

The background of the slide is a composite image. The top half shows a wide, concrete dam with water cascading over its spillway. The bottom half shows a close-up of a waterfall with water falling over a rocky ledge. The text is overlaid on this background.

**UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
ESCUELA CENTROAMERICANA DE GEOLOGÍA**

**“Modelado geofísico mediante el uso del método de refracción sísmica, del área comprendida por los Sitios de Presa Electriona y Belén, Heredia, Costa Rica”.**

**Proyecto de Graduación presentado para optar por el grado de Licenciatura en Geología**

**Geol. Maureen Bonilla Hidalgo**

**Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica.**

**2012**

## **DEDICATORIA**

*A Dios por darme la vida y la salud para poder alcanzar mis metas*

*A mis padres por su apoyo incondicional y constantes oraciones*

*“Después de escalar una montaña muy alta, descubrimos que hay muchas otras montañas por escalar”*

Nelson Mandela

## ***AGRADECIMIENTOS***

A mi director de tesis y mis revisores por sus acertadas recomendaciones y sugerencias, tanto como profesionales, amigos y colegas.....y sobre todo por no perder la fe en mí.

A mi novio Iván Sanabria Coto, por su constante apoyo, consejos, y sugerencias en todo este camino, y sobre todo por su cariño y comprensión 🐾

A mis compañeros de trabajo por todo el apoyo recibido.

A el Geol. Manuel Barrantes por su increíble aporte y experiencia, en la descripción de las secciones delgadas.

A Dios por permitirme llegar este día y completar así una etapa más en mi vida.

Esta tesis fue defendida el **26 de Junio del 2012** en la Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Geología.

**TRIBUNAL EXAMINADOR:**

---

[M.Sc. Rolando Mora Chinchilla]  
**Director Escuela Centroamericana de Geología**

---

[Lic. Miguel Ávila Ballar]  
**Director de Tesis**

---

[M.Sc. Fernando Alvarado Villalón]  
**Revisor 1**

---

[Lic. Rafael Matamoros Arguedas]  
**Revisor 2**

---

[M.Sc. Héctor Zúñiga]  
**Revisor 3 Asignado por ECG**

---

[Geol. Maureen Bonilla Hidalgo]  
Estudiante de Grado



## RESUMEN

Los sitios de Presa Electriona y Belén poseen alrededor de los 100 años de antigüedad desde su construcción en 1922 y 1911 respectivamente; en los últimos años se ha evidenciado un constante incremento en el deterioro estructural de ambas presas, por tal motivo la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL), institución actualmente encargada de la administración y operación de la generación eléctrica en ambas plantas hidroeléctricas, ha solicitado al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), la responsabilidad de cuantificar tanto la condición estructural como el entorno geológico sobre el cual se cimientan estos sitios de presa. A partir de dicha solicitud, y en función de la caracterización del medio geológico, se generaron estudios geológicos y geofísicos de refracción sísmica, que permitieron caracterizar geomecánicamente los materiales sobre los cuales se cimientan ambas presas.

El modelo geológico propuesto para el área en y entre ambos sitios de presa, comprende el cartografiado geológico de las Formaciones Pacacua, Grifo Alto, Colima, Tiribí y los Depósitos Recientes, sobre los cuales se detallan los contactos principalmente de la Formación Colima y sus respectivos Miembros: Superior, Puente de Mulas e Inferior. Se determinó que ambos sitios de Presa se fundan sobre los diferentes Miembros de la Formación Colima, y entre los cuales se localizan niveles de paleosuelos rojizos con espesores significativos que podrían eventualmente localizarse en las zonas de fundación de las presas.

El modelo geofísico de refracción sísmica determinó que las materiales de fundación de las presas en el caso del sitio de Presa Electriona presenta velocidades  $V_p$  de 3,3 a 4,3 km/s asociadas a lavas andesíticas de la Formación Colima Superior, mientras que el sitios del presa Belén presenta velocidades  $V_p$  de 3,7 a 4,8 km/s asociadas a lavas andesíticas de la Formación Colima Inferior. A partir del valor  $V_p$  obtenido se utilizaron cuatro parámetros geotécnico para caracterizar las litologías de fundación de las Presas, los cuales son: ripabilidad, índice Q, RQD y la relación  $V_p$  con la Resistencia a la Compresión Simple. Para las rocas sobre las que se funda el sitio de Presa Electriona se determinó basado en los parámetros geotécnicos anteriormente expuestos que corresponden a macizos no ripables, con una calida del macizo muy mala a buena, un grado de fracturación numeroso a poco, y una dureza asociada a rocas moderadamente duras a duras, respectivamente. Mientras que para las rocas del sitio de Presa Belén, se determinó que corresponden a macizos no ripables, con una calidad de macizo buena, una escasa fracturación y asociados a rocas duras a muy duras. Mediante la comparación del valor de  $V_p$  obtenido en cada sitio de Presa y los datos geotécnicos recopilados por el ICE en diferentes proyectos, se realizó un análisis comparativo con el fin de determinar de forma indirecta los parámetros de velocidad de onda S ( $V_s$ ), Módulo Dinámico ( $E_d$ ) y Módulo Estático ( $E_s$ ). Para el sitio de Presa Electriona se determinó un valor de  $V_s$  de 2,0 y 2,6 km/s, un  $E_d$  de 21.289 y 38.931 MPa, y un  $E_s$  de 11.771 y

30.628 MPa. Para el sitio de Presa Belén se determinaron valores de  $V_s$  de 2,2 y 2,9 km/s,  $E_d$  de 27.635 y 50.030 MPa, y  $E_s$  de 17.796 y 45.572 MPa.

En general se considera que ambas litologías sobre las que se fundan los sitios de Presa presentan cualidades geomecánicas buenas, debido a la condición sana de la roca, la alta resistencia al golpe y a los parámetros geotécnicos obtenidos de forma directa e indirectamente relacionados al valor  $V_p$  del material. Dada la posibilidad de que en un futuro cercano la CNFL, considere reubicar o reestructurar los sitios de Presa, se sugiere que las zonas de fundación se localicen sobre estos materiales lávicos asociados a la Formación Colima.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	12
1.2 OBJETIVOS .....	12
1.2.1 Objetivo General .....	12
1.2.2 Objetivos específicos .....	12
1.3 UBICACIÓN.....	13
1.4 METODOLOGÍA.....	14
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO .....</b>	<b>15</b>
2.1 PROSPECCIÓN SÍSMICA.....	15
2.1.1 Propagación de las ondas sísmicas.....	16
2.1.2 Constantes elásticas .....	18
2.1.3 Trayectoria de los rayos sísmicos.....	21
2.1.4 Curvas Distancia-Tiempo.....	22
2.2 REFRACCIÓN SÍSMICA.....	25
2.2.1 Principios de refracción sísmica.....	25
2.3 FENOMENOS ASOCIADOS A LA PROPAGACIÓN DE LA ONDA SISMICA .....	27
2.3.1 Principios generales de interpretación en refracción sísmica.....	29
2.4 PRINCIPALES METODOLOGÍAS DE INTERPRETACIÓN DE DATOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA.....	31
2.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA .....	34
<b>CAPÍTULO 3. MARCO GEOLOGICO .....</b>	<b>36</b>
3.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	36
3.1.1 Formación Pacacua (Basamento Terciario).....	40

3.1.2 Formación Grifo Alto .....	40
3.1.3 Formación Colima (Lavas Intracañón) .....	40
3.1.4 Formación Tiribí (Avalancha Ardiente).....	42
<b>3.2 GEOLOGÍA LOCAL.....</b>	<b>43</b>
3.2.1 Formación Pacacua .....	45
3.2.2 Formación Grifo Alto .....	49
3.2.3 Formación Colima .....	51
3.2.4 Formación Tiribí .....	58
3.2.5 Depósitos Recientes .....	62
3.2.6 Tectónica Asociada .....	64
<b>3.3 MODELO GEOLOGICO.....</b>	<b>66</b>
<b>CAPÍTULO 4. MARCO GEOFÍSICO .....</b>	<b>72</b>
<b>4.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LA GEOFÍSICA REALIZADA.....</b>	<b>72</b>
4.1.1 P.H. Ventanas-Garita .....	74
4.1.2 P.H. Virilla .....	77
4.1.3 P.H. Brasil.....	79
4.1.4 P.H. Belén y P.H. Electriona .....	80
<b>4.2 GEOFÍSICA REALIZADA EN AMBOS SITIOS DE PRESA .....</b>	<b>81</b>
4.2.1 Logística de campo .....	82
4.2.2 Procesamiento de datos.....	88
4.2.3 Metodología de interpretación.....	92
<b>4.3 MODELADO GEOFISICO.....</b>	<b>93</b>
4.3.1 Sitio de presa Electriona .....	93

4.3.2 Comparación entre el modelo geológico y geofísico de los perfiles transversales al sitio de presa Electriona.....	97
4.3.3 Sitio de presa Belén .....	99
4.3.4 Comparación entre el modelo geológico y geofísico de los perfiles transversales al sitio de presa Belén .....	104
4.3.5 Síntesis de las Velocidades ( $V_p$ ) .....	108
4.3.6 Clasificación geomecánica de los materiales a partir del valor $V_p$ obtenido.....	110
4.3.7 Caracterización de las litologías de fundación de las presas .....	117
4.3.8 Relación entre $V_p$ y valores obtenidos en estudios previos de los parámetros $V_p$ , $V_s$ , $E_d$ , $E_s$ .....	119
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>127</b>
5.1 CONCLUSIONES.....	127
5.2 RECOMENDACIONES .....	130
<b>CAPÍTULO 6. REFERENCIAS .....</b>	<b>131</b>
<b>ANEXOS. ....</b>	<b>137</b>



## TABLA DE CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio.....	13
Figura 2. Tipos de ondas que se generan a partir de una fuente sísmica. (Tomado de Bolt, 1976)	16
Figura 3. Esquemas de la relación entre la dirección de los esfuerzos y las deformaciones dadas. a) Esfuerzos tensionales, b) Esfuerzos compresionales y c) Esfuerzos de cizalle. (Modificado de Fuster & Strong, 1961).....	18
Figura 4. Diferentes trayectorias de las ondas generadas a partir de una misma fuente sísmica (Modificado de Astier, 1975). .....	22
Figura 5. Arreglo del tendido sísmico (Modificado de Peralta, 2007) .....	23
Figura 6. Muestra los parámetros que constituyen una curva D-T (Modificado de Peralta, 2007) ..	23
Figura 7. Gráfico de relación entre la distancia crítica ( $X_c$ ) y la profundidad ( $Z_1$ ), con el contraste de velocidades ( $V_2/V_1$ ) (Tomado de Peralta, 2007). .....	24
Figura 8. Representación del principio de Snell (Modificado de Astier, 1975). .....	25
Figura 9. Esquema del principio de Huygens .....	26
Figura 10. Esquema de la ley de Fermat (Modificado Pérez, 2006).....	27
Figura 11. Difracción producida por una irregularidad en los contactos de los reflectores (Fuster & Strong, 1961).....	28
Figura 12. Scattering o ruido producido por partículas dentro del medio. ....	28
Figura 13. Esquema del principio de reciprocidad (Modificado de Cantos, 1987) .....	29
Figura 14. Esquema del principio de tiempos de intercepto (Modificado de Cantos, 1987).....	30
Figura 15. Esquema del principio de paralelismo (Modificado de Cantos, 1987).....	31
Figura 16. Esquema base a partir del cual se obtienen los parámetros para el método de Mínimos Cuadrados .....	33
Figura 17. Columna regional resumida (Modificada de Echandi, 1981) .....	39
Figura 18. Columna geológica local .....	44

Figura 19. a) Vista desde la parte superior de Casa de Máquinas de Electriona hacia el Río Virilla b) Deslizamiento margen derecha río Virilla, c) Vista desde casa de máquinas Electriona hacia el cafetal de la localidad de Honduras d) Vista desde el tajo de Pedregal hacia el cafetal. ....	45
Figura 20. Brecha volcanoclástica, localizada sobre la quebrada en el cafetal Honduras. ....	46
Figura 21. Bloque de Jaspe localizado a lo largo de la quebrada en el sector de Honduras. ....	47
Figura 22. a-b) Materiales indiferenciados, localizados en el sector de Honduras, c) Contacto entre Fm. Pacacua y Fm. Tiribí. ....	48
Figura 23. a) Contacto lateral del dique andesítico con las brechas volcanoclásticas de Fm. Pacacua y b) Zona de alto grado de fracturación ubicado en la base del afloramiento. ....	49
Figura 24. a) Contacto inferior y lateral del dique con la Fm. Pacacua b) Lajas gruesas en la parte superior del afloramiento c) Entrada del cafetal en el sector de Honduras. ....	50
Figura 25. Lavas masivas sitio de presa Belén. ....	51
Figura 26. a-b) Autobrecha de enfriamiento en sitio de presa Belén. ....	52
Figura 27. Secuencia de los Miembros Puente de Mulas y Colima Superior, observada en el Tajo Pedregal. ....	53
Figura 28. a) Columna de ignimbrita escasamente desarrollada, b) Depósito de ignimbrítico. ....	54
Figura 29. a-b) Estructuras de flujo y lentes, c) Lavas lajeadas y c) Contacto inferior de las lavas con el paleosuelo rojizo. ....	55
Figura 30. a) Geometría lenticular de los depósitos lacustres con la lavas lajeadas del Miembro Linda Vista b) Contacto inferior de la capa café, c) Bloque sub-angular de lava andesítica. ....	56
Figura 31. Brecha volcanoclástica rojiza, bloques con tamaños promedios de 7 a 10 cm. ....	57
Figura 32. Brecha de pómez localizada en la base de las ignimbritas. ....	58
Figura 33. Cenizas localizadas en la base de las ignimbritas. a) Techo del túnel en el Tajo Pedregal, b) Sitio de presa P.H. Belén. ....	59
Figura 34. a) Columna de Ignimbrita volcada, b) Detalle de columna con fiames de obsidiana. ....	60
Figura 35. Contacto entre paleosuelo rojizo y las ignimbritas de la Fm. Tiribí. ....	61
Figura 36. Depósitos tobáceos asociados a la Fm. Tiribí, localizados en el Tajo El Encierro. ....	62

Figura 37. Depósitos coluvio-aluviales, localizados en el sector del sitio de presa Belén. ....	63
Figura 38. Plano de falla observado en la base del cañón del río Virilla, en el que se muestra el movimiento relativo sobre el plano. ....	64
Figura 39. Posible plano de falla, cambiando lateralmente la secuencia. ....	65
Figura 40. a) Bloques con planos de falla b) Posible zona de falla cubierta por coluvio. ....	65
Figura 41. Mapa de ubicación de los sitios y tajos visitados, en conjunto con las muestras de mano y sección petrográficas. ....	67
Figura 42. Mapa de afloramientos obtenidos a partir de los datos de levantamientos geológicos en los diferentes sitios visitados. ....	68
Figura 43. Mapa geológico obtenido a partir de los datos de pozos SENARA 2011, levantamientos de campo 2010-2012, y mapas geológicos de Echandi (1981) Denyer & Arias (1990) ....	69
Figura 44. Perfil geológico detallado transversal al Sitio de Presa Electriona E-E' ....	70
Figura 45. Perfil geológico detallado transversal al Sitio de Presa Belén C-C' ....	71
Figura 46. Ubicación de los trabajos geofísicos realizados en proyectos cercanos al área de estudio. ....	73
Figura 47. Ubicación de los sitios de Presa Electriona y Belén. ....	81
Figura 48. Ubicación de los perfiles sísmicos realizados en el sitio de presa P.H. Electriona. ....	82
Figura 49. Perfil 1, margen derecha en sitio de Presa Electriona. ....	83
Figura 50. Perfil 2, margen izquierda del sitio de presa Electriona. ....	83
Figura 51. Perfil 3, transversal al sitio de Presa Electriona. ....	84
Figura 52. Ubicación de los perfiles sísmicos realizados en el sitio de presa del P.H. Belén. ....	85
Figura 53. Perfil 1, margen derecha del sitio de Presa Belén. ....	86
Figura 54. Perfil 2, margen izquierda sitio de Presa Belén. ....	86
Figura 55. Perfil 3, transversal al sitio de Presa Belén. ....	87
Figura 56. Perfil 4, margen izquierda sitio de Presa Belén. ....	87
Figura 57. Dispositivo sísmico “picado”, corresponde a un tiro de orilla. ....	88

Figura 58. Dromocrónica obtenida a partir del “picado” de cada uno de los tres dispositivos sísmicos individuales que la componen. ....	89
Figura 59. Modelo de 2 capas propuesto con el método de inversión <i>Time-term</i> , determinado mediante cambios en la pendiente de la curva distancia-tiempo de cada dispositivo.....	92
Figura 60. Ubicación de los 3 perfiles con respecto al eje de la Presa Electriona .....	93
Figura 61. Perfil 1, dromocrónica y modelo Interpretación para 2 capas. ....	94
Figura 62. Perfil 2, dromocrónica y modelo interpretación para 2 capas .....	95
Figura 63. Perfil 3, dromocrónica y modelo interpretación para 2 capas .....	96
Figura 64. Perfil geológico y geofísico transversal al sitio al sitio de presa Electriona.....	98
Figura 65. Ubicación de los cuatro perfiles con respecto al eje de la Presa Belén. ....	99
Figura 66. Perfil 1, dromocrónica y modelo interpretación para dos capas.....	100
Figura 67. Perfil 2, dromocrónica y modelo interpretación para dos capas.....	101
Figura 68. Perfil 3, dromocrónica y modelo interpretación para dos capas.....	102
Figura 69. Perfil 4, dromocrónica y modelo interpretación para dos capas.....	103
Figura 70. Perfil geológico y geofísico transversal al sitio al sitio de presa Belén.....	105
Figura 71. Modelo <i>Caterpillar</i> D10N con <i>ripper</i> .....	110
Figura 72. Gráfico que relaciona $V_p$ con la resistencia a la compresión simple (Tomado de González de Vallejo et al., 2002) .....	115
Figura 73. Gráfico de relación entre la $V_p$ y la resistencia a la compresión simple. (Modificado de González de Vallejo et al., 2002) .....	116
Figura 74. Gráficos de relación $V_p$ y $V_s$ para rocas ígneas y sedimentarias. ....	121
Figura 75. Gráfico de relación de los módulos $E_d$ , $E_s$ y la $V_p$ , para rocas ígneas y sedimentarias. ....	122
Figura 76. Gráficos de relación $E_d$ - $E_s$ para rocas ígneas y sedimentarias.....	123
Figura 77. Gráfica de relación $V_p$ y $V_s$ para rocas ígneas, asociadas a los sitios de Presa Electriona y Belén.....	124

Figura 78. Gráfico de relación de  $V_p$  con los módulos  $E_d$  y  $E_s$ , y los valores obtenidos en ambos sitio de Presa..... 125

Figura 79. Gráfico de relación entre los módulos  $E_d$  y  $E_s$ , en relación a los obtenidos mediante el valor  $V_p$  de cada sitio de Presa..... 125



## TABLA DE CONTENIDO DE CUADROS

Cuadro 1. Resumen de los estudios geofísico realizados para el P.H. Ventanas-Garita (ICE). .....	75
Cuadro 2. Resumen de la microsísmica realizadas en el túnel San Miguel para el P.H. Ventanas-Garita (ICE). .....	76
Cuadro 3. Resumen de la microsísmica realizada en las Galerías sobre la margen izquierda en el Sitio de Presa de P.H. Ventanas-Garita (ICE). .....	77
Cuadro 4. Características geofísicas de los diferentes sitios que contempla el P. H. Virilla realizados por Ávila, 1986c (ICE). .....	78
Cuadro 5. Resultados obtenidos del perfil de refracción sísmica transversal al túnel de conducción (ICE). .....	79
Cuadro 6. Resumen de la microsísmica realizada en una sección final del túnel de conducción para el P.H. Brasil (ICE). .....	80
Cuadro 7. Resumen de las capas geofísicas determinadas por Leandro (1999), sobre el deslizamiento ocurrido en la margen derecha del Río Virilla. ....	80
Cuadro 8. Resumen de las capas sísmicas observadas en ambos sitios de Presa .....	106
Cuadro 9. Resumen de las velocidades Vp según las litologías asociadas .....	107
Cuadro 10. Síntesis de valores de las velocidades (Vp) obtenidos en la recopilación bibliográfica y el presente estudio. ....	108
Cuadro 11. Rangos de ripabilidad de un Caterpillar D-9 en función de Vp del material (Tomado de Arladi, 2005) .....	111
Cuadro 12. Rangos de clasificación del índice Q para macizos rocosos (Gonzales de Vallejo. et al., 2002). .....	112
Cuadro 13. Relación entre el valor de Vp y el RQD asociado a la calidad del macizo (Tomado Arladi, 2005) .....	113
Cuadro 14. Clasificación del macizo rocoso con respecto al índice de calidad (Gonzales de V. et al., 2002). .....	114
Cuadro 15. Caracterización de las litologías a partir de los datos obtenidos de Vp. ....	118
Cuadro 16. Rango de valores Es para la caracterización del macizo rocoso (Ávila, 2004) .....	126

Cuadro 17. Resumen de los parámetros obtenidos a partir de la relación de los estudios realizados por el ICE..... 126

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Durante la década de 1880 Costa Rica sufrió un auge en la construcción de represas para la generación de energía eléctrica por parte de la empresa privada conformada por los ingenieros Luis Batres y Manuel Víctor Dengo denominada Compañía Eléctrica de Costa Rica, posteriormente en el período de 1890 a 1945 se inició un crecimiento de empresas privadas como *The Costa Rican Electric Light and Traction Company*, La Compañía Nacional de Electricidad y La Compañía Nacional Hidroeléctrica, S.A., dedicadas al negocio de electrificación nacional y por lo tanto la construcción de represas. En 1949, mediante el *Plan General de Electrificación de Costa Rica*, que se creó el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), como una institución estatal autónoma dedicada a promover el desarrollo de fuentes de energía eléctrica a nivel nacional, utilizando el recurso hidroeléctrico.

Dentro de las primeras plantas hidroeléctricas construidas a nivel nacional por la entonces empresa privada, se destacan las presas de Electriona y Belén ubicadas sobre el Río Virilla y la confluencia entre el Río Virilla y el Río Tiribí, respectivamente.

La Planta Hidroeléctrica Belén construida en 1911, se localiza en el Cantón de San Antonio de Belén frente al histórico paso denominado “Puente de Mulas”, cuya estructura en arco de piedra es considerado como uno de los más antiguos del país. Este sitio de Presa fue construido por la entonces Compañía Nacional de Electricidad y presentó una potencia inicial de 2500 kW. Actualmente este proyecto hidroeléctrico genera una potencia total instalada de 10500 kW (ICE, s.f.).

En 1922 se construyó la Planta Hidroeléctrica Electriona, por la entonces Compañía Nacional Hidroeléctrica S.A., con una potencia inicial de 2720 kW. A partir del año 1991 se realizaron varias mejoras por parte de la ya entonces establecida Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL); y actualmente dicho proyecto hidroeléctrico genera una potencia total instalada de 5720 kW (ICE, s.f.).

Después de muchas décadas de servicio, ambos cuerpos de presa presentan un deterioro estructural evidente, por lo que en el año 2009, la CNFL encargada del manejo y el mantenimiento de ambos sitios de presa en P.H. Belén y P.H. Electriona, adquiere una contratación directa de los servicios del ICE, para generar una serie de estudios técnicos que permitan valorar el estado estructural de ambas presas. A partir de los estudios previos realizados en conjunto con las investigaciones de campo, se genera en el presente estudio un modelo geológico y geofísico detallado del área comprendida por los sitios de Presa. La importancia del presente estudio radica en la caracterización el medio geológico circundante y los macizos rocosos sobre las que fundan los sitios de Presa, con el fin de generar recomendaciones y criterios técnicos, que permitan

orientar o confirmar las medidas técnicas apropiadas para la remodelación o reconstrucción de dichas presas.

## **1.1 JUSTIFICACIÓN**

El presente proyecto de graduación pretende aportar información útil con un enfoque geológico-geofísico que permita orientar a la toma de decisiones para el diseño y modernización que eventualmente se contemplaría en ambos sitios debido a su evidente deterioro estructural; la necesidad de caracterizar geológicamente y de forma detallada los sitios de presa Electriona y Belén, así como las condiciones mecánicas de los materiales sobre los que se cimentan las presas, son características imprescindibles para determinar tanto la ubicación como el diseño ingenieril que pretende implementar la CNFL en ambas presas.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Generar un modelo geológico y geofísico detallado del área en la que se localizan los sitios de Presa Electriona y Belén, mediante el uso del método de refracción sísmica y la información geológica, obtenida a través de levantamientos de campo y recopilación bibliográfica.

### **1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1. Realizar un cartografiado geológico a detalle en cada sitio de presa comprendiendo el área que comunica a ambos.
2. Realizar recopilación y análisis de los registros de pozos dentro y cercanos al área de estudio, para definir la estratigrafía de la zona y generar un modelo geológico detallado.
3. Realizar perfiles geofísicos de refracción sísmica para determinar las velocidades de onda P ( $V_p$ ) asociadas a cada medio refractor y su relación con la geología de la zona.
4. Calibrar el modelo geofísico obtenido mediante el modelo geológico detallado de ambos sitios de presa.
5. Definir los parámetros geotécnicos obtenidos a partir de los valores de onda P ( $V_p$ ) de cada sitio de Presa, con el fin de establecer la calidad del macizo sobre el que se funda las Presas.

### 1.3 UBICACIÓN

Los sitios de presa se localizan en la hoja Abra 1:50.000, dentro de los cuadrantes de coordenadas con proyección Lambert Costa Rica Norte, 216,000- 219,000 de latitud N y 515,000-520,000 longitud E. La Figura 1, muestra la localización de ambas presas y del área de estudio.

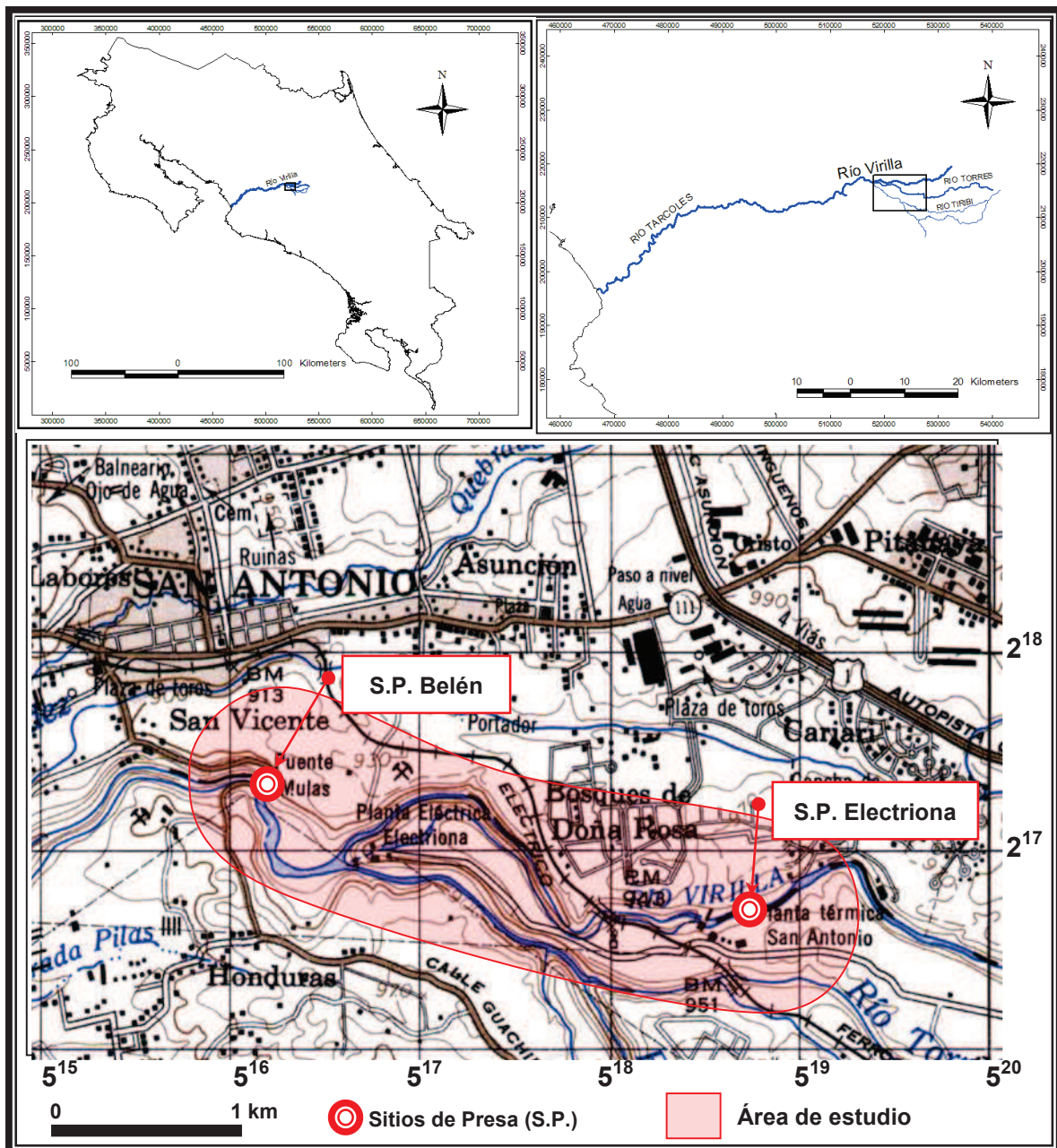


Figura 1. Ubicación del área de estudio



## 1.4 METODOLOGÍA

1. Recopilación bibliográfica de investigaciones geológicas, geofísicas y de registros de pozos realizadas en el área, para generar un modelo conceptual inicial del sitio de estudio.
2. Levantamiento geológico a largo de las márgenes del Río Virilla y en sitios puntuales como tajos circundantes, para confirmar el modelo inicial y definir los contactos geológicos.
3. Perfiles geofísicos de refracción sísmica en cada sitio de presa, transversales y longitudinales sobre cada margen, para determinar los valores de velocidades  $V_p$  y espesores de refractores superficiales, mediante el uso del equipo de sísmica Strata Visor NX 24 canales de la casa Geometrics.
4. Procesamiento de trazas sísmicas y análisis de velocidades a lo largo de perfiles de sísmica de refracción, para generar el modelo geofísico de los sitios, mediante el uso del software SeisImager 2D de OYO Corp.
5. Análisis de registros litológicos de pozos localizados dentro del área para determinar las relaciones estratigráficas de cada sitio.
6. Determinación de parámetros geotécnicos definidos a partir de los valores de  $V_p$ , para definir la calidad de los macizos sobre los que se fundan las presas.

## **CAPÍTULO 2. MARCO TEORICO**

Originalmente los métodos geofísicos sísmicos fueron desarrollados con un enfoque económico a partir del auge en las exploraciones de hidrocarburos y yacimientos minerales desde los años 20' (Fuster & Strong, 1961). En la actualidad la sísmica es ampliamente utilizada para investigar parámetros y características del terreno, que permitan determinar la geometría y las particularidades geomecánicas relacionadas a estructuras geológicas, tanto en profundidad como de forma lateral mediante metodologías de análisis de datos.

### **2.1 PROSPECCIÓN SÍSMICA**

Los métodos sísmicos conocido como geofísica de reflexión y refracción sísmica, suministran información acerca de las diferencias entre las propiedades elásticas de las rocas (Fuster & Strong, 1961).

Ambos métodos miden el tiempo de propagación de las ondas elásticas, transcurrido entre el sitio en el que se generan las ondas sísmicas y la llegada de estas a los diferentes puntos de observación, para lo cual se disponen sensores en línea recta a distancias conocidas, formando lo que se conoce como tendido sísmico o línea de refracción (Rosales, 2000).

Las ondas sísmicas se generan a partir de un punto de disparo provocado por una fuente detonante, mediante explosivos o de forma mecánica como mazos, vibradores, entre otros. Dichas vibraciones son detectadas por los sensores del tendido, denominados geófonos (Astier, 1975). Los registros de cada sensor o geófono tienen información de los movimientos del terreno en función del tiempo y son conocidos como sismogramas (Rosales, 2000).

En la refracción sísmica estos sismogramas son analizados para obtener los tiempos de llegada de las primeras ondas a cada sensor desde el punto de disparo, y en la reflexión para obtener información de las ondas que son reflejadas en las diferentes interfaces del subsuelo. Los límites entre capas de distintas velocidades generalmente coinciden con los límites geológicos, por ese motivo las interfaces de velocidades entre varios medios, son correlacionables a paquetes geológicos de similares condiciones geomecánicas (Rosales, 2000).

### 2.1.1 PROPAGACIÓN DE LAS ONDAS SÍSMICAS

Al iniciarse una fuente generadora de una onda sísmica en un medio, se genera una emisión de ondas de deformación u ondas elásticas, entre las que se encuentran según, Astier (1975):

- A. Ondas longitudinales ( $V_L$ ) o de compresión y dilatación ( $V_p$ ),** son ondas en las que la dirección de las partículas son las mismas que la propagación de la onda, similar a las ondas sonoras (Figura 2). La velocidad de las ondas longitudinales ( $V_L$ ) está relacionada con las constantes elásticas y la densidad de la siguiente forma:

$$V_L = \frac{\sqrt{k+4/3\mu}}{\rho} = \frac{\sqrt{E}}{\rho} \left(1 + \frac{2\nu^2}{1-\nu-2}\right) = \frac{\sqrt{E}}{\rho} \left[\frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}\right] \quad (\text{Ecu. 1})$$

Donde:

$\rho$  = densidad

E= Módulo Elástico Longitudinal o Young

k = Módulo de Compresibilidad o Bulk (B)

$\mu$  = Módulo de Rigidez o cizalle (G)

$\nu$  = Coeficiente de Poisson

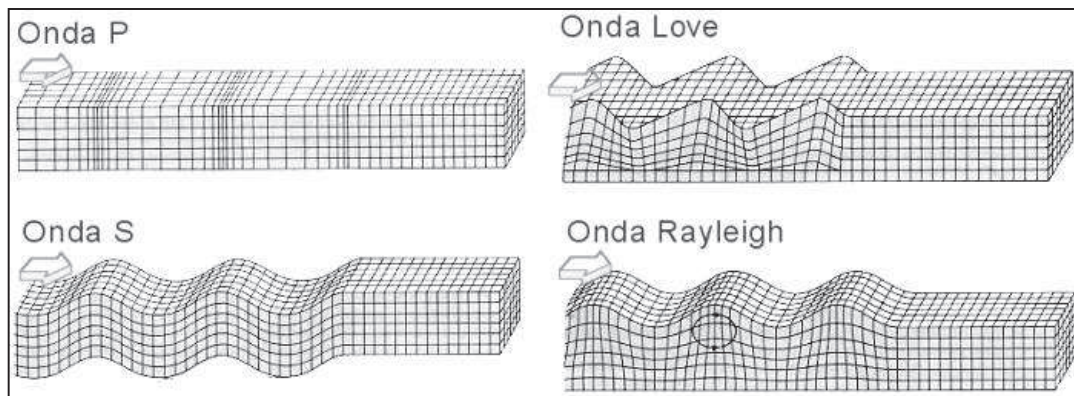


Figura 2. Tipos de ondas que se generan a partir de una fuente sísmica. (Tomado de Bolt, 1976)

Las ondas longitudinales u ondas primarias (P), son las que se utilizan en prospección sísmica, pues dependen de la elasticidad de los materiales a través de los que se propaga. Las velocidades de las ondas dependen de las constantes elásticas de los materiales (Fuster & Strong, 1961).

**B. Ondas transversales ( $V_T$ ) o de cizalla ( $V_s$ ):** son aquellas en las que los movimientos de las partículas se produce perpendicular a la dirección de propagación (Parasnis, 1970). A estas ondas también se les denominan ondas secundarias o S (Figura 2), y su velocidad de propagación en relación con las constantes elástica corresponden según Cantos (1987) a:

$$V_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}} \quad (\text{Ecu. 2})$$

Donde:

$\rho$  = densidad

E= Módulo Elástico Longitudinal o Young

k = Módulo de Compresibilidad o Bulk (B)

$\mu$  = Módulo de Rigidez o cizalle (G)

$\nu$  = Coeficiente de Poisson

La onda de cizalla (S), tiene velocidad de propagación poco mayor que la mitad de la correspondiente a la onda P (ecuación 3), para la mayoría de las rocas. Ambas velocidades pueden ser expresadas en constantes elásticas como se observan en las ecuaciones 1 y 2, por lo que el cociente de  $V_L/V_T$ , puede observarse que depende únicamente del Coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) según la ecuación 3. (Griffiths & King, 1972)

$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{\sqrt{1-\nu}}{\sqrt{0,5-\nu}}$$

Si  $\nu = 0,25$  entonces  $V_P/V_S = 1,73$

(Ecu. 3)

**C. Ondas Rayleigh:** corresponden a ondas superficiales que son más lentas que las ondas P y S, la vibración de las partículas se efectúa en plano perpendicular a la superficie y a la dirección de propagación (Figura 2), siendo su movimiento elíptico y retrogrado (Cantos, 1987). La velocidad de las ondas Rayleigh es aproximadamente  $0,9 V_S$  (Parasnis, 1970).

**D. Ondas Love:** son ondas superficiales que se producen en condiciones en las que la velocidad de la capa superior del medio es menor que en el sustrato (Parasnis, 1970). En este tipo de ondas el desplazamiento de las partículas es horizontal y perpendicular a la dirección de propagación (Cantos, 1987). Las ondas Love son esencialmente ondas de

cizalla (Figura 2), para longitudes de onda corta es igual a  $V_S$  del medio superior y para longitudes de ondas largas es igual a  $V_S$  del medio inferior (Parasnis, 1970).

