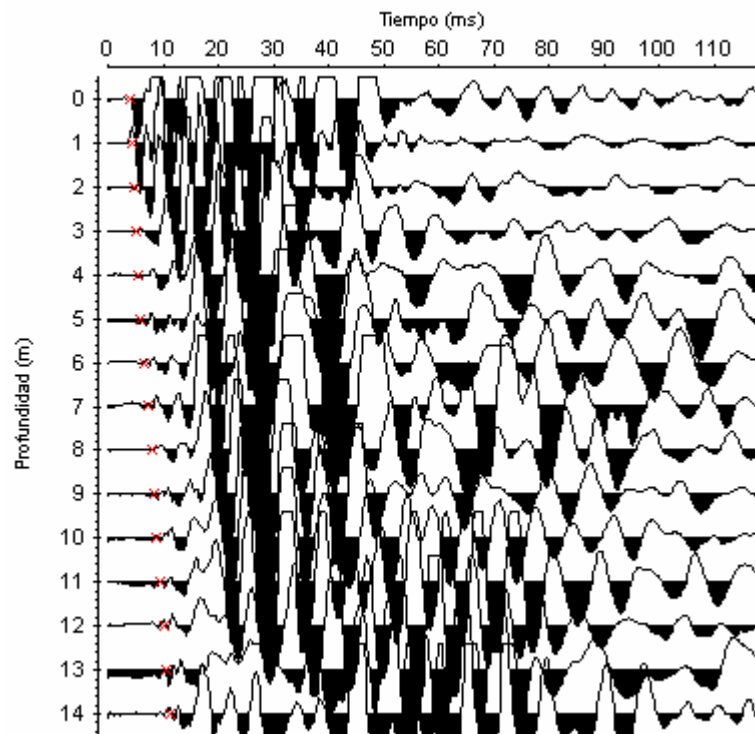
**Figura 72.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Don Martín.

Se interpretaron dos capas en el subsuelo:

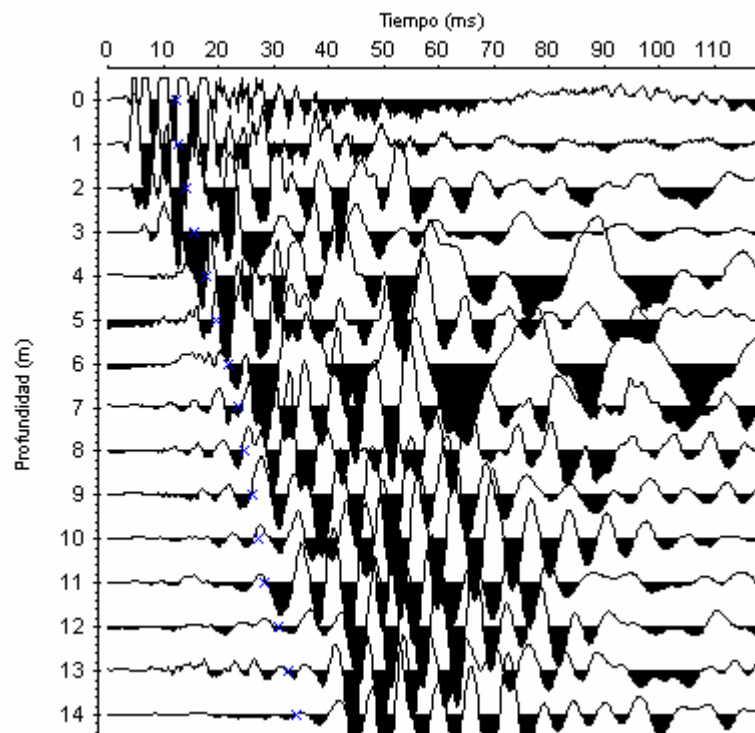
Capa 1; de cero a diez de profundidad, con rango de velocidades entre  $860 \leq V_p \leq 605 \text{ m/s}$  y  $181 \leq V_s \leq 518 \text{ m/s}$  .

Capa 2; de diez a diecisiete metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1009 \leq V_p \leq 1548 \text{ m/s}$  y  $557 \leq V_s \leq 750 \text{ m/s}$  .

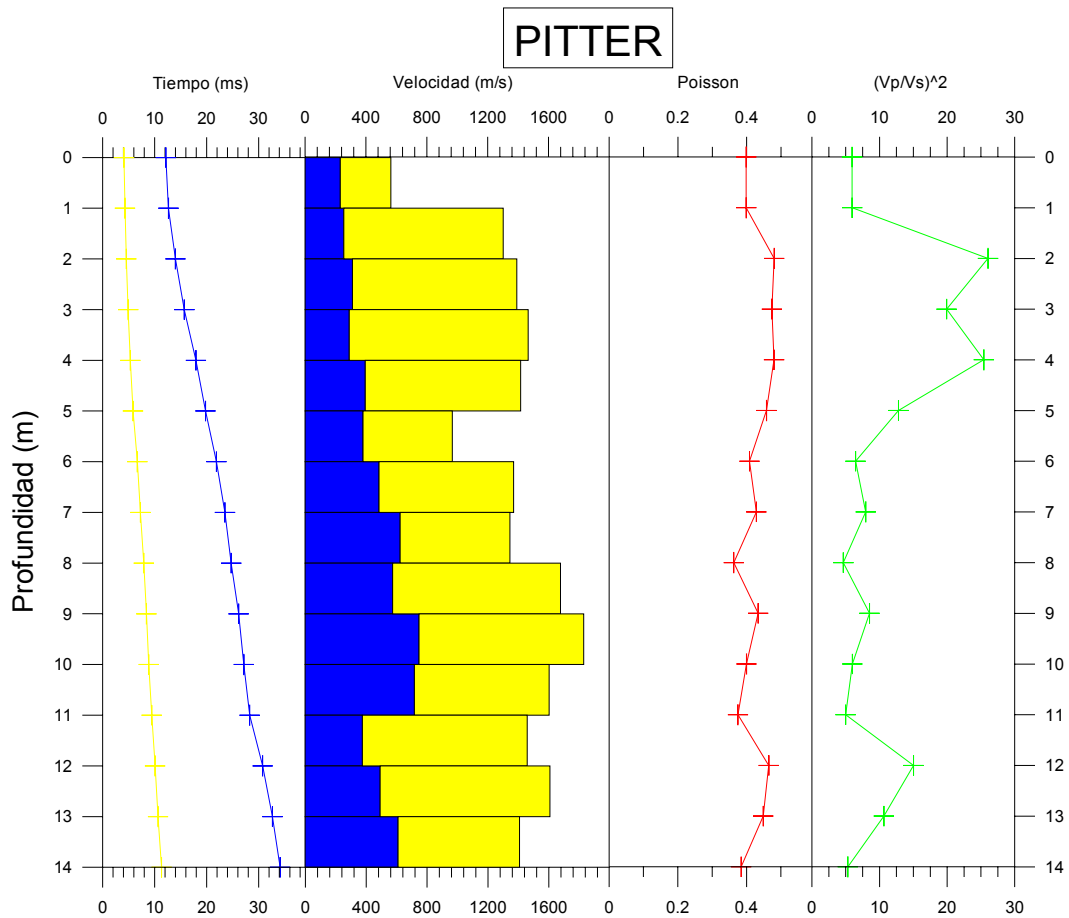
## Pozo Pitter



**Figura 73.** Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Pitter  
(registro de componente vertical).



**Figura 74.** Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Pitter  
(registro de componente longitudinal).



Nivel freático TRX: 6 metros.

Nivel de agua en el pozo: 1 metro.

**Figura 75.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Pitter.

Se interpretaron dos capas en el subsuelo:

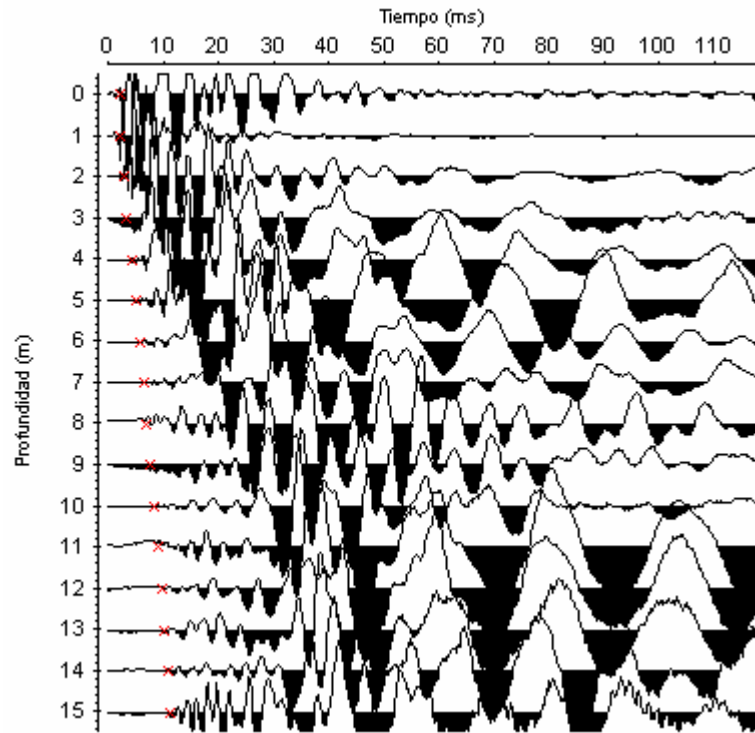
Capa 1; de cero a nueve metros de profundidad, con velocidades entre  $563 \leq V_p \leq 1678$  m/s y  $231 \leq V_s \leq 625$  m/s .

Capa 2; de nueve a catorce metros de profundidad, con velocidades entre  $1410 \leq V_p \leq 1832$  m/s y  $377 \leq V_s \leq 749$  m/s .

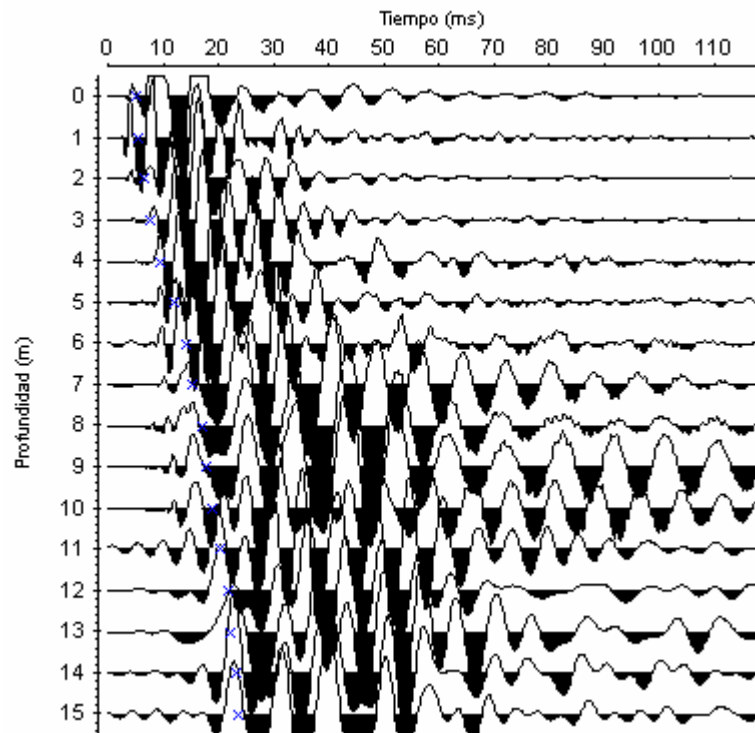
**Tabla 11.** Velocidades de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas “downhole” a lo largo de la avenida San Martín.

<b>Localización</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>
<b>Pozo San Vicente 1</b>	0 – 5	713	296
	5 – 13	1249	403
	13 – 17	1621	504
<b>Pozo San Vicente 2</b>	0 – 5	708	322
	5 – 14	1080	388
	14 – 19	1700	566
<b>Pozo Royal</b>	0 – 6	1273	339
	6 – 14	2087	539
<b>Pozo Don Martín</b>	0 – 10	1240	352
	10 – 17	1266	639
<b>Pozo Pitter</b>	0 – 9	1278	395
	9 – 14	1583	590

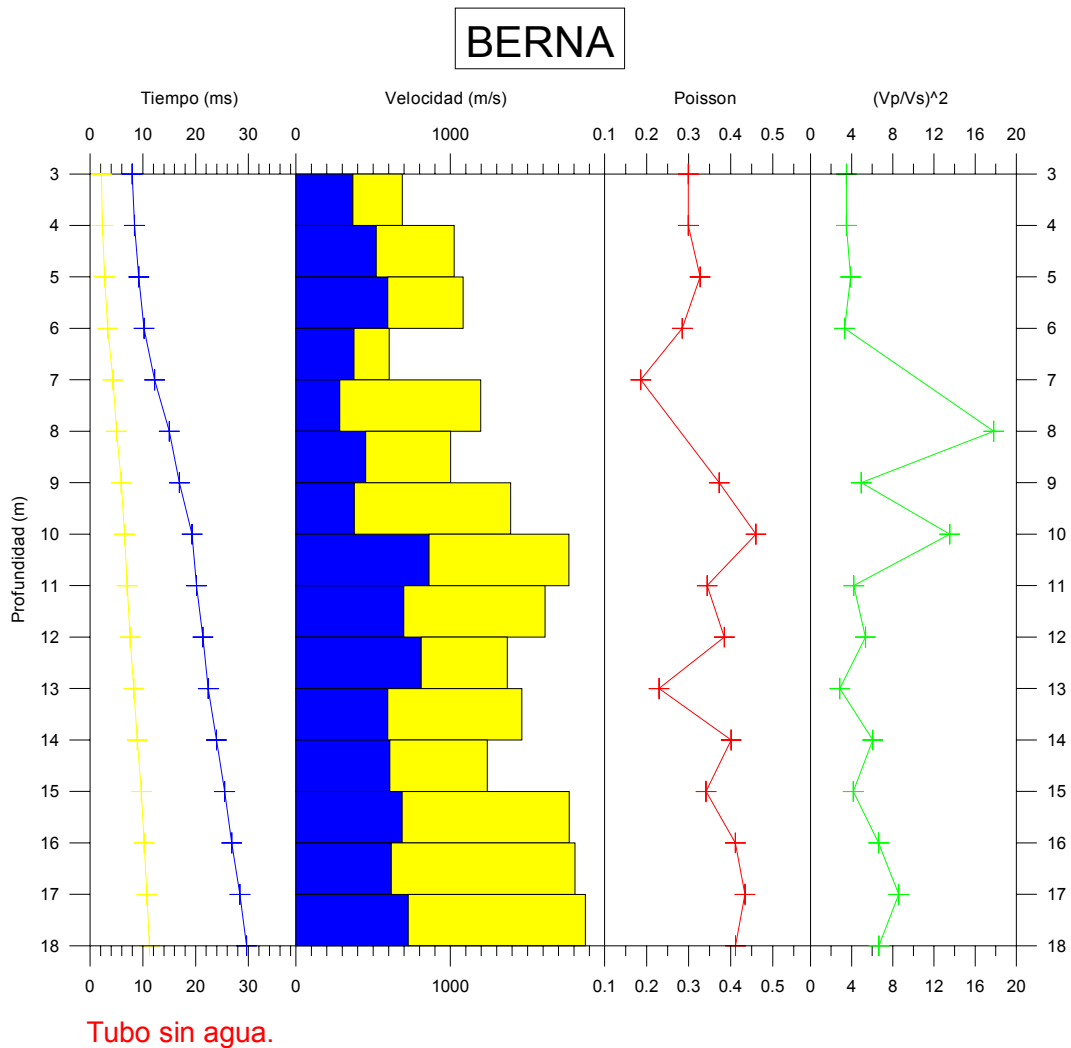
## Pozo Berna



**Figura 76.** Tiempos de llegada de ondas "P" en el pozo Berna (registro de componente transversal).



**Figura 77.** Tiempos de llegada de ondas "S" en el pozo Berna (registro de componente vertical).



**Figura 78.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Berna.

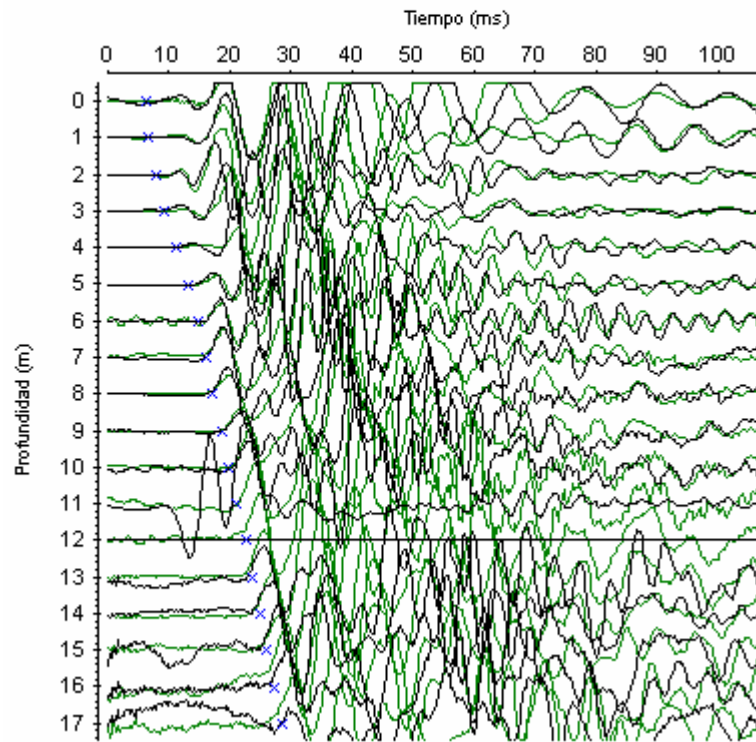
Se interpretaron tres capas en el subsuelo:

Capa 1; de tres a seis metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $689 \leq V_p \leq 1083$  m/s y  $369 \leq V_s \leq 594$  m/s .

Capa 2; de seis a diez metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $605 \leq V_p \leq 1391$  m/s y  $284 \leq V_s \leq 451$  m/s .

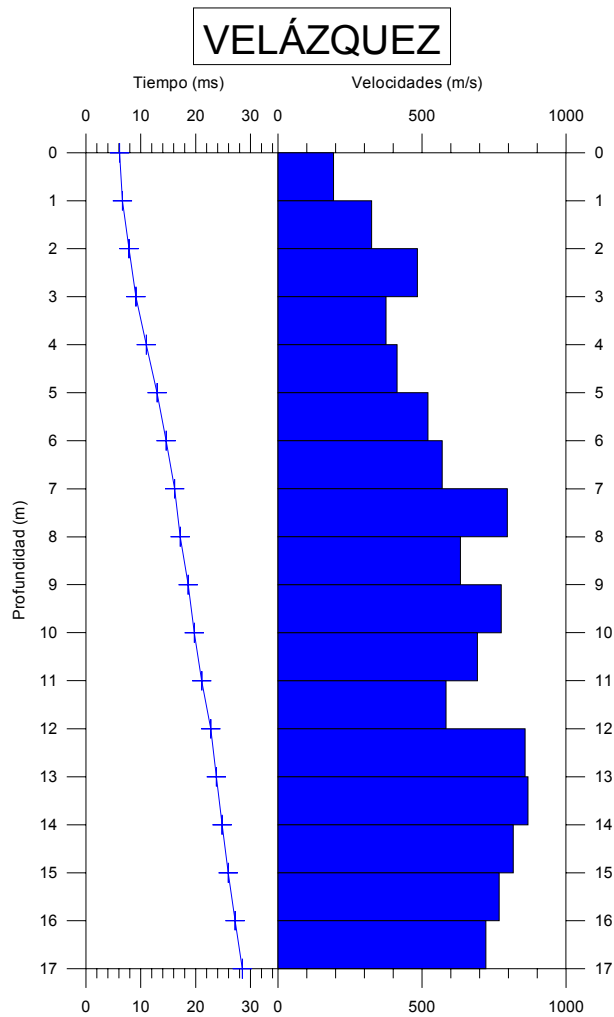
Capa 3; de diez a dieciocho metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1239 \leq V_p \leq 1874$  m/s y  $595 \leq V_s \leq 862$  m/s .

## Pozo Velázquez



**Figura 79.** Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Berna (registros polarizados de componente vertical).





Nivel de agua TRX: 4,4 metros. Nivel de agua en el pozo: 7 metros.

**Figura 80.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Velázquez.

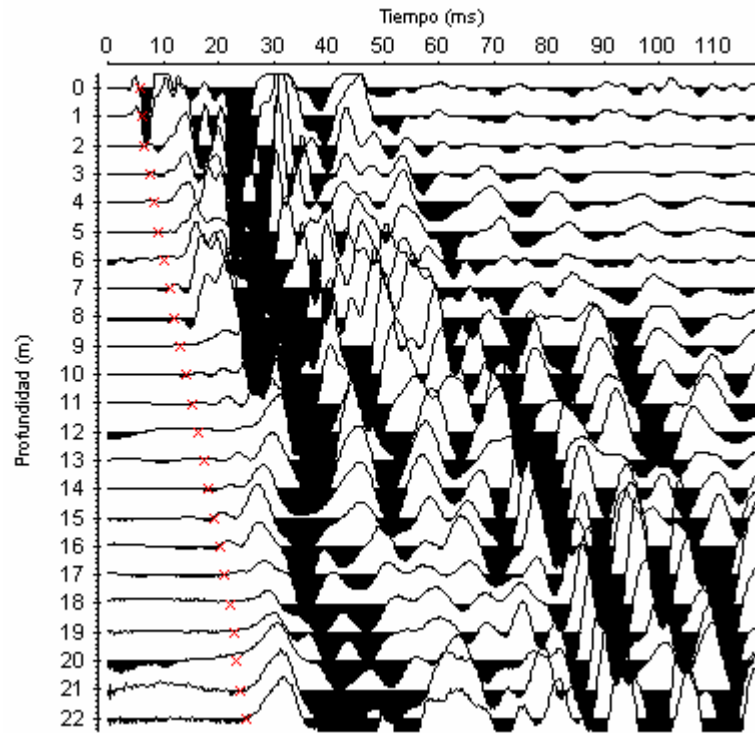
Se interpretaron tres capas en el subsuelo:

Capa 1; de cero a siete metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $193 \leq V_s \leq 570$  m/s .

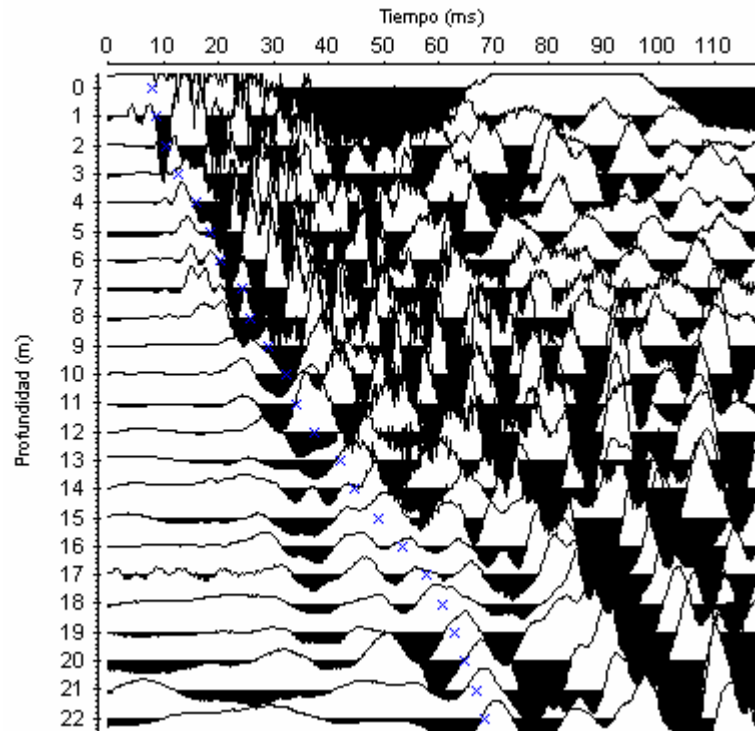
Capa 2; de siete a doce metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $583 \leq V_s \leq 796$  m/s .

Capa 3; de doce a diecisiete metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $722 \leq V_s \leq 868$  m/s .

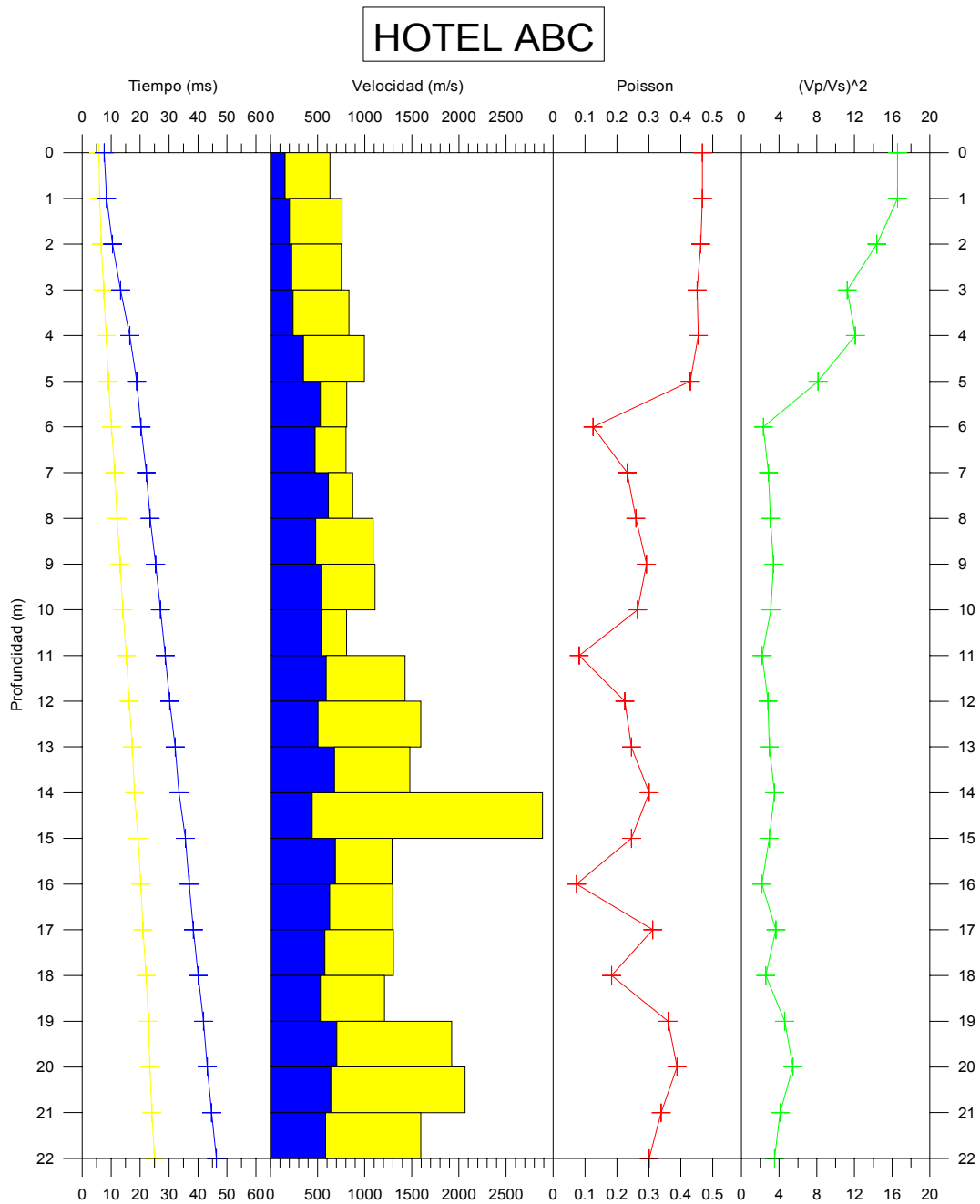
## Pozo Hotel ABC



**Figura 81.** Tiempos de llegada de ondas "P" en el pozo Hotel ABC (registro de componente vertical).



**Figura 82.** Tiempos de llegada de ondas "S" en el pozo Hotel ABC (registro de componente longitudinal).



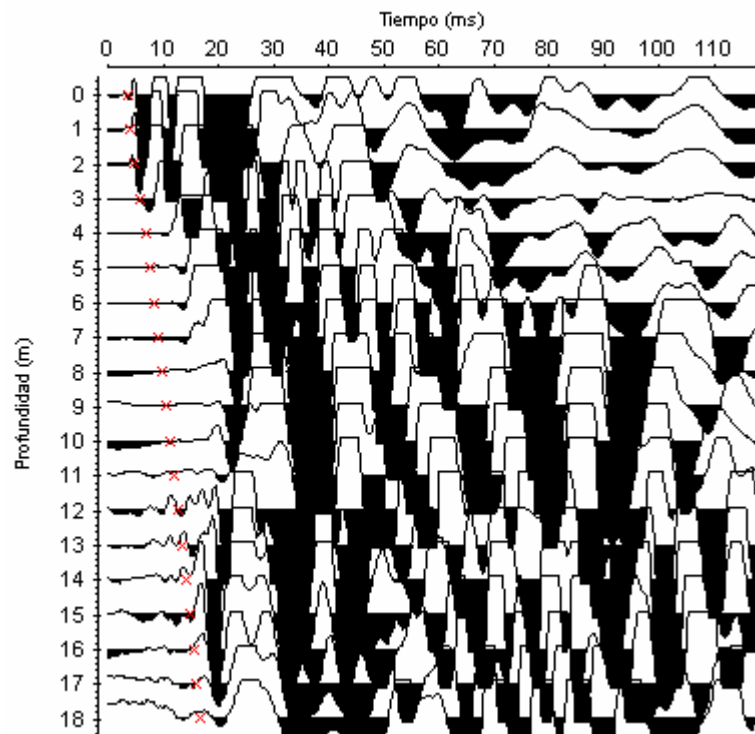
**Figura 83.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Hotel ABC.

Se interpretaron dos capas en el subsuelo:

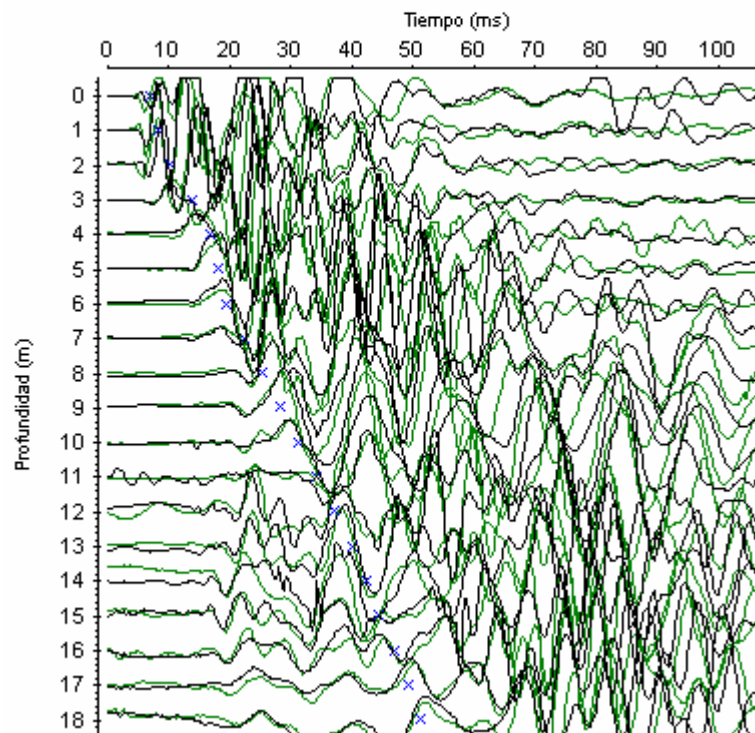
Capa 1; de cero a seis de profundidad, con rango de velocidades entre  $632 \leq V_p \leq 997$  m/s y  $128 \leq V_s \leq 435$  m/s .

Capa 2; de seis a veintidós metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $763 \leq V_p \leq 1646$  m/s y  $188 \leq V_s \leq 562$  m/s .

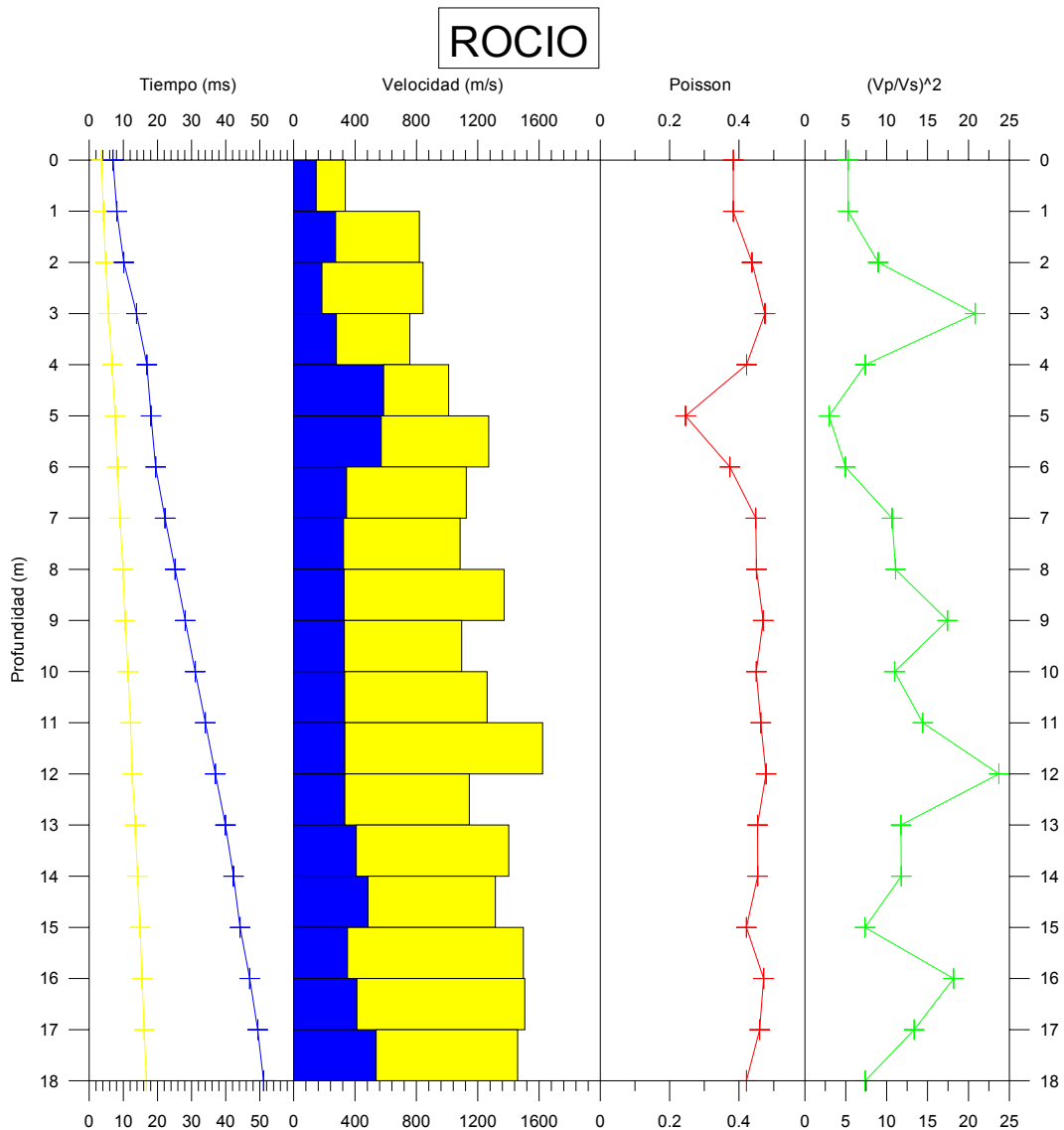
## Pozo Rocío



**Figura 84.** Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Rocío  
(registro de componente transversal).



**Figura 85.** Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Rocío  
(registros polarizados de componente transversal).



Nivel de agua en el pozo: 11 metros.

**Figura 86.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Rocío.

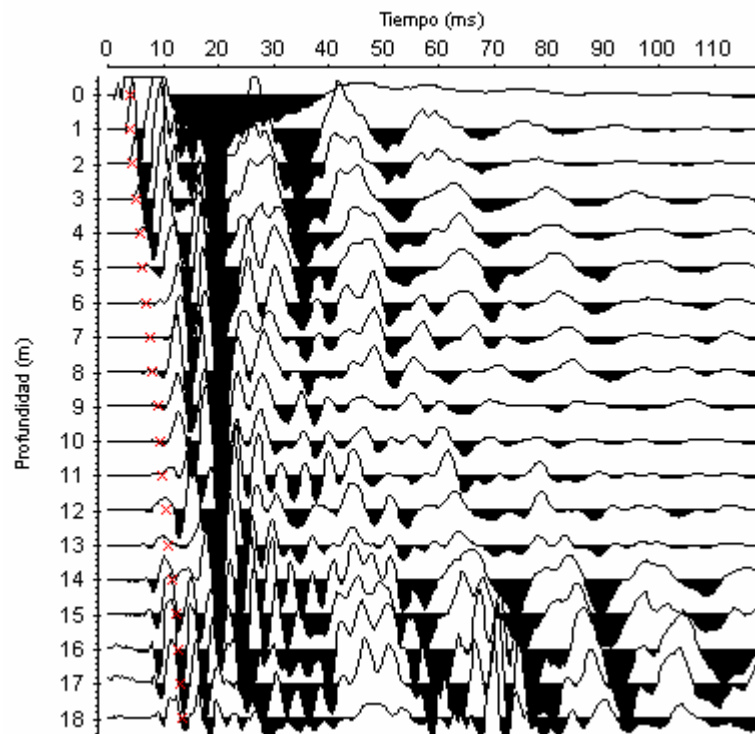
Se interpretaron tres capas en el subsuelo:

Capa 1; de cero a seis metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $336 \leq V_p \leq 1271$  m/s y  $146 \leq V_s \leq 587$  m/s .

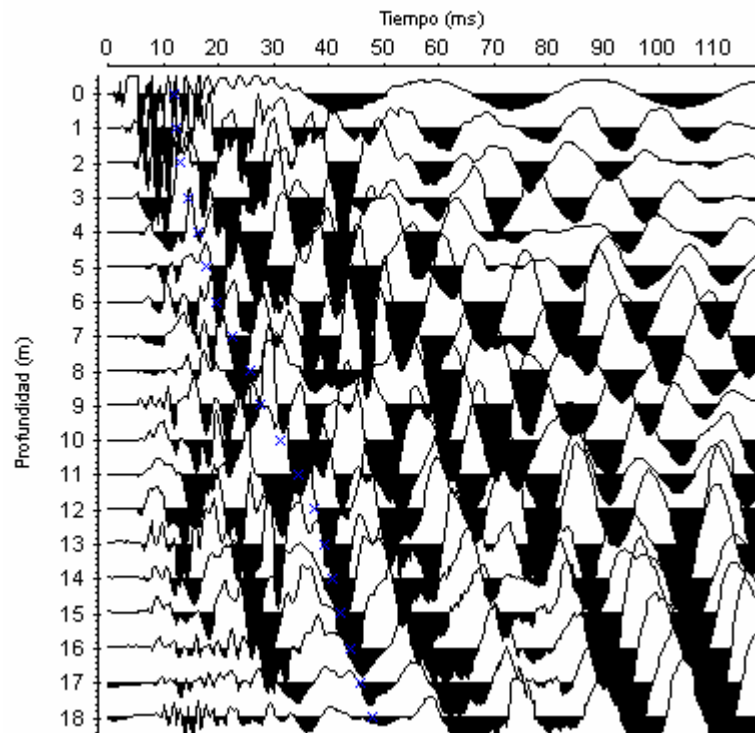
Capa 2; de seis a trece metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1084 \leq V_p \leq 1623$  m/s y  $325 \leq V_s \leq 344$  m/s .

Capa 3; de trece a dieciocho metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1315 \leq V_p \leq 1507$  m/s y  $351 \leq V_s \leq 537$  m/s .

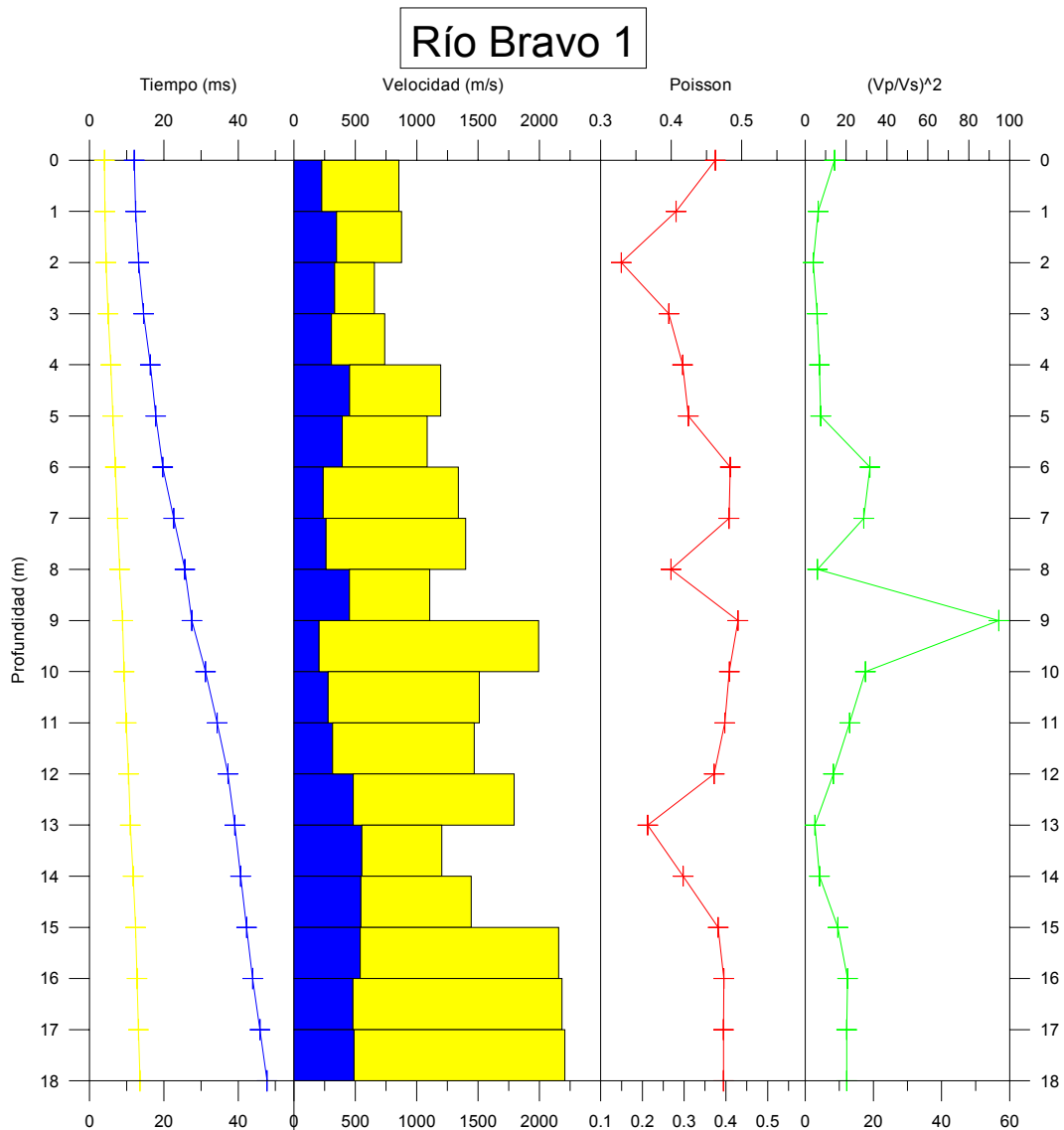
## Pozo Río Bravo 1



**Figura 87.** Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Río Bravo 1 (registro de componente vertical).



**Figura 88.** Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Río Bravo 1 (registro de componente transversal).



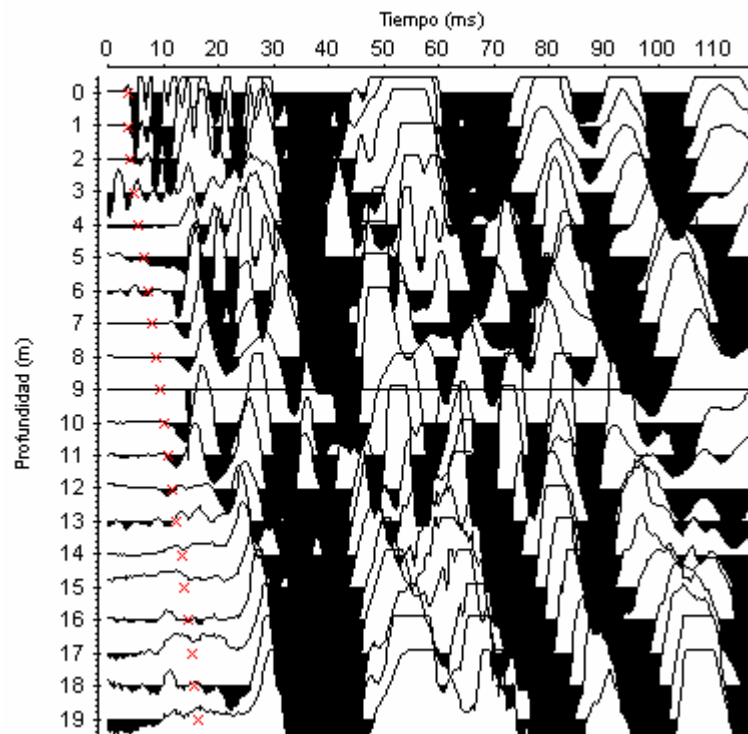
**Figura 89.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Río Bravo 1.

Se interpretaron dos capas en el subsuelo:

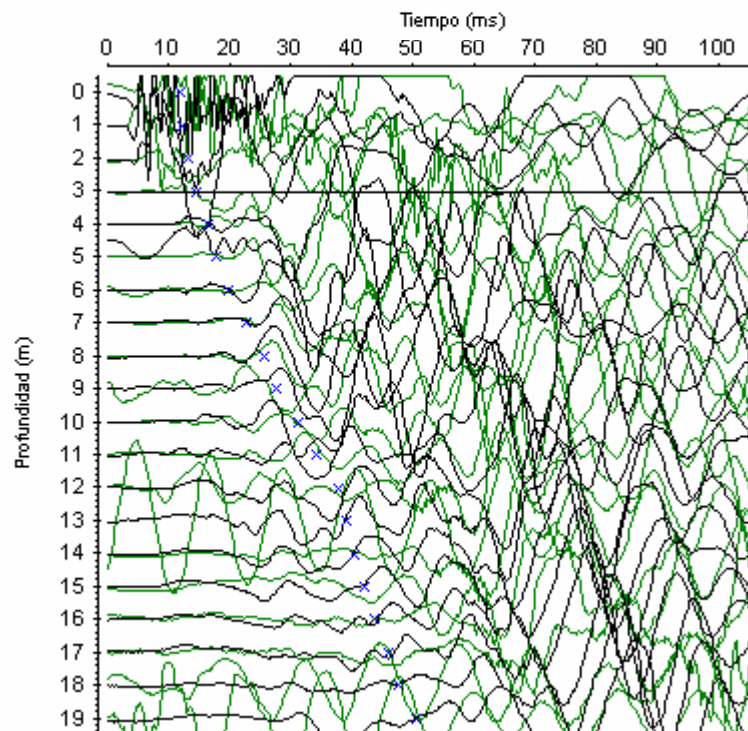
Capa 1; de cero a doce metros de profundidad, con velocidades entre  $655 \leq V_p \leq 1993$  m/s y  $205 \leq V_s \leq 453$  m/s .

Capa 2; de doce a dieciocho metros de profundidad, con velocidades entre  $1203 \leq V_p \leq 2208$  m/s y  $480 \leq V_s \leq 490$  m/s .

## Pozo Río Bravo 2

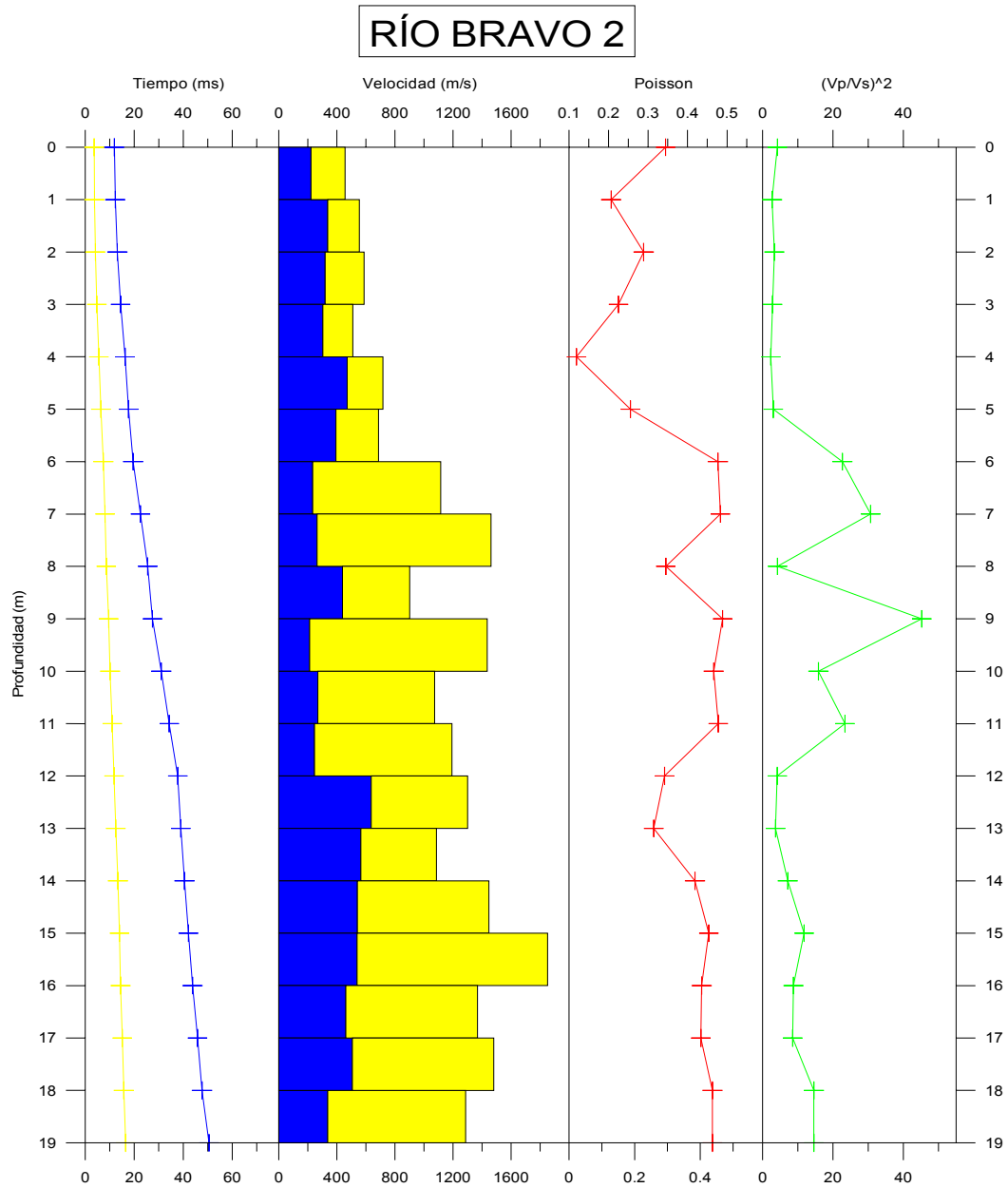


**Figura 90.** Tiempos de llegada de ondas "P" en el pozo Río Bravo 2 (registro de componente vertical).



**Figura 91.** Tiempos de llegada de ondas "S" en el pozo Río Bravo 2 (registros polarizados de componente transversal).





**Figura 92.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Río Bravo 2.

Se interpretaron dos capas en el subsuelo:

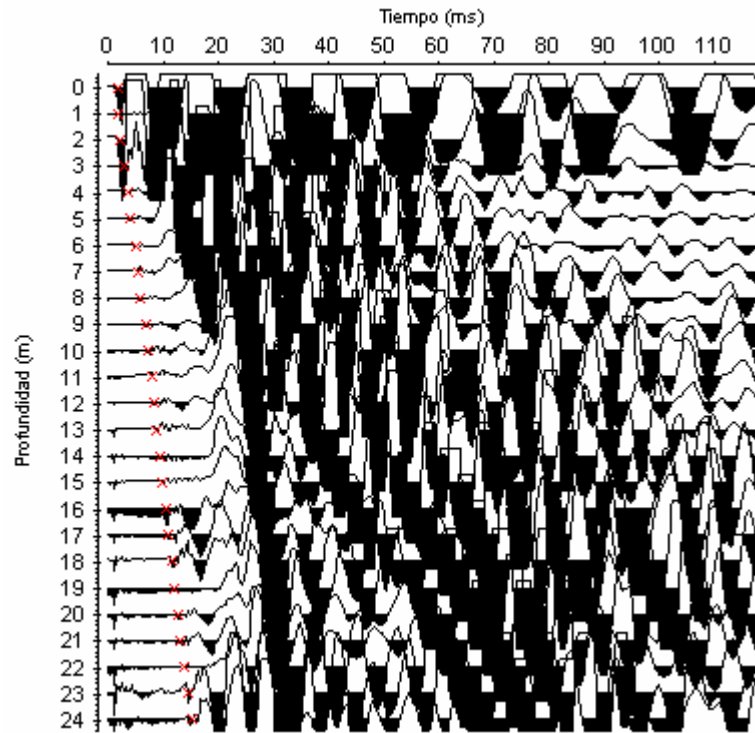
Capa 1; de cero a doce metros de profundidad, con velocidades entre  $457 \leq V_p \leq 1461$  m/s y  $213 \leq V_s \leq 471$  m/s .

Capa 2; de doce a diecinueve metros de profundidad, con velocidades entre  $1086 \leq V_p \leq 1481$  m/s y  $337 \leq V_s \leq 637$  m/s .

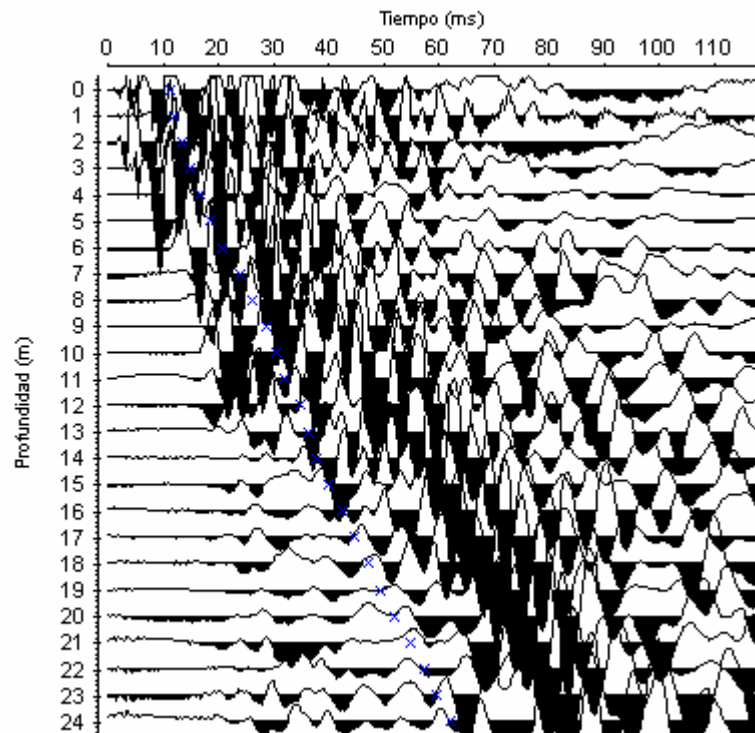
**Tabla 12.** Velocidades de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas “downhole” a lo largo de la avenida Lecuna.

<b>Localización</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>
<b>Pozo Berna</b>	3 – 6	932	494
	6 – 10	1048	372
	10 – 18	1613	701
<b>Pozo Velázquez</b>	0 – 7	-----	412
	7 – 12	-----	696
	12 – 17	-----	806
<b>Pozo Hotel ABC</b>	0 – 6	797	282
	6 – 22	1046	346
<b>Pozo Rocío</b>	0 – 6	839	340
	6 – 13	1243	333
	13 – 18	1436	439
<b>Pozo Río Bravo 1</b>	0 – 12	1185	317
	12 – 18	1831	515
<b>Pozo Río Bravo 2</b>	0 – 12	891	310
	12 – 19	1403	512

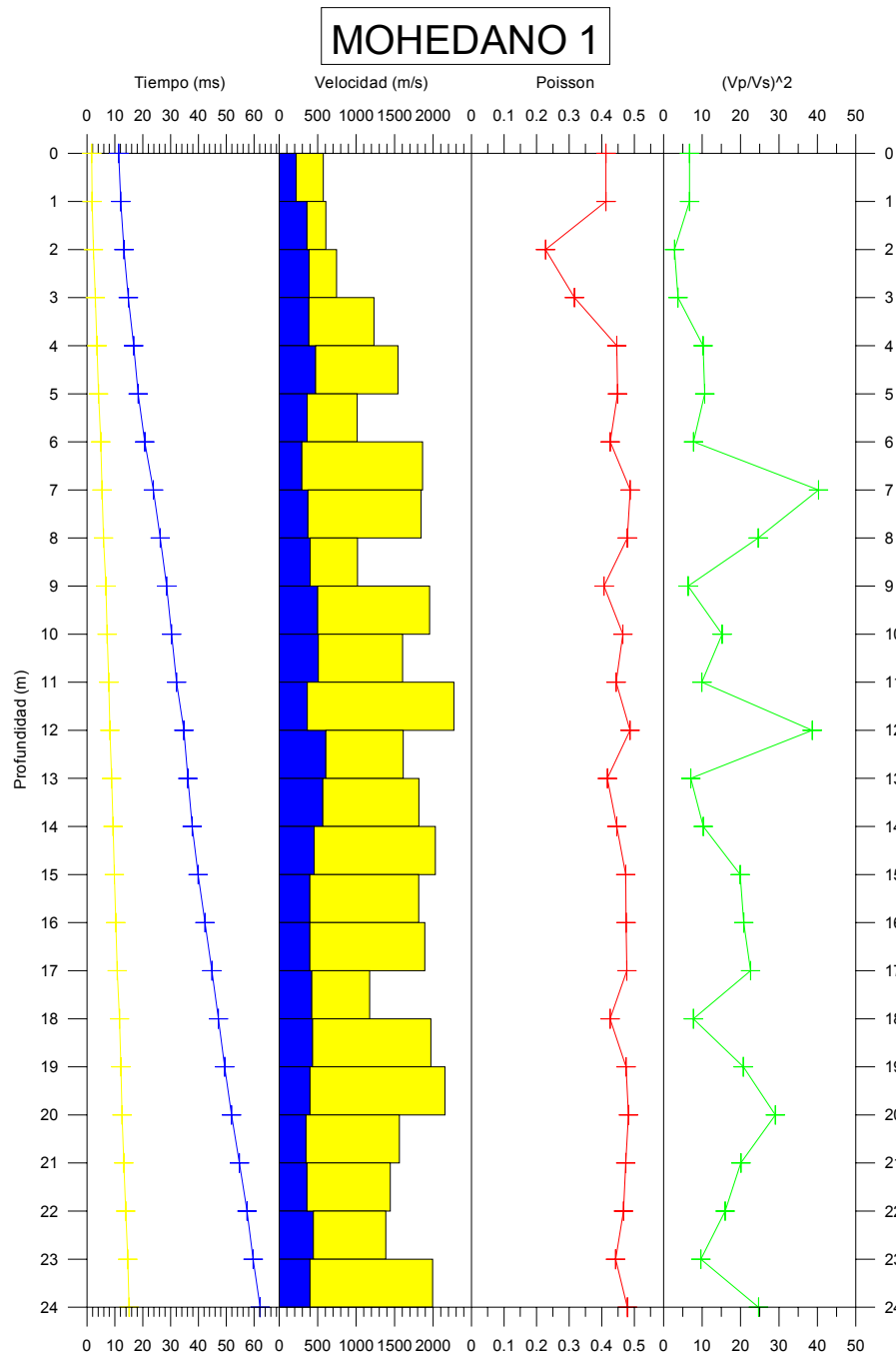
## Pozo Mohedano 1



**Figura 93.** Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Mohedano 1 (registro de componente vertical).



**Figura 94.** Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Mohedano 1 (registro de componente longitudinal).



Nivel freático TRX: 7,3 metros.

Nivel de agua en el pozo: 3 metros.

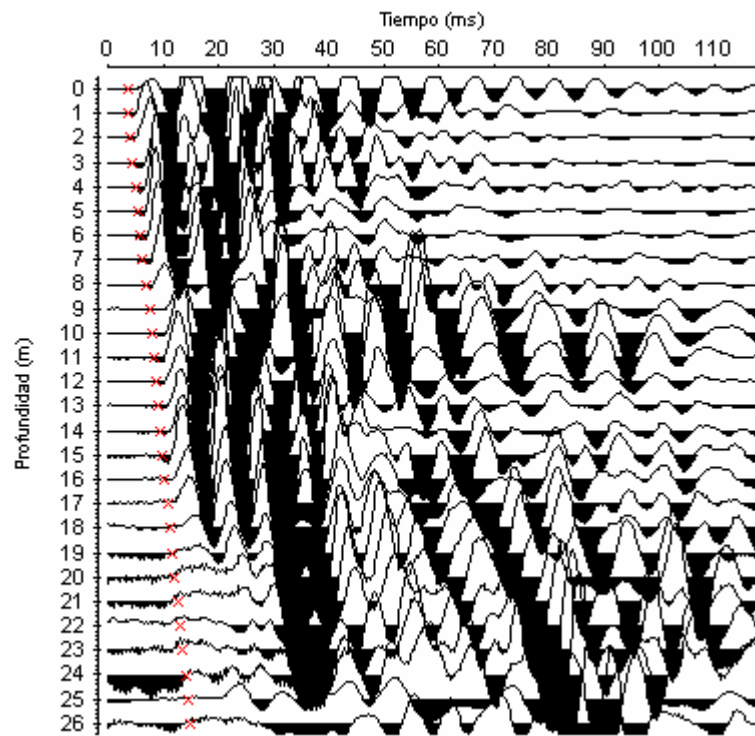
**Figura 95.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Mohedano 1.

Se interpretaron dos capas en el subsuelo:

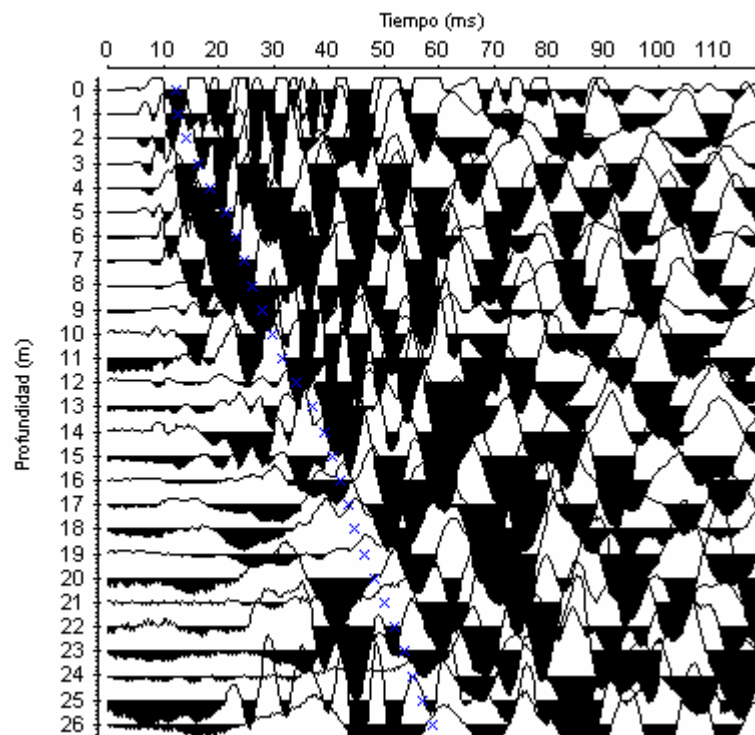
Capa 1; de cero a cinco metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $572 \leq Vp \leq 1544$  m/s y  $220 \leq Vs \leq 472$  m/s .

Capa 2; de cinco a veinticuatro metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1013 \leq Vp \leq 2271$  m/s y  $294 \leq Vs \leq 607$  m/s .

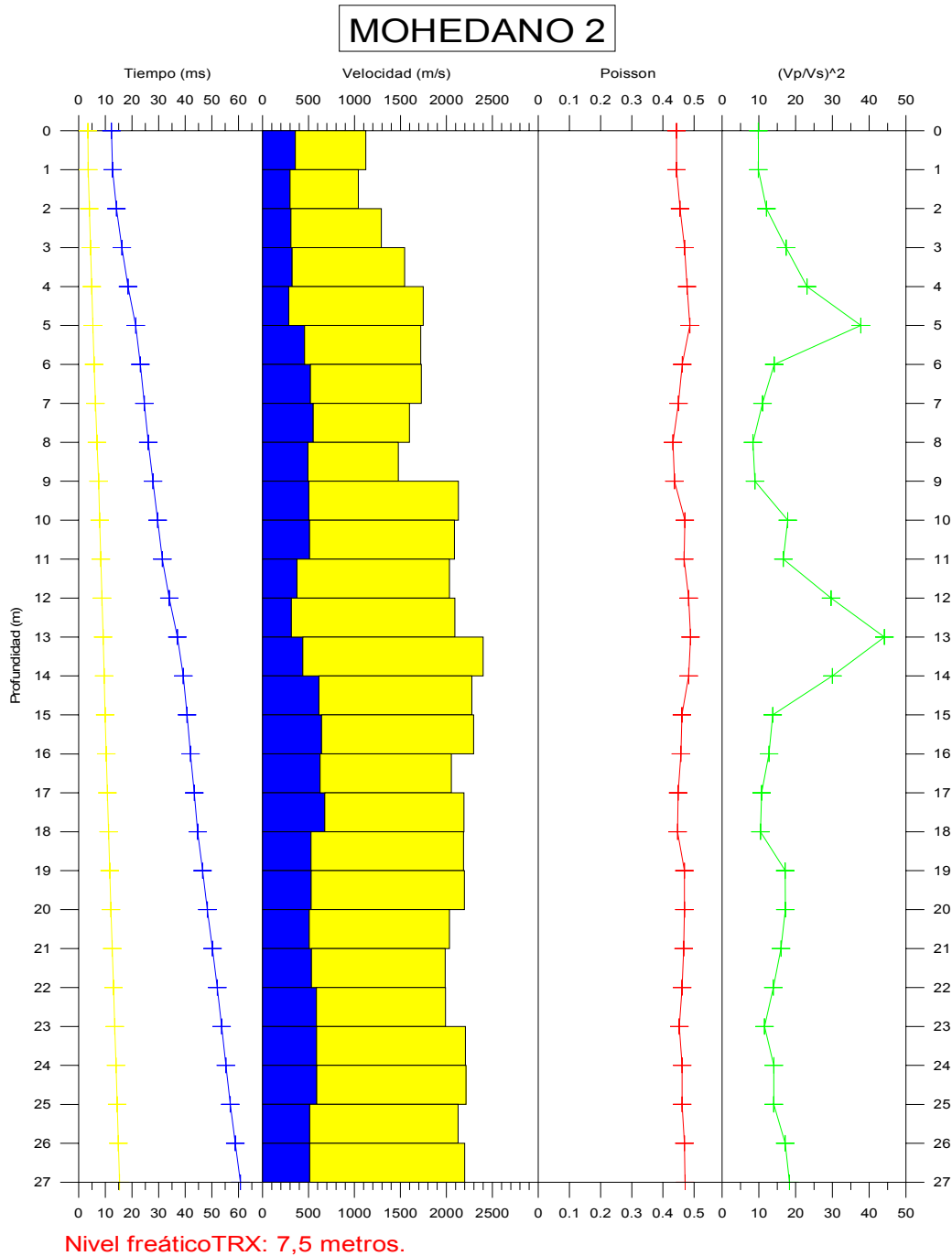
## Pozo Mohedano 2



**Figura 96.** Tiempos de llegada de ondas "P" en el pozo Mohedano 2 (registro de componente vertical).



**Figura 97.** Tiempos de llegada de ondas "S" en el pozo Mohedano 2 (registro de componente transversal).



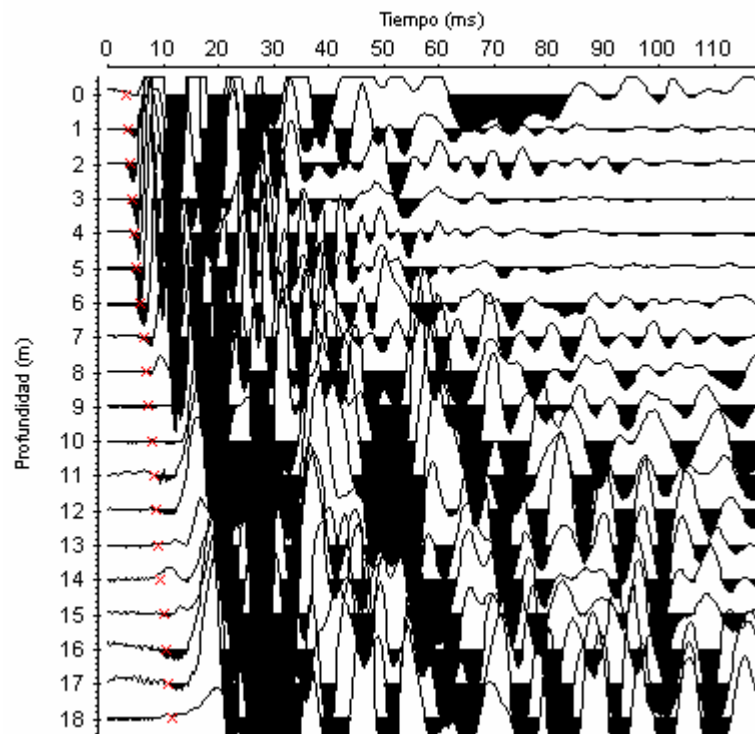
**Figura 98.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Mohedano 2.