### 2.1.2 CONSTANTES ELÁSTICAS

Las propiedades elásticas de los cuerpos vienen definidas por los módulos elásticos, que son constantes que especifican la relación entre el esfuerzo y la deformación (Parasnis, 1970).

#### A. Tensión, Esfuerzo y Deformación

Los esfuerzos se miden como fuerza por unidad de área, y se pueden clasificar según la dirección en que actúen sobre la superficie del objeto al cual se le aplique dicho esfuerzo, por lo que cuando actúan perpendicular a la superficie corresponde a esfuerzos de compresión o de tensión, mientras que cuando la dirección del esfuerzo es paralela a la superficie, el esfuerzo es de cizalle (Figura 3). En un sistema de esfuerzos de compresión cambia el volumen pero no la forma del cuerpo, mientras que en un sistema de esfuerzos de cizalle cambia la forma y no el volumen (Parasnis, 1970).

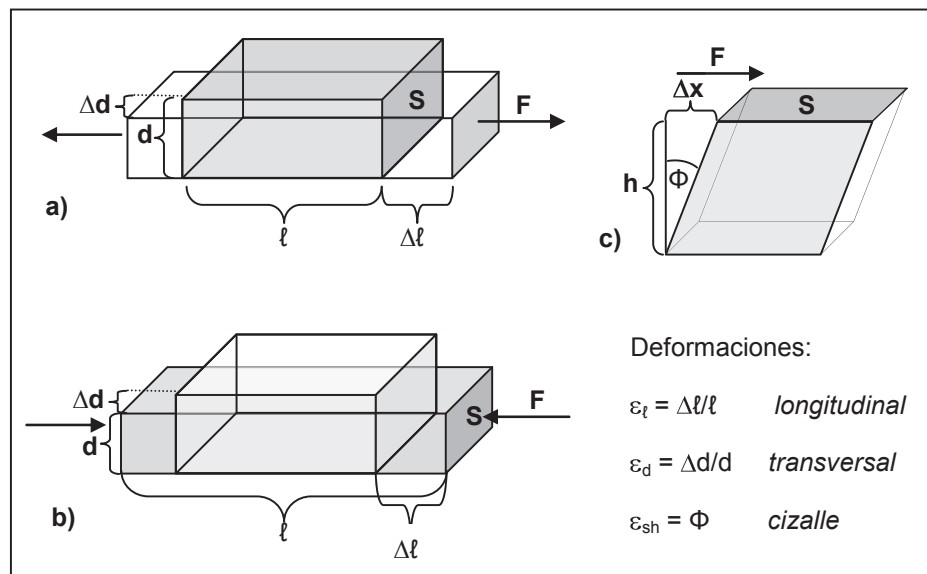


Figura 3. Esquemas de la relación entre la dirección de los esfuerzos y las deformaciones dadas. a) Esfuerzos tensionales, b) Esfuerzos compresionales y c) Esfuerzos de cizalle. (Modificado de Fuster & Strong, 1961)



El coeficiente de alargamiento  $\varepsilon_l$ , corresponde a la relación entre un diferencial de alargamiento ( $\Delta l$ ) producido por un esfuerzo sobre un cuerpo de longitud inicial  $l$ , Figura 3. (Cantos, 1987)

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l}$$

(Ecu. 4)

Por lo que el coeficiente de deformación transversal  $\varepsilon_d$  se define a su vez como la relación entre el diferencial de ancho o espesor ( $\Delta d$ ) producido por un esfuerzo sobre un cuerpo de ancho inicial  $d$ , y se expresa con la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d}$$

(Ecu. 5)

Mientras que la deformación de cizallamiento se determina como el ángulo de deformación ( $\Phi$ ) producido por un esfuerzo cortante, en el que no hay cambio de volumen, por el contrario, si se deforman (Figura 3), se define como:

$$\varepsilon_{sh} = \Phi$$

Siendo el ángulo de desplazamiento pequeño se puede definir:

$$\Phi \approx \tan \Phi = \frac{\Delta x}{h}$$

(Ecu. 6)

## **B. Módulo de Young o módulo elástico longitudinal (E)**

Permite caracterizar el comportamiento de un material cuando se le aplica un esfuerzo de tensión o de compresión en el que se origina una deformación unitaria del material. (Martínez & Uzuaga, 1997).

Se determina mediante la ecuación:

$$E = \frac{\text{Esfuerzo por unidad de \u00e1rea}}{\text{Cambio de longitud}} = \frac{F/S}{\Delta l/l}$$

(Ecu. 7)

Donde:

F = esfuerzo aplicado

S = unidad de \u00e1rea sobre la que se aplica el esfuerzo

### C. Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )

Determina la relaci\u00f3n entre dos deformaciones unitarias, la deformaci\u00f3n transversal y la longitudinal. En el caso de materiales el\u00e1sticos est\u00e1 compuesto entre los siguientes valores  $0 < \nu < 0,5$  (Cantos, 1987)

El coeficiente est\u00e1 representado por la siguiente ecuaci\u00f3n:

$$\nu = \frac{\epsilon_d}{\epsilon_l} = \frac{\Delta d/d}{\Delta l/l}$$

(Ecu. 8)

### D. M\u00f3dulo de rigidez o de cizalla ( $\mu$ )

Este m\u00f3dulo determina la resistencia de los materiales a cambiar de forma sin modificar su volumen, por lo que se mide determinando el desplazamiento relativo de planos paralelos o por el \u00e1ngulo ( $\Phi$ ) en el que girar\u00eda un plano normal a la fuerza (Cantos, 1987)

Est\u00e1 representado por la siguiente ecuaci\u00f3n:

$$\mu = \frac{F/S}{\Phi}$$

(Ecu. 9)

### E. M\u00f3dulo volum\u00e9trico o de Bulk ( $k$ )

Determina la resistencia de los materiales al cambio de volumen, sin que var\u00ede su forma, y se expresa mediante la siguiente ecuaci\u00f3n (Cantos, 1987).

$$k = \frac{P}{\Delta V/V}$$

(Ecu. 10)

Donde:

P = presión

$\Delta V$  = diferencial de volumen

V = volumen del cuerpo

### 2.1.3 TRAYECTORIA DE LOS RAYOS SÍSMICOS

La superficie de onda se define por todos los puntos del terreno que vibran simultáneamente generada a partir de una fuente sísmica. En un medio homogéneo e isótropo estas superficies son concéntricas a la fuente sísmica, cuyos radios se denominan rayos sísmicos (Astier, 1975).

En el contacto entre dos medios con velocidades distintas  $V_1$  y  $V_2$ , los rayos sísmicos se refractan siguiendo las reglas de los rayos de luz, relacionadas a la ley de Snell (Astier, 1975).

Las ondas generadas por un rayo por una fuente sísmica pueden llegar a los receptores según cuatro trayectorias (Figura 4) (Astier, 1975):

- A. Una trayectoria directa (rayo directo) a lo largo de la superficie del suelo.
- B. Trayectorias reflejadas (rayos reflejados) en el contacto de ambos medios.
- C. Trayectorias con refracción total, las cuales continúan a lo largo del contacto de un medio con otro.
- D. Trayectorias difractadas (rayos difractados) en el contacto de la interface entre ambos medios.

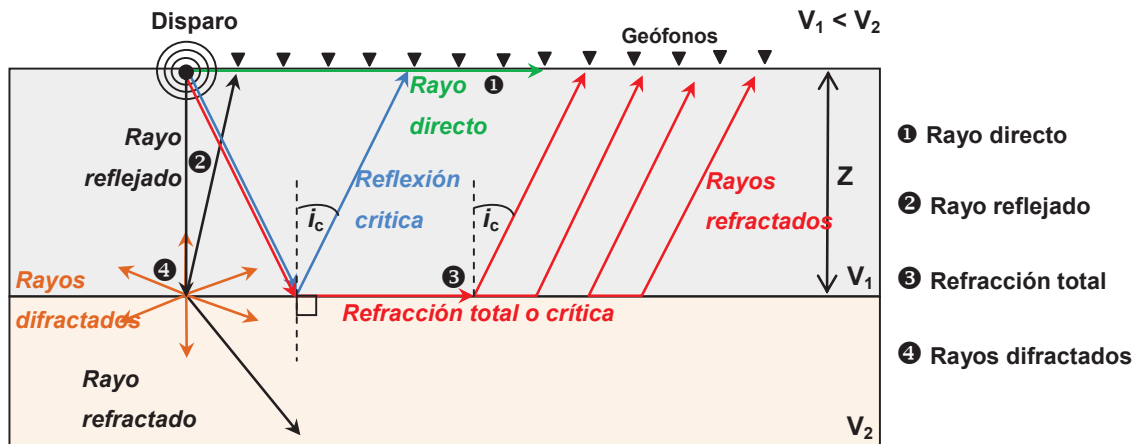


Figura 4. Diferentes trayectorias de las ondas generadas a partir de una misma fuente sísmica (Modificado de Astier, 1975).

#### 2.1.4 CURVAS DISTANCIA-TIEMPO

Las curvas distancia-tiempo (D-T) correspondientes a trayectorias refractadas y reflejadas se llaman respectivamente dromocrónica e indicatriz (Astier, 1975).

Estas curvas D-T, se generan a partir de un arreglo o tendido sísmico a lo largo del cual se colocan los geófonos (canales sísmicos) geoméricamente separados entre sí. Por lo general los geófonos se disponen en grupos de 12, 24 y 48 unidades; los mismos se conectan por medio de un cable (cable multicanal) al equipo. El impulso sísmico o fuente sísmica (explosivo) se dispone al principio y final del arreglo (orillas). Por cada fuente sísmica detonada se registra un dispositivo sísmico. Cuando las fuentes sísmicas se sitúan en los extremos internos en tendido se conoce como tiro sobre-extremos. Una fuente ubicada a una distancia discreta del final del arreglo se llama tiro fuera de línea (*off-end*). Cuando la fuente es ubicada en un punto a lo largo del arreglo (excepto en uno de sus extremos) se conoce con el nombre de tiro en-arreglo (*split-spread*), normalmente es a la mitad, a un cuarto o a tres cuartos de la distancia total del tendido sísmico (Peralta, 2007).

Los tiros realizados en los extremos del arreglo en direcciones contrarias se denominan tiros directos e inversos (Figura 5). La ubicación de los tiros es función del espesor de la cobertura superficial que sobreyace a la roca considerada como basamento y a la resolución lateral deseada (Peralta, 2007).

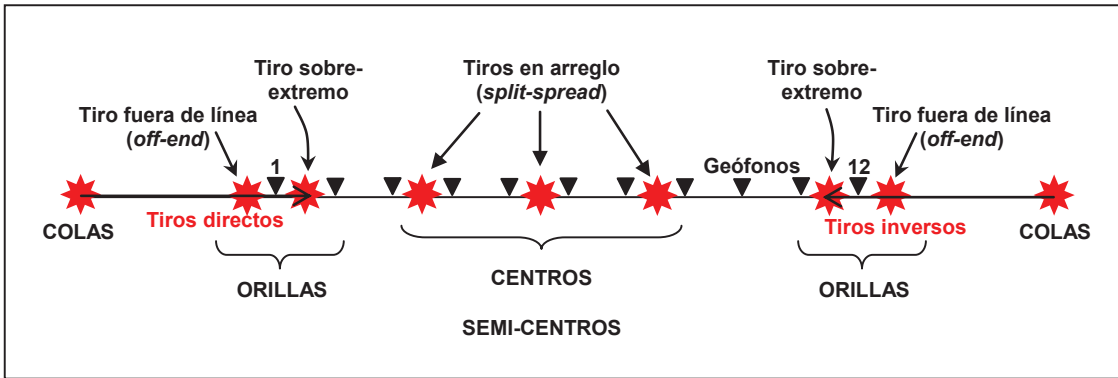


Figura 5. Arreglo del tendido sísmico (Modificado de Peralta, 2007)

Las curvas tiempo-distancia conocidas como dromocrónicas, se construyen con los tiempos de llegada de las ondas P, en cada sensor, y la distancia de cada sensor al punto de disparo (Rosales, 2000). La Figura 6, esquematiza los diferentes conceptos que componen la curva de D-T, para un dispositivo de refracción sísmica.

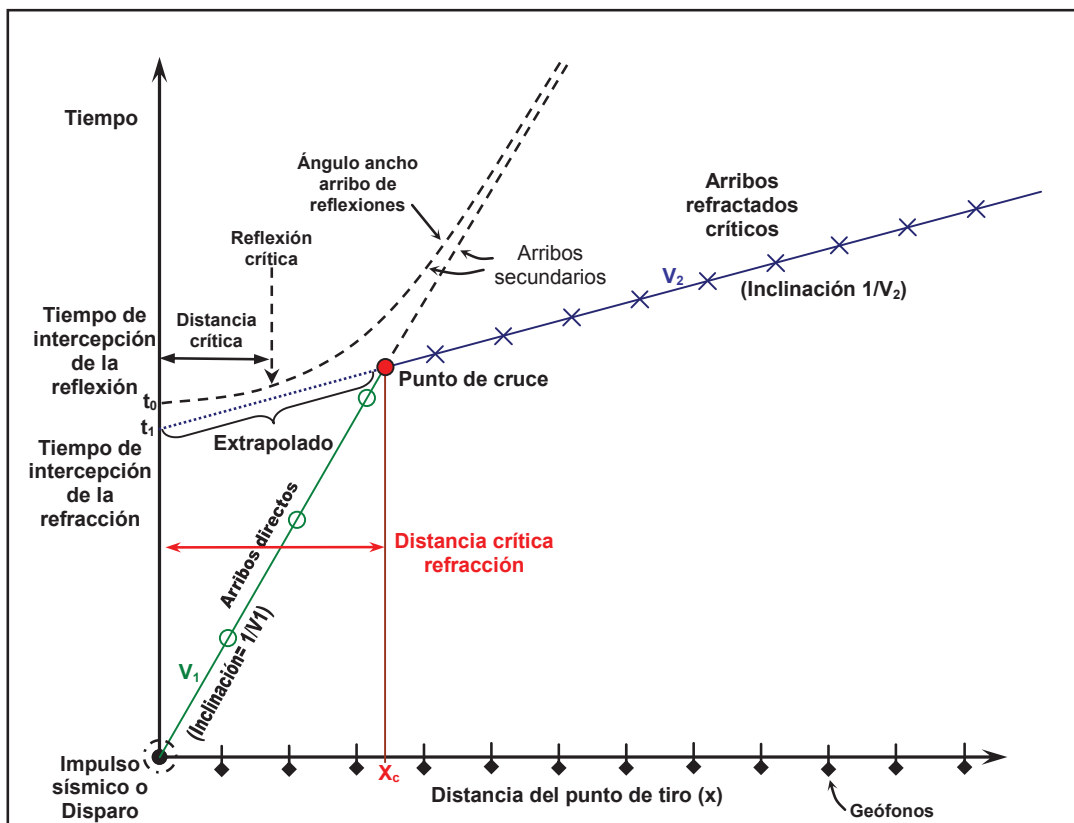


Figura 6. Muestra los parámetros que constituyen una curva D-T (Modificado de Peralta, 2007)

Según Peralta (2007), la distancia crítica ( $X_c$ ), representa la distancia o punto donde el frente de onda refractado con ángulo crítico se convierte en la primera llegada, debido a que llega primero que la onda directa. Esto depende de las velocidades de las capas, así como del espesor y profundidad de las mismas; la distancia crítica puede ser menor o mayor que la longitud del tendido sísmico.

La ecuación 11 relaciona las velocidades  $V_1$  y  $V_2$ , de cada capa, la distancia crítica  $X_c$  con la profundidad, en este caso de la primera superficie refractora:

$$Z_1 = (X_c/2) * [(V_2 - V_1)/(V_2 + V_1)]^{1/2} \quad (\text{Ecu. 11})$$

Donde:

$Z_1$ = es la profundidad de la superficie refractora o espesor de la primera capa,

$X_c$ = es la distancia crítica

$V_1$  y  $V_2$ = las velocidades de cada capa respectivamente (siendo  $V_1 < V_2$ ).

Redpath (1973), planteó una forma de definir aproximadamente la longitud de los tendidos, a través de una relación entre la distancia crítica y la profundidad de la interfase refractora ( $X_c/Z_1$ ) y en función del contraste de velocidad ( $V_2/V_1$ ). Peralta (2007) basándose en el gráfico de Redpath, determina que asumiendo un  $V_1$  de 1,5 km/s y una  $V_2$  de 3 km/s, que la distancia crítica será 3,4 veces la profundidad (Figura 7), asumiendo que el objetivo de investigación está aproximadamente a 10 m de profundidad, la distancia crítica será aproximadamente 35 m; y el tendido tiene que ser mayor que esta distancia. Por lo que a profundidades mayores de investigación ( $>Z_1$ ) se debe cumplir necesariamente que la longitud de la línea sísmica sea casi tres veces la distancia crítica.

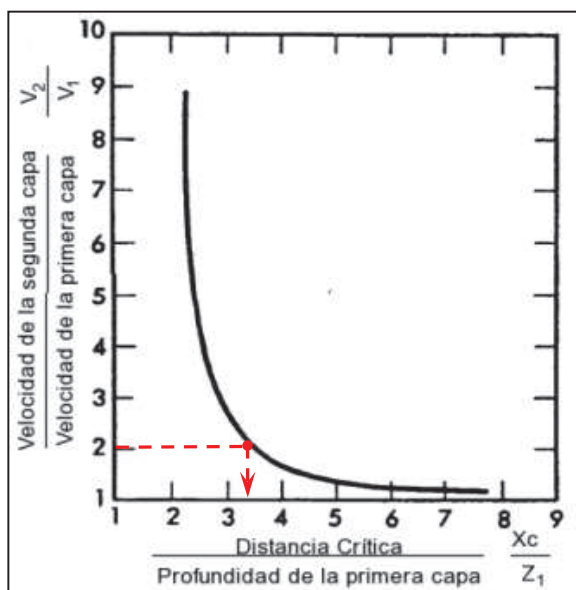


Figura 7. Gráfico de relación entre la distancia crítica ( $X_c$ ) y la profundidad ( $Z_1$ ), con el contraste de velocidades ( $V_2/V_1$ ) (Tomado de Peralta, 2007).

## 2.2 REFRACCIÓN SÍSMICA

La refracción sísmica tiene por finalidad medir el tiempo de propagación de las ondas elásticas generadas por una fuente sísmica.

La refracción sísmica parte de varios supuestos a partir de los cuales se aplica el método, los cuales son: (Astier, 1975)

- A. Los medios a través de los cuales se transmiten las ondas elásticas son homogéneos e isótropos.
- B. Los diferentes contactos o interfaces entre los medios geológicos, admiten un único plano perpendicular que pasa por el dispositivo sísmico y sólo se considerarán las trayectorias contenidas en ese plano.
- C. La velocidad aumenta con la profundidad de un medio a otro.

### 2.2.1 PRINCIPIOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA

#### A. Ley de Snell

Estipula que en los rayos reflejados y refractados están en el plano definido por el rayo incidente y la normal con el contacto del punto de incidencia (Figura 8),

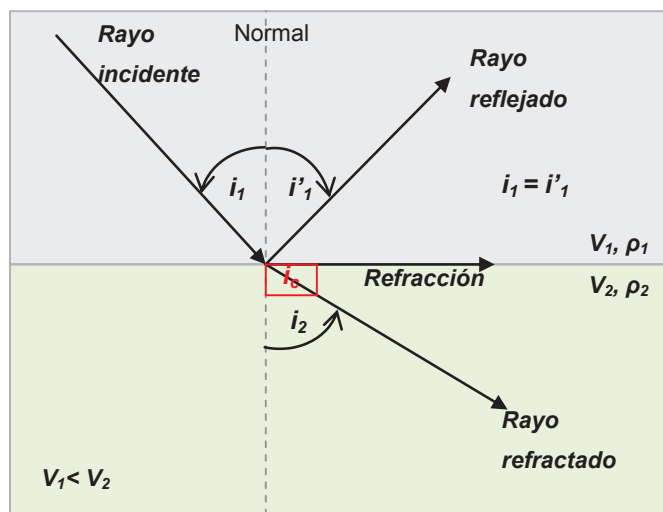


Figura 8. Representación del principio de Snell (Modificado de Astier, 1975).

Además plantea que el ángulo de reflexión es igual al de incidencia, y el ángulo de refracción ( $i_2$ ) y el de incidencia ( $i_1$ ) se pueden representar mediante la relación: (Astier, 1975)

$$\frac{\text{Sen } i_1}{\text{Sen } i_2} = \frac{V_1}{V_2}$$

(Ecu. 12)

La refracción total sucede cuando el ángulo de incidencia  $i_2 = 90^\circ$ , cuando los rayos sísmicos pasan de un medio de menor velocidad ( $V_1$ ) a un medio inferior de mayor velocidad ( $V_2$ ), por lo que el rayo se refracta en el contacto entre ambos medios. El ángulo de incidencia se denomina también ángulo de incidencia crítica ( $i_c$ ), y está definido por la relación: (Astier, 1975)

$$\text{Sen } i_c = \frac{V_1}{V_2}$$

(Ecu. 13)

## B. Principio de Huygens

Establece que cada punto alcanzado por el frente de ondas actúa como un nuevo frente de ondas que se extiende en todas direcciones, si el medio es homogéneo el frente de ondas es esférico en un momento  $t$  cualquiera, posteriormente un tiempo  $t + \Delta t$  (Figura 9). Cada uno de los puntos de los frentes de onda, habrá generado nuevos frentes de ondas esféricos de  $V\Delta t$  ( $r$ ). Si  $V$  es la velocidad del medio, el nuevo frente de ondas, en el instante  $t + \Delta t$ , será la envolvente de los demás frentes de ondas esféricas menores (Cantos, 1987).

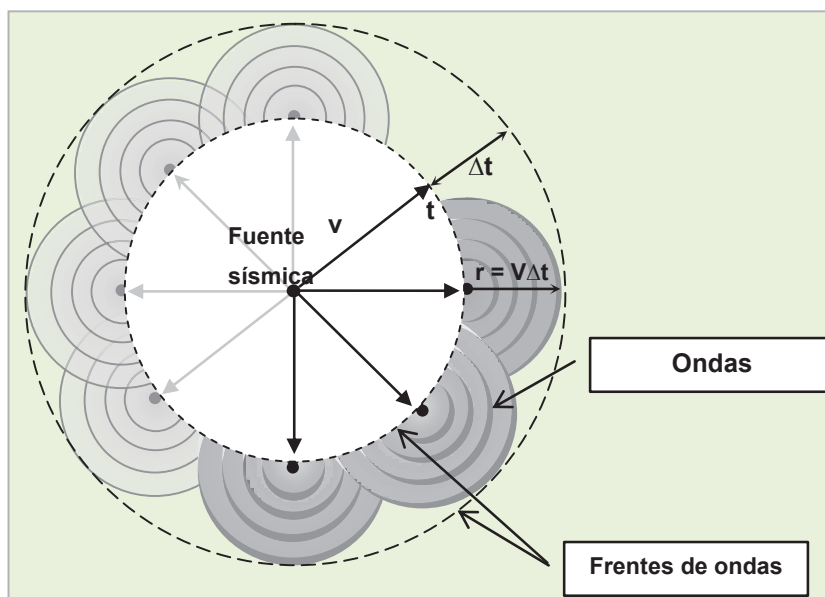


Figura 9. Esquema del principio de Huygens



### C. Principio de Fermat

Este principio estipula que los rayos generados a partir de los frentes de ondas recorren la trayectoria de menor tiempo que se genere de un punto a otro (Figura 10). En un medio homogéneo los rayos sísmicos corresponden a líneas rectas, mientras que en medios estratificados los rayos se comportan como curvas de tiempo mínimo (Cantos, 1987).

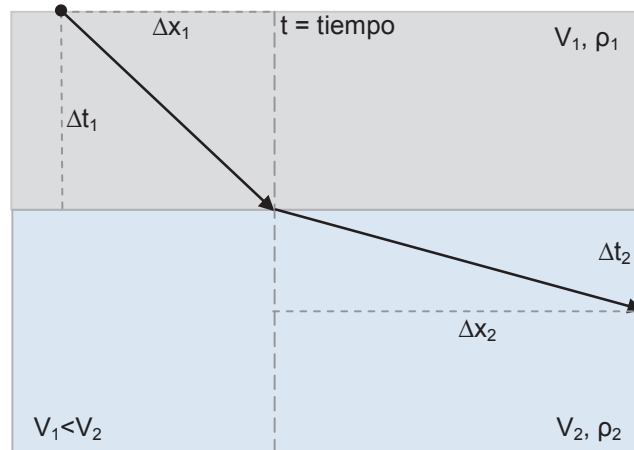


Figura 10. Esquema de la ley de Fermat (Modificado Pérez, 2006)

### D. Ley de las velocidades aparentes

Esta ley establece que la velocidad con la que aparenta transmitirse una onda en un cierto punto de la superficie del suelo, es igual al cociente entre la velocidad superficial y el seno del ángulo emergente, ambos tomados a partir de este punto (Cantos, 1987).

## 2.3 FENOMENOS ASOCIADOS A LA PROPAGACIÓN DE LA ONDA SISMICA

La disminución de la energía sísmica con la distancia, produce un efecto de amortiguamiento, debido a los fenómenos mencionados a continuación:

### A. Difracción- Radiación

Se produce cuando el frente de ondas sísmicas se encuentra con una irregularidad (Figura 11), de tal forma que desvía la trayectoria de los rayos. Algunos de estas irregularidades se asocian a cambios bruscos en la inclinación de los estratos y zonas de fallas. (Cantos, 1987)

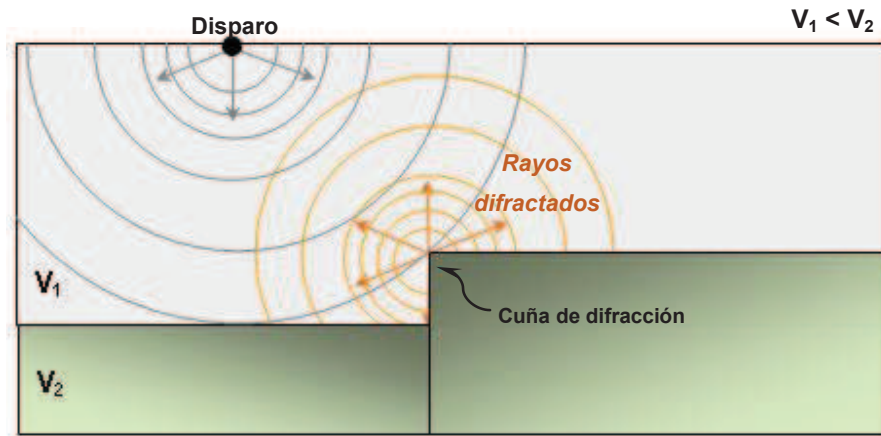


Figura 11. Difracción producida por una irregularidad en los contactos de los reflectores (Fuster & Strong, 1961).

### B. Dispersión

Corresponde a la variación de la onda debido al cambio de la frecuencia, en refracción no hay evidencia de una dispersión apreciable, excepto cuando hay una fuente generadora de ondas cerca de la fuente sísmica (Cantos, 1987).

### C. Scattering

Es la generación de pequeñas ondas sísmicas que se propagan en todas direcciones, producto del choque del frente de ondas con partículas libres u objetos comparados con su longitud de onda (Figura 12). Este fenómeno es mayor para frecuencias altas, y corresponde en parte a lo que se considera "ruido" dentro de un registro sísmico, debido a que genera una distribución de energía al azar sobre la superficie (Cantos, 1987).

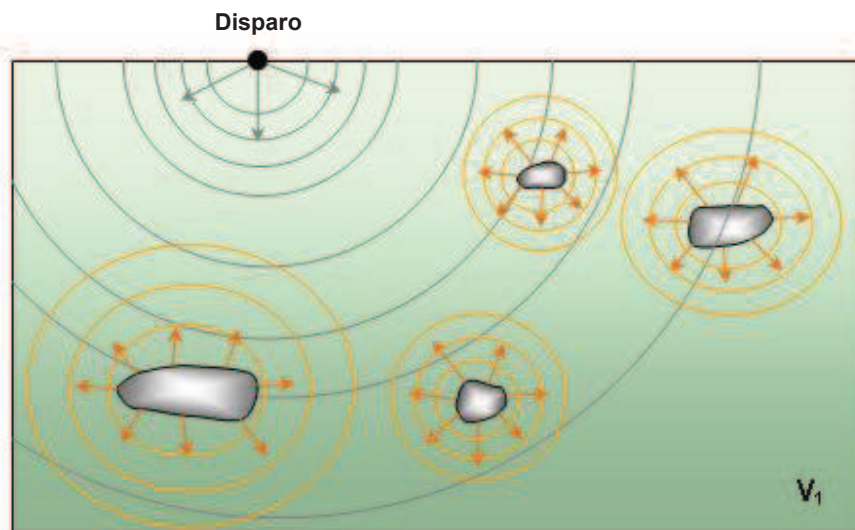


Figura 12. Scattering o ruido producido por partículas dentro del medio.

### 2.3.1 PRINCIPIOS GENERALES DE INTERPRETACIÓN EN REFRACCIÓN SÍSMICA

#### A. Principios de reciprocidad

Se basa en el principio de Fermat o del recorrido del tiempo mínimo y establece que el tiempo de propagación de una onda sísmica, de un punto a otro y su viceversa tiene que ser iguales y realizados en el menor tiempo posible.

En la Figura 13, se muestra la dromocrónica con sus correspondientes curvas de conjugación, la proyección de las mismas hacia el eje del tiempo deben ser interceptadas en un mismo valor (Rosales, 2000).

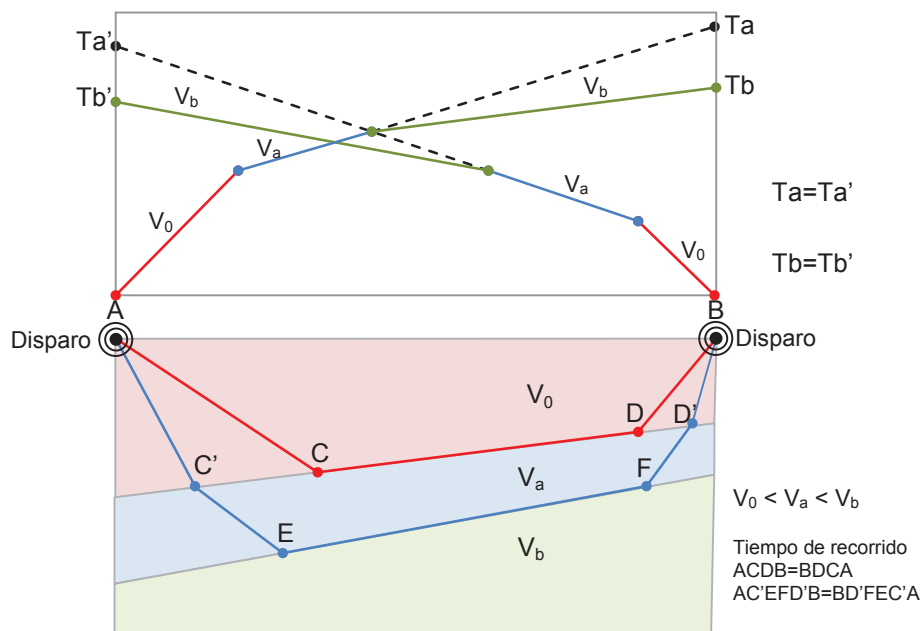


Figura 13. Esquema del principio de reciprocidad (Modificado de Cantos, 1987)

#### B. Principios de tiempos de intercepto en el origen

Este principio establece que la prolongación de las pendiente de dos pares conjugados en una dromocrónica, se proyectan hasta cortar el eje del tiempo en el tiro central (Figura 14), los tiempos interceptados en el origen deben ser iguales (Cantos, 1987).

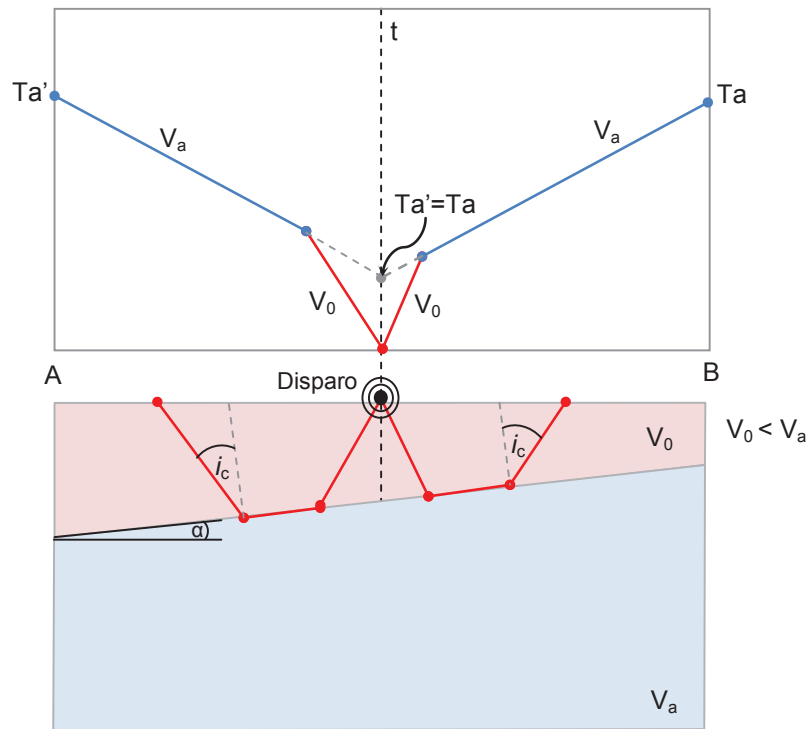


Figura 14. Esquema del principio de tiempos de intercepto (Modificado de Cantos, 1987)

### C. Principio de paralelismo

Este principio permite deducir las dromocrónicas (abc) relacionadas con puntos de disparo intermedios entre los puntos de disparo comprendidas entre los diferentes extremos del tendido (ABC y A'B'C'); o bien deducir una dromocrónica con un punto de disparo alejados de dos puntos de disparos complementados. Este principio funciona para refractores horizontales o planos inclinados, ya que en el caso de refractores cóncavos, las ondas viajarán por la superficie externa del refractor y para distancias largas viajarán por la superficie interna del refractor, siguiendo el principio de Fermat (Rosales, 2000).

Según la Figura 15, se puede obtener la dromocrona abc, a partir de las otras dos dromocrónicas conjugadas ABC y A'B'C'.

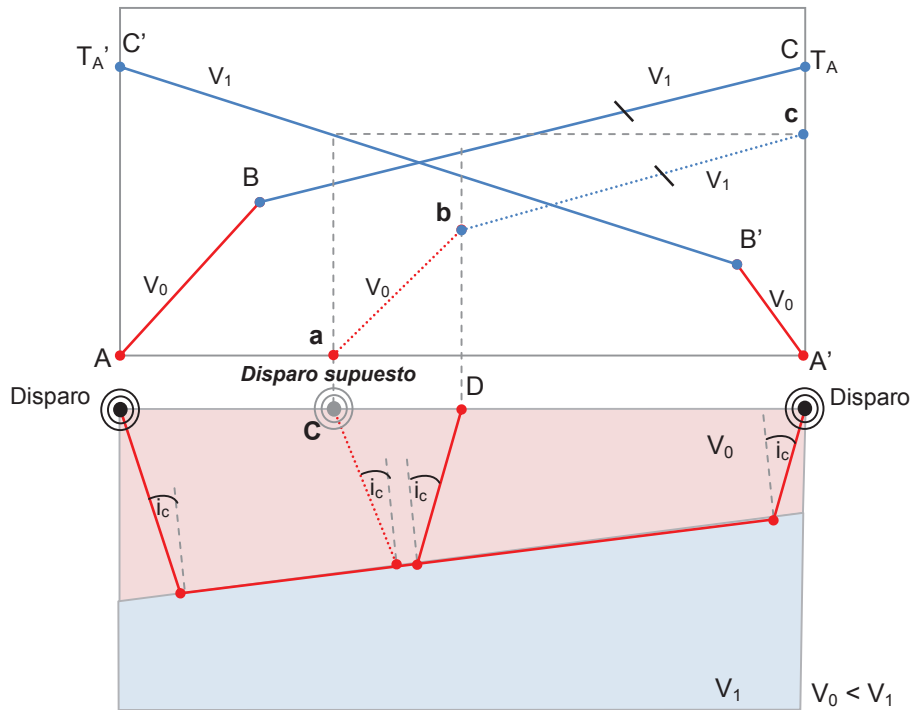


Figura 15. Esquema del principio de paralelismo (Modificado de Cantos, 1987).

## 2.4 PRINCIPALES METODOLOGÍAS DE INTERPRETACIÓN DE DATOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA

### A. Tiempos de intercepto (Capas Paralelas)

Este método es utilizado para refractores planos o múltiples refractores planos. Las ondas originadas por el punto de disparo una vez refractadas en los contactos de los medios, determinan los tiempos de llegada de las ondas en los tiempos de llegada en superficie. Estos tiempos se incrementan con la distancia y la profundidad de penetración. En la curva tiempo-distancia, el método utiliza las pendientes de las dromocrónicas para calcular las velocidades de los refractores y los tiempos de intercepto de las dromocrónicas para calcular las profundidades (Rosales, 2000).

## **B. Velocidades aparentes**

Este método se utiliza para refractores inclinados y paralelos, utiliza los tiempos de intercepto en el origen de un tendido directo y reverso, basándose en las velocidades aparentes, en las que hay que suponer que la velocidad de cada uno de los estratos es constantes, al igual que la pendiente del refractor (Rosales, 2000).

## **C. Frentes de ondas (*Ray tracing*)**

Este método se utiliza para refractores ondulados, y se basa en el principio de Huygens, este método de carácter gráfico utiliza el trazado de los frentes de ondas, provenientes de puntos de disparo conjugados, de manera que se pueda definir un punto intermedio en el refractor, de forma que la suma de los tiempos de viaje entre los puntos de disparo y los puntos de emergencia de las ondas refractadas desde el punto intermedio, sea igual al tiempo total de viaje (Rosales, 2000; Cantos, 1987).

## **D. Tiempos de retraso (*Delay times*) o Método de Gardner**

Este método se utiliza en zonas de relieve poco pronunciado. Determinando el tiempo de retardo como la diferencia entre el tiempo que requiere la onda para recorrer la trayectoria entre un punto de disparo y el refractor, su ángulo crítico dentro del medio superior y su propia velocidad  $V_1$ , en contraste con el tiempo requerido por la misma onda para recorrer la misma trayectoria con la velocidad del refractor  $V_2$  (Rosales, 2000; Cantos, 1987).

## **E. Más-menos o Método de Hagedoorn**

Este método permite la visualización e interpretación a partir de los frentes de ondas y por lo tanto, de los primeros arribos del registro sísmico, de una manera fácil y rápida.

Se utiliza en refractores irregulares, cuyas pendientes no sobrepasen los  $10^\circ$ , el componente "más" del método permite determinar la profundidad del refractor por debajo de cada punto receptor (geófono) de forma perpendicular. El componente "menos" se utiliza para determinar la velocidad del medio.

## F. Mínimos cuadrados (*Time Term*)

Este método utiliza el ajuste lineal por mínimos cuadrados, para determinar una discreta solución de las capas obtenidas con los datos. Los parámetros a partir de los cuales se basa el método se ejemplifican en la Figura 16.

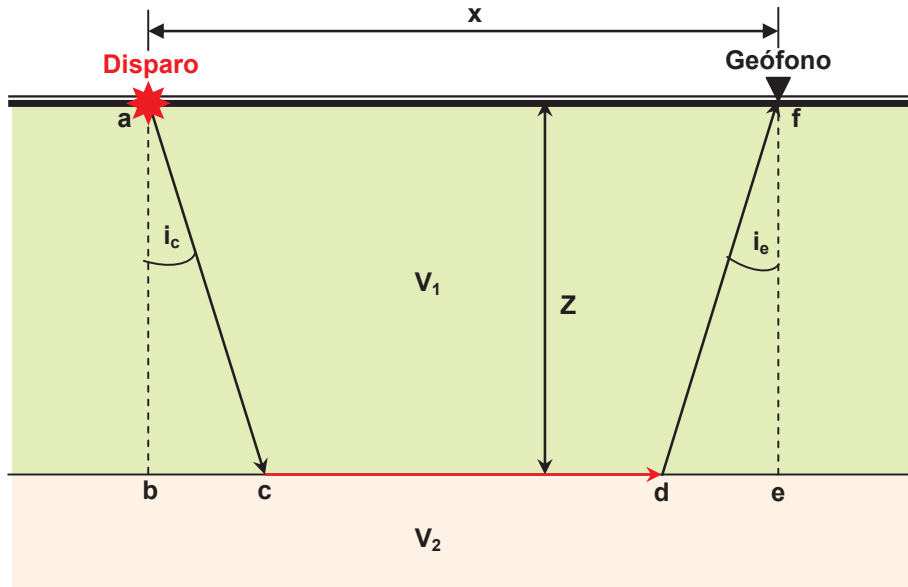


Figura 16. Esquema base a partir del cual se obtienen los parámetros para el método de Mínimos Cuadrados.

Se definen inicialmente  $S_1$  y  $S_2$  como los inversos de las velocidades  $V_1$  y  $V_2$ .

$$S_1 = 1/V_1$$

$$S_2 = 1/V_2$$

A partir de la Ley de Snell se define:

$$\text{Sen}(i_c) = S_1/S_2$$

El tiempo de viaje total ( $t$ ) desde el disparo hasta el geófono se define mediante la siguiente ecuación: (obtenida a través de múltiples sustituciones de variables trigonométricas)

$$t = 2S_1 \text{Cos}(i_c)Z + xS_2$$

Si se define  $c$  como:

$$c = 2S_1 \text{Cos}(i_c)$$

Entonces:

$$t = 2cZ + xS_2$$

$Z$  es la variable desconocida.

Si se emplea este método para refractores irregulares se parte de una matriz cuadrática a partir de la ecuación generalizada, para los diferentes  $Z_n$ :

$$t_j = \sum_{k=1}^n C_{jk} Z_k + X_j S_2$$

$$\begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & \cdot & c_{1n} & x_1 \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & \cdot & c_{2n} & x_2 \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & \cdot & c_{3n} & x_3 \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & \cdot & c_{4n} & x_4 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ c_{m1} & c_{m2} & c_{m3} & \cdot & c_{mn} & x_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ \cdot \\ z_n \\ s_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ \cdot \\ t_m \end{pmatrix}$$

En donde  $m$  = número de tiempos  $n$  = numero de receptores a los cuales se les debe calcular la profundidad (OYO Corp, 2004).

## 2.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL MÉTODO DE REFRACCIÓN SÍSMICA

La refracción sísmica como método geofísico, permite determinar la profundidad y el espesor de las capas sísmicas predominantes en ambos sitios de presa, así como la caracterización geomecánica asociada a cada medio refractor y la presencia de anomalías sísmicas, que eventualmente se pueden asociar a estructuras geológicas o antropogénicas.

Una desventaja del método según Fuster & Strong (1961), es la escasa información, y la poca precisión de las estructuras geológicas que brinda, sin embargo el método sísmico de refracción no es influenciado por campos eléctricos o magnéticos generados por estructuras metálicas circundantes, por lo que se considera como el método más adecuado para ser aplicado en ambos sitios de presa, pues en dichos sectores se muestran importantes estructuras metálicas (tuberías), que pueden generar en otros métodos geofísicos un error en la toma de datos, además proporciona datos de las velocidades en las capas refractantes, que con frecuencia permiten identificar o especificar la litología de las mismas, en un tiempo menor al de la reflexión sísmica.

Según Rosales (2000), otras limitaciones del método se asocian al cumplimiento de la Ley de Snell, en la cual las velocidades tienen que necesariamente aumentar con la profundidad, por lo que medios con velocidades inferiores subyaciendo capas con velocidades mayores, no serán detectados a través de este método. Cantos (1989), menciona que un cambio de pendiente de la curva tiempo-distancia no necesariamente representa un cambio de refractor, sino que puede significar un cambio de pendiente del primer refractor. Además Terford et al. (1990) mencionan que la existencia de una capa o medio refractor de poco espesor, a pesar de que poseer una velocidad mayor a las capas sobreyacentes no alcanza a detectar las primeras llegadas debido a que la



longitud de onda de la señal sísmica generada es mucho mayor que el espesor de la capa sobre la que debe refractar.

Los alcances del método radican claramente en la facilidad para detectar variaciones de la velocidad, tanto en el eje horizontal como vertical, de la onda  $V_p$  y  $V_s$ ; así como determinar la profundidad del basamento y su respectivo relieve (Rosales, 2000). A partir de dichos valores de  $V_p$  y  $V_s$  se pueden determinar parámetros significativos como lo son las constantes elásticas, que permiten caracterizar geomecánicamente la calidad del medio a través del cual se transmiten.

## **CAPÍTULO 3. MARCO GEOLOGICO**

### **3.1 GEOLOGÍA REGIONAL**

Los primeros estudios publicados en referencia a la geología en el área, fueron efectuados por Schaufelberger (1935), Crosby (1940), y Dóndoli (1943). Posteriormente Dengo & Chaverri (1944), realizan una descripción más detallada de la geología aflorante en las márgenes del Río Virilla y otros afluentes cercanos. Estos autores definen tres grupos litológicos predominantes en el área, las primeras corresponden a rocas sedimentarias, que consiste en el basamento de la zona, y en general corresponden a conglomerados y areniscas calcáreas oscuras de grano fino a medio. Sobreyaciendolas se localizan las denominadas Andesitas del Virilla, caracterizadas por ser rocas efusivas andesíticas asociadas a dos eventos lávicos separados por el contacto con una toba. En algunos sectores de estas coladas se presentan texturas prismáticas y blocosas. Finalmente y sobre la secuencia anterior se localizan las rocas piroclásticas, asociadas a tobas con matriz gris oscura que contiene bloques angulares oscuros pumíticos y fragmentos de vidrio volcánico (fiames), en algunos sectores cerca del Río Virilla muestra una textura columnar. Dicha litología pueden llegar alcanzar espesores máximos que ronda los 90 m en las localidades de Santa Ana y San Antonio de Belén, hasta los 20 m cerca de Los Anonos.

Dóndoli (1949 & 1950), realiza un breve estudio de dos sectores en que corresponden a la Junta de Protección Social y a las canteras de Colima y del Río Virilla, en donde determinó la existencia de una capa superficial de una toba volcánica de aproximadamente 30 m de espesor, sobreyaciendo una colada de lava andesítica de 10 m de espesor seguida de un conglomerado, en cuyo contacto con las lavas se observa un horizonte rojizo, asociado a un paleosuelo quemado.

Posteriormente Howell (1952), define la historia volcánica asociada a los depósitos en el sector sur y oeste de Valle Central, definiendo tres unidades topográficas asociadas directamente con tres unidades geológicas, las cuales se encuentran compuestas por un volcanismo Terciario deformado y rocas sedimentarias asociadas a cuerpos plutónicos. La parte Central de la Cordillera consiste en lavas juveniles y materiales de variada composición eyectados desde los focos volcánicos existentes. Mientras que La Meseta Central Occidental, está compuesta esencialmente por depósitos Pleistocénicos que consisten en avalanchas ardientes, flujos de lavas cubiertos en sus extremos distales por depósitos de flujos provenientes del Poás y Barva.

Weyl (1956), por su parte determina que los eventos asociados a los depósitos volcánicos del Valle Central, iniciaron durante el período Plioceno, en el cual se derramaron corrientes de lava muy fluidas pobres en ácido silícico, provenientes del Volcán Barva, cubrieron los valles entre serranías. Tras un período de reposo que permitió la erosión de las lavas previamente depositadas, inició nuevamente la actividad volcánica en forma explosiva mediante nubes ardientes, cuyos depósitos varían desde tobas soldadas asociadas a actividades fisurales del Volcán Barva, a tobas porosas

ricas en bombas de escoria, y fragmentos de lavas mezclados con masas piroclásticas, depositadas a temperaturas más bajas. Posteriormente esta actividad explosiva, fue sustituida por coladas de lavas basálticas y andesíticas basálticas, hasta culminar con las erupciones de cenizas, cuya actividad volcánica predomina actualmente.

Dóndoli (1958), realiza un reconocimiento a lo largo de la cabecera del Río Virilla, en el que determina la secuencia desde la base del cañón hasta la superficie. En la base describe una serie de materiales volcánicos asociados a dos coladas andesíticas, separadas por superficies de alteración, debido al calentamiento de la colada superior con respecto a la inferior. Sobre estas coladas, se localiza un material escoráceo poroso formado por piedras negras de lava pumícea (autobrecha). Posteriormente se encuentra un manto de pómez riolítica granulada siguiendo la topografía irregular de la lava y la escoria. Seguidamente se localiza un espeso manto de toba andesítica estratificada que aumenta o disminuye su espesor según las irregularidades topográficas existentes en el momento de la depositación. Siguiendo la secuencia se localizan materiales de arrastre de tipo aglomerático heterogéneo envuelto en una matriz arcillosa amarillenta, denominados por Dóndoli (1958) como lávina. Finalmente en el extremo superior de la secuencia sobre la lavina, se describen dos horizontes de cenizas depositados en eventos muy distanciados debido al grado de alteración que hay entre ellas.

Seguidamente Malavassi (1965), realiza un recopilación de los trabajo de Howell (1952) y Dóndoli (1958), esquematizando los depósitos volcánicos del Valle Central en tres grupos, Lavas Intracañón, que corresponde a varias coladas de lavas andesíticas y andesíticas-basálticas con espesores individuales de 15 a 35 m; depósitos de Ignimbritas de composición predominantemente andesítica con espesores máximos de 100 m, y Lavas Post-avalancha, de composición basalto-andesíticas.

Bohneneberger (1968), realiza una delimitación de las unidades volcánicas existentes en el oeste del Valle Central a partir de una foto interpretación del área, basándose a su vez en la descripción hecha por Howell (1952).

Fernández (1969), define como Formación a los materiales volcánicos Plio-Pleistocénicos, que se encuentran rellenando el basamento sedimentario. Asociando a las Lavas Intracañón y las Avalanchas Ardientes de Howell (1952) a la Formación Colima, y la Formación Tiribí, respectivamente. Finalmente agrupa todos los depósitos pertenecientes a las últimas actividades lávicas provenientes del macizo a la Formación Barva.

Posteriormente Echandi (1981), adiciona a la Formación Colima, los Miembros Belén (superior), Linda Vista (inferior), y al Miembro Puente de Mulas descrito por Fernández (1969). Agrega a su vez a la Formación Tiribí, el Miembro Electriona, junto a los ya descritos por Fernández (1969), como Miembro Nuestro Amo y Miembro La Caja.

En el año 1983, el ICE realiza estudios de reconocimiento geológico, para realizar las etapas de Prefactibilidad y Factibilidad del Proyecto Hidroeléctrico denominado P.H. Virilla, y realiza en total 4 perforaciones de las cuales tres se realizaron sobre la posible línea de túnel y una sobre el tanque de oscilación. Este proyecto fue localizado tentativamente sobre la margen derecha del Río Virilla entre la planta eléctrica Nuestro Amo y Casa de máquinas de Belén, sin embargo, no llegó a concretarse la construcción del mismo.

Flores et al. (1988), Arredondo et al. (1988) y Molina et al. (1988), realizan la Campaña Geológica de la zona, así como el cartografiado y recopilación bibliográfica del sitio.

Pinilla (1992), realiza un estudio geoquímico asociado a los suelos del Valle Central. Pérez (2000), determinó que las ignimbritas del Valle Central se originaron por un evento violento asociado al colapso caldérico del macizo del Barva, cuyo depósito denominó Formación Ignimbritas Río Tiribí. Definió cuatro litofacies representativas de los mismos: Valle Central, Puente de Piedra, La Garita y Orotina.

Otros estudios realizados en Cuenca del Río Virilla o sectores de la misma, los cuales presentan un enfoque hidrogeológico corresponden a Losilla (1977), Losilla (1986), Vargas (1994), y Schosinsky & Vargas (2001). Analizan las características de la cuenca y los acuíferos presentes, tales como, el uso potencial del suelo, fuentes de contaminación, planificación urbana y la planificación del recurso hídrico para el Valle Central, así como el modelo hidrogeológico de la zona.

A continuación se muestra la columna regional generalizada de la zona (Figura 17), modificada de Echandi (1981).

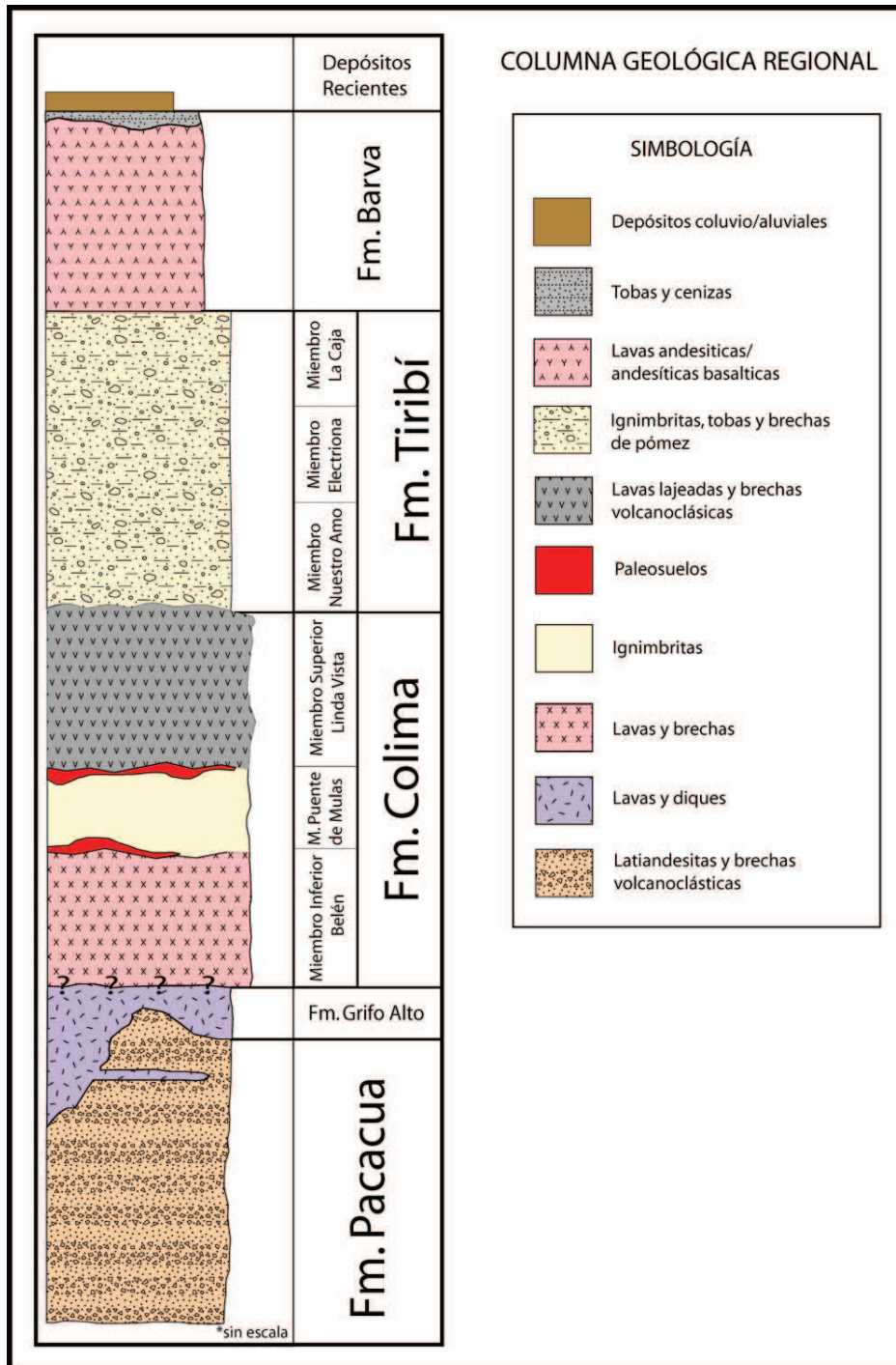


Figura 17. Columna regional resumida (Modificada de Echandi, 1981)

### **3.1.1 FORMACIÓN PACACUA (BASAMENTO TERCIARIO)**

Definida inicialmente por Castillo (1979), como una secuencia compuesta de conglomerados brechosos y areniscas conglomeráticas, areniscas, limolitas y lutitas, de naturalezas tobáceas, con espesores superiores a los 1148 m.

Rivier (1979), divide la Formación de dos unidades, una unidad inferior, caracterizada por la presencia de vulcanoruditas, vulcaneritas, conglomerados y wacas varicolores, con estructuras sedimentarias asociadas (laminaciones y estratificaciones) así como la presencia de fragmentos de fósiles. La unidad superior formada por una serie marina de areniscas arcillosas finas con intercalaciones de lutitas y tobas.

Alvarado (1982), detalla los aspectos sedimentológicos y paleogeográficos, determinando que la Formación se encuentra principalmente constituida por lutitas negras depositadas en ambientes anóxicos.

Posteriormente Denyer & Arias (1991), determinan una edad estratigráfica de Mioceno Medio, y separan la subunidad sedimentaria de lutitas negras elevándola al rango de Formación Peña Negra. A su vez delimita la Formación Pacacua atribuyéndole la secuencia volcanoclástica inicialmente definida por Castillo (1969), como areniscas volcanoclásticas, tobas y brechas finas a gruesas. Según Denyer & Arias (1991), esta Formación presenta pequeñas intrusiones diabásicas ( $\approx 1$  m) de diques y sills.

### **3.1.2 FORMACIÓN GRIFO ALTO**

Denyer & Arias (1991), definen esta formación como una serie de rocas volcánicas andesíticas y piroclásticas, que sobreyacen la secuencia sedimentaria y volcánica del Mioceno; agrupando dentro de esta Formación los Basaltos La Garita definidos por Kussmaul & Sprechmann (1984) y los depósitos ignimbríticos denominados por Alán (1978) & Álvarez (1982) como Ignimbritas San Gabriel. Esta formación se localiza predominantemente en las Hojas Carraigres y Candelaria, sin embargo, se localizan parches dispersos sobre la Hoja Abra.

Las rocas de esta formación presentan una coloración gris-rojiza característica, y su depósito presenta una geometría irregular rellenando la topografía preexistente. La edad radiométrica para esta Formación ronda los 5,5 Ma (Marshall & Idleman, 1999).

### **3.1.3 FORMACIÓN COLIMA (LAVAS INTRACAÑÓN)**

Fueron inicialmente descritas por Howell (1952), como Lavas Intracañón, debido a su confinamiento a lo largo de los valles en V, dichas extensiones de lavas encausadas, fueron

asociadas a actividades fisurales o focalizadas de las actividades volcánicas iniciales de los volcanes Poás y Barva.

Posteriormente Malavassi & Madrigal (1967), las describen como coladas andesíticas porfiríticas con fenocristales de plagioclasa y piroxenos, con una matriz afanítica cubierta por una gruesa masa de escoria de color rojizo de 5 m de espesor, que separa un segundo nivel de lavas andesíticas con estructura fluidal y visible lajeamiento, la cual es sobreyacida por una capa de escoria negra de 4 m de espesor.

Fernández (1969) la eleva a rango de Formación, y definió la Unidad de Ignimbrita Inferior Puente de Mula como parte de la Formación Colima. Esta Unidad es descrita como ignimbritas de color gris oscuro a gris café, compuesto por fragmentos lapillíticos y líticos (5-8 cm), incluidos dentro de una matriz tobácea, parcialmente soldada. Toda la Unidad se encuentra limitada, tanto en su parte inferior como superior, por las lavas de la Formación Colima. Presentan según Fernández (1969) estructura columnar y espesores de alrededor de 12 m.

Losilla (1977) realiza un estudio hidrogeológico del potencial acuífero de esta Formación. Define una Unidad Superior e Inferior, ambas constituidas por lavas andesíticas separadas por la ignimbrita de Puente de Mulas.

Echandi (1981) subdivide la Formación en tres Miembros: un Miembro inferior denominado Belén, que corresponde a lavas andesíticas y latandesíticas, que se encuentran en contacto con el basamento sedimentario (Formación Pacacua) del Valle Central. El Miembro intermedio que corresponde a las Ignimbritas Puente de Mulas, descritas por Fernández (1969), como una ignimbrita grisácea a café, con textura columnar hexagonal, en algunos sectores esta ignimbrita presenta una composición vidriosa negra muy densa. Este miembro se encuentra limitado tanto superior como inferiormente por flujos lávicos, perteneciente a los otros dos Miembros. El tercer Miembro descrito como Miembro Linda Vista, ubicado en la parte superior del depósito, consiste en una colada lávica andesítico-basáltica densa y lajeada, que hacia su parte superior presenta una textura brechosa escorácea y negra.

Inicialmente Bellon & Tournon (1978), le asignaron a esta secuencia volcánica una edad de  $1 \pm 0,15$  Ma. Posteriormente Gans (1999), realiza una datación radiométrica de algunas muestras asociadas a los eventos pre-ignimbriticos ubicadas en el Tajo Colima, asignándoles una edad de 0,338 Ma, la cual es correlacionable con los depósitos de Colima Superior. Recientemente Marshall & Idleman (1999) y Marshall et al. (2003), muestran tres edades radiométricas, las cuales se pueden asociar a Miembro Belén con  $758 \pm 16$  ka y al Miembro Linda Vista de  $337 \pm 7$  ka, esta última con una edad muy similar a la propuesta por Gans (1999). Una posible correlación a las edades de las ignimbritas del Miembro Puente de Mulas, fueron las dataciones realizadas por Gans et al. (2003),

cuyos rangos de edades de 440 a 570 ka, para las ignimbritas del Valle Central, se podría eventualmente relacionar, debido a su correlación temporal en la secuencia de la formación.

#### **3.1.4 FORMACIÓN TIRIBÍ (AVALANCHA ARDIENTE)**

Definida inicialmente como Avalancha Ardiente por Howell (1952), quien al considerar las características del depósito, composición y textura, determinó que corresponden a materiales con similitudes asociadas a los depósitos de nubes ardientes de la erupción del Monte Pelée en 1902. A su vez determinó que el foco de origen de estos depósitos sobre los cañones del Río Grande y del Río Virilla, corresponden a los volcanes Poás y Barva respectivamente, cuyas edades ubicó en el período Plio-Pleistoceno.

Malavassi & Madrigal (1967), la mencionan como una “toba de colada de cenizas”, y agrupan los depósitos asociados a las nomenclaturas de colada de pómez, sillar, ignimbrita y toba soldada. Ubicados en los tajos de Pavas, Colima, Hatillo y Barreal, con sus respectivas características litológicas y grados de soldamiento particulares.

Kussmaul y Sprechmann (1982) la elevan al grado de Formación Avalancha Ardiente.

Fernández (1969) la denomina Formación Tiribí, asociándola a los depósitos de avalancha ardiente descritos por Howell (1952), como una toba soldada de coloración grisácea oscura a clara, con bandeado horizontal y fiames, envueltos en una matriz de ceniza densa. El depósito presenta según Fernández (1969), una disyunción prismática vertical, debido a cambios en la compactación, textura y composición a lo largo del depósito.

Fernández (1969), considera distinguir dos miembros asociados a los que denominó La Caja y Nuestro Amo. 1) El Miembro La Caja presenta espesores que rondan los 30 m, y consiste en materiales ignimbríticos poco soldados de carácter masivo, matriz de ceniza con abundantes componentes escoriales sin bandeamientos. 2) El Miembro Nuestro Amo, corresponde con depósitos asociados a avalanchas frías, que consisten en tobas con fragmentos de composición heterogénea y tamaños variados, redondeados a subangulares, incluidos en una matriz densa y masiva, de composición tufácea, lapillítica y cenicienta. A este miembro se le estimó un espesor aproximado de 65 m.

Echandi (1981), subdivide la Formación en tres Miembros. 1) El Miembro Nuestro Amo inicialmente definido por Fernández (1969) como avalanchas frías, posteriormente redefinido por Echandi (1981) como flujos de lodos ardientes, originados a partir de cenizas y pómez cargados de agua y vapor. 2) El Miembro Electróna, asociado según Echandi (1981), a depósitos ignimbríticos emplazados posterior a la Formación Colima; y 3) El Miembro La Caja definido por Fernández



(1969) y descrito por Echandi (1981), como depósitos cenizas finas a gruesas con fragmentos lapillíficos o bloques lávicos de carácter escoráceo, las cuales no presentan estructuras de bandeamiento o flujo definido.

Pérez (2000), agrupa los depósitos ignimbríticos del Valle Central y los denomina Formación Ignimbritas Río Tiribí con una edad de 0,33 Ma mediante dataciones radiométricas. A esta Formación le define cuatro litofacies asociadas: 1) Litofacies del Valle Central, que incorpora los Miembros Electriona y La Caja, propuestos por Echandi (1981) para la Formación Tiribí. Estas litofacies se asocian a los depósitos encontrados en los tajos Electriona, Virilla, Barreal y Los Sitios de Moravia. 2) Litofacie Puente de Piedra, asociada a los depósitos aflorantes al oeste del Valle Central en la localidad de Grecia, propiamente en el Puente de Piedra. 3) Litofacies La Garita, asociada a los depósitos alrededor de la Garita y Río Grande de Atenas, fue subdividida en tres Unidades según los porcentajes de escorias, líticos y pómez. 4) Litofacies Orotina, asociada a los depósitos del sur y oeste de Ciudad Colón, Piedras Negras, Cordel de Mora, Atenas, alrededores de Grecia y Naranjo, Turrubares y camino a Orotina y Mata de Limón. Pérez (2000), asocia estos depósitos a un origen por colapso caldérico proveniente del macizo del Barva.

Hannah et al. (2002), realiza un análisis geoquímico, de los depósitos de flujos de ceniza dentro de la Formación Tiribí. A partir de la composición de sílice encontrada en los clastos de pómez, define el origen y los diferentes niveles asociados a la cámara magmática que originó el depósito.

### **3.2 GEOLOGÍA LOCAL**

La zona de estudio comprende el cañón y las márgenes del Río Virilla y sus márgenes, sobre las que se construyeron los sitios de presa de los Proyectos Hidroeléctricos Electriona y Belén. En ambas localidades afloran las Formaciones Pacacua, Grifo Alto, Colima y Tiribí, así como depósitos recientes coluvio-aluviales producto de la erosión de los cañones adyacentes al río y sus depósitos.

A continuación se muestra la columna geológica local (Figura 18), propuesta para el sitio de estudio. Describen las características de las formaciones y depósitos encontrados en ambos sitios de presa y en el área comprendida entre los mismos.

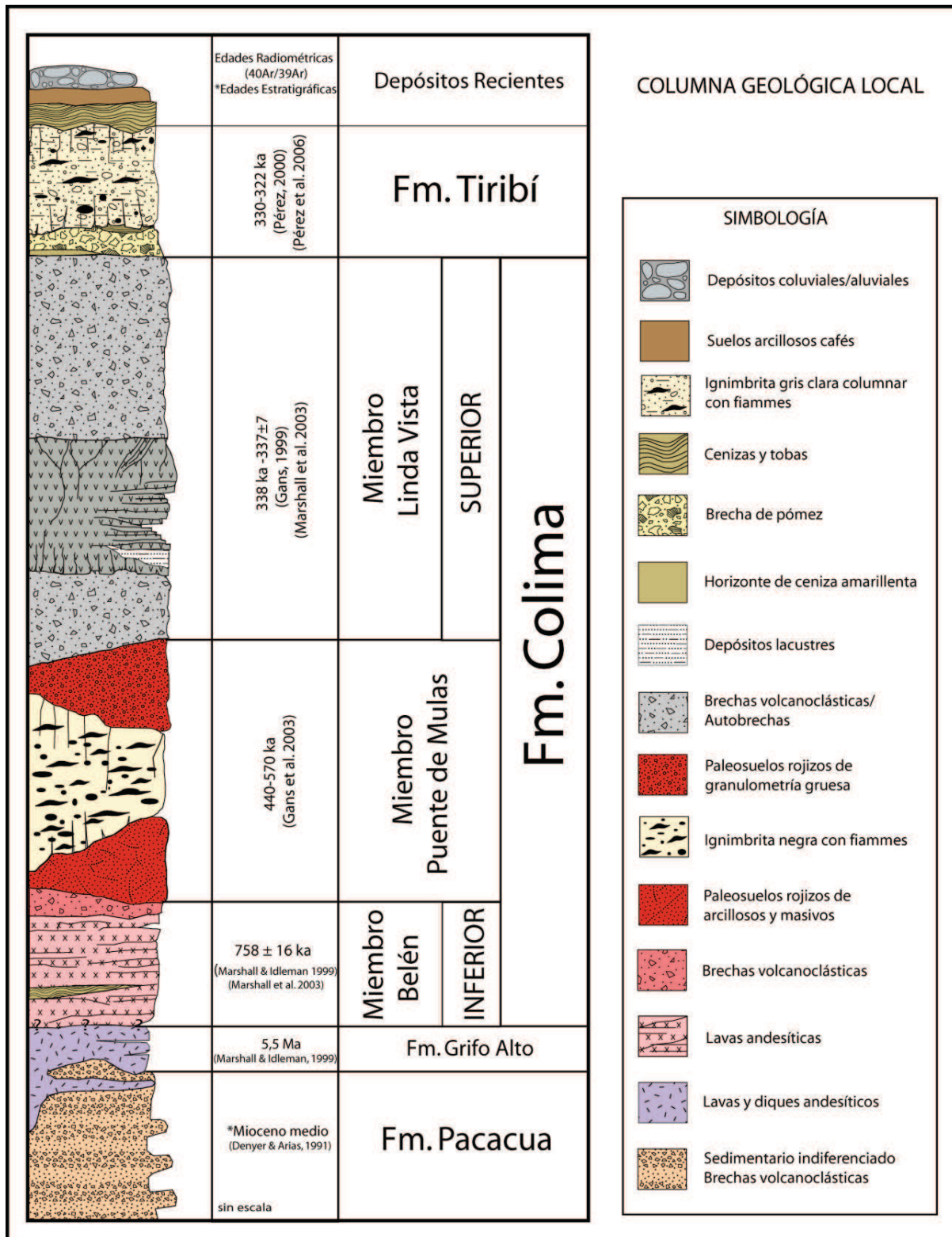


Figura 18. Columna geológica local

### 3.2.1 FORMACIÓN PACACUA

Aflora en la margen izquierda del Río Virilla, en el codo que forma el río antes de ser retenido en el sitio de presa Belén, en el sector denominado Honduras (Figura 19a-d).

Se presenta a lo largo de esta margen y es visible a lo largo de las quebradas intermitentes y deslizamientos (Figura 19b) presentes en el área en forma de herradura que conforma esta zona de cafetal. Dentro de la litología observada para esta formación se encuentran brechas volcanoclásticas de colores morados-grisáceos y fragmentos de jaspes y depósitos volcanoclásticos indiferenciados de coloraciones morado-grisáceos, verduzcos y cafés, debido a su alto grado de alteración.



Figura 19. a) Vista desde la parte superior de Casa de Máquinas de Electriona hacia el Río Virilla b) Deslizamiento margen derecha río Virilla, c) Vista desde casa de máquinas Electriona hacia el cafetal de la localidad de Honduras d) Vista desde el tajo de Pedregal hacia el cafetal.



A nivel local la Formación presenta un espesor visible de 45 m. El contacto superior es ondulante y discordante con la Fm. Grifo Alto. El contacto inferior no fue observado.

A continuación se describen a detalle los depósitos asociados localmente con la Fm. Pacacua:

### 3.2.1.1 Brechas volcanoclásticas

Afloran en el sector de margen izquierda del Río Virilla, a lo largo de una quebrada en el cafetal en la localidad de Honduras, a lo largo de una sección de 5 m sobre la quebrada. Este depósito consisten en una brecha polimíctica bien sorteada y compuesta de bloques predominantemente de carácter andesítico, con coloraciones morado-rojizas a grises, y formas subangulares a angulares, de tamaños centimétricos, que no sobrepasan los 6 cm (Figura 20).

El contacto entre los bloques es predominantemente puntual y en algunos sectores se observa contacto por matriz. La matriz es pobremente desarrollada y alterada a arcilla, con coloraciones rojizas a grisáceas.



Figura 20. Brecha volcanoclástica, localizada sobre la quebrada en el cafetal Honduras.

### 3.2.1.2 Jaspes

Se localizan a lo largo de la quebrada en el sector de Honduras, se observan de forma esporádica como bloques angulares de jaspe veteadado con coloraciones rojo, morado a grisáceo y vetas blanquecinas irregulares (Figura 21), estos bloques angulares presentan tamaños de 30-40 cm aproximadamente.



Figura 21. Bloque de Jaspe localizado a lo largo de la quebrada en el sector de Honduras.

### 3.2.1.3 Depósitos sedimentarios indiferenciados

Se ubicaron en la localidad de Honduras, sobre el codo de la margen izquierda del Río Virilla. Presentan un espesor visible de 25-30 m.

Corresponden a materiales muy alterados con coloraciones rojas, moradas y grises, dando la apariencia de depósitos masivos alterados en algunas zonas cuya alteración es homogénea en coloración. Dependiendo del grado de alteración, es difícil definir el tipo de litología original, sin embargo, dan la apariencia de ser materiales originalmente volcánicos y posiblemente retrabajados (Figura 22).



Figura 22. a-b) Materiales indiferenciados, localizados en el sector de Honduras, c) Contacto entre Fm. Pacacua y Fm. Tiribí.



### 3.2.2 FORMACIÓN GRIFO ALTO

#### 3.2.2.1 Dique andesítico

Se localiza en la parte alta del sector de Honduras, sobreyaciendo e intruyendo a la Fm. Pacacua. El contacto inferior con dicha Formación es lateral e irregular.

El afloramiento asociado a dicha formación se presenta a lo largo del camino cerca de la entrada al cafetal en Honduras. Muestra un espesor visible de entre 7 a 15 m.

En la base del afloramiento las rocas presentan una textura afírica que tiende a disminuir levemente hacia la parte superior, al igual que una intensa fracturación sub-horizontal y vertical que le confieren una textura de lajamiento (Figura 23a). A lo largo de las fracturas presenta pátinas de óxidos de hierro que le confieren un aspecto “quemado” (Figura 23b).



Figura 23. a) Contacto lateral del dique andesítico con las brechas volcanoclásticas de Fm. Pacacua y b) Zona de alto grado de fracturación ubicado en la base del afloramiento.

Este dique andesítico presenta un lajamiento más grueso hacia la parte superior y una textura a nivel macro de carácter porfírico, con minerales alterados (Figura 24).



Figura 24. a) Contacto inferior y lateral del dique con la Fm. Pacacua b) Lajas gruesas en la parte superior del afloramiento c) Entrada del cafetal en el sector de Honduras.



### 3.2.3 FORMACIÓN COLIMA

La Fm. Colima se encuentra constituida por tres miembros principales que se describen a continuación:

#### 3.2.3.1 Miembro Colima Inferior (Miembro Belén)

##### 3.2.3.1.1 Lavas andesíticas:

Aflora en la base del cañón de la presa Belén. Corresponde a lavas andesíticas porfíricas, con estructura masivas muy sanas, de color gris violáceo poco fracturadas y con un escaso lajamiento hacia la parte superior de las misma. (Figura 25).