Se interpretaron dos capas en el subsuelo:

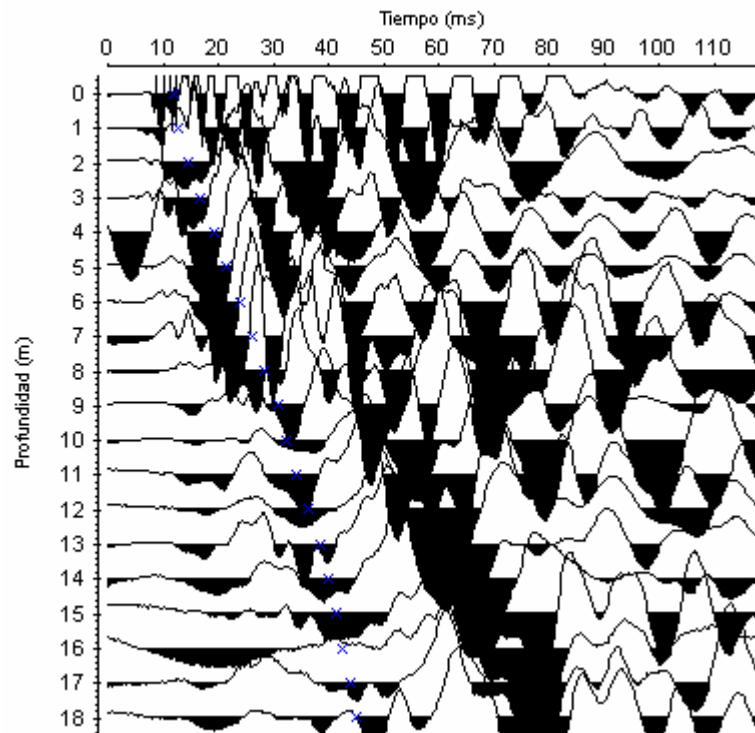
Capa 1; de cero a cinco metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1042 \leq V_p \leq 1748$  m/s y  $285 \leq V_s \leq 358$  m/s .

Capa 2; de cinco a veintisiete metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1476 \leq V_p \leq 2400$  m/s y  $315 \leq V_s \leq 678$  m/s .

### Pozo Mohedano 3

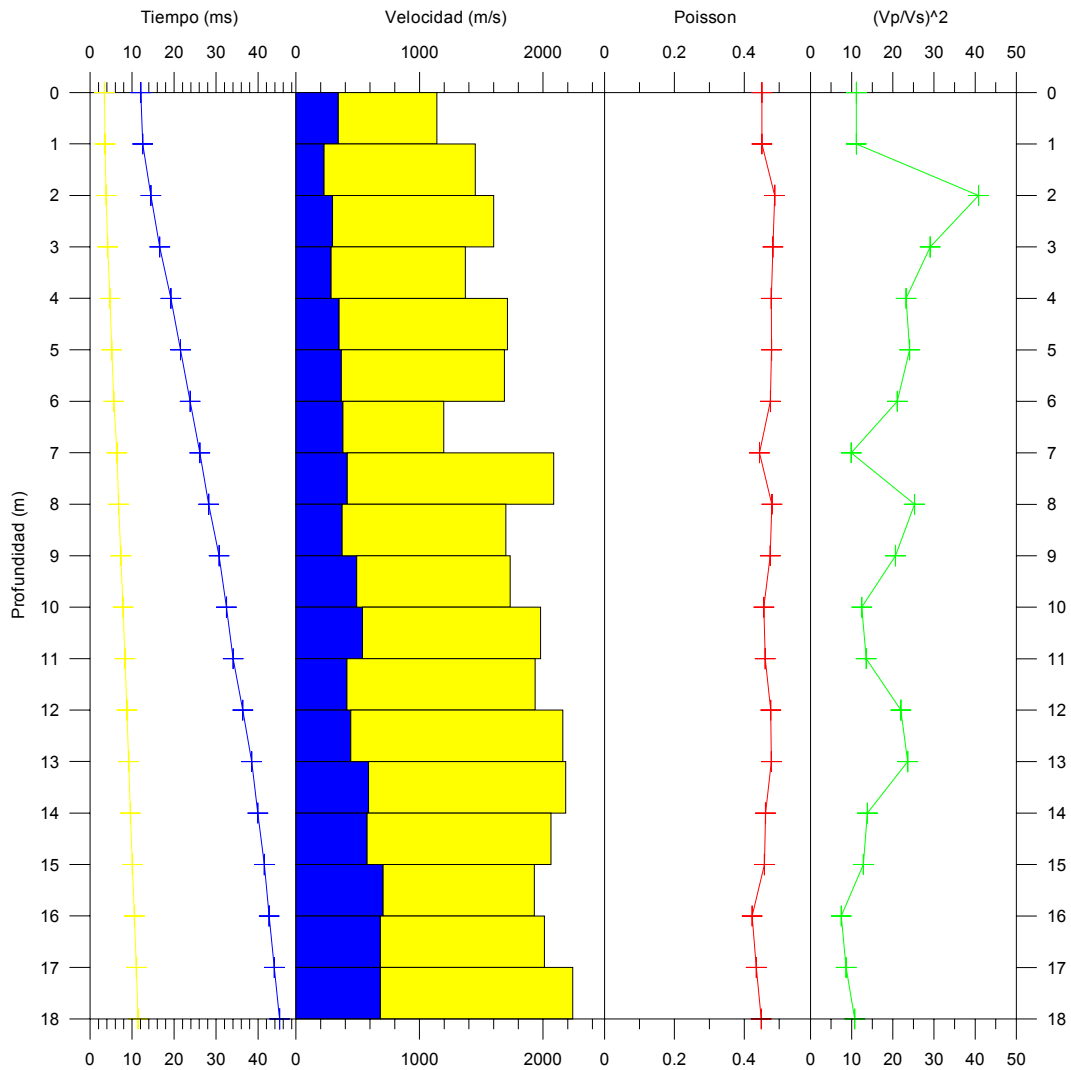


**Figura 99.** Tiempos de llegada de ondas “P” en el pozo Mohedano 3 (registro de componente vertical).



**Figura 100.** Tiempos de llegada de ondas “S” en el pozo Mohedano 3 (registro de componente longitudinal).

## MOHEDANO 3



Nivel de agua en el pozo: 6 metros.

**Figura 101.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “downhole” para el pozo Mohedano 3.

Se interpretaron dos capas en el subsuelo:

Capa 1; de cero a once metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1141 \leq V_p \leq 2087$  m/s y  $227 \leq V_s \leq 538$  m/s .

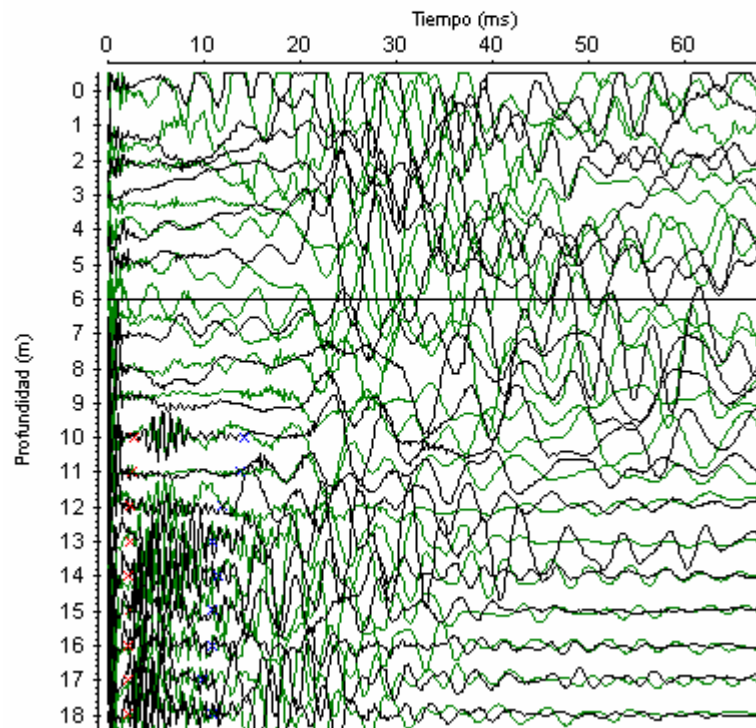
Capa 2; de once a dieciocho metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1929 \leq V_p \leq 2241$  m/s y  $413 \leq V_s \leq 706$  m/s .



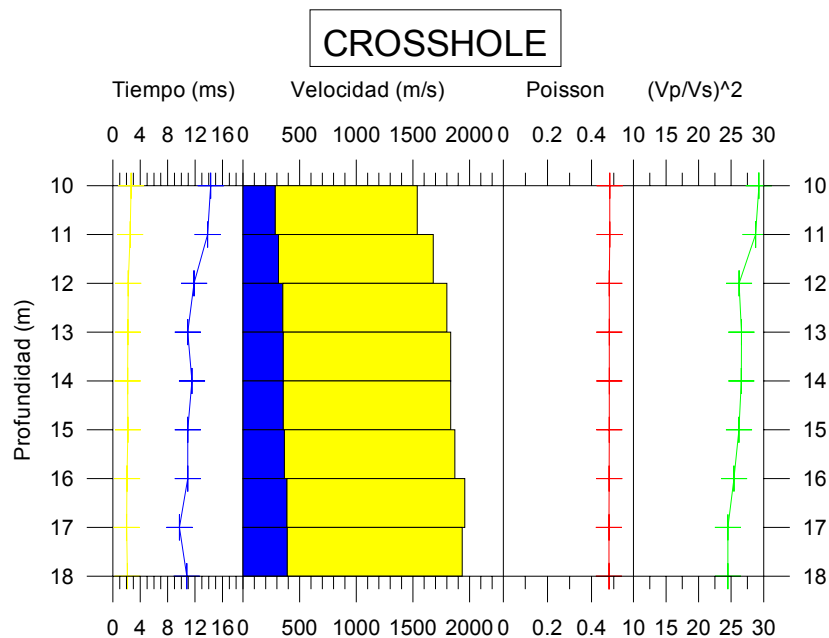
**Tabla 13.** Velocidades de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas “downhole” en el distribuidor Mohedano.

<b>Localización</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>
<b>Pozo Mohedano 1</b>	0 – 5	940	365
	5 – 24	1706	423
<b>Pozo Mohedano 2</b>	0 – 5	1350	315
	5 – 27	2055	528
<b>Pozo Mohedano 3</b>	0 – 11	1606	370
	11 – 18	2075	585

## 4.2 “Crosshole”



**Figura 102.** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (polarizadas) con el “crosshole” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.



**Figura 103.** Gráfico de los parámetros geofísicos obtenidos mediante la técnica “crosshole” ubicada en la futura estación Parque Central.

Debido a la baja relación señal/ruido los filtros fueron de poca ayuda, por lo que sólo se pudieron identificar las llegadas de las ondas “P” y “S” en los últimos ocho metros de profundidad y de esta manera obtener información en este intervalo de profundidad (diez a dieciocho metros).

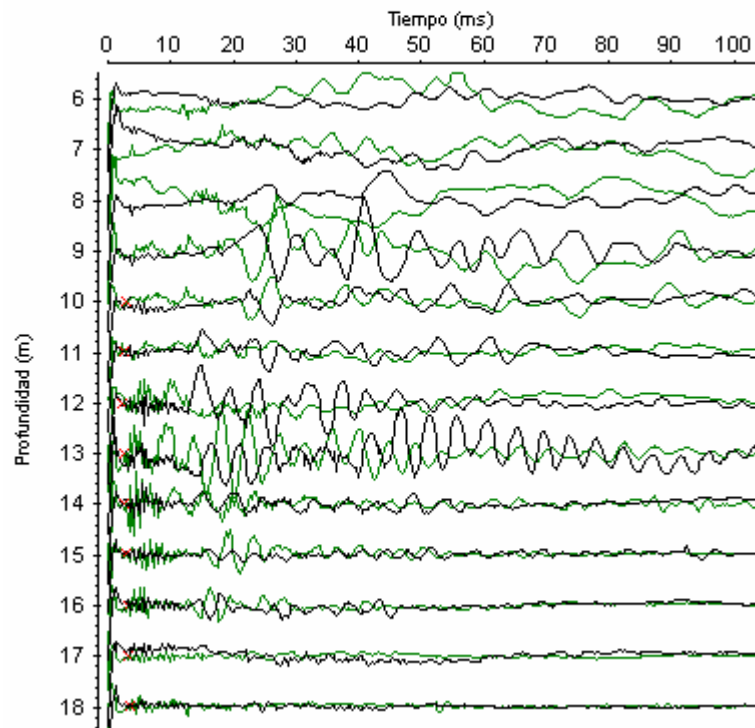
Se interpretaron dos capas en el subsuelo:

Capa 1; de diez a doce metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1539 \leq V_p \leq 1681$  m/s y  $285 \leq V_s \leq 313$  m/s .

Capa 2; de doce a dieciocho metros de profundidad, con rango de velocidades entre  $1800 \leq V_p \leq 1959$  m/s y  $351 \leq V_s \leq 391$  m/s .

<b>Tabla 14.</b> Velocidades de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas “crosshole” en la futura estación Parque Central.			
<b>Localización</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>V<sub>p</sub> (m/s)</b>	<b>V<sub>s</sub> (m/s)</b>
<b>Pozos Río Bravo 1 y 2</b>	10 – 12	1610	299
<b>Pozos Río Bravo 1 y 2</b>	12 – 18	1872	368

### 4.3 Tomografía



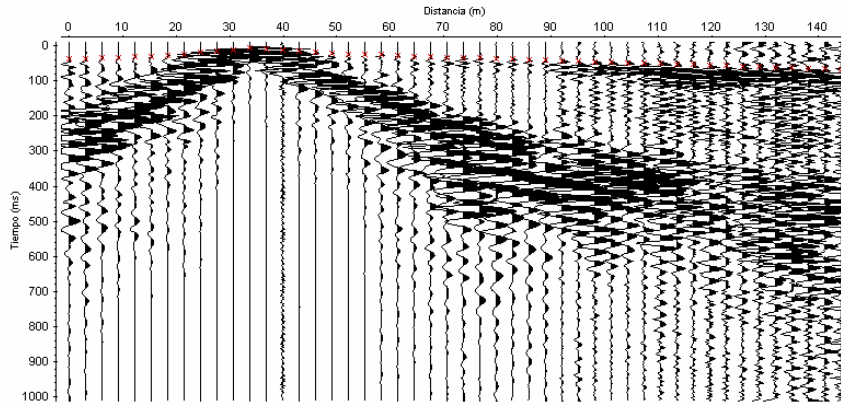
**Figura 104.** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (polarizadas) con la tomografía y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 12, receptor de 6 a 18 metros).

De la misma manera que en las secciones obtenidas a través de la técnica “crosshole”, la relación señal/ruido fue muy baja, por lo que los filtros fueron de poca ayuda y sólo se pudieron ubicar las llegadas de ondas “P” y “S” en muy pocas de las secciones sísmicas que conforman la tomografía, debido a esto se hizo imposible obtener información a través de la misma y la realización de las imágenes tomográficas.

#### 4.4 Sísmica de refracción

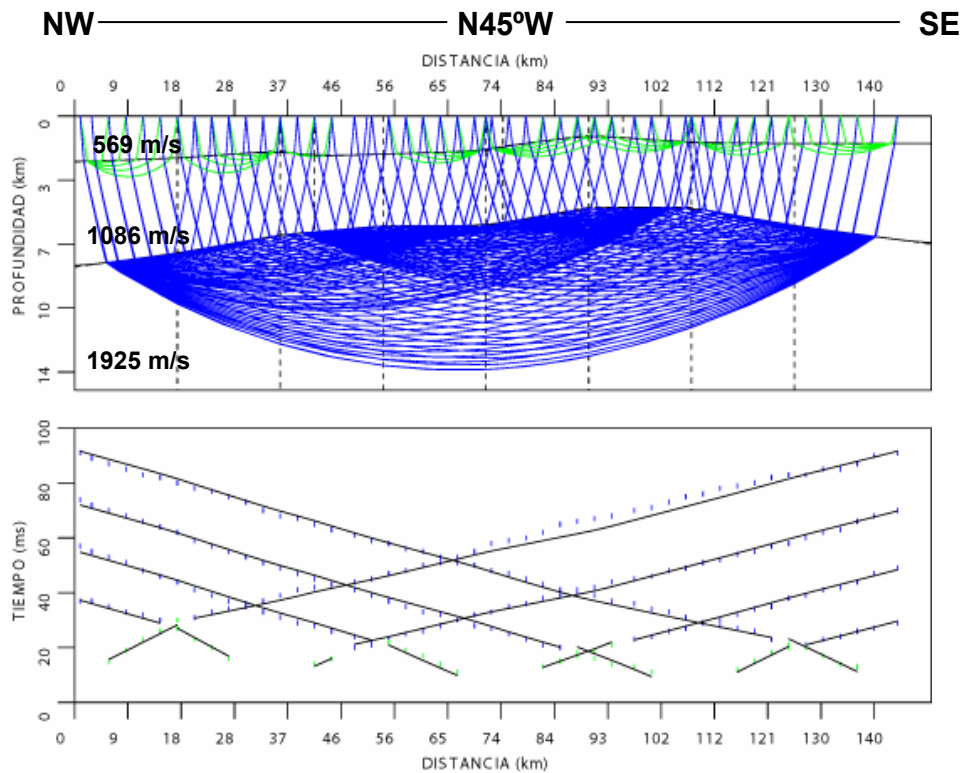
##### Tendido de refracción Nuevo Circo.

En las figuras 105 y 107 se observan los registros sísmicos en donde se identifican las llegadas de las ondas “P” “S” respectivamente.



**Figura 105.** Registro sísmico de onda “P” en el tendido de refracción Nuevo Circo (fuente sísmica ubicada a los 36 metros y las llegadas de ondas “P” se identifican en rojo).

Modelo 2D ondas “P”.



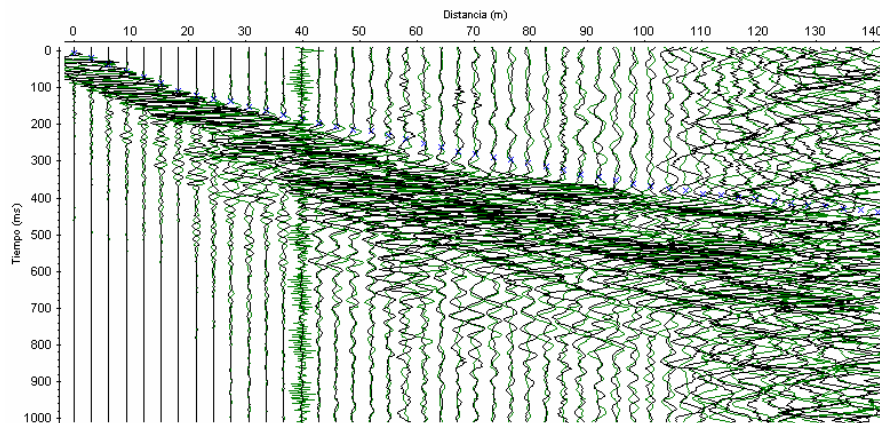
**Figura 106.** Modelo 2D para ondas “P”. Tendido de refracción Nuevo Circo.

Se interpretaron tres capas en el modelo 2D (figura 106), en los modelos 1D sólo se observaron dos capas, posiblemente porque el espesor de la primera capa es muy pequeño. Las capas están dispuestas de la siguiente manera:

Capa 1: Con velocidades que van desde los 400 hasta los 750 m/s (velocidad promedio de 569 m/s), con buzamiento hacia el noroeste hasta los noventa metros de tendido aproximadamente, luego comienza a buzarse hacia el sureste, el espesor de la capa varía desde los 1,05 metros hasta los 2,50 metros.

Capa 2: Las velocidades en esta capa están ubicadas entre los 900 hasta los 1300 m/s (velocidad promedio de 1086 m/s), se observa un buzamiento de la capa hacia el noroeste aproximadamente a partir de los noventa metros de tendido y luego comienza a buzarse hacia el sureste, teniendo un comportamiento similar a la capa superior, sólo que el ángulo de inclinación es un poco mayor en la segunda. Los espesores en esta capa se mantuvieron entre los 3,35 metros hasta los 5,75 metros.

Capa 3: Con rango de velocidades entre 1800 hasta los 2050 m/s (velocidad promedio de 1925 m/s).



**Figura 107.** Registro sísmico polarizado de ondas “S” en el tendido de refracción Nuevo Circo (fuente ubicada a los 0 metros y las llegadas de ondas “S” se identifica en azul).

Modelo 2D ondas “S”.

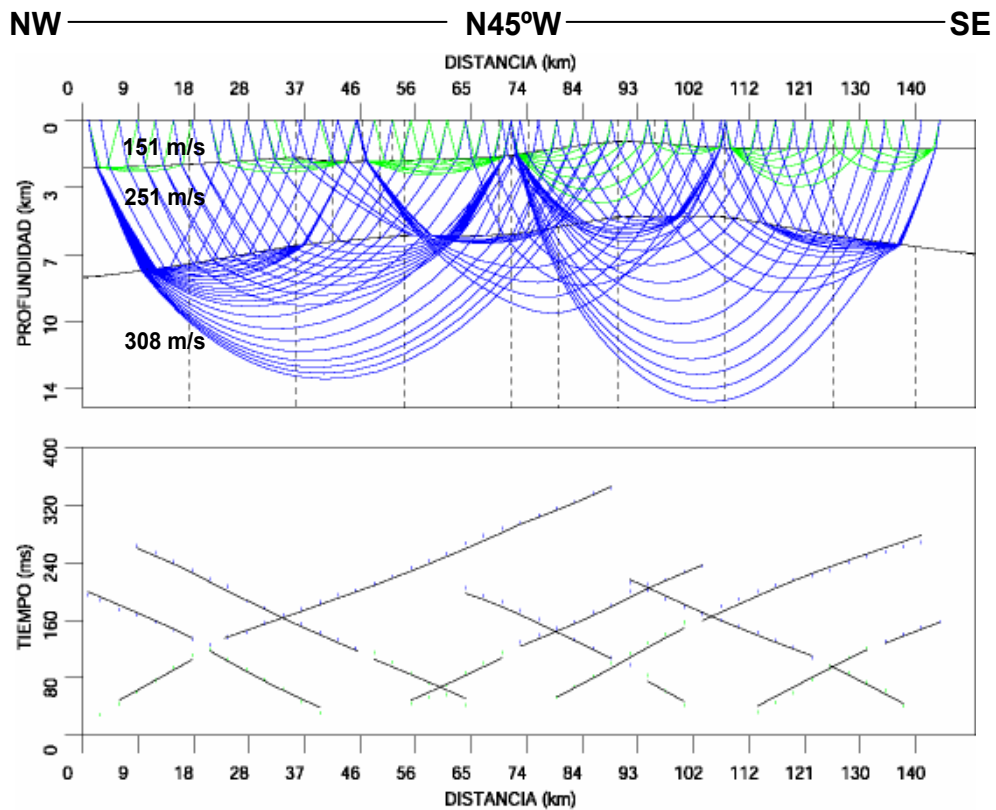


Figura 108. Modelo 2D para ondas “S”. Tendido de refracción Nuevo Circo.

De nuevo en los modelos 1D sólo se observaron dos capas y en el modelo 2D tres capas (figura 108), posiblemente por las causas mencionadas anteriormente. Las velocidades de las capas están dispuestas de la siguiente forma:

Capa 1: Con velocidades que van desde los 110 hasta los 210 m/s (velocidad promedio de 151 m/s), la geometría de las capas es similar al obtenido en el modelo 2D con ondas “P”.

Capa 2: Las velocidades en esta capa están ubicadas entre los 200 hasta los 300 m/s (velocidad promedio de 215 m/s), manteniendo la misma geometría que el interpretado en el modelo 2D para ondas “P”.

Capa 3: Con rango de velocidades entre 240 hasta los 350 m/s (velocidad promedio de 308 m/s).

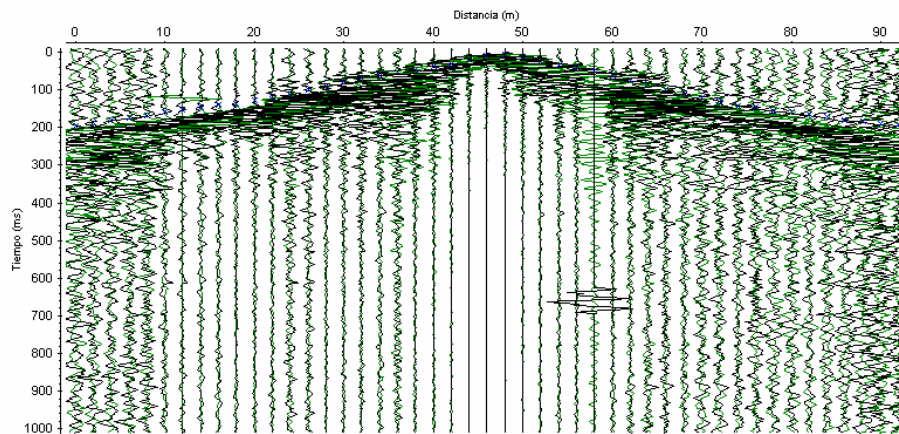
## Tendido de refracción Río Bravo.

Modelo 2D ondas “P”.

El modelo 2D para ondas “P” del tendido de refracción Río Bravo, no se pudo realizar debido al ruido presente en los registros sísmicos. A pesar de la utilización de diversos filtros la relación señal – ruido resultó ser muy baja.

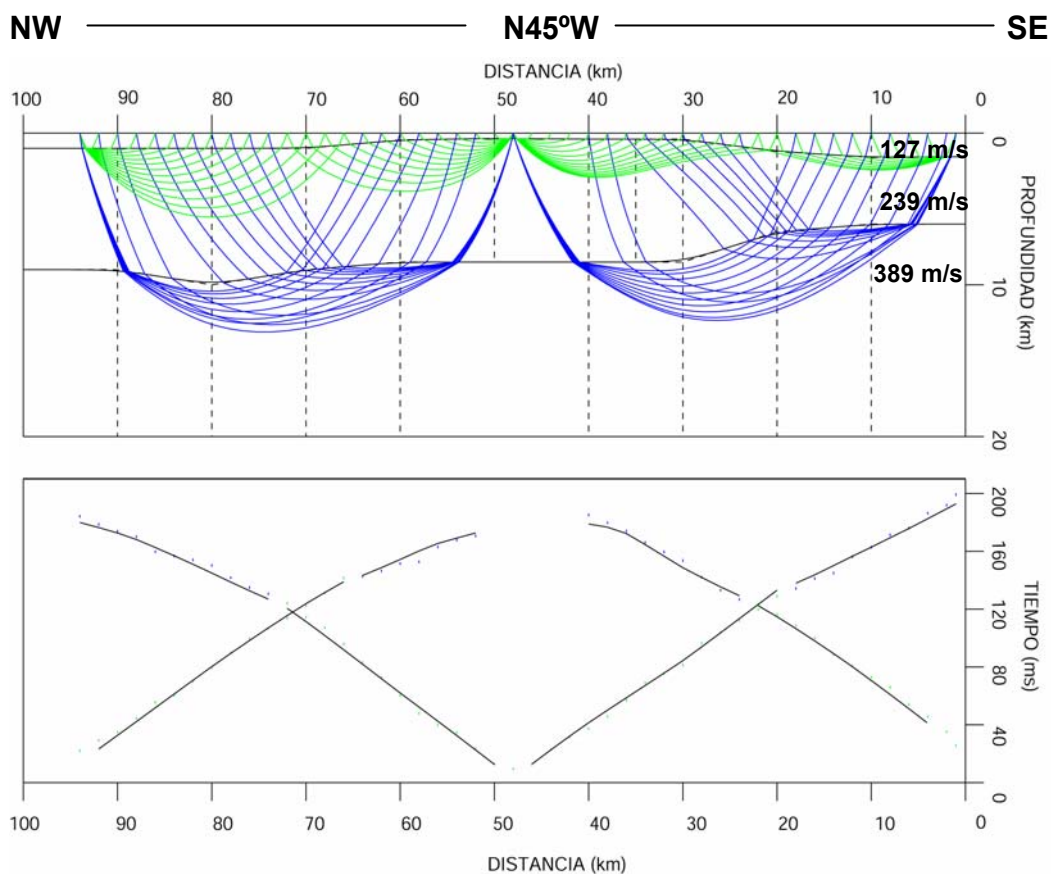
Modelo 2D ondas “S”.

Debido a la baja relación señal – ruido, la ubicación de las llegadas de las ondas “S” en los registros se pudieron localizar aproximadamente hasta 40 metros de distancia de los disparos, ya que de la misma manera que los registros adquiridos para ondas “P”, los de ondas “S” también fueron influenciados por el alto nivel de ruido (tráfico muy cercano). Debido a esto el modelo 2D se realizó solamente con las llegadas de ondas “S” que se pudieron determinar. El único registro en donde se lograron ubicar todas las llegadas es en el intermedio, es decir en el disparo a 46 metros (figura 109).



**Figura 109.** Registro sísmico polarizado de ondas “S” en el tendido de refracción Río Bravo (fuente ubicada a los 46 metros y las llegadas de ondas “S” se identifican en azul).





**Figura 110.** Modelo 2D de ondas “S”. Tendido de refracción Río Bravo.

De la misma manera que en el tendido anterior, en este se interpretaron tres capas en el modelo 2D, observándose en los modelos 1D sólo dos capas, posiblemente porque el espesor de la primera capa es muy pequeño. Las capas están dispuestas de la siguiente forma:

Capa 1: Con rango de velocidades entre 80 – 180 m/s (velocidad promedio de 127 m/s) Se observa un adelgazamiento en la capa entre los 30 a 60 metros aproximadamente del tendido, desde los veinte a treinta metros de tendido se observa un buzamiento suave hacia el sureste, luego se vuelve horizontal hasta el comienzo del tendido. En la otra mitad del tendido se observa que la capa se inclina suavemente hacia el noroeste a partir de los 60 metros aproximadamente hasta los setenta, luego se torna horizontal hasta llegar al final del perfil. La profundidad varía desde los 0,35 metros hasta 1,60 metros.

Capa 2: Las velocidades en esta capa se encontraron en el siguiente rango: 180 – 350 m/s (velocidad promedio de 239 m/s), en los primeros veinte metros aproximadamente la capa se mantiene relativamente horizontal, luego comienza a buzar suavemente hacia el noroeste entre los veinte y treinta metros del tendido, a partir de los cuarenta hasta los setenta metros aproximadamente la capa es horizontal, posteriormente entre los setenta a noventa metros más o menos se observa un pequeño plegamiento hacia abajo y hacia el final del tendido se mantiene horizontal, los espesores de esta capa están en el orden de los 4,4 – 9 metros.

Capa 3: Con rango de velocidades entre 300 – 500 m/s (velocidad promedio de 389 m/s).

<b>Tabla 15.</b> Velocidades de ondas “P” y “S” en base a mediciones sísmicas de refracción a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.			
<b>Localización</b>	<b>Profundidad (m)</b>	<b>Vp (m/s)</b>	<b>Vs (m/s)</b>
<b>Nuevo Circo</b>	0 – 1.8	400 – 750	110 – 210
	1.8 – 6.4	900 – 1300	200 – 300
	6.4 – 14	1800 – 2050	240 – 350
<b>Parque Central</b>	0 – 0.9	-----	80 – 180
	0.9 – 8.1	-----	180 – 350
	8.1 – 14	-----	300 – 500

#### 4.5 Sísmica de reflexión.

En la figura 111 se visualiza el registro sísmico de reflexión 2D obtenido en la futura estación Nuevo Circo.

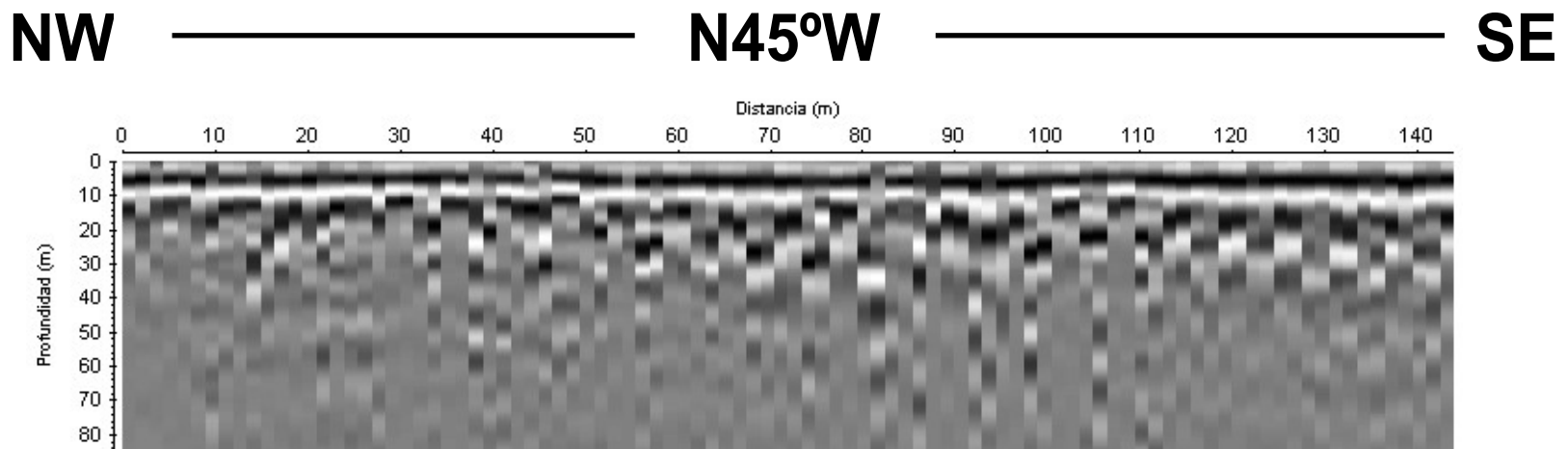


Figura 111. Registro sísmico de reflexión 2D.







En el tendido se observan tres reflectores relativamente horizontales. El primero se puede asociar con la capa de baja velocidad arrojada por las ondas refractadas (de color negro). Se observa que la impedancia acústica entre éste y el reflector ubicado inmediatamente por debajo de él es bastante fuerte (color blanco), ya que la amplitud en estas capas es mayor con respecto a las otras. Se podría interpretar un último reflector de color negro, sin embargo el mismo no posee buena continuidad y desaparece constantemente a lo largo del perfil. Aproximadamente a los cuarenta metros de profundidad se aprecia un posible reflector (color blanco), el cual cambia lateralmente de espesor, posiblemente causado por contrastes litológicos laterales, sin embargo la resolución en esta parte de la sección sísmica no es lo suficientemente buena como para asegurar esta interpretación. En la parte inferior de la sección se observa mucho ruido, posiblemente causado en parte por la llegada de las ondas al basamento metamórfico.

#### 4.6 Integración de los métodos

Los registros sísmicos adquiridos en los pozos mediante la técnica “downhole” se correlacionaron con los registros del radar de pozos y sólo la mitad se pudo correlacionar con mediciones de SPT. Por otro lado la tomografía y el “crosshole” se correlacionaron con el tendido de refracción llevado a cabo en las cercanías de Parque Central (tendido Río Bravo) y con los pozos Río Bravo 1 y Río Bravo 2 y por último el tendido de refracción realizado en el Nuevo Circo de Caracas se comparó con el tendido de reflexión y con el pozo Hotel ABC por su cercanía.

La leyenda empleada para la interpretación litológica de las capas se observa a continuación:

### *LEYENDA*

	<b><i>RELLENO</i></b>
	<b><i>SED. ARCILLOSOS</i></b>
	<b><i>SED. ARENOSOS</i></b>
	<b><i>SED. LIMOSOS</i></b>
	<b><i>SUELO DE METEORIZACIÓN DE ROCA</i></b>
	<b><i>MACIZO ROCOSO</i></b>

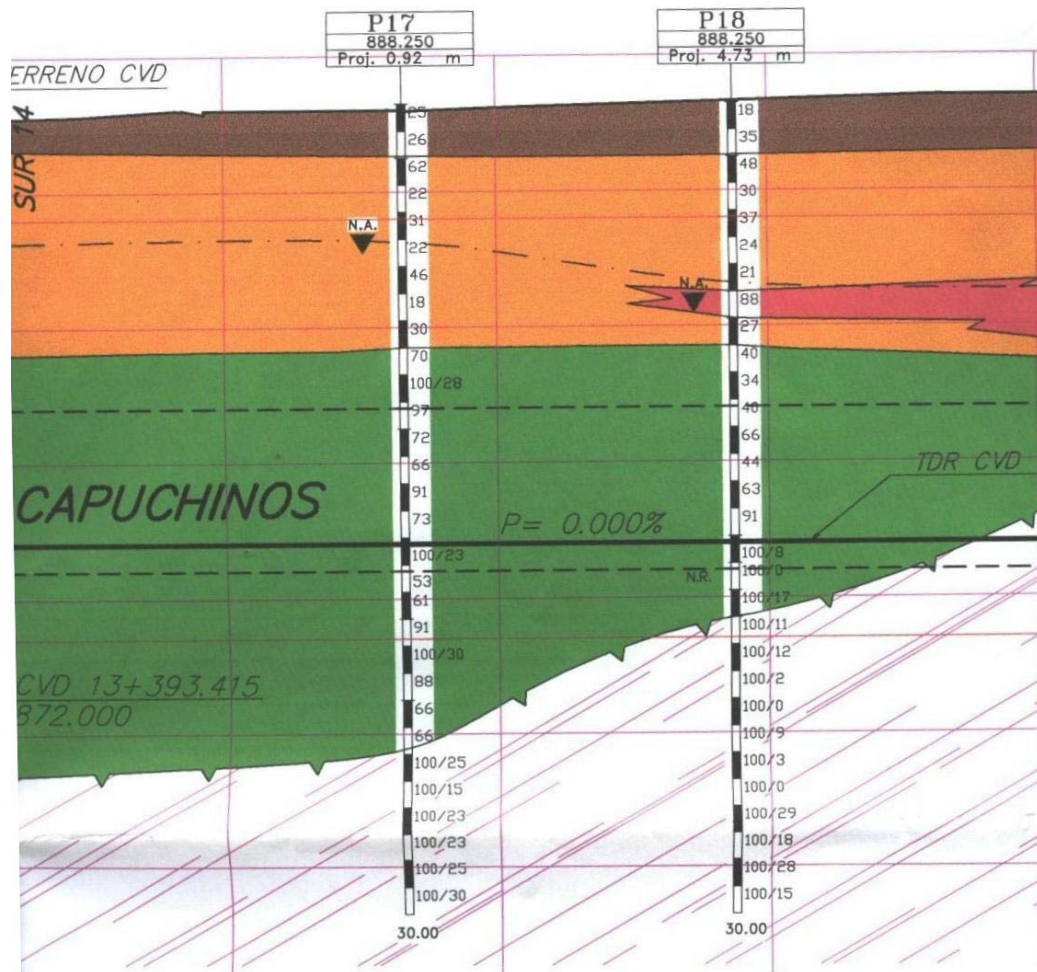
#### 4.6.1 Avenida San Martín

##### Pozo San Vicente 1

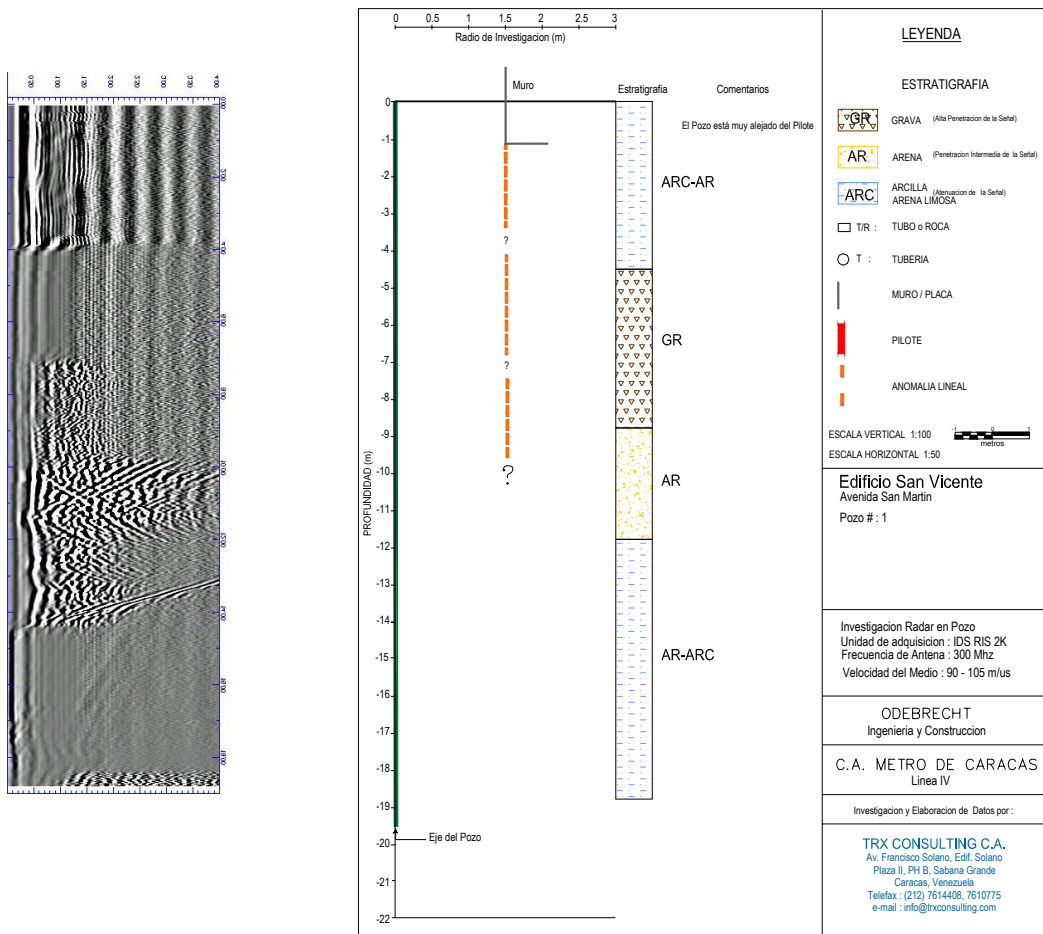
Nivel freático (TRX Consulting): 4,5 metros de profundidad.

Pozo geotécnico correlacionado: P-17.

La ubicación del pozo se indica en la figura 35.

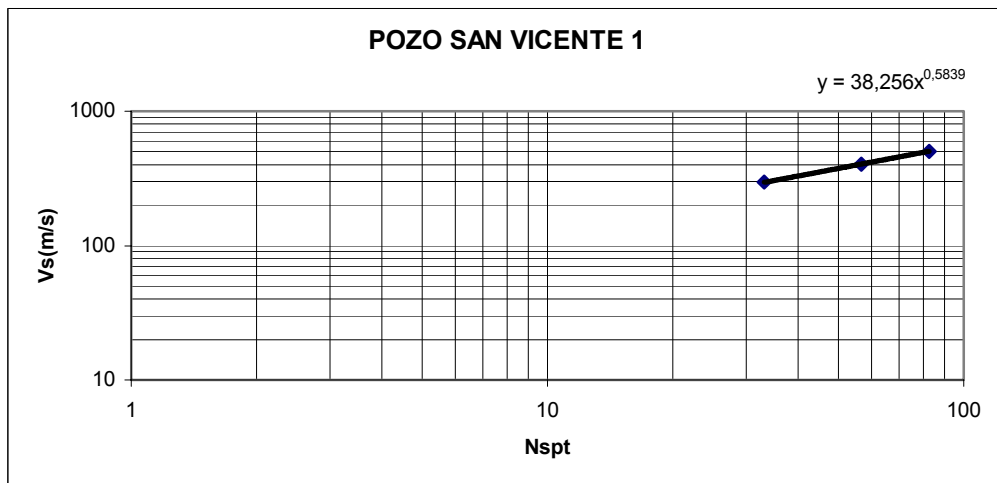
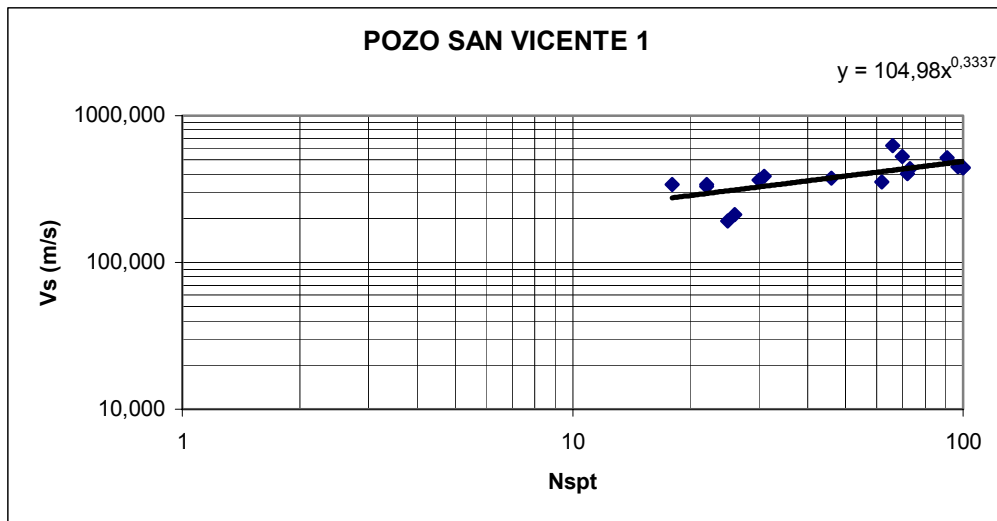


**Figura 112.** Perfil en el que se aprecia el número de golpes realizados durante el  $N_{SPT}$  tanto para el pozo P-17 como para el pozo cercano y su respectiva interpretación litológica.



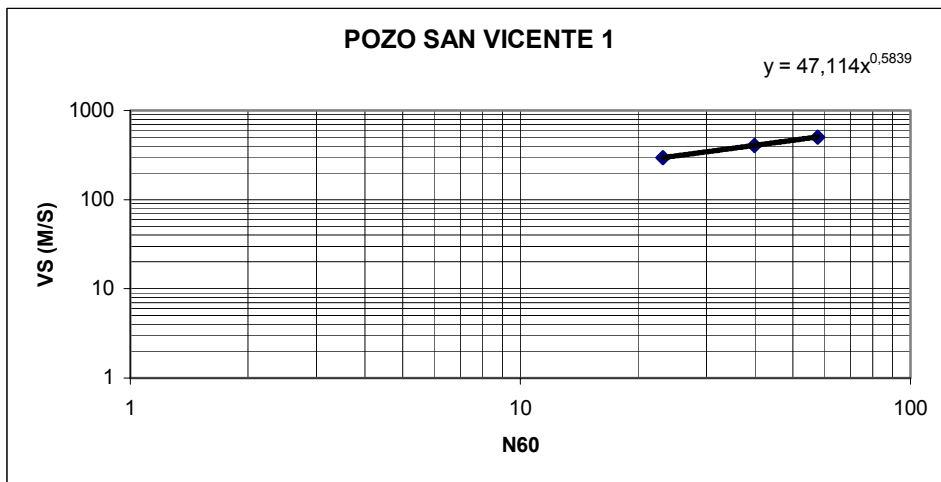
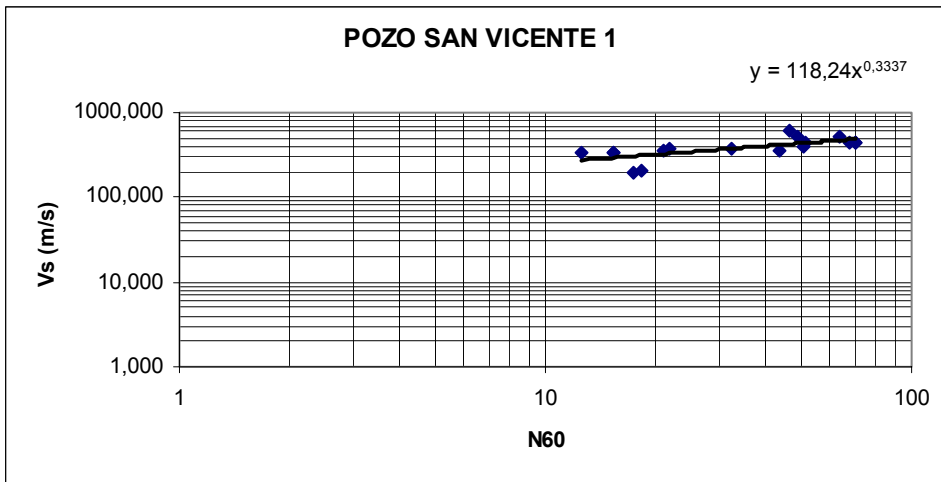
**Figura 113.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo San Vicente 1.

En la figura 114 se observa la relación  $N_{SPT} - V_s$ , y en la figura 115 se visualiza la relación  $N_{60} - V_s$  para el pozo San Vicente 1 y el pozo P-17.



**Figura 114.** Gráficos de las relaciones  $N_{SPT} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo San Vicente 1 y el pozo P-17.





**Figura 115.** Gráficos de las relaciones  $N_{60} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo San Vicente 1 y el pozo P-17.

A partir de las interpretaciones de los registros del SPT y del radar de pozo, se realizaron tablas para cada uno de los pozos en los que se muestra la litología interpretada en cada una de las capas, un ejemplo de esto se observa en la tabla 16.

**Tabla 16.** Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones  $N_{SPT}/V_s$  y  $N_{60}/V_s$  entre los pozos San Vicente 1 y P-17.

Prof. (m)	Litología Radar	Litología Pozo (P-17)	San Vicente 1 ( $V_s$ )	$N_{SPT}$	$N_{SPT}/V_s$	$N_{60}$	$N_{60}/V_s$
0--1	Arcilla, arena limosa	Relleno	Capa 1 (296 m/s)	33	33/296	23	23/296
1--2							
2--3							
3--4							
4--5	Grava	Arena	Capa 2 (403 m/s)	57	57/403	40	40/403
5--6							
6--7							
7--8							
8--9	Arena	Meteorización de rocas	Capa 3 (504 m/s)	83	83/504	58	58/504
9--10							
10--11							
11--12							
12--13	Arcilla, arena limosa	Meteorización de rocas	Capa 3 (504 m/s)	83	83/504	58	58/504
13--14							
14--15							
15--16							
16--17	Arcilla, arena limosa	Meteorización de rocas	Capa 3 (504 m/s)	83	83/504	58	58/504
13--14							
14--15							
15--16							

A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron tres capas, el SPT arrojó también tres capas y el radar de pozo cuatro capas.

Al correlacionar el radar con el SPT se observa que la primera capa del radar tiene su base dos metros más abajo que la del SPT, la base de la segunda capa coincide en las dos técnicas y la tercera y cuarta capa se ven como una sola en el SPT.

La correlación entre el radar de pozo y el “downhole” nos muestra una primera capa en la sísmica con cinco metros de espesor y en el radar la capa tiene cuatro metros de espesor; la segunda capa en la sísmica se pudiera relacionar con la segunda y tercera capa del radar de pozo, aunque la sísmica ubicó esta capa un

metro más abajo, por último la tercera capa interpretada en el “downhole” se puede relacionar con la cuarta capa del radar, aunque en la sísmica se observa el tope de la capa un metro de profundidad más abajo.

Al correlacionar el pozo 17 en el que se realizaron mediciones SPT y el pozo San Vicente 1 en el que se llevó a cabo mediciones “downhole” se interpretan la misma cantidad de capas, aunque el tope y la base de estas capas están desfasadas levemente, en la sísmica la capa 1 tiene su base a los cinco metros de profundidad y en el SPT se localizó a los dos metros; la base de la segunda capa interpretada en la sísmica se observó a los trece metros de profundidad y a partir del SPT a los nueve metros de profundidad; por lo que la última capa tiene localizada su tope en la sísmica a cuatro metros más de profundidad que en el SPT.

En el análisis estadístico de correlación entre la velocidad de ondas de corte y el  $N_{60}$  para el pozo San Vicente 1 se determinó el múltiple R, el múltiple cuadrado R, el múltiple cuadrado ajustado y el error normal de estimación. El coeficiente, error estándar, coeficiente estándar, la tolerancia, el coeficiente t y la probabilidad de error en las dos colas (tanto para el  $N_{60}$  como para la constante) se observa en la tabla 17. El análisis de varianza se observa en la tabla 18 y los gráficos obtenidos en el mencionado análisis se observan en la figura 116.

La variable dependiente es Vs.

El múltiple R es 0.668

El múltiple cuadrado R es 0.447

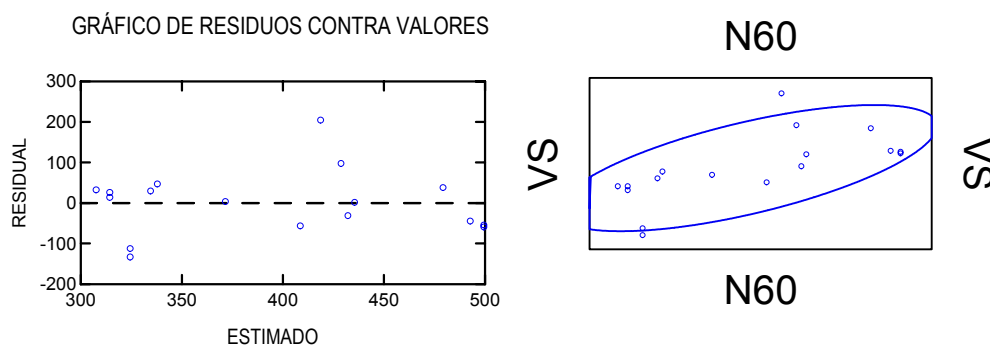
El múltiple cuadrado ajustado es 0.410

El error normal estimado es 81.951

<b>Tabla 17. Resultados del análisis estadístico en el pozo San Vicente 1.</b>						
Efecto	Coeficiente	Error Estándar	Coeficiente Estándar	Tolerancia	t	P (2Colas)
Constante	263.929	42.713	0.000	.	6.179	0.000
$N_{60}$	3.364	0.966	0.668	1.000	3.481	0.003

<b>Tabla 18.</b> Análisis de varianza en el pozo San Vicente 1.					
Fuente	Suma de los cuadrados	df	Cuadrado promedio	Coefficiente F	P
Regresión	81373.525	1	81373.525	12.117	0.003
Residual	100738.710	15	6715.914		

La estadística de Durban – Watson es de 1.280



**Figura 116.** Izquierda: gráfico de residuos contra valores en el pozo San Vicente 1.  
Derecha: elipse de confianza obtenida en el pozo San Vicente 1.

Al observar el múltiple cuadrado ajustado y el error normal de estimación se podría pensar que la relación  $N_{60} - V_s$  en este pozo no está ajustando bien, sin embargo al recordar que estamos trabajando con una probabilidad teórica de datos poco confiables menor que 0.05% y al comparar este valor teórico con la probabilidad en dos colas (P 2 colas, en la tabla 17) se observa que la probabilidad en la constante y en el  $N_{60}$  es menor que el teórico, es decir  $0.000 < 0.050$  y  $0.003 < 0.050$ , por lo que se infiere que la relación  $N_{60} - V_s$  en este pozo es satisfactoria. La ecuación de la recta de mejor ajuste viene dada por el coeficiente en el  $N_{60}$  (pendiente de la recta) y en la constante (punto de corte), es decir:

$$V_s = 3.364 \cdot N_{60} + 263.929$$

Para verificar el hecho de que la relación  $N_{60} - V_s$  en este pozo es significativa, se comparó la probabilidad de datos poco confiables obtenidos en el análisis de varianza (tabla 18) con la probabilidad teórica mencionada anteriormente, es decir  $0.003 < 0.050$ . Por lo que se confirma el buen resultado de la relación  $N_{60} - V_s$  en el pozo San Vicente 1.

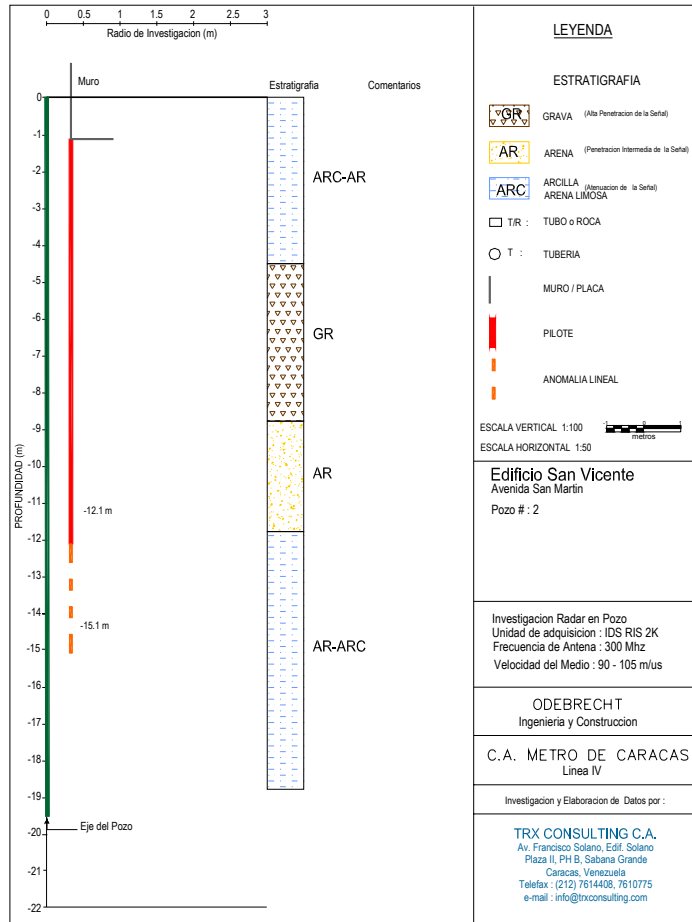
Al observar el gráfico de residuos contra valores y la elipse de confianza (figura 116) se observa que en el primero, los valores residuales no varían en gran medida con respecto a los valores de  $V_s$  estimados y en la elipse de confianza se visualiza a la gran mayoría de los datos dentro de la elipse y sólo dos de los valores están por fuera (sin embargo están muy cercanos de la elipse); por lo que se concluye que la relación  $N_{60} - V_s$  obtenida para el pozo San Vicente 1 es bastante satisfactoria.

## Pozo San Vicente 2

Nivel freático (TRX Consulting): 4,4 metros de profundidad.

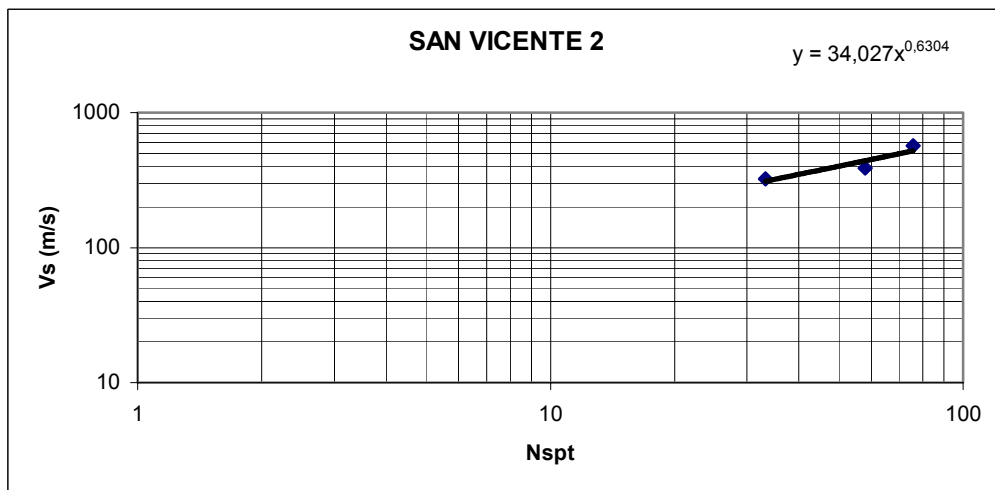
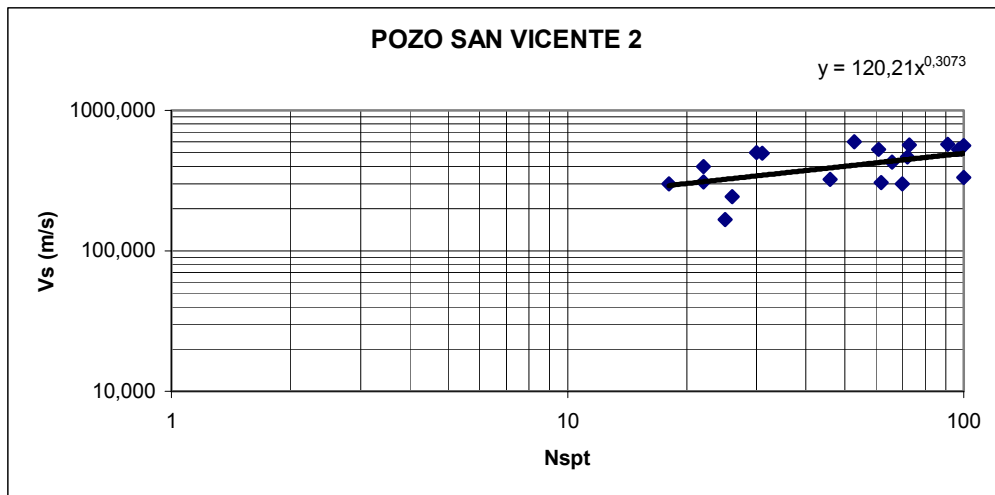
La ubicación del pozo se indica en la figura 35.

Se correlacionó el mismo pozo con mediciones  $N_{SPT}$  (P-17), el perfil interpretado por el SPT se observa en la figura 112.

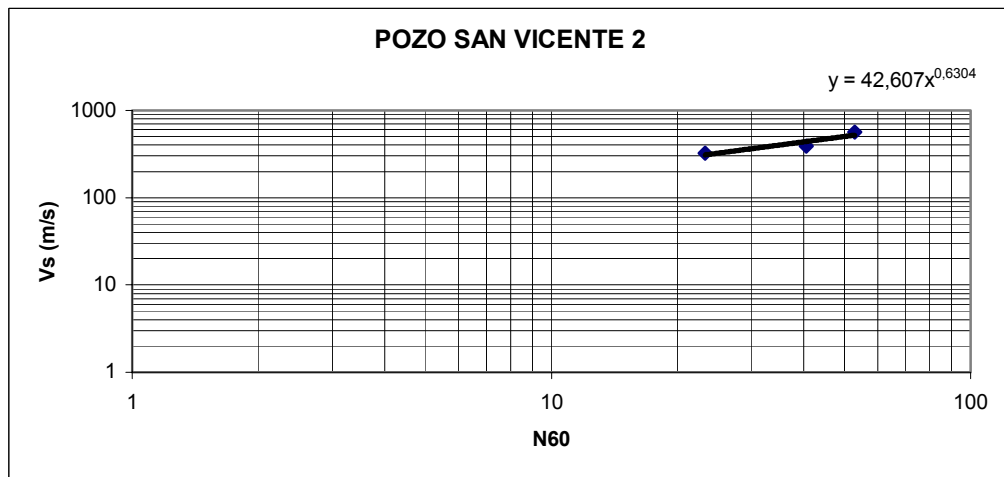
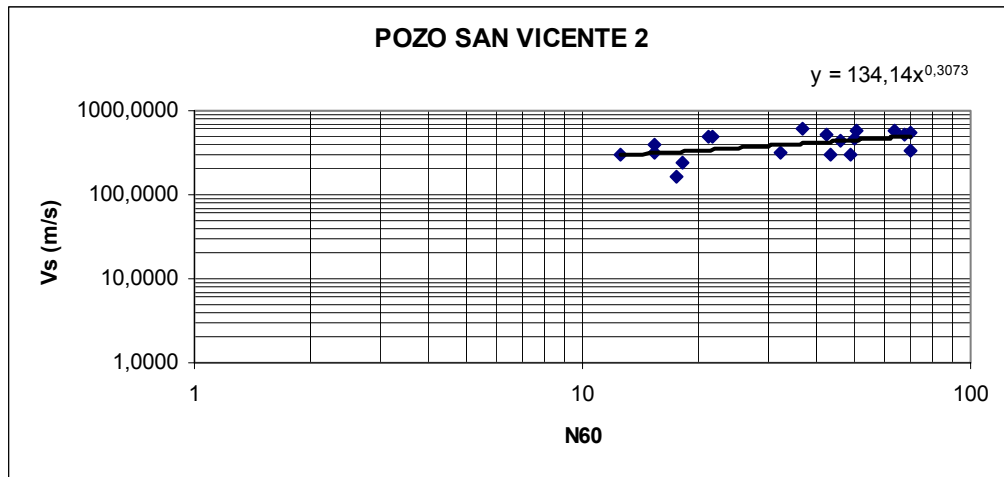


**Figura 117.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el Pozo San Vicente 2.

En la figura 118 se observa la relación  $N_{SPT} - V_s$  y en la figura 119 se visualiza la relación  $N_{60} - V_s$  para los pozos San Vicente 2 y P-17.



**Figura 118.** Gráficos de las relaciones  $N_{SPT} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo San Vicente 2 y el pozo P-17.



**Figura 119.** Gráficos de las relaciones  $N_{60} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo San Vicente 2 y el pozo P-17.



**Tabla 19.** Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones  $N_{SPT}/V_s$  y  $N_{60}/V_s$  entre los pozos San Vicente 2 y P-17.