Figura 25. Lavas masivas sitio de presa Belén.

Las rocas se presentan muy densas y levemente meteorizadas (ligeros cambios de coloración café-rojizo) sin llegar a observarse una alteración profunda de la misma. Estas lavas en general, presentan patrones de diaclasamiento densos y caóticos con tendencias sub-verticales, y separaciones decimétricas entre las fracturas. Algunas de las fracturas presentan rellenos parciales de óxidos de hierro y manganeso.

Sobre las coladas andesíticas se observa una autobrecha de enfriamiento (Figura 26). Esta autobrecha monomítica muy consolidada, se muestra de forma superficial y aleatoria a las lavas masivas, y su contacto con las mismas es transicional. Los bloques angulares de color violáceo presentan contacto por matriz y tamaños máximos de hasta 1 m de diámetro.

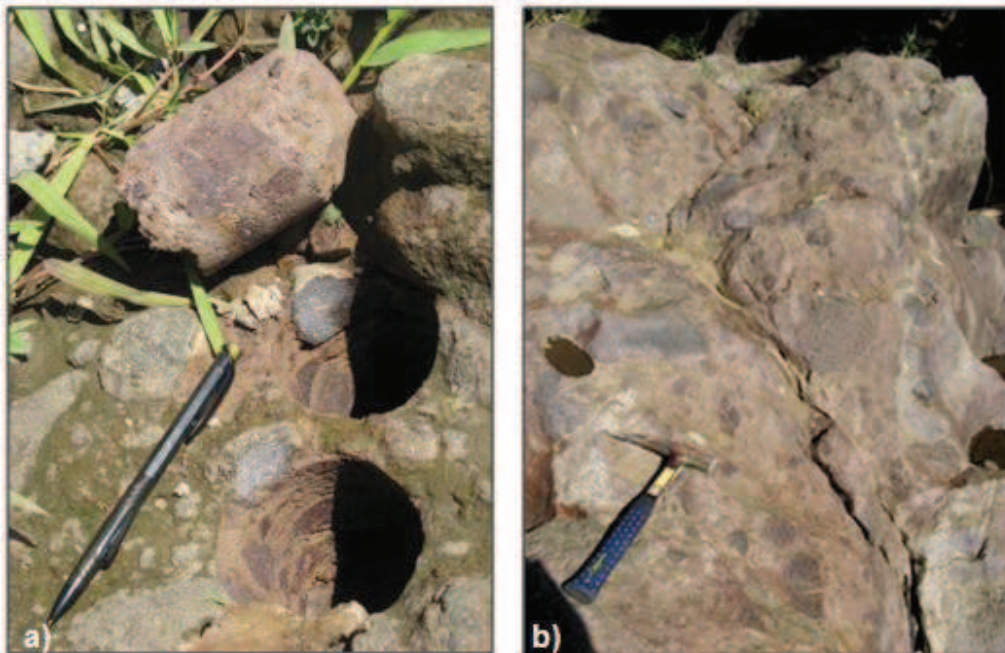


Figura 26. a-b) Autobrecha de enfriamiento en sitio de presa Belén.

Microscópicamente en las secciones B-01, B-02, B-03 y B-04 (Anexo 1), tanto las lavas como los bloques de la autobrecha corresponden a andesitas con dos piroxenos, el hipersteno y las augitas, estas últimas se caracterizan por presentar maclas tipo reloj de arena.

### 3.2.3.2 Miembro Puente de Mulas

Este Miembro corresponde a depósitos ignimbríticos que presentan espesores visibles de 5 a 10 m observados en el Tajo Pedregal. Posee una geometría lenticular con terminación lateral en cuña. Los contactos tanto superior e inferior son ondulantes e irregulares, y se encuentran limitados por paleosuelos rojizos cuyos espesores visibles rondan 2 a 12 m (Figura 27).

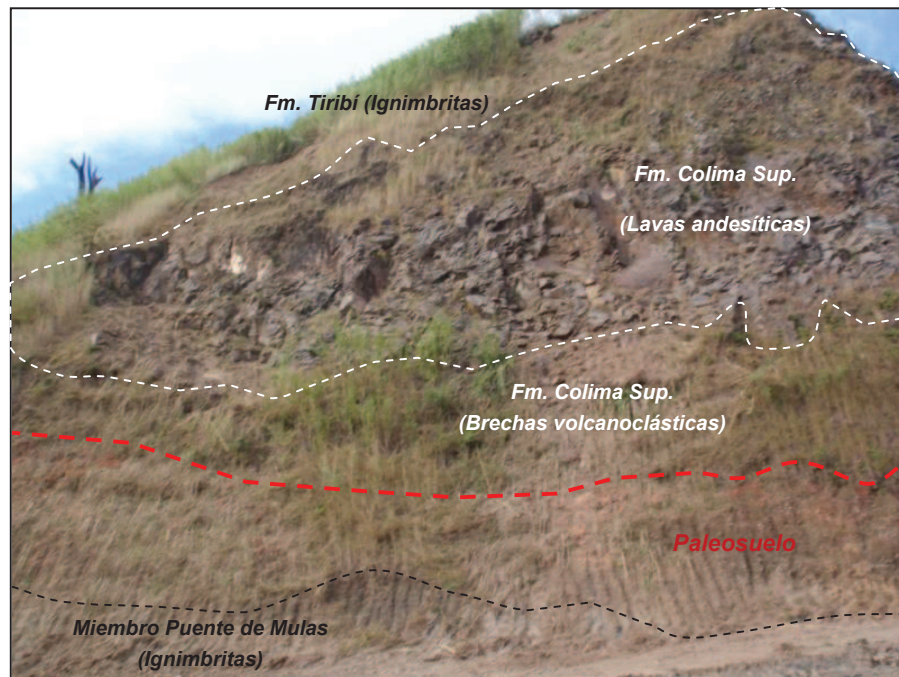


Figura 27. Secuencia de los Miembros Puente de Mulas y Colima Superior, observada en el Tajo Pedregal.

Hacia el techo del depósito, la ignimbrita se muestra más alterada y con un menor grado de soldamiento, presentando una coloración café oscuro, y fiamas escoráceos opacos, por lo que las rocas de este sector se muestran más livianas o disgregables. Hacia el contacto inferior muestra una mayor densidad de fiamas y una coloración más oscura, por lo tanto un mayor grado de soldamiento. Los fiamas de vidrio volcánico pueden alcanzar hasta longitudes máximas de 20 cm. En los sectores más soldados las ignimbritas se muestra masiva y densa, con escaso desarrollo de textura columnar. Dichas columnas presentan dimensiones que pueden alcanzar los 40 a 70 cm de alto y diámetros de 15 a 30 cm (Figura 28). Dentro del depósito ignimbrítico se localizan fragmentos líticos de color gris claro y carácter andesítico con tamaños promedios de 0,5 cm.





Figura 28. a) Columna de ignimbrita escasamente desarrollada, b) Depósito de ignimbrítico.

El paleosuelo rojizo que sobreyace este Miembro, presenta una aparente textura brechosa, y un espesor máximo observable de 12 m. Dicho paleosuelo muestra granulometrías promedio de 5 a 10 cm, con bloques subangulares a subredondeados, envueltos en una matriz arcillosa rojiza. El contacto entre los mismo es predominantemente por matriz y de forma esporádica por contacto puntual. El paleosuelo inferior que subyace al depósito ignimbrítico presenta granulometrías predominantemente arcillosas, con menor cantidad de materiales blocosos y una coloración rojo ocre más intensa.

### 3.2.3.3 Miembro Colima Superior (Miembro Linda Vista)

#### 3.2.3.3.1 Lavas andesíticas

Este Miembro aflora en la base del sitio de presa Electriona, a lo largo del Tajo Pedregal, en la base del Tajo Monte Roca y en la base de las paredes de los cañones del Río Virilla. Corresponde a lavas andesíticas y andesíticas basálticas muy fracturadas con coloraciones gris oscuro. Se encuentra limitada de forma superior e inferior por una brecha volcanoclástica o autobrecha. En algunos sectores el contacto inferior de la misma se encuentra limitada por un paleosuelo rojizo, que la separa de la ignimbrita inferior del Miembro Puente de Mulas. Dicho contacto inferior es irregular y ondulante, a lo largo del mismo se muestra en algunos sectores un desarrollo de estructuras columnares por enfriamiento de las lavas superiores. Hacia los sectores centrales de la colada se observa un denso lajamiento con tendencia semi-circular y estructura de flujo (Figura

29). El espesor de estas lavas varía a lo largo de los cortes, sin embargo, ronda en promedio entre 10 y 15 m.

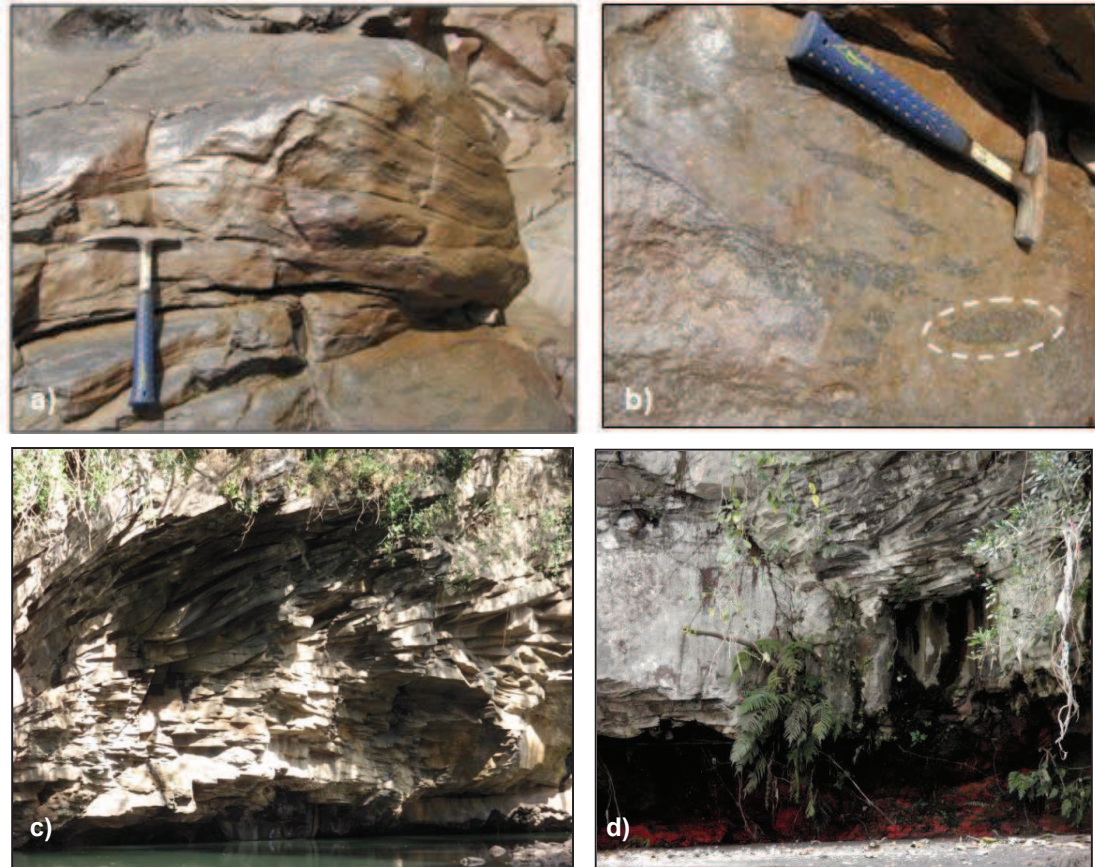


Figura 29. a-b) Estructuras de flujo y lentes, c) Lavas lajeadas y c) Contacto inferior de las lavas con el paleosuelo rojizo

Microscópicamente en las secciones E-01, E-02, TM-01 y TM-02 (Anexo 1), estas lavas se denominan como andesitas con dos piroxenos, al igual que las lavas asociadas a el Miembro Colima Inferior, sin embargo a diferencia de las lavas aflorantes en el sitio de Presa Belén, estas lavas presentan una mayor densidad de augitas (2-3%) y un mayor grado de alteración en los hiperstenos (fantasmas de hipersteno). En el caso de la sección TM-03 (Anexo 1), estas lavas pueden también presentar tendencias a ser andesitas basálticas, debido a la presencia de fantasma de olivino.



### 3.2.3.3.2 Depósitos lacustres

Estos depósitos fueron observados en el talud norte del Tajo Pedregal. Corresponden a depósitos lenticulares (Figura 30a), muy limitados a unos pocos metros y predominantemente arcillosos. Poseen una extensión de 5 m de largo por 1,5 m de espesor. Presentan una coloración blanca a café claro, con laminación e intercalación de paquetes con diferentes granulometrías (finas-medias) y gradación normal.

El contacto entre las capas de granulometrías finas es generalmente plano paralelo, en algunos sectores se muestra irregular y ondulado en contactos con los paquetes de mayor granulometría. En la parte intermedia de este depósito se localiza una capa de color café de aproximadamente 30 cm de espesor, la cual contiene fragmentos esporádicos de lavas andesíticas sub-angulares (2 a 5 cm de diámetro) distribuidos de forma caótica y envueltos en una matriz arcillosa café (Figura 30bc).

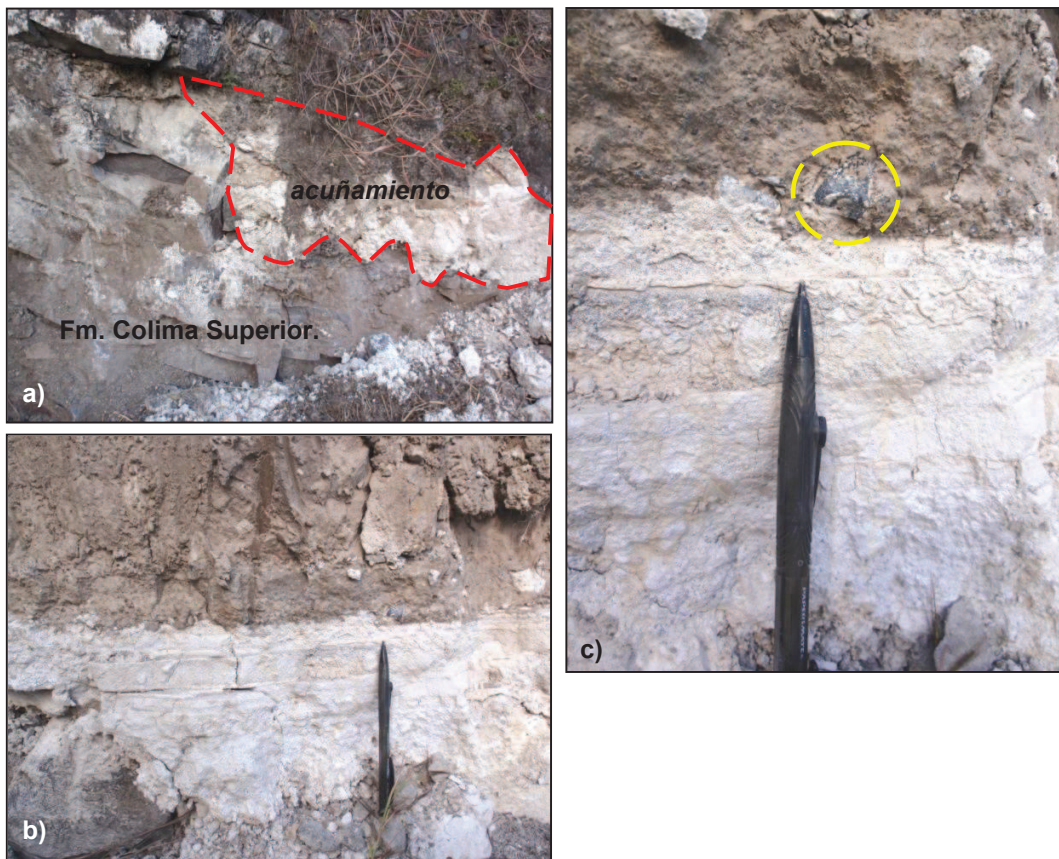


Figura 30. a) Geometría lenticular de los depósitos lacustres con la lavas lajeadas del Miembro Linda Vista b) Contacto inferior de la capa café, c) Bloque sub-angular de lava andesítica.

Estos depósitos se encuentran subyaciendo las lavas andesíticas lajeadas del Miembro Colima Superior (Figura 30a).

### 3.2.3.3 Brechas volcanoclásticas

Sobreyaciendo las coladas andesíticas, se localiza un capa de brechas volcanoclásticas rojiza, pobremente soldada. Los bloques andesíticos y vesiculares de la brecha, se muestran relativamente sanos y presentan tamaños predominantes de entre los 7 y 10 cm, con contacto puntual (Figura 31).

La matriz tobácea que envuelve a los bloques, en algunos sectores presenta una mayor alteración a arcillas café-rojizas. En condiciones sanas la matriz presenta una alta disgregación, lo que permite separar fácilmente los bloques andesíticos.

El contacto entre estas brechas y las lavas andesíticas inferiores es irregular. Las brechas presentan espesores máximos de 30 m. No obstante, a lo largo de la margen del río, muestra una tendencia lenticular con espesores variables. No existe un patrón de diaclasamiento en estas brechas.



Figura 31. Brecha volcanoclástica rojiza, bloques con tamaños promedios de 7 a 10 cm.

Estas brechas pueden alcanzar sectores muy bajos dentro del cañón del río, donde se encuentra rellenando los canales y las irregularidades topográficas preexistentes al depósito de lavas andesíticas inferiores.

### 3.2.4 FORMACIÓN TIRIBÍ

A continuación se describen las litologías asociadas a esta Formación:

#### 3.2.4.1 Brecha de pómez

Este depósito se localiza en la base de la ignimbritas de la Fm. Tiribí, en el camino hacia el sitio de presa Belén sobre la margen derecha del Río Virilla.

Corresponden a bloques escoriaáceos andesíticos y de pómez, envueltos en una matriz de pómez de color blanco amarillento. Los bloques son angulares y el contacto entre los mismos son por matriz y puntual (Figura 32). Los tamaños promedios rondan los 30 cm. El contacto entre la ignimbrita y la brecha es difuso. El espesor visible de esta brecha no sobrepasa los 2 a 3 m, y pierde continuidad a lo largo del contacto inferior de las ignimbritas.



Figura 32. Brecha de pómez localizada en la base de las ignimbritas.

#### 3.2.4.2 Tobas de ceniza

Estos depósitos se localizan en las paredes del túnel de acceso al área del Tajo Pedregal y el camino de acceso al sitio de presa Belén.

Corresponden con depósitos de tobas de cenizas, que se localizan por debajo de las ignimbritas, en algunos sectores separando las brechas de pómez con la brecha andesítica de Colima Superior.

El espesor de estos depósitos es variable, desde los 40 cm hasta los 2 m, y presentan coloraciones grisáceas a café amarillento, con una geometría lenticular a lo largo del contacto inferior de la ignimbrita. El contacto con las brechas inferiores es irregular, rellenando los espacios entre los bloques (Figura 33).





Figura 33. Cenizas localizadas en la base de las ignimbritas. a) Techo del túnel en el Tajo Pedregal, b) Sitio de presa P.H. Belén

### 3.2.4.3 Depósitos Ignimbríticos

Estos depósitos se localizan sobre toda la secuencia anterior, se encuentran presentes a lo largo de toda el área de estudio, en las partes altas de los tajos, así como a lo largo de las paredes que conforman los cañones del Río Tiribí y del Río Virilla.

Estos depósitos se caracterizan por sus diferentes grados de soldamiento, y estructuras de enfriamiento que pueden o no formarse según el tipo y espesor del depósito.

En general este depósito presenta una geometría lenticular a tabular con espesores variables y contactos ondulantes e irregulares, que rellenan la paleotopografía preexistente. Hacia los contactos superior e inferior, al igual que en aquellos sectores en los que se acuña el depósito y por lo tanto se reduce significativamente su espesor, presenta un marcado desarrollo de estructuras columnares. En los sectores intermedios y más espesos del mismo. Presenta un textura masiva con características tobáceas, disgregables y con diferentes grados de soldamiento.

Las ignimbritas soldadas, con estructuras columnares, pueden alcanzar fácilmente los 10 m de altura y 1 m de diámetro (Figura 34a). Estas ignimbritas presentan fiames de obsidiana (Figura 34b), con longitudes máximas 15 cm y distintos grados de compactación en un mismo nivel. En el sector de Belén a lo largo de los afloramientos, se observa una mayor densidad de fiames hacia la

parte intermedia y superior del depósito, así como la presencia de vesículas alargadas y bloques brechosos de obsidiana.



Figura 34. a) Columna de Ignimbrita volcada, b) Detalle de columna con fiamas de obsidiana.

En la base de casa de máquinas del Proyecto Hidroeléctrico Electriona, se observa el contacto inferior de las ignimbritas columnares con un paleosuelo rojizo (Figura 35). Las ignimbritas en este sector presentan una coloración gris oscura evidenciado un aporte de vidrio volcánico, tanto en la densidad como en el tamaños de los fiames, los cuales pueden alcanzar fácilmente los 20 cm de longitud.



Figura 35. Contacto entre paleosuelo rojizo y las ignimbritas de la Fm. Tiribí

El paleosuelo rojizo inferior, presenta un evidente contacto quemado con la ignimbrita sobreyacente, generando pequeñas pseudocolumnas de enfriamiento y un color rojo ocre intenso. El espesor visible máximo observado para este paleosuelo ronda los 3 m.

Los depósitos poco soldados y con características tobáceas (Figura 36), agrupados dentro de los depósitos ignimbríticos, corresponden a materiales fácilmente disgregables constituidos por una matriz de ceniza fina a media la cual envuelve bloques escoráceos subangulares a angulares cuyos tamaños rondan desde los 2 cm a los 80 cm, así como materiales líticos asociados a bloques andesíticos y fragmentos de pómez con tamaños promedio de 3 cm.

Estos depósitos son observados en el tajo El Encierro y presentan evidentes estados de soldamiento y alteración de la matriz, la cual tiende a colores café claro.





Figura 36. Depósitos tobáceos asociados a la Fm. Tiribí, localizados en el Tajo El Encierro

### 3.2.5 DEPÓSITOS RECIENTES

#### 3.2.5.1 Suelos

Sobreyaciendo la secuencia anterior, se localizan los suelos del Valle Central, caracterizándose por ser suelos generados a partir de la alteración de materiales volcánicos, se presentan como suelos arcillosos con coloraciones anaranjadas y un desarrollo importante de suelo orgánico superficial. La capa superficial de estos suelos presenta espesores promedios de 2 a 4 m.

### 3.2.5.2 Depósitos coluvio-aluviales

Estos materiales se encuentran depositados de manera aleatoria. En el caso del material aluvial se asocia a clastos redondeados o sub-redondeados arrastrados por el río durante las épocas de avenidas máximas (Figura 37). Los depósitos coluviales corresponden con materiales angulares a sub-angulares acumulados por el desprendimiento de las paredes del cañón del río. La litología de estos depósitos corresponde al retrabajo de las rocas aflorantes en la zona.



Figura 37. Depósitos coluvio-aluviales, localizados en el sector del sitio de presa Belén.

### 3.2.6 TECTÓNICA ASOCIADA

En el área de estudio se presentan las siguientes fallas asociadas:

#### 3.2.6.1 Fallas observadas

**F1:** Este plano de falla se localiza en la coordenada 217,220N-517,250E. Sobre la margen izquierda del Río Virilla, cortando el paleosuelo que aflora a lo largo de esta margen. Presenta una orientación E-W y un movimiento aparentemente inverso con una posible componente de rumbo. El plano de falla no pudo ser medido directamente en el sitio, debido a que el sitio en el que se localiza no es fácilmente accesible (Figura 38).



Figura 38. Plano de falla observado en la base del cañón del río Virilla, en el que se muestra el movimiento relativo sobre el plano.

#### 3.2.6.2 Fallas Inferidas

**F2:** Esta posible falla se localiza en la coordenada 217,161N-517,000E, sobre la margen izquierda del Río Virilla. Este plano de falla se infiere a partir de un cambio brusco lateral en la secuencia estratigráfica entre el paleosuelo y los depósitos aluviales antiguos. Presenta una posible orientación N-S y al menos un movimiento aparentemente inverso, el plano se encuentra cubierto por depósitos coluviales de bloques lávicos provenientes de la Formación Colima Superior (Figura 39)





Figura 39. Posible plano de falla, cambiando lateralmente la secuencia.

**F3:** este posible plano de falla se localiza en la coordenada 217,052N-516,180E, sobre la margen izquierda del Río Virilla. Dicho plano de falla se infiere debido a la presencia de bloques rodados con planos de falla expuestos, sin poderse observar directamente el plano falla principal, el cual se encuentra cubierto por coluvio (Figura 40). Este plano presenta una posible orientación NE-SW, y al menos un posible movimiento inverso.



Figura 40. a) Bloques con planos de falla b) Posible zona de falla cubierta por coluvio.

**F4:** este posible plano de falla se localiza sobre la margen derecha del Río Virilla, en las coordenadas 217,230N-516,248E y presenta una posible orientación NW-SE. Dicho plano de falla se infirió a partir de la correlación estratigráfica de pozos (AB-1198, PED-1) presentes en ambas márgenes del Río Virilla y distanciados a menos de 700 m. A partir de los registros de estos pozos se determinó una interrupción y levantamiento de la secuencia hacia la margen izquierda, por lo que se infiere que esta posible falla puede presentar al menos un movimiento inverso asociado.

### **3.2.6.3 Fallas propuestas en estudios previos**

**Falla Higuito:** Esta falla es propuesta en el mapa de Denyer & Arias (1990), como una traza de falla cubierta y proyectada hasta el área de estudio. Presenta una orientación NW-SE, y un movimiento dextral, cuyo bloque derecho baja en relación al izquierdo.

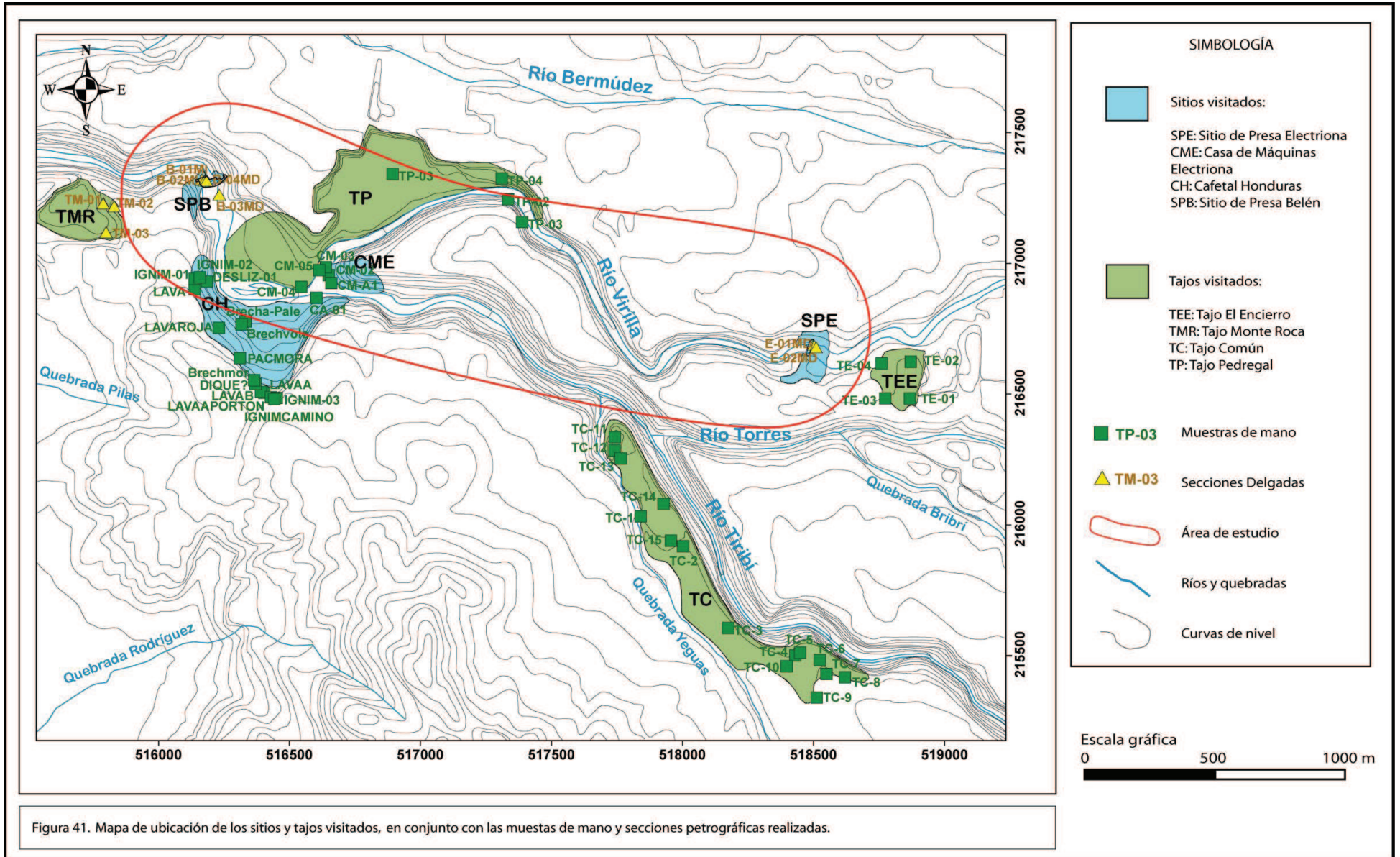
## **3.3 MODELO GEOLOGICO**

Los primeros mapas propuestos de la geología del área fueron realizados por Dondoli & Chaves (1968). Posteriormente en la década de los 80' varios autores realizaron cartografiados geológicos dentro del área de interés a diferentes escalas de mapeo, entre los que se encuentran Bergoing & Malavassi (1980), Echandi (1981), Denyer & Montero (1988), y Denyer & Arias (1990).

Los mapas geológicos más detallados realizados a escala 1:50000 sobre la Hoja cartográfica Abra, fueron efectuados por Echandi (1981), y Denyer & Arias (1990). A partir de estos mapas y con base en los registros litológicos de 108 pozos suministrados por SENARA e ICE, sumado a los levantamientos geológicos realizados en los tajos cercanos (Tajo PEDREGA S.A, Tajo Monte Roca, Tajo El Encierro y Tajo Común) y el acceso algunos sectores del cauce del Río Virilla, se generó un mapa de afloramientos y el mapa geológico del área de estudio (Figura 41, 42 y 43).

Para los sitios de Presa Electriona y Belén, se presenta un detalle de la geología correlacionada a partir de perfiles geológicos transversales sobre perforaciones cercanas y levantamientos geológicos, como se muestra en las Figuras 44 y 45 respectivamente.







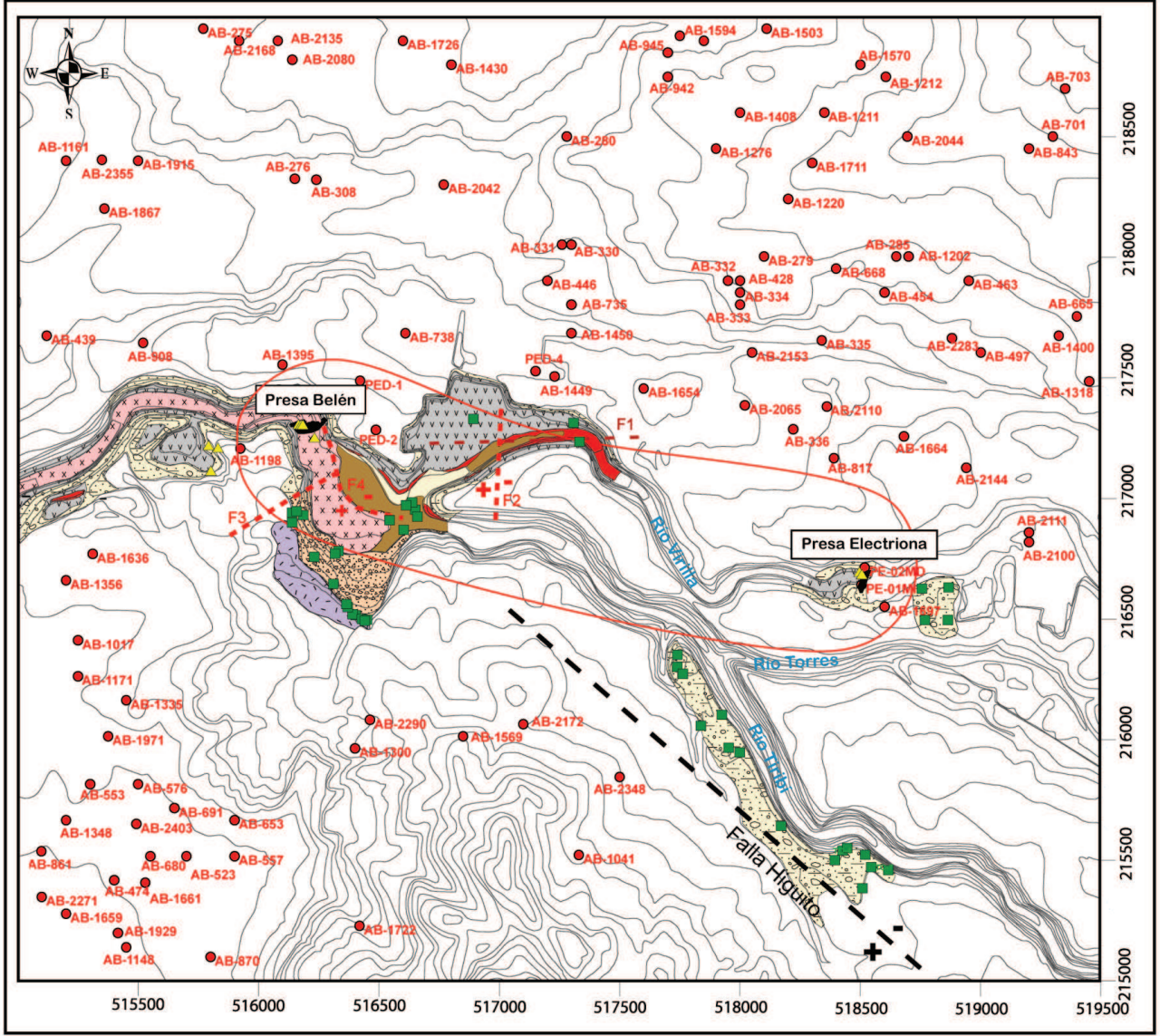
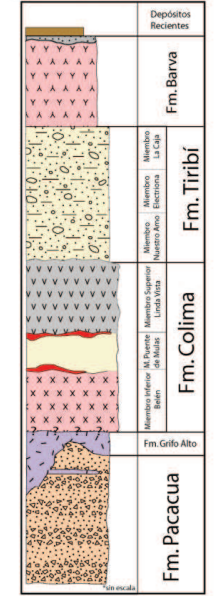


Figura 42. Mapa de afloramientos, obtenido a partir de los datos de levantamientos geológicos realizados en los diversos sitios visitados.



COLUMNA GEOLÓGICA REGIONAL



**SIMBOLOGÍA**

- F1 - Falla observada
- F2 - Falla inferida
- - - - - Falla propuesta (Denyer & Arias, 1990)
- + - Bloque sube
- - - - - Bloque baja
- ~ - Curva de nivel
- - Pozos SENARA 2011
- - Muestras de mano
- ▲ - Secciones Delgadas
- - Área de estudio

**SIMBOLOGÍA**

	Basamento sedimentario	Fm. Pacacua
	Lavas andesíticas diques y sills	Fm. Grifo Alto
	Lavas y brechas andesíticas basálticas	Colima Superior
	Paleosuelo Ignimbritas Paleosuelo	Miembro Puente de Mulas
	Lavas y brechas andesíticas basálticas	Colima Inferior
	Lavas y brechas andesíticas/andesíticas basálticas	Fm. Barva
	Cenizas y tobas	Fm. Tiribí
	Ignimbritas y tobas	Fm. Tiribí
	Coluvios y aluviones	Depósitos Recientes



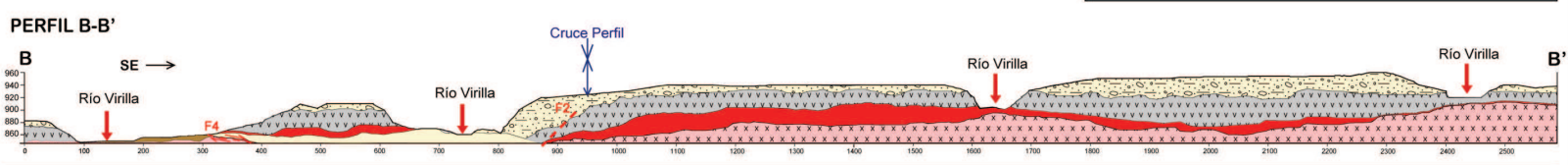
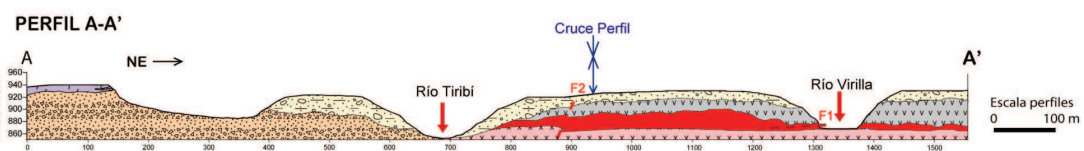
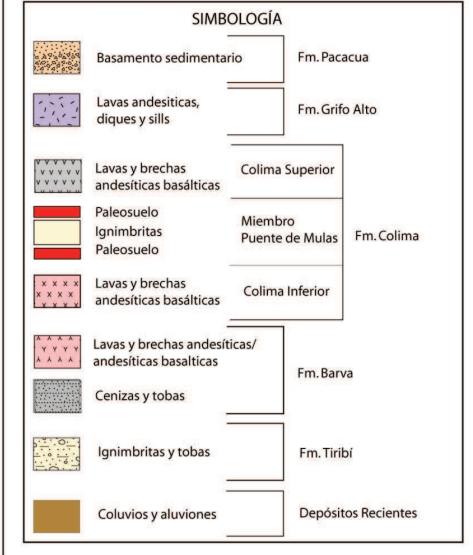
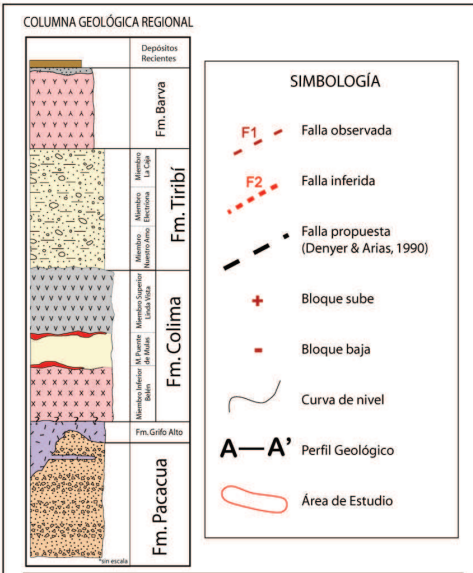
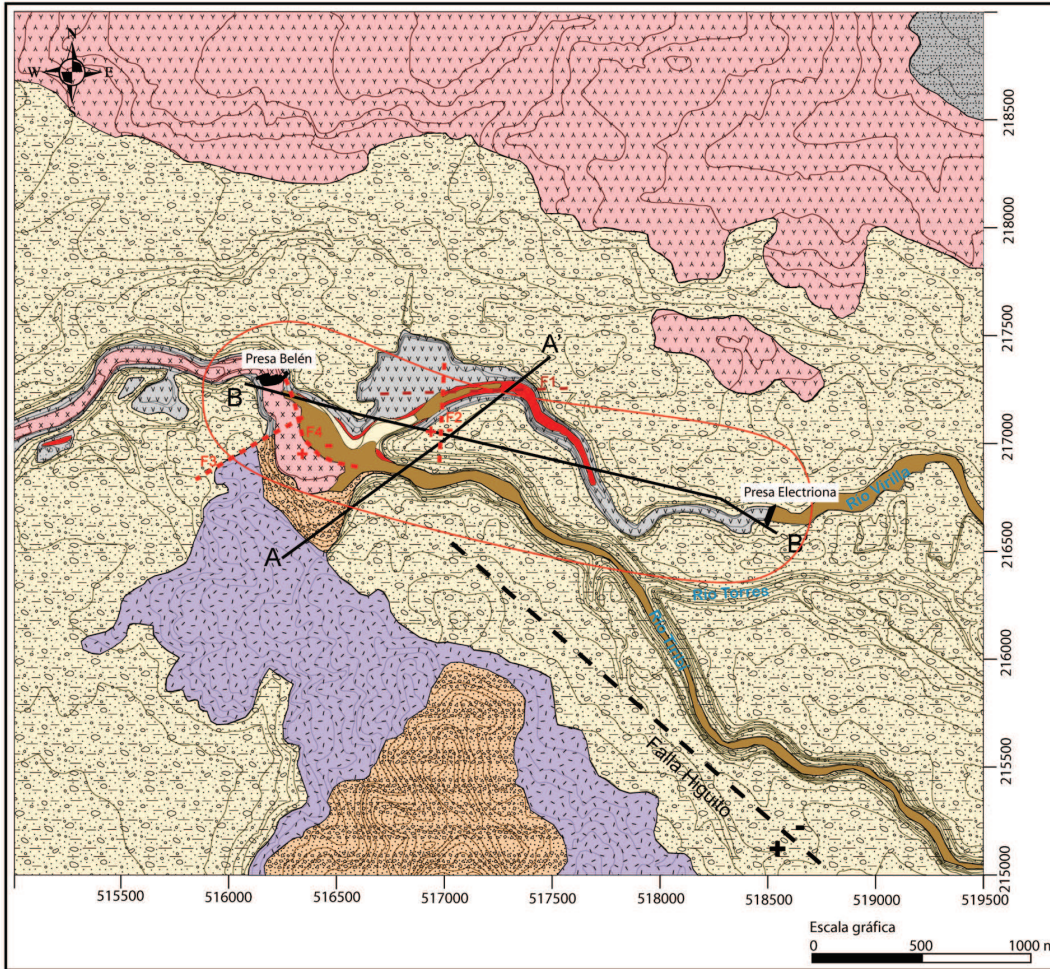
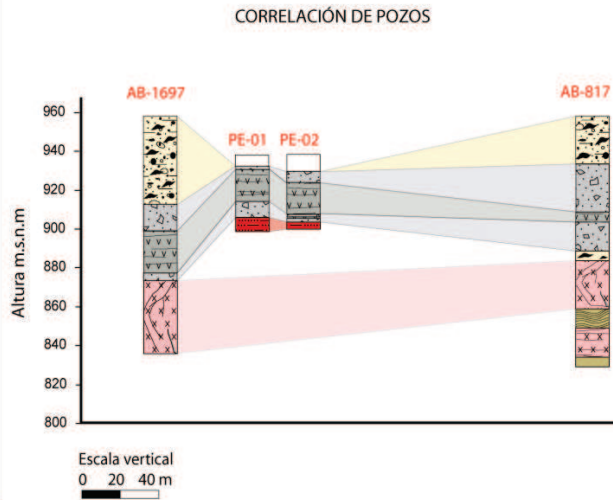
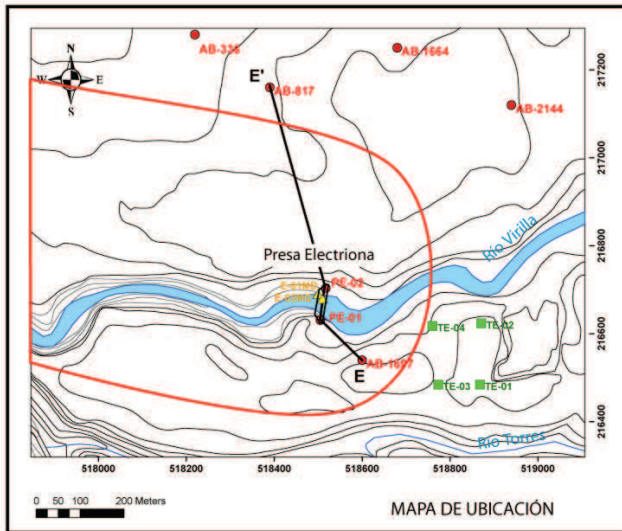


Figura 43. Mapa Geológico: obtenido a partir de los datos de pozos SENARA 2011, ICE 2010, levantamientos de campo 2010-2012, y mapas geológicos de Echandi (1981), Denyer & Arias (1990).





PERFIL GEOLÓGICO E-E'

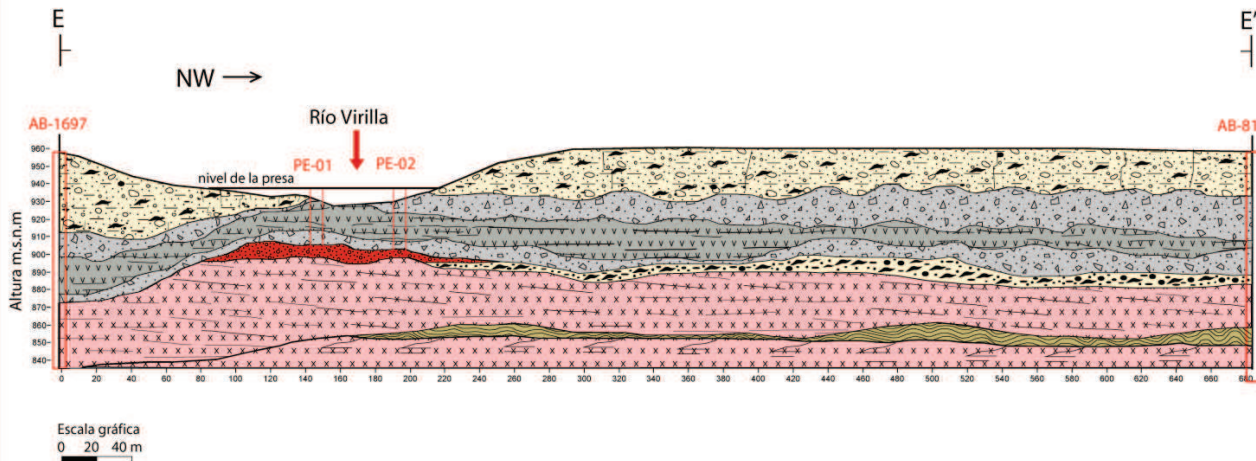
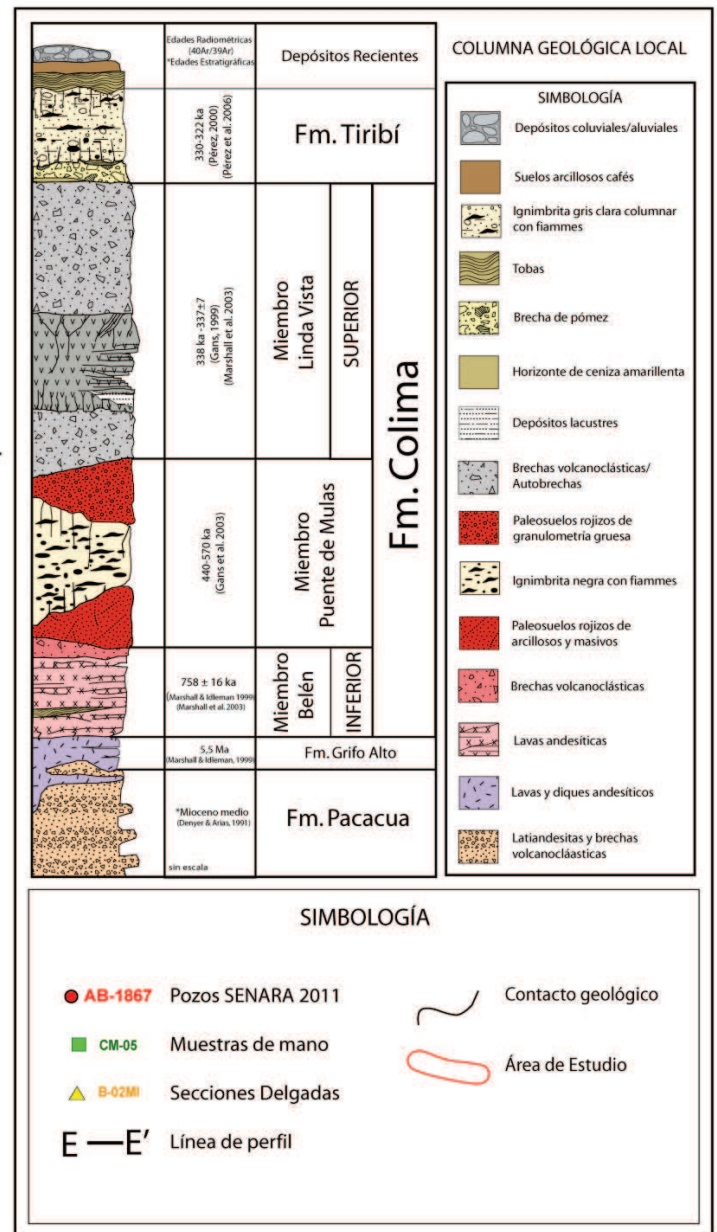


Figura 44. Perfil geológico detallado transversal al Sitio de Presa Electrónica E-E'



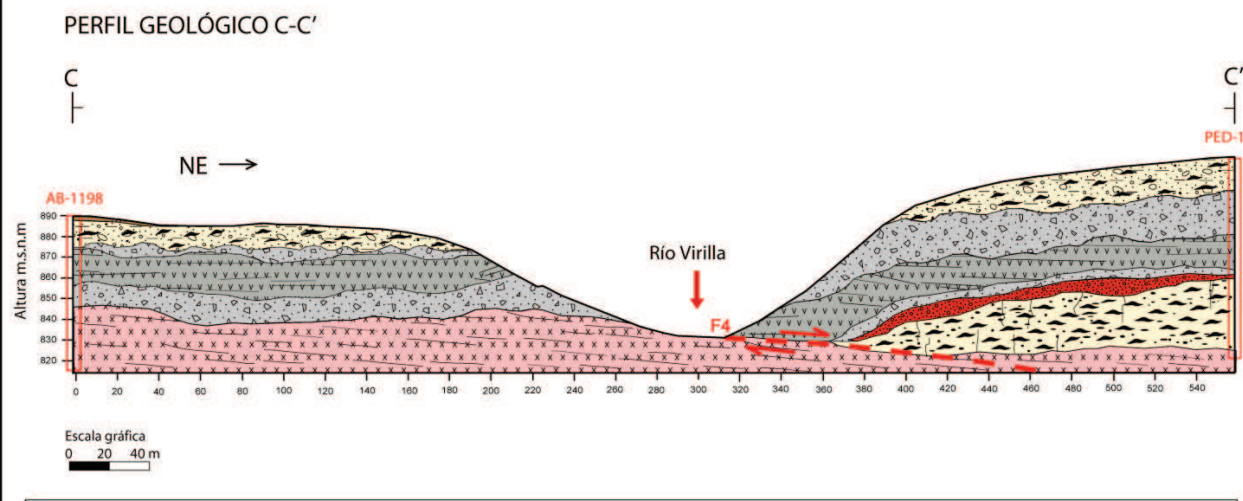
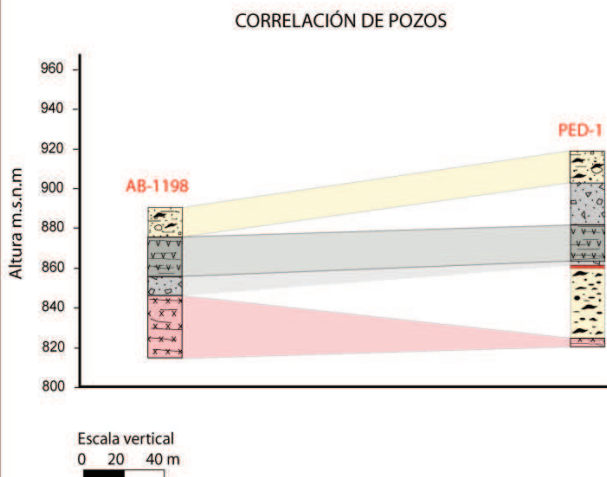
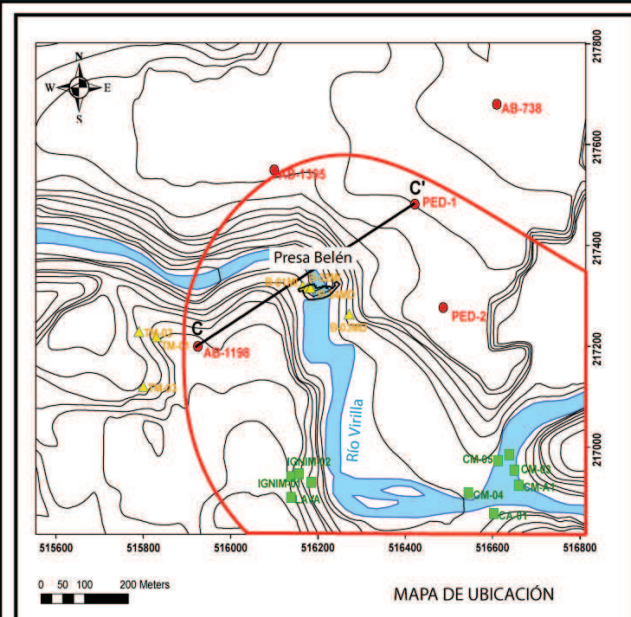
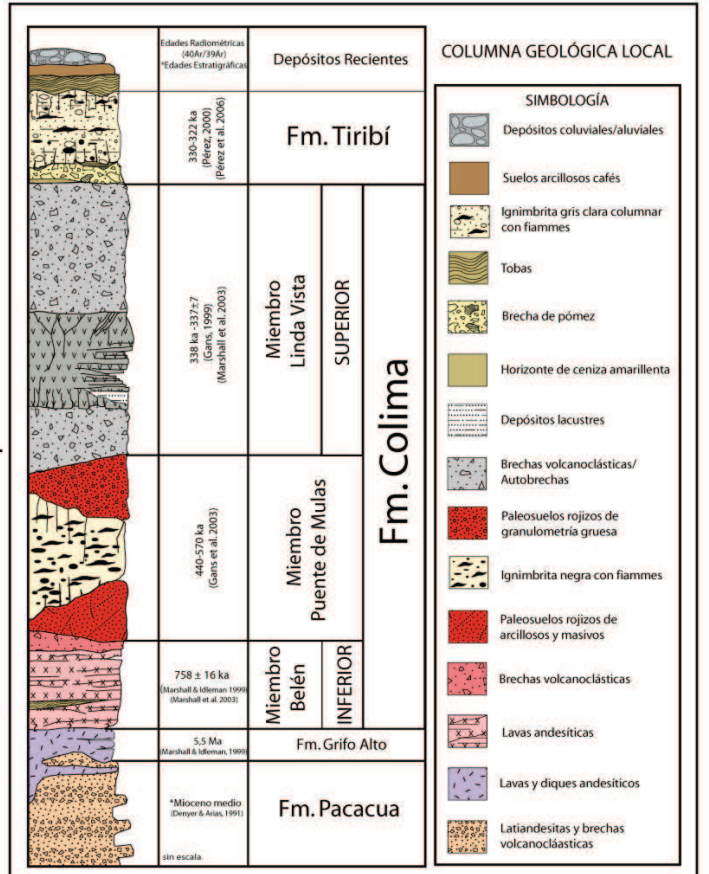


Figura 45. Perfil geológico detallado transversal al Sitio de Presa Belén C-C'



## **CAPÍTULO 4. MARCO GEOFÍSICO**

### **4.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA DE LA GEOFÍSICA REALIZADA**

La mayoría de trabajos geofísicos realizados previamente dentro o cerca del área de estudio han estado a cargo del entonces Departamento de Geología, oficina de Geofísica del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). Trabajos adicionales más recientes han sido realizados por la empresa privada, e igualmente incorporados a la recopilación geofísica.

Los métodos aplicados en estos estudios geofísicos corresponden principalmente a refracción sísmica y microsísmica. Los trabajos realizados en estas zonas se aplicaron en áreas específicas de proyectos ya construidos o en etapas de Prefactibilidad, para el ICE y la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL).

La utilidad de obtener los valores geofísicos en zonas consideradas remotas con respecto al área de estudio, radica en que los datos obtenidos para litologías con características mecánicas similares o diferentes pueden considerarse como parámetros de comparación con los valores obtenidos mediante el presente estudio. A su vez permite asociar las velocidades de la onda longitudinal ( $V_p$ ) a litologías presentes en el área de estudio, y sobre las cuales no fue posible obtener el valor de la velocidad ( $V_p$ ) de forma directa, puesto que no se encontraban aflorando sobre los sitios en los que se realizaron los perfiles de refracción sísmica.

A partir de la recopilación bibliográfica realizada, se determinó agrupar los estudios geofísicos realizados definieron cinco principales proyectos de interés: (Figura 46)

- 1) Proyecto Hidroeléctrico Ventanas-Garita
- 2) Proyecto Hidroeléctrico Virilla
- 3) Proyecto Hidroeléctrico Brasil
- 4) Proyecto Hidroeléctrico Belén
- 5) Proyecto Hidroeléctrico Electriona



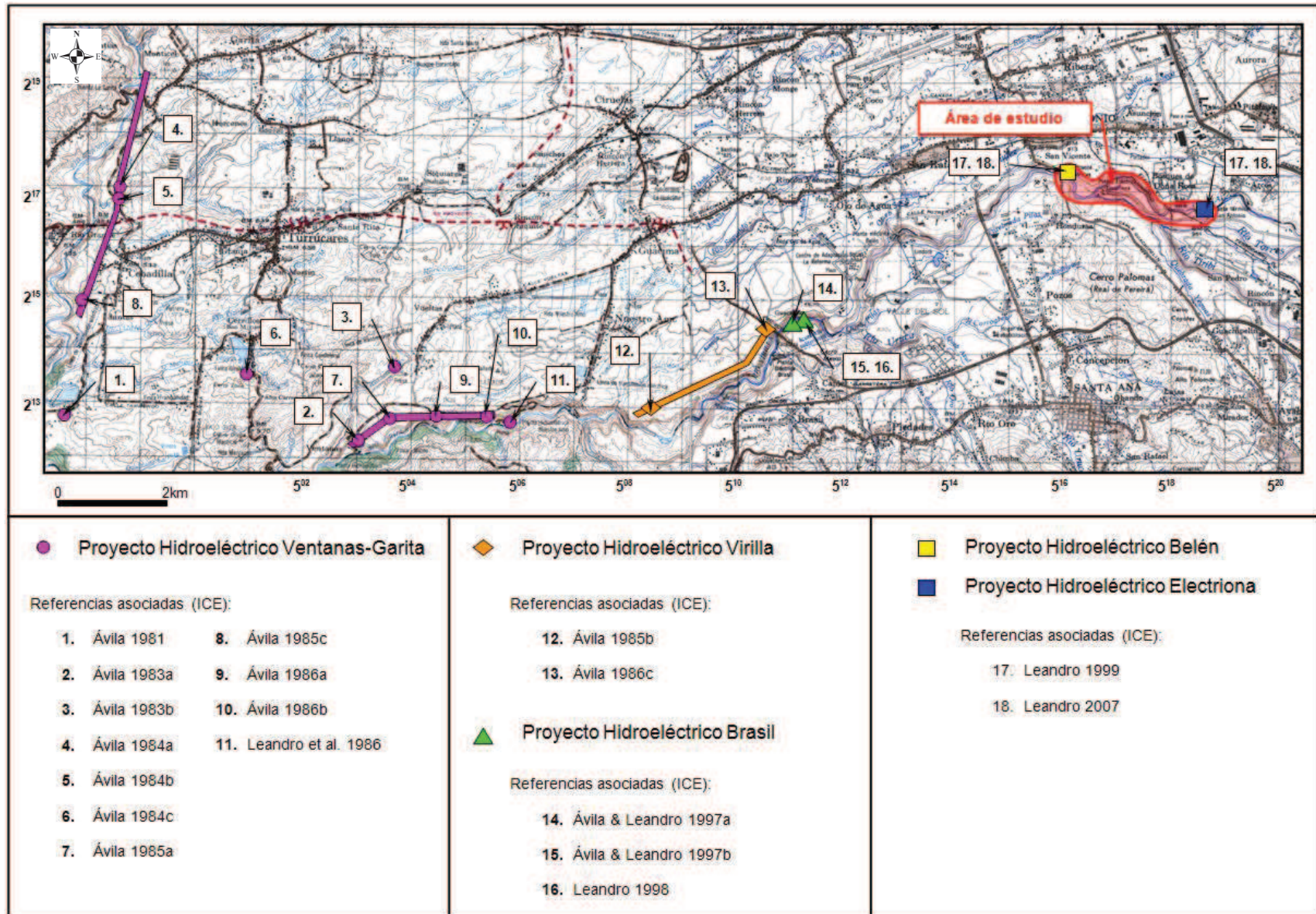


Figura 46. Ubicación de los trabajos geofísicos realizados en proyectos cercanos al área de estudio.

#### **4.1.1 P.H. VENTANAS-GARITA**

A partir de la década de los 80' el ICE inician una serie de estudios geofísicos asociados a diferentes sectores del P.H. Ventanas Garita. Dichos estudios se distribuyen en diferentes zonas de interés dentro del proyecto como lo son: Tubería Forzada, Tanque de Oscilación, Desarenador, zonas de Trincheras, la Línea de Túnel, Zona de intersección de Túneles, Sitio de Toma, Sitio de Presa; algunos de los cuales presentan un mayor detalle del trabajo geofísico, según hayan sido los objetivos planteados en cada sitio de estudio.

##### **4.1.1.1 Estudios de Refracción Sísmica**

El ICE realizó varios perfiles de refracción sísmica en diferentes sitios que comprenden el área del proyecto de P.H. Ventanas-Garita.

Inicialmente sobre la zona de la Tubería Forzada y el Tanque de Oscilación (T.O.), Ávila (1981), realiza cinco perfiles sísmicos, para determinar la calidad geomecánicas de los materiales en este sector del proyecto. Seguidamente Ávila (1983a), realiza investigaciones geofísicas en los sitios del Desarenador, y Línea de Túnel, en donde se efectuaron perfiles sísmicos, con el fin de determinar la calidad geomecánica de la roca de fundación, el espesor de la cobertura y la presencia de zonas de anomalías. Ávila (1983b) continúa los estudios geofísicos en el Sitio de Toma cerca del Río Ciruelas sobre la margen izquierda (M.I.), y detecta la presencia de tres capas sísmicas, el objetivo de dicho estudio es determinar la profundidad del basamento y las condiciones mecánicas de los materiales, los detalles de las capas y velocidades asociadas se muestran en el Cuadro 1.

Ávila (1984a, 1984b), efectúa una serie de estudios de refracción sísmica en la zona de intersección de túneles (PID) a lo largo del la Línea de Túnel, con el propósito de determinar las condiciones físicas de la roca en este tramo del túnel y evaluar el tipo de blindaje adecuado para este sector. A partir de dicho estudio se determina la presencia de tres capas sísmicas detalladas en el Cuadro 1.

Ávila (1985a), realiza estudios de refracción sísmica ubicada en la margen izquierda del Sitio de Presa, con el fin de determinar la profundidad a la que se localizaba la roca sana, y definir la longitud de los pernos para el anclaje de la cimentación de la presa. A partir de dicho estudio se determinó la existencia de tres capas sísmicas, descritas en la Cuadro 1.

Finalmente Leandro et al. (1986), realiza un estudio geofísico complementario en el Sitio de Presa sobre la margen derecha (M.D.) (Cuadro 1), integrando la refracción sísmica con la resistividad eléctrica, a fin de determinar la profundidad del basamento, el rumbo y la geometría de un paleocanal, así como la ubicación de estructuras geológicas importantes.

En el Cuadro 1, se resumen los trabajos geofísicos de refracción sísmica realizados en los diferentes sectores dentro del área del proyecto.



Cuadro 1. Resumen de los estudios geofísico realizados para el P.H. Ventanas-Garita (ICE).

P.H. Ventanas-Garita	Velocidades asociadas (km/s)	Litología asociada
Tubería Forzada y T.O. (Ávila, 1981)	0,3-0,5	Suelo poco compacto y drenado
	1,5-2,0	Suelo saturado y compactado
	0,7-1,3	Toba alterada
	1,8-2,0	Ignimbritas grises masivas
	2,8-4,3	Lavas sanas
Desarenador (Ávila, 1983a)	0,8-1,8	Material coluvial y suelos
	2,1-3,5	Basamento
Trinchera (Ávila, 1983a)	0,6-2,1	Toba lacustre
	2,0-2,8	Tobas y lavas
	0,9-1,15	Aglomerado volcánico
Zona de intersección de túneles (Ávila, 1984a,1984b)	0,3-0,4	Suelos
	0,6-1,4	Lava meteorizada
	1,5-3,1	Lavas sanas
Sitio de Toma Río Ciruela M.I. (Ávila, 1983b)	0,3-0,4	Suelos
	1,6-2,0	Lavas meteorizadas
	≈4,0	Lavas sanas
	—	Tobas arcillosas
Sitio de Presa M.I. (Ávila, 1985a)	0,5-0,9	Suelos y roca alterada
	1,0-1,3	Roca fracturada
	2,0-3,0	Lavas
Sitio de Presa M.D. (Leandro et al, 1986)	1,2-1,6	Grava sucia y limpia saturada Depósitos aluviales de grava limpia
	3,5-4,0	Basamento roca sedimentaria arenisca y conglomerados

#### 4.1.1.2 Estudios de Microsísmica

Los perfiles de microsísmica son igualmente estudios de refracción sísmica, con la diferencia de que los espaciamentos entre los geófonos son menores o iguales a los 5 m, logrando así que el detalle del contacto de capas refractoras superficiales sea más preciso.

Dentro de los estudios de microsísmica realizados para el P.H. Ventanas-Garita se encuentran el túnel de San Miguel (Avila, 1984c, 1985c), y varias Galerías del Sitio de Presa (Ávila, 1986a, 1986b), los cuales se realizan en la parte interna de los túneles y permiten caracterizar la calidad geomecánica de los materiales. En el Cuadro 2, se describen las velocidades así como la litología asociada a lo largo del túnel San Miguel.

Cuadro 2. Resumen de la microsísmica realizadas en el túnel San Miguel para el P.H. Ventanas-Garita (ICE).

<b>P.H. Ventanas-Garita</b>	<b>Velocidades asociadas (km/s)</b>	<b>Litología asociada</b>
<b>Túnel San Miguel (Ávila, 1984c)</b>	0,9-2,3	Areniscas trituradas y arcillas
	1,9-3,5	Areniscas de grano fino
	1,0-2,3	Lavas vesiculares en bloques y matriz arcillosa
	2,2-4,0	Lavas lajeadas sanas
	1,1-2,0	Lavas en bloque con matriz arcillosa
	2,4-3,6	Arenisca de grano fino y grueso
	1,1-2,1	Lavas vesiculares blocosas con matriz arcillosa
	1,4-1,6	Ignimbritas alteradas
	2,3-3,0	Arenisca de grano medio y grueso, lutitas.
	1,2-2,1	Conglomerados
<b>Túnel San Miguel (Ávila, 1985c)</b>	2,2-2,8	Arenisca de grano medio
	1,4-2,1	Areniscas y lutitas
	1,5-2,3	Zona contacto sedimentario intrusivo
	2,3-4,4	Intrusivo, lavas andesíticas
	2,5-3,5	Lavas andesíticas sanas
	1,2-2,1	Lavas andesíticas fracturadas y alteradas
2,2-3,2	Zona de fallas y lavas andesíticas sanas	

Los trabajos realizados en las galerías de exploración (Ávila, 1986a, 1986b), en la margen izquierda del sitio de presa P.H. Ventanas-Garita, se realizaron con el fin de determinar la zona descomprimida, así como la calidad geomecánica de la roca y homogeneidad del material. Las velocidades así como la litología asociada se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Resumen de la microsísmica realizada en las Galerías sobre la margen izquierda en el Sitio de Presa de P.H. Ventanas-Garita (ICE).

P.H. Virilla	Velocidades asociadas (km/s)	Litología asociada
Sitio de presa Galería M.I (Ávila, 1986a)	1,0-1,4	Lutitas y areniscas meteorizadas
	1,5-1,8	
	1,5-2,0	Areniscas y conglomerados semialterados
	2,4-3,2	Alternancia de conglomerados y areniscas de color gris
	1,4-1,6	Areniscas finas semi-alteradas
	2,6-3,0	Conglomerados sanos, con pátinas y vetillas de calcita
Sitio de presa Galería M.D (Ávila, 1986b)	2,0	Conglomerados sanos
	2,6-3,5	Areniscas finas a gruesas
	2,0-2,2	Areniscas finas
	1,8-2,4	Lavas grises meteorizadas, lajeadas y fracturadas
	2,3-2,5	areniscas medias a gruesas
	1,6-2,6	Conglomerados calcáreos

#### 4.1.2 P.H. VIRILLA

El P. H. Virilla fue un proyecto propuesto por el ICE en la década de los 80'. A pesar de que el proyecto no avanzó más allá de su etapa de Factilidad, los estudios geofísicos realizados, generaron una importante obtención de datos, que permitieron caracterizar las diferentes capas sísmicas asociadas a estas zonas.

##### 4.1.2.1 Estudios de Refracción Sísmica

Inicialmente Ávila (1985b, 1986c) realiza una vasta campaña geofísica para los diferentes sitios de obras que comprende el área del proyecto, integrando los estudios de refracción sísmica en las zonas alternativas para la localización de las diferentes obras.

En el Cuadro 4, se detallan los sitios de obras del proyecto P.H. Virilla, las diferentes capas geosísmicas obtenidas, así como la posible litología asociada.

Cuadro 4. Características geofísicas de los diferentes sitios que contempla el P. H. Virilla realizados por Ávila, 1986c (ICE).

P.H. Virilla		Nº capas	Velocidades asociadas (km/s)	Litología asociada
Sitio de Presa Río Virilla		Capa 1	0,5-1,0	Roca alterada o coluvio
		Capa 2	1,8-2,3	Roca sana, aglomerado volcánico
Embalse de Río Segundo		Capa 1	0,3-1,5	Suelo y rocas meteorizada
		Capa 2	1,7-2,3	Ignimbritas, tobas y lavas fracturadas
		Capa 3	2,5-2,7	Basamento local
Tubería de baja presión		Capa 1	0,3-0,5	Suelo residual
		Capa 2	0,6-1,2	Roca meteorizada
		Capa 3	2,0-2,9	Basamento local
Tubería de Presión	Alternativa nº 1. Nuestro Amo	Capa 1	0,4-1,3	Suelos compactos, coluvios y rocas meteorizadas
		Capa 2	1,8-2,2	Rocas sedimentarias
	Alternativa nº 2.	Capa 1	0,4-1,3	Suelos compactos, coluvios y rocas meteorizadas
		Capa 2	1,9-2,2	Rocas sedimentarias
Casa de Máquinas	Alternativa nº 1. Nuestro Amo	Capa 1	0,6-1,0	Material coluvial
		Capa 2		Rocas sedimentaria fracturada
		Capa 3	2,4-2,6	Rocas sedimentaria saturada
	Alternativa nº 2. Ventanas Garita	Capa 1	0,8-1,2	Material coluvial de bloques lávicos
		Capa 2		Rocas sedimentarias fracturadas o meteorizadas
		Capa 3		Rocas sedimentaria

#### 4.1.3 P.H. BRASIL

Los estudios geofísicos realizados en este proyecto se limitan a una sección final del túnel de conducción, con el fin de caracterizar este tramo del túnel para la colocación del revestimiento final del mismo. Estos trabajos se asocian a las obras de ampliación y mejoras que se le realizaron a la planta de Brasil en la década de los 90`.

##### 4.1.3.1 Estudios de refracción sísmica

Inicialmente Ávila & Leandro (1997a), realizan un perfil de refracción sísmica superficial y transversal a la línea de túnel, el mismo presenta una longitud de 120 m. Mediante este estudio se determinó la existencia de tres capas geosísmicas detalladas a continuación:

Cuadro 5. Resultados obtenidos del perfil de refracción sísmica trasversal al túnel de conducción (ICE).

Capas	Velocidad Vp (km/s)	Litología
Capa 1	0,2-0,3	Suelo poco compacto
Capa 2	0,4-0,7	Coluvios / Suelos compactos
	0,7-1,0	Roca meteoriza
Capa 3	2,3-3,5	Areniscas, lutitas y brechas verdes

##### 4.1.3.2 Estudios de microsísmica

Comprendido dentro del trabajo anteriormente mencionado, Ávila & Leandro (1997a), realizaron dos perfiles de microsísmica paralelos sobre las paredes laterales del túnel y a lo largo de un tramo de 120 m. Posteriormente en el mismo año Ávila (1997b) realiza la continuación de la microsísmica cubriendo una longitud de 615 m para completar el tramo final del túnel. Finalmente, Leandro (1998) realiza una microsísmica sobre parte de un tramo del túnel de conducción, el cual se traslapa sobre los perfiles anteriormente realizados, a fin de generar información para el diseño final del revestimiento del túnel. El Cuadro 6, resumen los resultados obtenidos en la microsísmica realizada dentro del túnel de conducción de P.H. Brasil.

Cuadro 6. Resumen de la microsísmica realizada en una sección final del túnel de conducción para el P.H. Brasil (ICE).

Túnel de Conducción	Secciones	Velocidad Vp (km/s)	Litología
Ávila & Leandro (1997a)	Sección 1	1,3-1,5	Roca meteorizada
	Sección 2	1,8-2,4	Roca fracturada
	Sección 3	2,8-3,4	Areniscas, lutitas y Brechas
Ávila (1997b)	Sección 1	1,8-2,3	Roca fracturada
	Sección 2	2,5-3,4	Areniscas, lutitas y brechas
Leandro (1998)	Sección 1	1,0-1,7	Roca fracturada
	Sección 2	2,8-4,0	Areniscas, lutitas y brechas

#### 4.1.4 P.H. BELÉN Y P.H. ELECTRIONA

Los estudios geofísicos relacionados a estos proyecto se asocian a sectores en los cuales se han generado problemas de estabilidad de laderas o bien a estudios relacionados directamente con la calidad estructural de los cuerpos de presa, a continuación se mencionan los trabajo de refracción sísmica realizados en varios sectores de dichos proyectos.

##### 4.1.4.1 Estudios de Refracción Sísmicas

Leandro (1999) realiza estudios geofísicos cerca del Sitio de Presa Electriona, con el objetivo de valorar un deslizamiento importante que se generó en la margen derecha del Río Virilla. Determinó la presencia de cuatro capas geosísmicas, resumidas en el Cuadro 7 (Leandro, 1999).

Cuadro 7. Resumen de las capas geofísicas determinadas por Leandro (1999), sobre el deslizamiento ocurrido en la margen derecha del Río Virilla.

Nº capas	Velocidades asociadas (km/s)	Litología asociada
Capa 1	0,3-0,4	Suelo
Capa 2	0,6-0,7	Coluvio
Capa 3	1,1	Roca alterada
Capa 4	3,0	Roca

Finalmente, Leandro (2007) realiza un estudio de tomografía sísmica sobre los cuerpos de presa en P.H. Electriona y P.H. Belén, con el fin de determinar las condiciones físico-mecánicas de ambas estructuras. No obstante el estudio no trasciende a la geología del sitio, sino a la calidad estructural de las presas.