Prof. (m)	Litología Radar	Litología Pozo (P-17)	San Vicente 2 ( $V_s$ )	$N_{SPT}$	$N_{SPT}/V_s$	$N_{60}$	$N_{60}/V_s$
0--1	Arcilla, arena limosa	Relleno	Capa 1 (322 m/s)	33	33/322	23	23/322
1--2							
2--3							
3--4							
4--5	Grava	Arena					
5--6							
6--7							
7--8							
8--9							
9--10	Arena		Capa 2 (388 m/s)	58	58/388	41	41/38
10--11							
11--12	Arcilla, arena limosa	Meteorización de rocas	Capa 3 (566 m/s)	76	76/566	53	53/566
12--13							
13--14							
14--15							
15--16							
16--17							
17--18							
18--19							

A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron tres capas, el SPT arrojó también tres capas y el radar de pozo cuatro capas.

Al correlacionar el radar con el SPT se observa que la primera capa del radar tiene su base dos metros más abajo que la del SPT, la base de la segunda capa coincide en las dos técnicas y la tercera y cuarta capa se ven como una sola en el SPT.

La correlación entre el radar de pozo y el “downhole” nos muestra una primera capa en la sísmica con cinco metros de espesor y en el radar la capa tiene cuatro metros de espesor; la segunda capa en la sísmica se pudiera relacionar con la segunda y tercera capa del radar de pozo, aunque la sísmica ubicó el tope de esta capa un metro más abajo y la base de la misma se localizó cinco metros más abajo en relación al radar, por último la tercera capa interpretada con el

Se observan la misma cantidad de capas, aunque el tope de la tercera está un metro más abajo en el pozo San Vicente 2, los valores de ondas “P” y “S” en ambos pozos son bastantes similares en las tres capas interpretadas; por lo que se infiere que existe continuidad entre las capas.

En el análisis estadístico de correlación entre la velocidad de ondas de corte y el  $N_{60}$  para el pozo San Vicente 2 se determinó el múltiple R, el múltiple cuadrado R, el múltiple cuadrado ajustado y el error normal de estimación. El coeficiente, error estándar, coeficiente estándar, la tolerancia, el coeficiente t y la probabilidad de error en las dos colas (tanto para el  $N_{60}$  como para la constante) se observa en la tabla 21. El análisis de varianza se observa en la tabla 22 y los gráficos obtenidos en el mencionado análisis se observan en la figura 120.

La variable dependiente es Vs.

El múltiple R es 0.487

El múltiple cuadrado R es 0.237

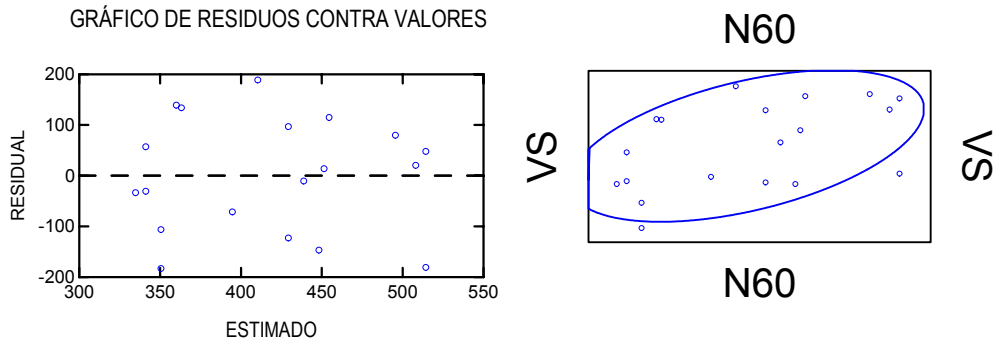
El múltiple cuadrado ajustado es 0.192

El error normal estimado es 116.278

<b>Tabla 21. Resultados del análisis estadístico en el pozo San Vicente 2.</b>						
Efecto	Coeficiente	Error Estándar	Coeficiente Estándar	Tolerancia	t	P (2Colas)
Constante	293.954	59.959	0.000	.	4.903	0.000
$N_{60}$	3.149	1.369	0.487	1.000	2.299	0.034

<b>Tabla 22. Análisis de varianza en el pozo San Vicente 2.</b>					
Fuente	Suma de los cuadrados	df	Cuadrado promedio	Coeficiente F	P
Regresión	71479.130	1	71479.130	5.287	0.034
Residual	229849.501	17	13520.559		

La estadística de Durban – Watson es de 1.179



**Figura 120.** Izquierda: gráfico de residuos contra valores en el pozo San Vicente 2.  
Derecha: elipse de confianza obtenida en el pozo San Vicente 2.

Se observa que la probabilidad de datos poco confiables en la constante y en el  $N_{60}$  es menor que el teórico, es decir  $0.000 < 0.050$  y  $0.034 < 0.050$ , por lo que se tiene que el coeficiente de  $N_{60}$  es regularmente significativo y por lo tanto la relación  $N_{60} - V_s$  en este pozo es regular. La ecuación de la recta de mejor ajuste viene dada por:  $V_s = 3.149 \cdot N_{60} + 293.954$ .

Se comparó la probabilidad de datos poco confiables obtenidos en el análisis de varianza (tabla 22) con el error teórico, es decir  $0.034 < 0.050$ . Y al observar que el coeficiente R no es significativo se confirma el resultado regular de la relación  $N_{60} - V_s$  en el pozo San Vicente 2.

Al observar el gráfico de residuos contra valores y la elipse de confianza (figura 120) se observa que en el primero, los valores residuales no varían en gran medida con respecto a los valores de  $V_s$  estimados y en la elipse de confianza se visualiza a la gran mayoría de los datos dentro de la elipse y sólo dos de los valores está por fuera (cercanos a la elipse); por lo que se concluye que la relación  $N_{60} - V_s$  obtenida para el pozo San Vicente 2 es aceptable.

“downhole” se puede relacionar con la cuarta capa del radar, aunque en la sísmica se observa el tope de la capa dos metros de profundidad más abajo.

Al correlacionar el pozo 17 en el que se realizaron mediciones SPT y el pozo San Vicente 2 en el que se llevó a cabo mediciones “downhole” se interpretan la misma cantidad de capas, aunque el tope y la base de estas capas estuvieron desfasadas, la capa 1 tiene su base en la sísmica a los cinco metros de profundidad y en el SPT se localizó a los dos metros; la base de la segunda capa interpretada en la sísmica se observó a los catorce metros de profundidad y en el SPT a los nueve metros de profundidad; por lo que la última capa tiene localizada su tope en la sísmica a cinco metros más de profundidad que en el SPT. Debido a la cercanía entre los pozos San Vicente 1 y San Vicente 2 las interpretaciones sísmicas respectivas son similares (tabla 20).

**Tabla 20.** Comparación de las interpretaciones sísmicas entre los pozos San Vicente 1 y 2, los cuales están distanciados aproximadamente diez metros (ver figura 35).

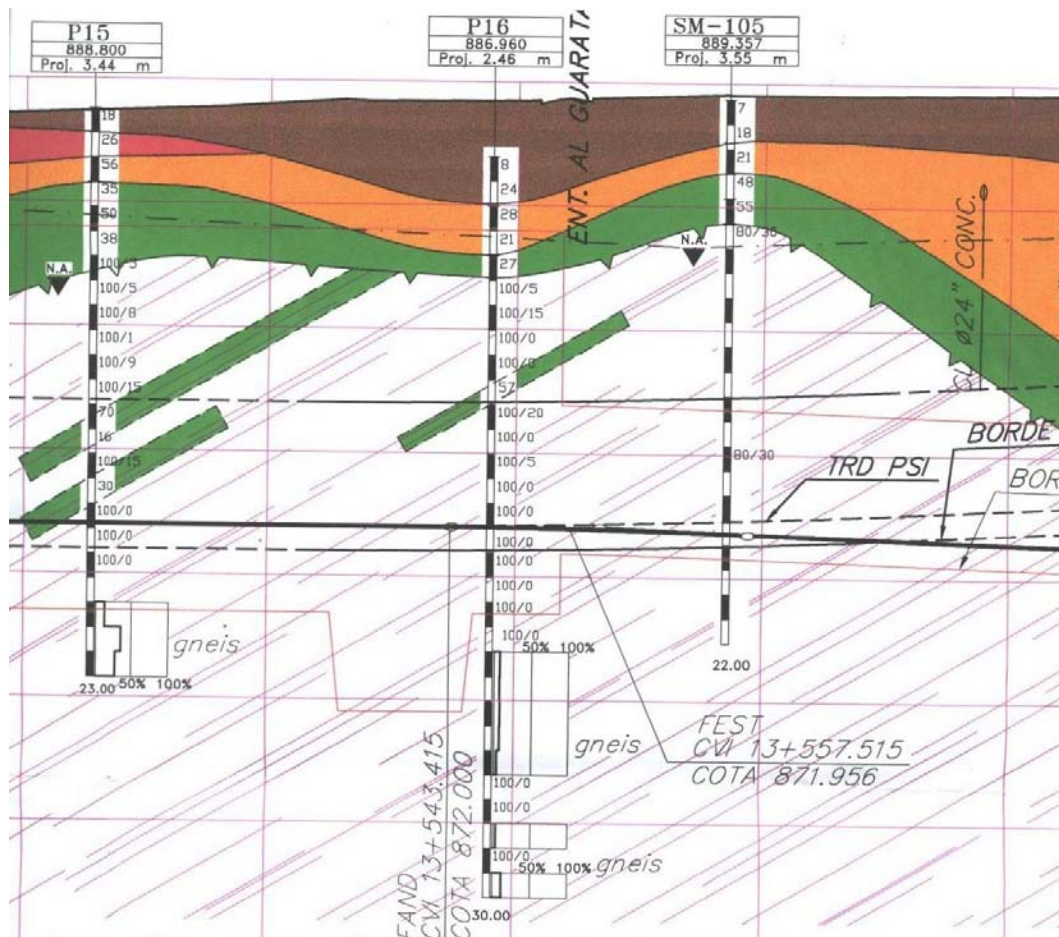
Intervalos (m)	San Vicente 1 (Vp – Vs) m/s	San Vicente 2 (Vp – Vs) m/s
0--1	Capa 1 (713 – 296)	Capa 1 (708 – 322)
1--2		
2--3		
3--4		
4--5		
5--6	Capa 2 (1249 – 403)	Capa 2 (1080 – 388)
6--7		
7--8		
8--9		
9--10		
10--11		
11--12		
12--13	Capa 3 (1621 – 504)	Capa 3 (1700 – 566)
13--14		
14--15		
15--16	???????	
16--17		
17--18		
18--19		

## Pozo Royal

Nivel freático (TRX Consulting): 3,5 metros de profundidad.

Pozo geotécnico correlacionado: SM-105.

La ubicación del pozo se indica en la figura 35.



**Figura 121.** Perfil en el que se aprecia el número de golpes realizados durante el  $N_{SPT}$  tanto para el pozo SM-105 como para los pozos cercanos y su respectiva interpretación litológica.

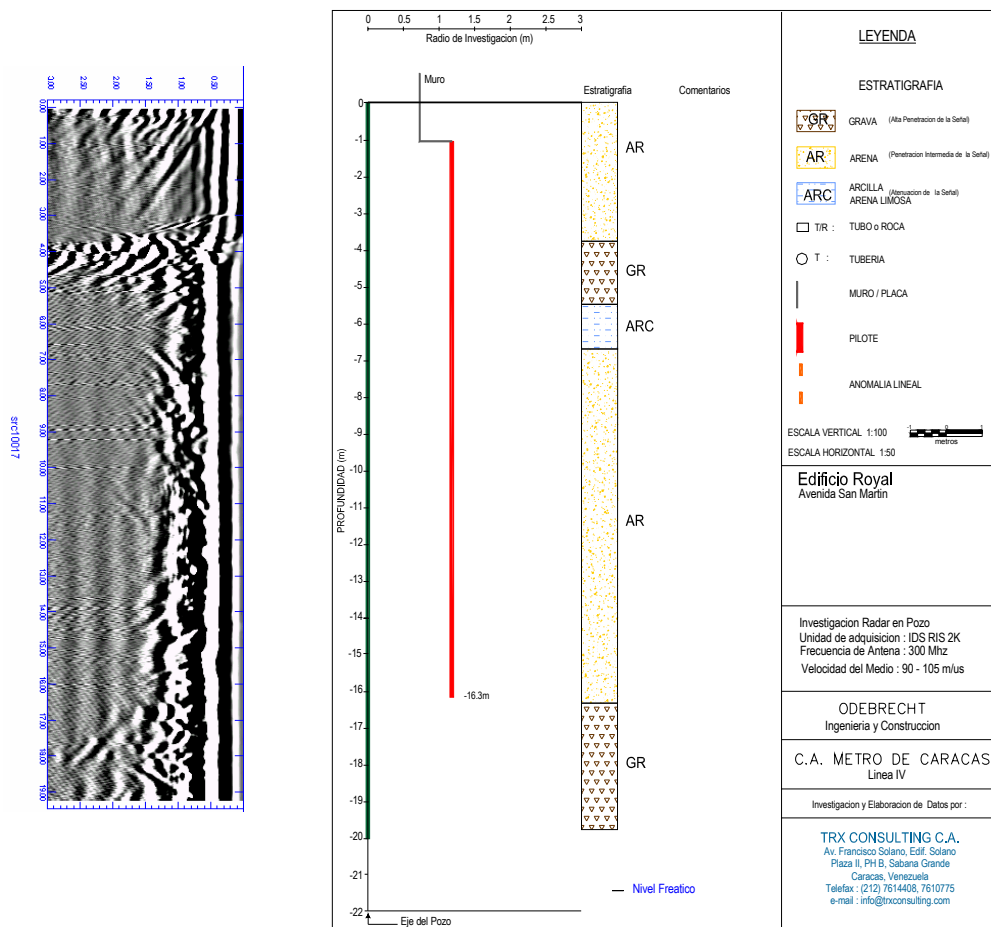
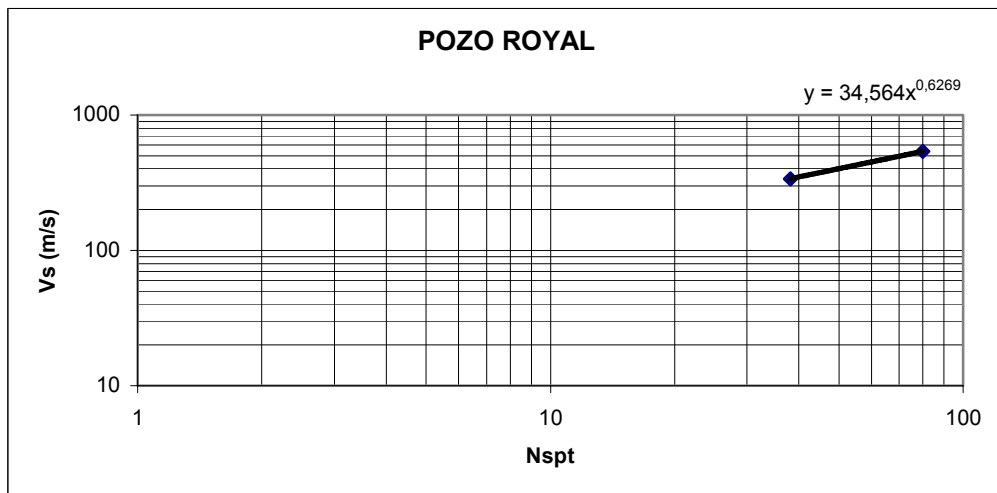
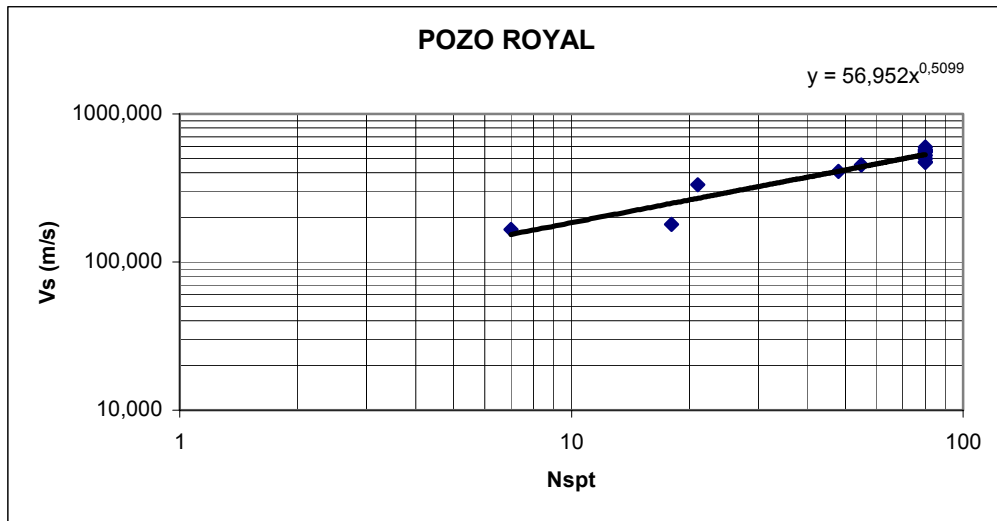
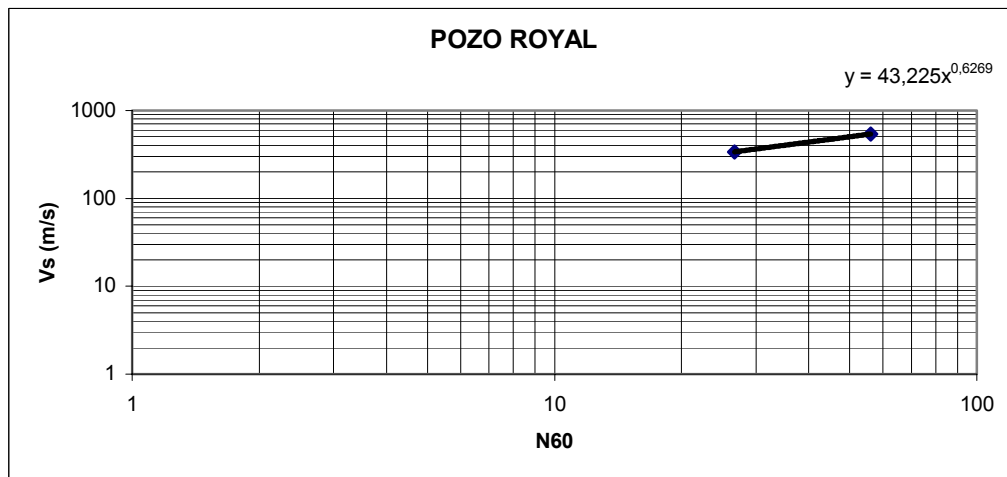
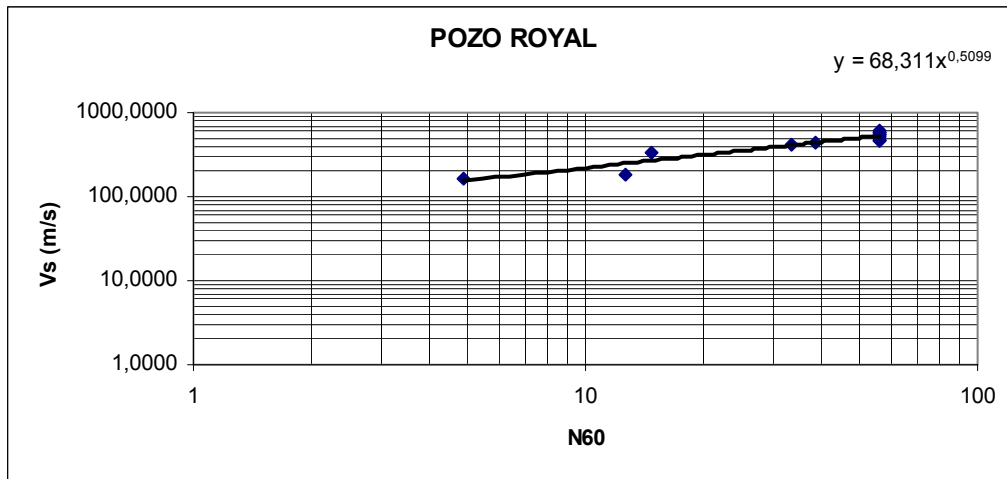


Figura 122. Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Royal.

En la figura 123 se observa la relación  $N_{SPT} - V_s$  y en la figura 124 se visualiza la relación  $N_{60} - V_s$  para el pozo Royal y el pozo SM-105.



**Figura 123.** Gráficos de las relaciones  $N_{SPT} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo Royal y el pozo SM-105.



**Figura 124.** Gráficos de las relaciones  $N_{60} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo Royal y el pozo SM-105.



**Tabla 23.** Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones  $N_{SPT}/V_s$  y  $N_{60}/V_s$  entre los pozos Royal y SM-105.

Prof. (m)	Litología Radar	Litología Pozo (SM-105)	Royal ( $V_s$ )	$N_{SPT}$	$N_{SPT}/V_s$	$N_{60}$	$N_{60}/V_s$
0--1	Arena	Relleno	Capa 1 (339 m/s)	38	38/339	27	27/339
1--2		Arena					
2--3		Meteorización de rocas					
3--4							
4--5							
5--6	Arcilla, arena limosa	Macizo Rocososo	Capa 2 (539 m/s)	80	80/539	56	56/539
6--7							
7--8							
8--9							
9--10							
10--11							
11--12							
12--13							
13--14	Arena						

A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron dos capas, el SPT arrojó cuatro capas al igual que el radar de pozo.

Al correlacionar el radar con el SPT se observa que la primera capa del radar tiene su base cuatro metros más abajo que la del SPT, la base de la segunda y tercera capa están ubicadas dos metros más abajo en el radar y la cuarta capa se ubica un metro más abajo en el radar.

La correlación entre el radar de pozo y el “downhole” nos muestra una primera capa en la sísmica con seis metros de espesor, por lo que las tres primeras capas arrojadas por el radar se ven como una en la sísmica; la segunda capa en la sísmica coincide con la cuarta capa del radar de pozo.

Al correlacionar el pozo SM-105 en el que se realizaron mediciones SPT y el pozo Royal en el que se llevó a cabo mediciones “downhole” se observa que las tres primeras capas del SPT se ven como una en la sísmica, aunque el tope de la segunda capa de la sísmica se encuentra a un metro más de profundidad.

En el análisis estadístico de correlación entre la velocidad de ondas de corte y el  $N_{60}$  para el pozo Royal se determinó el múltiple R, el múltiple cuadrado R, el múltiple cuadrado ajustado y el error normal de estimación. El coeficiente, error estándar, coeficiente estándar, la tolerancia, el coeficiente t y la probabilidad de datos poco confiables en las dos colas (tanto para el  $N_{60}$  como para la constante) se observa en la tabla 24. El análisis de varianza se observa en la tabla 25 y los gráficos obtenidos en el mencionado análisis se observan en la figura 125.

La variable dependiente es Vs.

El múltiple R es 0.942

El múltiple cuadrado R es 0.888

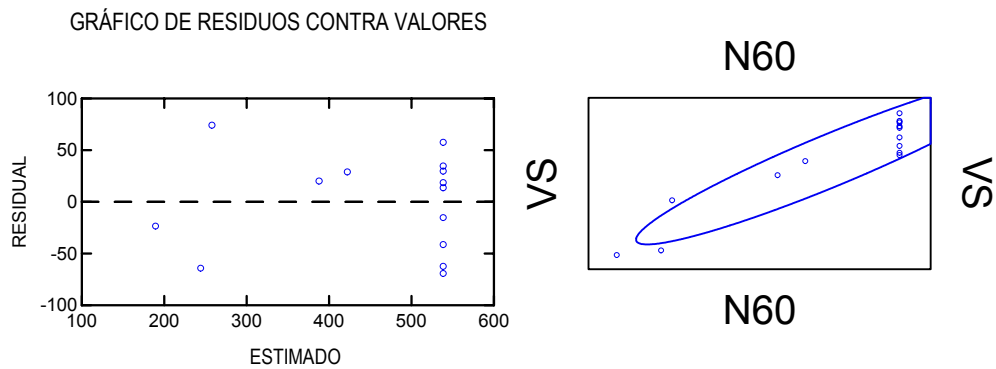
El múltiple cuadrado ajustado es 0.879

El error normal estimado es 48.295

<b>Tabla 24. Resultados del análisis estadístico en el pozo Royal.</b>						
Efecto	Coeficiente	Error Estándar	Coeficiente Estándar	Tolerancia	t	P (2Colas)
Constante	155.361	33.174	0.000	.	4.683	0.001
$N_{60}$	6.841	0.701	0.942	1.000	9.754	0.000

<b>Tabla 25. Análisis de varianza en el pozo Royal.</b>					
Fuente	Suma de los cuadrados	df	Cuadrado promedio	Coeficiente F	P
Regresión	221888.040	1	221888.040	95.131	0.000
Residual	27989.388	12	2332.449		

La estadística de Durban – Watson es de 1.344



**Figura 125.** Izquierda: gráfico de residuos contra valores en el pozo Royal.  
Derecha: elipse de confianza obtenida en el pozo Royal.

La probabilidad de datos poco confiables en la constante y en el  $N_{60}$  es menor que el teórico, ya que  $0.001 < 0.005$  y  $0.000 < 0.050$ , por lo que se infiere que la relación  $N_{60} - V_s$  en este pozo es satisfactoria. La ecuación de la recta de mejor ajuste viene dada por:  $V_s = 6.841 * N_{60} + 155.361$ .

La probabilidad de datos poco confiables obtenidos en el análisis de varianza (tabla 25) se comparó con la probabilidad teórica, es decir  $0.000 < 0.050$ . Por lo que se confirma el buen resultado de la relación  $N_{60} - V_s$  en el pozo Royal.

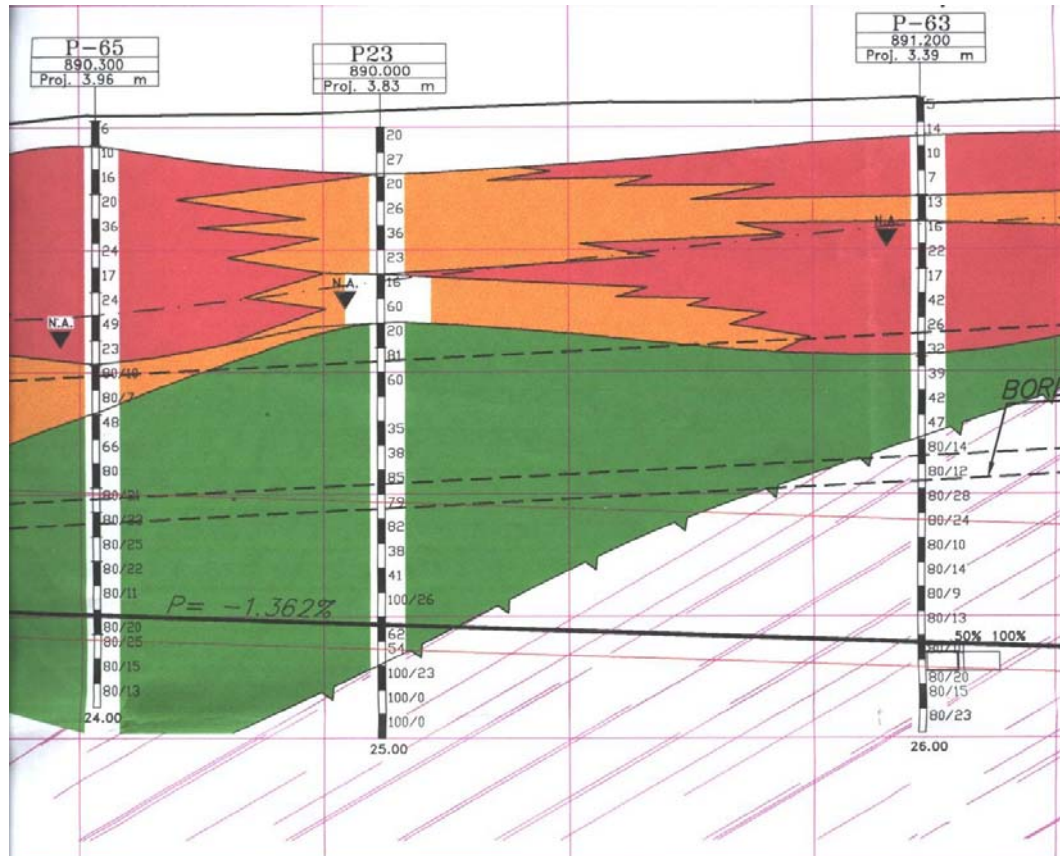
Al observar el gráfico de residuos contra valores y la elipse de confianza (figura 125) se observa que en el primero, los valores residuales no varían en gran medida con respecto a los valores de  $V_s$  estimados y en la elipse de confianza se visualiza a la gran mayoría de los datos dentro de la elipse y sólo tres de los valores está por fuera (cercanos a la elipse); por lo que se concluye que la relación  $N_{60} - V_s$  obtenida para el pozo Royal es bastante satisfactoria.

## Pozo Don Martín

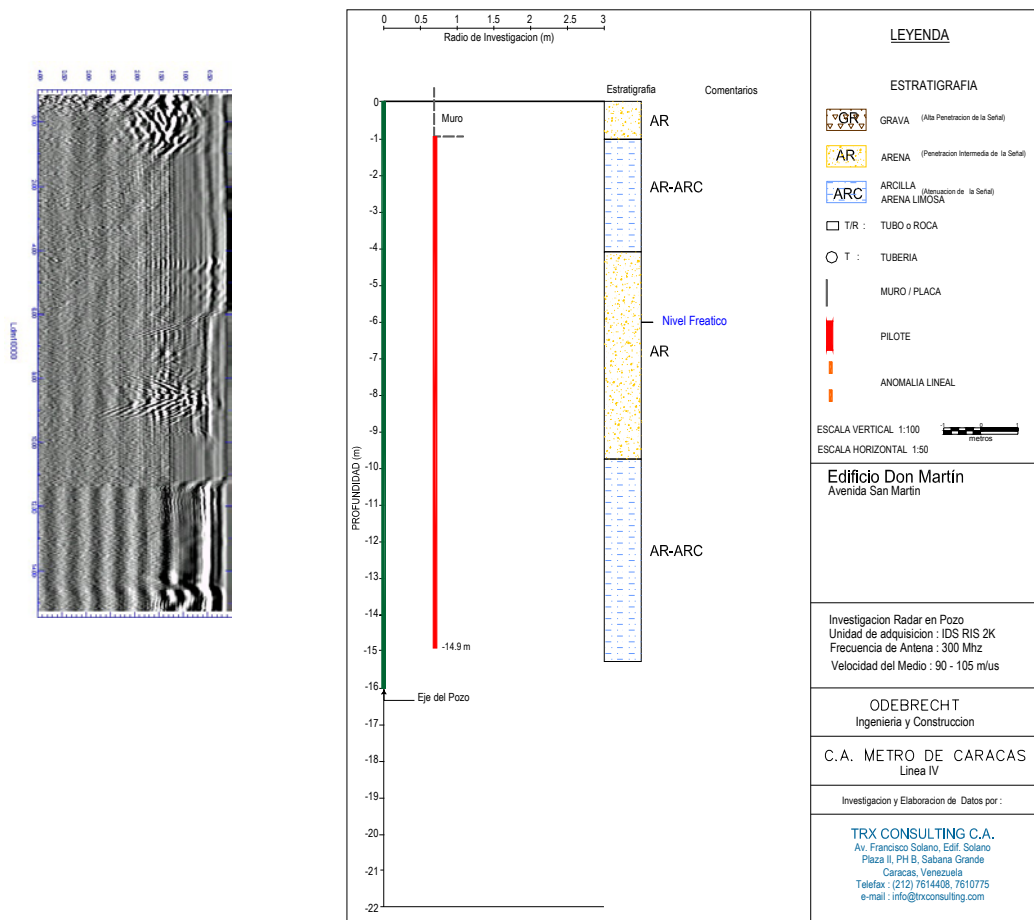
Nivel freático (TRX Consulting): 6 metros de profundidad.

Pozo geotécnico correlacionado: P-65.

La ubicación del pozo se indica en la figura 35.

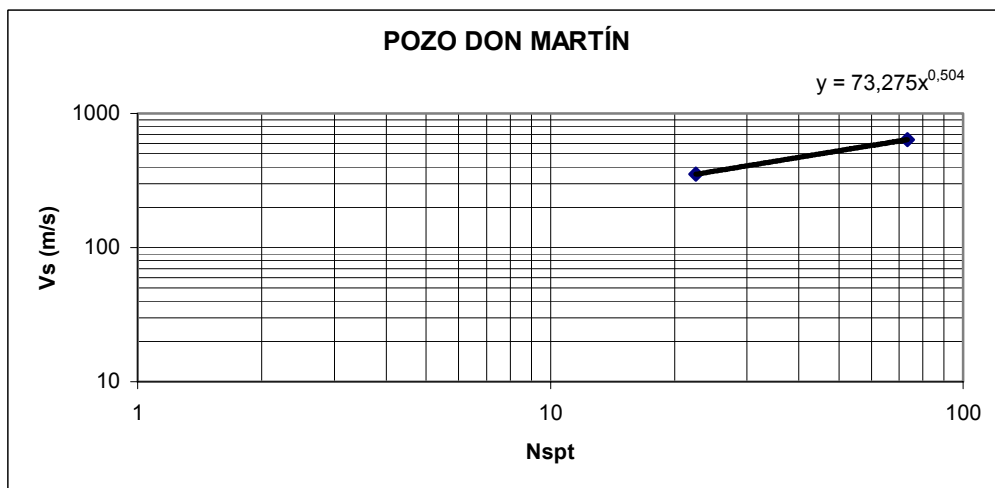
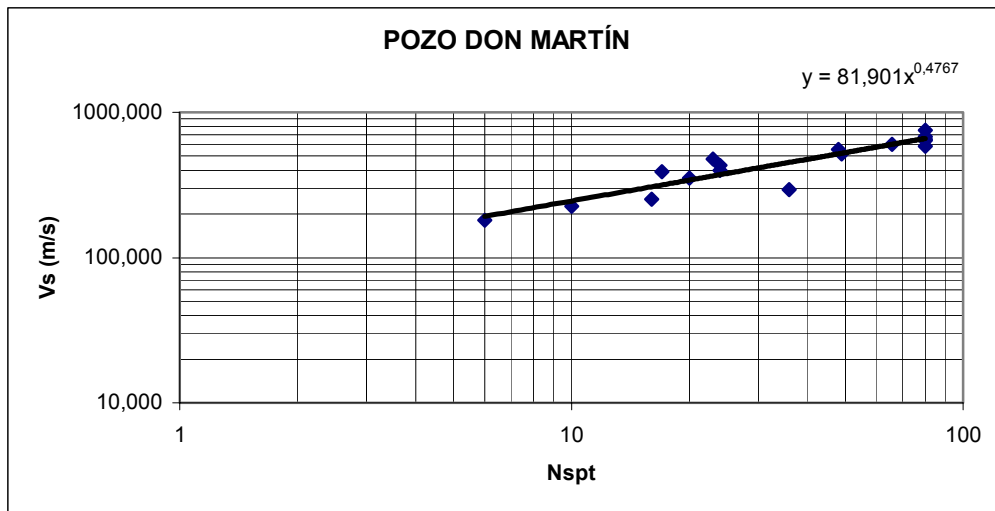


**Figura 126.** Perfil en el que se aprecia el número de golpes realizados durante el  $N_{SPT}$  tanto para el pozo P-65 como para los pozos cercanos y su respectiva interpretación litológica.

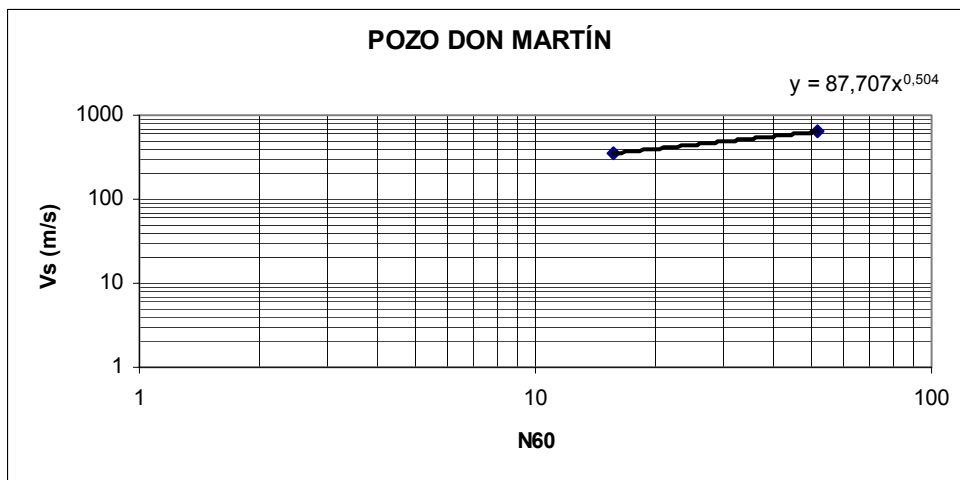
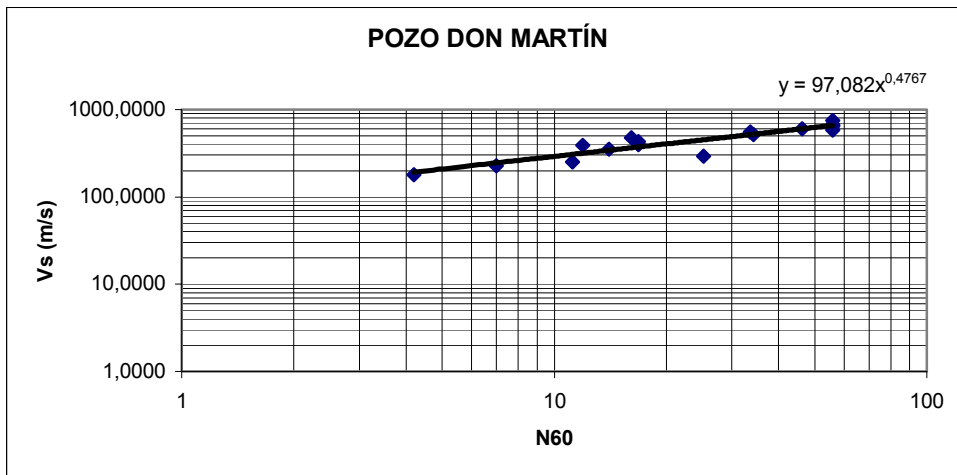


**Figura 127.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Don Martín.

En la figura 128 se observa la relación  $N_{SPT} - V_s$  y en la figura 129 se visualiza la relación  $N_{60} - V_s$  entre el pozo Don Martín y el pozo P-65.



**Figura 128.** Gráficos de las relaciones  $N_{SPT} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo Don Martín y el pozo P-65.



**Figura 129.** Gráficos de las relaciones  $N_{60} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo Don Martín y el pozo P-65.

**Tabla 26.** Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones  $N_{SPT} / V_s$  y  $N_{60} / V_s$  entre los pozos Don Martín y P-65.

Prof. (m)	Litología Radar	Litología Pozo (P-65)	Don Martín ( $V_s$ )	$N_{SPT}$	$N_{SPT}/V_s$	$N_{60}$	$N_{60}/V_s$
0--1	Arena	Limo	Capa 1 (352 m/s)	23	23/352	16	16/352
1--2	Arcilla, arena limosa						
2--3							
3--4							
4--5							
5--6							
6--7							
7--8							
8--9							
9--10	Arena						
10--11	Arcilla, arena limosa		Arena	Capa 2 (639 m/s)	73	73/639	51
11--12							
12--13		Meteorización de rocas					
13--14							
14--15							
15--16							
16--17							

A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron dos capas, el SPT arrojó cuatro capas al igual que el radar de pozo. Al correlacionar el radar con el SPT se observa que la primera capa del radar coincide con la del SPT, la base de la segunda y tercera capa del radar se observa como una sola en el SPT y la cuarta capa del radar se visualiza como dos en el SPT, es decir como la tercera y cuarta arrojada por esta técnica.

La correlación entre el radar de pozo y el “downhole” nos muestra tres capas en el radar que son vistas como una sola en la sísmica y la segunda capa interpretada en la sísmica coincide completamente con la cuarta capa arrojada por el radar. Al correlacionar el pozo P-65 en el que se realizaron mediciones SPT y el pozo Don Martín en el que se llevó a cabo mediciones “downhole” se observa que las dos primeras capas del SPT son vistas como una sola en la sísmica y la segunda y tercera capa coinciden completamente con la segunda capa de la sísmica.



En el análisis estadístico de correlación entre la velocidad de ondas de corte y el  $N_{60}$  para el pozo Don Martín se determinó el múltiple R, el múltiple cuadrado R, el múltiple cuadrado ajustado y el error normal de estimación. El coeficiente, error estándar, coeficiente estándar, la tolerancia, el coeficiente t y la probabilidad de datos poco confiables en las dos colas (tanto para el  $N_{60}$  como para la constante) se observa en la tabla 27. El análisis de varianza se observa en la tabla 28 y los gráficos obtenidos en el mencionado análisis se observan en la figura 130.

La variable dependiente es Vs.

El múltiple R es 0.917

El múltiple cuadrado R es 0.841

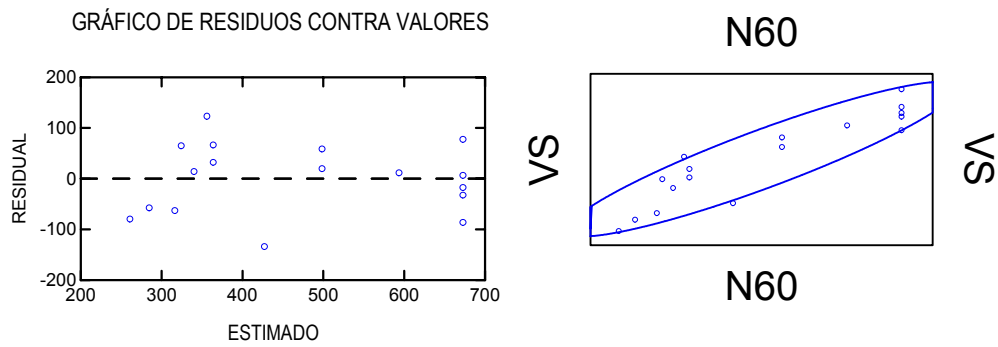
El múltiple cuadrado ajustado es 0.830

El error normal estimado es 70.957

<b>Tabla 27. Resultados del análisis estadístico en el pozo Don Martín.</b>						
Efecto	Coeficiente	Error Estándar	Coeficiente Estándar	Tolerancia	t	P (2Colas)
Constante	229.310	32.050	0.000	.	7.155	0.000
$N_{60}$	7.918	0.889	0.917	1.000	8.906	0.000

<b>Tabla 28. Análisis de varianza en el pozo Don Martín.</b>					
Fuente	Suma de los cuadrados	df	Cuadrado promedio	Coeficiente F	P
Regresión	399397.867	1	399397.867	79.325	0.000
Residual	75523.897	15	5034.926		

La estadística de Durban – Watson es de 1.698



**Figura 130.** Izquierda: gráfico de residuos contra valores en el pozo Don Martín.  
Derecha: elipse de confianza obtenida en el pozo Don Martín.

Todos los resultados en este pozo muestran lo buena que es la relación  $N_{SPT} - V_s$  en el mismo, ya que la probabilidad de datos de poca confiabilidad en la constante y en el  $N_{60}$  tiende a cero. La ecuación de la recta de mejor ajuste viene dada por:  $V_s = 7.918 \cdot N_{60} + 229.310$ .

La probabilidad de datos de poca confianza en el análisis de varianza (tabla 28) también tiende a cero. Por lo que se confirma el buen resultado de la relación  $N_{60} - V_s$  en el pozo Don Martín.

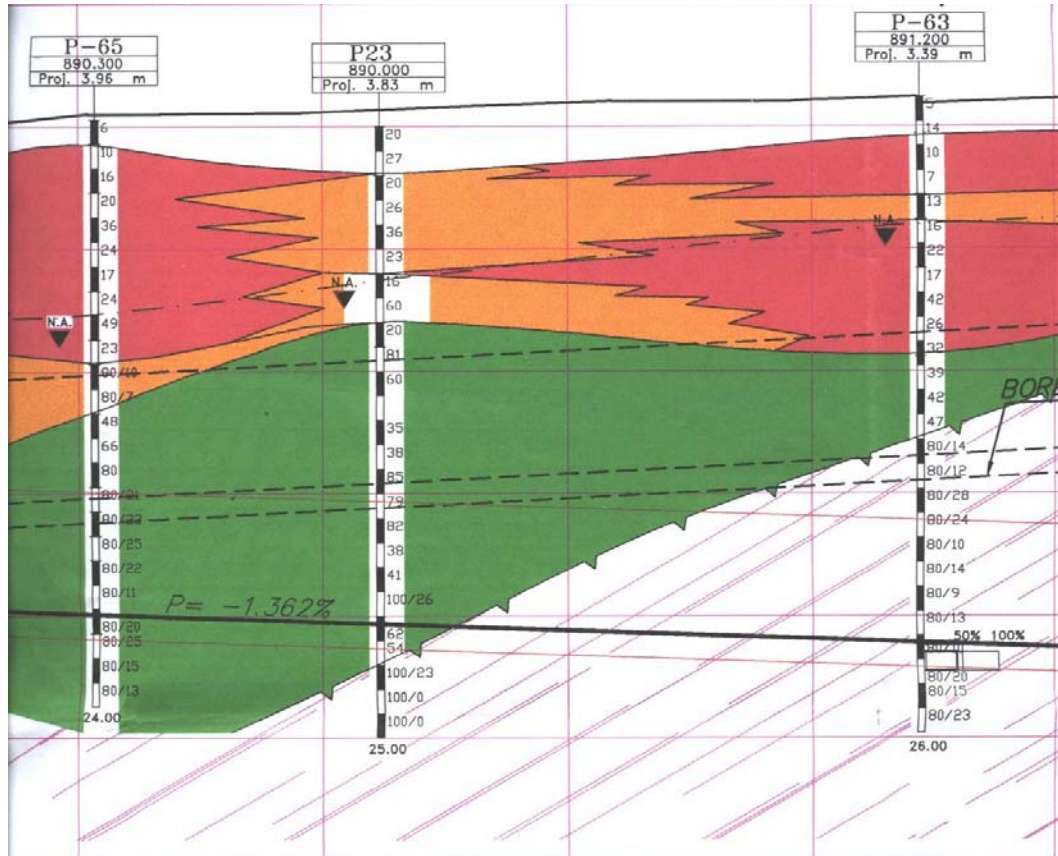
Al observar el gráfico de residuos contra valores y la elipse de confianza (figura 130) se observa que en el primero, los valores residuales no varían en gran medida con respecto a los valores de  $V_s$  estimados y en la elipse de confianza se visualiza a la gran mayoría de los datos dentro de la elipse y sólo dos de los valores está por fuera (prácticamente en el contorno de a la elipse); por lo que se concluye que la relación  $N_{60} - V_s$  obtenida para el pozo Don Martín es excelente.

## Pozo Pitter

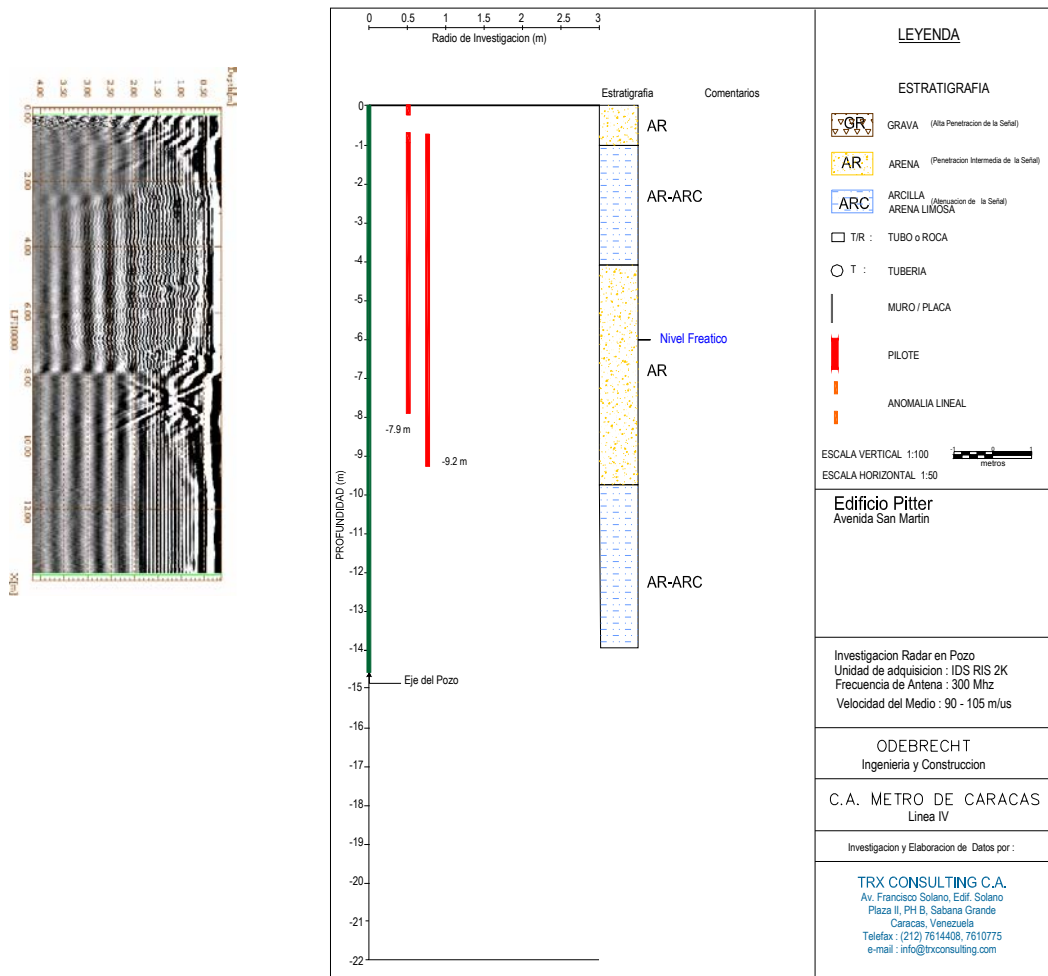
Nivel freático (TRX Consulting): 6 metros de profundidad.

Pozo geotécnico correlacionado: P-23.

La ubicación del pozo se indica en la figura 35.

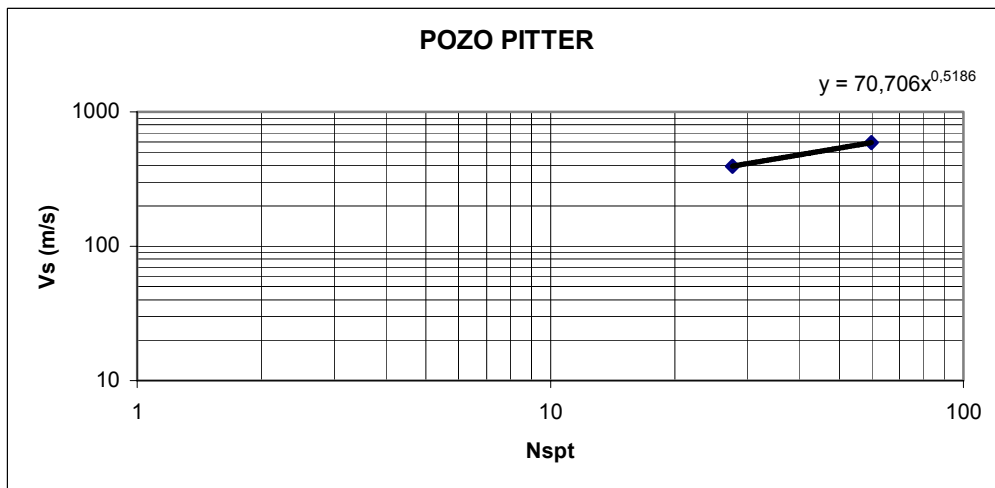
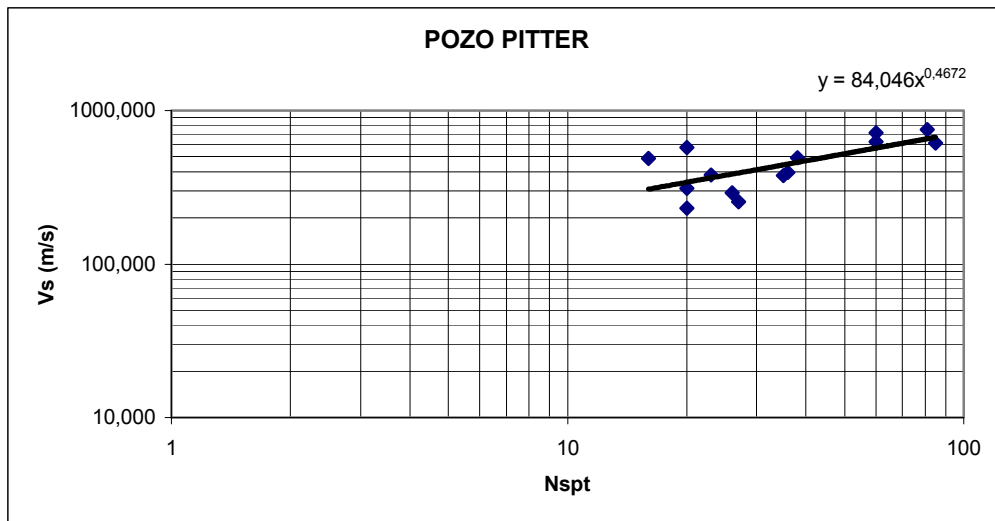


**Figura 131.** Perfil en el que se aprecia el número de golpes realizados durante el  $N_{SPT}$  tanto para el pozo P-23 como para los pozos cercanos y su respectiva interpretación litológica.

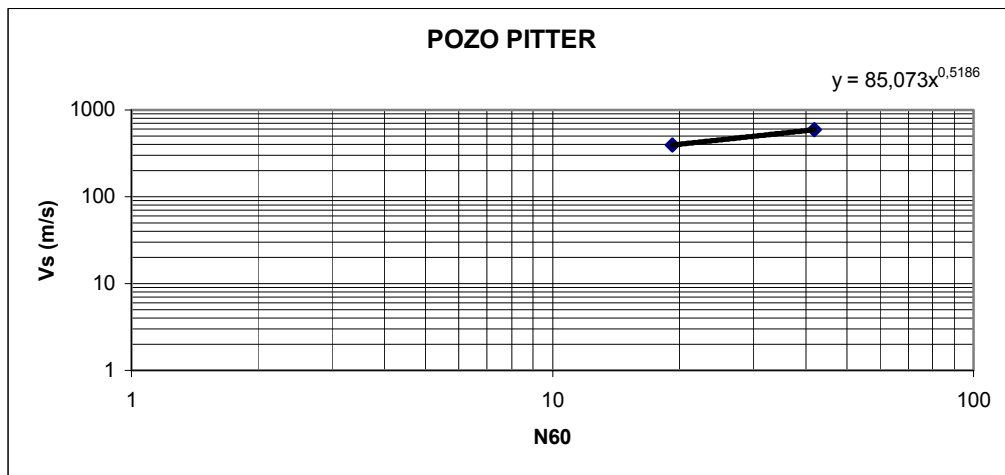
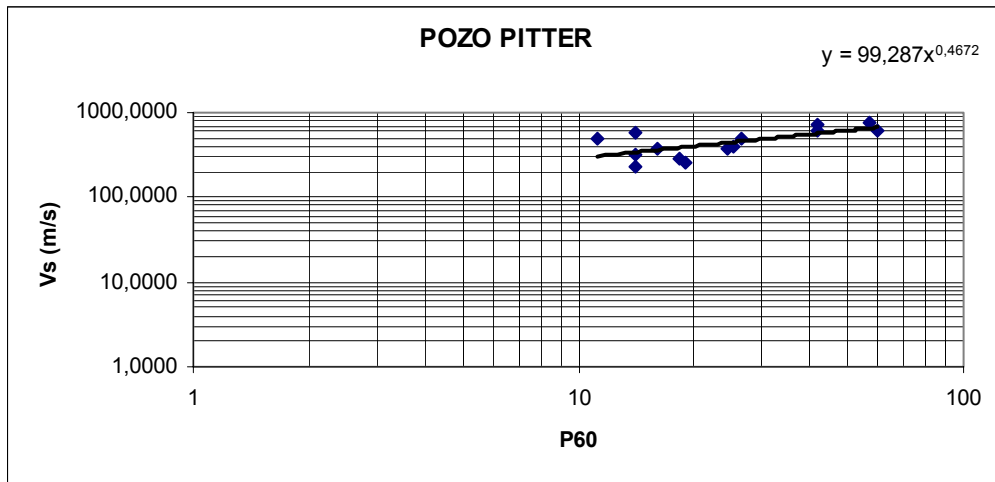


**Figura 132.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Pitter.

En la figura 133 se observa la relación  $N_{SPT} - V_s$  y en la figura 134 se visualiza la relación  $N_{60} - V_s$  entre el pozo Pitter y el pozo P-23.



**Figura 133.** Gráficos de las relaciones  $N_{SPT} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo Pitter y el pozo P-23.



**Figura 134.** Gráficos de las relaciones  $N_{60} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo Pitter y el pozo P-23.

**Tabla 29.** Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones  $N_{SPT} / V_s$  y  $N_{60} / V_s$  entre los pozos Pitter y P-23.

Prof. (m)	Litología Radar	Litología Pozo (P-23)	Pitter (Vs)	$N_{SPT}$	$N_{SPT}/V_s$	$N_{60}$	$N_{60}/V_s$
0--1	Arena	Limo					
1--2	Arcilla, Arena limosa						
2--3							
3--4							
4--5							
5--6	Arena	Arena	Capa 1 (395 m/s)	28	28/395	19	19/395
6--7							
7--8							
8--9							
9--10							
10--11							
11--12	Arcilla, Arena limosa	Meteorización de Roca	Capa 2 (590 m/s)	60	60/590	42	42/590
12--13							
13--14							

A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron dos capas, el SPT arrojó tres capas y en el radar de pozo se observaron cuatro capas. Al correlacionar el radar con el SPT se observa que la primera capa del radar tiene sólo un metro de espesor, a diferencia de la del SPT que tiene dos metros, la base de la segunda capa del radar se observa a cuatro metros de profundidad mientras que en el SPT se visualiza a los ocho; la tercera capa del radar está comprendida entre los cuatro a diez metros de profundidad a diferencia de la del SPT que está ubicada entre los ocho y catorce metros.

La correlación entre el radar de pozo y el “downhole” nos muestra tres capas en el radar que son vistas como una sola en la sísmica aunque la base de la misma se ubicó un metro más abajo y la segunda capa interpretada en la sísmica se puede relacionar con la cuarta capa vista en el radar, sin embargo el tope de la capa en la sísmica está un metro más arriba.

Al correlacionar el pozo P-23 y el pozo Pitter, se observa que las dos primeras capas del SPT son vista como una sola en la sísmica, tomando en cuenta que el tope de la misma está un metro más abajo en comparación al SPT y la segunda en la sísmica se relaciona con la tercera arrojada por el SPT, sin embargo

en el SPT el tope de la misma está un metro más arriba. Debido a la cercanía entre los pozos Don Martín y Pitter las interpretaciones sísmicas respectivas son similares (tabla 30).

**Tabla 30.** Comparación de las interpretaciones sísmicas entre los pozos Don Martín y Pitter, los cuales están distanciados aproximadamente 20 metros (figura 35).

Intervalos (m)	Don Martín (Vp – Vs) m/s	Pitter (Vp – Vs) m/s
0--1	Capa 1 (1240 – 352)	Capa 1 (1278 – 395)
1--2		
2--3		
3--4		
4--5		
5--6		
6--7		
7--8		
8--9		
9--10	Capa 2 (1266 – 639)	Capa 2 (1583 – 590)
10--11		
11--12		
12--13		
13--14		
14--15		
15--16		
16--17	??????	

Se observan la misma cantidad de capas, aunque el tope de la primera está un metro más abajo en el pozo Don Martín, los valores de ondas “P” son un poco más altos en el pozo Pitter y los valores de las ondas “S” en ambos pozos son bastantes similares; por lo que se infiere que existe continuidad entre las capas.

En el análisis estadístico de correlación entre la velocidad de ondas de corte y el  $N_{60}$  para el pozo Pitter se determinó el múltiple R, el múltiple cuadrado R, el múltiple cuadrado ajustado y el error normal de estimación. El coeficiente, error estándar, coeficiente estándar, la tolerancia, el coeficiente t y la probabilidad de datos de poca confianza en las dos colas (tanto para el  $N_{60}$  como para la constante) se observa en la tabla 31. El análisis de varianza se observa en la tabla 32 y los gráficos obtenidos en el mencionado análisis se observan en la figura 135.



La variable dependiente es Vs.

El múltiple R es 0.754

El múltiple cuadrado R es 0.569

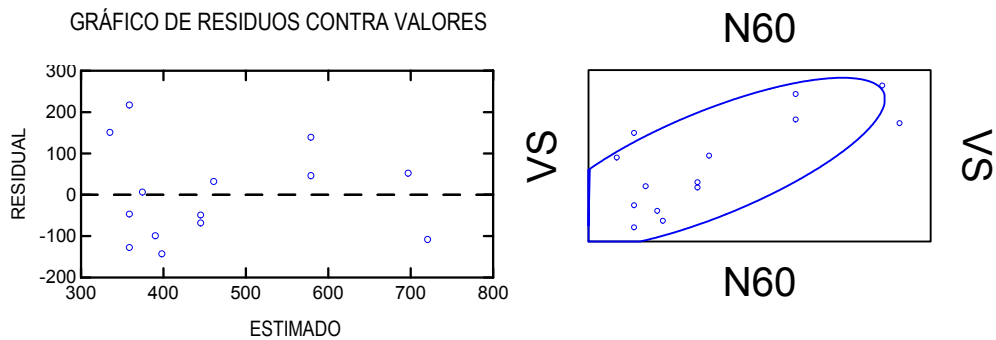
El múltiple cuadrado ajustado es 0.533

El error normal estimado es 116.499

<b>Tabla 31. Resultados del análisis estadístico en el pozo Pitter.</b>						
Efecto	Coefficiente	Error Estándar	Coefficiente Estándar	Tolerancia	t	P (2Colas)
Constante	248.806	62.522	0.000	.	3.979	0.002
N60	7.861	1.977	0.754	1.000	3.977	0.002

<b>Tabla 32. Análisis de varianza en el pozo Pitter.</b>					
Fuente	Suma de los cuadrados	df	Cuadrado promedio	Coefficiente F	P
Regresión	214654.315	1	214654.315	15.816	0.002
Residual	162863.114	12	13571.926		

La estadística de Durban – Watson es de 1.145



**Figura 135.** Izquierda: gráfico de residuos contra valores en el pozo Pitter.

Derecha: elipse de confianza obtenida en el pozo Pitter.

La probabilidad de datos poco confiables en la constante y en el  $N_{60}$  es menor que el teórico, ya que  $0.002 < 0.005$  y  $0.002 < 0.050$ , por lo que se infiere que la relación  $N_{60} - V_s$  en este pozo es satisfactoria. La ecuación de la recta de mejor ajuste viene dada por:  $V_s = 7.861 \cdot N_{60} + 248.806$ .

La probabilidad de datos de poca confianza obtenidos en el análisis de varianza (tabla 32) se comparó con la probabilidad teórica, es decir  $0.002 < 0.050$ . Por lo que se confirma el buen resultado de la relación  $N_{60} - V_s$  en el pozo Pitter.

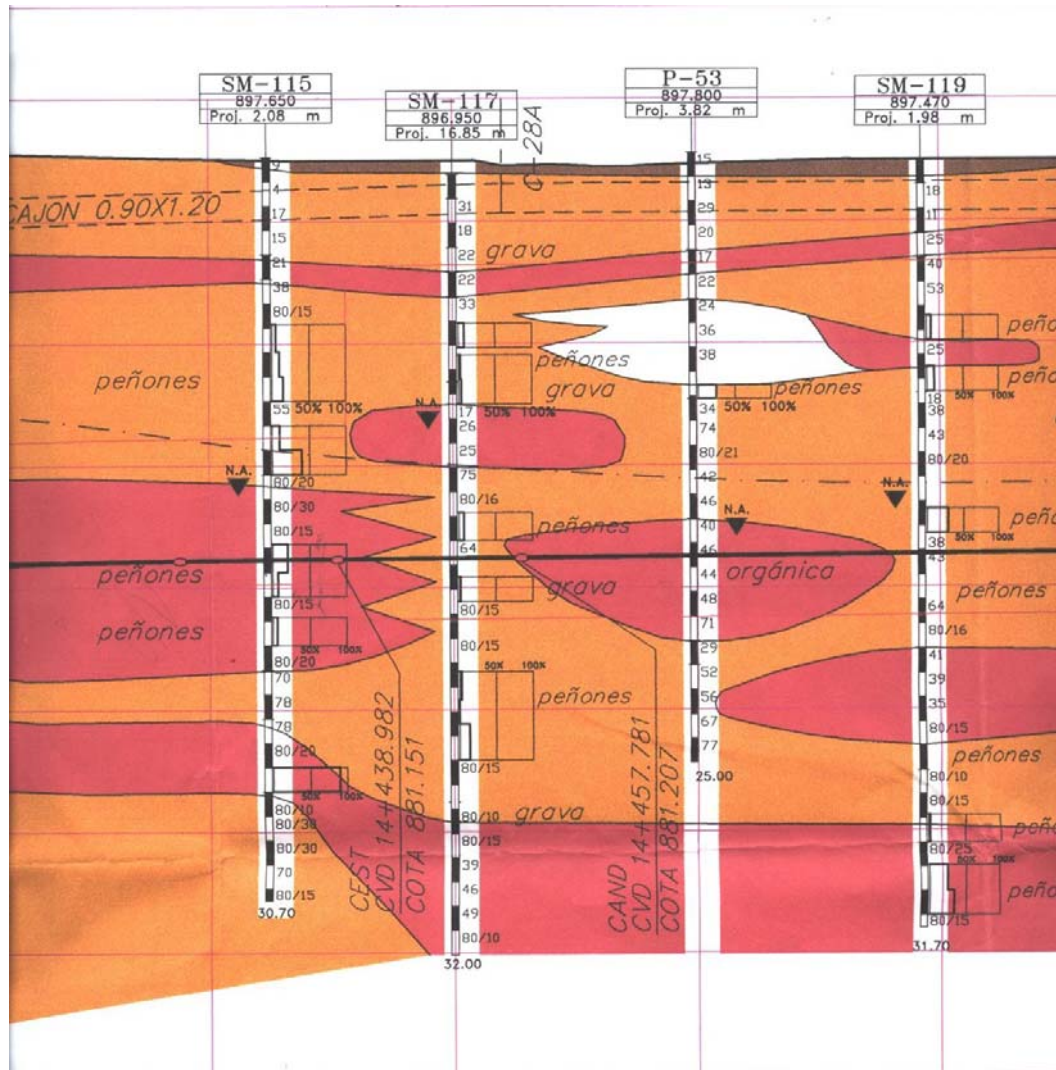
Al observar el gráfico de residuos contra valores y la elipse de confianza (figura 135) se observa que en el primero, los valores residuales no varían en gran medida con respecto a los valores de  $V_s$  estimados y en la elipse de confianza se visualiza a la gran mayoría de los datos dentro de la elipse y sólo tres de los valores está por fuera (muy cercanos a la elipse); por lo que se concluye que la relación  $N_{60} - V_s$  obtenida para el pozo Pitter es bastante satisfactoria.

## 4.6.2 Avenida Lecuna

### Pozo Berna

Pozo geotécnico correlacionado: SM-119.

La ubicación del pozo se indica en la figura 36.

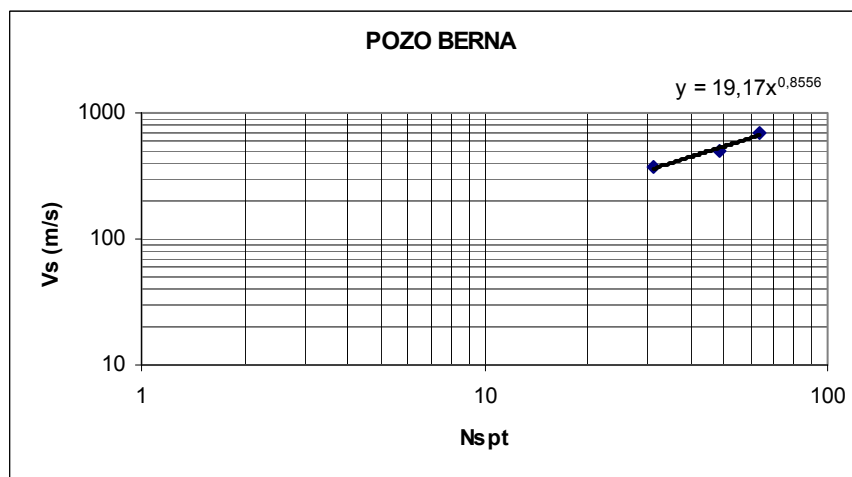
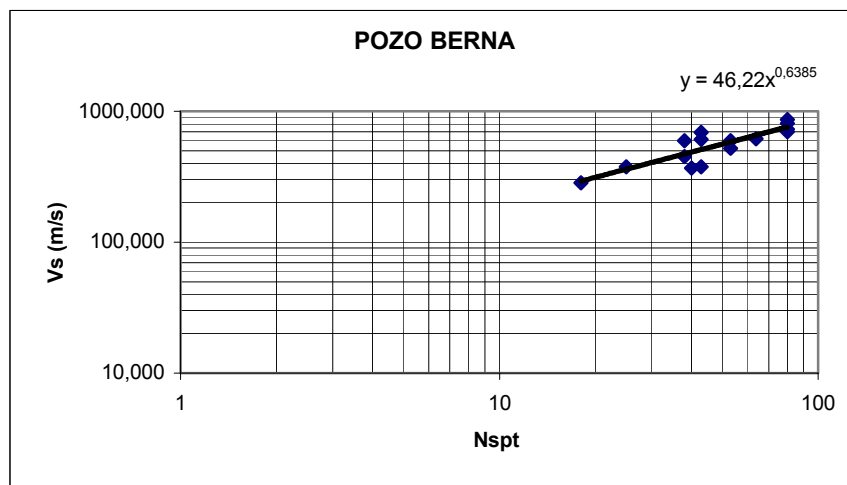


**Figura 136.** Perfil en el que se aprecia el número de golpes realizados durante el  $N_{SPT}$  tanto para el pozo SM-119 como para los pozos cercanos y su respectiva interpretación litológica.

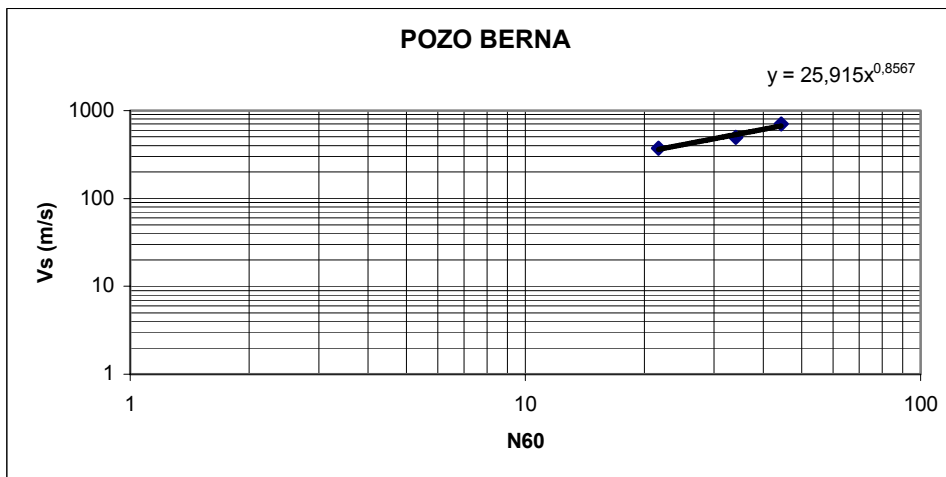
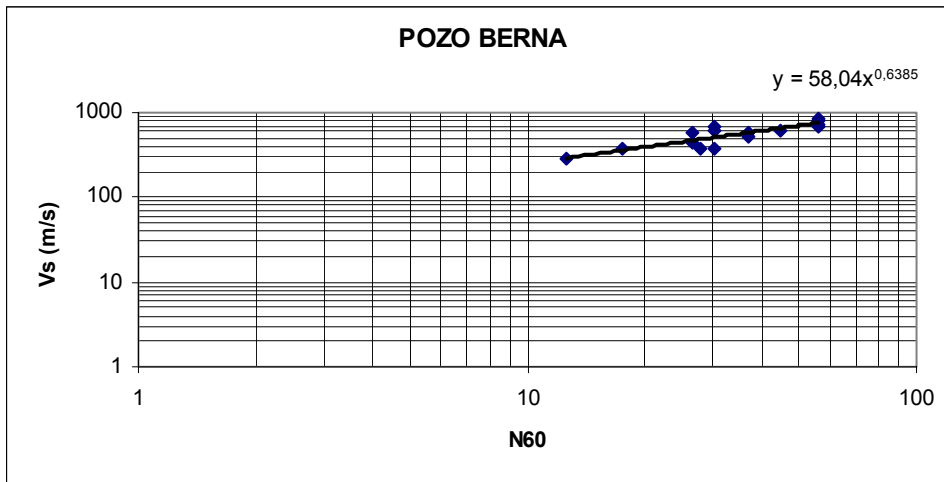
Se debe recordar que este pozo se encuentra en un estacionamiento, por lo que las mediciones sísmicas comenzaron a tres metros de profundidad y debido a

esto los tres primeros metros visualizados en el perfil de SPT no se tomaron en cuenta al momento de realizar los gráficos y los análisis.

Para este pozo no se dispone de la interpretación de radar de pozo hecha por la compañía TRX Consulting, por lo que sólo se correlacionó con los datos de SPT y se tomó como ayuda la sección de radar llevada a cabo en este pozo. En la figura 137 se observa la relación  $N_{SPT} - V_s$  y en la figura 138 se visualiza la relación  $N_{60} - V_s$  entre el pozo Berna y el pozo SM-119.



**Figura 137.** Gráficos de las relaciones  $N_{SPT} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo Berna y el pozo SM-119.



**Figura 138.** Gráficos de las relaciones  $N_{60} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo Berna y el pozo SM-119.

**Tabla 33.** Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones  $N_{SPT} / V_s$  y  $N_{60} / V_s$  entre los pozos Berna y SM-119.

Prof. (m)	Litología Pozo (SM-119)	Berna ( $V_s$ )	$N_{SPT}$	$N_{SPT}/V_s$	$N_{60}$	$N_{60}/V_s$
3--4	Arcilla	Capa 1 (494 m/s)	49	49/494	34	34/494
4--5	Arena					
5--6						
6--7						
7--8	Arcilla	Capa 2 (372 m/s)	31	31/372	22	22/372
8--9	Arena					
9--10						
10--11						
11--12						
12--13						
13--14						
14--15						
15--16	Arena	Capa 3 (701 m/s)	64	64/701	44	44/701
16--17						
17--18						

A partir de las mediciones sísmicas en el pozo Berna se interpretaron tres capas, el SPT realizado en el pozo SM-119 arrojó cuatro capas, no se observaron coincidencias entre tope y base de las capas.

En el análisis estadístico de correlación entre la velocidad de ondas de corte y el  $N_{60}$  para el pozo Berna se determinó el múltiple R, el múltiple cuadrado R, el múltiple cuadrado ajustado y el error normal de estimación. El coeficiente, error estándar, coeficiente estándar, la tolerancia, el coeficiente t y la probabilidad de datos de poca calidad en las dos colas se observa en la tabla 34. El análisis de varianza se observa en la tabla 35 y los gráficos obtenidos en el mencionado análisis se observan en la figura 139.

La variable dependiente es  $V_s$ .

El múltiple R es 0.853

El múltiple cuadrado R es 0.728

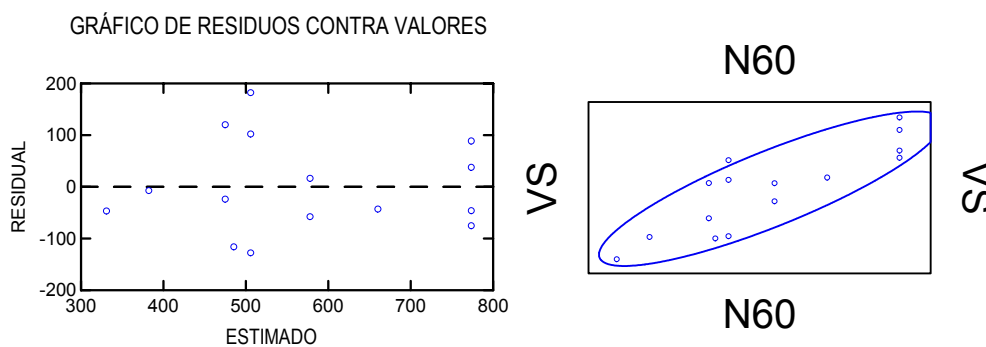
El múltiple cuadrado ajustado es 0.707

El error normal estimado es 93.353

<b>Tabla 34. Resultados del análisis estadístico en el pozo Berna.</b>						
Efecto	Coficiente	Error Estándar	Coficiente Estándar	Tolerancia	t	P (2Colas)
Constante	197.287	67.879	0.000	.	2.906	0.012
N <sub>60</sub>	10.289	1.743	0.853	1.000	5.902	0.000

<b>Tabla 35. Análisis de varianza en el pozo Berna.</b>					
Fuente	Suma de los cuadrados	df	Cuadrado promedio	Coficiente F	P
Regresión	303563.195	1	303563.195	34.833	0.000
Residual	113291.205	13	8714.708		

La estadística de Durban – Watson es de 1.528



**Figura 139.** Izquierda: gráfico de residuos contra valores en el pozo Berna.  
Derecha: elipse de confianza obtenida en el pozo Berna.

La probabilidad de datos de poca confianza en la constante y en el N<sub>60</sub> es menor que el teórico, ya que  $0.012 < 0.050$  y  $0.000 < 0.050$ , por lo que se infiere que la relación N<sub>60</sub> – Vs en este pozo es satisfactoria. La ecuación de la recta de mejor ajuste viene dada por:  $Vs = 10.289 \cdot N_{60} + 197.287$ .

La probabilidad de datos de poca confianza obtenidos en el análisis de varianza (tabla 35) se comparó con la probabilidad teórica, en donde  $0.000 < 0.050$ . Por lo que se confirma el buen resultado de la relación N<sub>60</sub> – Vs en el pozo Berna.

Al observar el gráfico de residuos contra valores y la elipse de confianza (figura 139) se observa que en el primero, los valores residuales no varían en gran medida con respecto a los valores de  $V_s$  estimados y en la elipse de confianza se visualiza a la gran mayoría de los datos dentro de la elipse y sólo un valor está por fuera (muy cercano a la elipse); por lo que se concluye que la relación  $N_{60} - V_s$  obtenida para el pozo Berna es bastante satisfactoria.

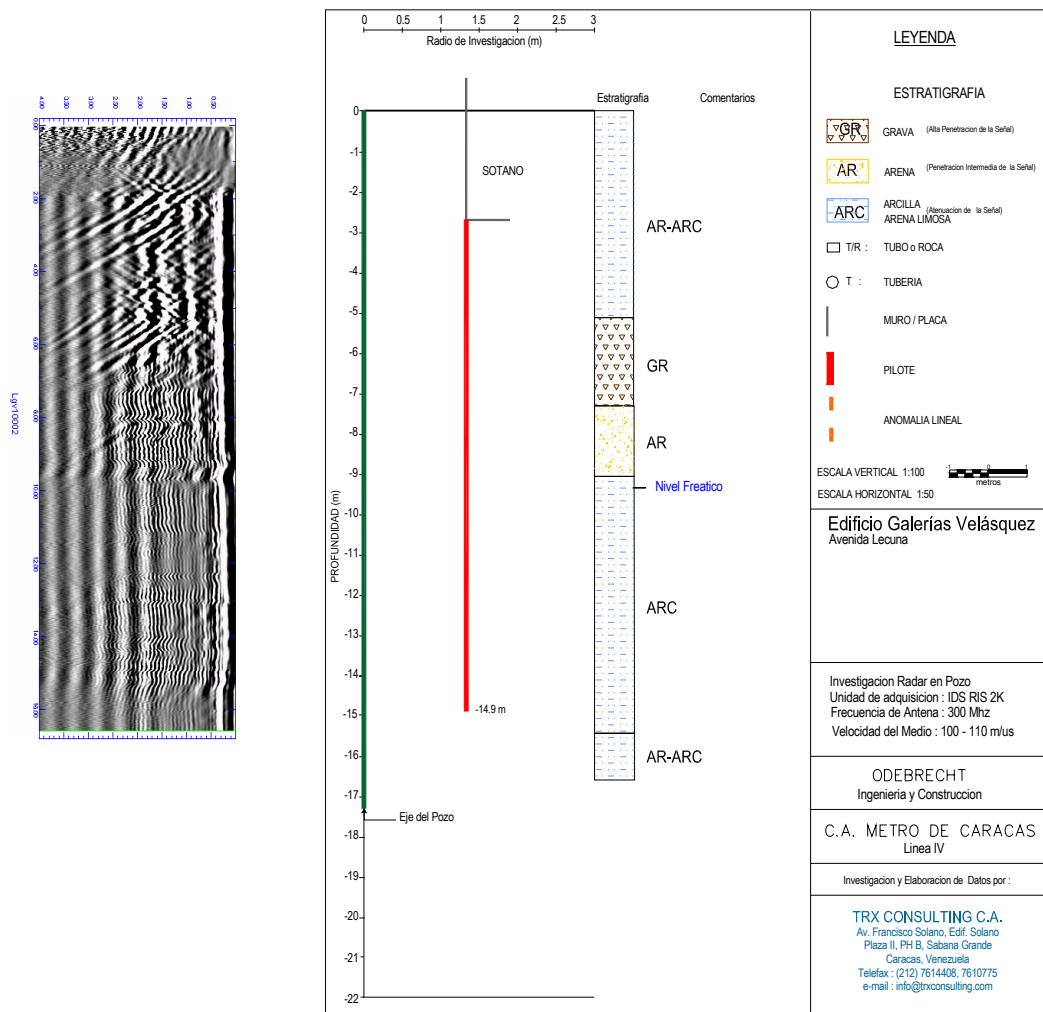


## Pozo Velázquez

Nivel freático (TRX Consulting): 9,36 metros de profundidad.

La ubicación del pozo se indica en la figura 36.

Este pozo no pudo ser correlacionado con ningún pozo con mediciones de SPT debido a la distancia de los mismos, por lo que sólo se correlacionó con el radar de pozo.



**Figura 140.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Velázquez.

**Tabla 36.** Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles en el pozo Velázquez.

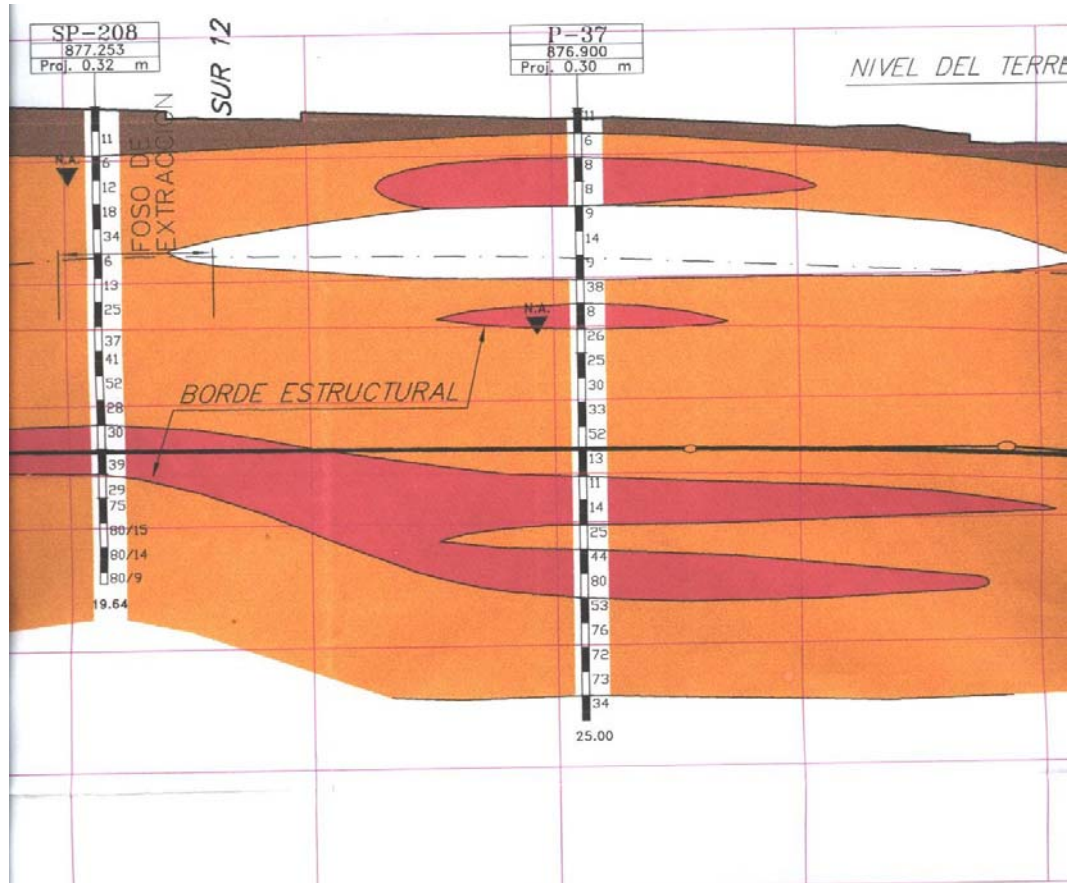
Prof. (m)	Litología Radar	Velázquez ( $V_s$ )	
0--1	Arcilla, Arena limosa	Capa 1 (412 m/s)	
1--2			
2--3			
3--4			
4--5			
5--6	Grava	Capa 1 (412 m/s)	
6--7			
7--8	Arena	Capa 2 (696 m/s)	
8--9			
9--10	Arcilla, Arena limosa		Capa 2 (696 m/s)
10--11			
11--12			
12--13			
13--14			
14--15			
15--16		Capa 3 (806 m/s)	
16--17			

A partir de las mediciones sísmicas en el pozo Velázquez se interpretaron tres capas, el radar de pozo arrojó cuatro capas, la primera y segunda capa del radar se ven como una sola en la sísmica, la segunda capa del radar tiene dos metros de espesor a diferencia de la arrojada por el “downhole”, en el que la capa tiene cinco metros de espesor y la última capa del radar no coincidió con ninguna del pozo Velásquez.

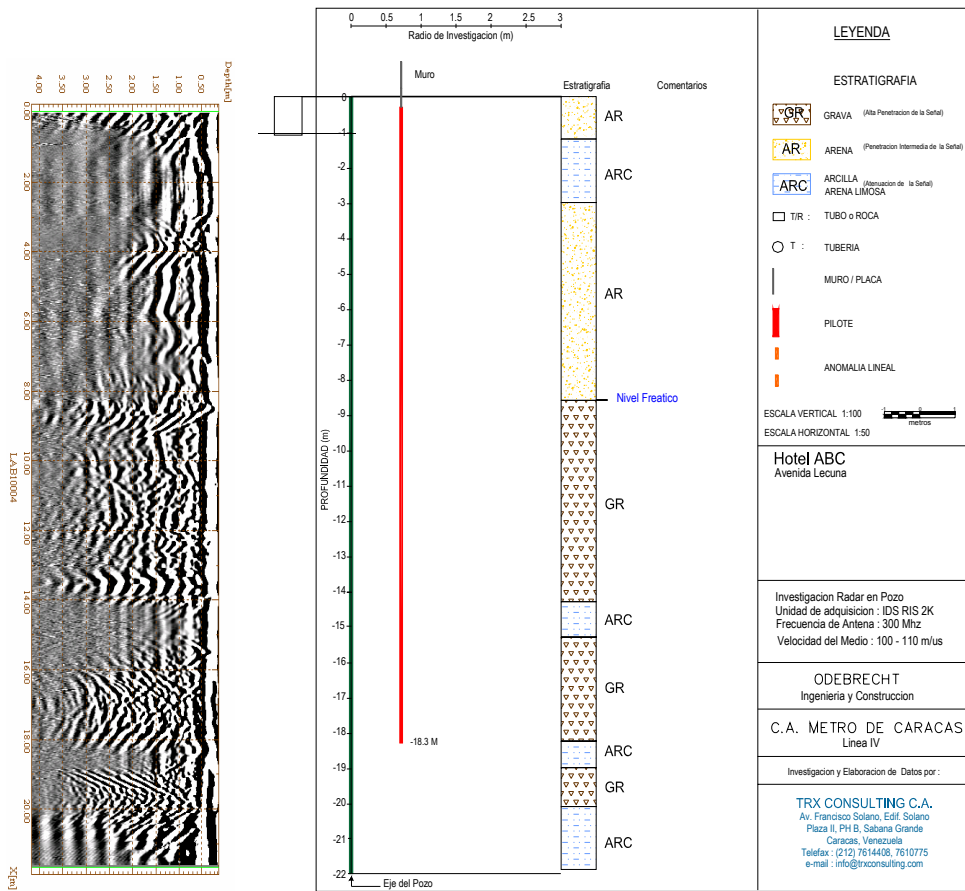
Pozo Hotel ABC

Pozo geotécnico correlacionado: P-37.

La ubicación del pozo se indica en la figura 37.

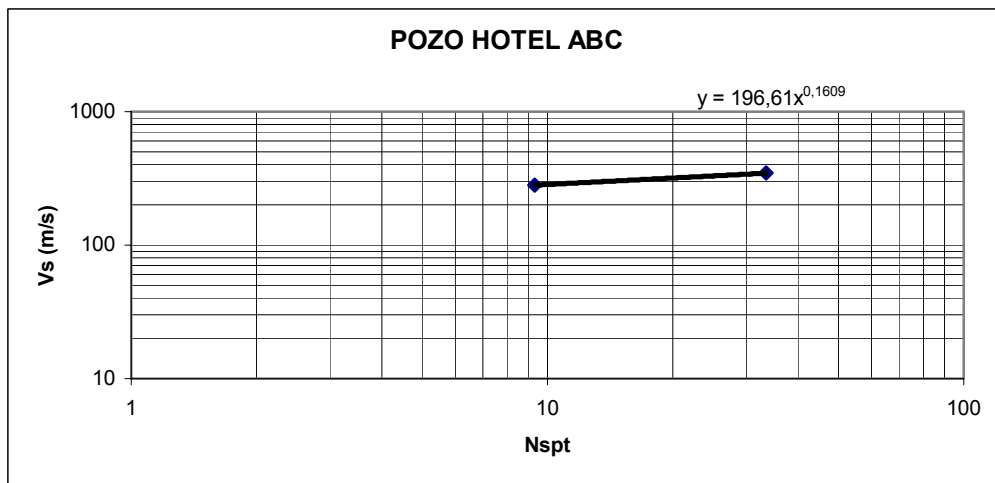
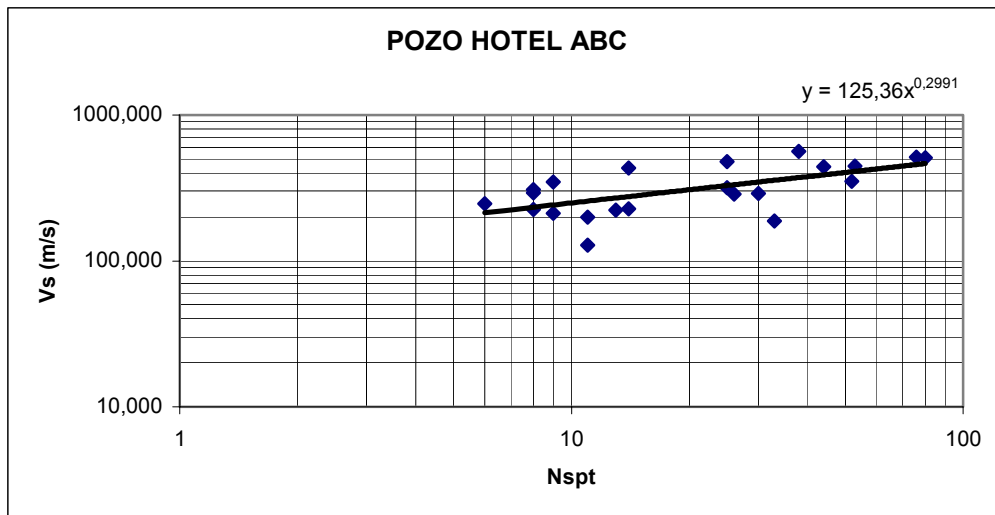


**Figura 141.** Perfil en el que se aprecia el número de golpes realizados durante el  $N_{SPT}$  tanto para el pozo P-37 como para el pozo cercano y su respectiva interpretación litológica.

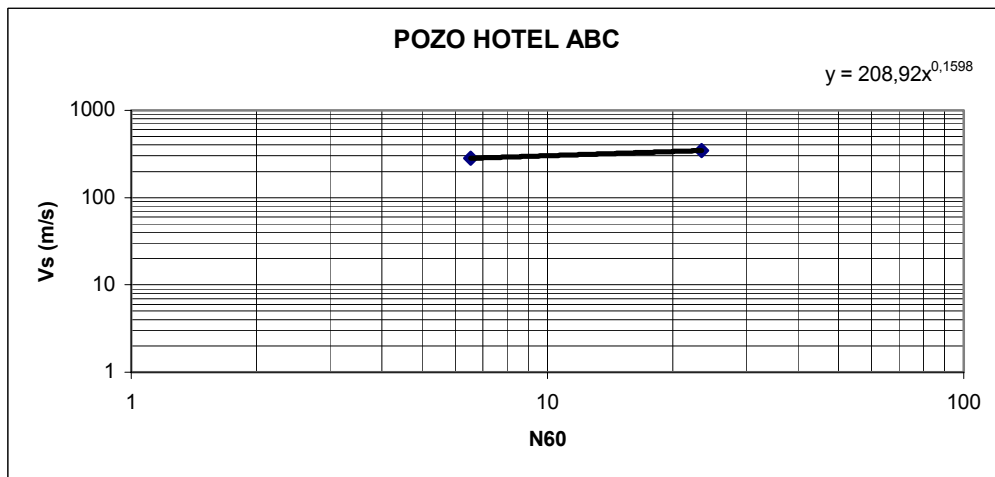
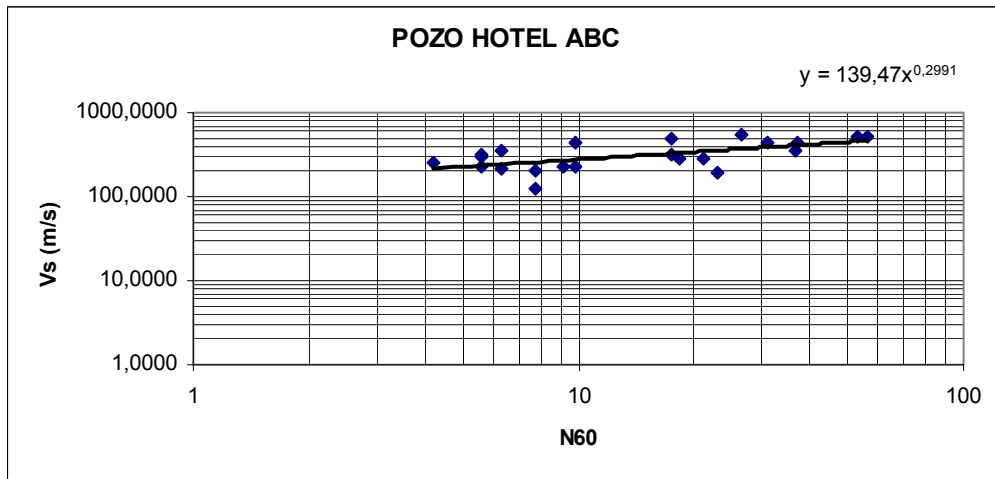


**Figura 142.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Hotel ABC.

En la figura 143 se observa la relación  $N_{SPT} - V_s$  y en la figura 144 se visualiza la relación  $N_{60} - V_s$  entre el pozo Hotel ABC y el pozo P-37.



**Figura 143.** Gráficos de las relaciones  $N_{SPT} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo Hotel ABC y el pozo P-37.



**Figura 144.** Gráficos de las relaciones  $N_{60} - V_s$ . Arriba: relación obtenida para cada metro de profundidad. Abajo: relación obtenida para cada una de las capas interpretadas entre el pozo Hotel ABC y el pozo P-37.

**Tabla 37.** Interpretación litológica según cada uno de los métodos disponibles, relaciones  $N_{SPT} / V_s$  y  $N_{60} / V_s$  entre los pozos Hotel ABC y P-37.

Prof. (m)	Litología Radar	Litología Pozo (P-37)	Hotel ABC ( $V_s$ )	$N_{SPT}$	$N_{SPT}/V_s$	$N_{60}$	$N_{60}/V_s$
0--1	Arena	Relleno	Capa 1 (282 m/s)	9	9/282	7	7/282
1--2	Arcilla, arena limosa	Arena					
2--3		Arcilla					
3--4							
4--5		Limo					
5--6							
6--7							
7--8	Arena						
8--9		Arcilla					
9--10	Grava	Arena					
10--11							
11--12							
12--13							
13--14							
14--15			Arcilla, arena limosa				
15--16	Grava	Arcilla					
16--17		Arcilla					
17--18		Arcilla					
18--19	Arcilla, arena limosa	Arcilla					
19--20	Grava						
20--21	Arcilla, arena limosa	Arena					
21--22							

A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron dos capas, el SPT arrojó once capas y en el radar de pozo se observaron nueve capas.

Al correlacionar el radar con el SPT se observa que la primera capa coincide en profundidad, la segunda y tercera capa del SPT se ven como una en el radar; la cuarta, quinta y sexta capa del SPT se observan como una sola capa en la respuesta del radar (tercera capa); la séptima capa interpretada en el SPT se observa en el radar como la cuarta y quinta; la octava y novena capa del SPT se visualiza como la sexta en el radar de pozo, la décima capa en el SPT se observa como la séptima y octava capa del radar y la última capa coincide en los dos métodos. La correlación entre el radar de pozo y el “downhole” no fue muy buena, ya que las capas interpretadas en la sísmica no coincidió con ningún tope ni base de las capas del radar.

Al correlacionar el pozo P-37 y el pozo Hotel ABC, se observa que la primera capa en la sísmica se puede relacionar con las cuatro primeras capas del SPT, aunque la base de la misma en la sísmica se observa un metro por encima de la base de la cuarta capa en el SPT; la segunda capa de la sísmica ve como un solo paquete las capas observadas en el SPT.

Las mediciones sísmicas realizadas en el pozo Hotel ABC y el tendido de refracción Nuevo Circo fueron comparadas, ya que están relativamente cerca (tabla 38).

**Tabla 38.** Comparación de las interpretaciones sísmicas entre el pozo Hotel ABC y el tendido de refracción Nuevo Circo. La distancia entre el pozo y el punto más cercano de los tendidos (distancia de 144 metros en los perfiles) es de aproximadamente 125 metros (figura 37).

Intervalos (m)	Hotel ABC (Vp - Vs) m/s	Tendido de refracción (Vp - Vs) m/s
0--1	Capa 1 (797 - 282)	Capa 1 (569 - 151)
1--2		
2--3		
3--4		
4--5		
5--6		
6--7	Capa 2 (1046 - 346)	Capa 2 (1086 - 251)
7--8		
8--9		
9--10		
10--11		
11--12		
12--13		Capa 3 (1925 - 308)
13--14		
14--15		
15--16		
16--17		
17--18		
18--19		
19--20		
20--21		
21--22		?????

En la sísmica “downhole” se aprecian dos capas y en el tendido de refracción se observan tres, la primera capa del tendido de refracción se asocia con un relleno (a partir de la geología de superficie y la velocidad de onda “P”



obtenida), posiblemente la primera capa arrojada por el pozo sea vista en el tendido como la segunda capa. Suponiendo lo anterior, la base de la capa estaría desfasada sólo por un metro de profundidad, ubicándose en el tendido de refracción un metro más abajo (hasta los siete metros de profundidad), esto debido posiblemente a la distancia entre el pozo y el tendido, por lo que simplemente se aprecia un cambio de espesor de uno a otro. La segunda capa interpretada en el pozo coincidiría con la tercera obtenida por la sísmica de superficie, en donde el tope de esta capa se ubicaría un metro más arriba en la sísmica de pozo; en cuanto a las velocidades, se observa que las velocidades de las ondas “P” tienden a ser mayores en la sísmica de refracción, y por el contrario las ondas “S” tienden a ser un poco mayores en el pozo Hotel ABC. En el tendido de reflexión Nuevo Circo se observa un primer reflector de color negro que puede ser asociado con la capa de baja velocidad (también obtenida en la sísmica de refracción). La resolución del tendido de reflexión no fue muy buena y se obtuvieron pocos reflectores (se debe tomar en cuenta que los sedimentos encontrados en esta área son de edad reciente) estos reflectores se observaron prácticamente horizontales y no se hizo posible la interpretación de plegamientos, fallas o contrastes laterales de litología (debido al ruido presente en la sección sísmica).

En el análisis estadístico de correlación entre la velocidad de ondas de corte y el  $N_{60}$  para el pozo Hotel ABC se determinó el múltiple R, el múltiple cuadrado R, el múltiple cuadrado ajustado y el error normal de estimación. El coeficiente, error estándar, coeficiente estándar, la tolerancia, el coeficiente t y la probabilidad de datos de poca confianza en las dos colas (tanto para el  $N_{60}$  como para la constante) se observa en la tabla 39. El análisis de varianza se observa en la tabla 40 y los gráficos obtenidos en el mencionado análisis se observan en la figura 145.

La variable dependiente es  $V_s$ .

El múltiple R es 0.685

El múltiple cuadrado R es 0.470

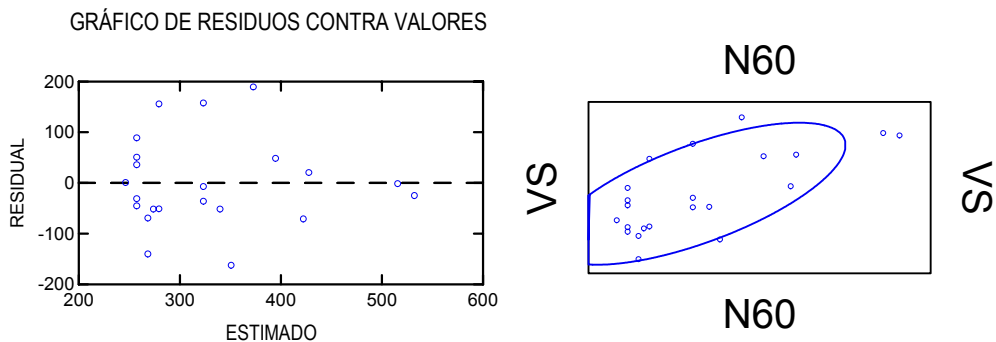
El múltiple cuadrado ajustado es 0.443

El error normal estimado es 91.780

<b>Tabla 39. Resultados del análisis estadístico en el pozo Hotel ABC.</b>						
Efecto	Coefficiente	Error Estándar	Coefficiente Estándar	Tolerancia	t	P (2Colas)
Constante	224.455	31.546	0.000	.	7.115	0.000
N <sub>60</sub>	5.494	1.305	0.685	1.000	4.209	0.000

<b>Tabla 40. Análisis de varianza en el pozo Hotel ABC.</b>					
Fuente	Suma de los cuadrados	df	Cuadrado promedio	Coefficiente F	P
Regresión	149198.303	1	149198.303	17.712	0.000
Residual	168471.015	20	8423.551		

La estadística de Durban – Watson es de 1.712



**Figura 145.** Izquierda: gráfico de residuos contra valores en el pozo Hotel ABC.  
Derecha: elipse de confianza obtenida en el pozo Hotel ABC.

Los resultados en este pozo muestran lo buena que es la relación  $N_{SPT} - V_s$  en el mismo, ya que el la probabilidad de datos de poca confianza en la constante y en el  $N_{60}$  tiende a cero. La ecuación de la recta de mejor ajuste viene dada por:  

$$V_s = 5.494 \cdot N_{60} + 224.455.$$

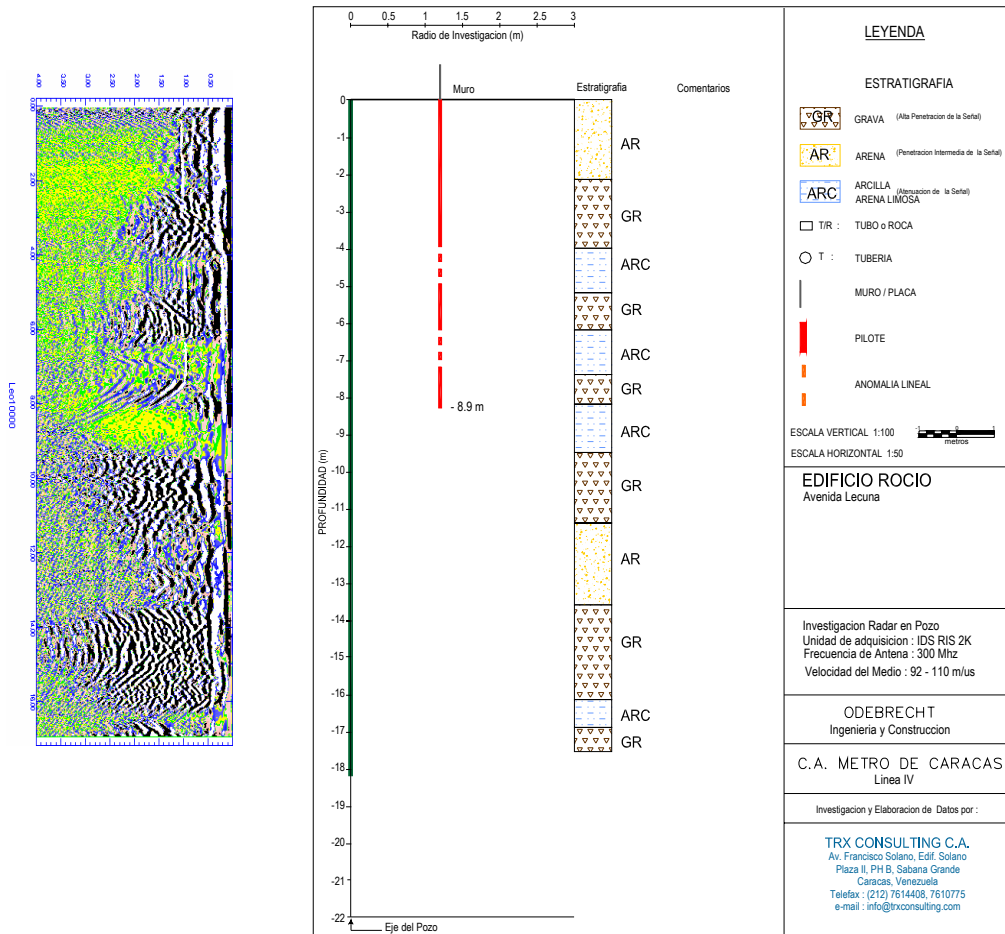
La probabilidad de datos de poca confianza obtenidos en el análisis de varianza (tabla 40) también tiende a cero. Por lo que se confirma el buen resultado de la relación  $N_{60} - V_s$  en el pozo Hotel ABC.

Al observar el gráfico de residuos contra valores y la elipse de confianza (figura 145) se observa que en el primero, los valores residuales no varían en gran medida con respecto a los valores de  $V_s$  estimados y en la elipse de confianza se visualiza a la gran mayoría de los datos dentro de la elipse y sólo tres de los valores está por fuera, otros tres prácticamente están en el contorno de a la elipse; por lo que se concluye que la relación  $N_{60} - V_s$  obtenida para el pozo Hotel ABC es bastante buena.

## Pozo Rocío

La ubicación del pozo se indica en la figura 38.

Este pozo no se correlacionó con mediciones de SPT, sólo se hizo con el registro obtenido del radar de pozo.



**Figura 146.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Rocío.

**Tabla 41.** Interpretación litológica a partir de cada uno de los métodos disponibles en el pozo Rocío.

<b>Prof. (m)</b>	<b>Litología Radar</b>	<b>Rocío (V<sub>s</sub>)</b>
0--1	Arena	Capa 1 (340 m/s)
1--2		
2--3		
3--4		
4--5	Arcilla, Arena limosa	
5--6	Grava	
6--7	Arcilla, Arena limosa	Capa 2 (333 m/s)
7--8	Grava	
8--9	Arcilla, Arena limosa	
9--10	Grava	
10--11		
11--12	Arena	
12--13		
13--14	Grava	Capa 3 (439 m/s)
14--15		
15--16		
16--17	Arcilla, Arena limosa	
17--18	Grava	

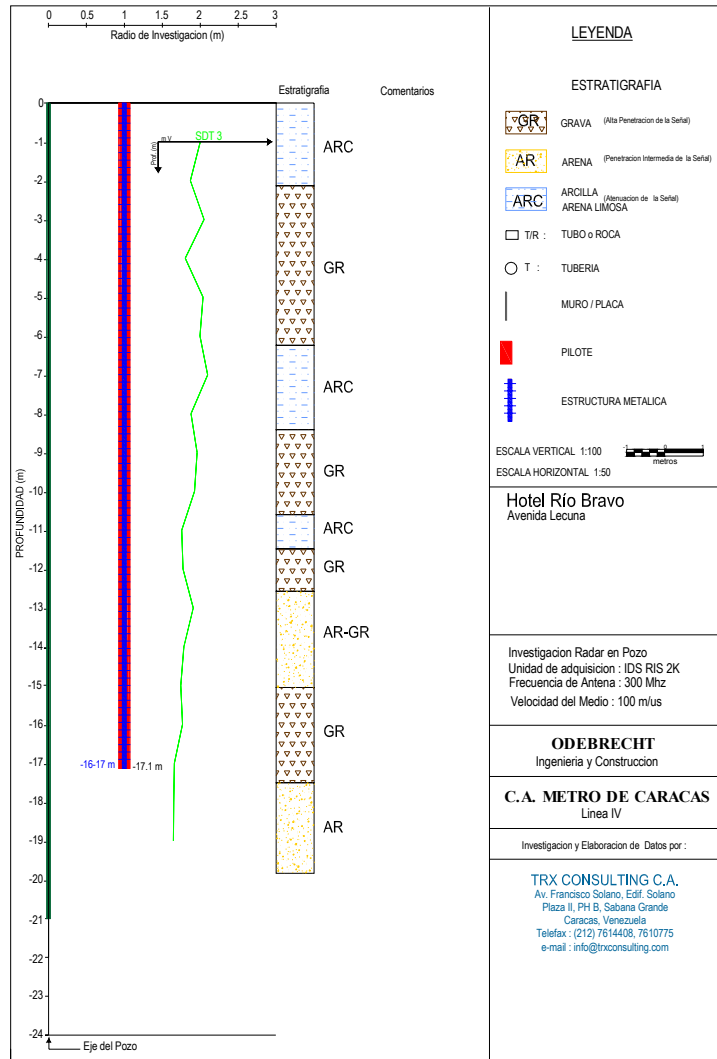
A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron tres capas, y en el radar de pozo se observaron doce capas.

En la correlación entre el radar de pozo y el “downhole” se observa una primera capa en la sísmica, la cual en el radar se visualiza como cuatro capas, la segunda capa en la sísmica se observa en el radar como cinco capas y la última capa Interpretada en la sísmica se ve en el radar como tres capas.

## Pozo Río Bravo 1

La ubicación del pozo se indica en la figura 38.

Este pozo no se correlacionó con mediciones de SPT, sólo se hizo con la respuesta obtenida del radar de pozo.



**Figura 147.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Río Bravo 1.

**Tabla 42.** Interpretación litológica a partir de cada uno de los métodos disponibles en el pozo Río Bravo 1.

<b>Prof. (m)</b>	<b>Litología Radar</b>	<b>Río Bravo 1 (V<sub>s</sub>)</b>
0--1	Arcilla, Arena limosa	Capa 1 (317 m/s)
1--2		
2--3	Grava	
3--4		
4--5		
5--6		
6--7	Arcilla, Arena limosa	
7--8		
8--9	Grava	
9--10		
10--11	Arcilla, Arena limosa	
11--12	Grava	
12--13	Arena, grava	Capa 2 (515 m/s)
13--14		
14--15		
15--16		
16--17	Grava	
17--18		

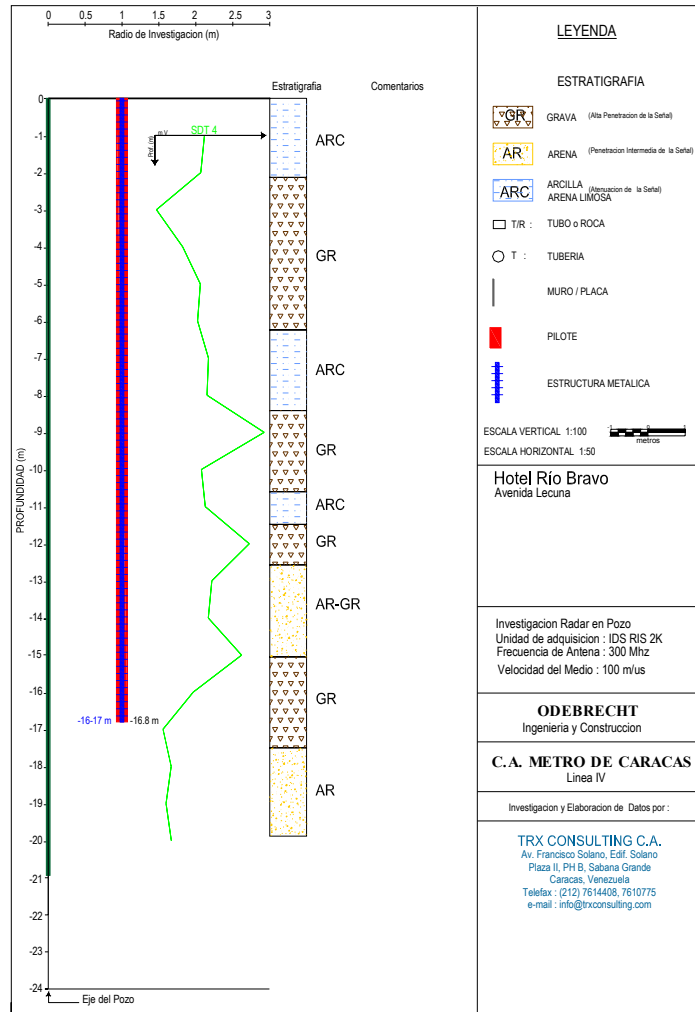
A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron dos capas y en el radar de pozo se observaron ocho capas.

En la correlación entre el radar de pozo y el “downhole” se observa una primera capa en la sísmica, la cual en el radar se visualiza como seis capas y la segunda capa en la sísmica se observa en el radar como dos capas.

## Pozo Río Bravo 2

La ubicación del pozo se indica en la figura 38.

Este pozo no se correlacionó con mediciones de SPT, sólo se hizo con la respuesta obtenida del radar de pozo.



**Figura 148.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Río Bravo 2.



**Tabla 43.** Interpretación litológica a partir de cada uno de los métodos disponibles en el pozo Río Bravo 2.

Prof. (m)	Litología Radar	Río Bravo 2 ( $V_s$ )
0--1	Arcilla, Arena limosa	Capa 1 (310 m/s)
1--2		
2--3		
3--4		
4--5		
5--6		
6--7	Grava	
7--8		
8--9		
9--10	Arcilla, Arena limosa	
10--11	Grava	
11--12	Arcilla, Arena limosa	Capa 2 (512 m/s)
12--13	Arena, grava	
13--14		
14--15		
15--16		
16--17	Grava	
17--18	Arena	
18--19		

A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron dos capas y en el radar de pozo se observaron nueve capas.

En la correlación entre el radar de pozo y el “downhole” se observa una primera capa en la sísmica, la cual en el radar se visualiza como seis capas y la segunda capa en la sísmica se observa en el radar como tres capas.

Debido a la cercanía entre los pozos Río Bravo 1, Río Bravo 2, el hecho de que la medición “crosshole” y la tomografía se hicieron en esos mismos pozos y la cercanía al tendido sísmico de refracción Río Bravo, las interpretaciones sísmicas respectivas son similares (tabla 44).

**Tabla 44.** Comparación de las interpretaciones sísmicas entre los pozos Río Bravo 1, Río Bravo 2, la medición “crosshole” y el tendido de refracción Río Bravo. Los pozos están distanciados cuatro metros y los mismos están distanciados aproximadamente sesenta metros al punto más cercano del tendido (96 metros en el tendido) (figura 49).

Intervalos (m)	Río Bravo 1 (Vp – Vs) m/s	Río Bravo 2 (Vp – Vs) m/s	"Crosshole" (Vp – Vs) m/s	Tendido de refracción (Vs) m/s
1--2				Capa 1 (127)
2--3				
3--4				
4--5				
5--6				
6--7				
7--8				
8--9				
9--10				
10--11	Capa 1	Capa 1	Capa 1	
11--12	(1185 – 317)	(891 – 310)	(1610 – 299)	
12--13	Capa 2 (1831 – 515)	Capa 2 (1403 – 512)	Capa 2 (1872 – 368)	
13--14				
14--15				
15--16				
16--17				
17--18				
18--19				??????

Se observan la misma cantidad de capas en ambas mediciones “downhole”, los valores de ondas “P” son un poco más altos en el pozo Río Bravo 1 y los valores de las ondas “S” en ambos pozos son bastantes similares; por lo que se infiere que hay continuidad entre las capas. En el “crosshole” se observan también dos capas, el tope de la segunda coincide con las dos arrojadas por las mediciones “downhole”, la velocidad de onda “P” en el “crosshole” es superior a la arrojada por las mediciones “downhole” y la velocidad de las ondas “S” es un poco menor en el “crosshole”. Cabe destacar que las discrepancias de velocidades entre la medición “downhole” y el “crosshole” puede ser debida a que en el primero las mediciones obtenidas son de velocidad interválica y en la segunda son velocidades directas. También influye la dirección entre la fuente y el receptor, ya que la misma fue diferente para cada una de las mediciones. En lo que respecta a la tomografía, los datos fueron de mala calidad y no arrojaron resultados, por lo que no se pudieron correlacionar con las otras técnicas empleadas. Por su parte el

tendido de refracción arrojó tres capas, las cuales tienen su tope y base menos profundas que las encontradas en las otras técnicas (posiblemente a variaciones en el espesor de las capas, ya que están separados sesenta metros aproximadamente), las velocidades de las ondas “P” en el tendido de refracción no fueron obtenidas, ya que las llegadas de estas ondas no se visualizaron en la sección sísmica, las ondas “S” del tendido fueron más bajas que las observadas en las mediciones “downhole” y muy parecidas a las obtenidas en el “crosshole”, se observa una primera capa con muy baja velocidad la cual se asocia con un relleno en la zona, por lo que la segunda capa en el perfil correspondería a la primera capa arrojada por la sísmica de pozo y la tercera capa del perfil con la segunda capa interpretada en la sísmica de pozos.

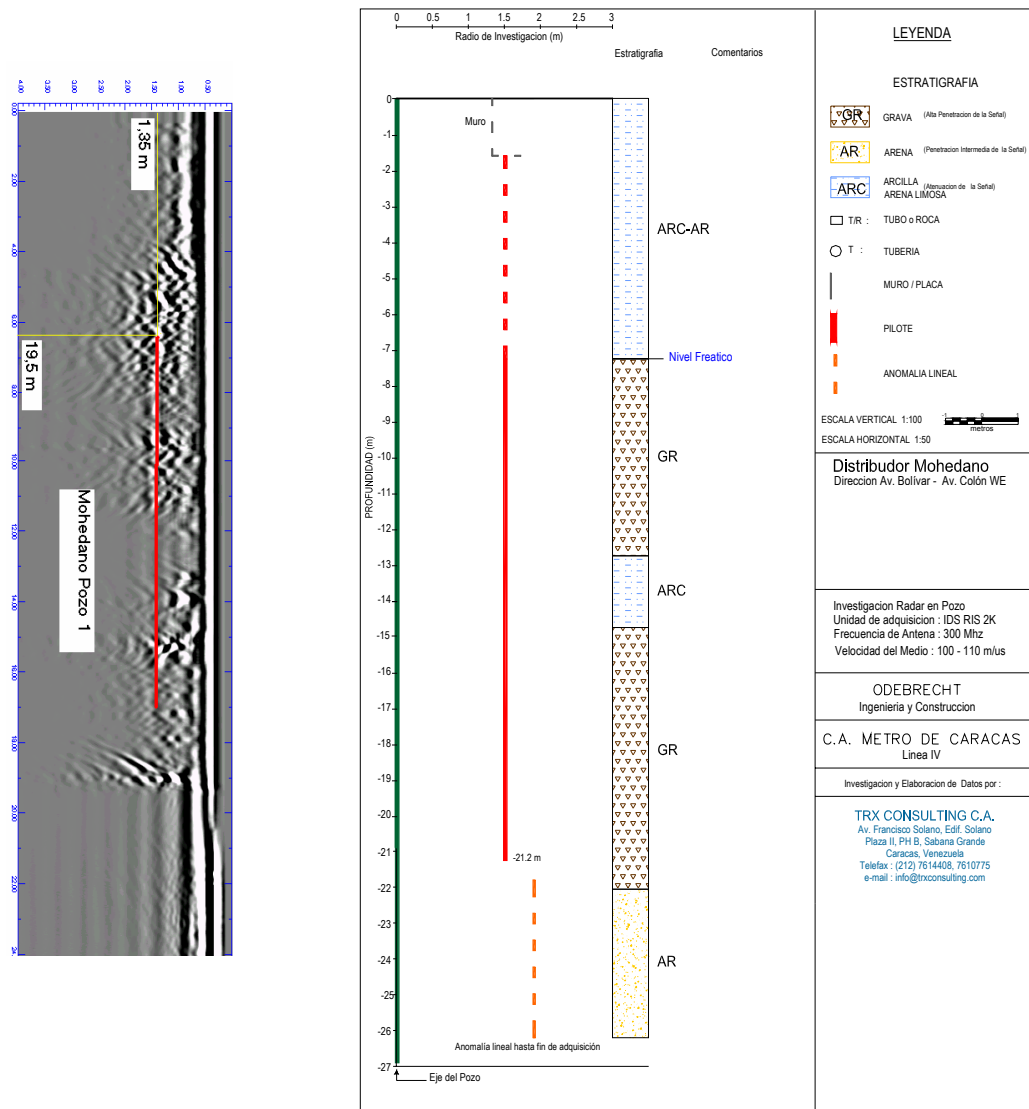
### 4.6.3 Distribuidor Mohedano

#### Pozo Mohedano 1

Nivel freático (TRX Consulting): 7,3 metros de profundidad.

La ubicación del pozo se indica en la figura 39.

Este pozo no se correlacionó con mediciones de SPT, sólo se hizo con la respuesta obtenida del radar de pozo.



**Figura 149.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Mohedano 1.

**Tabla 45.** Interpretación litológica a partir de cada uno de los métodos disponibles en el pozo Mohedano 1.

Prof. (m)	Litología Radar	Mohedano 1 (V <sub>s</sub> )
0--1	Arcilla, Arena limosa	Capa 1 (365 m/s)
1--2		
2--3		
3--4		
4--5		
5--6		
6--7	Grava	Capa 2 (423 m/s)
7--8		
8--9		
9--10		
10--11	Arcilla, Arena limosa	
11--12		
12--13	Grava	
13--14		
14--15		
15--16		
16--17		
17--18		
18--19		
19--20		
20--21	Arena	
21--22		
22--23		
23--24		

A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron dos capas y en el radar de pozo se observaron cinco capas.

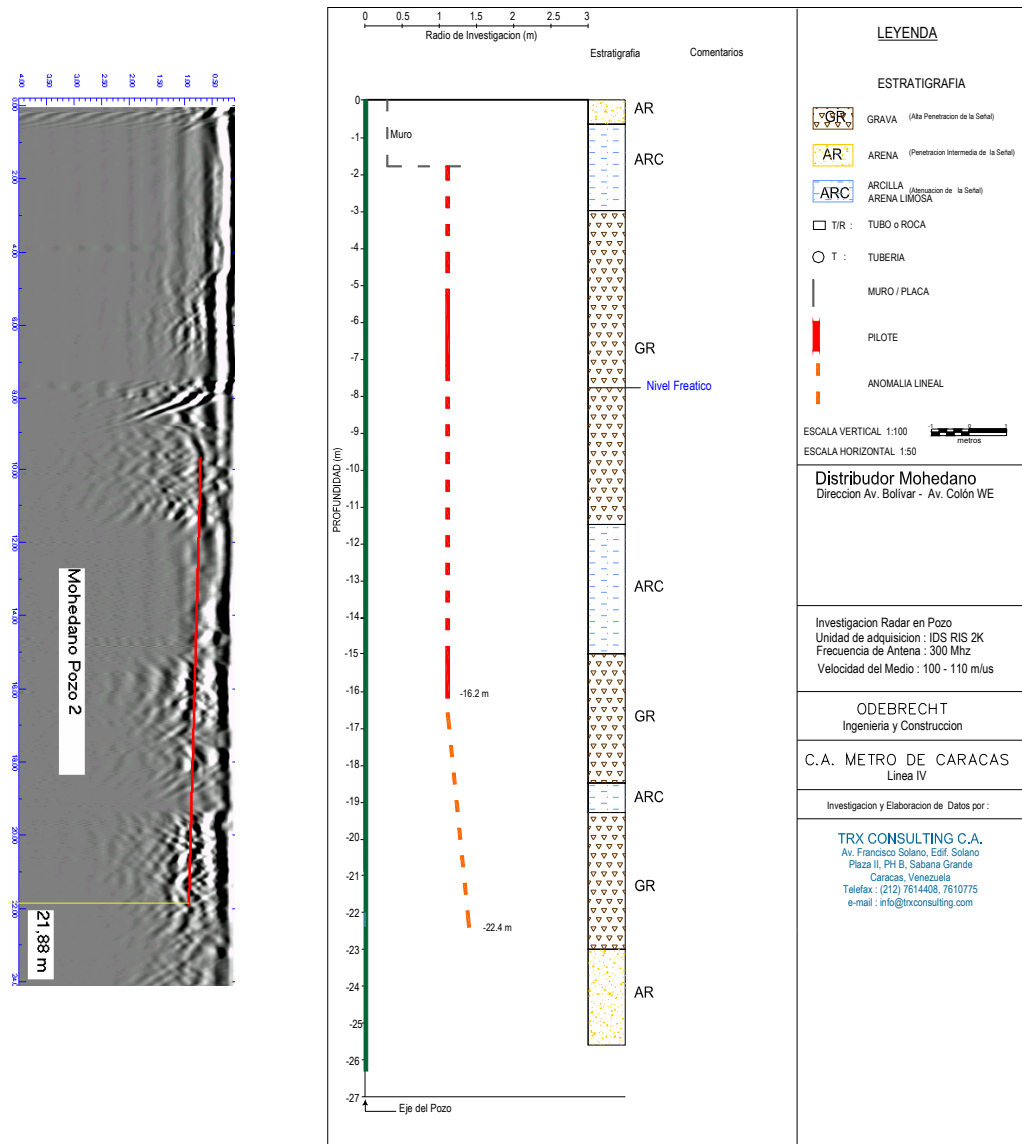
En la correlación entre el radar de pozo y el “downhole” se observa que la primera capa en la sísmica y en el radar se pueden relacionar, sin embargo en la sísmica la base de la capa tiene dos metros de profundidad menos, las otras capas del radar se interpretaron como un solo paquete en la segunda capa de la sísmica.

## Pozo Mohedano 2

Nivel freático (TRX Consulting): 7,8 metros de profundidad.

La ubicación del pozo se indica en la figura 39.

Este pozo no se correlacionó con mediciones de SPT, sólo se hizo con la respuesta obtenida del radar de pozo.



**Figura 150.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Mohedano 2.

**Tabla 46.** Interpretación litológica a partir de cada uno de los métodos disponibles en el pozo Mohedano 2.

Prof. (m)	Litología Radar	Mohedano 2 (V <sub>s</sub> )	
0--1	Arena	Capa 1 (315 m/s)	
1--2	Arcilla, arena limosa		
2--3			
3--4			
4--5			
5--6			
6--7			
7--8			
8--9			
9--10			
10--11			Grava
11--12			Arcilla, Arena limosa
12--13			
13--14			
14--15			
15--16	Grava		
16--17			
17--18			
18--19	Arcilla, arena limosa		
19--20	Grava		
20--21			
21--22			
22--23			
23--24	Arena		Capa 2 (528 m/s)
24--25			
25--26			
26--27			

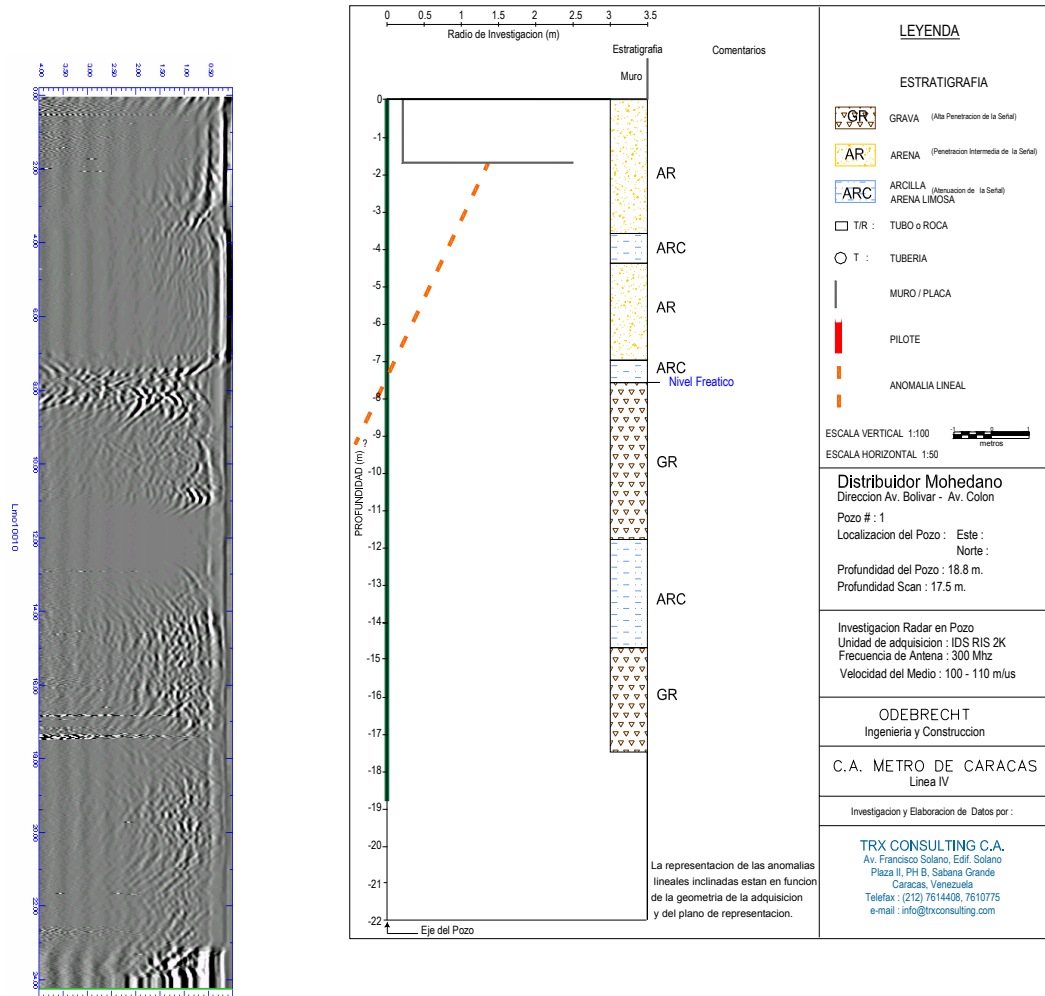
A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron dos capas y en el radar de pozo se observaron ocho capas.

En la correlación entre el radar de pozo y el “downhole” se observa que la primera capa en la sísmica se puede relacionar con la primera y segunda capa del radar, sin embargo en la sísmica la base de la capa tiene dos metros de profundidad más, las otras capas del radar se interpretaron como un solo paquete en la segunda capa de la sísmica.

### Pozo Mohedano 3

La ubicación del pozo se indica en la figura 39.

Este pozo no se correlacionó con mediciones de SPT, sólo se hizo con la respuesta obtenida del radar de pozo.



**Figura 151.** Interpretación del radar de pozo realizada por la compañía TRX Consulting en el pozo Mohedano 3.



**Tabla 47.** Interpretación litológica a partir de cada uno de los métodos disponibles en el pozo Mohedano 3.

Prof. (m)	Litología Radar	Mohedano 3 (Vs)	
0--1	Arena	Capa 1 (370 m/s)	
1--2			
2--3			
3--4	Arcilla, Arena limosa		
4--5	Arena		
5--6			
6--7			
7--8	Arcilla, Arena limosa		
8--9	Grava		Capa 2 (585 m/s)
9--10			
10--11			
11--12			
12--13	Arcilla, Arena limosa		
13--14			
14--15			
15--16	Grava		
16--17			
17--18			

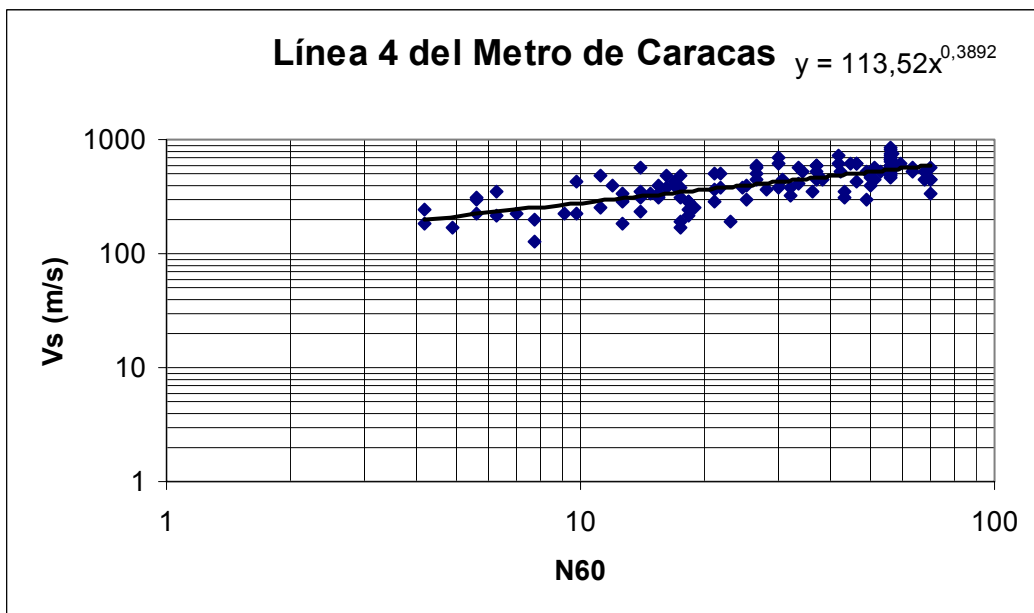
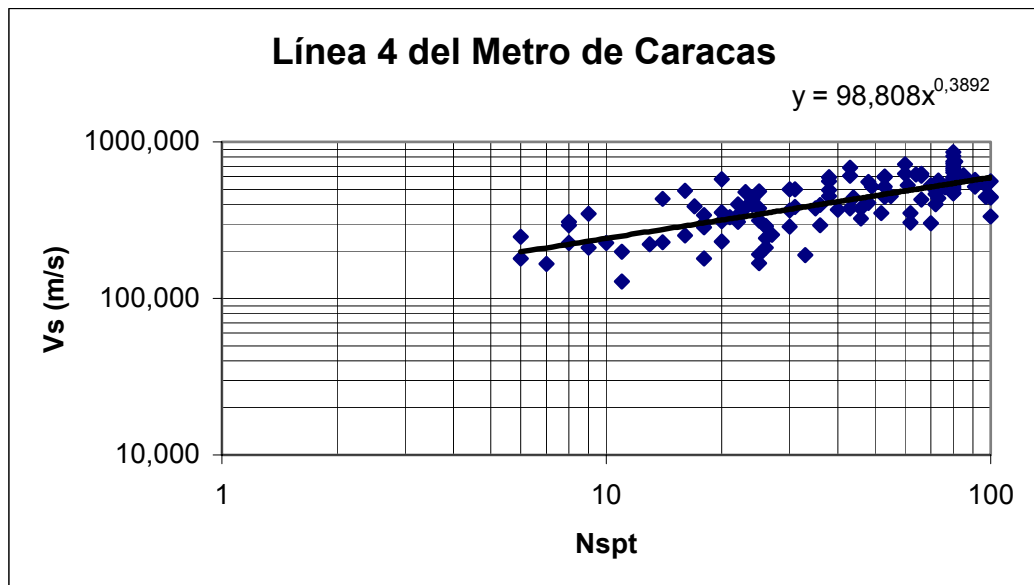
A partir de las mediciones sísmicas se interpretaron dos capas y en el radar de pozo se observaron siete capas.