#### 4.2 GEOFÍSICA REALIZADA EN AMBOS SITIOS DE PRESA

Para el presente estudio se realizó un estudio geofísico de refracción sísmica en los sitios de presa P.H. Electriona y P.H. Belén, localizados sobre el Río Virilla. El sitio de Presa Belén se encuentra separado 2,5 km aguas abajo del sitio de Presa Electriona. (Figura 47).

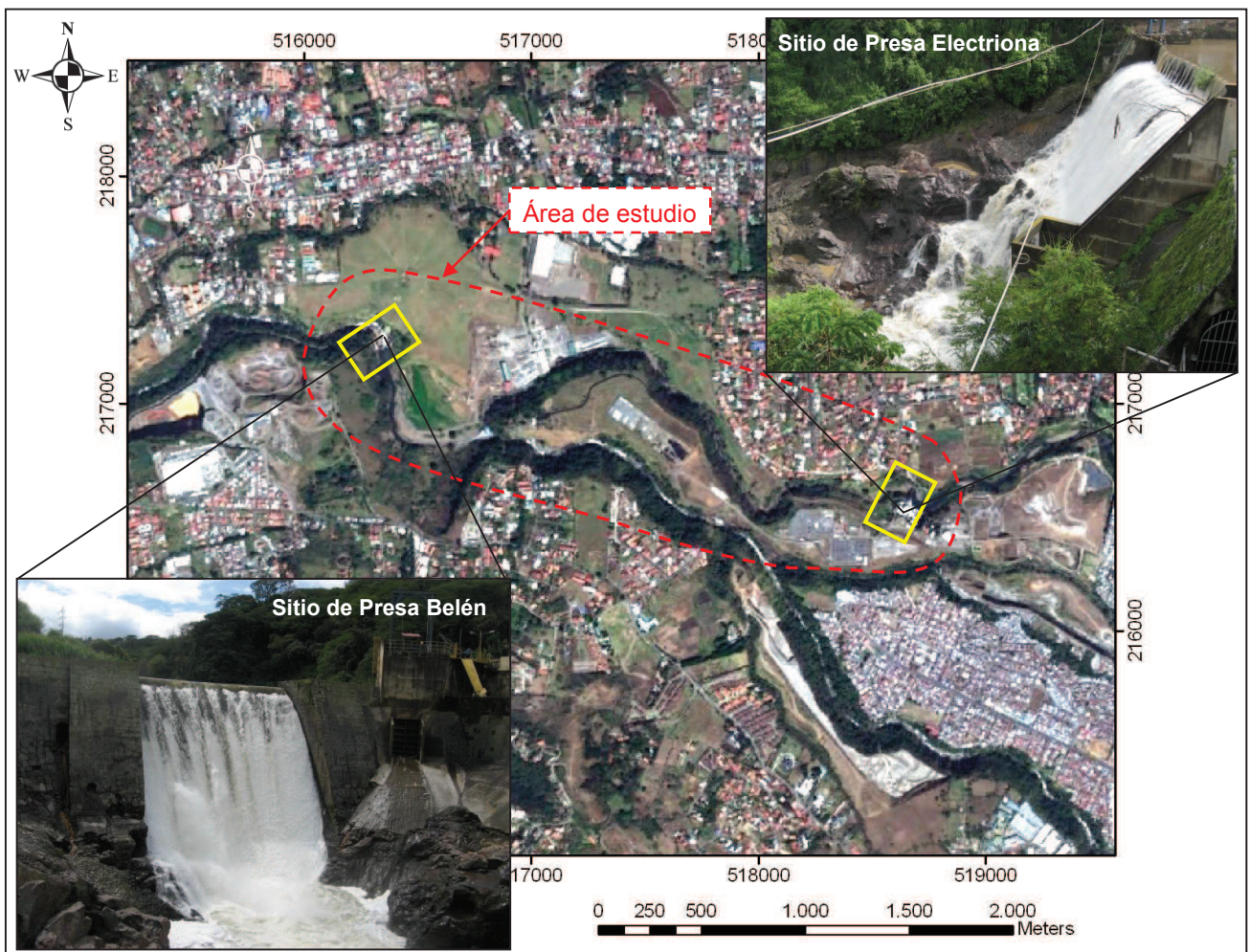


Figura 47. Ubicación de los sitios de Presa Electriona y Belén.



## 4.2.1 LOGÍSTICA DE CAMPO

### 4.2.1.1 Arreglo de campo

#### 4.2.1.1.1 P.H. Electriona

Se realizaron tres perfiles geofísicos en el sitio de Presa Electriona (Figura 48), dos de los cuales se distribuyen en forma lateral a la presa (Perfil 1 y 2) y uno transversal sobre la base de la presa (perfil 3).

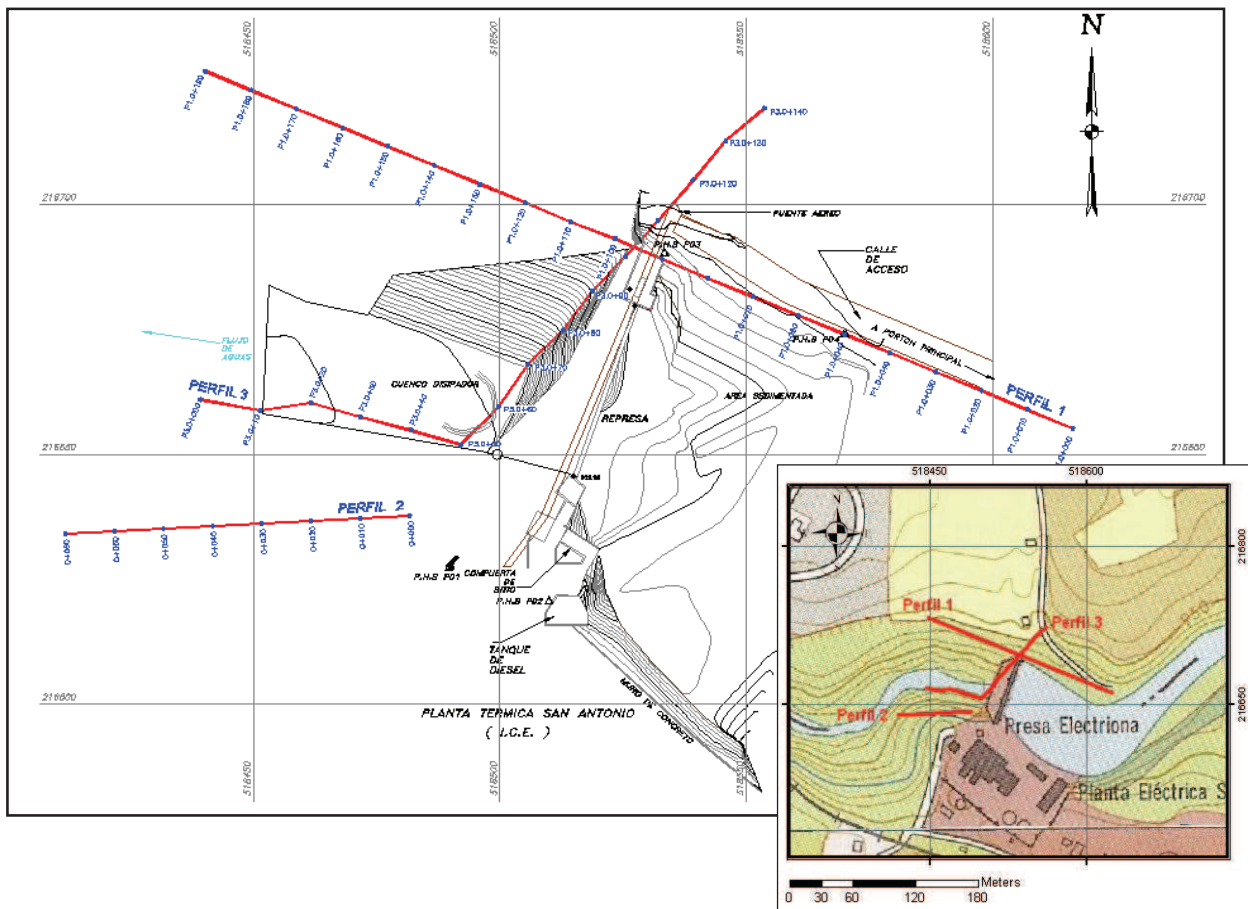


Figura 48. Ubicación de los perfiles sísmicos realizados en el sitio de presa P.H. Electriona.

Cada perfil sísmico está constituido de tres dispositivos sísmicos que corresponden a dos orillas y un centro, las orillas se ubican a 5 m del primer y último geófono del tendido, con geófonos distribuidos geoméricamente entre sí a una distancia de 10m.

**Perfil 1:** Se localiza en la margen derecha del sitio de presa (Figura 49) y presenta una longitud total de 190 m. Está constituido por 20 geófonos ubicados desde los estacionamientos 0+000 a 0+190. Las explosiones se localizaron con respecto al primer geófono ubicado en el 0 (estacionamiento 0+000) a -5, 95 y 195 m.



Figura 49. Perfil 1, margen derecha en sitio de Presa Electriona.

**Perfil 2:** Se localiza en margen izquierda del sitio de presa (Figura 50), y presenta una longitud total de 70 m. Está constituido por 8 geófonos ubicados desde los estacionamientos 0+000 a 0+070. Las explosiones se localizaron con respecto al primer geófono ubicado en el 0 (estacionamiento 0+000) a -5, 30 y 75 m.



Figura 50. Perfil 2, margen izquierda del sitio de presa Electriona.

**Perfil 3:** Se localiza de manera transversal al sitio de presa (Figura 51) y presenta una longitud total de 140 m. Está constituido por 15 geófonos ubicados desde los estacionamientos 0+000 a 0+140. Las explosiones se localizaron con respecto al primer geófono ubicado en el 0 (estacionamiento 0+000) a -5, 60 y 145m.



Figura 51. Perfil 3, transversal al sitio de Presa Electrónica.

#### 4.2.1.1.2 P.H. Belén

Se realizaron cuatro perfiles de refracción sísmica en el Sitio de Presa Belén, tres de los cuales se localizan de forma lateral a la presa y uno transversal sobre la base de la presa (Figura 52).

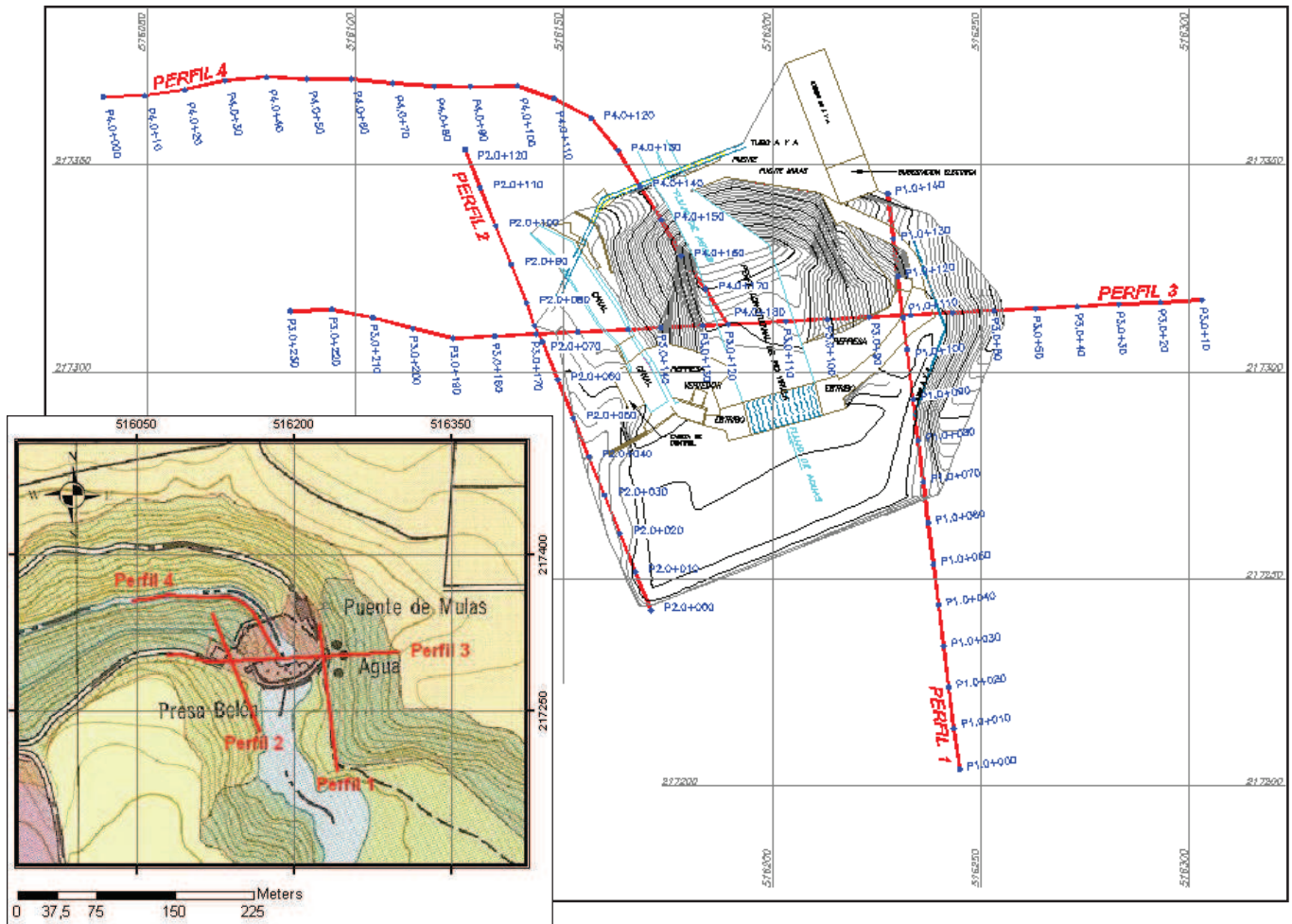


Figura 52. Ubicación de los perfiles sísmicos realizados en el sitio de presa del P.H. Belén.



**Perfil 1:** Se localiza en margen derecha del sitio de presa (Figura 53), y presenta una longitud total de 140 m. Está constituido por 15 geófonos ubicados desde los estacionamientos 0+000 a 0+140. Las explosiones se localizaron con respecto al primer geófono ubicado en el 0 (estacionamiento 0+000) a -5, 65 y 145 m.



Figura 53. Perfil 1, margen derecha del sitio de Presa Belén.

**Perfil 2:** se localiza en la margen izquierda del sitio de presa Belén (Figura 54), y presenta una longitud total de 120 m, está constituido por 13 geófonos ubicados desde los estacionamientos 0+000 a 0+120. Las explosiones se localizaron con respecto al primer geófono ubicado en el 0 (estacionamiento 0+000) a -5 m, 55 y 125 m.



Figura 54. Perfil 2, margen izquierda sitio de Presa Belén.



**Perfil 3:** Se localiza transversal al sitio de presa Belén (Figura 55), presenta una longitud total de 240 m. Está constituido por 23 geófonos ubicados desde los estacionamientos 0+000 a 0+240. Las explosiones se localizaron con respecto al primer geófono ubicado en el 0 (estacionamiento 0+000) a -5, 110 y 245 m.



Figura 55. Perfil 3, transversal al sitio de Presa Belén.

**Perfil 4:** Se localiza en la margen izquierda del sitio de presa Belén (Figura 56), y presenta una longitud total de 180 m. Está constituido por 19 geófonos ubicados desde los estacionamientos 0+000 a 0+180. Las explosiones se localizaron con respecto al primer geófono ubicado en el 0 (estacionamiento 0+000) a -5, 95 y 185 m.



Figura 56. Perfil 4, margen izquierda sitio de Presa Belén.

#### 4.2.1.2 Instrumentación

El equipo utilizado propiedad del ICE, consistió en un Strata Visor NX de 24 canales de la Casa Geometrics. Los geófonos presentan una frecuencia de 40 Hz y una resistencia de 375 ohm.

#### 4.2.1.3 Detonante

Se utilizó como fuente sísmica un explosivo amoniacal en gel de 3,5 kg por unidad, el cual fue detonado por fulminantes eléctricos nº 6, de baja sensibilidad y tiempo de retardo de 0 ms.

#### 4.2.2 PROCESAMIENTO DE DATOS

Los datos se procesaron con el programa Seislmager/2D, el cual es un paquete de software integrado para la interpretación, proceso y modelado de refracción sísmica, de la casa Geometrics de OYO Corp. Consiste en la incorporación de dos módulos correspondientes denominados Pickwin y Plotrefa.

El módulo Pickwin, se utiliza para realizar el procesamiento de las señales sísmicas o trazas. Permite manipular cada traza de forma independiente, “picar” el arribo de la onda P por traza (Figura 57); aumentar o disminuir la ganancia de la línea sísmica (variar la amplitud de la señal); corregir los tiempos de disparo, polaridad y filtro de la frecuencia sísmicas; y modificar la geometría del perfil sísmico.

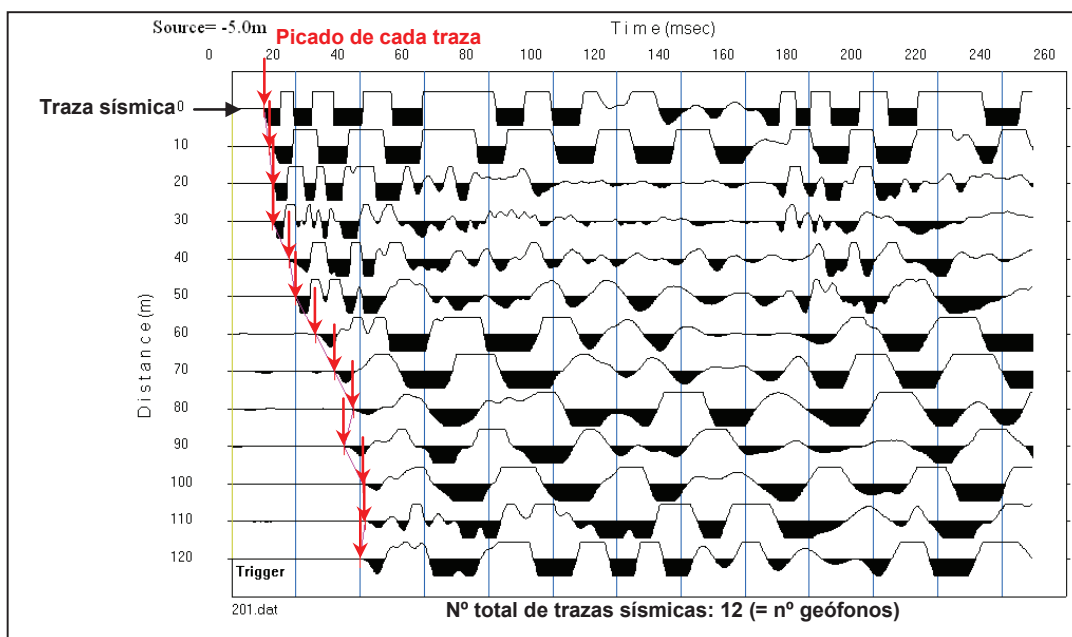


Figura 57. Dispositivo sísmico “picado”, corresponde a un tiro de orilla.

Una vez procesada la señal y determinados los tiempos de arribo de la onda P para cada uno de los tres dispositivos sísmicos o tiros (Figura 58) que constituye cada perfil sísmico, se genera la dromocrónica que posteriormente será utilizada en el siguiente módulo.

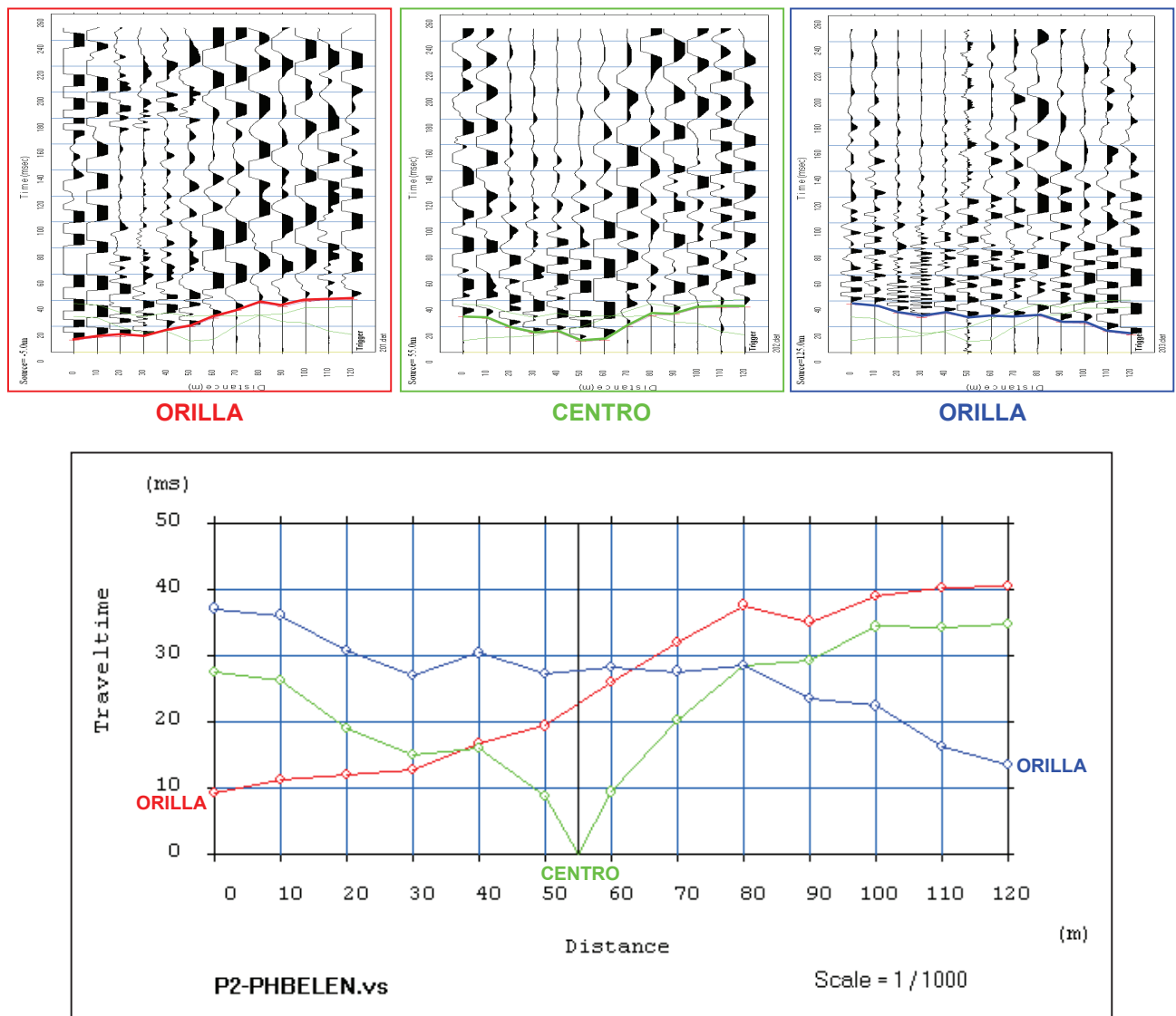


Figura 58. Dromocrónica obtenida a partir del “picado” de cada uno de los tres dispositivos sísmicos individuales que la componen.

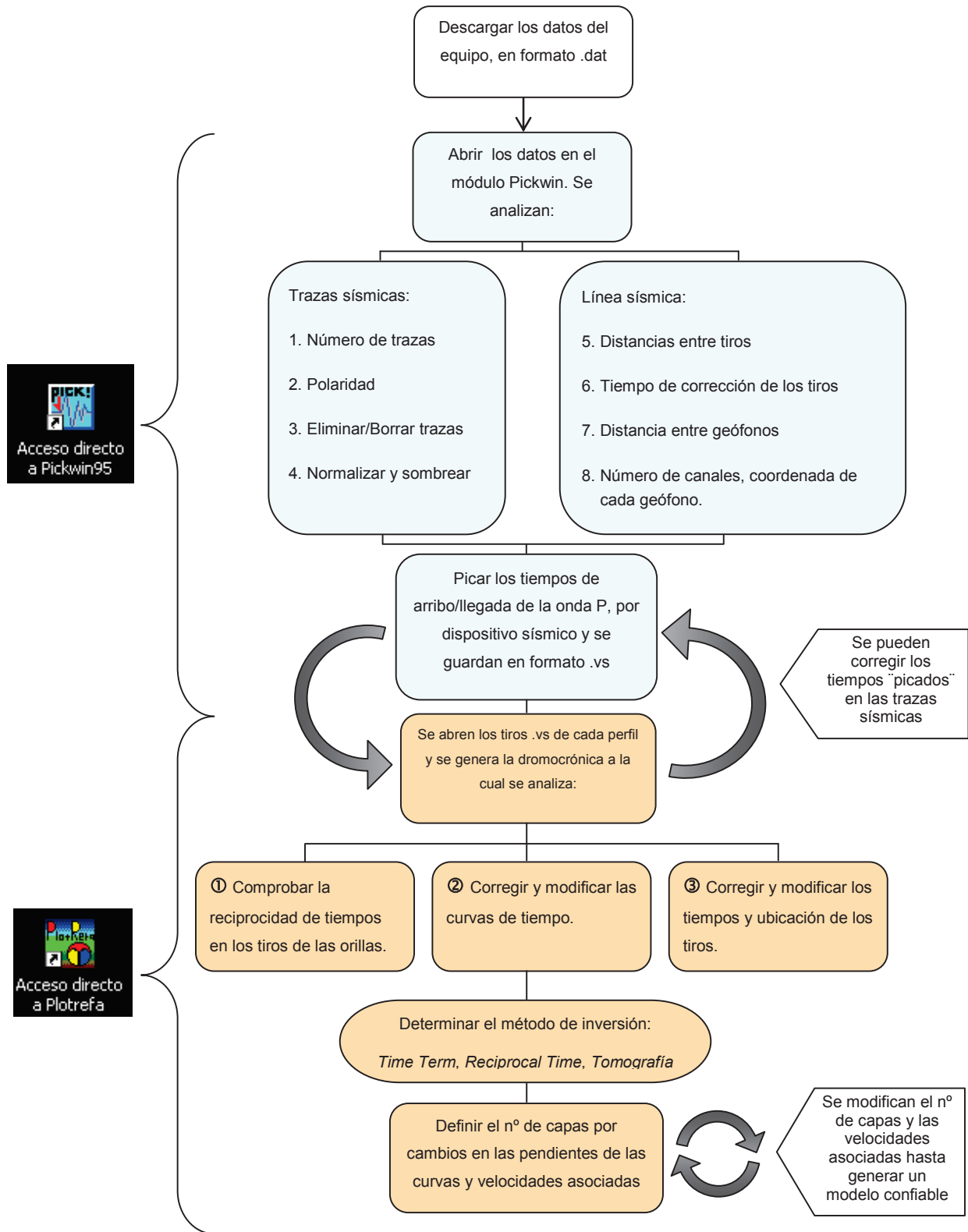
Con la tomografía definida se generan los perfiles de interpretación sísmica. Mediante el método de análisis de inversión se define el número de capas y las velocidades asociadas a las mismas, según sean los cambios en las pendientes asociadas a las velocidades.

El módulo *Plotrefa* contiene tres métodos de análisis de inversión los cuales son: (OYO Corp., 2004).

- Mínimos cuadrados (*Time-term*): genera un modelo de espesores y velocidades asociadas, combinando los mínimos cuadráticos lineales y los tiempos de retardo (*Delay times*) para invertir los primeros arribos de una sección de velocidad.
- Tiempos recíprocos (*Reciprocal Time ó Delay-Time*): es ideal para refractores con contactos subhorizontales.
- Inversión tomográfica: permite observar variaciones laterales de las velocidades a lo largo de un mismo refractor.

Según sean las condiciones geológicas del sitio de previo a la realización de los perfiles, se debe tomar en consideración cual de los métodos propuestos es más confiable para la generación del modelo geofísico.

A continuación se esquematiza el proceso de procesado e interpretación de los datos sísmicos utilizados en el presente estudio:





#### 4.2.3 METODOLOGÍA DE INTERPRETACIÓN

Para cada modelo de velocidades se utilizó el método de inversión *Time-term* sobre el cual se definen el número de capas visibles en las graficas de tiempo-distancia que conforma cada dromocrónica (Figura 59). El programa indica en cada modelo generado, un error asociado a la matriz de inversión de la RMS (*root mean square*) como parámetro de referencia para determinar si un modelo es aceptable. Valores de RMS  $\leq 1,5$  se consideran aceptables según OYO Corp., (2004).

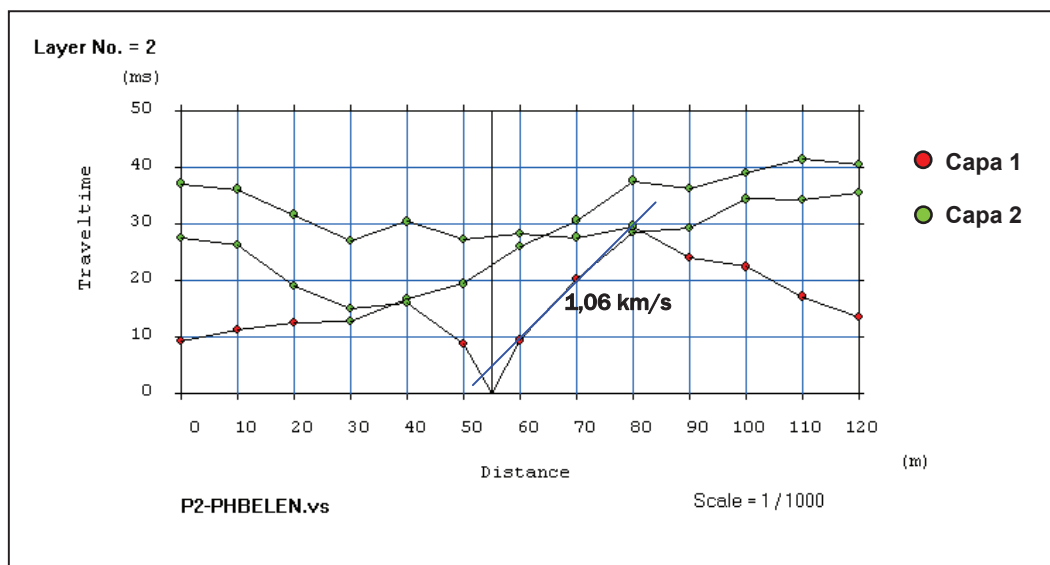


Figura 59. Modelo de 2 capas propuesto con el método de inversión *Time-term*, determinado mediante cambios en la pendiente de la curva distancia-tiempo de cada dispositivo.

Los otros dos métodos de inversión a utilizar en el programa *Plotrefa* (*Reciprocal Time* y *Tomography*) se descartan para la generación del modelado geosísmico debido a la diferencia en la reciprocidad de los tiempos máximos de arribo en cada orilla que conforman las dromocrónicas. Esta diferencia se asocia parcialmente a las irregularidades topográficas de cada perfil propuesto y a las posibles variaciones laterales existentes en la geología del área. Según OYO Corp (2004) las diferencia de reciprocidad en los tiempos máximos de arribo de la onda, no debe ser mayor al 5%. En el caso de que este parámetro no se cumpla no es aceptable aplicar el método *Reciprocal Time*. Por otro lado, para que el método *Reciprocal Time* sea efectivo se deben considerar dispositivos sísmicos compuestos por 24 o más geófonos en los cuales los tiros realizados se localicen dentro de la línea sísmica. A su vez, el método de tomografía sísmica, según Dibiase (2005), requiere una densidad mayor de tiros o dispositivos realizados sobre una línea sísmica. Esto permite generar un modelo tomográfico confiable para delimitar las variaciones laterales en las velocidades de un refractor.

## 4.3 MODELADO GEOFISICO

### 4.3.1 SITIO DE PRESA ELECTRONA

Para el sitio de Presa Electriona, se realizó el siguiente análisis para cada uno de los tres perfiles realizados (Figura 60).

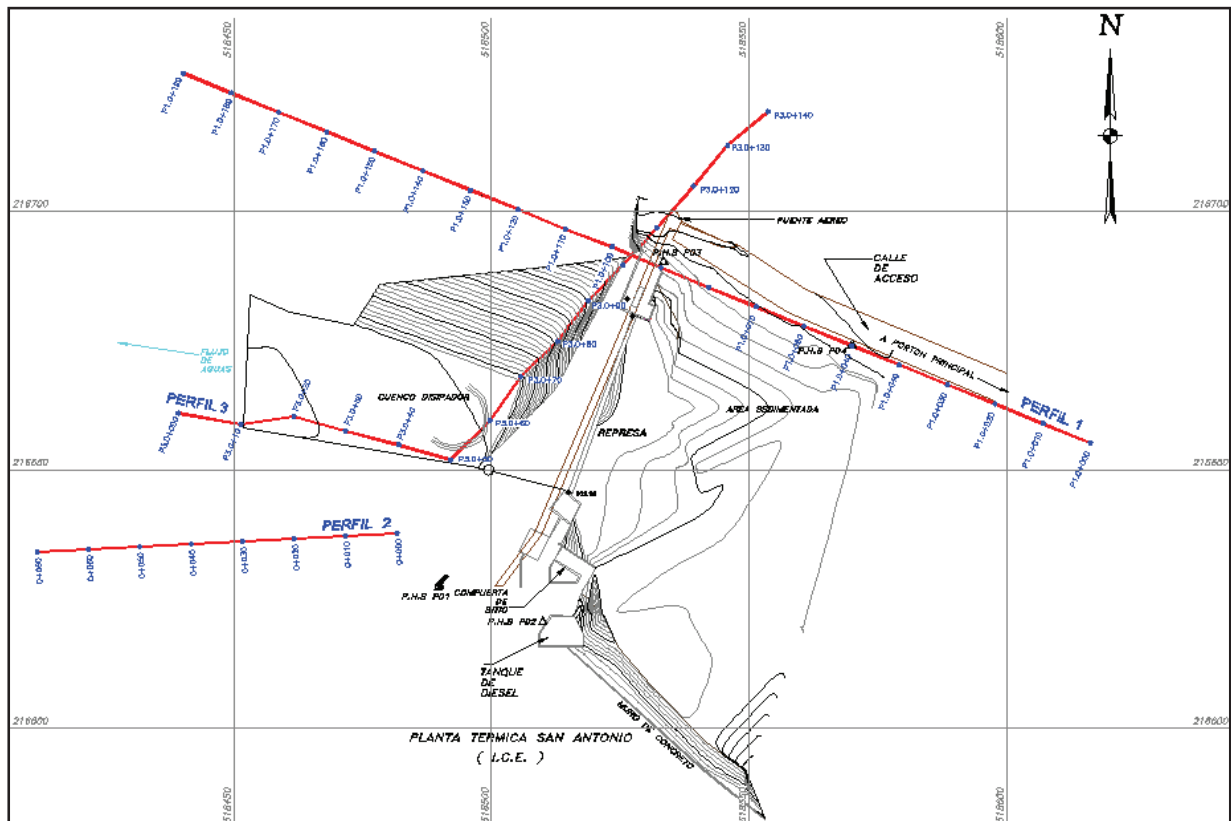


Figura 60. Ubicación de los 3 perfiles con respecto al eje de la Presa Electriona

#### A- Perfil 1, P.H. Electriona margen derecha (0+000 a 0+190)

Modelos de 2 capas método *Time-term*

$RMS = 2,0$

Se determinó la presencia de dos capas sísmicas, una superficial con velocidades de 0,9 km/s, asociadas posiblemente con suelos poco desarrollados y brechas volcánoclasticas saturadas con espesores que rondan los 5 a 20 m. Una segunda capa inferior que presenta velocidades de 3,3 km/s, asociadas a lavas andesíticas que afloran en la base del cañón, ambas litologías se asocian a la Formación Colima Superior (Figura 61).