En la correlación entre el radar de pozo y el “downhole” se observa que las cinco primeras capas del radar se pueden relacionar con la primera vista en la sísmica, aunque la base de ésta se encuentra a un metro menos de profundidad con respecto a quinta capa del radar, la sexta y séptima capa del radar se relaciona con la segunda capa de la sísmica, aunque el tope de la misma se encuentra a un metro menos de profundidad con respecto al radar de pozo. Debido a la cercanía entre los pozos Mohedano 2 y 3, las interpretaciones sísmicas respectivas son similares (tabla 48).

<b>Tabla 48.</b> Comparación de las interpretaciones sísmicas entre los pozos Mohedano 2 y 3, los cuales están distanciados aproximadamente una longitud de ocho metros (figura 39).		
<b>Intervalos (m)</b>	<b>Mohedano 2 (Vp – Vs) m/s</b>	<b>Mohedano 3 (Vp – Vs) m/s</b>
0--1	Capa 1 (1350 – 315)	
1--2		
2--3		
3--4		
4--5		
5--6	Capa 2 (2055 – 528)	Capa 1 (1606 – 370)
6--7		
7--8		
8--9		
9--10		
10--11		
11--12		
12--13		
13--14		
14--15		
15--16		
16--17		
17--18		
18--19		Capa 2 (2075 – 585)
19--20		
20--21		
21--22		
22--23		
23--24		
24--25		
25--26		
26--27	??????	

Se observan la misma cantidad de capas en ambos pozos, aunque las bases se las mismas no coincidieron, valores de ondas “P” y “S” en ambos pozos son bastantes similares, por lo que se infiere que las capas son las mismas, engrosándose la capa 1 desde el pozo Mohedano 2 hasta el 3, y no se tiene información de la base de la capa 2.

4.6.4 Relaciones  $N_{SPT} / V_s$  y  $N_{60} / V_s$  a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.



**Figura 152.** Arriba: relación  $N_{spt} - V_s$  obtenida a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.  
Abajo: relación  $N_{60} - V_s$  a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.

En el análisis estadístico de correlación entre la velocidad de ondas de corte y el  $N_{60}$  a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas se determinó el múltiple R, el múltiple cuadrado R, el múltiple cuadrado ajustado y el error normal de estimación. El coeficiente, error estándar, coeficiente estándar, la tolerancia, el coeficiente t y la probabilidad de datos de poca confianza en las dos colas (tanto para el  $N_{60}$  como para la constante) se observa en la tabla 49. El análisis de varianza se observa en la tabla 50 y los gráficos obtenidos en el mencionado análisis se observan en la figura 153.

La variable dependiente es Vs.

El múltiple R es 0.681

El múltiple cuadrado R es 0.464

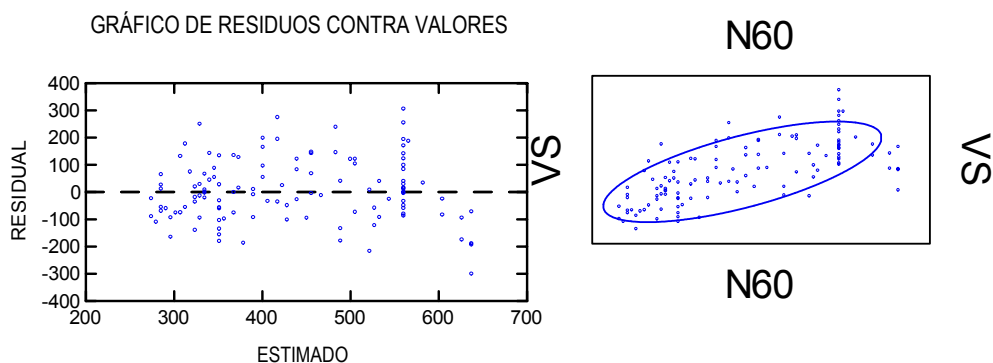
El múltiple cuadrado ajustado es 0.459

El error normal estimado es 116.187

<b>Tabla 49.</b> Resultados obtenidos a partir del análisis estadístico a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.						
Efecto	Coeficiente	Error Estándar	Coeficiente Estándar	Tolerancia	t	P (2Colas)
Constante	253.772	20.999	0.000	.	12.08	0.000
$N_{60}$	5.499	0.549	0.681	1.000	10.01	0.000

<b>Tabla 50.</b> Análisis de varianza a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.					
Fuente	Suma de los cuadrados	df	Cuadrado promedio	Coeficiente F	P
Regresión	1354348.017	1	1354348.017	100.326	0.000
Residual	1565944.805	116	13499.524		

La estadística de Durban – Watson es de 1.005



**Figura 153.** Izquierda: gráfico de residuos contra valores a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas. Derecha: elipse de confianza obtenida a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.

La relación para la línea 4 del Metro de Caracas es bastante confiable, ya que el análisis estadístico mostró que el porcentaje de datos de poca confianza tienden a cero, tanto en el coeficiente de la constante, el del  $N_{60}$  y en el análisis de varianza. La ecuación de regresión general para la línea 4 del Metro de Caracas viene dada por:

$$V_s = 10.289 \cdot N_{60} + 197.287.$$

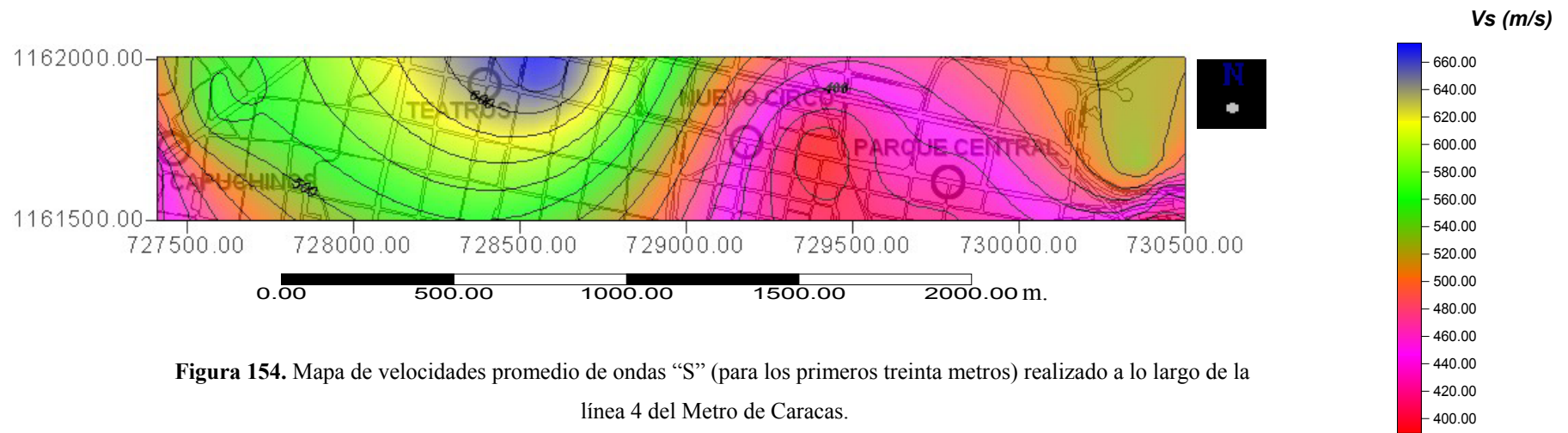
Al observar el gráfico de residuos contra valores y la elipse de confianza (figura 153) se observa que en el primero, los valores residuales no varían en gran medida con respecto a los valores de  $V_s$  estimados y en la elipse de confianza se visualiza a la gran mayoría de los datos dentro de la elipse y los pocos que están por fuera se encuentran cercanos a la misma; por lo que se concluye que la relación  $N_{60} - V_s$  obtenida a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas es bastante confiable.

#### 4.6.5 Mapas de velocidades promedio mínimas de ondas “S” a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.

En el mapa de velocidades promedio mínimas de ondas “S” para los primeros treinta metros de profundidad (NEHRP, 2000), (figura 154) las mismas van aproximadamente desde los 378 hasta los 679 m/s . En la avenida San Martín, cerca de la estación Capuchinos se observan bajas velocidades cercanas a los 440 m/s y siguiendo el rumbo de la avenida se encuentra en gradiente relativamente fuerte, las velocidades tienden a incrementarse más hacia el norte con un promedio de 550 m/s y el gradiente se suaviza un poco.

A lo largo de la avenida Lecuna, en las cercanías de la futura estación Teatros se observan las máximas velocidades, ubicadas aproximadamente entre los 600 m/s, con un gradiente de velocidades relativamente suave con rumbo próximo noreste; hacia la futura estación Nuevo Circo se visualizan las mínimas velocidades, en un orden de los 360 m/s y con un gradiente un poco más fuerte que en la estación anterior, el cual tiene el rumbo de la avenida; en las adyacencias de la futura estación Parque Central, se observan velocidades cercanas a los 400 m/s y el gradiente más bajo visualizado en el mapa, el cual tiene dirección próxima noreste, incrementando velocidades hacia el norte.

En el Distribuidor Mohedano, se observa el gradiente de velocidades más fuerte, el cual posee dirección norte – sur, velocidades próximas a los 440 m/s y las mismas tienden a incrementarse hacia el norte.



**Figura 154.** Mapa de velocidades promedio de ondas “S” (para los primeros treinta metros) realizado a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizaron mediciones geofísicas en pozos disponibles a lo largo de la línea 4 del Metro de Caracas y se definieron de 2 a 3 capas sedimentarias por medio de las mediciones sísmicas.

La técnica de “downhole” ofrece buena información sobre la geometría de las capas en el subsuelo y permite determinar de manera satisfactoria las velocidades interválicas de las ondas “P” y “S”, las mismas se ubicaron entre los 708 – 2087 m/s y 282 – 806 m/s respectivamente.

La aplicación de la técnica “crosshole” obtuvo buena información de las velocidades sólo para los últimos metros de profundidad, debido al alto ruido encontrado en la superficie. Las velocidades de ondas “P” se encontraron entre los 1610 – 1872 m/s y las de “S” entre los 299 – 368 m/s . Una dificultad de esta técnica es que requiere la existencia de dos pozos lo suficientemente cercanos.

Se hizo imposible obtener información por medio de la tomografía sísmica, ya que la relación señal/ruido fue muy baja en este estudio.

Con la sísmica de refracción se observaron tres capas coincidiendo con la geometría en las capas interpretadas en las técnicas de sísmica de pozos, las velocidades de ondas “P” se encontraron en el orden de los 569 – 1925 m/s y las de ondas “S” entre los 127 – 389 m/s .

La sísmica de reflexión en este estudio no tuvo buena resolución, sin embargo se observó continuidad en los reflectores. Los cambios de espesor no son notables y no se observó plegamientos, fallas o contrastes laterales de litología.

Por medio del radar de pozo se obtiene información geológica somera del subsuelo, ya que la técnica permite obtener una imagen de alta resolución del



mismo. Es un método que no afecta al medio ambiente y es muy aplicado en la geotecnia.

El coeficiente de poisson dinámico se puede determinar con gran exactitud a partir de las velocidades de las ondas “P” y “S”. Los demás parámetros de elasticidad tales como el módulo de corte, módulo de Young y modulo de volumen se pueden obtener a partir de las velocidades de ondas “P” y “S” y el de las densidades en el área de estudio.

Para evaluar la respuesta dinámica del subsuelo, se requiere conocer las velocidades de propagación de las ondas de corte en el mismo, por lo que se aplican ensayos sismoelásticos en sitio o se establecen correlaciones entre las velocidades de ondas y el índice de penetración corregido por  $N_{60}$ .

Se obtuvo una relación general de  $N_{SPT} - V_s$  y  $N_{60} - V_s$  para la línea 4 del Metro de Caracas y se concluyó que las mismas resultaron satisfactorias a partir de un análisis estadístico de los datos.

Las velocidades de ondas de corte tienen muchas aplicaciones en el campo de la ingeniería geotécnica, ya que ayudan a complementar la información requerida para la caracterización dinámica del subsuelo.

La exactitud del cálculo de los parámetros de elasticidad mediante velocidades de ondas “P” y “S” es bastante buena ya que son mediciones “in situ”; a diferencia de las muestras de núcleos de rocas, en donde las mediciones son alteradas al cambiar la presión, temperatura y humedad de la roca.

La aplicación de diversos métodos tanto geofísicos como geotécnicos permitirá obtener una mejor caracterización de las condiciones del subsuelo en cualquier área a explorar. Por lo que se pueden aprovechar los pozos perforados para realizar varias pruebas y de esa manera obtener mayor información a un bajo costo.

El mapa de velocidades promedio de ondas “S” en los primeros 30 metros es considerado un ensayo para caracterizar este parámetro en el área de estudio, basándose en las recomendaciones usadas en el BSSC-NEHRP (2000). En la norma COVENIN 1756-01 (2001) la velocidad de ondas de corte es considerada uno de los parámetros críticos en la caracterización del subsuelo, pero no se pone mayor énfasis en como debe ser determinado. Hasta la fecha se determina generalmente a través de correlaciones entre  $N_{SPT} - V_s$  y  $N_{60} - V_s$ , sin que existan datos experimentales en Venezuela que puedan corroborar las tablas existentes. El presente estudio constituye un primer paso en la determinación de la velocidad de las ondas de corte en una determinada zona de Caracas.

Se recomienda realizar estudios de SPT y mediciones sísmicas “downhole” en un mismo pozo o en pozos cercanos; así como también mediciones “crosshole” en donde sea posible, con el fin de perfeccionar las relaciones  $N_{SPT} - V_s$  y  $N_{60} - V_s$  y el mapa de velocidades de ondas de corte obtenidos en este trabajo.

Se recomienda también llevar a cabo este tipo de correlaciones en otras áreas de Caracas para tratar de obtener una relación  $N_{SPT} - V_s$  y  $N_{60} - V_s$  generalizada.

En lugares en donde las perforaciones son de poca profundidad (15 metros aproximadamente) se recomienda realizar mediciones a partir de sísmica de superficie para obtener información a más profundidad de valores de ondas “S” y por lo tanto conocer la respuesta dinámica del subsuelo.

## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS CITADAS

**Abeki, N., T. Enomoto, T. Guevara y Z. Villegas** (1995). Fundamental concept for Seismic microzonation and preliminary surveys of microtremor observations in Caracas and Cumaná City, Venezuela. II Coloquio Internacional sobre “Microzonificación Sísmica” y V Reunión de Cooperación Iberoamericana, Cumaná, Venezuela, 12 al 16 de junio de 1995, Resumen.

**Acuña, H.** (1990). Procesamiento de tiros de verificación sísmica (TVS). Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 52 p.

**Aguerrevere, S. E y G. Zuloaga** (1937). Observaciones Geológicas en la Parte Central de la Cordillera de la Costa. Venezuela. Bol. Geol. y Min., Caracas, 1(2-4): 3-22.

**AIJ** (1993). Earthquake Motion and Ground Conditions. *In Commemoration of the 20<sup>th</sup> Anniversary of the Research Subcommittee on Earthquake Ground Motion, The Architectural Institute of Japan.* AIJ Japan.

**Aisiks, E y C. Redel** (1975). Consideraciones Geológicas y Sísmicas sobre el Metro de Caracas. Venezuela. *IV Congreso Geológico Venezolano*, Caracas, V:2913-12945.

**Alviar, J., D. Penela, H. Echezuría** (1986). Desarrollo de un sistema de medición para evaluar la eficiencia energética en el campo del SPT. *Memorias del IX Seminario de Geotecnia*, SVMSIF, Caracas, 1:28.

**Ampuero, A.** (2000). Ensayos de Refracción Sísmica Aplicados a la Caracterización Geotécnica de Algunos Sitios de Santiago. Trabajo Especial de Grado. Pontificia Universidad Católica de Chile. 165 p.

**Barboza, L y S. Rodríguez** (2001). Integración de la Geología del Estado Vargas y del Flanco Sur del Macizo del Ávila al Norte de Caracas. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 270 p.

**Beckwith, G y L, Hansen** (1981). Calcareous soils of southwestern United States, en Demars, K. R. y Chaney, R. C., Eds., Geotechnical properties, behavior and performance of calcareous soils: Spec. Tech. Pub. 777: Am. Soc. for Testing and Materials.

**Calderón J.** (2000). Caracterización Geotécnica de Perfiles de Suelos Mediante Tomografía Sísmica. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. pp 89.

**Cantos, J.** (1974). Tratado de Geofísica Aplicada, Madrid (España) Litoprint pp 520.

**Cavada, J.** (2000). Guía de Prospección Sísmica por Refracción. Universidad Central de Venezuela. Versión 1.

**Chalbaud, D.** (2000). Determinación del Espesor Cortical del Escudo de Guayana a Partir de Análisis de Información Sísmica de Refracción. Trabajo Especial de Grado. Universidad Simón Bolívar. 124 p.

**COVENIN 1756-98.** (2001). Edificaciones sismorresistentes. Fondonorma, Caracas, 113 p.

**Craig, R.** (1987). Soil Mechanics, Van Nostrand Reinhold.

**Décourt, L., Muromachi, Nixon, Schmertmann, Thornburn y Zolkov** (1988). The Standard Penetration Test, State of the art report. ISOPT 1, Orlando, USA, 3:26.

**De Marco, P.** (2000). Determinación de la forma tipificada del terreno de acuerdo a la norma venezolana COVENIN 1756-98. *Memorias del XVI Seminario Venezolano de Geotecnia*. SVMSIF, Caracas, 363 – 374 p.

**De Marco, P.** (2002). Corrección del índice de resistencia a la penetración (SPT) considerando la eficiencia energética del equipo. *Boletín Geos N°35*, UCV, Caracas, 67 – 73 p.

**Dengo, G.** (1951). Geología de la Región de Caracas. *Boletín de Geología*, (Venezuela). 1(1): 39-116.

**Dengo, G.** (1953). Geology of the Caracas región. Venezuela. *Geol. Soc. Amer. Bull* 64(1): 7:40.

**Dobrin, M.** (1961) Introducción a la Prospección Geofísica. Barcelona (España). Omega 483 p.

**Duval, A.-M., J.-P. Méneroud, S. Vidal y A. Singer** (1988). Relation between curves obtained from microtremor and site effects observed after Caracas 1967 Earthquake. 11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, 1-9 p.

**FUNVISIS.** (1978). Segunda Fase del Estudio del Sismo ocurrido en Caracas el 29 de Julio de 1967. Ministerio de Obras Públicas, Comisión Presidencial para el estudio del Sismo, FUNVISIS, Caracas, Venezuela, Volumen A, 517 p.

**Gibbs, H y W, Holtz** (1957). Research on determining the density of sands by spoon penetration testing. Proc. 4<sup>th</sup> Internat. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, 1, Butterwoths.

**González de Juana, C., J. M. Iturralde y X. Picard** (1980). Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas. Edic. Foninves, Caracas, 2 Vols. 1021 p.

**González, J.** (1997). La línea 4 del Metro de Caracas. [Revista en línea]. 17

Disponible: <http://www.analitica.com/archivo/vam1997.07/sxxi3.htm> [Consulta: 2003, mayo 19]

**JICA.** (2003). Estudio sobre el Plan Básico de Prevención de Desastres en el Distrito Metropolitano de Caracas. Alcaldía del Distrito Metropolitano de Caracas, JICA, Caracas, Venezuela, Informe de Avance (2) 23-24 p.

**Kantak, P.** (2001). Modeling of the thickness of the aluvial sediments in the Caracas valley, Venezuela, based on geological and geophysical data and their GIS-integration. Tesis, University of Bonn – FUNVISIS, 232 p.

**Kokusho, T.** (1992). Dynamic properties of ground. Lecture on soil-structure interaction, Tsuchi to Kiso, JSSMFE, (40): 4.

**Lunne, T., S Lacasse., N. S. Rad y L. Décourt** (1989). SPT, CPT, pressuremeter testing and recent developments on in situ testing. *Norges Geotekniske Institutt (NGI)*.

**Mellet, J.** (1995). Ground Penetrating Radar Applications in Engineering, Environmental Management, and Geology. *J. of Applied Geophysics*, 33 (1-3): 157-166.

**Metroplanet.** (2000). Caracas Subway Network.

Disponible: <http://www.metropla.net/am/cara/caracas.htm> [Consulta: 2003, mayo 19]

**Miller, R. D., D. W. Steeples y M. Brannan** (1989). Mapping a bedrock surface under dry alluvium with shallow seismic reflections. *Geophysics*, 54, 1528-1534.

**Navarro, E., M. Ostos y F. Yoris** (1988). Revisión y Redefinición de Unidades Litoestratigráficas y Síntesis de un Modelo Tectónico para la Evolución de la Parte Norte-Central de Venezuela Durante el Jurásico Medio-Paleógeno. *Acta Científica Venezolana*, 39:427-436.

**Requena, N.** (2000). Análisis de velocidad de sísmica de superficie y de pozos para migración en profundidad, utilizando datos 3D de los campos El Furrial y Carito. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 192 p.

**Rocabado, V.** (2000). Períodos Fundamentales del Suelo de la Ciudad de Caracas a Partir de Mediciones de Ruido Ambiental. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. pp 87.

**Romero, M y A. Cragno** (2001). Evaluación Geofísica Integral de los Conos Aluviales en Macuto, Caraballeda y Tanaguarena. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. 81 p.

**Sánchez, J.** (2001). Modelaje Gravimétrico del Basamento de la Cuenca de Los Palos Grandes. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. pp 83.

**Schepers, R.** (1977). High Resolution Near Surface Reflection Measurements Using a Vertical Array Technique. *J. Geophys*, 43: 791-806.

**Schmertmann, J y A. Palacios** (1979). Energy dynamics of SPT. *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 105(GT 8): 909-926

**Schlumberger.** (1984). Sísmica de Pozo, México D.F., 43 p.

**Seed, H., R., Wong., I, Idriss y K, Tokimatsu** (1984). Moduli and damping factors for dynamic analysis of cohesionless soils. Rep. No. UCB/EERC-84/14, Univ. Of California Press, Berkeley.

**Seismograph Service Corporation of Delaware EEUU.** (1950). Informe sobre investigaciones de aguas subterráneas del Valle de Caracas; Instituto Nacional de Obras Sanitarias (INOS), Caracas, 189 p.

**Singer, A.** (1977). Tectónica Reciente, Morfogénesis Sísmica y Riesgo Geológico en el Graben de Caracas, Venezuela, *V Congreso Geológico Venezolano*, 1861-1902 p.

**Sirles, P.** (1988). Shear wave velocity measurements in embankment dams. *Proc. From the Am. Soc. Civ. Eng. Earthquake engineering and soil dynamics II Conference*, Park City, Utah, June 27-30.

**Sirles, P y A, Viksne** (1990). Site-Specific Shear Wave Velocity Determinations for Geotechnical Engineering Applications, en Ward., *Geotechnical and environmental geophysics: Investigations in geophysics N°5. Volume III: Geotechnical. Society of Exploration Geophysicists*. 121-131 p.

**Skempton, A. W.** (1986). Standard Penetration Test, procedures and the effect in sand of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and over consolidation. *Géotechnique*, 36(3): 425-447.

**Smith, R. J.** (1952). Geología de la Región de Los Teques-Cúa. *Bol. Geol. Venezuela*, 2(6): 333-406.

**Steeple, D. W.** (2000). A review of shallow seismic methods. Department of Geology, University of Kansas, December. 43 (6): 1021- 1041.



**Sternberg, B., M, Poulton y S, Thomas** (1990). Geophysical Investigations in Support of the Arizona SSC Project, en Ward., Geotechnical and environmental geophysics: Investigations in geophysics N°5. Volume III: Geotechnical. *Society of Exploration Geophysicists*. 211-228 p.

**Sykora, D y K, Stokoe** (1983). Correlations of in situ measurements in sands of shear wave velocity, soil characteristics, and site conditions. Geotechnical Engineering Report GR83-33, Univ. of Texas.

**Telford, M., P, Geldart y E, Sheriff** (1990). Applied Geophysics. 192-272 p.

**Terzaghi, K y R, Peck** (1967). Soil mechanics in engineering practice. (2<sup>nd</sup> Edition): John Wiley & Sons.

**Troncoso, J.** (1965). In Situ Impulse Test for Determination of Soil Shear Modulus as a Function of Strain. Tesis (Doctor of Philosophy). Urbana, Champaign, University of Illinois.

**Troncoso, J.** (1979). Cross-Hole and Down-Hole Vs by Mechanical Impulse. *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105 (GT1): 118-119, January.

**Troncoso, J.** (1992). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica Antisísmica. Chile, Ediciones Universidad Católica de Chile. 144 p.

**Urbani, F. y M. Ostos** (1989). El Complejo Ávila, Cordillera de la Costa, Venezuela. GEOS, UCV, Caracas. (29): 205-217.

**Wehrmann, M.** (1972). Geología de la Región Guatire-Colonia Tovar. Bol. Geol. Caracas, Public. Esp. 5 4:2093-2119.

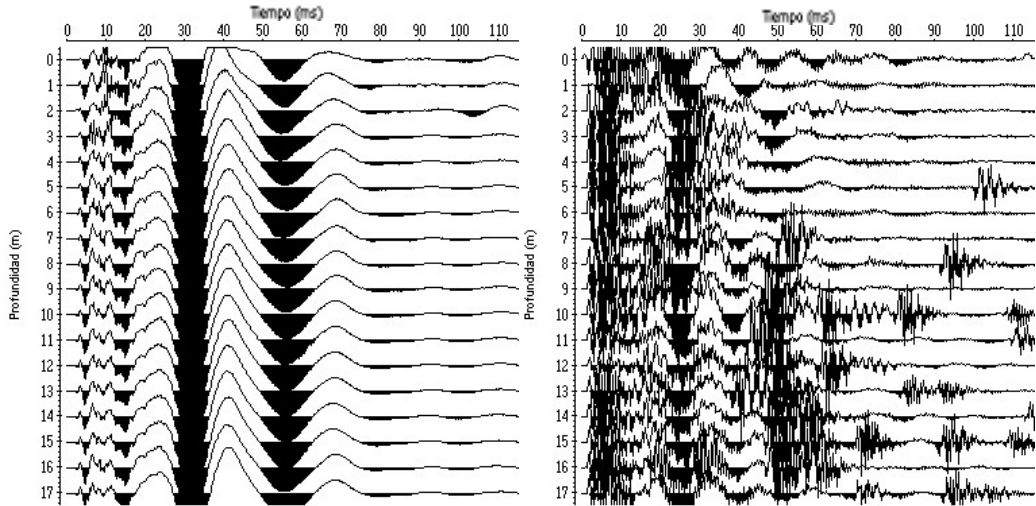
**Weston Geophysical Engineers International, INC.** Seismic investigations, Valley of Caracas and the Litoral Central, *Comisión Presidencial para el Estudio del Sismo de Caracas de 1967*.

**Wrench, B y E, Nowatzki** (1986). A relation-ship between deformation, modulus and SPT N for gravels, in: use of in situ tests in geotechnical engineering: Proc., Am. Soc. Civ. Eng., Geotech. Special Pub. #6.

# APÉNDICE A

## 1. Registros sísmicos obtenidos a partir de la técnica “Downhole”.

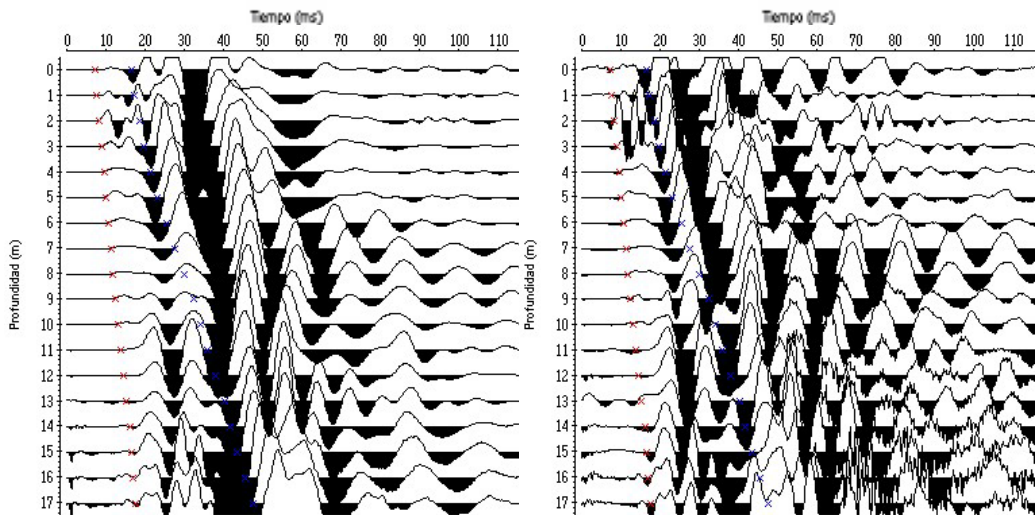
### 1.1 Pozo San Vicente 1.



**Figura A-1.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

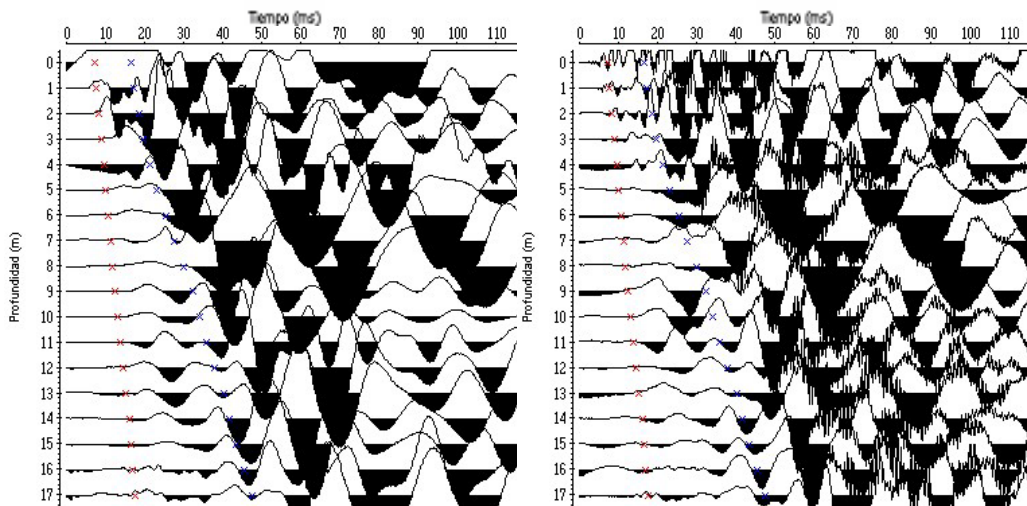
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.



**Figura A-1.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

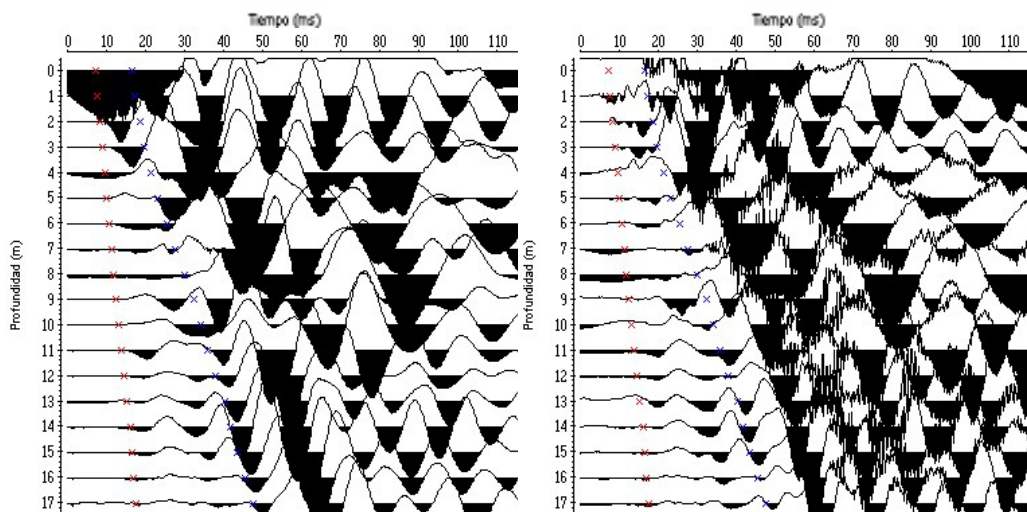
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-1.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

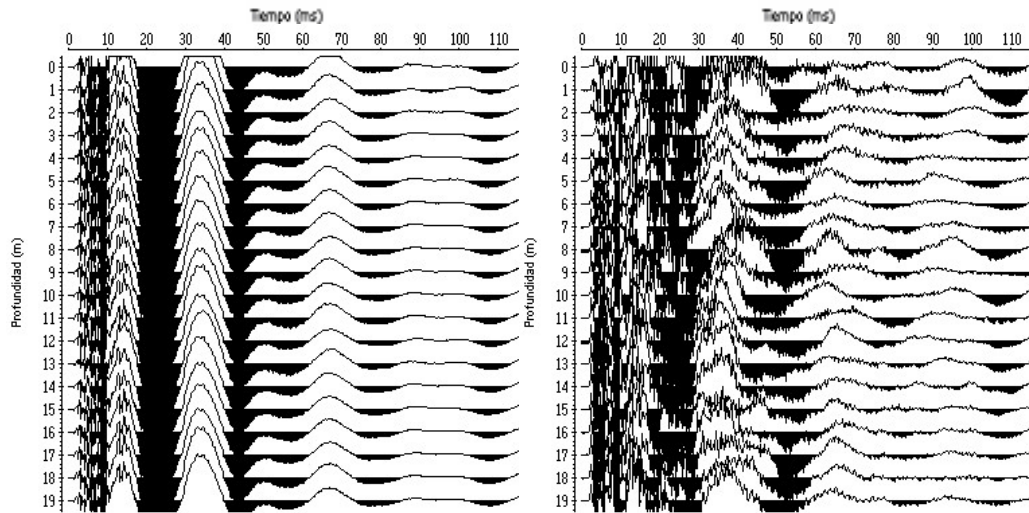


**Figura A-1.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

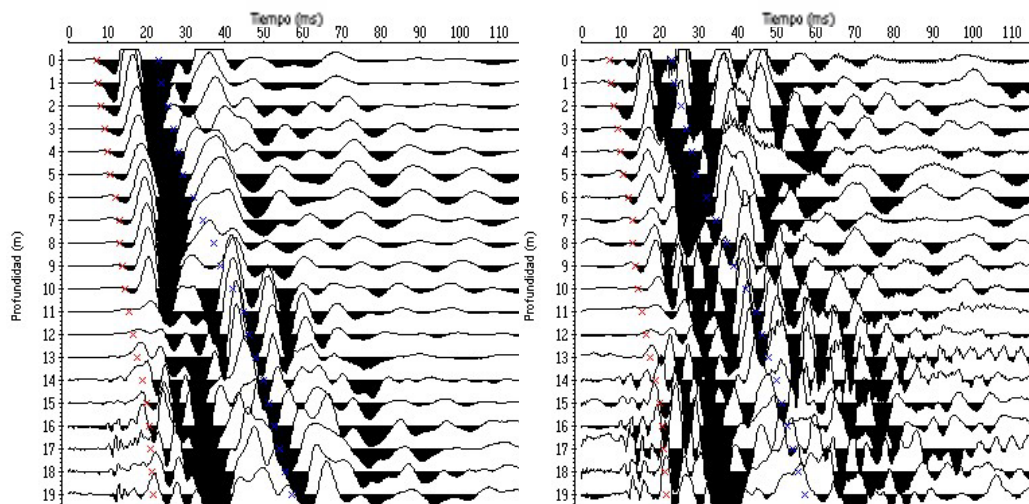
## 1.2 Pozo San Vicente 2.



**Figura A-2.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

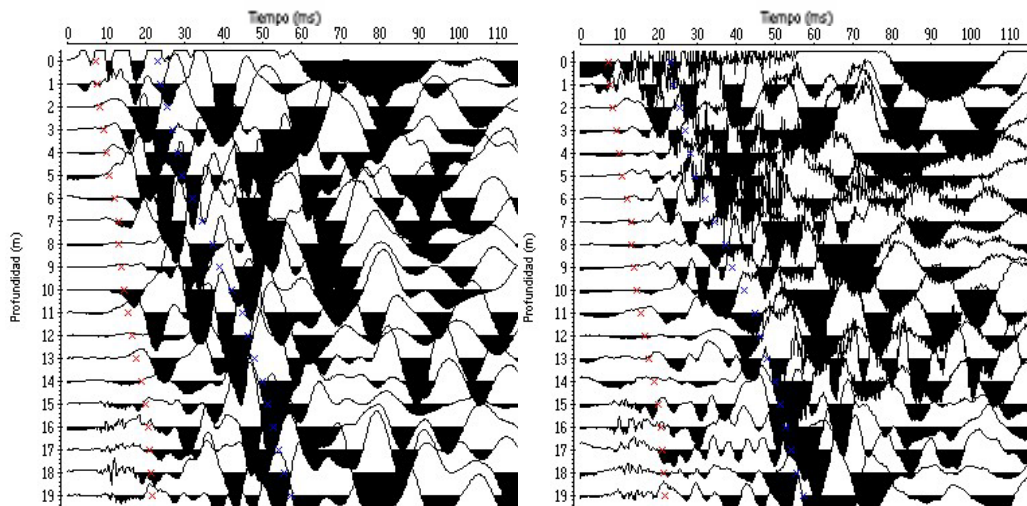
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.



**Figura A-2.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

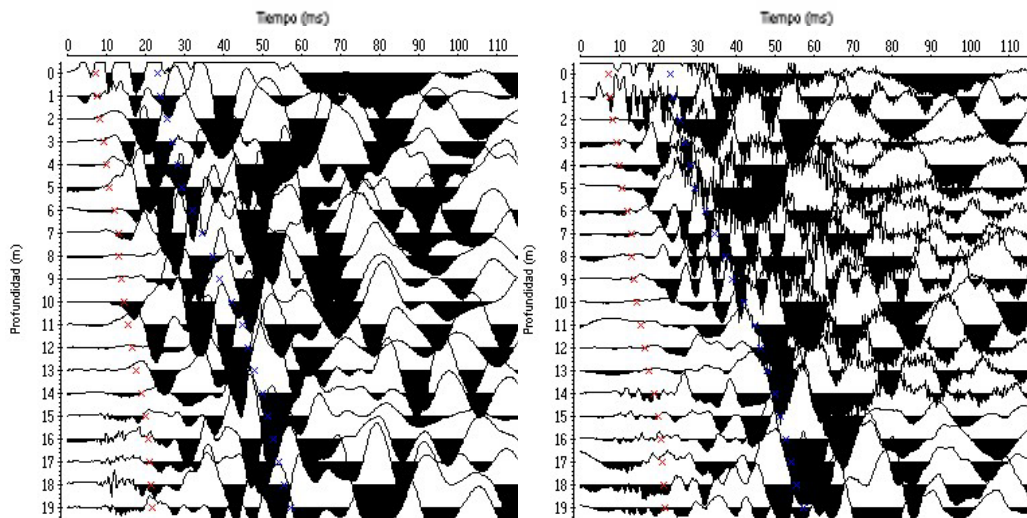
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-2.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo en el pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

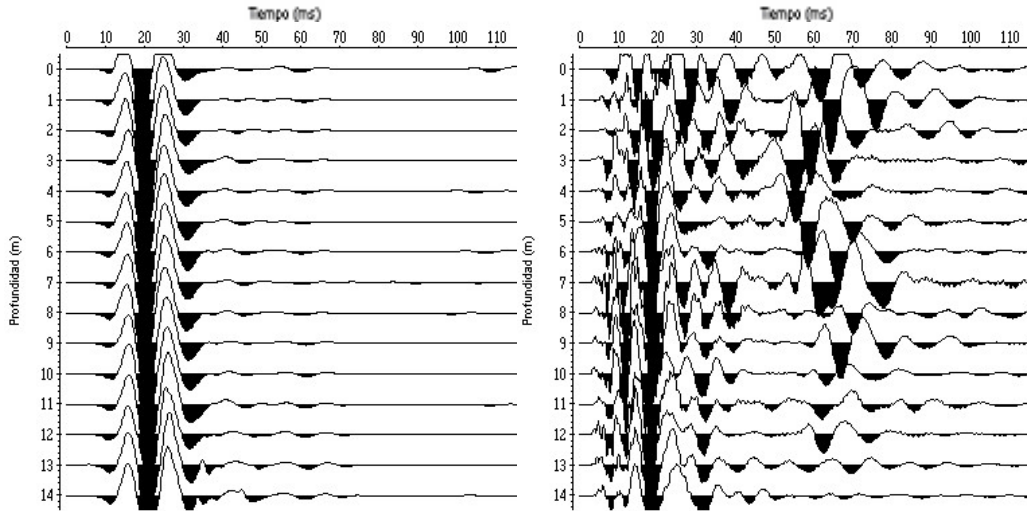


**Figura A-2.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

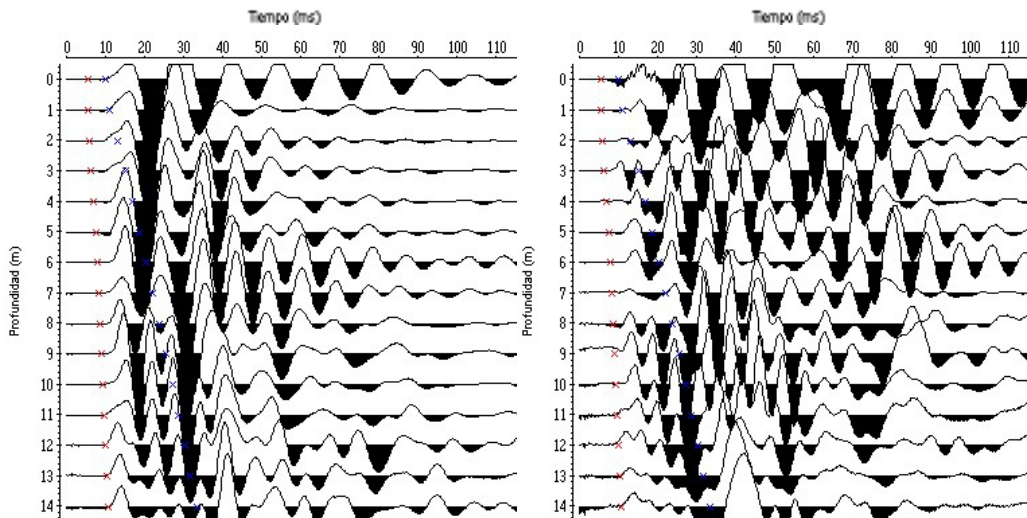
### 1.3 Pozo Royal.



**Figura A-3.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.

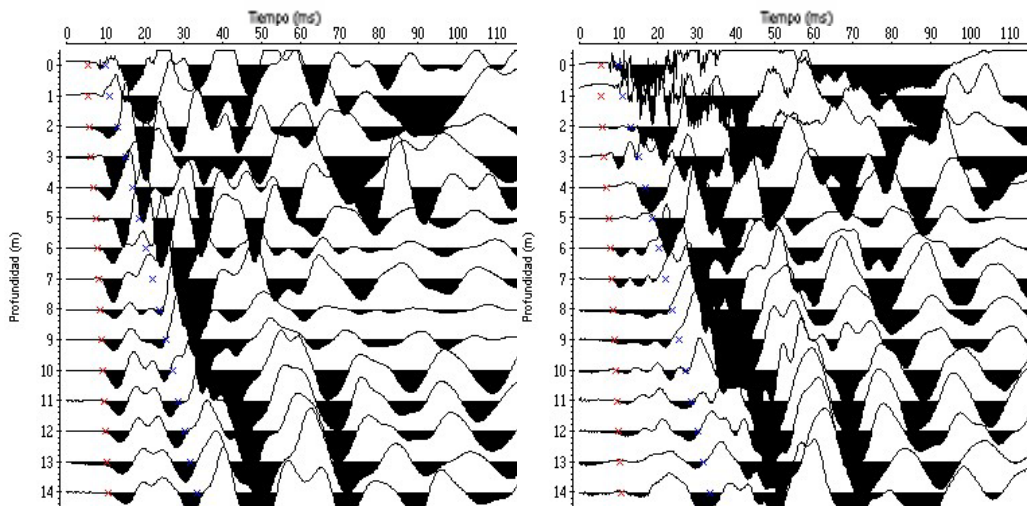


**Figura A-3.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

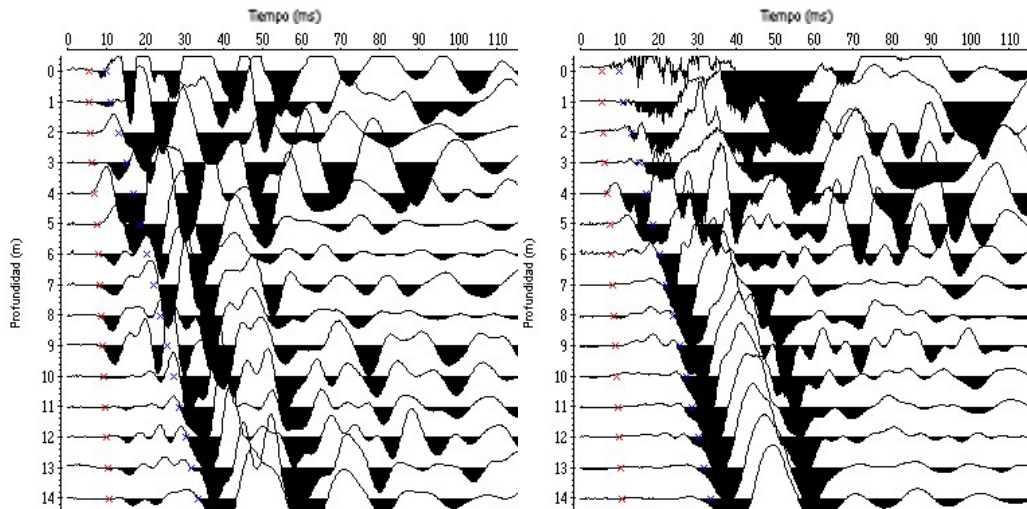




**Figura A-3.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

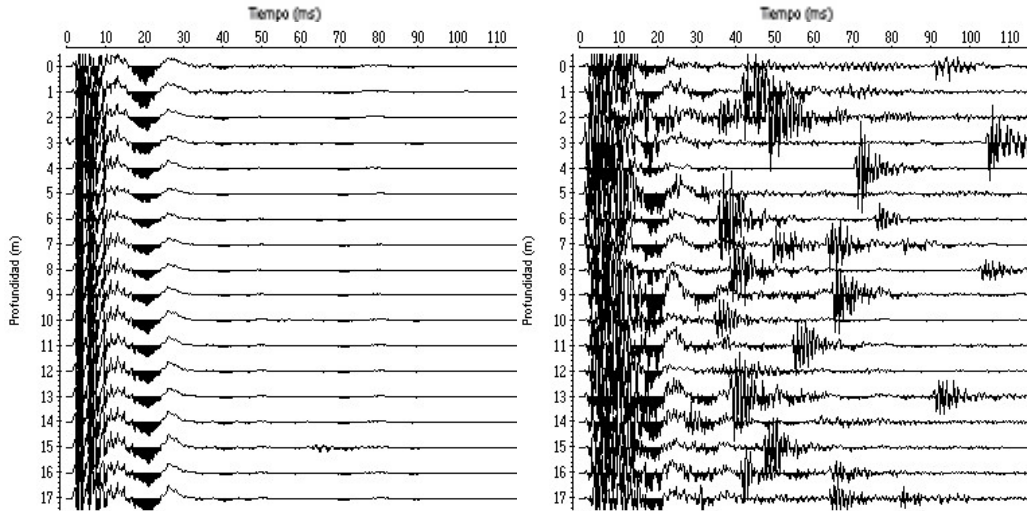


**Figura A-3.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

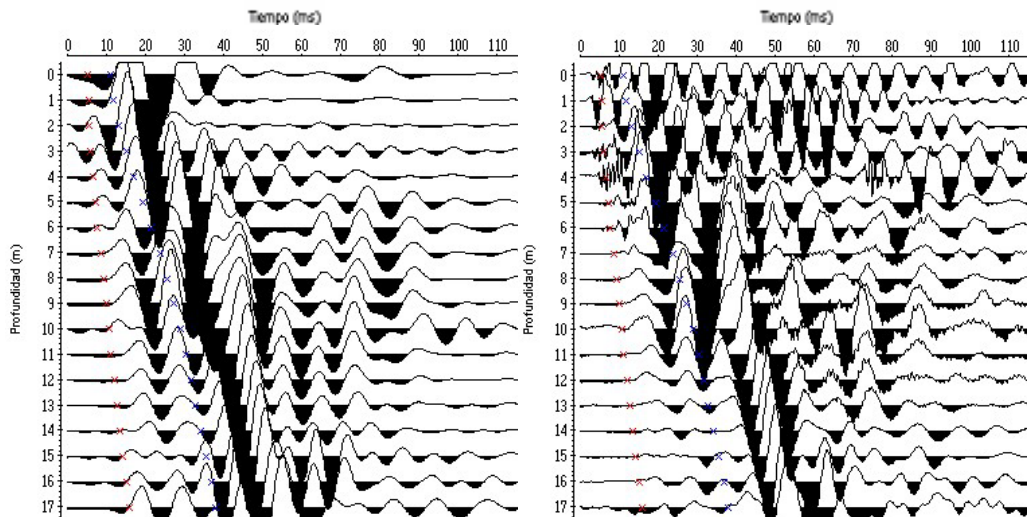
## 1.4 Pozo Don Martín



**Figura A-4.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

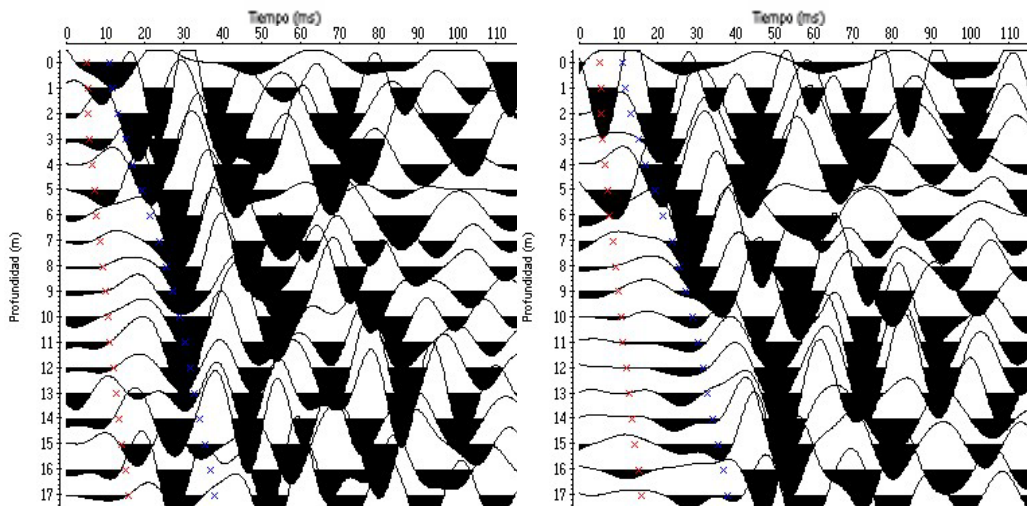
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.



**Figura A-4.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

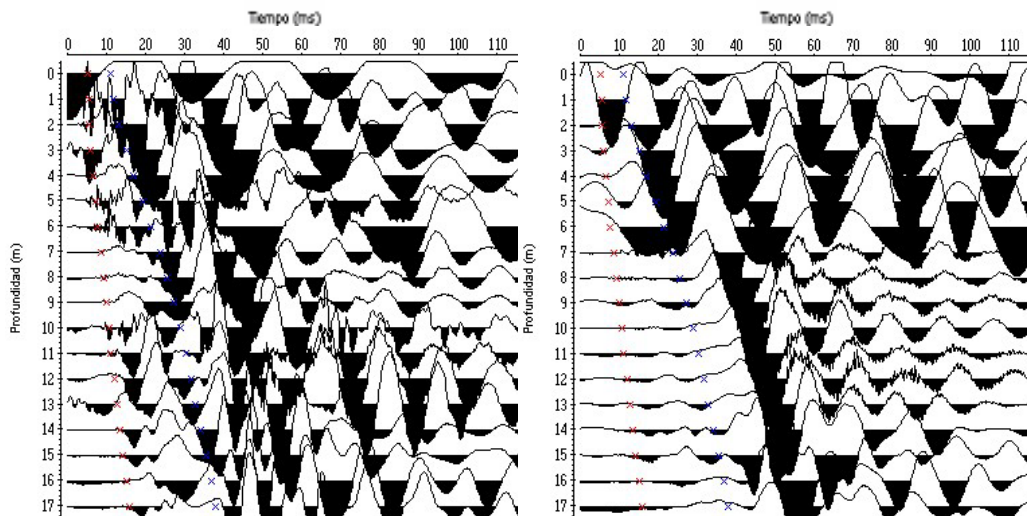
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-4.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

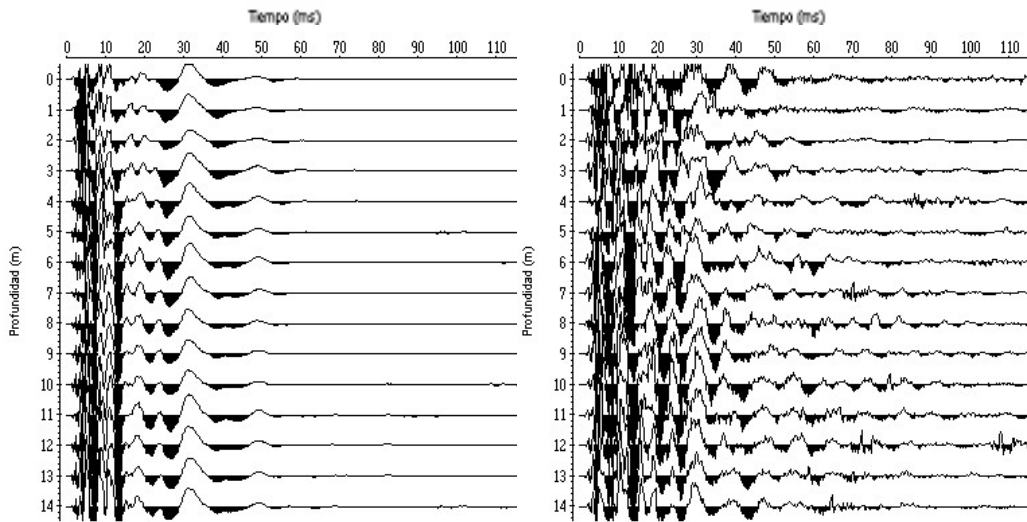


**Figura A-4.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

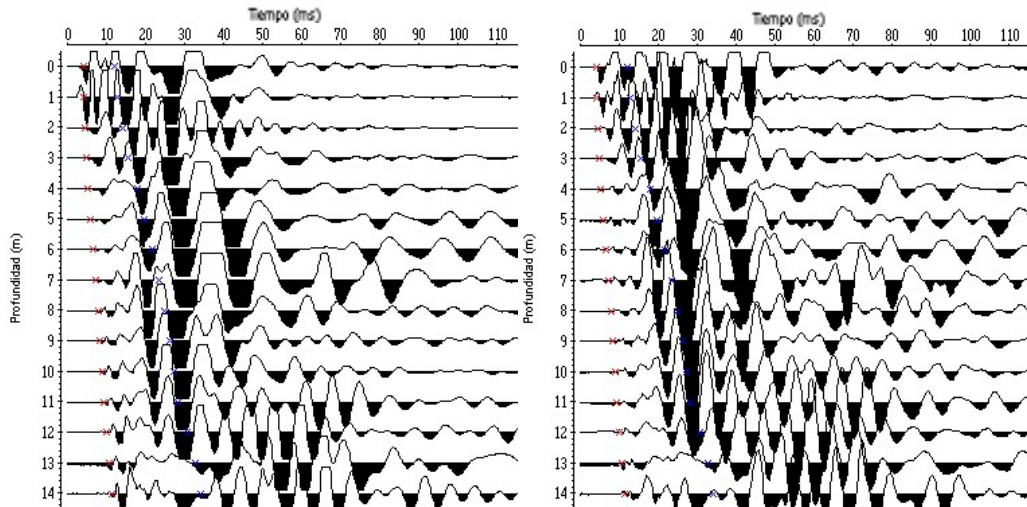
## 1.5 Pozo Pitter



**Figura A-5.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

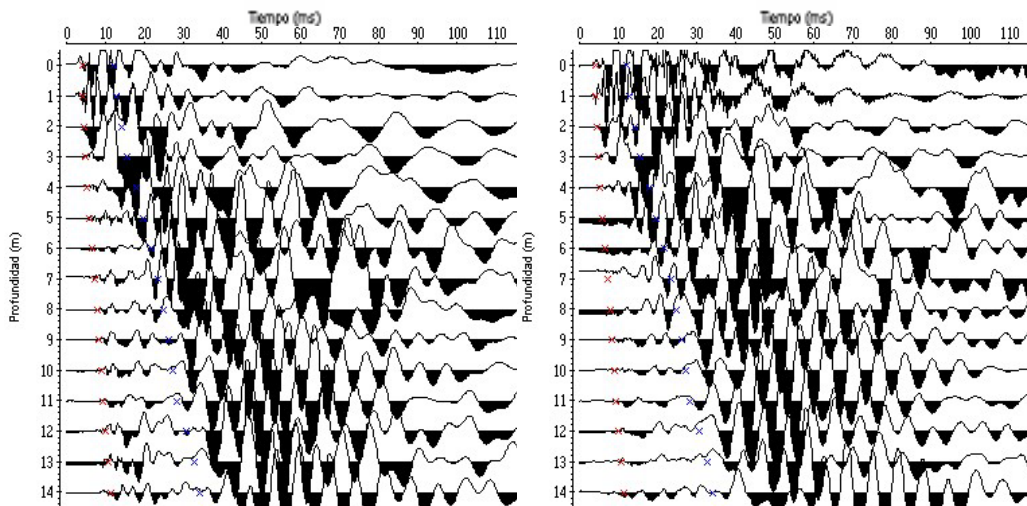
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.



**Figura A-5.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

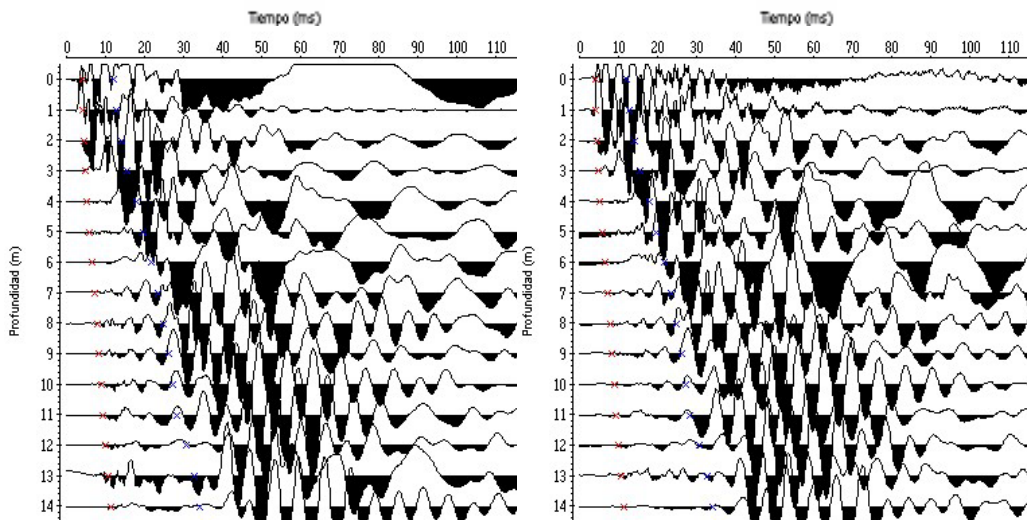
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-5.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

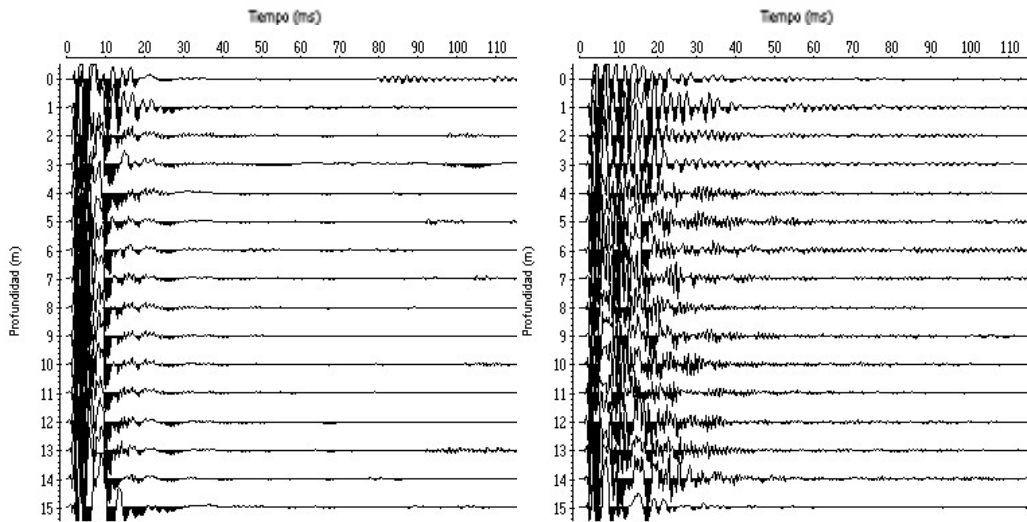


**Figura A-5.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

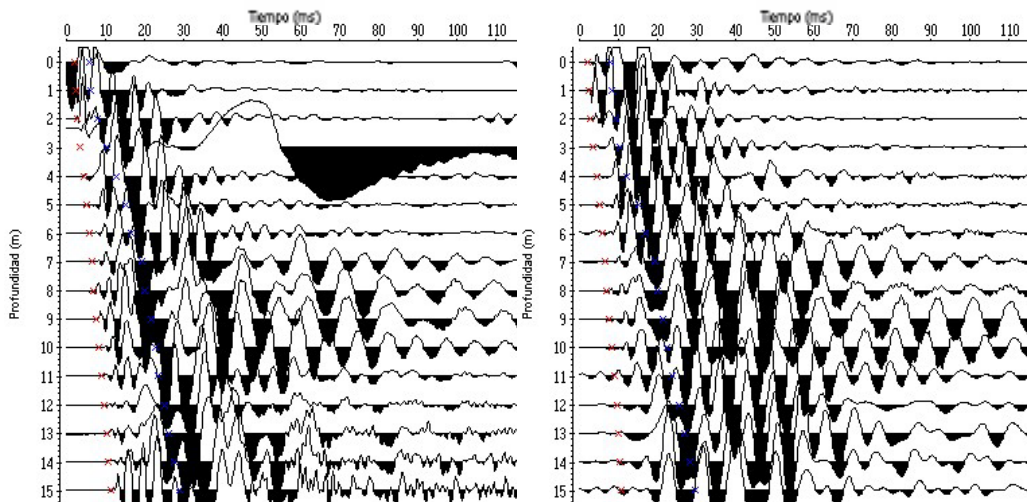
## 1.6 Pozo Berna



**Figura A-6.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

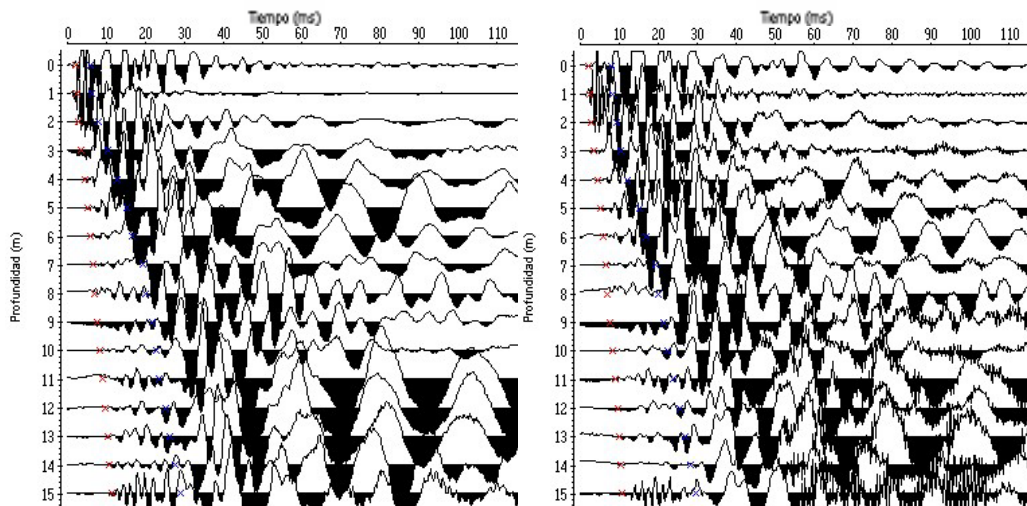
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.



**Figura A-6.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

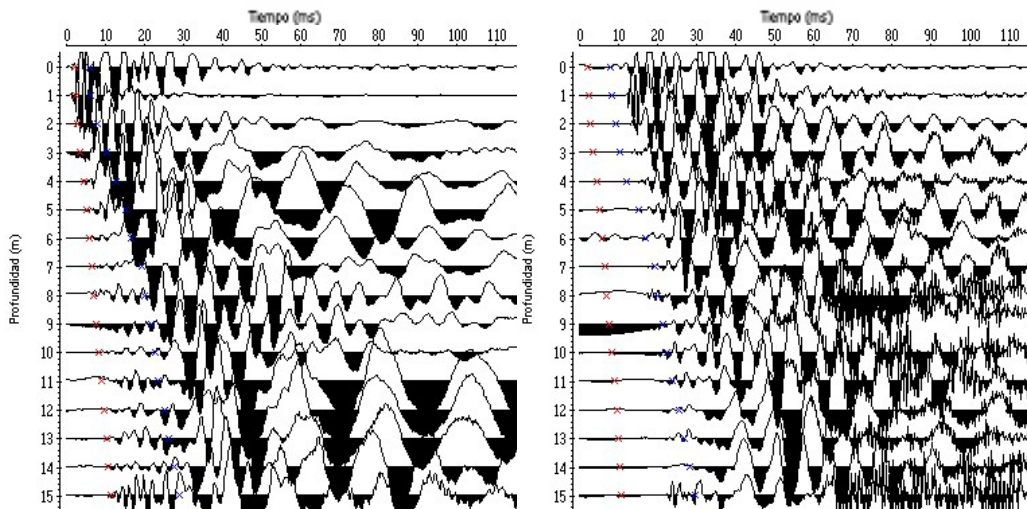
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-6.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

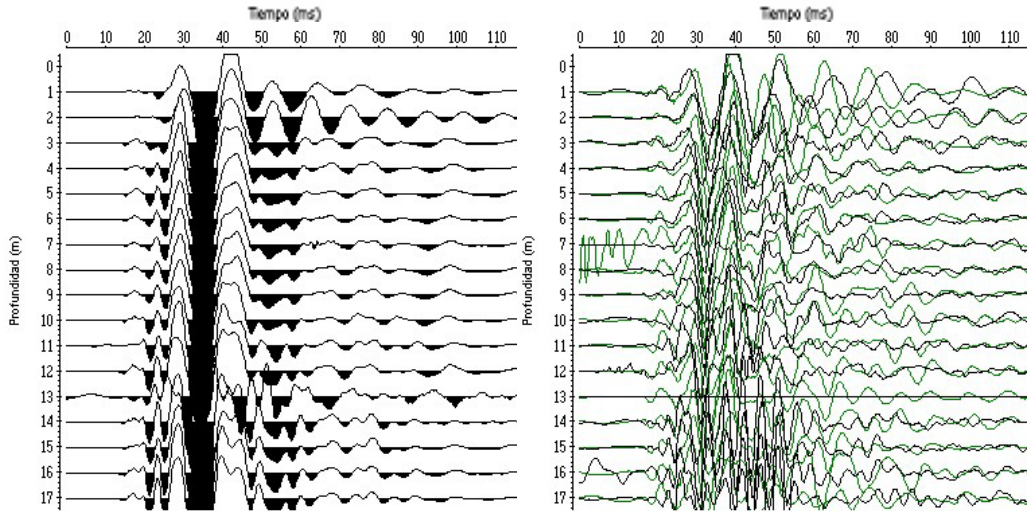


**Figura A-6.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

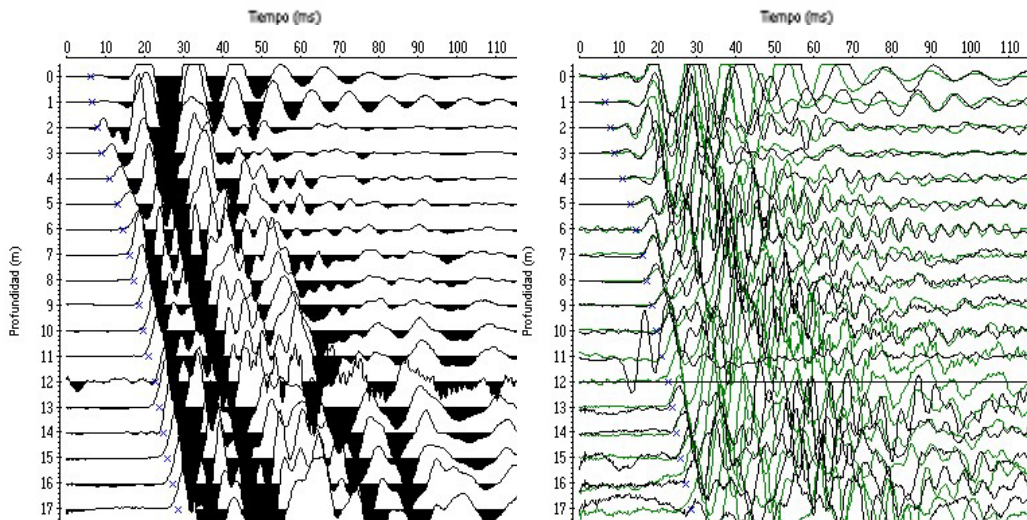
## 1.7 Pozo Velázquez



**Figura A-7.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (registros polarizados al generar la fuente en sentidos opuestos) y ser captadas por los geófonos horizontales de control en la cabecera del pozo.

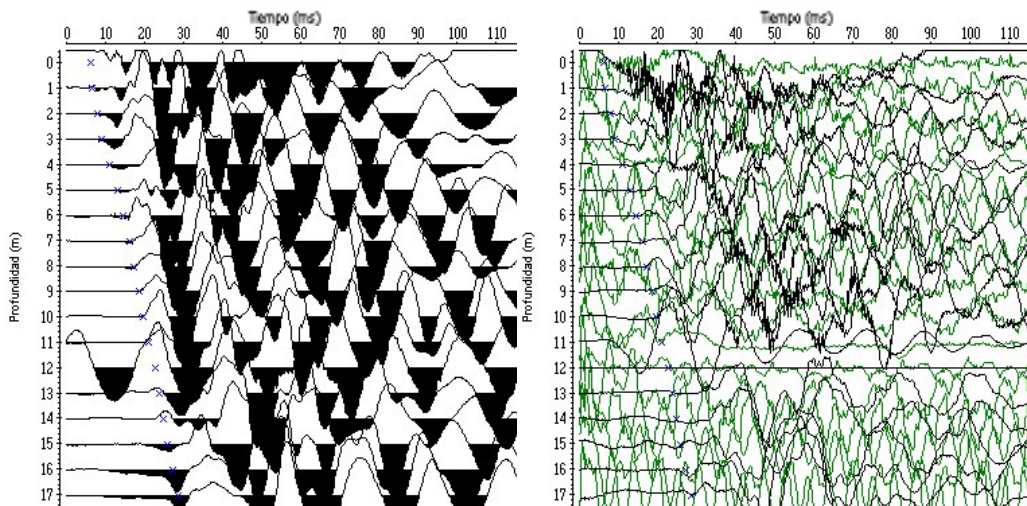


**Figura A-7.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (polarizada) y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La segunda llegada de las ondas se observan en color azul.

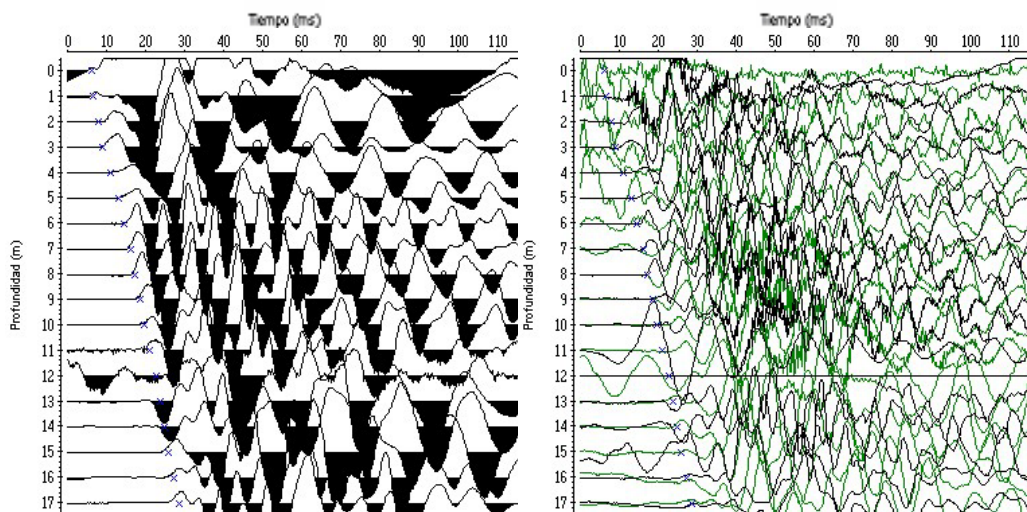




**Figura A-7.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (polarizada) y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La segunda llegada de las ondas se observan en color azul.

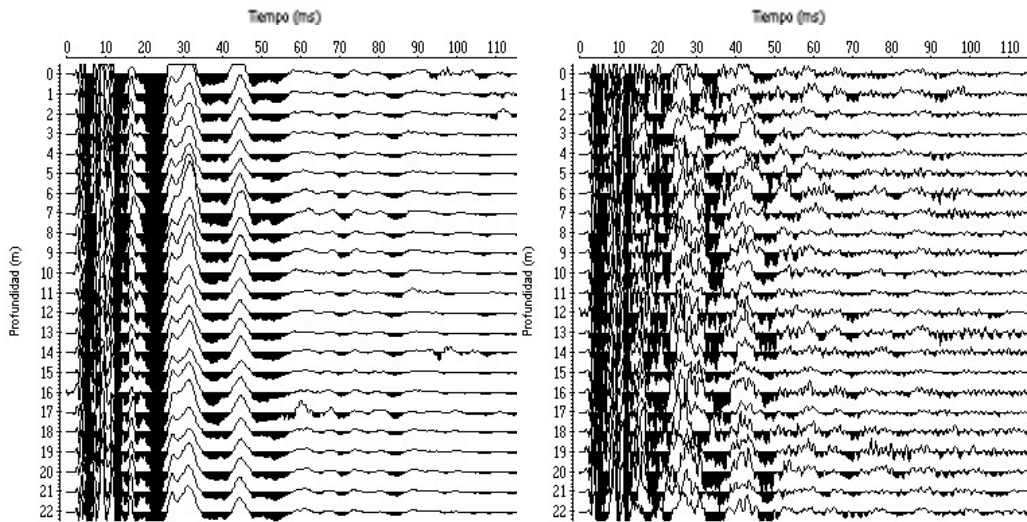


**Figura A-7.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (Polarizadas) y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La segunda llegada de las ondas se observan en color azul.

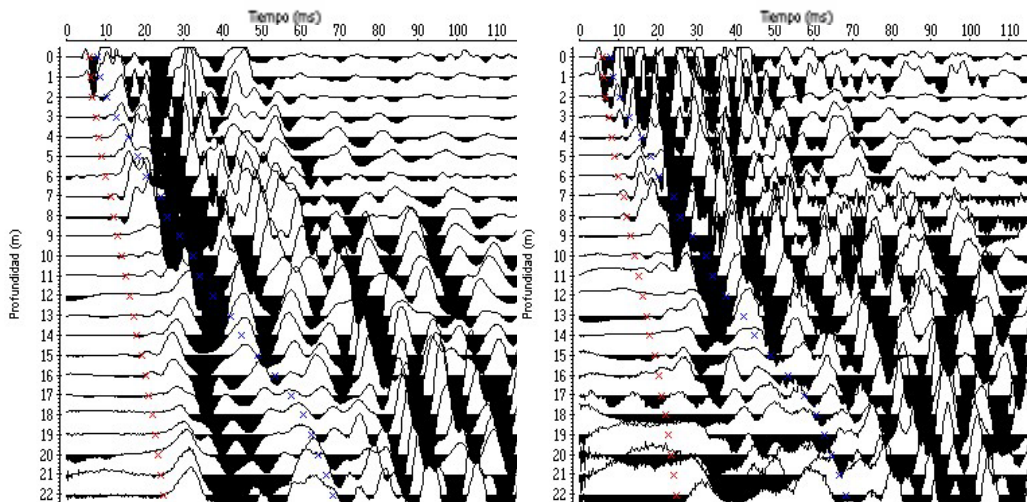
## 1.8 Pozo Hotel ABC



**Figura A-8.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

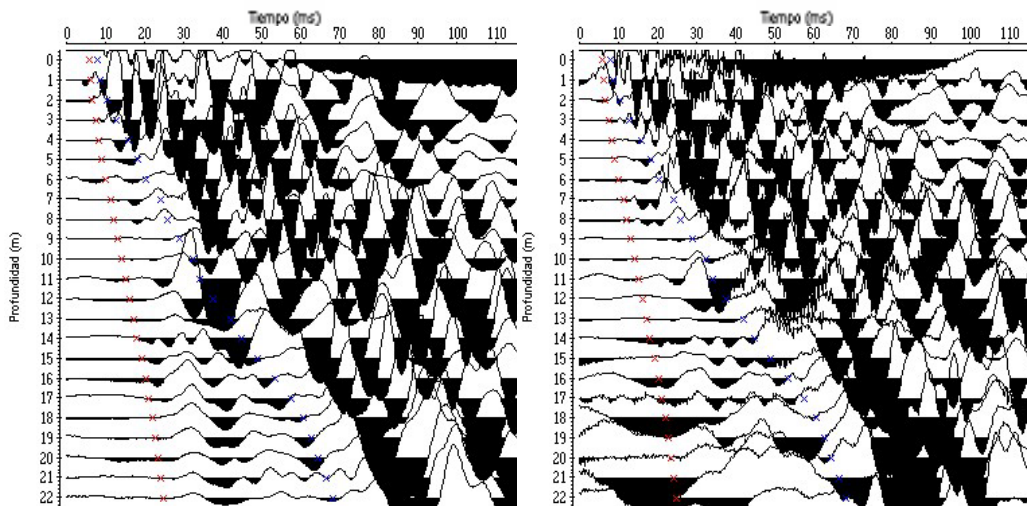
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.



**Figura A-8.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

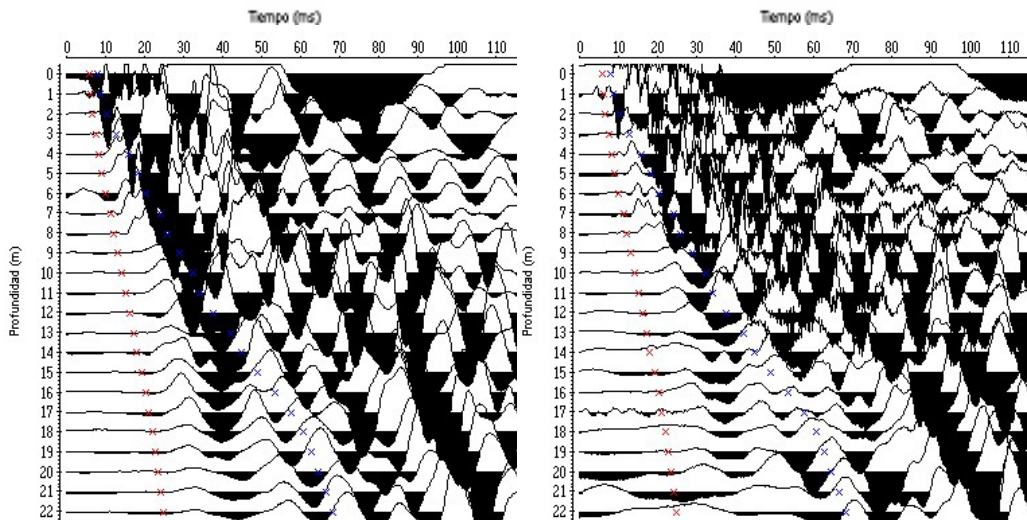
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-8.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

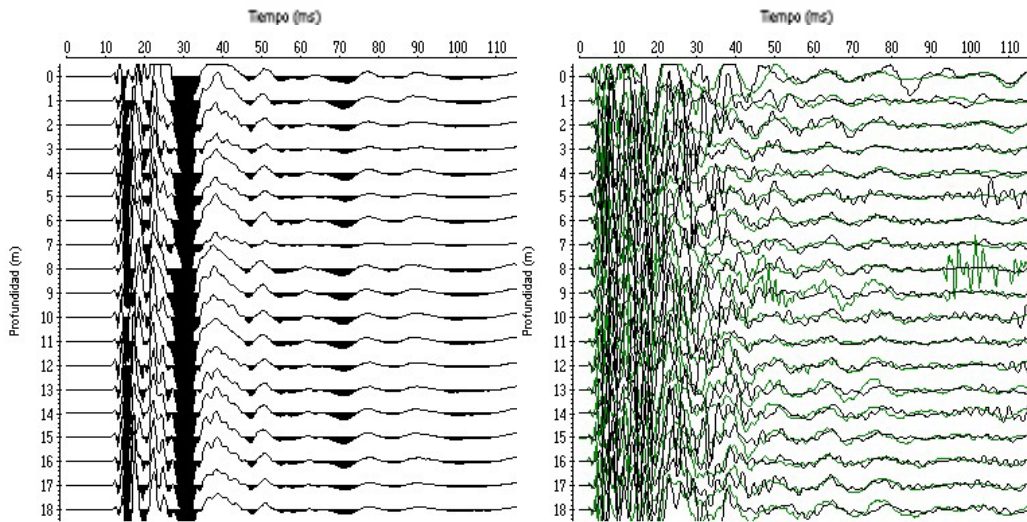


**Figura A-8.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

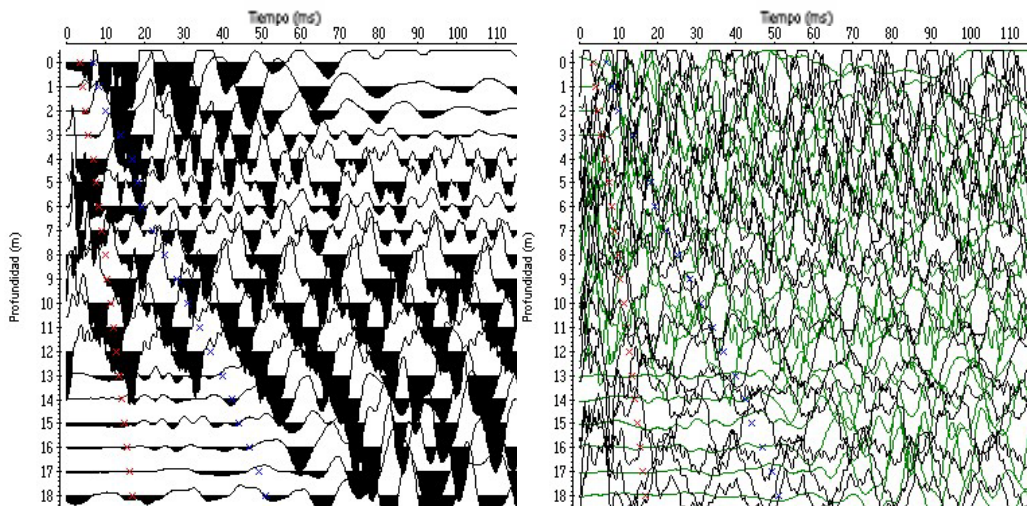
## 1.9 Pozo Rocío



**Figura A-9.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

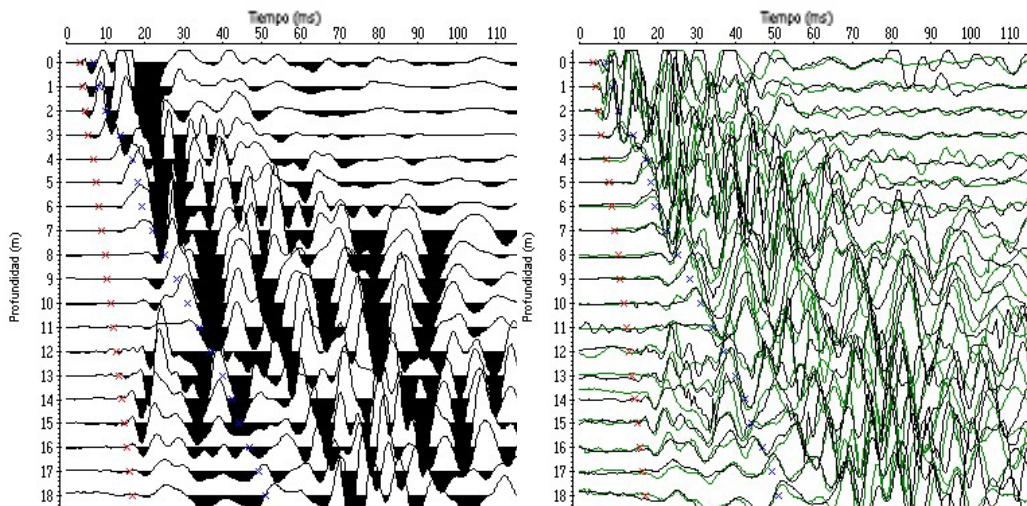
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (registros polarizados al generar la fuente en sentidos opuestos) y ser captadas por los geófonos horizontales de control en la cabecera del pozo.



**Figura A-9.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

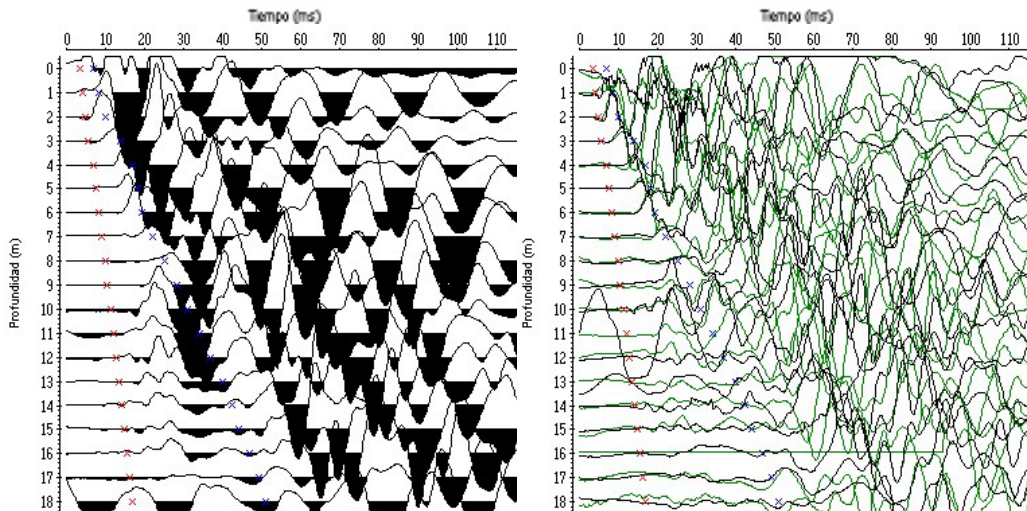
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (polarizadas) y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-9.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (polarizada) y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

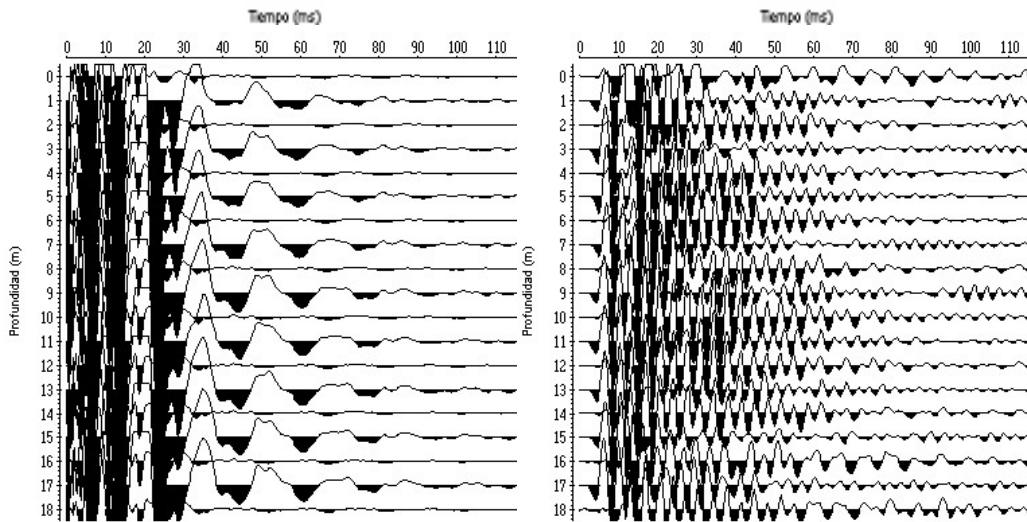


**Figura A-9.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (Polarizadas) y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

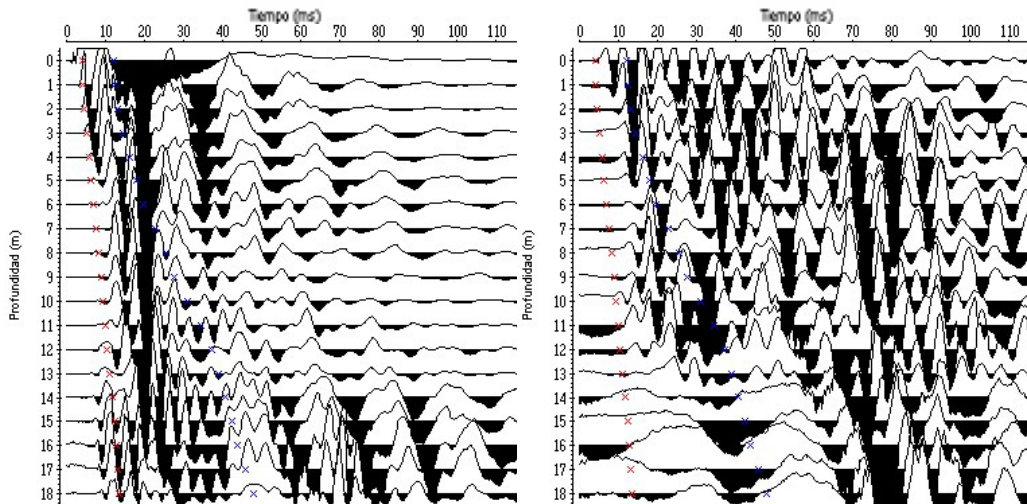
## 1.10 Pozo Río Bravo 1



**Figura A-10.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

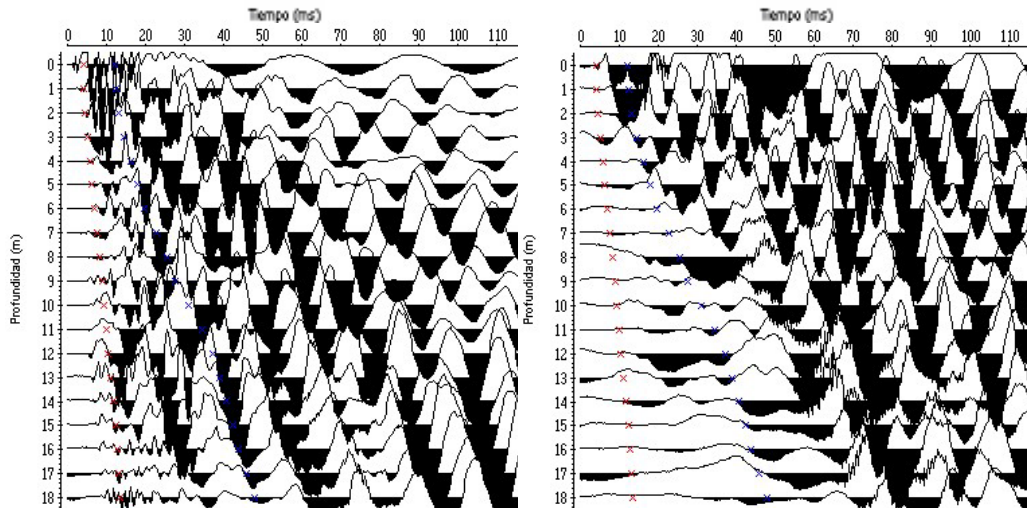
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.



**Figura A-10.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

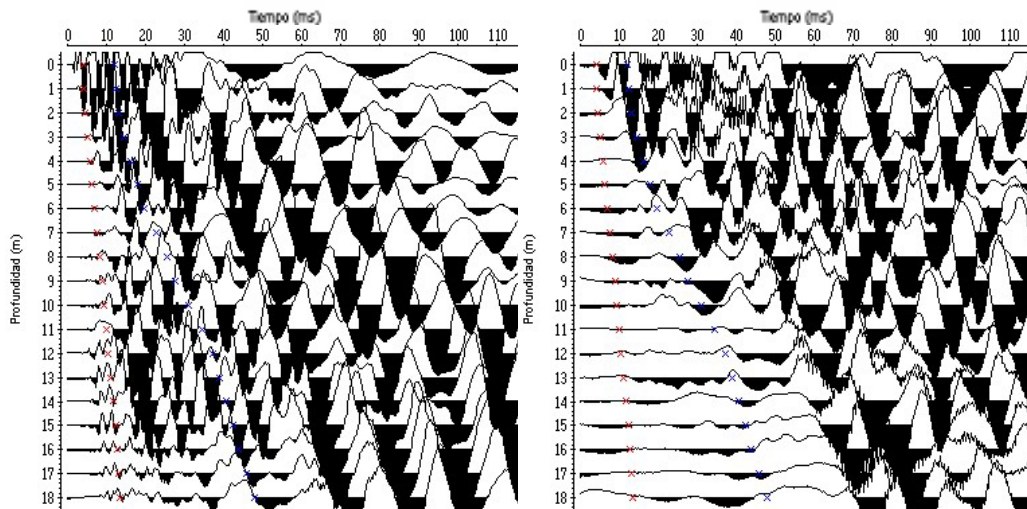
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-10.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

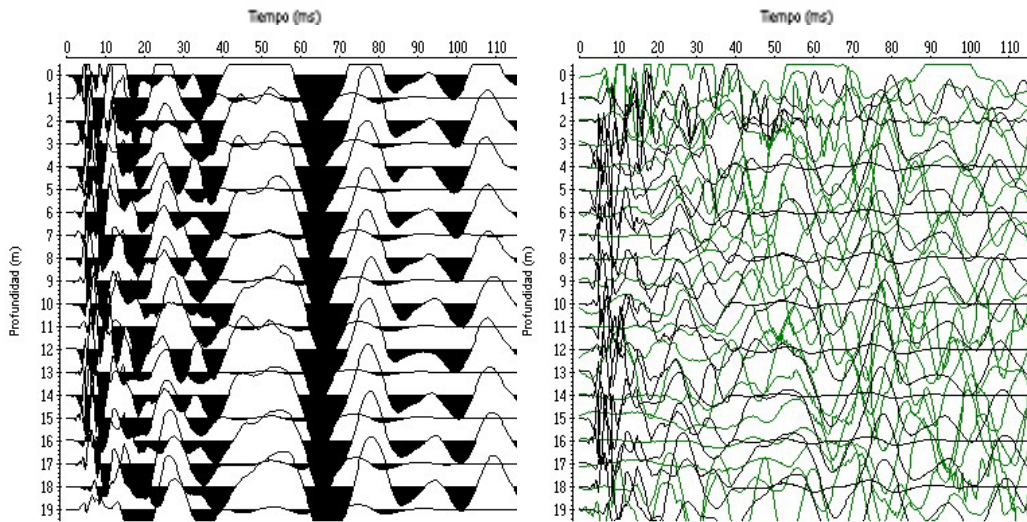


**Figura A-10.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

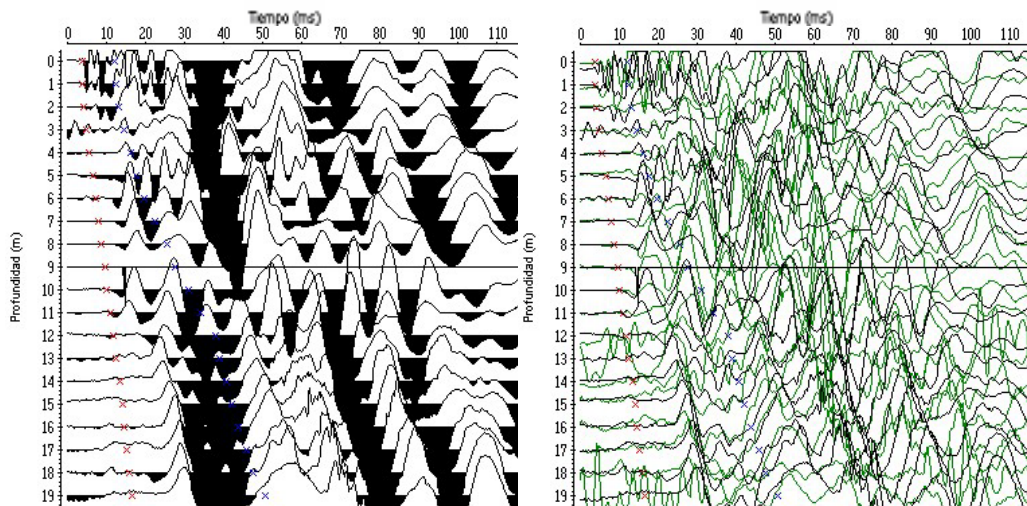
## 1.11 Pozo Río Bravo 2



**Figura A-11.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (registros polarizados al generar la fuente en sentidos opuestos) y ser captadas por los geófonos horizontales de control en la cabecera del pozo.

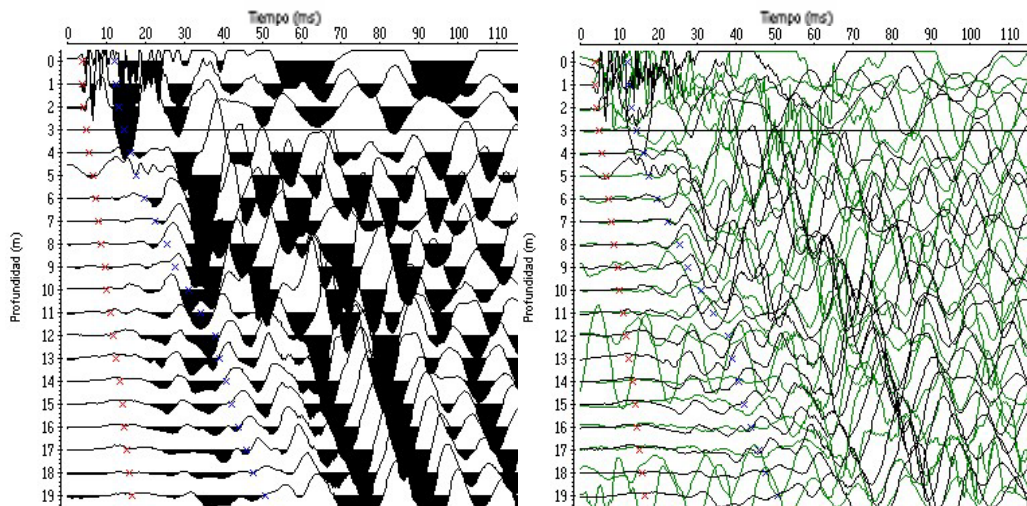


**Figura A-11.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (polarizadas) y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

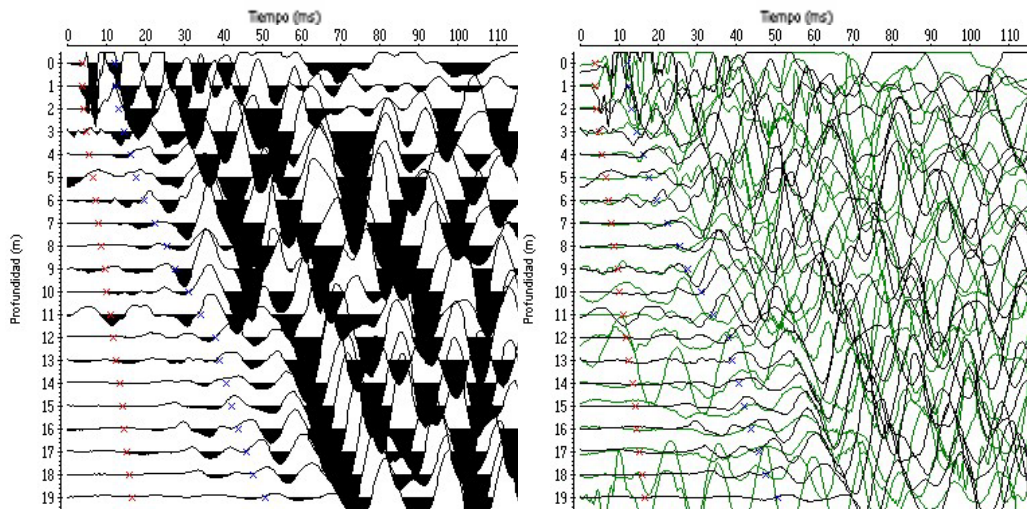




**Figura A-11.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (polarizada) y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

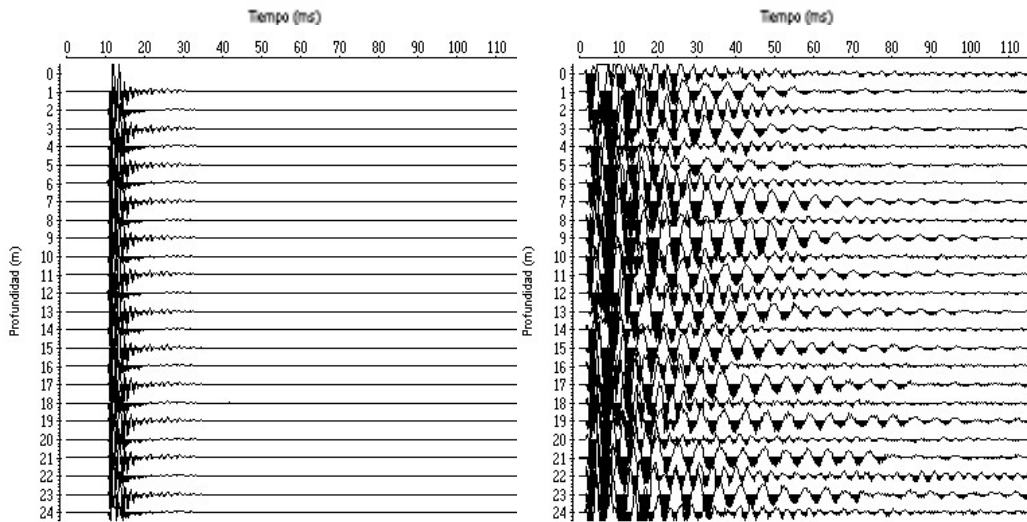


**Figura A-11.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (Polarizadas) y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

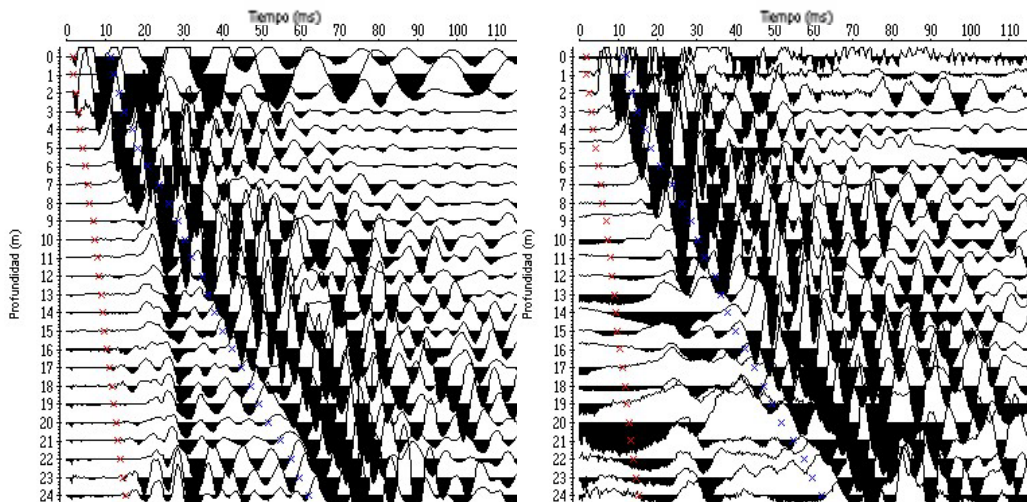
## Pozo Mohedano 1



**Figura A-12.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

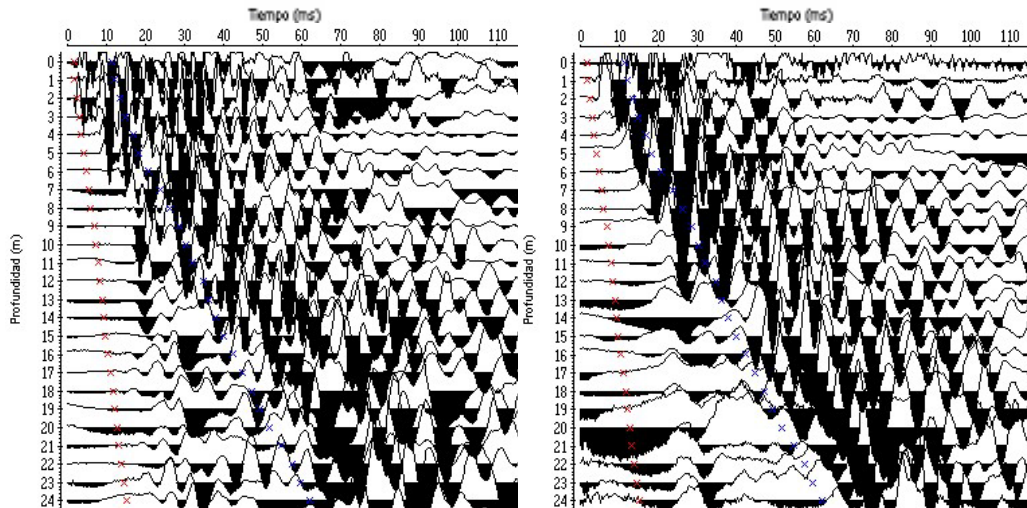
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.



**Figura A-12.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

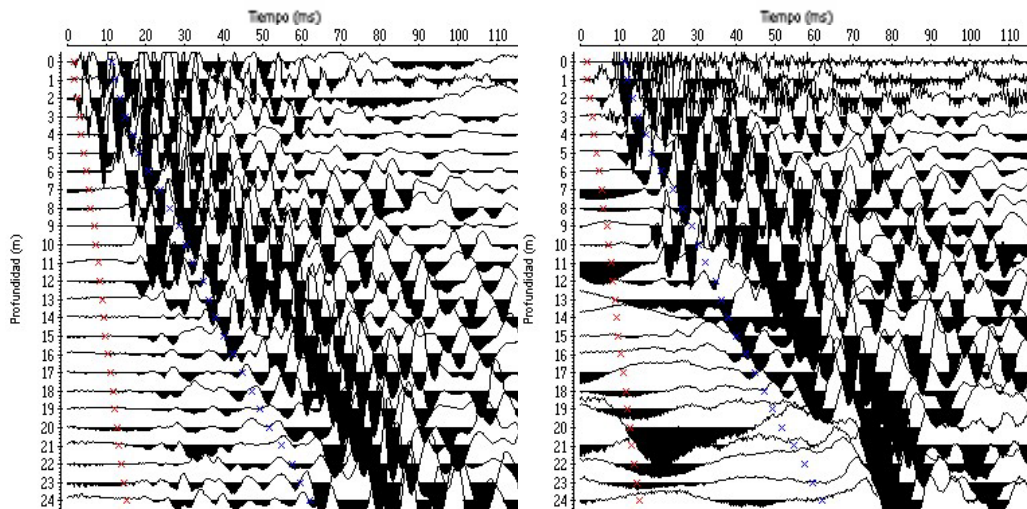
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-12.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

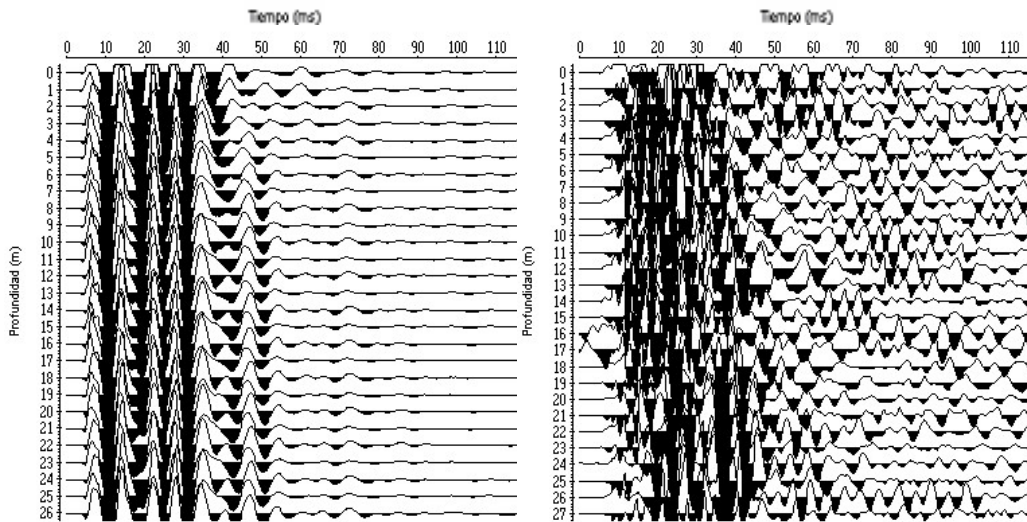


**Figura A-12.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

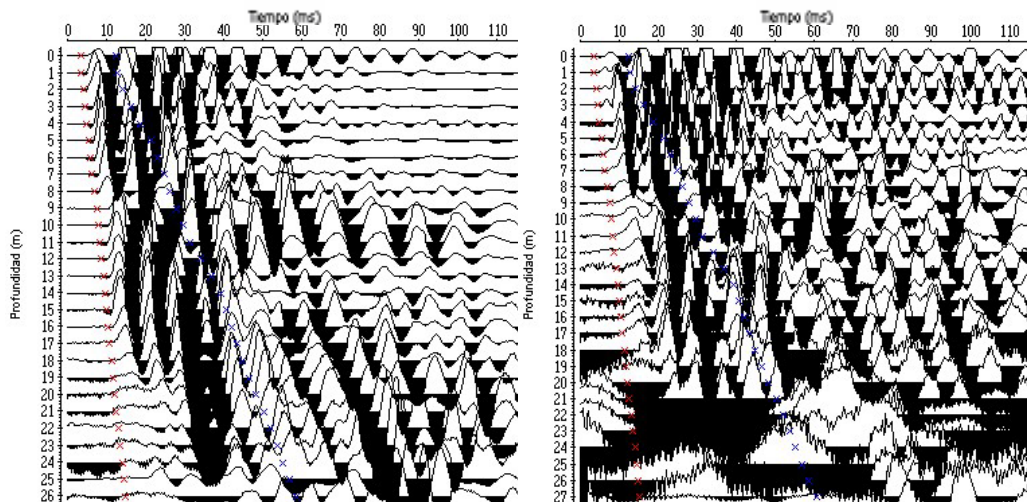
### 1.13 Pozo Mohedano 2



**Figura A-13.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

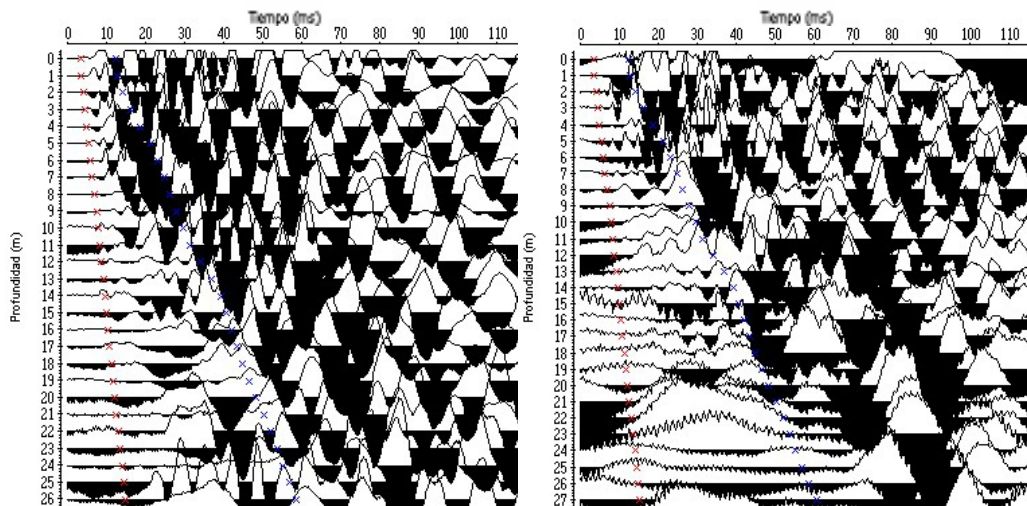
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.



**Figura A-13.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

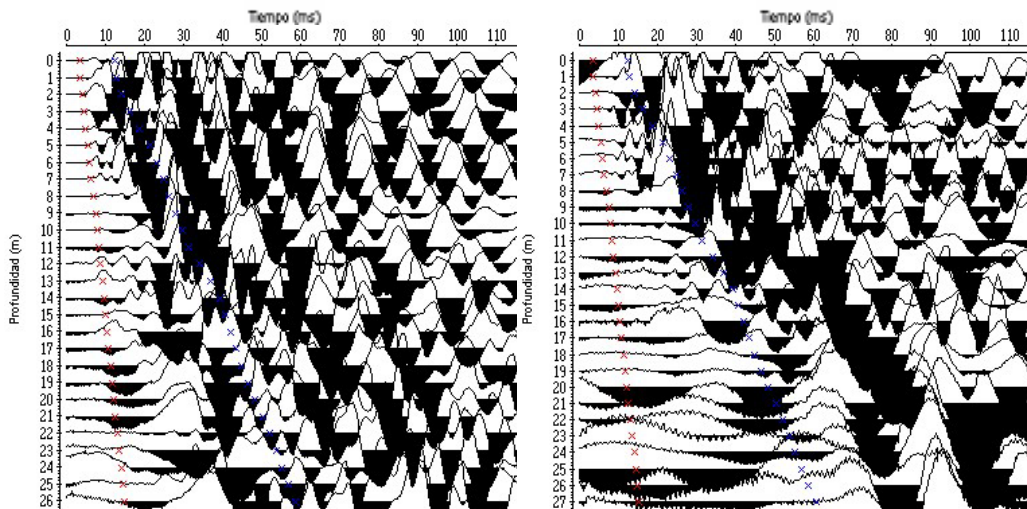
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-13.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

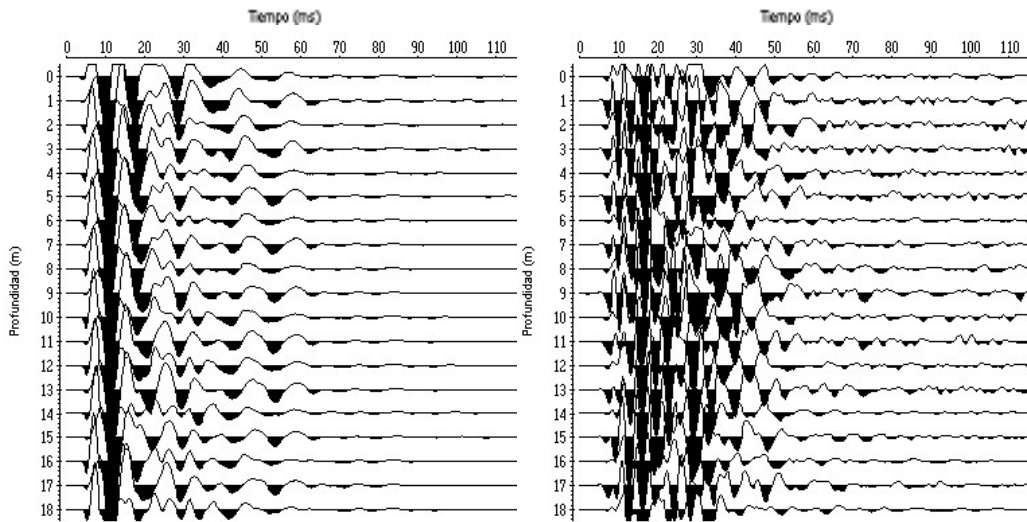


**Figura A-13.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

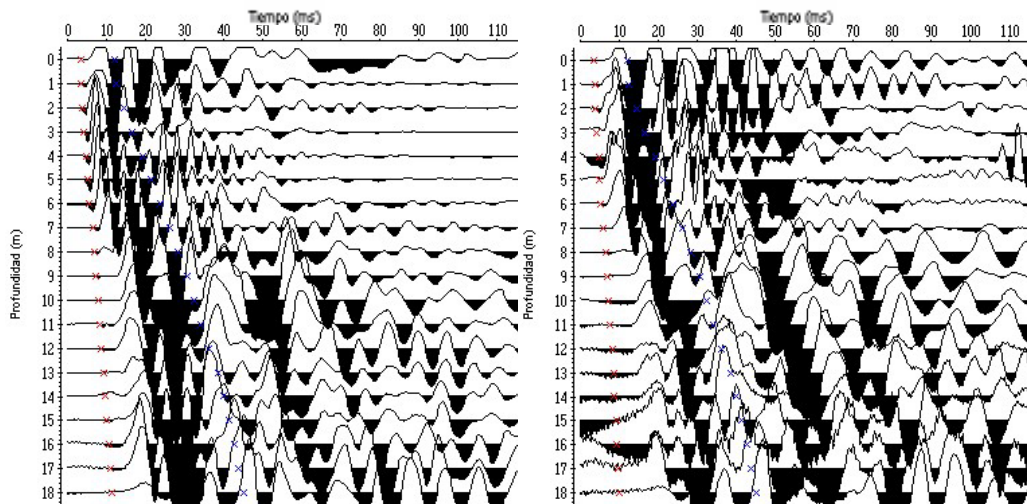
### 1.14 Pozo Mohedano 3



**Figura A-14.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser captadas por los geófonos verticales de control ubicados en la cabecera del pozo.

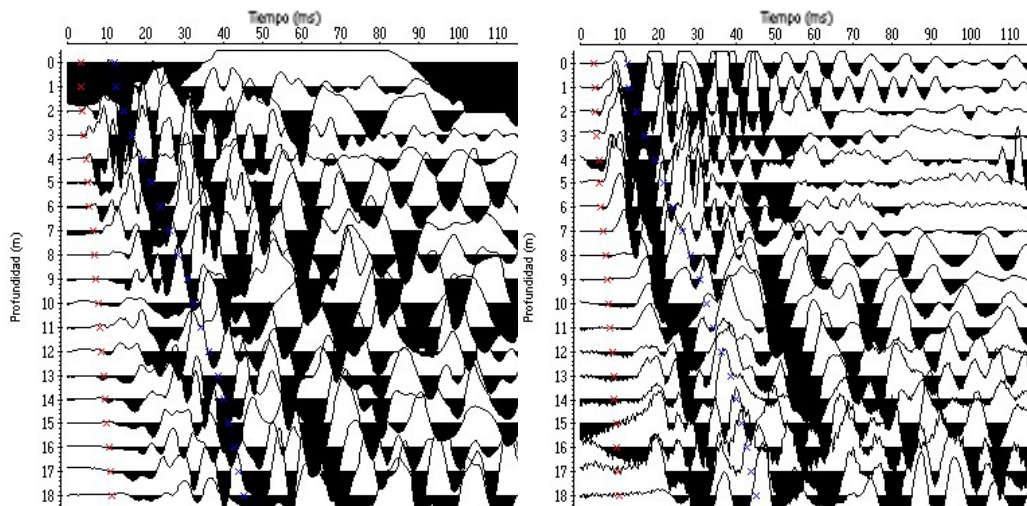
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser captadas por los geófonos horizontales de control ubicados en la cabecera del pozo.



**Figura A-14.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

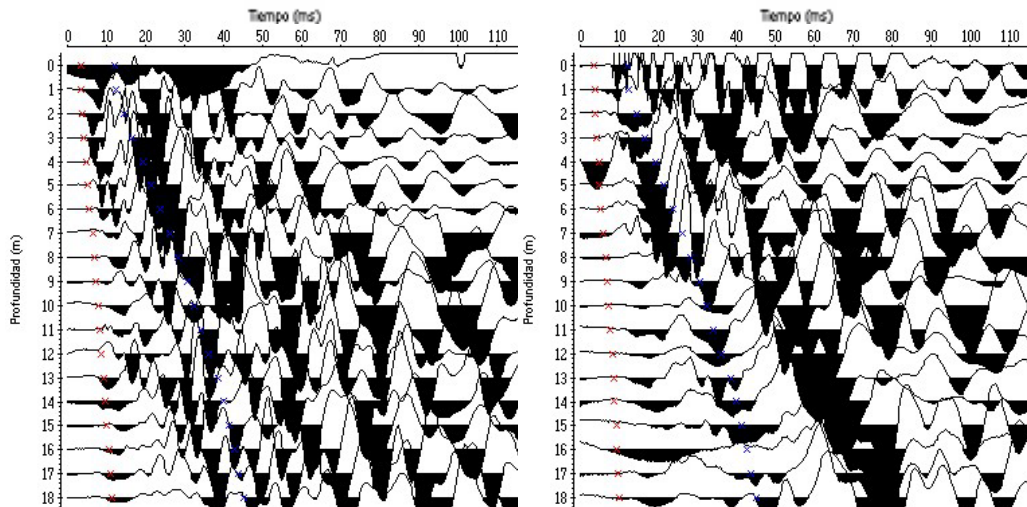
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-14.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

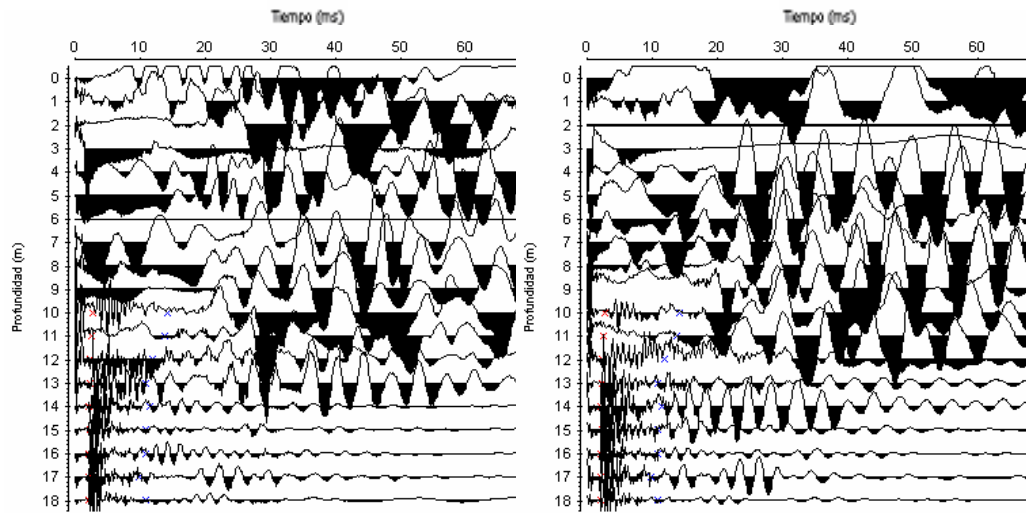


**Figura A-14.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “S” y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

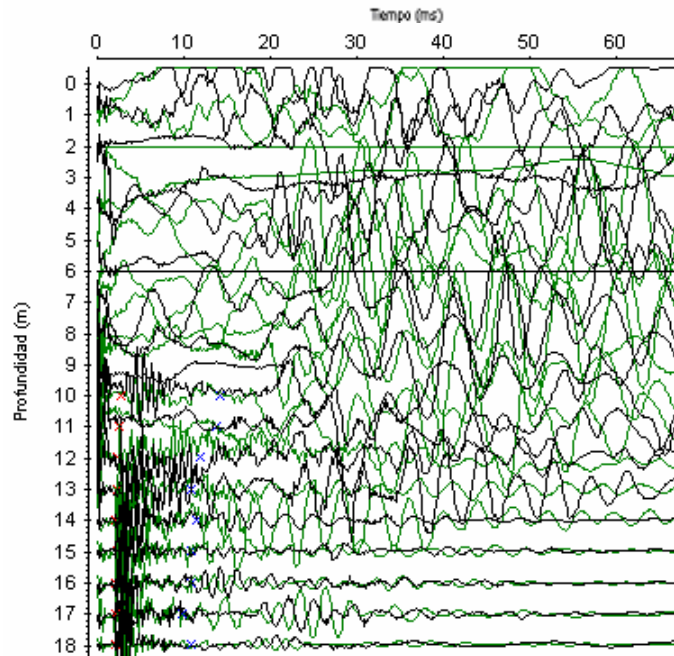
## 2. Registros sísmicos obtenidos a partir de la técnica “Crosshole”.



**Figura A-15.a**

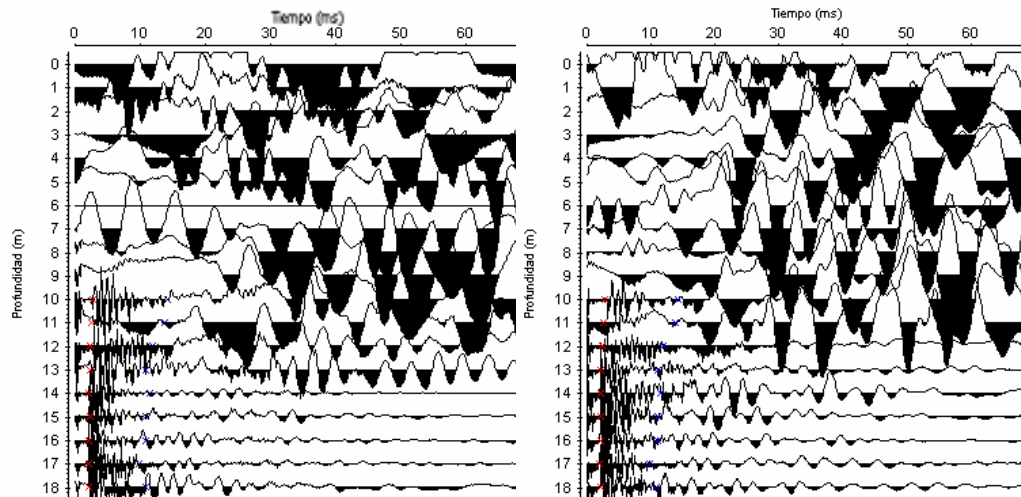
Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-15.b** registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (Polarizadas) y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

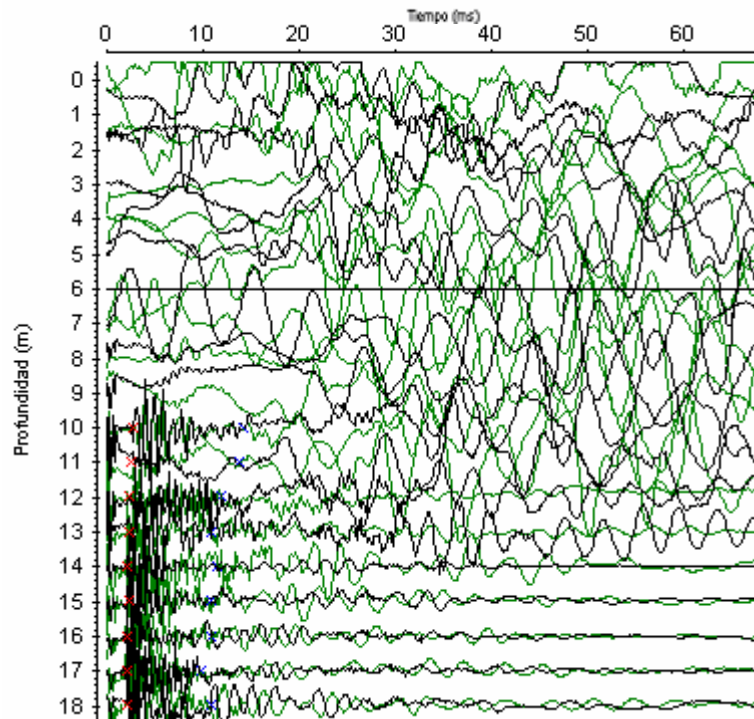




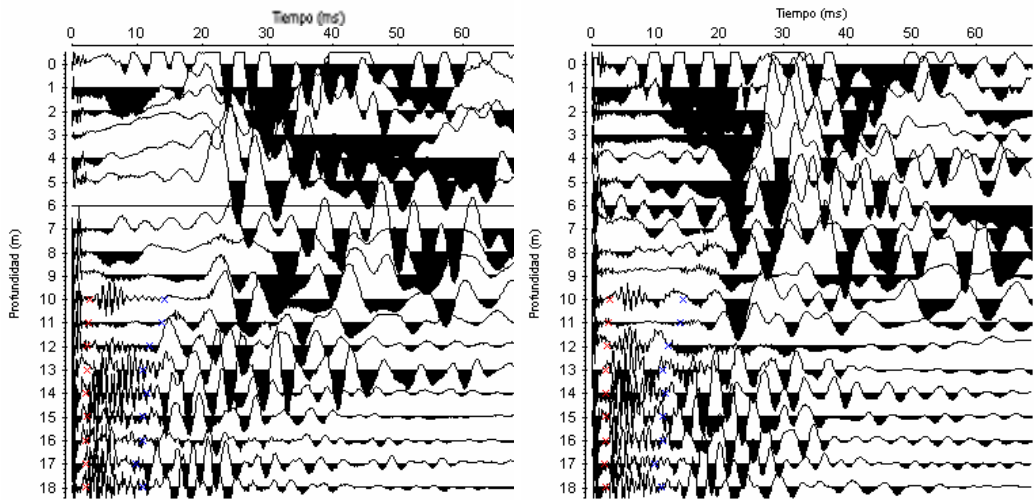
**Figura A-15.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



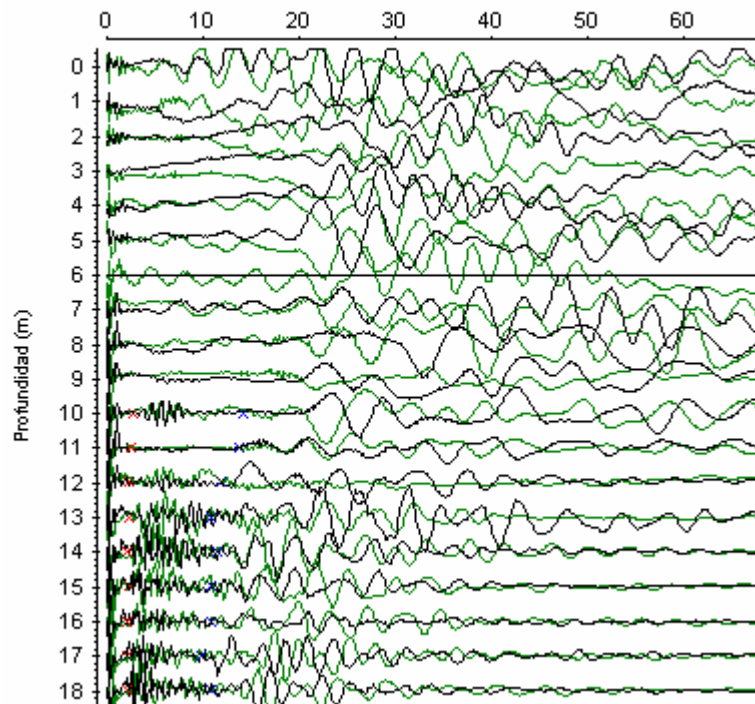
**Figura A-15.d** registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (Polarizadas) y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-15.e**

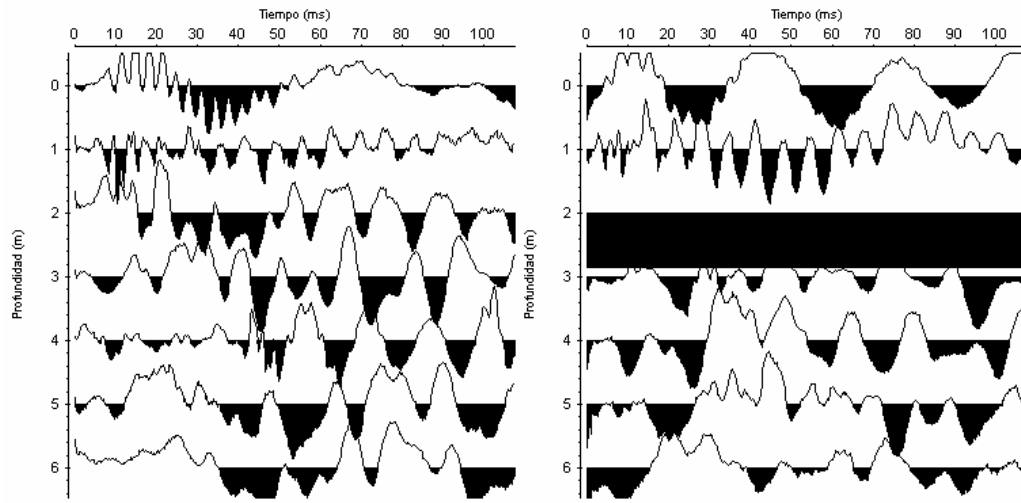
Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.