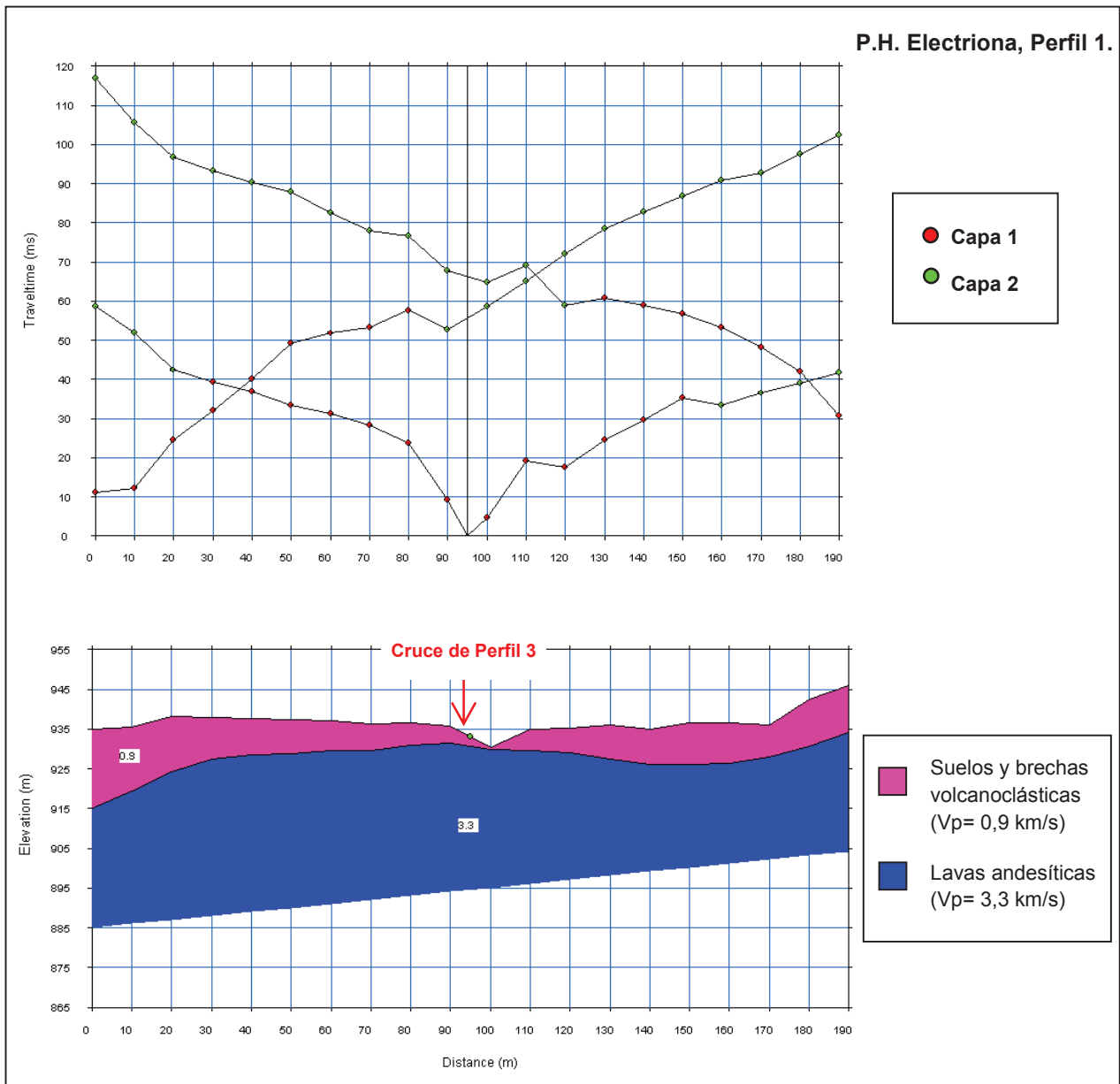


Figura 61. Perfil 1, dromocrónica y modelo Interpretación para 2 capas.

**B- Perfil 2, P.H. Electrona margen izquierda (0+000 a 0+080)**

Modelos de dos capas método *Time-term*

*RMS= 0,16*

Presenta dos capas sísmicas, una superficial con velocidades de 0,6 km/s, asociadas a suelos y materiales de relleno que presentan espesores que rondan los 5 a 10 m, y una capa inferior

con velocidades de 4,3 km/s, asociada con lavas andesíticas de la Formación Colima Superior (Figura 62).

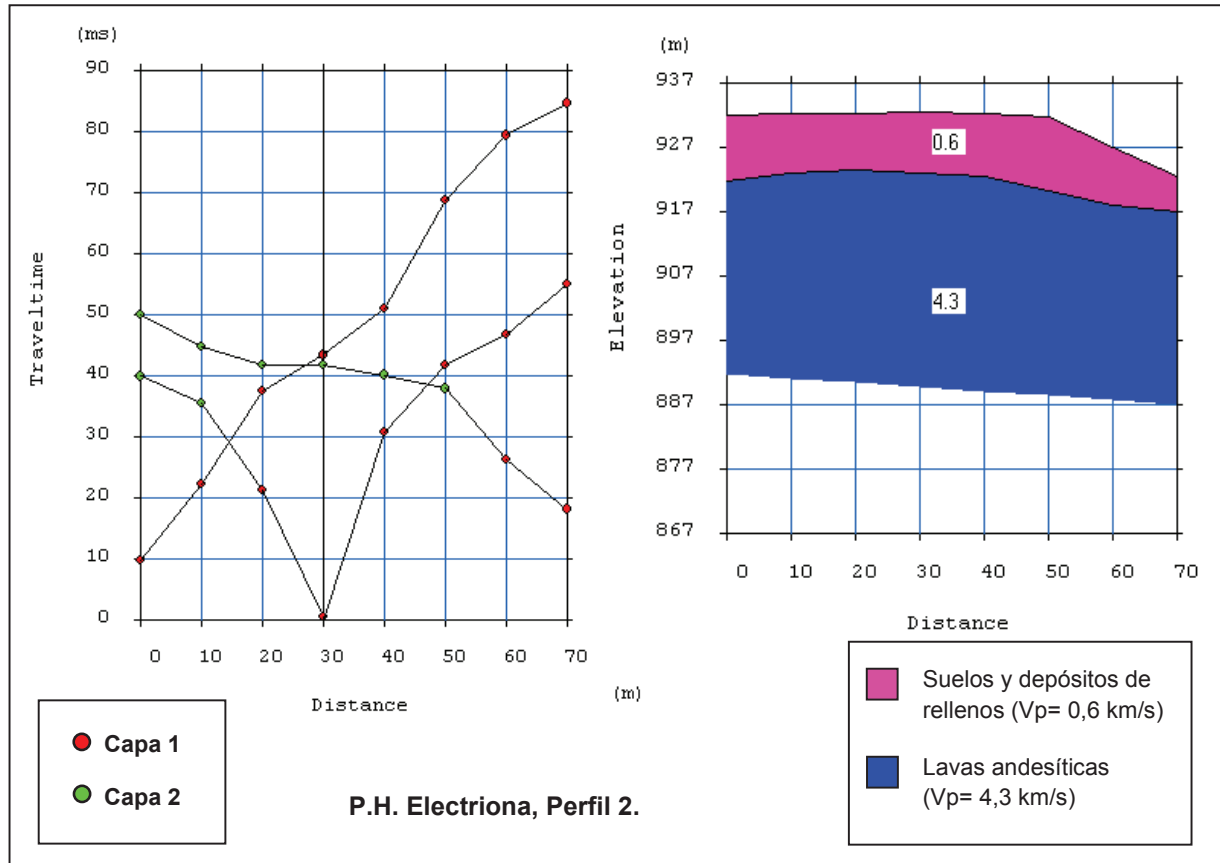


Figura 62. Perfil 2, dromocrónica y modelo interpretación para 2 capas

**C- Perfil 3, P.H. Electriona transversal al eje de presa (0+000 a 0+0140).**

Modelos de 2 capas método *Time-term*

*RMS=2,5*

La capa superficial con velocidades de 0,8 km/s se asocian las ignimbritas de la Formación Tiribí, cuyos espesores es alrededor entre 1 a 15 m. Geométricamente se observa un acuñamiento hacia el cañón del río. Las velocidades 3,5 km/s de la capa inferior se asocia con lavas andesíticas aflorantes en la base del Río Virilla, correlacionables con a la Formación Colima Superior (Figura 63).

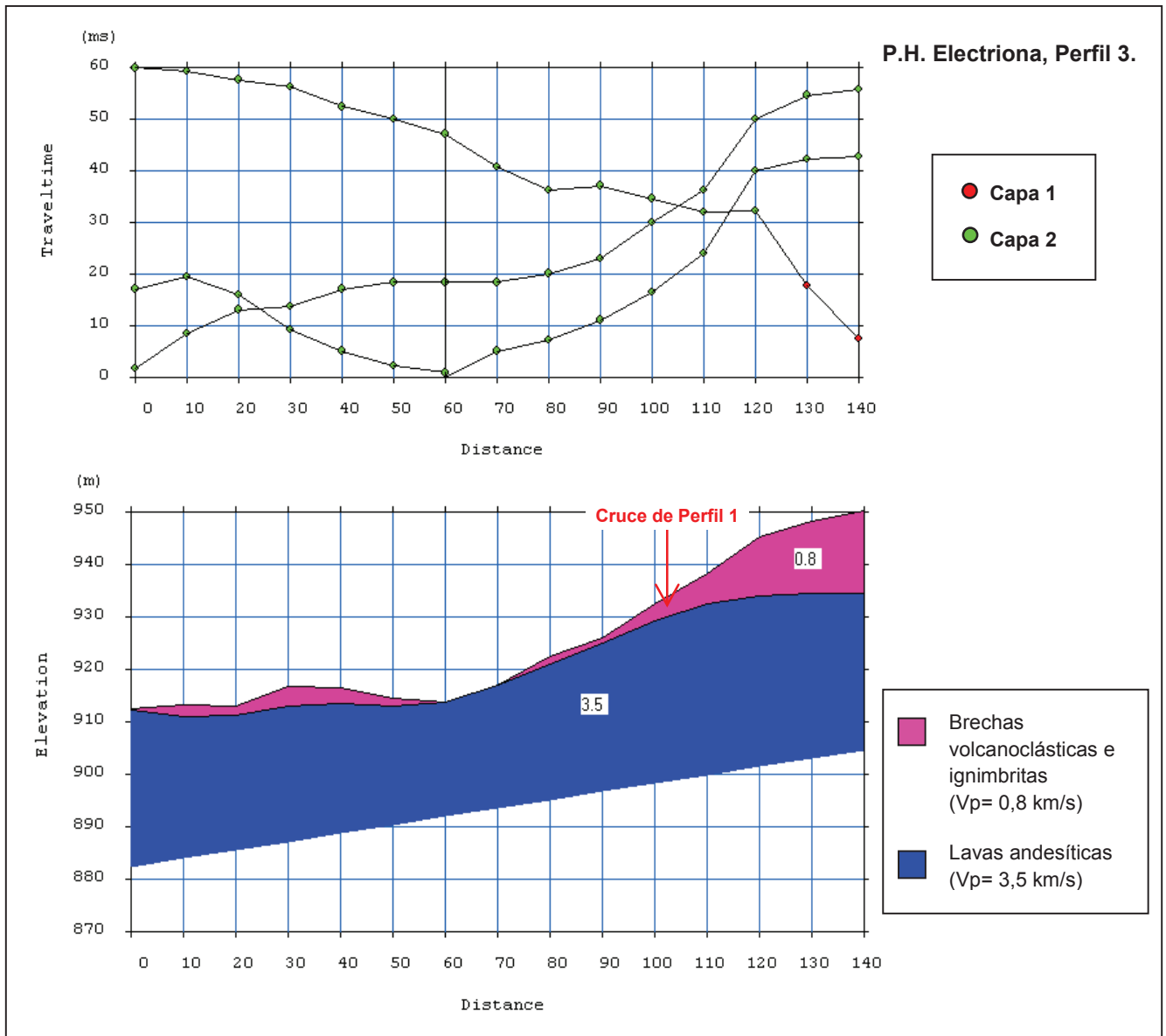


Figura 63. Perfil 3, dromocrónica y modelo interpretación para 2 capas



#### **4.3.2 COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO GEOLÓGICO Y GEOFÍSICO DE LOS PERFILES TRANSVERSALES AL SITIO DE PRESA ELECTRIONA**

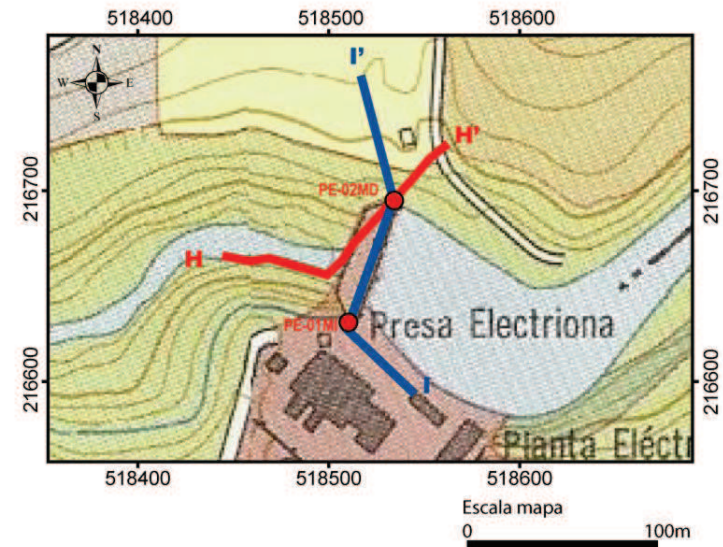
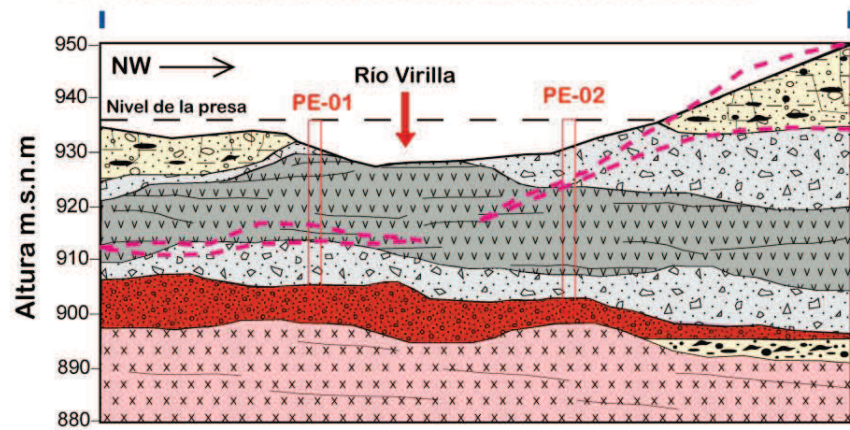
Los perfiles transversales tanto el geológico (Figura 44) como el geofísico (Figura 63), realizados en Electriona, muestran y corrobora, que los contactos propuestos para la capa superficial con velocidades de 0,8 km/s y espesores de 13 m, corresponden a ignimbritas, de la Fm Tiribí y parcialmente a las brechas volcanoclásticas de la Formación Colima Superior.

Las capas geológicas intermedias de bajas velocidades como los niveles de paleosuelo y brechas, no pueden ser observadas en el modelo geofísico debido a la limitación del método para detectar refractores de baja velocidad por debajo o entre refractores con velocidades superiores.

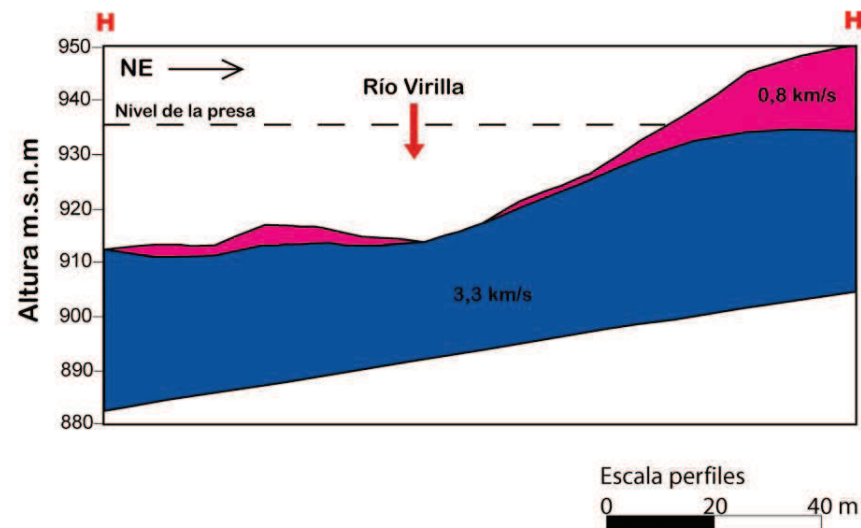
El contacto entre las capas geológicas y geofísicas, es muy similar en ambos perfiles, sin embargo el perfil geofísico abarca predominantemente las ignimbritas del perfil geológico dentro de la capa superior con velocidades ( $V_p$ ) de 0,8 km/s. Esto debido a que las brechas localizadas por debajo de las ignimbritas y sobre la margen derecha del sitio de Presa, presentan posiblemente un mayor grado de consolidación, lo que genera en el modelo geofísico un contacto más superficial que el propuesto en el perfil geológico (Figura 64).

La capa inferior con velocidades de 3,5 km/s, correlacionables con las lavas andesíticas de la Formación Colima Superior, muestra continuidad lateral tanto en el perfil geofísico como en el perfil geológico.

A- Perfil Geológico propuesto transversal al sitio de presa Electriona



B- Perfil Geofísico propuesto transversal al sitio de presa Electriona



SIMBOLOGÍA

- |  |   |  |   |
|--|---|--|---|
|  | Lavas andesíticas                           |  | Lavas andesíticas lajeadas                                      |
|  | Ignimbrita negra con fiammes                |  | Ignimbrita gris clara columnar con fiammes                      |
|  | Paleosuelos rojizos de granulometría gruesa |  | Lavas andesíticas $V_p = 3,3 \text{ km/s}$                      |
|  | Brechas volcanoclásticas/ Autobrechas       |  | Brechas volcanoclásticas e ignimbritas $V_p = 0,8 \text{ km/s}$ |
|  | PE-01                                       |  | PE-01MI Pozos   |
|  |   |  | Contacto geofísico de la capa superficial                       |
|  |   |  | Perfil Geológico  |
|  |   |  | Perfil Geofísico  |

Figura 64. Perfil geológico y geofísico transversal al Sitio de Presa Electriona.

### 4.3.3 SITIO DE PRESA BELÉN

Para el sitio de Presa Belén se realizó el siguiente análisis para cada uno de los 4 perfiles (Figura 65).

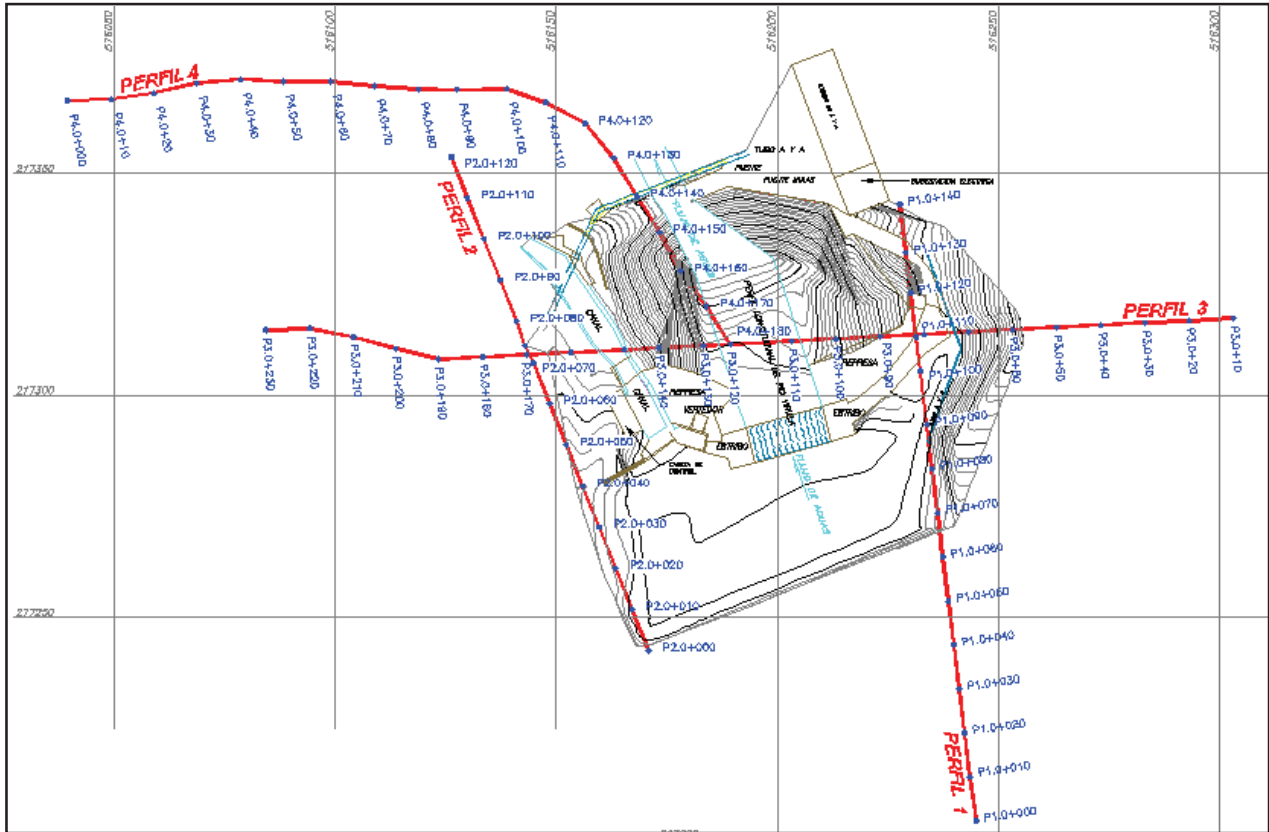


Figura 65. Ubicación de los cuatro perfiles con respecto al eje de la Presa Belén.

**A- Perfil 1, P.H. Belén margen derecha (0+000 a 0+140)**

Modelos de dos capas método *Time-term*

*RMS*= 2,0

Presenta dos capas sísmicas, la capa superior con velocidades de 0,3 km/s, corresponden con materiales de relleno depósitos aluviales y coluvios con espesores entre 1 a 5 m. La capa inferior con velocidades de 3,7 km/s, se asocian con lavas andesíticas de la Fm Colima Inferior, que aflora en la base del cañón del Río Virilla (Figura 66).

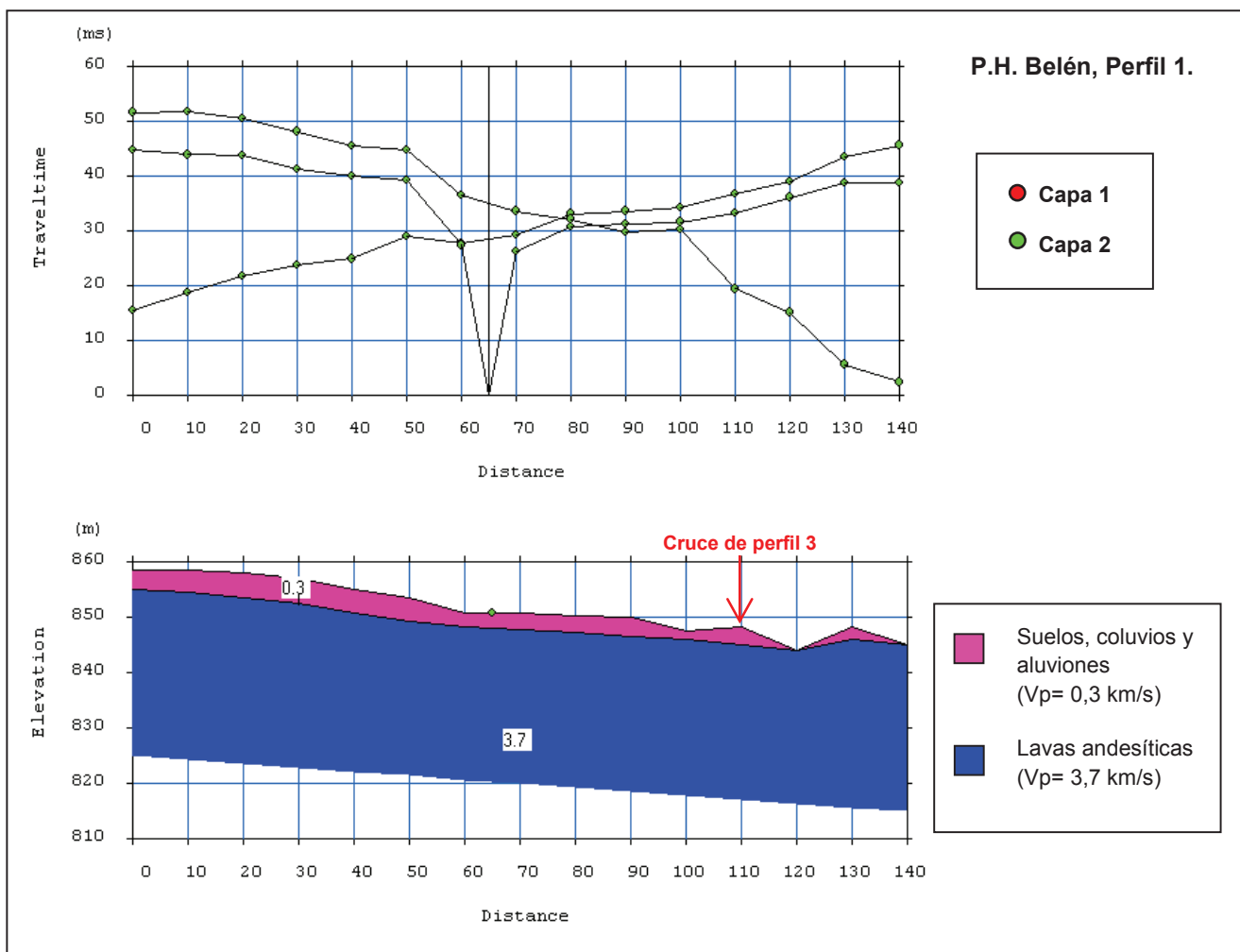


Figura 66. Perfil 1, dromocrónica y modelo interpretación para dos capas.

**B- Perfil 2, P.H. Belén margen izquierda (0+000 a 0+120)**

Modelos de dos capas método *Time-term*

*RMS= 0,92*

La capa superior con velocidades de 0,6 km/s, se asocia a brechas volcanoclásticas alteradas, cuyos espesores se estiman entre los 2 a 8 m. Correlacionables con la Formación Colima Superior. Las velocidades de 4,2 km/s de la capa sísmica inferior, se asocian con las lavas andesíticas de la Fm. Colima Inferior (Figura 67).

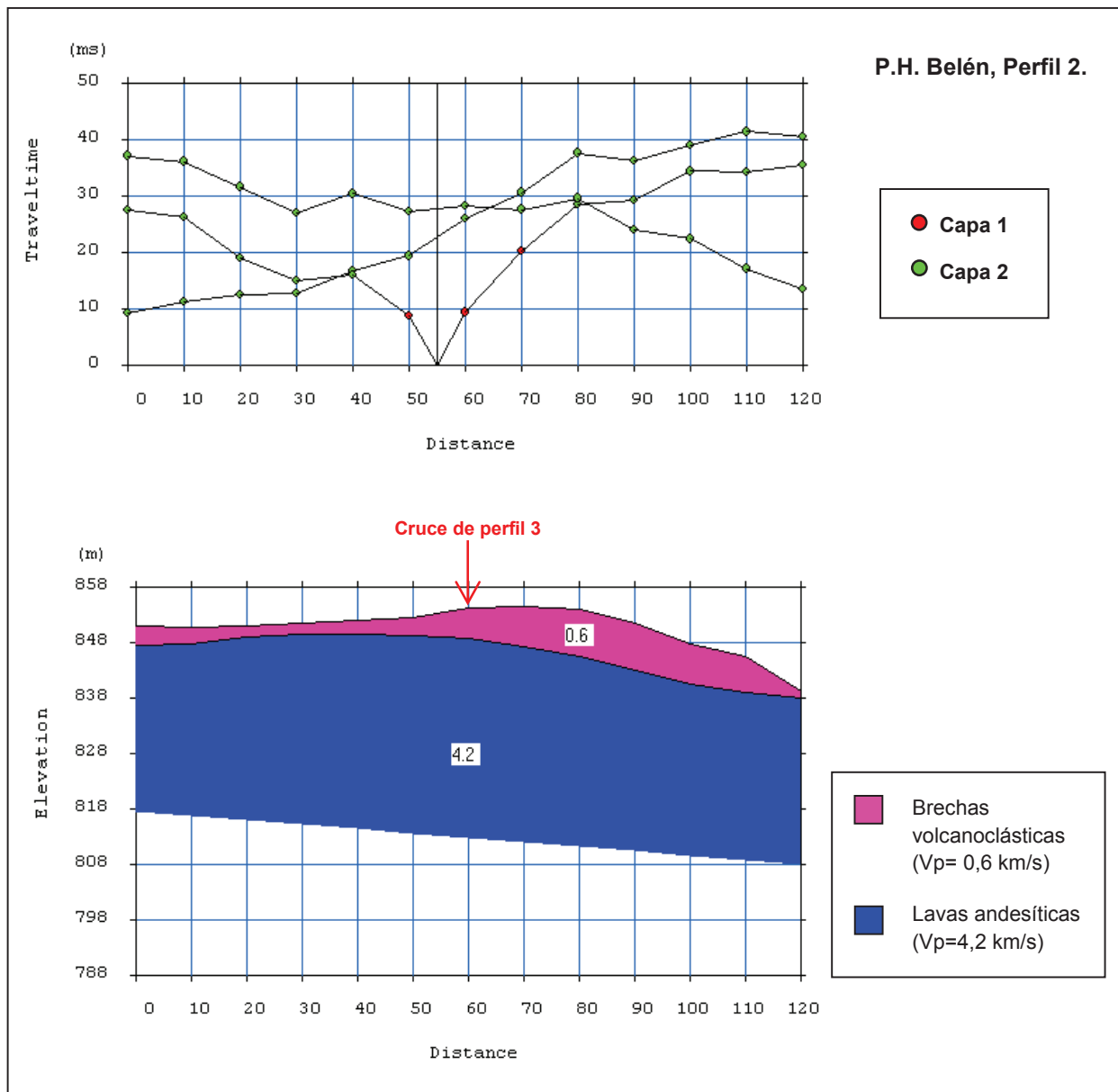


Figura 67. Perfil 2, dromocrónica y modelo interpretación para dos capas.



**C- Perfil 3, P.H. Belén transversal al eje de presa (0+000 a 0+240)**

Modelos de dos capas método *Time-term*

*RMS= 1,5*

La capa superior con velocidades de 0,9 km/s, se puede asociar con brechas volcanoclásticas de la Fm Colima Superior y con las ignimbritas de la Formación Tiribí, la agrupación de ambas litologías rondan espesores de 15 a 25 m. La capa sísmica inferior, con velocidades de 3,7 km/s, se asocia con las lavas andesíticas de Colima Inferior (Figura 68).

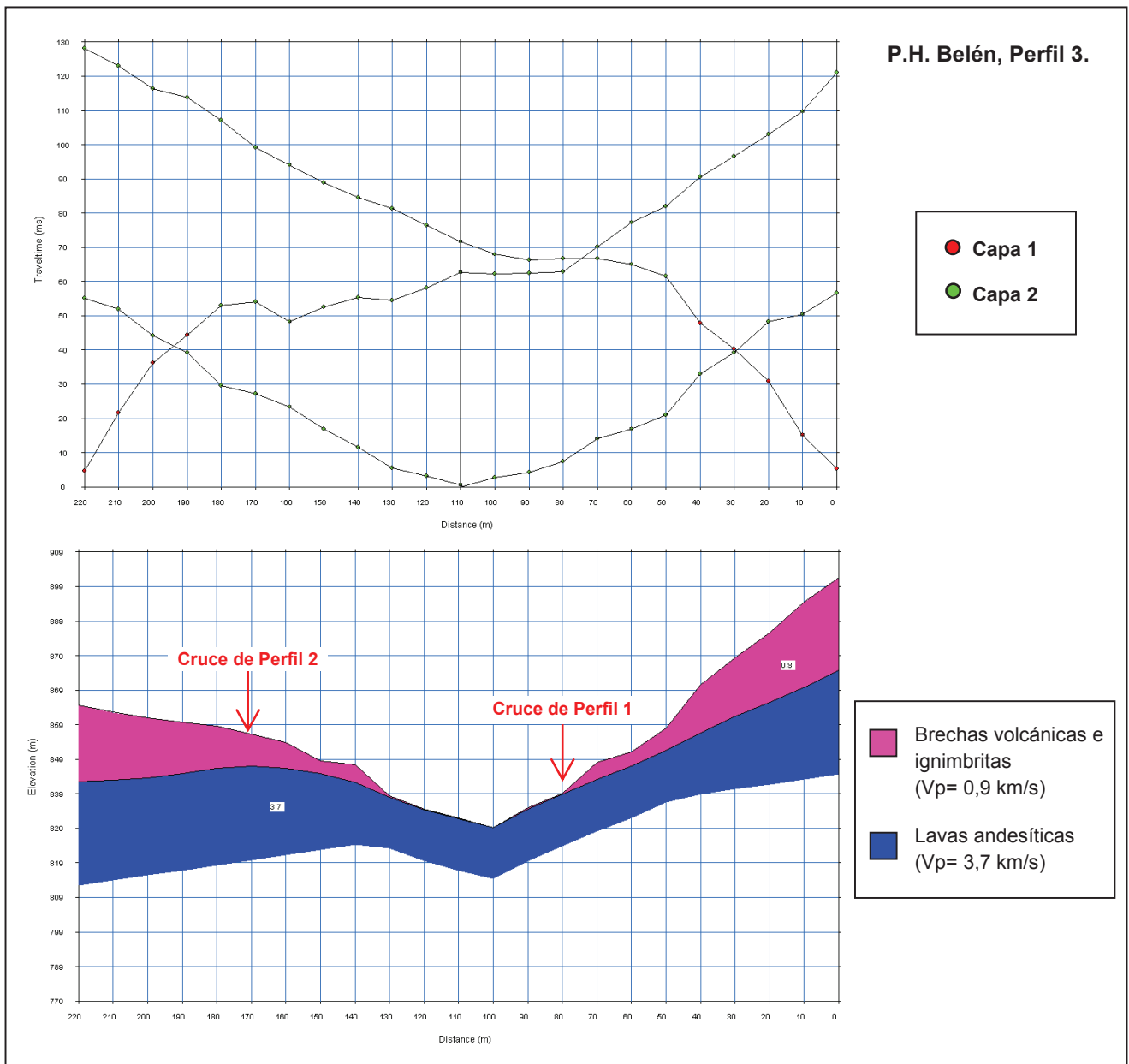


Figura 68. Perfil 3, dromocrónica y modelo interpretación para dos capas.

**D- Perfil 4, P.H. Belén margen izquierda (0+000 a 0+180)**

Modelos de 2 capas método *Time-term*

*RMS= 1,09*

Este perfil se realizó sobre las lavas de la Formación Colima Inferior, por lo que las velocidades superficiales de 1,6 km/s, se asocian eventualmente con lavas fracturadas, y las velocidades subyacentes de 4,8 km/s, con las lavas masivas más profundas (Figura 69).

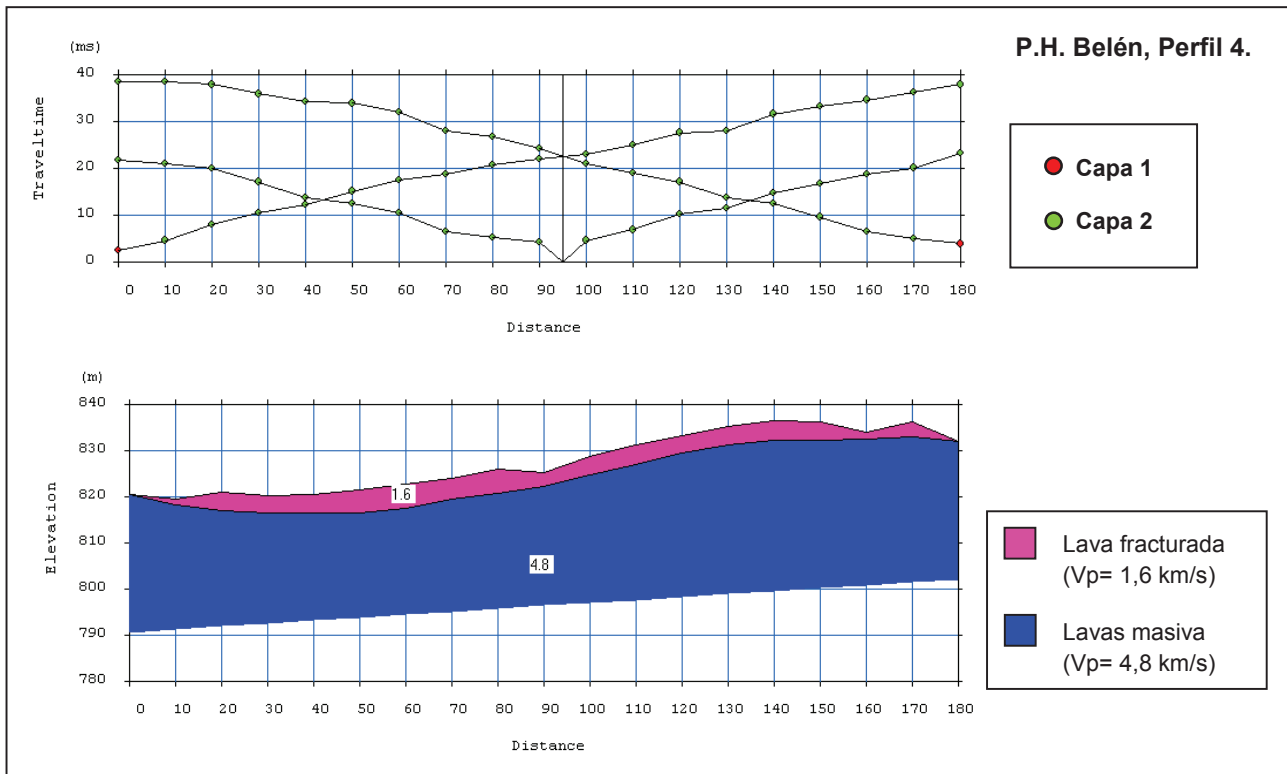


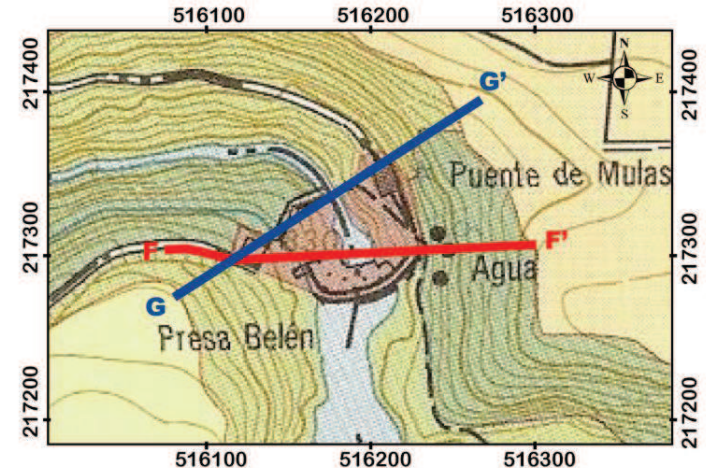
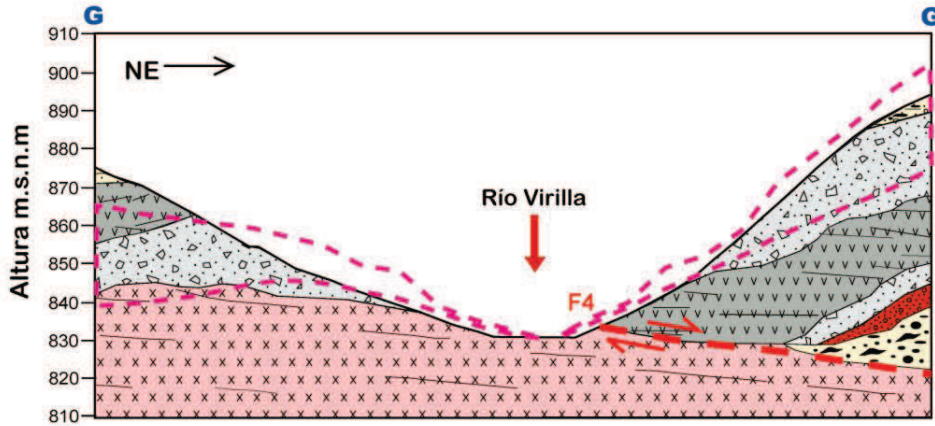
Figura 69. Perfil 4, dromocrónica y modelo interpretación para dos capas.