**Figura A-15.f** registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (Polarizadas) y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo. La primera y segunda llegada de las ondas se observan en color rojo y azul respectivamente.

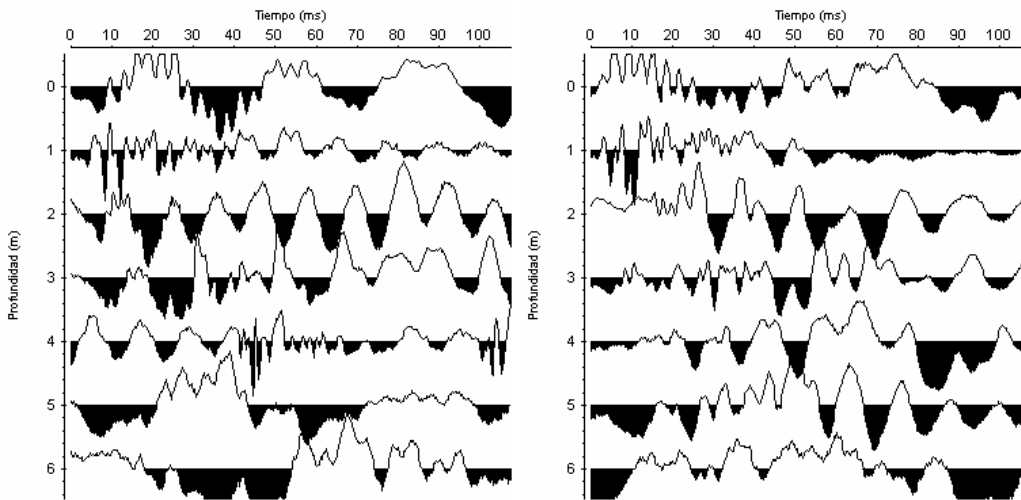
### 3. Registros sísmicos obtenidos a partir de la Tomografía Sísmica de Pozos.



**Figura A-16.a**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 0, receptor de 0 a 6 metros).

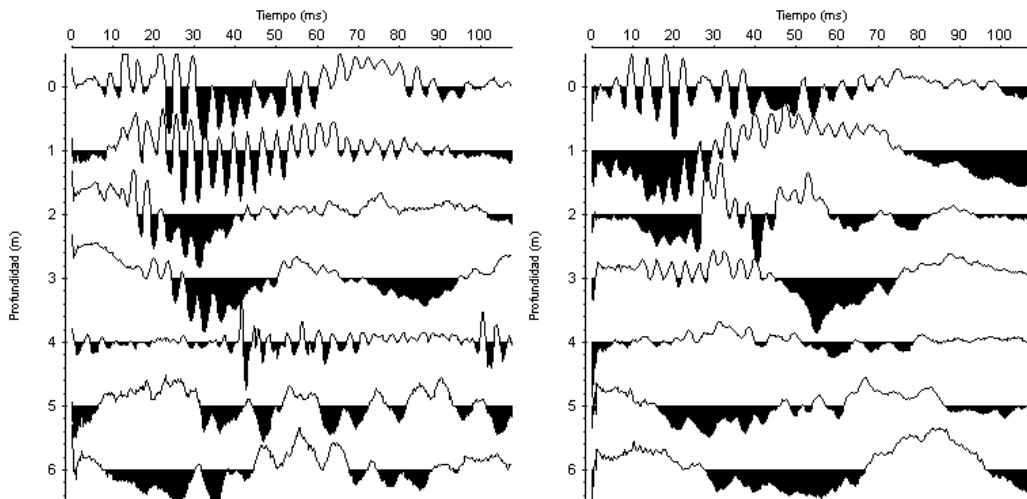
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 0, receptor de 0 a 6 metros).



**Figura A-16.b**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 0, receptor de 0 a 6 metros).

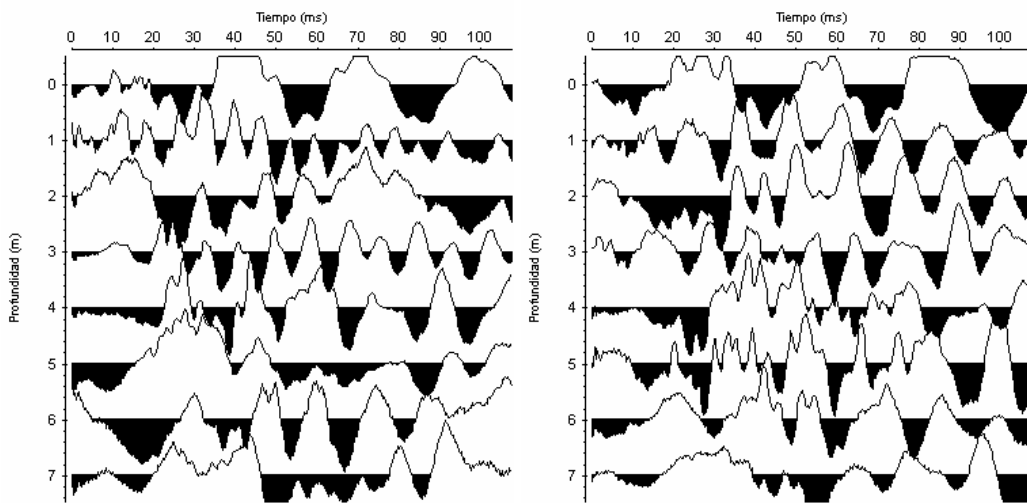
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 0, receptor de 0 a 6 metros).



**Figura A-16.c**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 0, receptor de 0 a 6 metros).

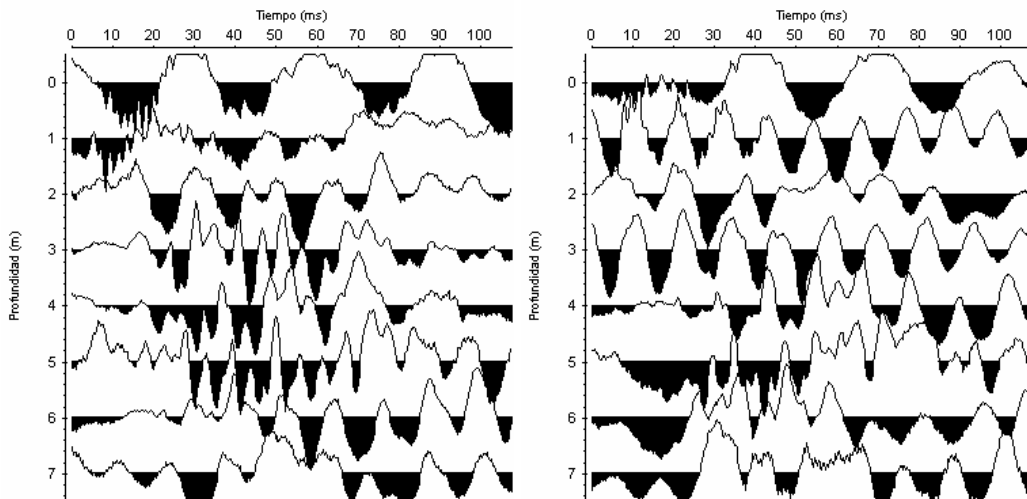
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 0, receptor de 0 a 6 metros).



**Figura A-16.d**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 1, receptor de 0 a 7 metros).

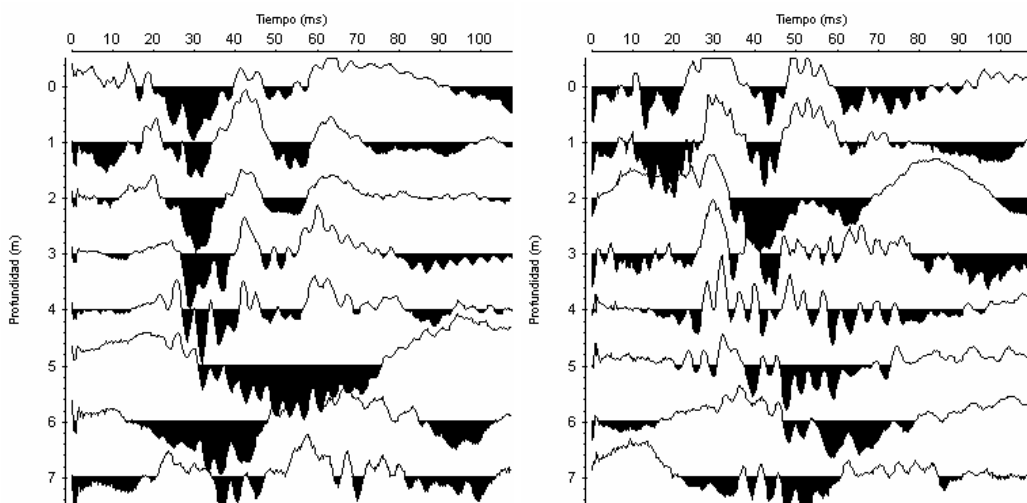
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 1, receptor de 0 a 7 metros).



**Figura A-16.e**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 1, receptor de 0 a 7 metros).

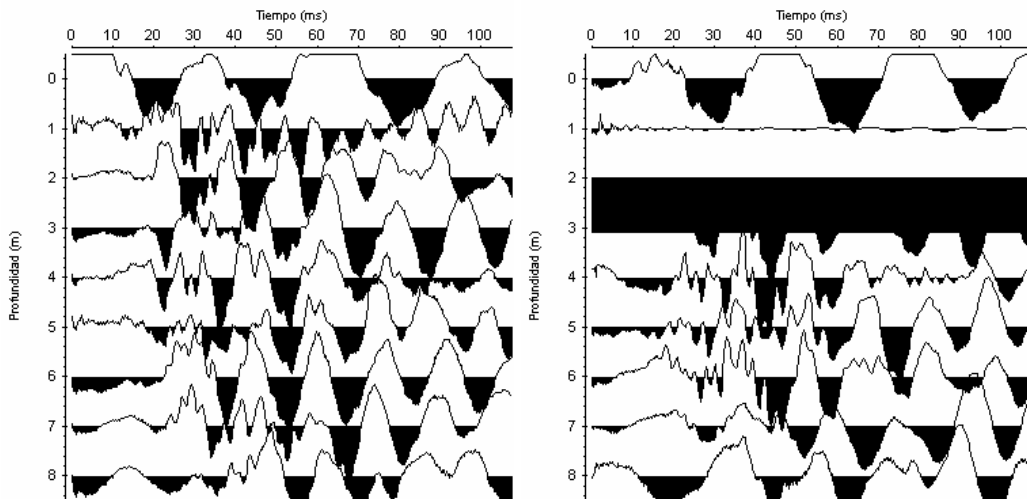
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 1, receptor de 0 a 7 metros).



**Figura A-16.f**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 1, receptor de 0 a 7 metros).

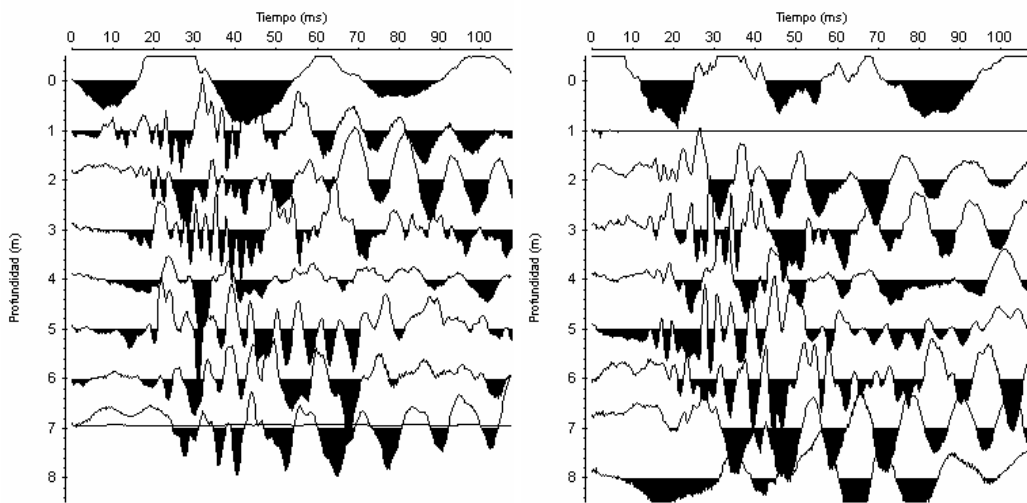
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 1, receptor de 0 a 7 metros).



**Figura A-16.g**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 2, receptor de 0 a 8 metros).

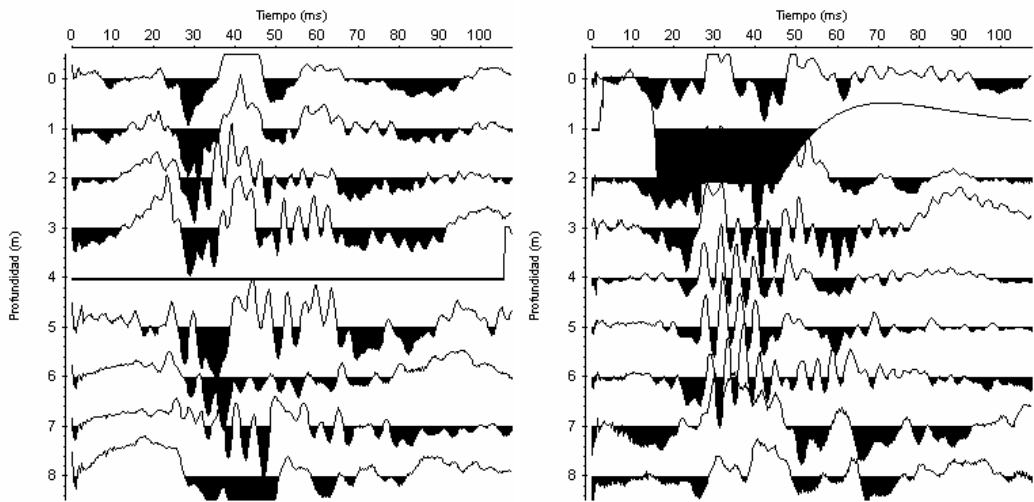
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 2, receptor de 0 a 8 metros).



**Figura A-16.h**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 2, receptor de 0 a 8 metros).

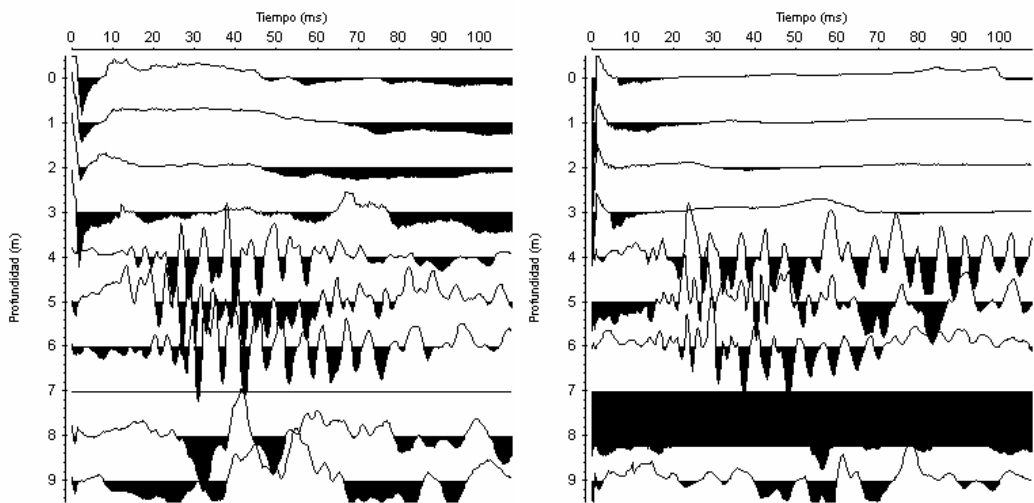
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 2, receptor de 0 a 8 metros).



**Figura A-16.i**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 2, receptor de 0 a 8 metros).

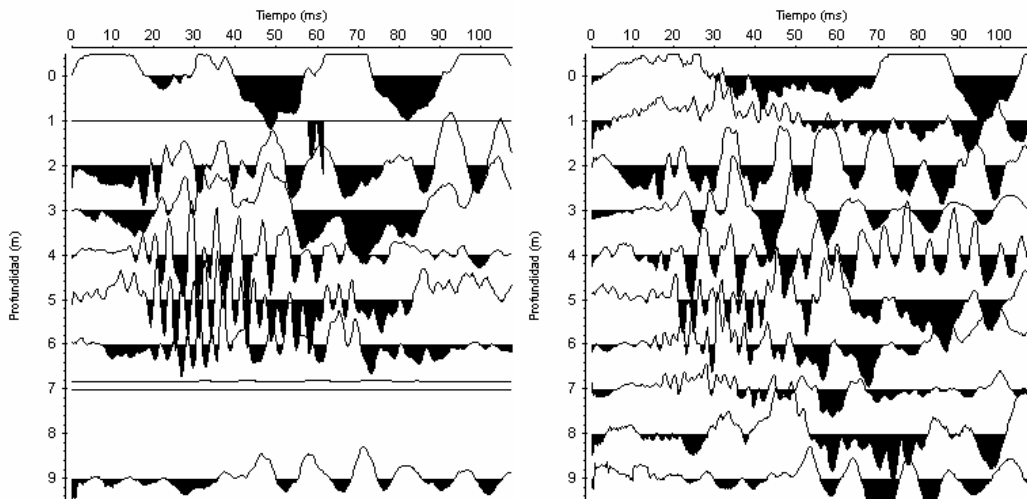
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 2, receptor de 0 a 8 metros).



**Figura A-16.j**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 3, receptor de 0 a 9 metros).

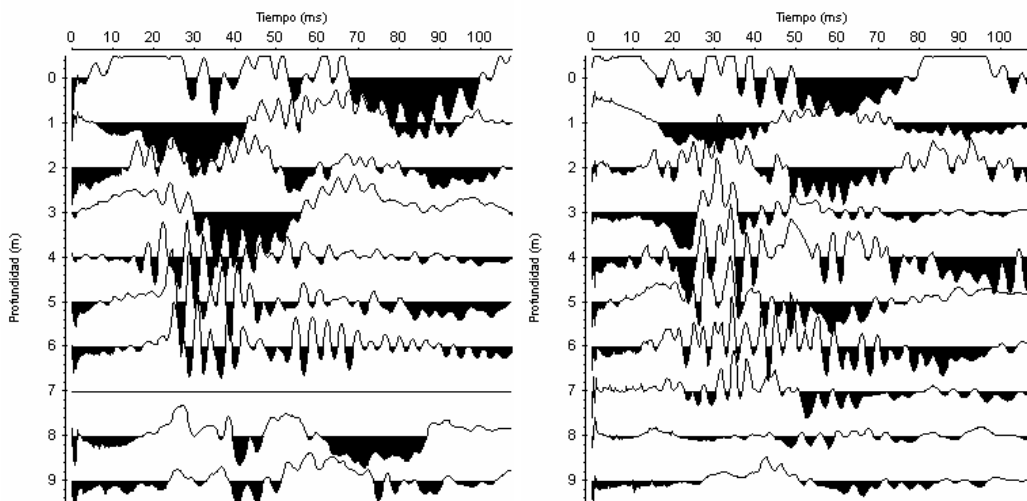
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 3, receptor de 0 a 9 metros).



**Figura A-16.k**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 3, receptor de 0 a 9 metros).

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 3, receptor de 0 a 9 metros).

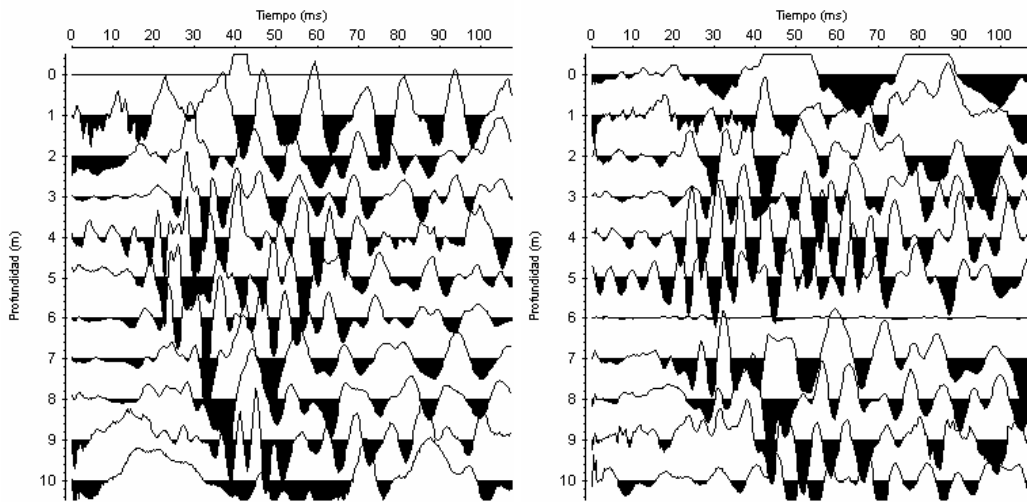


**Figura A-16.l**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 3, receptor de 0 a 9 metros).

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 3, receptor de 0 a 9 metros).

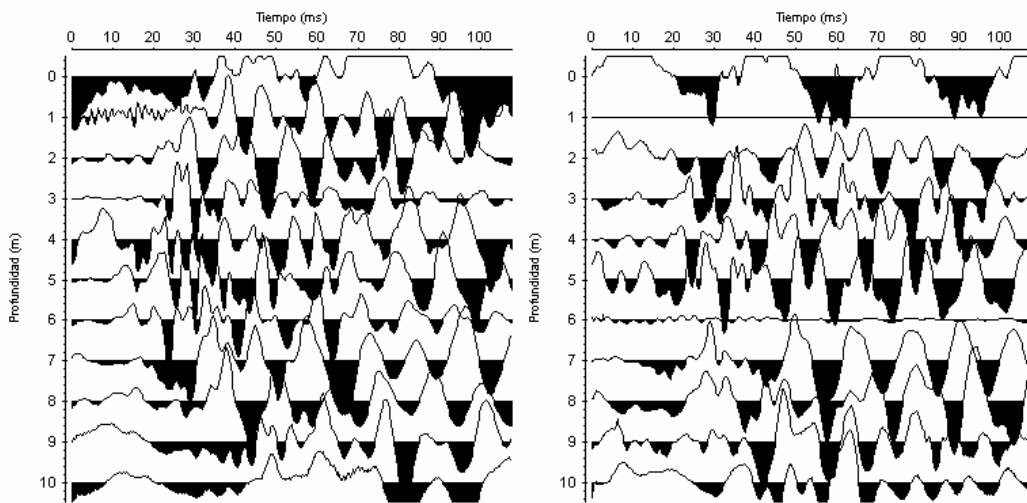




**Figura A-16.m**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 4, receptor de 0 a 10 metros).

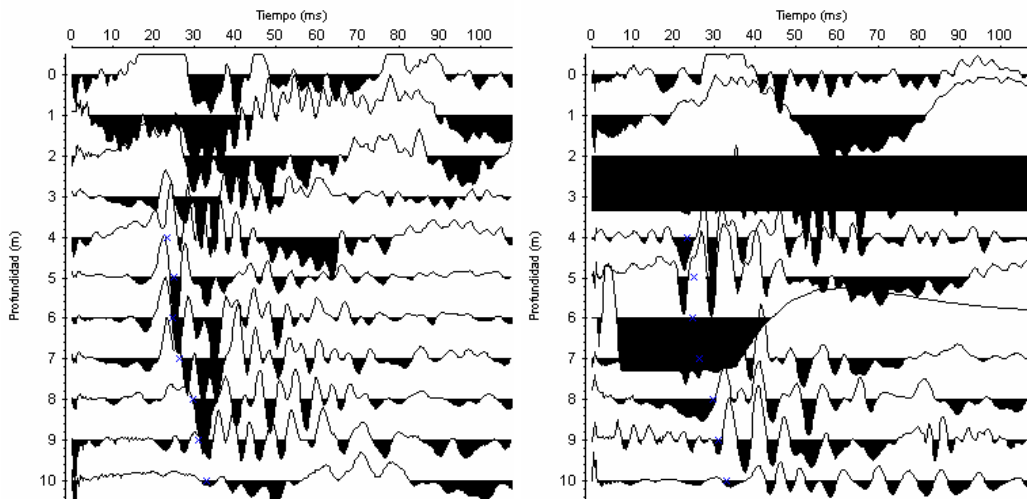
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 4, receptor de 0 a 10 metros).



**Figura A-16.n**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 4, receptor de 0 a 10 metros).

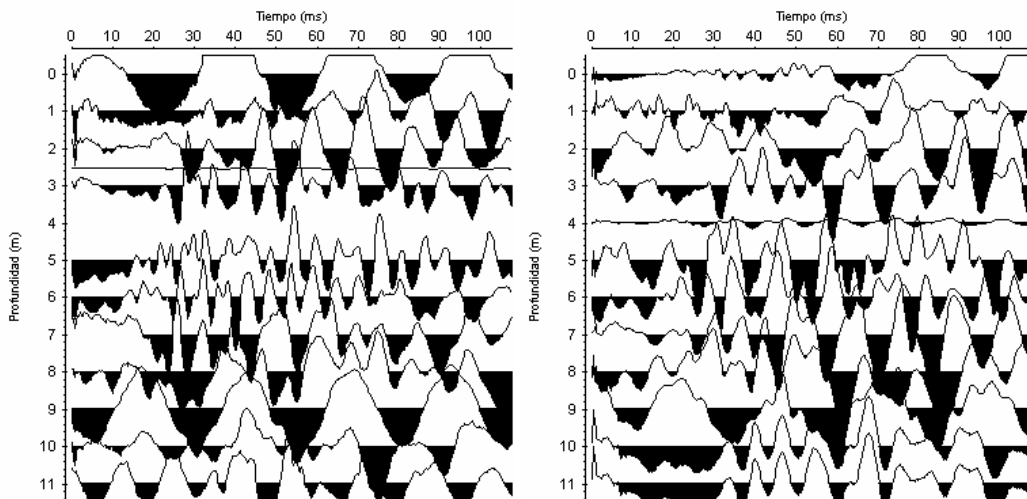
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 4, receptor de 0 a 10 metros).



**Figura A-16.ñ**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 4, receptor de 0 a 10 metros). Se ven algunas de las llegadas de las ondas “S” en azul.

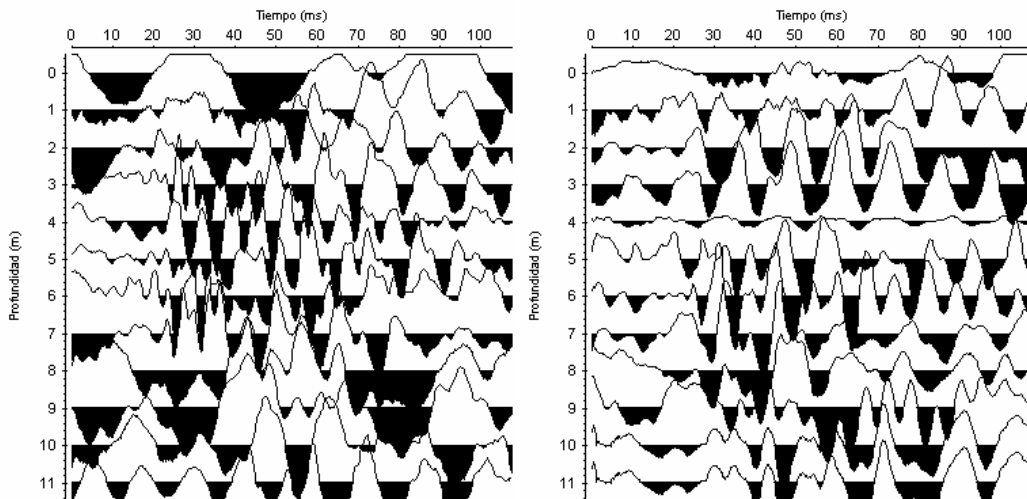
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 4, receptor de 0 a 10 metros). Se ven algunas de las llegadas de las ondas “S” en azul.



**Figura A-16.o**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 5, receptor de 0 a 11 metros).

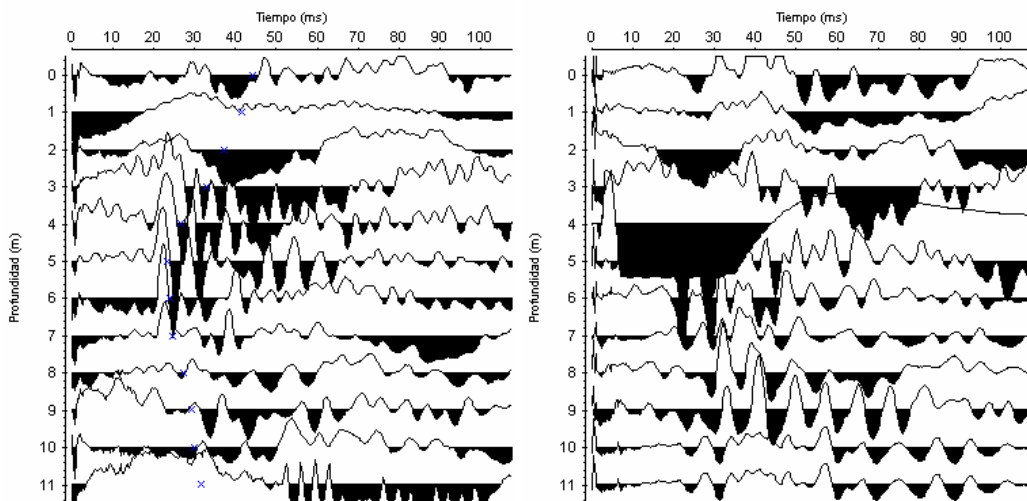
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 5, receptor de 0 a 11 metros).



**Figura A-16.p**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 5, receptor de 0 a 11 metros).

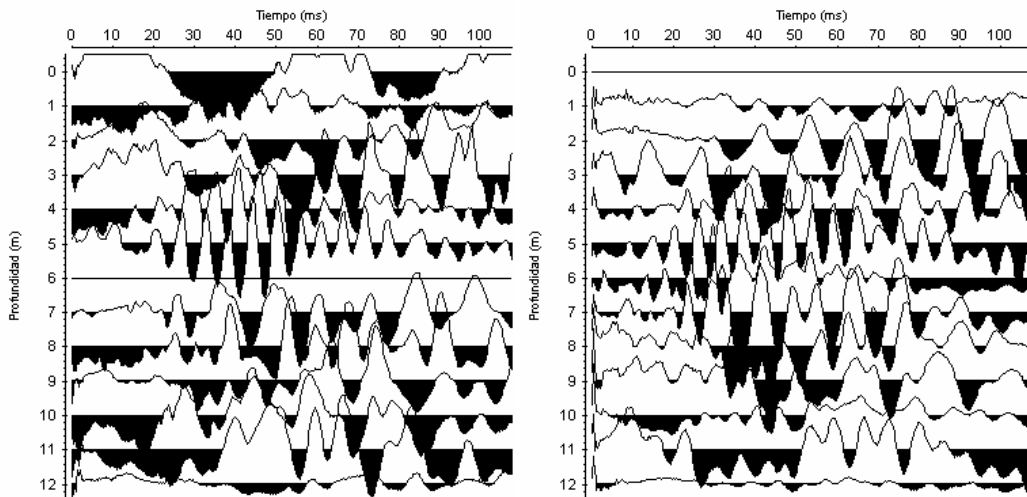
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 5, receptor de 0 a 11 metros).



**Figura A-16.q**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 5, receptor de 0 a 11 metros). Se ven las llegadas de las ondas “S” en color azul.

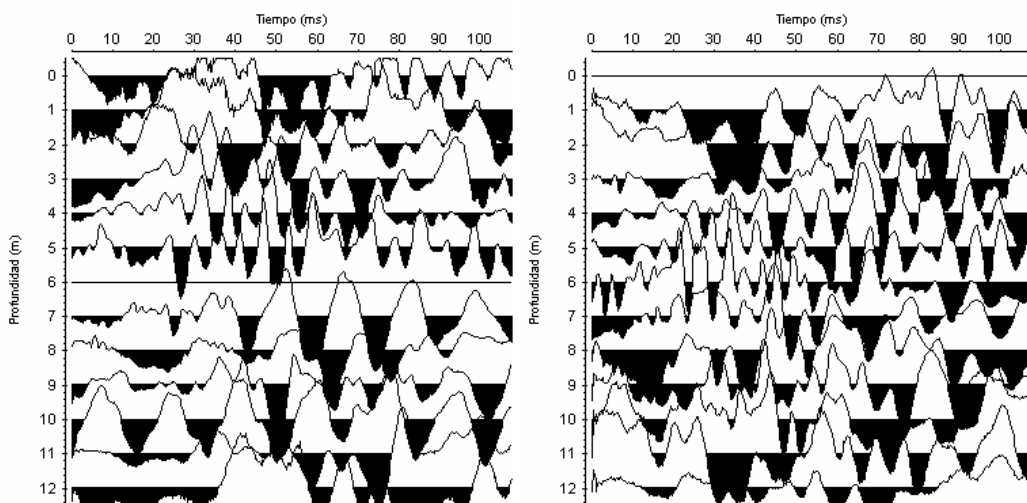
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 5, receptor de 0 a 11 metros).



**Figura A-16.r**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 6, receptor de 0 a 12 metros).

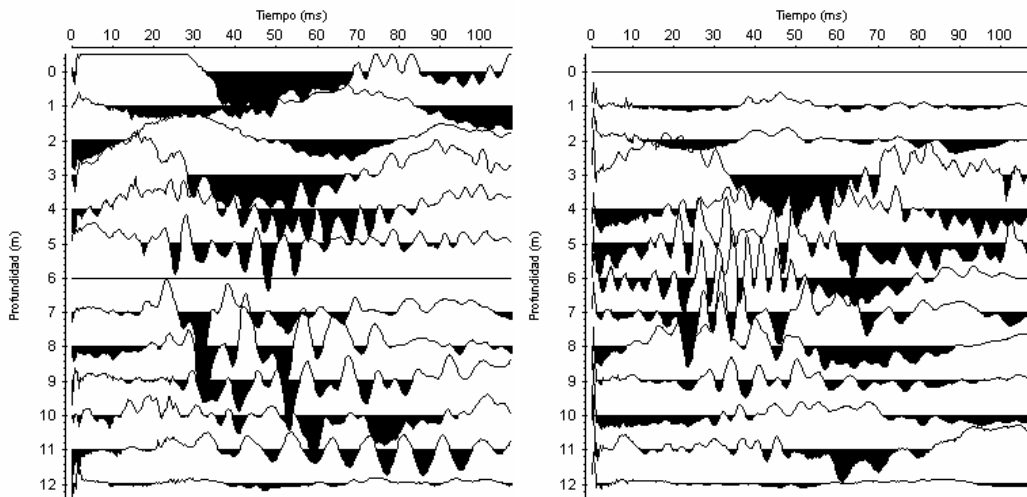
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 6, receptor de 0 a 12 metros).



**Figura A-16.s**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 6, receptor de 0 a 12 metros).

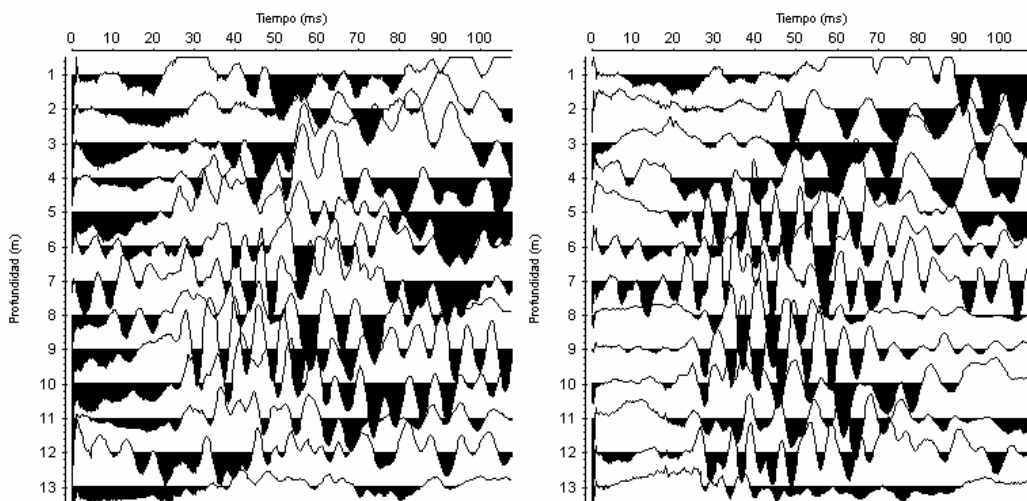
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 6, receptor de 0 a 12 metros).



**Figura A-16.t**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 6, receptor de 0 a 12 metros).

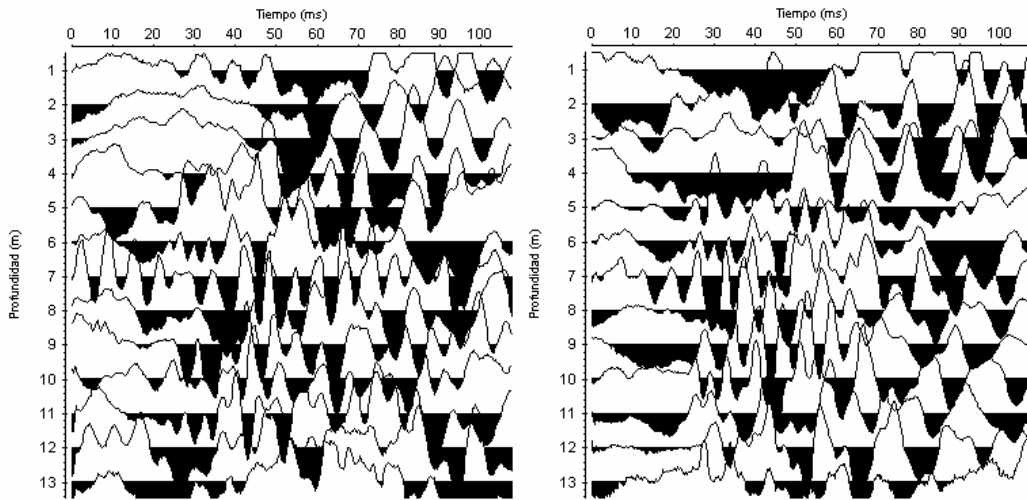
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 6, receptor de 0 a 12 metros).



**Figura A-16.u**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 7, receptor de 1 a 13 metros).

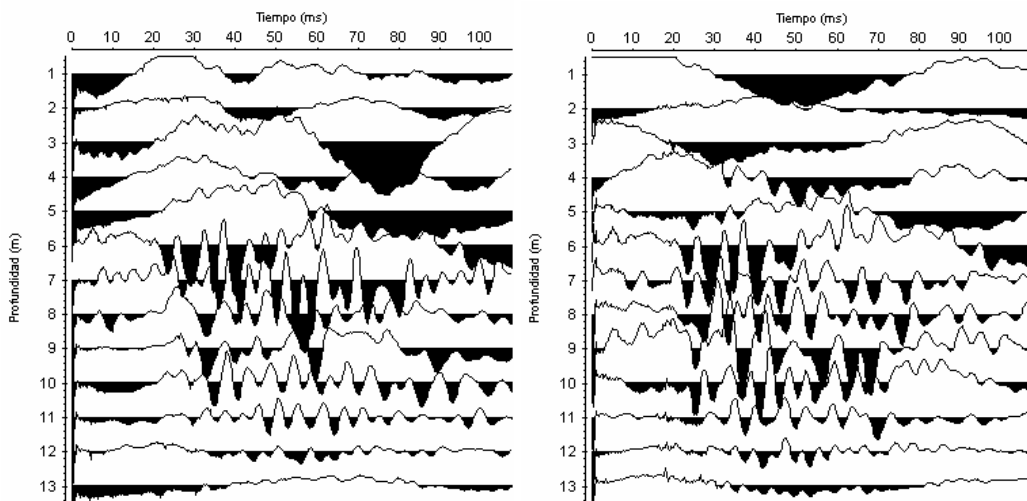
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 7, receptor de 1 a 13 metros).



**Figura A-16.v**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 7, receptor de 1 a 13 metros).

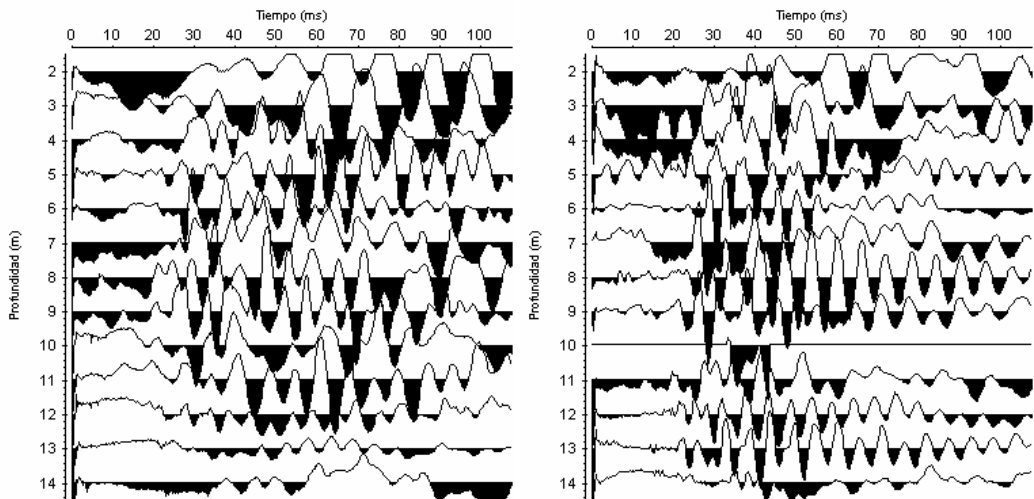
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 7, receptor de 1 a 13 metros).



**Figura A-16.w**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 7, receptor de 1 a 13 metros).

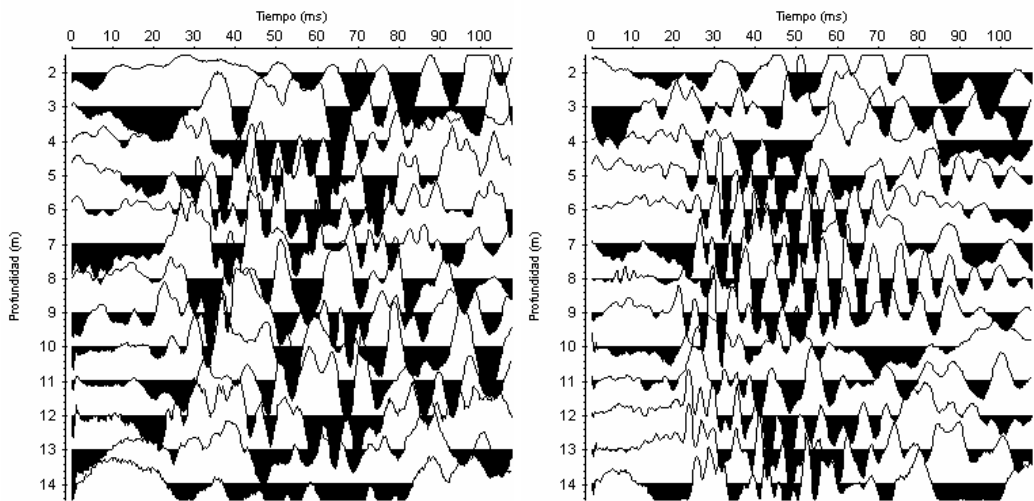
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 7, receptor de 1 a 13 metros).



**Figura A-16.x**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 8, receptor de 2 a 14 metros).

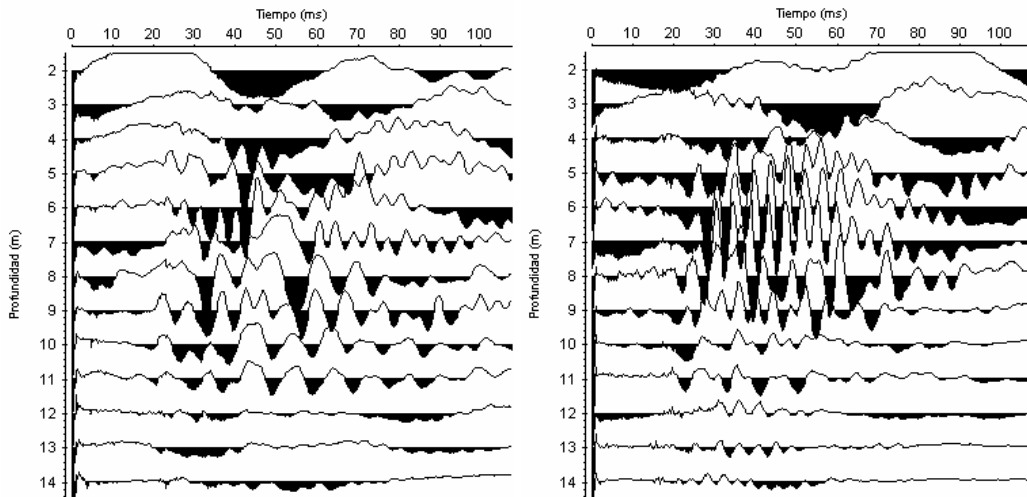
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 8, receptor de 2 a 14 metros).



**Figura A-16.y**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 8, receptor de 2 a 14 metros).

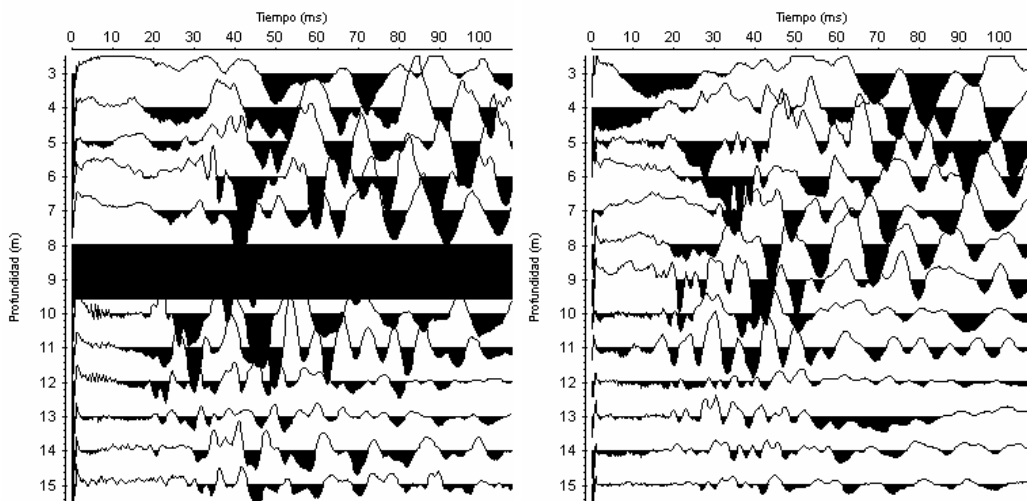
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 8, receptor de 2 a 14 metros).



**Figura A-16.z**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 8, receptor de 2 a 14 metros).

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 8, receptor de 2 a 14 metros).

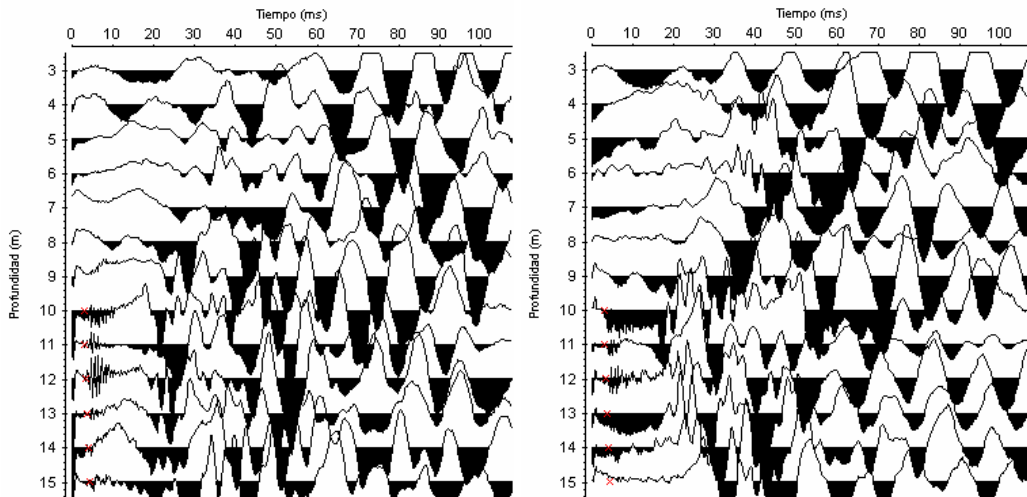


**Figura A-16.aa**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 9, receptor de 3 a 15 metros).

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 9, receptor de 3 a 15 metros).

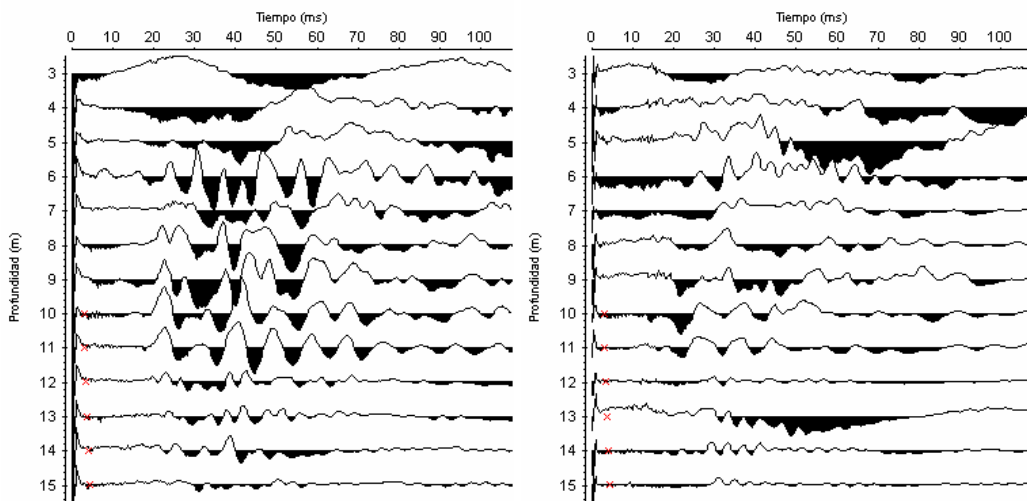




**Figura A-16.bb**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 9, receptor de 3 a 15 metros).

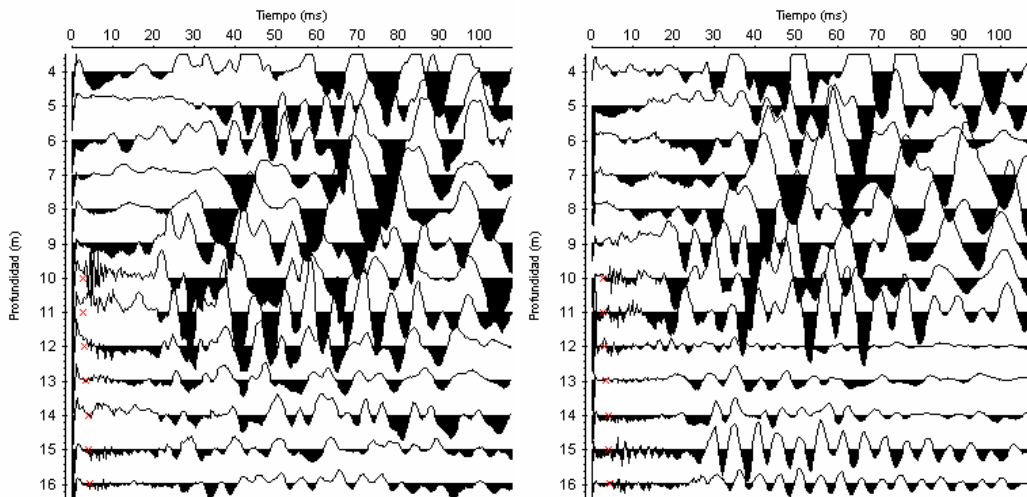
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 9, receptor de 3 a 15 metros).



**Figura A-16.cc**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 9, receptor de 3 a 15 metros). Se observan algunas de las llegadas de ondas “P” en rojo.

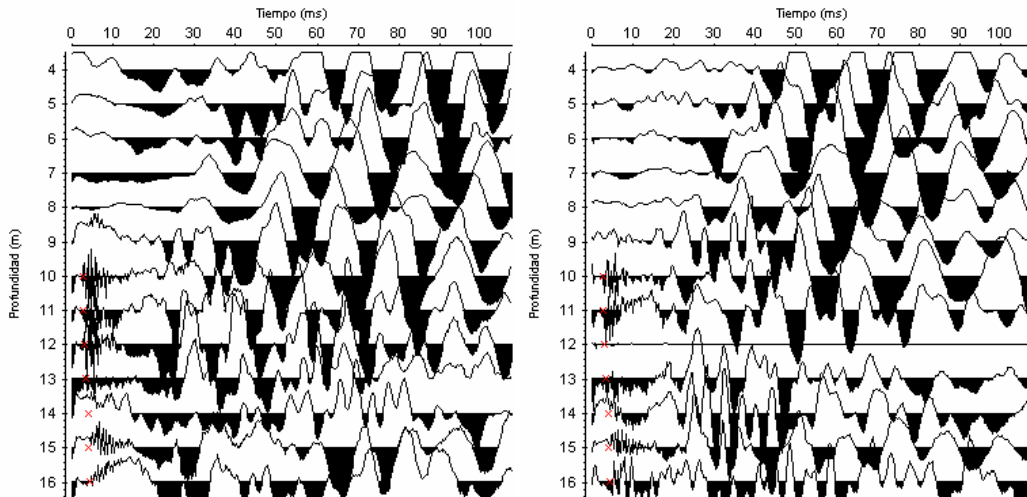
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 9, receptor de 3 a 15 metros). Se observan algunas de las llegadas de ondas “P” en rojo.



**Figura A-16.dd**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 10, receptor de 4 a 16 metros). Se observan algunas de las llegadas de ondas “P” en rojo.

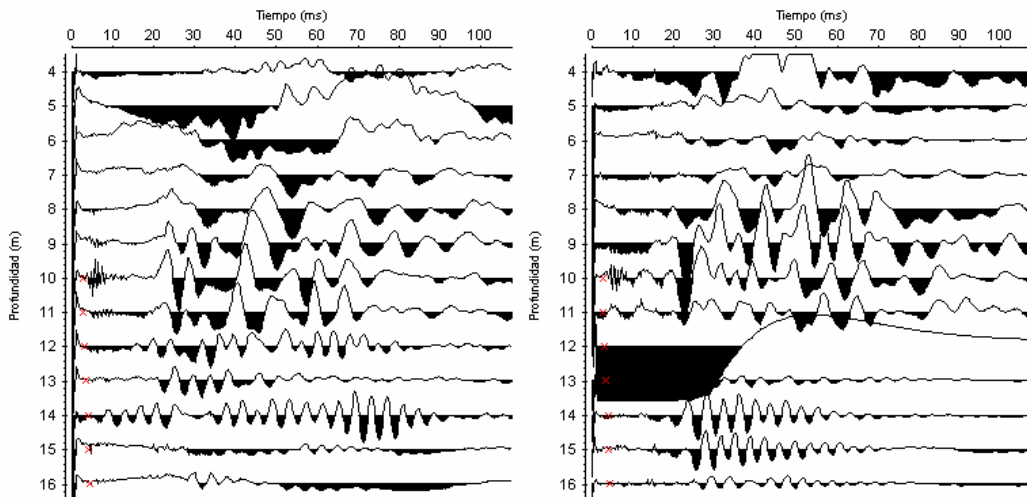
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 10, receptor de 4 a 16 metros). Se observan algunas de las llegadas de ondas “P” en rojo.



**Figura A-16.ee**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 10, receptor de 4 a 16 metros). Se observan algunas de las llegadas de ondas “P” en rojo.

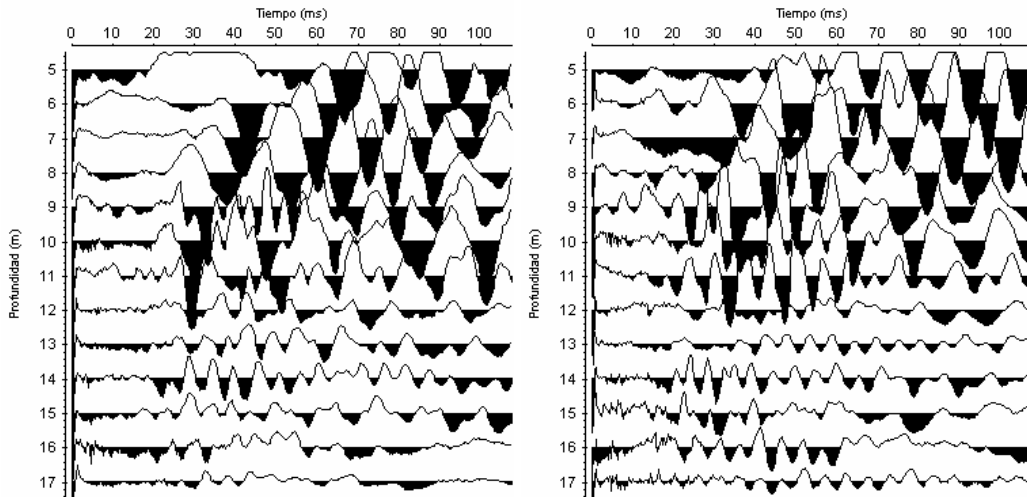
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 10, receptor de 4 a 16 metros). Se observan algunas de las llegadas de ondas “P” en rojo.



**Figura A-16.ff**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 10, receptor de 4 a 16 metros). Se observan algunas de las llegadas de ondas “P” en rojo.

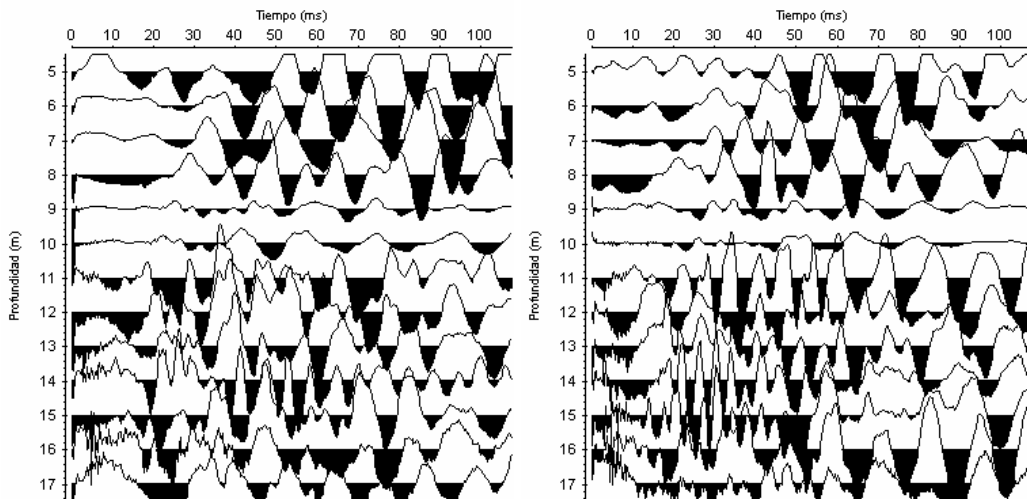
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 10, receptor de 4 a 16 metros). Se observan algunas de las llegadas de ondas “P” en rojo.



**Figura A-16.gg**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 11, receptor de 5 a 17 metros).

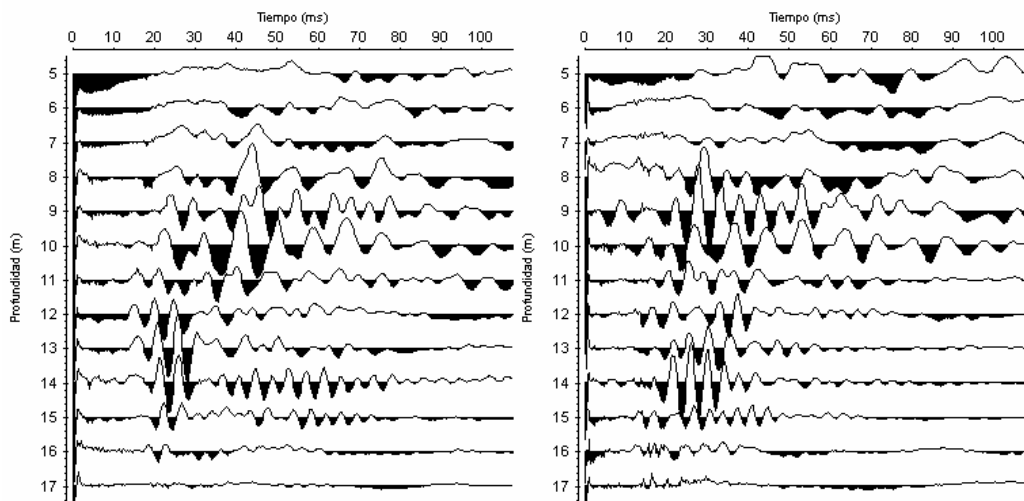
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 11, receptor de 5 a 17 metros).



**Figura A-16.hh**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 11, receptor de 5 a 17 metros).

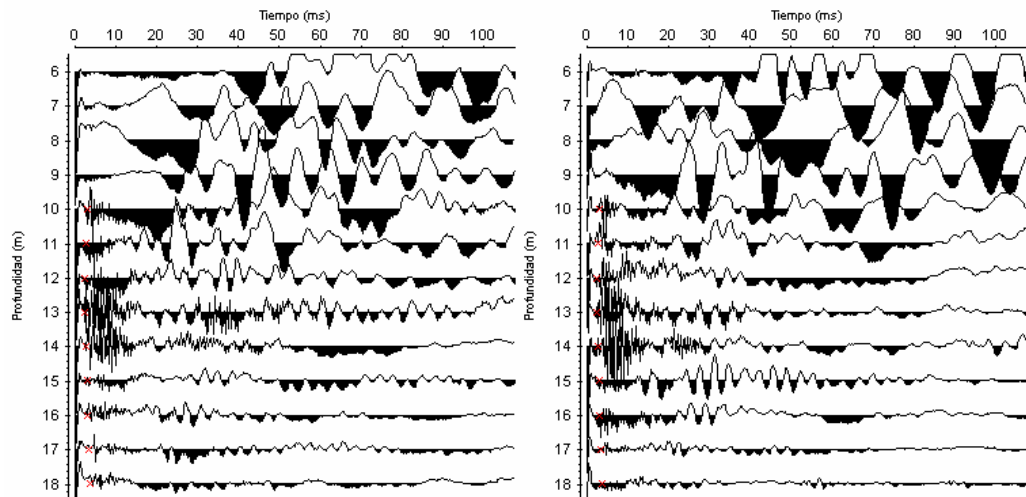
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 11, receptor de 5 a 17 metros).



**Figura A-16.ii**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 11, receptor de 5 a 17 metros).

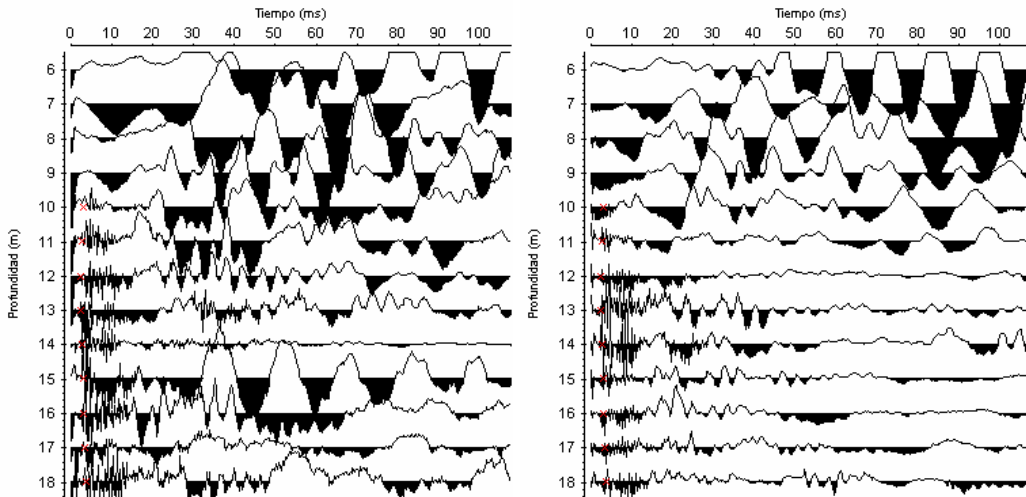
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 11, receptor de 5 a 17 metros).



**Figura A-16.jj**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 12, receptor de 6 a 18 metros). Algunas de las llegadas de las ondas “P” se ven en rojo.

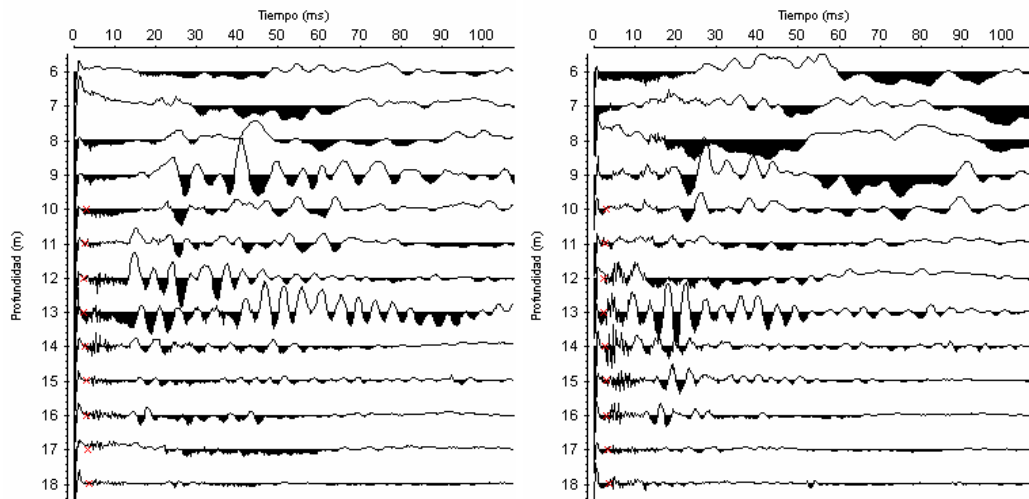
Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente longitudinal del geófono de pozo (fuente en 12, receptor de 6 a 18 metros). Algunas de las llegadas de las ondas “P” se ven en rojo.



**Figura A-16.kk**

Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 12, receptor de 6 a 18 metros). Algunas de las llegadas de las ondas “P” se ven en rojo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente transversal del geófono de pozo (fuente en 12, receptor de 6 a 18 metros). Algunas de las llegadas de las ondas “P” se ven en rojo.



**Figura A-16.II**

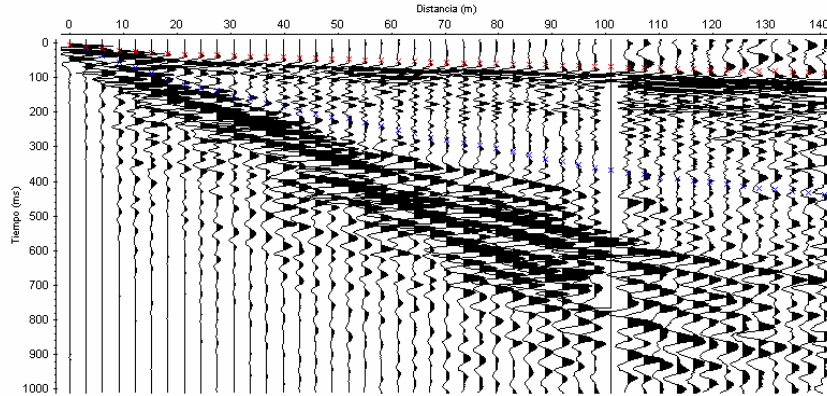
Izquierda: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia abajo y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 12, receptor de 6 a 18 metros). Algunas de las llegadas de las ondas “P” se ven en rojo.

Derecha: registro sísmico obtenido al generar ondas “P” hacia arriba y ser detectadas por la componente vertical del geófono de pozo (fuente en 12, receptor de 6 a 18 metros). Algunas de las llegadas de las ondas “P” se ven en rojo.

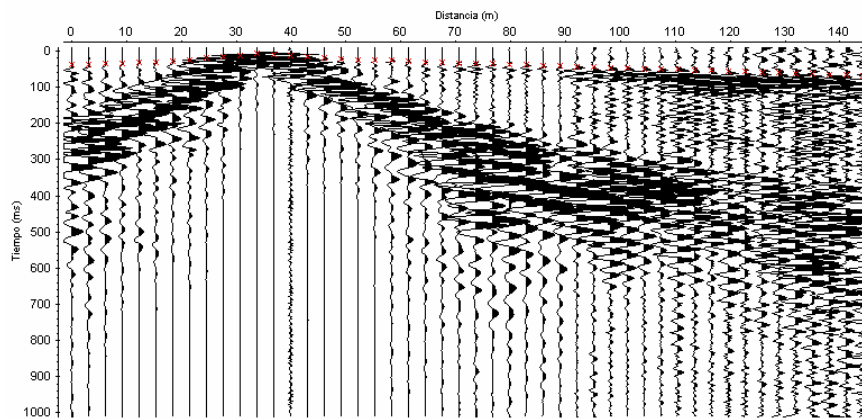
# APÉNDICE B

## 1. Registros sísmicos de refracción.

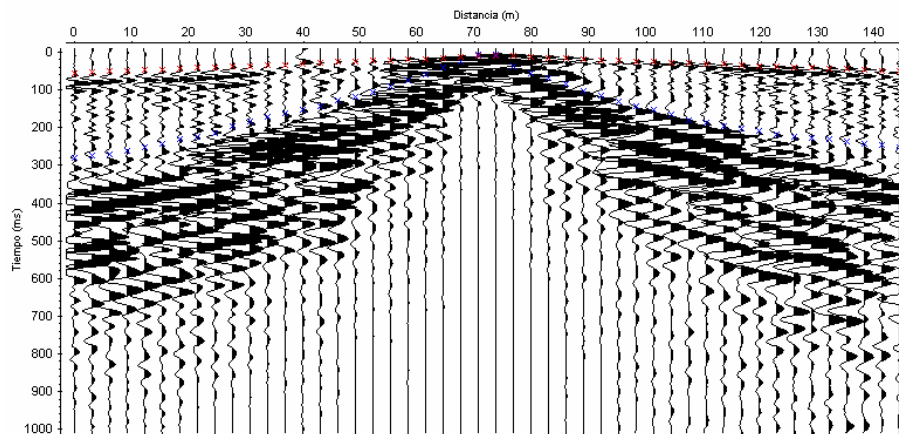
### 1.1 Tendido de refracción Nuevo Circo.



**Figura B-1.a** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (fuente en 0 metros), llegadas de ondas “P” en color rojo y llegadas de ondas “S” en azul.

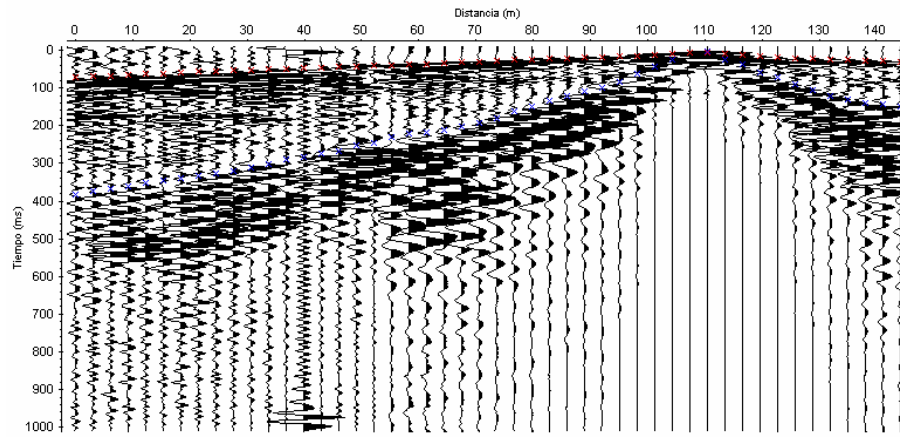


**Figura B-1.b** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (fuente en 36 metros), llegadas de ondas “P” en color rojo.

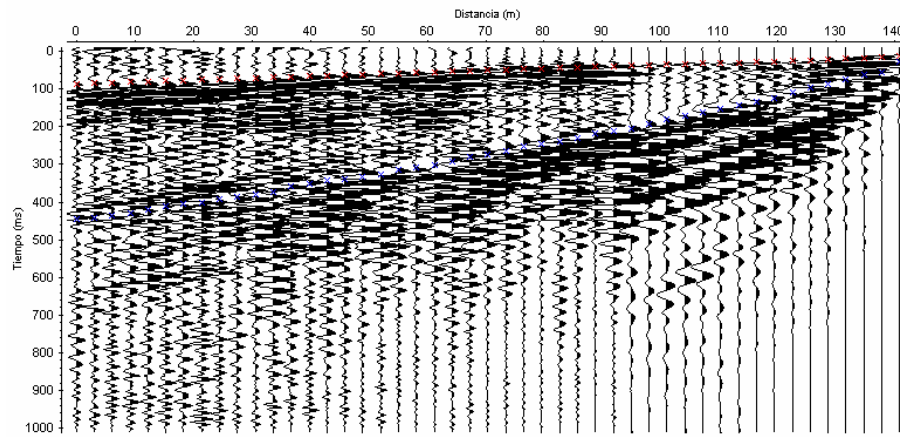


**Figura B-1.c** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (fuente en 72 metros), llegadas de ondas “P” en color rojo y llegadas de ondas “S” en azul.

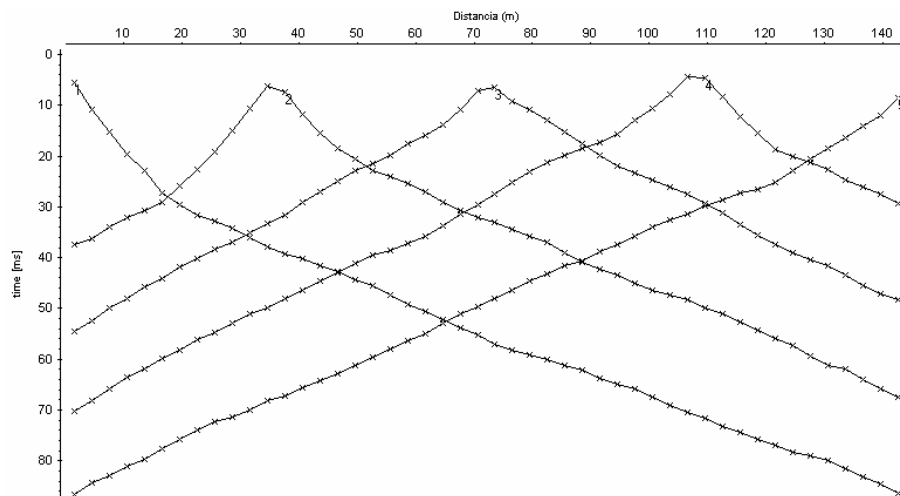




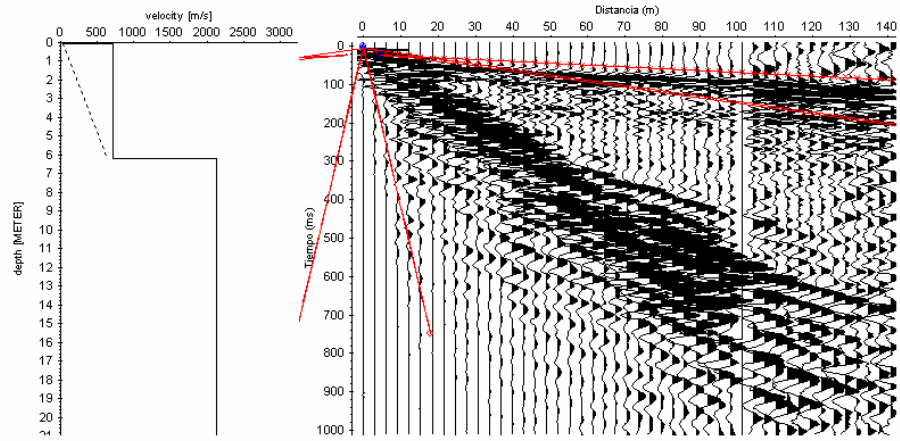
**Figura B-1.d** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (fuente en 108 metros), llegadas de ondas “P” en color rojo y llegadas de ondas “S” en azul.



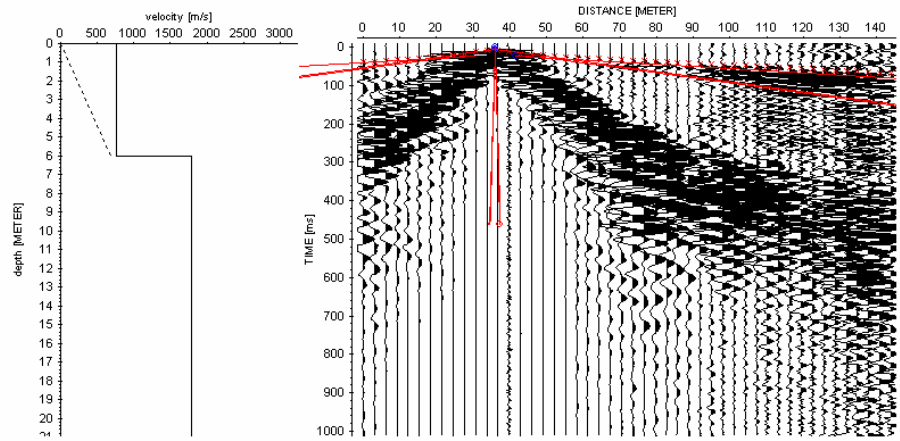
**Figura B-1.e** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (fuente en 144 metros), llegadas de ondas “P” en color rojo y llegadas de ondas “S” en azul.



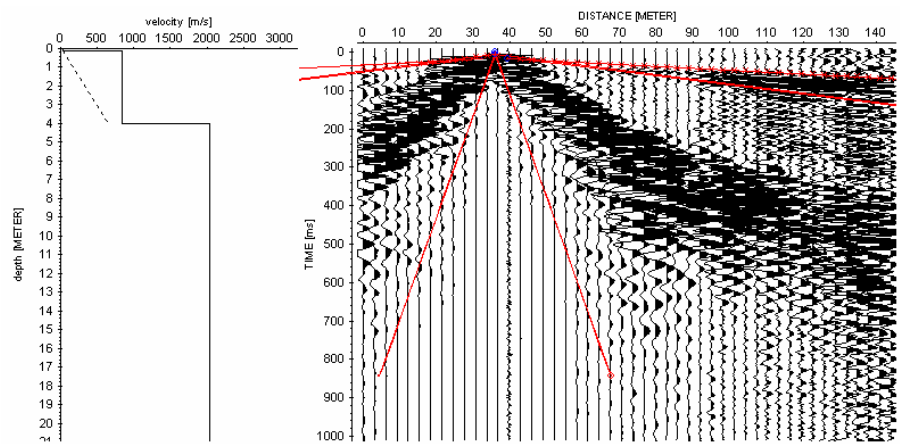
**Figura B-1.f** Control de tiempos para ondas “P”.



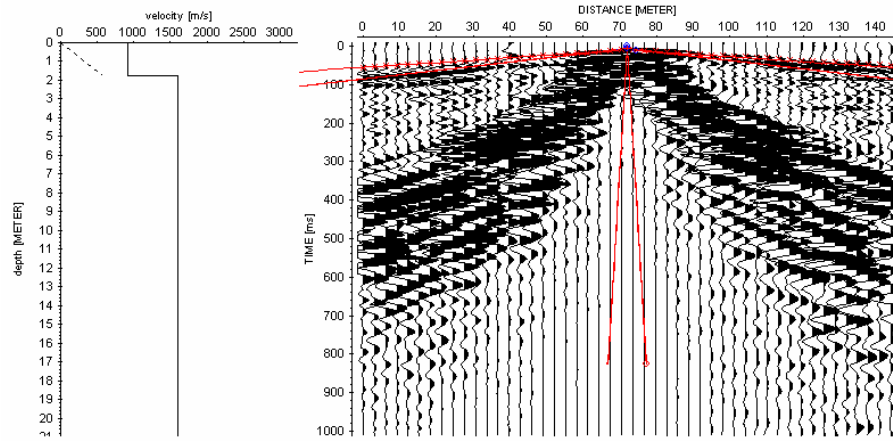
**Figura B-1.g** Modelo 1D para ondas “P”; disparo en 0 metros.



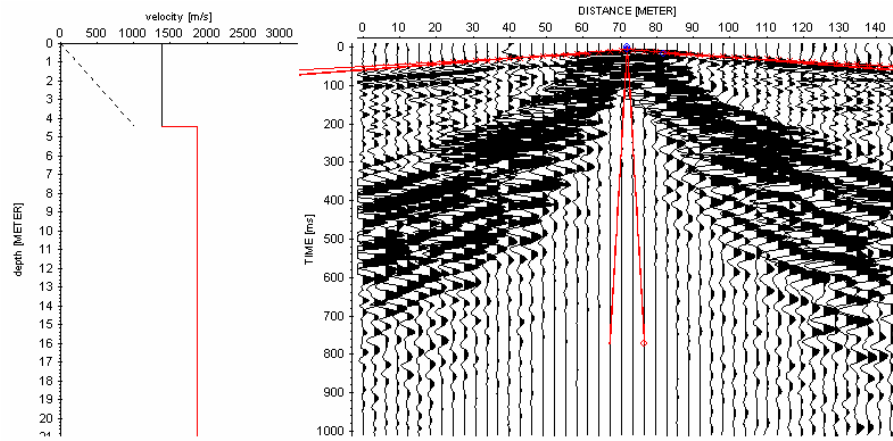
**Figura B-1.h** Modelo 1D para ondas “P”; disparo en 36 metros.



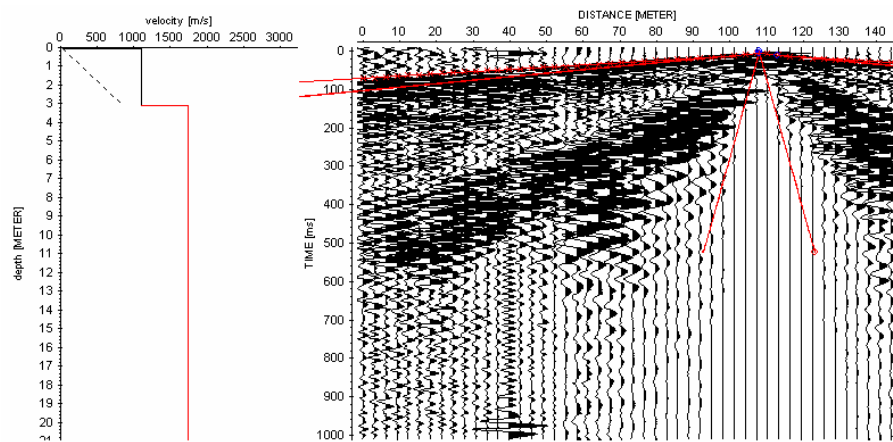
**Figura B-1.i** Modelo 1D para ondas “P”; disparo en 36 metros.



**Figura B-1.j** Modelo 1D para ondas “P”; disparo en 36 metros.



**Figura B-1.k** Modelo 1D para ondas “P”; disparo en 72 metros.



**Figura B-1.l** Modelo 1D para ondas “P”; disparo en 108 metros.

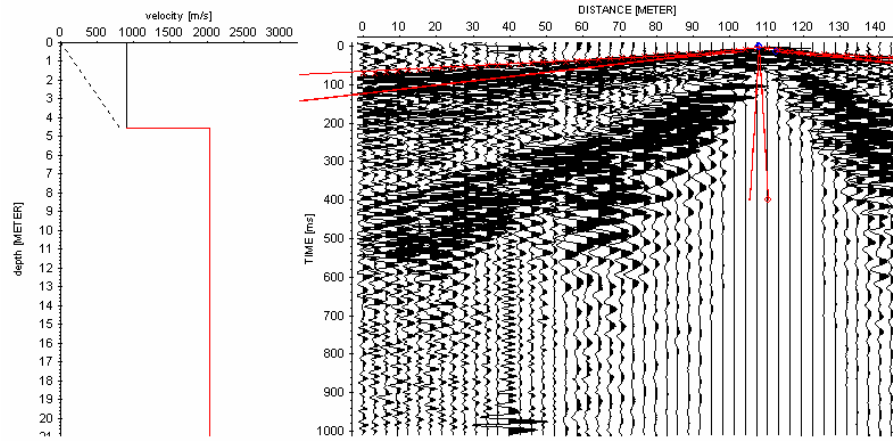


Figura B-1.m Modelo 1D para ondas "P"; disparo en 108 metros.

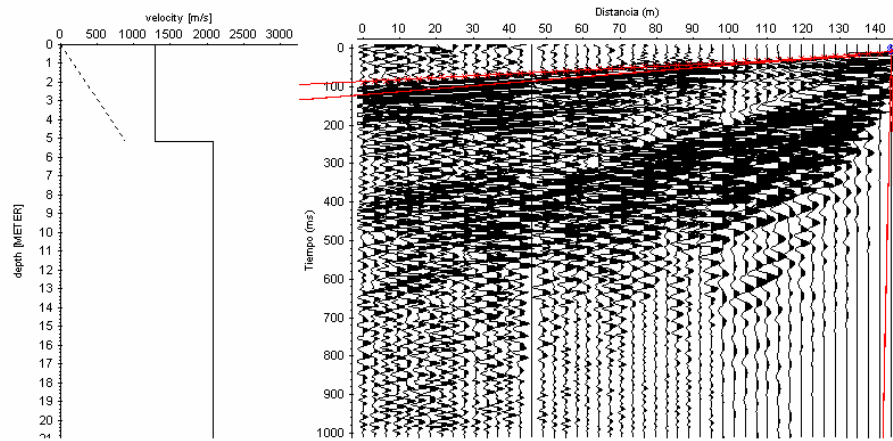


Figura B-1.n Modelo 1D para ondas "P"; disparo en 144 metros.

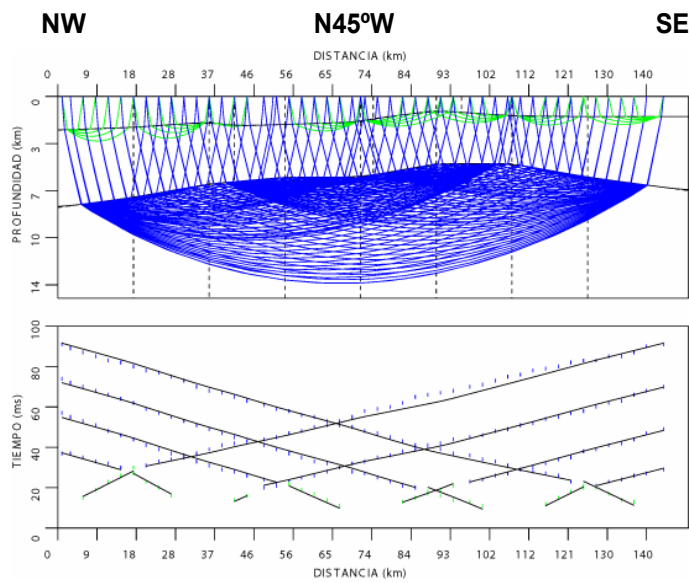
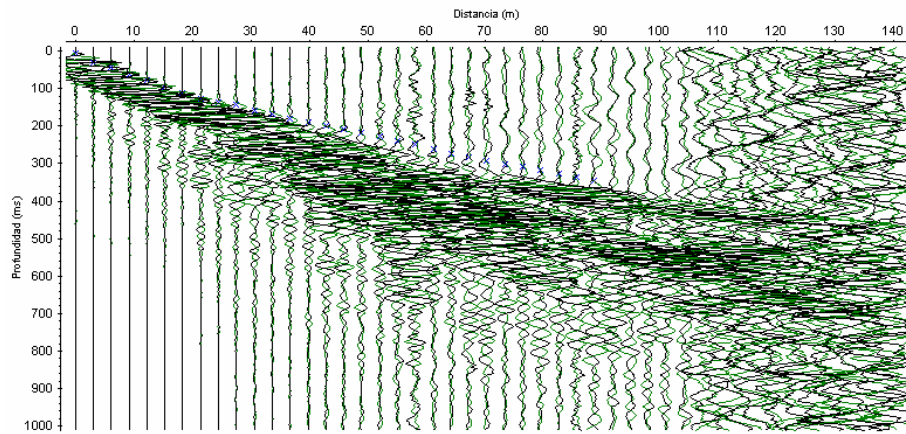
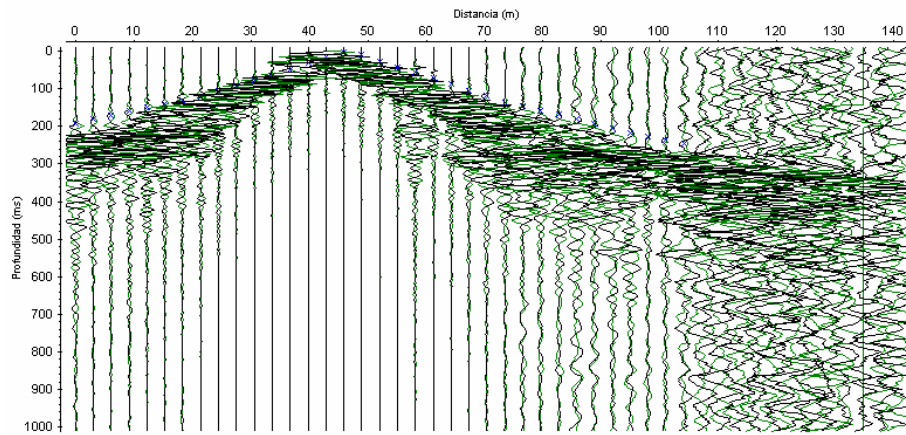


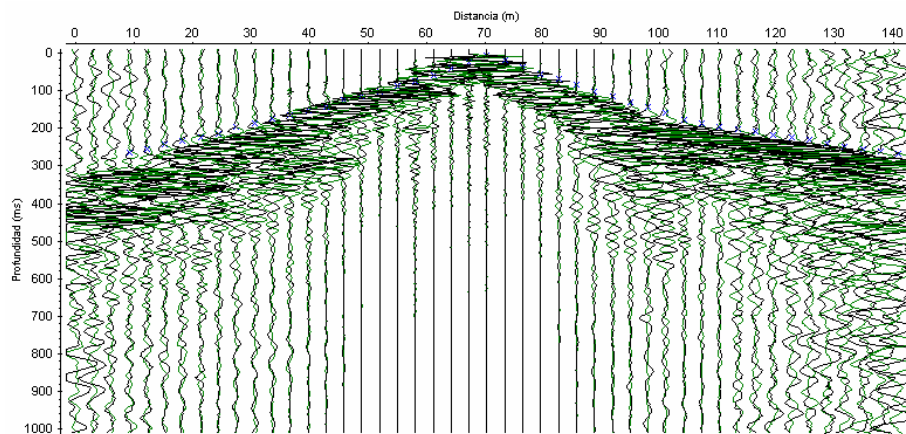
Figura B-1.o Modelo 2D para ondas "P".



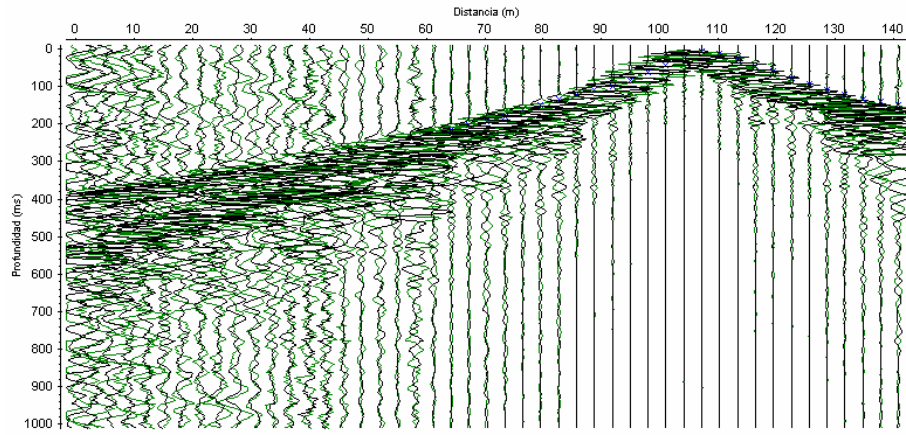
**Figura B-1.p** Registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (fuente en 0 metros), llegadas de ondas “S” en azul.



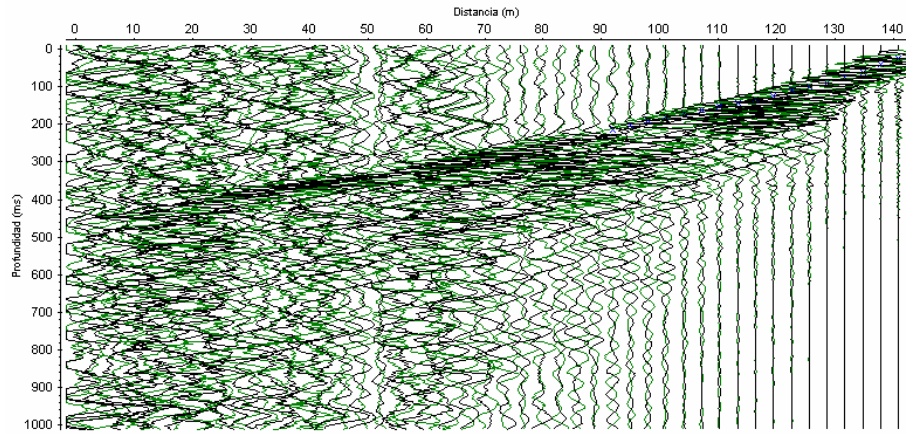
**Figura B-1.q** Registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (fuente en 46 metros), llegadas de ondas “S” en azul.



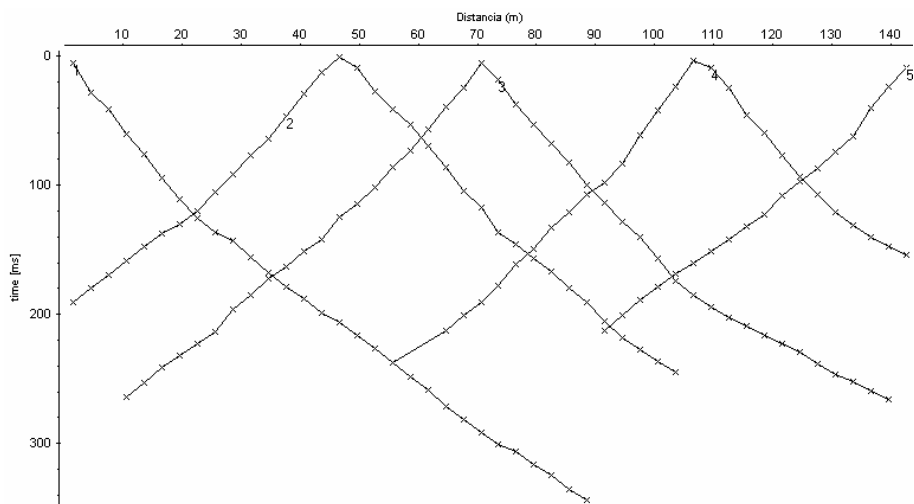
**Figura B-1.r** Registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (fuente en 72 metros), llegadas de ondas “S” en azul.



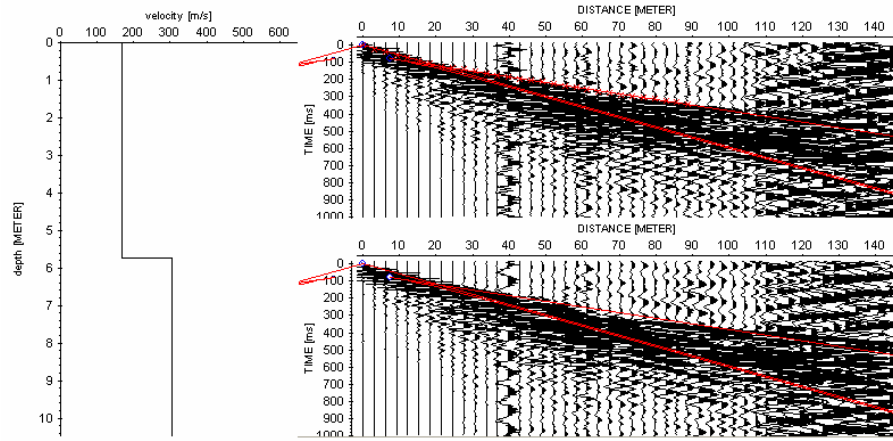
**Figura B-1.s** Registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (fuente en 108 metros), llegadas de ondas “S” en azul.



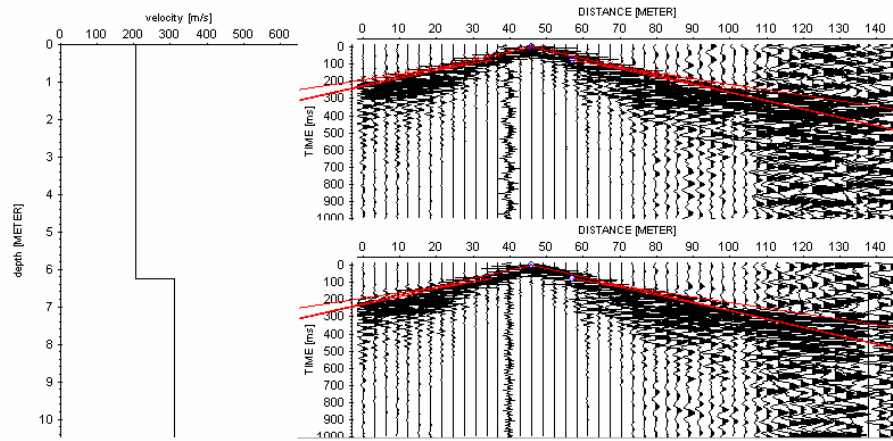
**Figura B-1.t** Registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (fuente en 144 metros), llegadas de ondas “S” en azul.



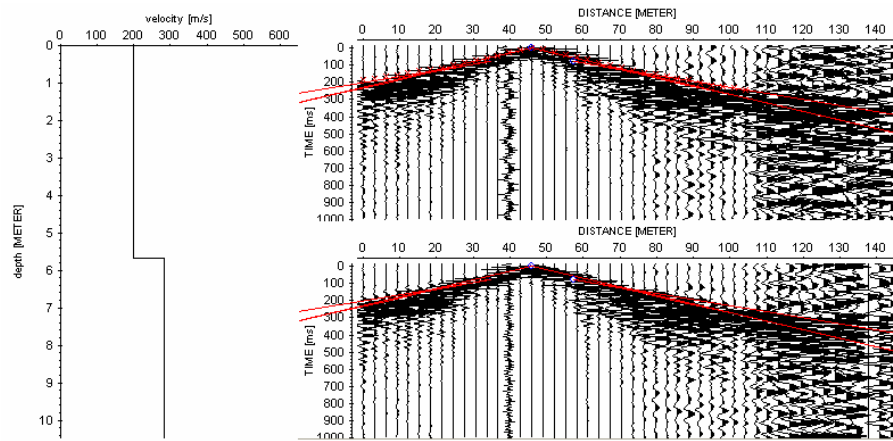
**Figura B-1.u** Control de tiempos para ondas “S”.



**Figura B-1.v** Modelo 1D para ondas “S”; disparo en 0 metros.



**Figura B-1.w** Modelo 1D para ondas “S”; disparo en 46 metros.



**Figura B-1.x** Modelo 1D para ondas “S”; disparo en 46 metros.

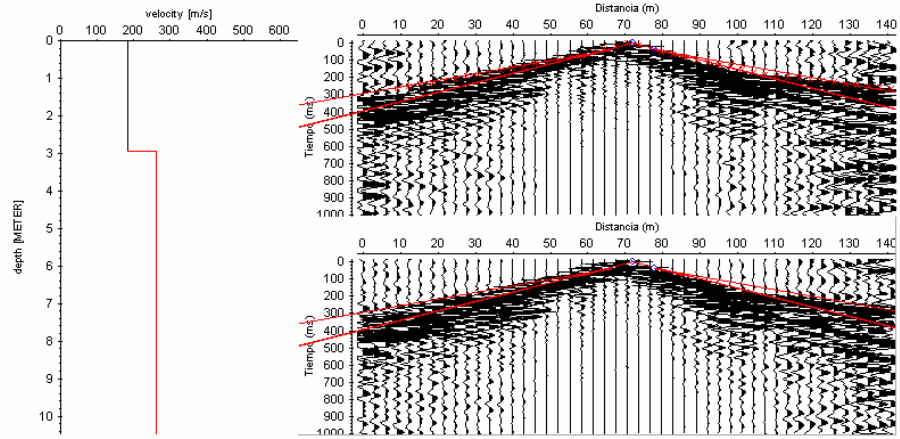


Figura B-1.y Modelo 1D para ondas “S”; disparo en 72 metros.

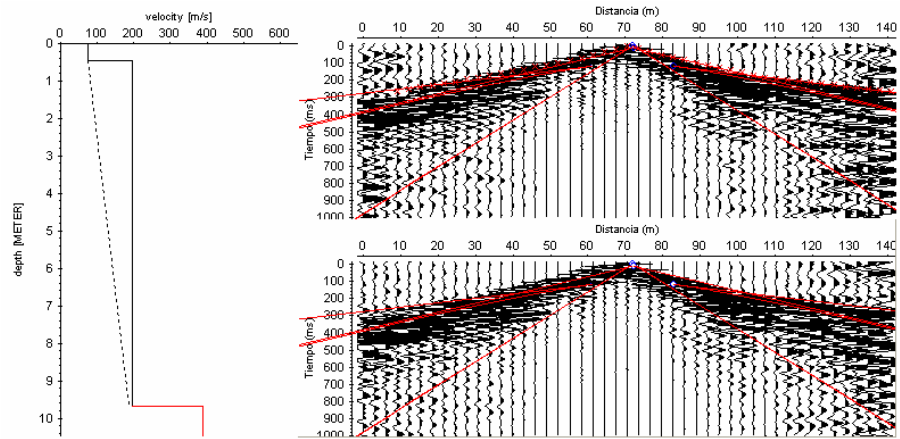


Figura B-1.z Modelo 1D para ondas “S”; disparo en 72 metros.

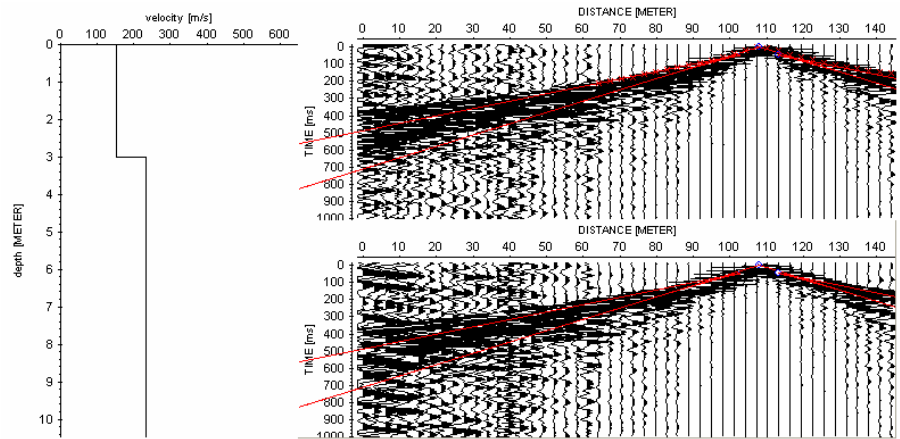


Figura B-1.aa Modelo 1D para ondas “S”; disparo en 108 metros.



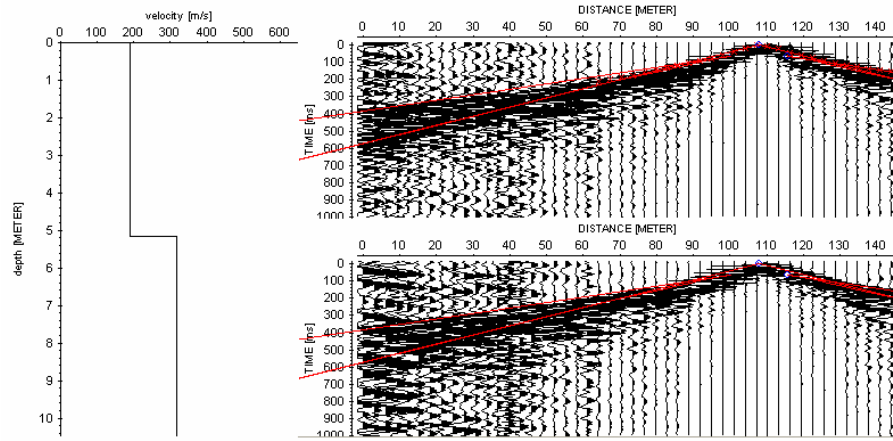


Figura B-1.bb Modelo 1D para ondas "S"; disparo en 108 metros.

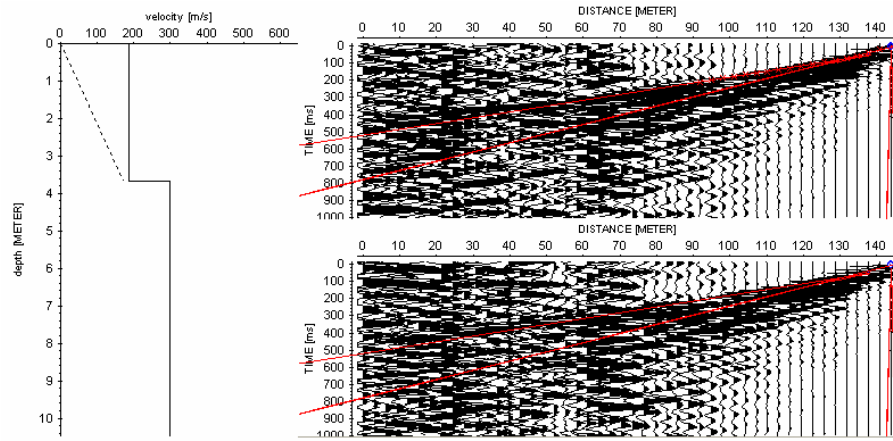


Figura B-1.cc Modelo 1D para ondas "S"; disparo en 144 metros.

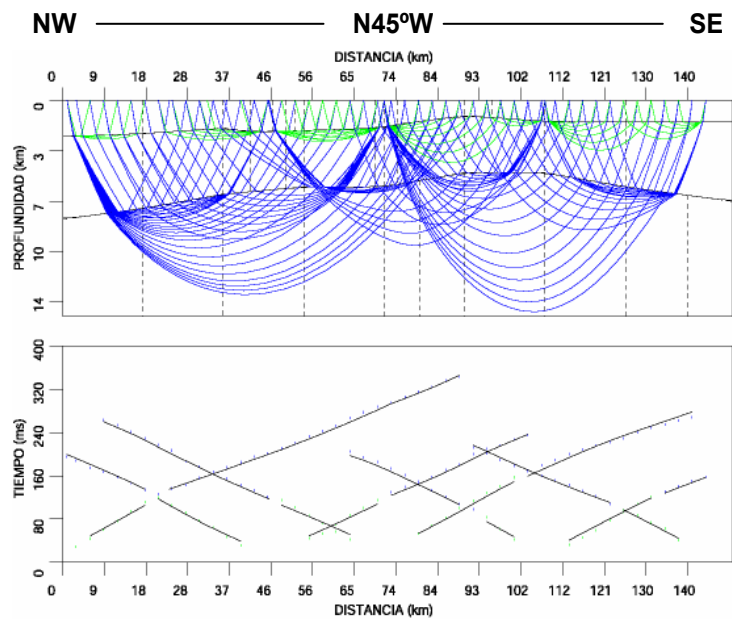
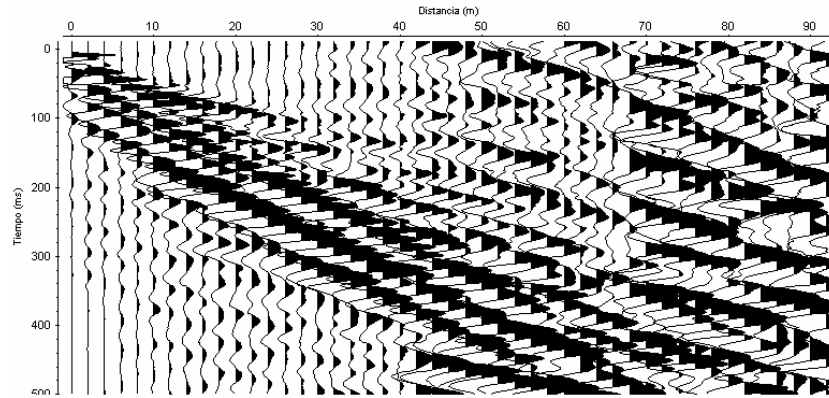
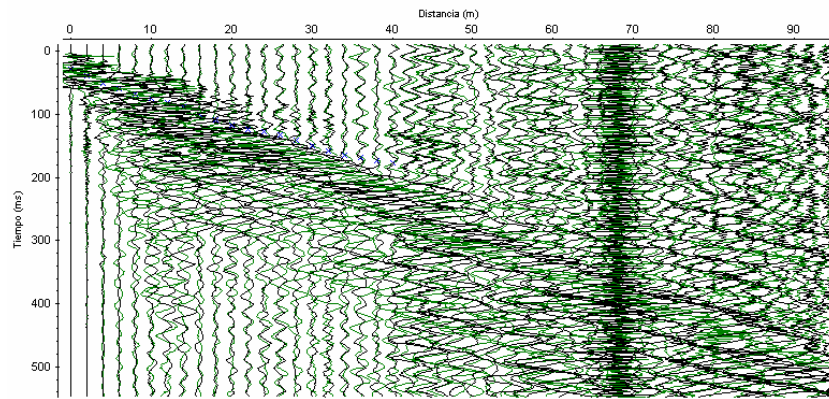


Figura B-2.dd Modelo 2D para ondas "S".

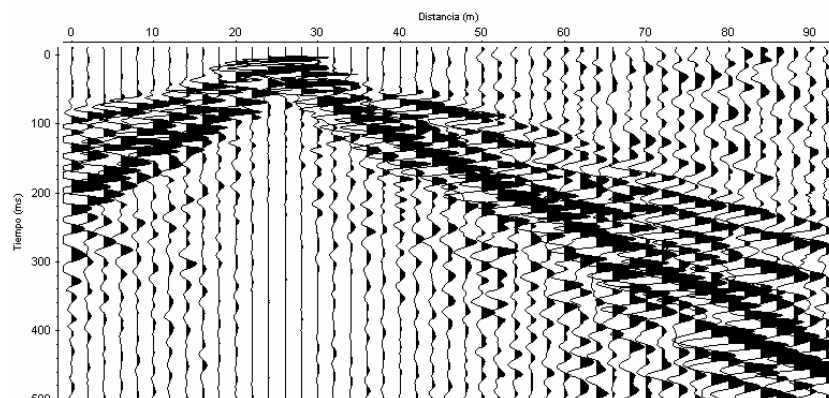
## 2. Tendido de refracción Río Bravo.



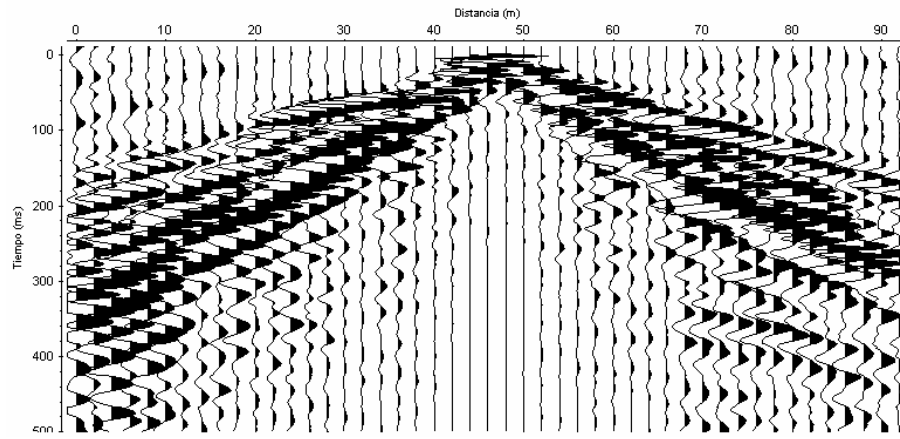
**Figura B-2.a** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (fuente en 0 metros).



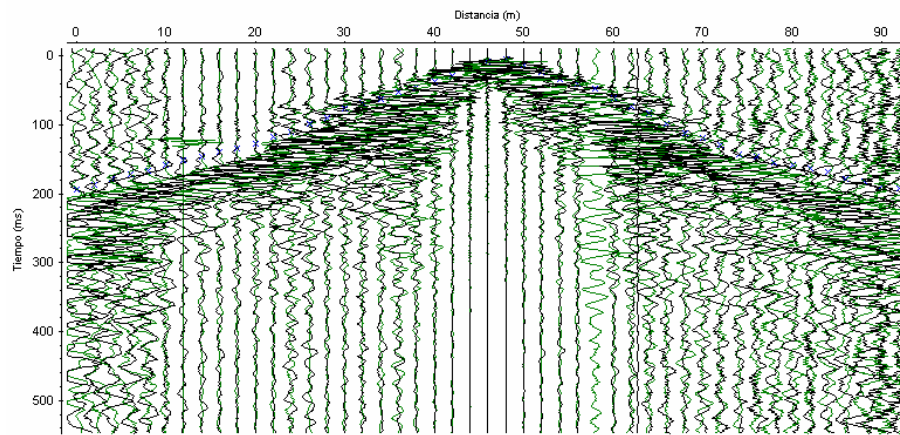
**Figura B-2.b** Registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (fuente en 0 metros), algunas llegadas de las ondas “S” en azul.



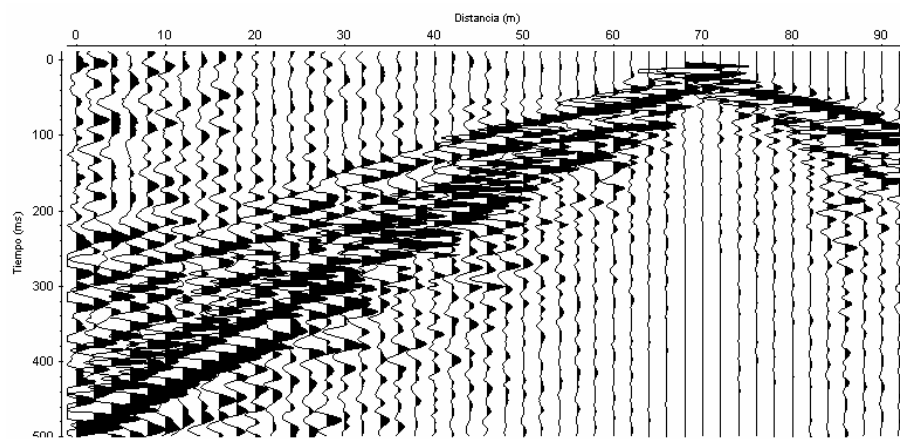
**Figura B-2.c** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (fuente en 24 metros).



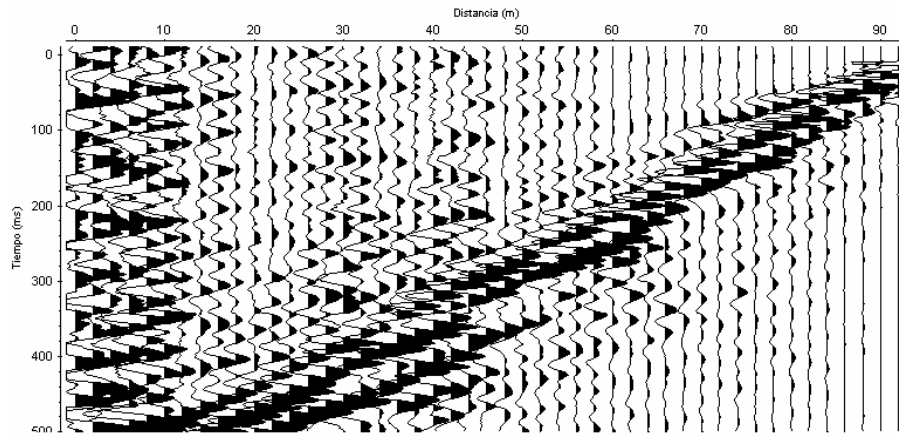
**Figura B-2.d** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (fuente en 48 metros).



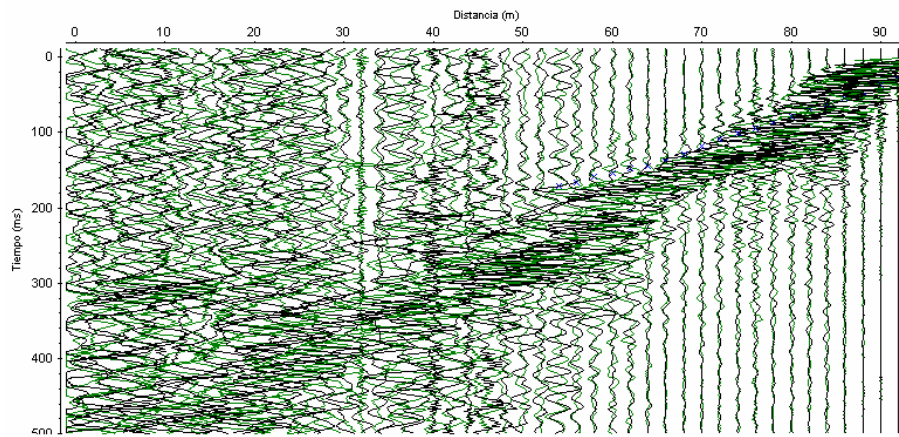
**Figura B-2.e** Registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (fuente en 48 metros), llegadas de las ondas “S” en azul.



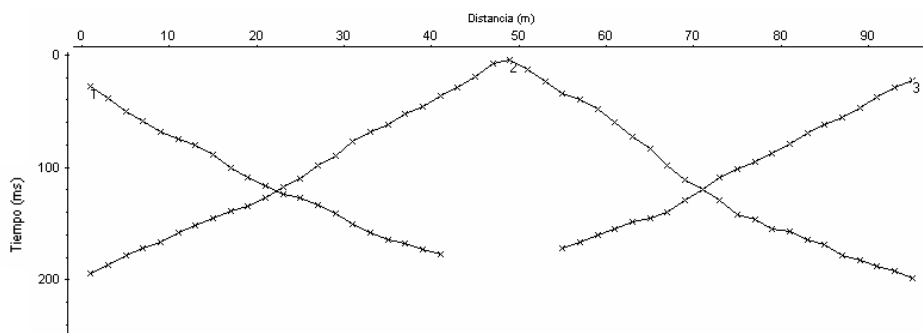
**Figura B-2.f** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (fuente en 72 metros).



**Figura B-2.g** Registro sísmico obtenido al generar ondas “P” (fuente en 96 metros).



**Figura B-2.h** Registro sísmico obtenido al generar ondas “S” (fuente en 96 metros), algunas de las llegadas de las ondas “S” en azul.



**Figura B-2.i** Control de tiempos para ondas “S”.

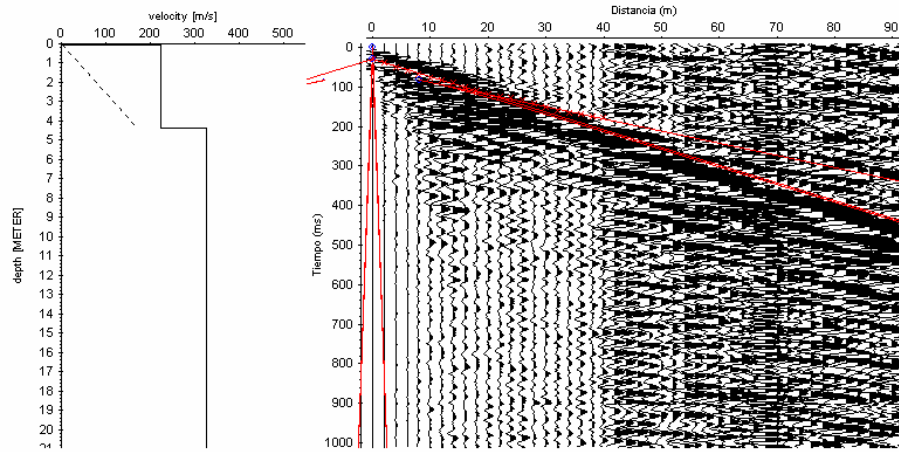


Figura B-2.j Modelo 1D para ondas “S”; disparo en 0 metros.

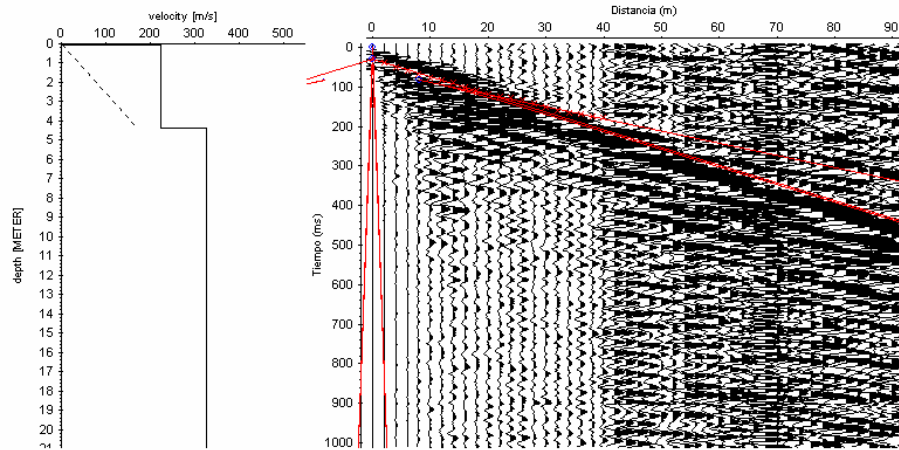


Figura B-2.k Modelo 1D para ondas “S”; disparo en 48 metros.

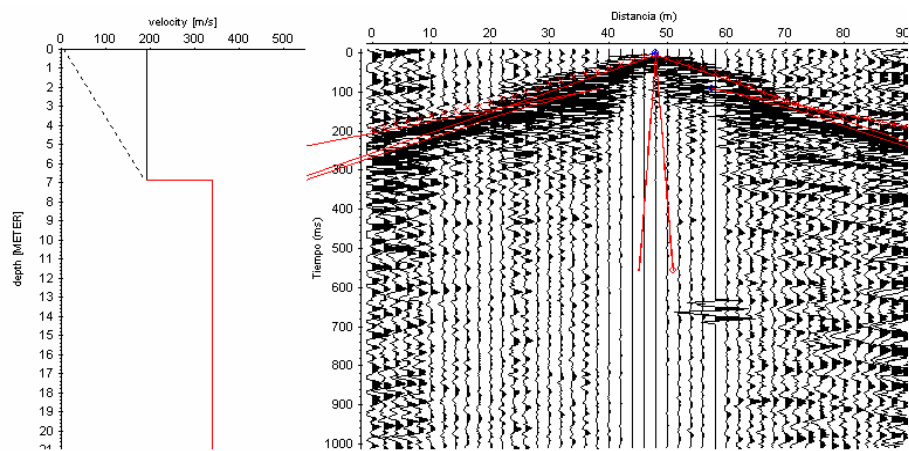
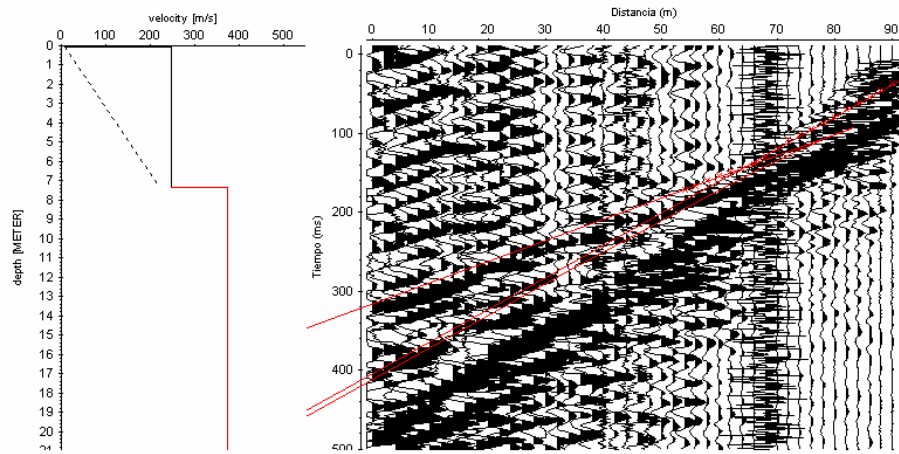
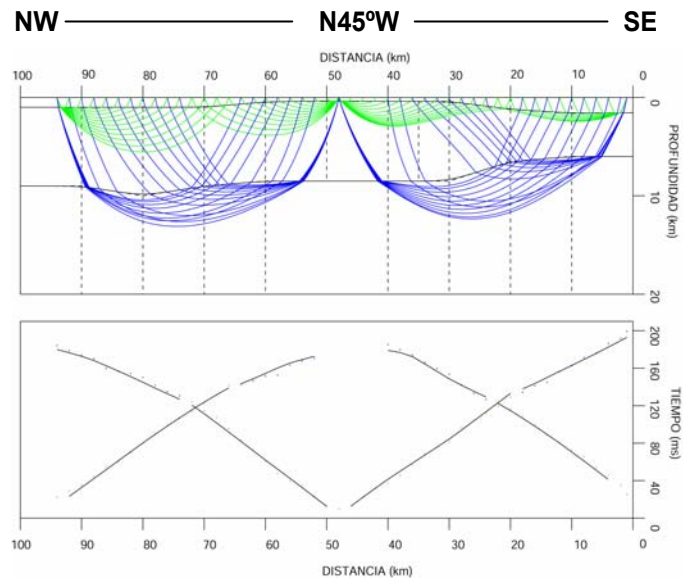


Figura B-2.l Modelo 1D para ondas “S”; disparo en 48 metros.

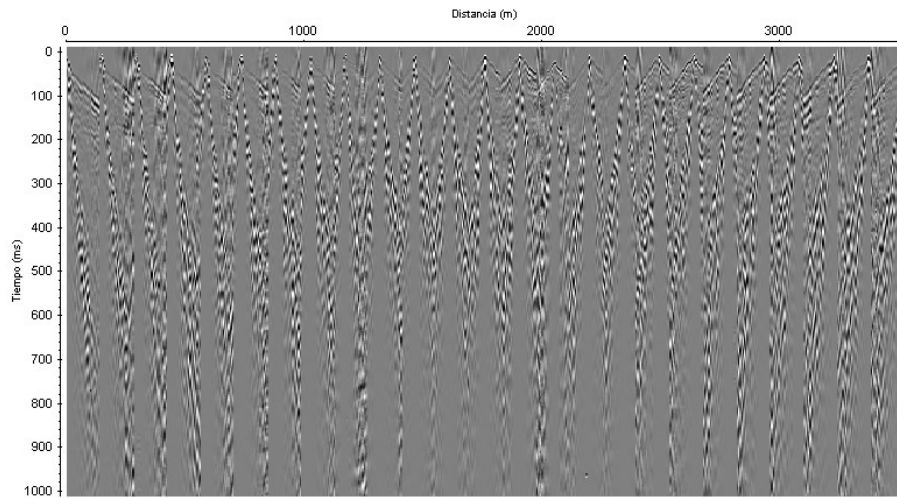


**Figura B-2.m** Modelo 1D para ondas “S”; disparo en 96 metros.

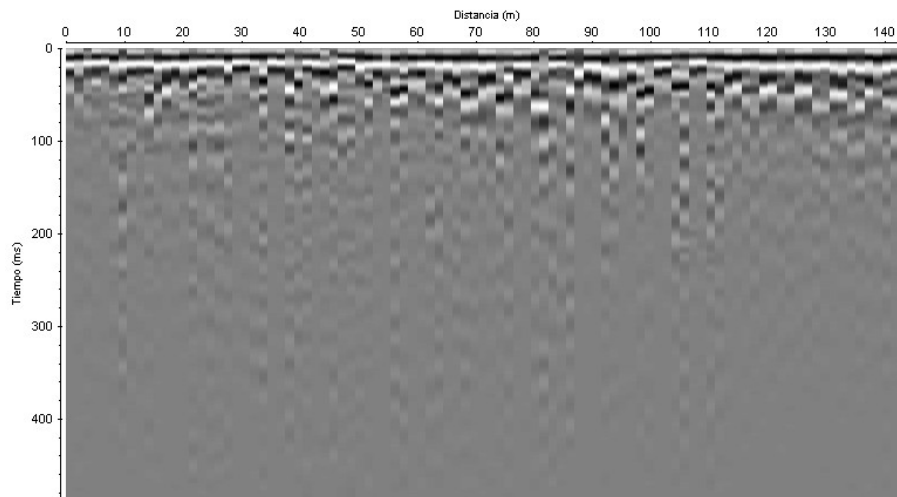


**Figura B-1.n** Modelo 2D para ondas “S”.

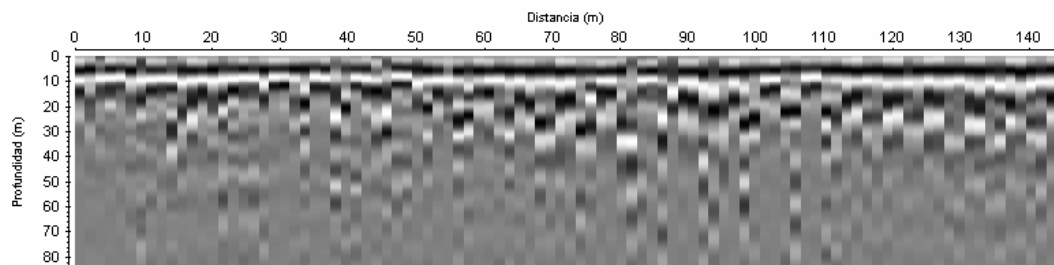
## 2. Registro sísmico de reflexión 2D.



**Figura B-3.a** Unión de todos los disparos realizados en el tendido.



**Figura B-3.b** Perfil apilado en tiempo.



**Figura B-3.c** Sección final, luego de la conversión tiempo – profundidad.

# APÉNDICE C



**Análisis estadístico entre pozos realizados por la compañía CENTENO – RODRÍGUEZ & ASOCIADOS.**

**1. Pozos Berna y Pitter**

<b>SISTEMA TUTORIAL DE INGENIEROS – 1992</b>				
<b>OFICINA CENTENO, RODRÍGUEZ &amp; ASOCIADOS</b>				
Comparación de dos líneas de regresión de primera clase				
$X_1 = N_{60}$ del pozo vecino al edificio Berna				
$Y_1 = Vs$ en pozo vecino al edificio Berna				
$X_2 = N_{60}$ del pozo vecino al edificio Pitter				
$Y_2 = Vs$ en pozo vecino al edificio Pitter				
Esta prueba se hace con 0.1 de confianza				
ENTRADA DE DATOS				
Observación	$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$
1	28	369	14	231
2	37	520	19	255
3	37	594	14	312
4	18	375	18	291
5	13	284	25	396
6	27	451	16	381
7	30	378	11	486
8	56	862	42	625
9	56	698	14	576
10	56	811	57	749
11	27	595	42	718
12	30	608	25	377
13	30	688	27	493
14	45	617	60	612
15	56	727		
Media	36.400	571.800	27.429	463.929
Desviación Estándar	14.312	172.555	16.346	170.502
$Y_1 = Mx + B$ Donde $M = 10.289$ $B = 197.287$ $R_1 = 0.85336$				
$Y_2 = Mx + B$ Donde $M = 7.868$ $B = 248.109$ $R_2 = 0.75434$				
$Y = Mx + B$ Donde $M = 8.963$ $B = 222.698$				

Varianza 1 = Varianza 2; Pendiente 1 = Pendiente 2; Las líneas son idénticas.

## 2. Pozos Berna y Royal

SISTEMA TUTORIAL DE INGENIEROS – 1992				
OFICINA CENTENO, RODRÍGUEZ & ASOCIADOS				
Comparación de dos líneas de regresión de primera clase				
$X_1 = N_{60}$ del pozo vecino al edificio Berna				
$Y_1 = Vs$ en pozo vecino al edificio Berna				
$X_2 = N_{60}$ del pozo vecino al edificio Royal				
$Y_2 = Vs$ en pozo vecino al edificio Royal				
Esta prueba se hace con 0.1 de confianza				
ENTRADA DE DATOS				
Observación	$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$
1	28	369	5	166
2	37	520	13	180
3	37	594	15	332
4	18	375	34	408
5	13	284	39	451
6	27	451	56	497
7	30	378	56	476
8	56	862	56	469
9	56	698	56	523
10	56	811	56	573
11	27	595	56	552
12	30	608	56	568
13	30	688	56	596
14	45	617	56	557
15	56	727		
Media	36.400	571.800	43.571	452.786
Desviación Estándar	14.312	172.555	19.098	138.607
$Y_1 = Mx + B$ Donde $M = 10.289$ $B = 197.287$ $R_1 = 0.85336$				
$Y_2 = Mx + B$ Donde $M = 6.840$ $B = 154.772$ $R_2 = 0.94239$				
$Y = Mx + B$ Donde $M = 7.320$ $B = 176.030$				

Varianza 1 = Varianza 2; Pendiente 1 = Pendiente 2; Las líneas son idénticas.

### 3. Pozos Hotel ABC y Don Martín

SISTEMA TUTORIAL DE INGENIEROS – 1992				
OFICINA CENTENO, RODRÍGUEZ & ASOCIADOS				
Comparación de dos líneas de regresión de primera clase				
$X_1 = N_{60}$ del pozo vecino al edificio Hotel ABC				
$Y_1 = Vs$ en pozo vecino al edificio Hotel ABC				
$X_2 = N_{60}$ del pozo vecino al edificio Don Martín				
$Y_2 = Vs$ en pozo vecino al edificio Don Martín				
Esta prueba se hace con 0.1 de confianza				
ENTRADA DE DATOS				
Observación	$X_1$	$Y_1$	$X_2$	$Y_2$
1	8	128	4	181
2	4	247	7	227
3	6	308	11	253
4	6	226	14	354
5	6	346	25	293
6	10	435	17	396
7	6	212	12	389
8	27	562	17	430
9	6	293	34	518
10	18	287	16	479
11	18	481	56	679
12	21	288	56	640
13	23	188	34	557
14	36	351	46	605
15	9	222	56	655
16	8	199	56	586
17	10	228	56	750
18	18	316		
19	31	443		
20	56	507		
21	37	448		
22	53	514		
Media	18.955	328.492	30.412	470.132
Desviación Estándar	15.342	122.947	19.953	172.387
$Y_1 = Mx + B$ Donde $M = 5.494$ $B = 224.352$ $R_1 = 0.68560$				
$Y_2 = Mx + B$ Donde $M = 7.920$ $B = 229.261$ $R_2 = 0.91675$				
$Y = Mx + B$ Donde $M = 6.860$ $B = 226.807$				

Varianza 1 = Varianza 2; Pendiente 1 = Pendiente 2; Las líneas son idénticas.