#### **4.3.4 COMPARACIÓN ENTRE EL MODELO GEOLÓGICO Y GEOFÍSICO DE LOS PERFILES TRANSVERSALES AL SITIO DE PRESA BELÉN**

El perfil geológico (Figura 45) y geofísico (Figura 68) transversal al sitio de presa Belén, muestran que la capa superficial del modelo geofísico con velocidades de 0,9 km/s y espesores que ronda los 25 m como máximo, se asocian a brechas volcanoclásticas e ignimbritas de las Formaciones Colima Superior y Tiribí respectivamente.

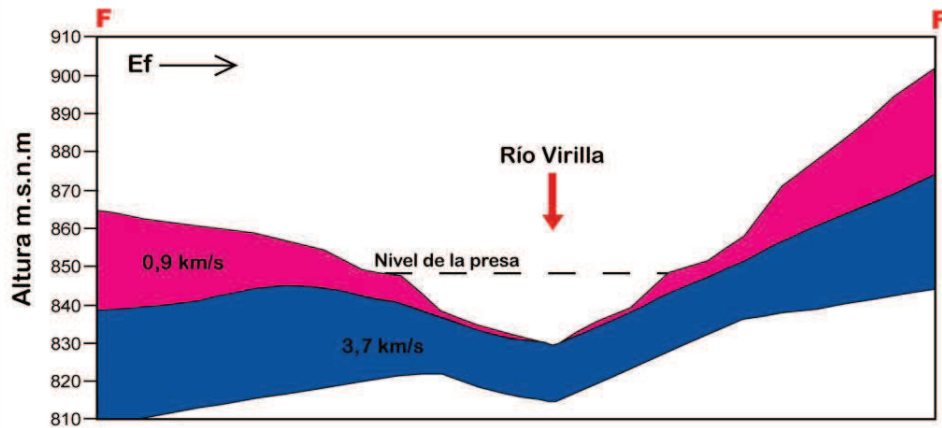
El contacto del perfil geofísico en relación al perfil geológico entre las lavas y las brechas volcanoclásticas es concordante en ambos perfiles (Figura 70). En el perfil geológico se observa un nivel superior de lavas lajeadas en la margen izquierda del sitio de Presa, asociadas a la Formación Colima Superior. Dichas lavas no se ven reflejadas en el perfil geofísico por la orientación del mismo y la tendencia de la capa de brechas volcanoclásticas a aumentar su espesor aguas abajo de la ubicación del perfil geológico.

A- Perfil Geológico propuesto transversal al sitio de presa Belén



Escala mapa  
0 100 m

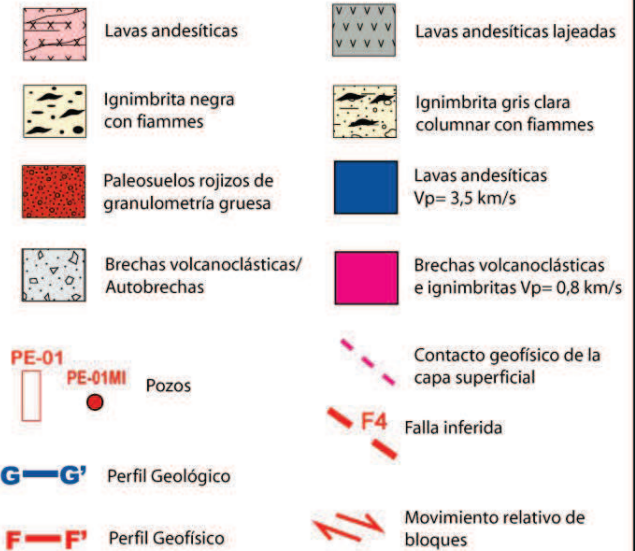
B- Perfil Geofísico propuesto transversal al sitio de presa Belén



Escala perfiles  
0 20 40 m

Figura 70 .Perfil geológico y geofísico transversal al Sitio de Presa Belén.

SIMBOLOGÍA



A continuación se resumen las velocidades asociadas a la litología en cada sitio de Presa, (Cuadro 8).

Cuadro 8. Resumen de las capas sísmicas observadas en ambos sitios de Presa

Ubicación	Perfil	Capas	Velocidades Vp (km/s)	Litología asociada
Sitio de presa P.H. Electriona	Perfil 1	Capa 1	0,9	Brechas volcánoclasticas
		Capa 2	3,3	Lavas andesíticas
	Perfil 2	Capa 1	0,6	Suelos, materiales de relleno
		Capa 2	4,3	Lavas andesíticas
	Perfil 3	Capa 1	0,8	Brechas volcánoclasticas e Ignimbritas
		Capa 2	3,5	Lavas andesíticas
Sitio de presa P.H. Belén	Perfil 1	Capa 1	0,3	Suelos, coluvios y aluviones
		Capa 2	3,7	Lavas andesíticas
	Perfil 2	Capa 1	0,6	Suelos, coluvios y aluviones
		Capa 2	4,2	Lavas andesíticas
	Perfil 3	Capa 1	0,9	Brechas volcánoclasticas e ignimbritas
		Capa 2	3,7	Lavas andesíticas
	Perfil 4	Capa 1	1,6	Lavas fracturadas
		Capa 2	4,8	Lavas masivas



A partir de los datos obtenidos se puede generalizar los siguientes rangos de velocidades ( $V_p$ ) asociados a las litologías aflorantes en los sitios de Presa P.H. Electriona y P.H. Belén (Cuadro 9):

Cuadro 9. Resumen de las velocidades  $V_p$  según las litologías asociadas

FORMACIÓN	LITOLOGÍA	VELOCIDADES $V_p$ (km/s)
<i>Depósitos Recientes</i>	Suelos, coluvios y aluviones	0,3-0,6
	Suelos y materiales de relleno	0,4
<i>Tiribí</i>	Ignimbritas	0,8-0,9
<i>Colima Superior</i>	Brechas volcanoclásticas	0,8-0,9
	Lavas andesíticas	3,3-4,8
<i>Colima Inferior</i>	Lavas fracturadas	1,6
	Lavas andesíticas masivas	3,7-4,8

#### 4.3.5 SÍNTESIS DE LAS VELOCIDADES ( $V_p$ )

Basándose en conjunto de valores obtenidos a partir de los diferentes estudios geofísicos realizados en sitios cercanos al área de estudio y los valores del presente estudio, se obtuvo una síntesis de velocidades asociadas a las litologías aflorantes en el Valle Central, como se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Síntesis de valores de las velocidades ( $V_p$ ) obtenidos en la recopilación bibliográfica y el presente estudio.

Litología	Velocidad $V_p$ (km/s)	Referencia
Suelos	0,3-0,4	Ávila (1984a, 1984b) Leandro (1999)
Suelo poco compacto y drenado	0,3-0,5	Ávila (1981)
Suelo saturado y compactado	1,5-2,0	Ávila (1981)
Material coluvial y suelos	0,8-1,8	Ávila (1983a)
<b>Suelos coluvios y aluviones</b>	<b>0,3-0,6</b>	<b>Cuadro 9.</b>
<b>Suelos y materiales de relleno</b>	<b>0,4</b>	<b>Cuadro 9.</b>
Toba alterada	0,7-1,3	Ávila (1981)
Toba lacustre	0,6-2,1	Ávila (1983a)
Ignimbrita gris masiva	1,8-2,0	Ávila (1981)
Ignimbritas alteradas	1,4-1,6	Ávila (1984c)
<b>Brechas volcanoclásticas e ignimbritas</b>	<b>0,9</b>	<b>Cuadro 9.</b>
<b>Brechas volcanoclásticas</b>	<b>0,8-0,9</b>	<b>Cuadro 9.</b>
Lavas sanas	2,8-4,3	Ávila (1981)
Lavas sanas	1,5-3,1	Ávila (1984a, 1984b)
Lavas	2,0-3,0	Ávila (1985a)
Lavas andesíticas sanas	2,5-3,5	Ávila (1985c)
Lavas lajeadas sanas	2,2-4,0	Ávila (1984c)
Lavas lajeadas meteorizadas	1,8-2,4	Ávila (1986b)
Lava meteorizada	0,6-1,4	Ávila (1984a, 1984b)
Lava meteorizada	1,6-2,0	Ávila (1983b)
Lavas andesíticas fracturadas y alteradas	1,2-2,1	Ávila (1985c)
<b>Lavas andesíticas</b>	<b>3,3-4,3</b>	<b>Cuadro 9.</b>
<b>Lavas fracturadas</b>	<b>1,6</b>	<b>Cuadro 9.</b>

Litología	Velocidad Vp (km/s)	Referencia
<b>Lavas andesíticas masivas</b>	<b>3,7-4,8</b>	<b>Cuadro 9.</b>
Aglomerado volcánico	0,9-1,15	Ávila (1983a)
Conglomerado	1,2-2,1	Ávila (1984c)
Conglomerados sanos con vetillas de calcita	2,6-3,0	Ávila (1986a)
Conglomerados calcáreos	2,4-2,6	Ávila (1986b)
Conglomerado sanos	2,0	Ávila (1986a)
Roca sedimentaria areniscas y conglomerados	3,5-4,0	Leandro et al. 1986
Roca sedimentaria	1,8-2,2	Ávila (1986c)
Roca sedimentaria	1,9-2,2	Ávila (1986c)
Roca sedimentaria	2,2-2,9	Ávila (1986c)
Roca sedimentaria saturada	2,4-2,6	Ávila (1986c)
Roca sedimentaria arenisca y conglomerado	3,5-4,0	Leandro et al. (1986)
Areniscas y lutitas	1,4-2,1	Ávila (1985c)
Areniscas lutitas y brechas verdes	2,3-3,5	Ávila & Leandro (1997a)
Areniscas lutitas y brechas verdes	2,8-3,4	Ávila & Leandro (1997a)
Areniscas lutitas y brechas verdes	2,5-3,4	Ávila (1997b)
Areniscas lutitas y brechas verdes	2,8-4,0	Leandro (1998)
Alternancia de areniscas y conglomerados	2,4-3,2	Ávila (1986a)
Areniscas de grano fino	1,9-3,5	Ávila (1984c)
Areniscas finas	2,0-2,2	Ávila (1986b)
Areniscas de grano medio	2,2-2,8	Ávila (1984c)
Areniscas de grano fino y grueso	2,4-3,6	Ávila (1984c)
Areniscas de grano fino y grueso	2,6-3,5	Ávila (1986b)
Arenisca de grano medio y grueso	2,3-3,0	Ávila (1984c)
Arenisca medias a gruesas	2,3-2,5	Ávila (1986b)
Areniscas meteorizadas	0,9-2,3	Ávila (1984c)
Areniscas finas semi-alteradas	1,4-1,6	Ávila (1986a)
Lutitas y areniscas meteorizadas	1,0-1,4	Ávila (1986a)
Areniscas y conglomerados semi-alterados	1,5-2,0	Ávila (1986a)

#### 4.3.6 CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA DE LOS MATERIALES A PARTIR DEL VALOR $V_p$ OBTENIDO

La velocidad ( $V_p$ ) en un cuerpo geológico puede variar según sean las condiciones físicas existentes a lo largo del mismo. Las características implícitas al cuerpo geológico (como lo son los cambios de facies, granulometrías, contactos irregulares, porosidad, saturación, ect,) así como las condiciones externas generadas por agentes como el tectonismo y la alteración hidrotermal y meteórica, fracturan y meteorizan los cuerpos rocosos, lo que les confieren variaciones significativas del valor  $V_p$ . Por lo que macizos geológicamente similares pueden tener valores de  $V_p$  tan diferentes, como así sean sus condiciones geomecánicas presentes.

El parámetro de  $V_p$  permite determinar algunas características geomecánicas de los materiales según sea la naturaleza de los mismos, Alguno de estos parámetros incluyen:

1. Excavabilidad o Ripabilidad
2. Índice Q de Barton
3. Densidad de la roca
4. RQD
5. Resistencia a la Compresión Simple

##### 4.3.6.1 Excavabilidad o Ripabilidad

Según Arladi (2005) corresponde a un criterio cualitativo que mide la aptitud del macizo rocoso a ser quebrado por medio de un *ripper* arrastrado por un *bull-dozer* (Figura 71).



Figura 71. Modelo *Caterpillar* D10N con *ripper*

Las compañías como Caterpillar regularmente publican tablas de ripabilidad para sus distintos modelos, la facilidad del ripado en un tipo de roca se define a partir de la velocidad  $V_p$ . El cuadro 11 muestra los rangos de ripabilidad de un modelo *Caterpillar* D-9 en función de la velocidad  $V_p$  (Arladi, 2005).

Cuadro 11. Rangos de ripabilidad de un Caterpillar D-9 en función de  $V_p$  del material (Tomado de Arladi, 2005)

Velocidad de onda primaria $V_p$ (m/s)	Condición de ripabilidad ( <i>Caterpillar</i> D-9)
< 600	Materiales sueltos
600-1300	Ripado Fácil
1300-1700	Ripado Normal
1700-1850	Ripado Duro
> 1850	No son ripables

#### 4.3.6.2 Índice Q de Barton

La clasificación Q desarrollada por Barton, Lien y Lunde en 1974, se basa en el análisis de un gran número de túneles construidos en Noruega, corresponde a una estimación de parámetros geotécnicos asociados al diseño de sostenimiento de túneles y cavernas (Gonzales de V. et al., 2002).

Esta clasificación le asigna a cada terreno un valor numérico, tanto mayor sea el valor Q obtenido, así mejor será la calidad geomecánica de la roca. Los valores para esta clasificación oscilan entre 0,001 a 1000, y los rangos asignados a cada clasificación del macizo rocoso se muestran en el Cuadro 12 (Gonzales de V. et al., 2002).



Cuadro 12. Rangos de clasificación del índice Q para macizos rocosos (Gonzales de Vallejo. et al., 2002).

Valor Q	Clasificación del macizo
0,001-0,01	Roca excepcionalmente mala
0,01-0,1	Roca extremadamente mala
0,1-1,0	Roca muy mala
1,0-4,0	Roca mala
4,0-10	Roca media
10-40	Roca buena
40-100	Roca muy buena
100-400	Roca extremadamente buena
400-1000	Roca excepcionalmente buena

Según Arladi (2005), el valor Q se puede obtener utilizando la expresión exponencial propuesta por Barton (1991), a partir de la velocidad de onda Vp para rocas superficiales: (Arladi, 2005)

$$Q = 10^{[(V_p - 3500)/1000]}$$

Donde:

Q= Índice de Barton

Vp= velocidad de la onda p (m/s)

Para rocas de muy buena calidad (Q>4) se puede aplicar la siguiente expresión (Arladi, 2005):

$$Q = (V_p - 3600)/50$$

#### 4.3.6.3 Densidad de la roca

Arladi (2005), presenta la relación empírica para rocas sedimentarias propuesta por Gardner (1974), entre la densidad del terreno ( $\rho$ ) y la velocidad ( $V_p$ ), la cual se presenta como:

$$\rho = aV_p^{0,25}$$

Donde:

$a$  = valor constante 1670

$\rho$  = densidad de la roca ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_p$  = velocidad de propagación  $V_p$  ( $\text{km/s}$ )

#### 4.3.6.4 RQD (*Rock Quality Designation*)

Helfrich (1971), propone la existencia de una relación entre el índice de fracturación RQD y la velocidad de onda  $V_p$  para rocas ígneas sanas (Cuadro 13).

Cuadro 13. Relación entre el valor de  $V_p$  y el RQD asociado a la calidad del macizo (Tomado Arladi, 2005)

$V_p$ (m/s)	RQD	Grado de fracturación
< 3000	< 25%	Roca fuertemente fracturada
3000-3500	25-50%	Roca con numerosas fracturas
3500-4000	50-75%	Roca fracturada en grado medio
4000-4500	75-95%	Roca con pocas fracturas
> 4500	> 95%	Roca sin fracturas

Sin embargo, describe una relación existente para el RQD, partiendo de la relación existente entre la velocidad  $V_p$  obtenida en el campo y la velocidad  $V_p$  obtenida mediante el laboratorio, mediante la expresión:

$$RQD= 100 (Vp/Vp_{laboratorio})$$

Vp= velocidad de la onda p obtenida en el campo

Vp<sub>laboratorio</sub>= velocidad de onda p obtenida mediante ensayo de laboratorio

A partir de la relación entre la velocidad de la onda p obtenida en el campo y la velocidad de onda p obtenida mediante ensayo de laboratorio (Vp/ Vp<sub>laboratorio</sub>), Coon & Merritt (1970) determinan un valor denominado Índice de Velocidad Relativa, con el cual se puede determinar la calidad del macizo rocoso, como se muestra en el Cuadro 14.

Cuadro 14. Clasificación del macizo rocoso con respecto al índice de calidad (Gonzales de V. et al., 2002)

Índice de velocidad relativa (Vp/ Vp <sub>laboratorio</sub> )	Calidad del macizo rocoso
< 0,2	Muy mala
0,2-0,4	Mala
0,4-0,6	Media
0,6-0,8	Buena
> 0,8	Muy buena

#### 4.3.6.5 Resistencia a la Compresión Simple

Según González de Vallejo et al., (2002), el valor de Vp puede correlacionarse linealmente con la deformabilidad de la roca y por lo tanto es un indicativo de la calidad de la misma al estar relacionado con la resistencia a la compresión simple.

La velocidad Vp muestra una tendencia lineal en relación con la resistencia de los materiales a la compresión simple, mediante el gráfico de la Figura 72, (González de Vallejo et al., 2002).

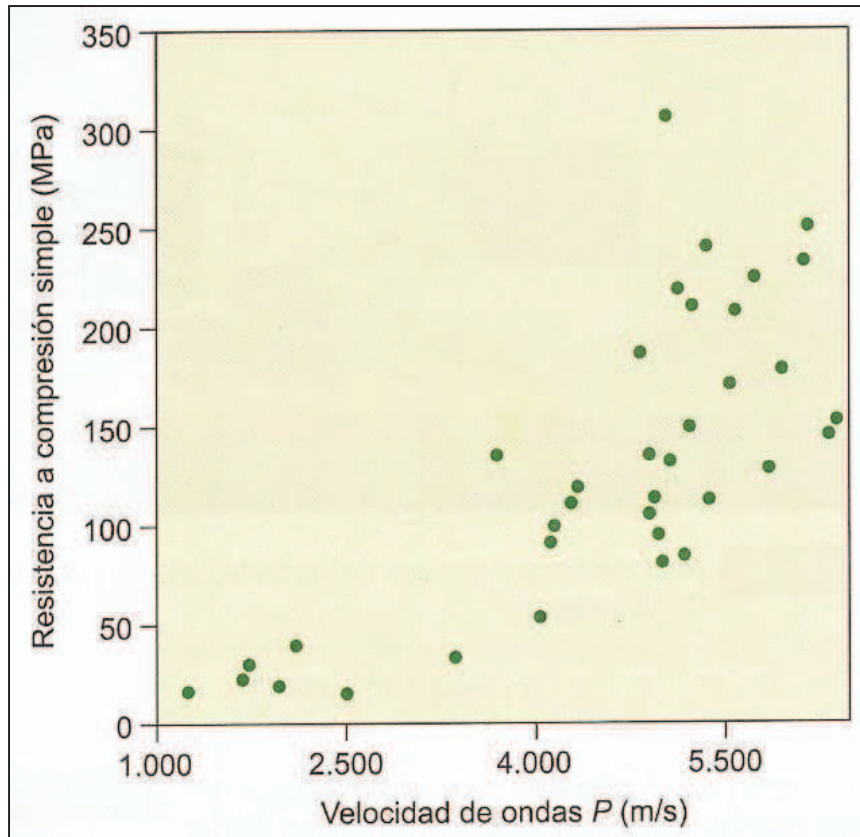


Figura 72. Gráfico que relaciona  $V_p$  con la resistencia a la compresión simple (Tomado de González de Vallejo et al., 2002)

A partir de los valores de la Figura 69 y basándose en la clasificación de las rocas definida por González de Vallejo et al. (2002), para diferentes rangos de la resistencia a la compresión simple, se elaboró la Figura 73.

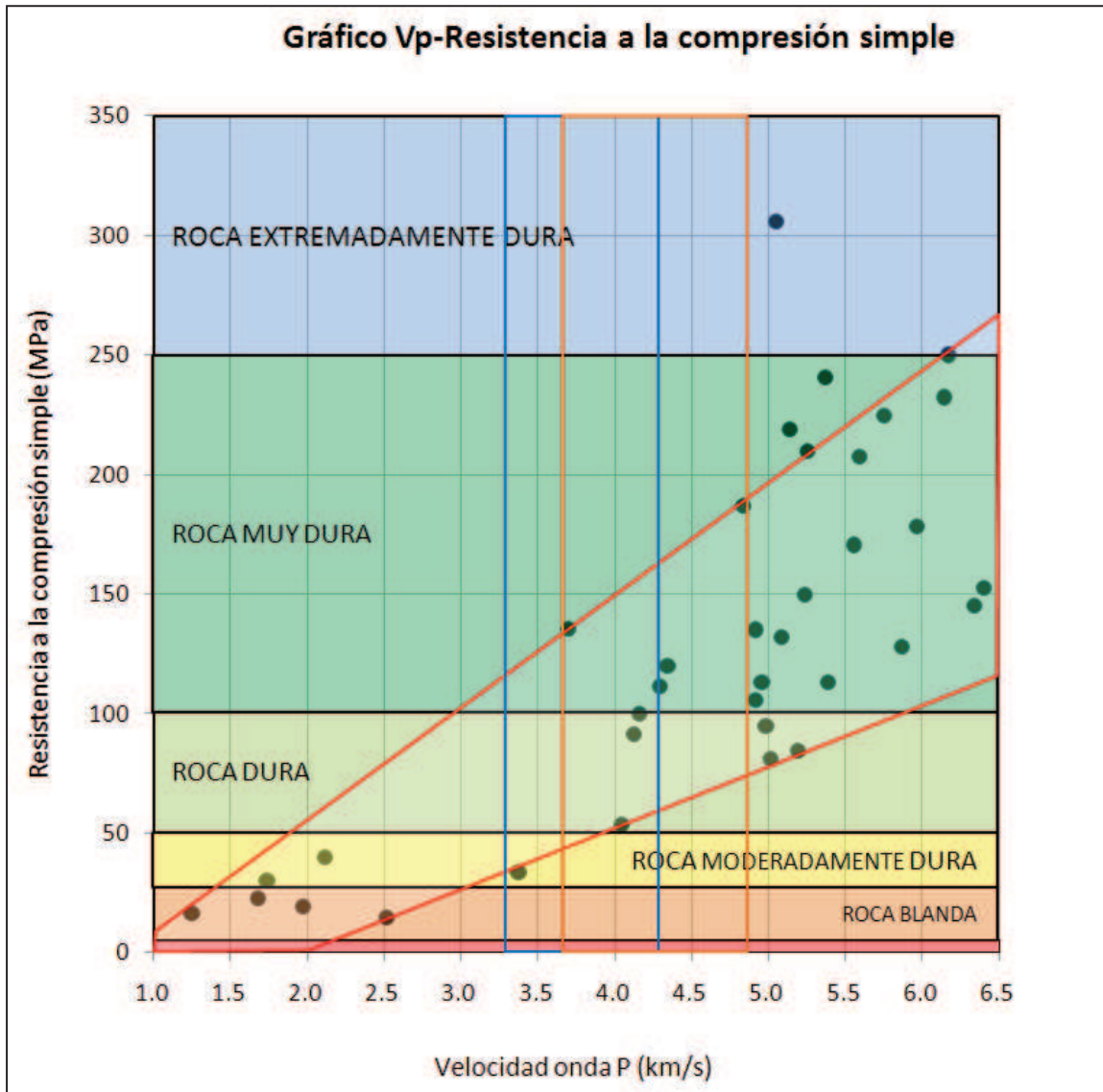


Figura 73. Gráfico de relación entre la Vp y la resistencia a la compresión simple. (Modificado de González de Vallejo et al., 2002)

En la Figura 73, se muestra el área que agrupa la mayor densidad de valores Vp (línea roja), dicha área abarca diferentes rangos de valores asociados a la calidad de la roca a partir de los valores de resistencia a la compresión. Con base en dicha figura, se puede considerar que velocidades Vp inferiores o iguales a 2,5 km/s se incluyen predominantemente cualidades de roca blanda y moderadamente dura, mientras que velocidades de Vp mayores a 2,5 km/s y hasta 3,5 km/s, abarca predominantemente cualidades de roca moderadamente dura a dura, y para velocidades mayores a 3,5 km/s, la cualidad de la roca es predominantemente dura a muy dura.



#### 4.3.7 CARACTERIZACIÓN DE LAS LITOLOGÍAS DE FUNDACIÓN DE LAS PRESAS

A partir de los datos en las velocidades  $V_p$  obtenidos para cada litología en los sitios de Presa Electriona y Belén, y con base en los parámetros anteriormente expuestos, se define el siguiente Cuadro 15 de caracterización de los materiales en los cuales se localizan los sitios de presa.

Cabe aclarar que la densidad de la roca no se incluye, dado que la determinación de este parámetro es exclusivo para rocas sedimentarias. Por otro lado para suelos y materiales no consolidados no se aplica el índice Q, ni el grado de fracturación del RQD, debido a que este análisis es utilizado en macizos rocosos. Además la relación con la Resistencia a la compresión simple se utiliza para macizos rocosos con velocidades superiores a 1,0 km/s (González de Vallejo et al., 2002)

El Cuadro 15, muestra que la litología sobre la que se funda la Presa Electriona con velocidades  $V_p$  de 3,3 a 4,3 km/s, se relaciona según los parámetros geotécnicos a rocas malas a buenas (Índice Q), moderadamente duras a duras (Figura 73, rectángulo azul), no ripables, y con numeroso a poco grado de fracturación (RQD). En el caso de la Presa Belén, la litología sobre la que se funda asociada a velocidades  $V_p$  de 3,7 a 4,8 km/s, se relacionada a rocas buenas (Índice Q), duras a muy duras (Figura 73, rectángulo anaranjado), no ripables y con poco grado de fracturación (RQD). En general se puede considerar que ambos sitios de Presa presentan condiciones geomecánicas con calidades buenas a muy buenas.

En el caso de las rocas ígneas cercanas al área de estudio y obtenidas mediante estudios geofísicos previos (Anexo 2), se muestra una tendencia generalizada, basándose en los parámetros anteriormente expuestos, a ser rocas de baja calidad según el índice Q, y un alto grado de fracturación según el porcentaje de RQD, sin embargo se muestran predominantemente no ripables, por lo que se pueden considerarse como rocas con tendencias regulares a buenas, ya que los parámetros de índice Q y porcentaje RQD son muy conservadores para ambientes geológicos complejos y expuestos a condiciones climáticas tropicales como las nuestras.

Cuadro 15. Caracterización de las litologías a partir de los datos obtenidos de Vp.

LITOLOGÍA		Vp (km/s)	PARAMETROS GEOTECNICOS					
			Ripabilidad (Caterpillar D-9)	Índice Q		RQD		Resistencia a la compresión simple (MPa)
				Valor Q $Q=10^{[(Vp-3500)/1000]}$	Clasificación	% Rango	Grado de fracturación	Cualidad de la roca
Materiales superficiales que se localizan en ambos sitios de presa	Suelos, coluvios y aluviones	0,3-0,6	Materiales sueltos	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
	Suelos y materiales de relleno	0,4	Materiales sueltos	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
	Brechas volcanoclásticas e ignimbritas	0,8-0,9	Ripado fácil	0,0020-0,0025	Roca excepcionalmente mala	< 25%	Roca fuertemente fracturada	N.A
Materiales sobre los que se funda el S.P. Electrióna	Lavas andesíticas	3,3	No son ripables	0,63	Roca muy mala	25-50%	Roca con numerosas fracturas	Rocas moderadamente duras a duras
		4,3	No son ripables	6,3095 <b>14,0*</b>	Roca buena	75-95%	Roca con pocas fracturas	
Materiales sobre los que se funda el S.P. Belén	Lavas andesíticas masivas	3,7	No son ripables	1,58	Roca mala	50-75%	Roca fracturada en grado medio	Rocas duras a muy duras
		4,8		19,95 <b>24,0*</b>	Roca buena	>95%	Roca sin fracturas	

\*Q>4 se aplica  $Q=(Vp-3600)/50$

N.A. No Aplica

#### 4.3.8 RELACIÓN ENTRE $V_p$ Y VALORES OBTENIDOS EN ESTUDIOS PREVIOS DE LOS PARÁMETROS $V_p$ , $V_s$ , $E_D$ , $E_s$

Los datos geofísico de refracción sísmica obtenidos por el ICE a lo largo de los túneles y galerías de los proyectos hidroeléctricos Ventanas-Garita, Arenal, Angostura, Toro I, Toro II y Pirris, generaron una serie de valores asociados a las velocidades de las ondas compresional ( $V_p$ ) y de cizalle ( $V_s$ ). A partir de dichos valores se obtuvieron los Módulos Elásticos, como lo son el Coeficiente o la Razón de Poisson ( $\nu$ ) y el Módulo Elástico Longitudinal o Módulo de Young ( $E_D$ ). Estos parámetros permiten determinar características geomecánicas de los materiales.

El coeficiente de Poisson ( $\nu$ ), indica la relación entre las deformaciones relativas en sentido transversal que sufre el material y las deformaciones relativas en dirección de la fuerza aplicada sobre el mismo, y se encuentra directamente relacionado con  $V_p$  y  $V_s$  mediante la siguiente expresión:

$$\nu = \frac{1/2(V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad (\text{Ecu.14})$$

Donde:

$V_s$ = Velocidad de onda S (km/s)

$V_p$ = Velocidad de onda P (km/s)

El módulo de Young o Módulo Elástico Dinámico ( $E_D$ ), caracteriza el comportamiento de un material, según la dirección en la que se aplica una fuerza. Está asociado directamente con los cambios de longitud que experimenta un material, cuando es sometido a la acción de esfuerzos de tracción o de compresión, y se encuentra directamente relacionado al coeficiente de Poisson, a la densidad de la roca y a la velocidad  $V_s$ , mediante la siguiente expresión:

$$E_D = 2V_s^2\rho(1+\nu) \quad (\text{Ecu. 15})$$

Donde:

$\nu$  = Coeficiente de Poisson

$\rho$ = Densidad del material ( $\text{kg/m}^3$ )

$V_s$ = Velocidad de onda S (km/s)

Basándose en los valores obtenidos para el Módulo Elástico Dinámico ( $E_d$ ), se puede determinar el Módulo Elástico Estático ( $E_s$ ), mediante la relación de los criterios de *Ninkitin* suministrado por Bollo (1979) al ICE. En el cual se establece que para macizos rocosos con velocidades mayores a 3,0 km/s se aplica la expresión empírica: (Leandro, 1992)

$V_p > 3,0 \text{ km/s}$	$E_s = 1,03(E_d - 86)$	(Ecu.16)
--------------------------	------------------------	----------

Mientras que para  $V_p$  menores a 3,0 km/s se aplica la expresión: (Leandro, 1992)

$V_p < 3,0 \text{ km/s}$	$E_s = K \cdot E_d$	(Ecu.17)
--------------------------	---------------------	----------

Donde  $K$  es una constante que varía con la velocidad  $V_p$ , de la siguiente forma:

$V_p \text{ (km/s)}$	$K$
2,9-2,7	0,55
2,7-2,6	0,55
2,6-2,5	0,45
2,5-2,4	0,35
2,4-2,3	0,30
2,3-2,2	0,25
2,2-2,1	0,20
< 2,0	0,15

Al graficar los valores de  $V_p$  y  $V_s$  obtenidos en los túneles en los diferentes proyectos, se observa una relación con tendencia lineal tal y como se muestra en la Figura 74, tanto para rocas ígneas como sedimentarias.

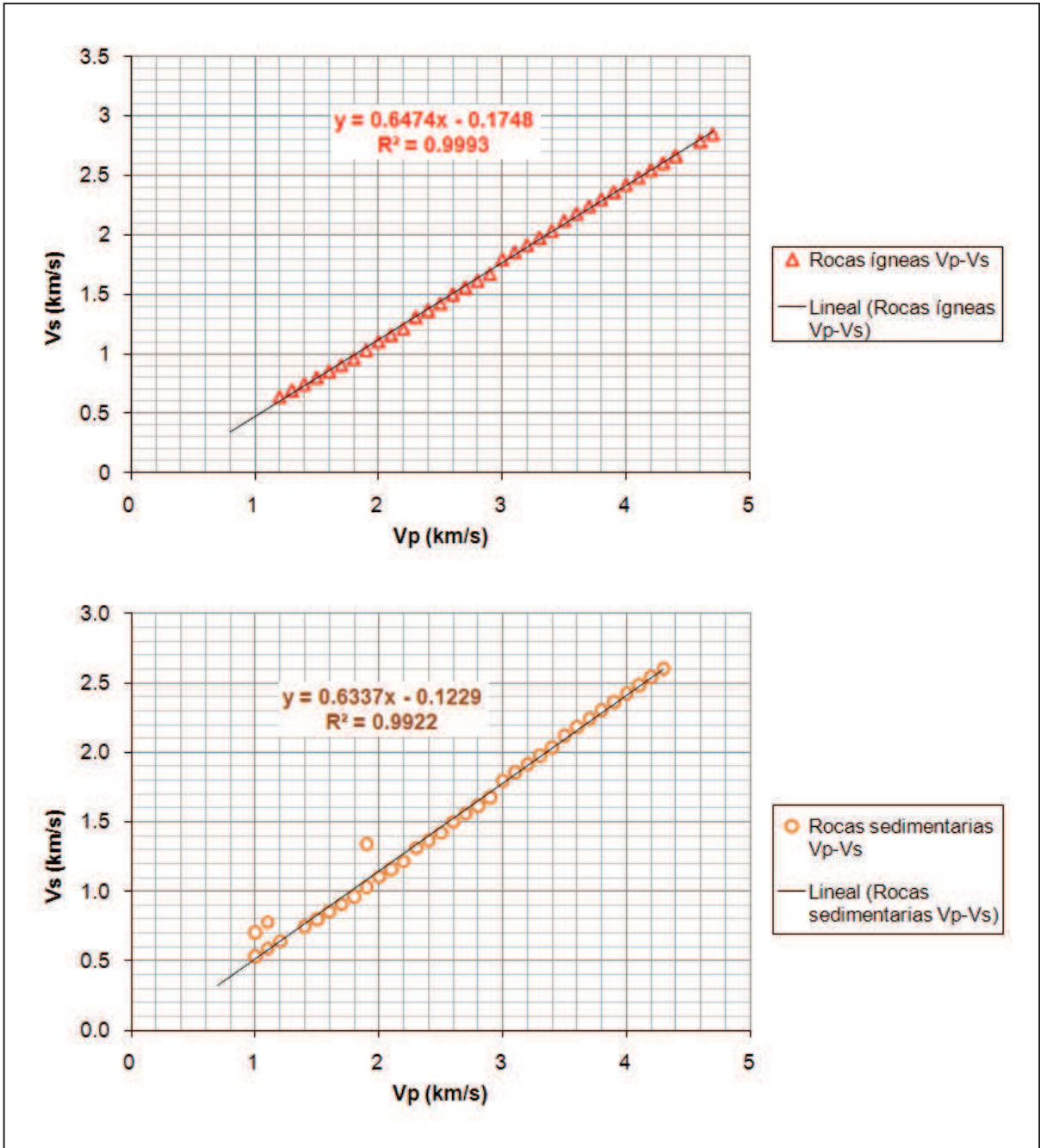


Figura 74. Gráficos de relación Vp y Vs para rocas ígneas y sedimentarias.



Para los valores de los módulos  $E_d$ ,  $E_s$ , en relación al valor de  $V_p$  tanto para rocas ígneas como sedimentarias, se observa una relación con una tendencia potencial (Figura 75). La separación entre ambas curvas, según Barton (2007), es un indicativo del grado de fracturación de la roca, entre más fracturado se encuentre el macizo mayor separación habrá entre las curvas.

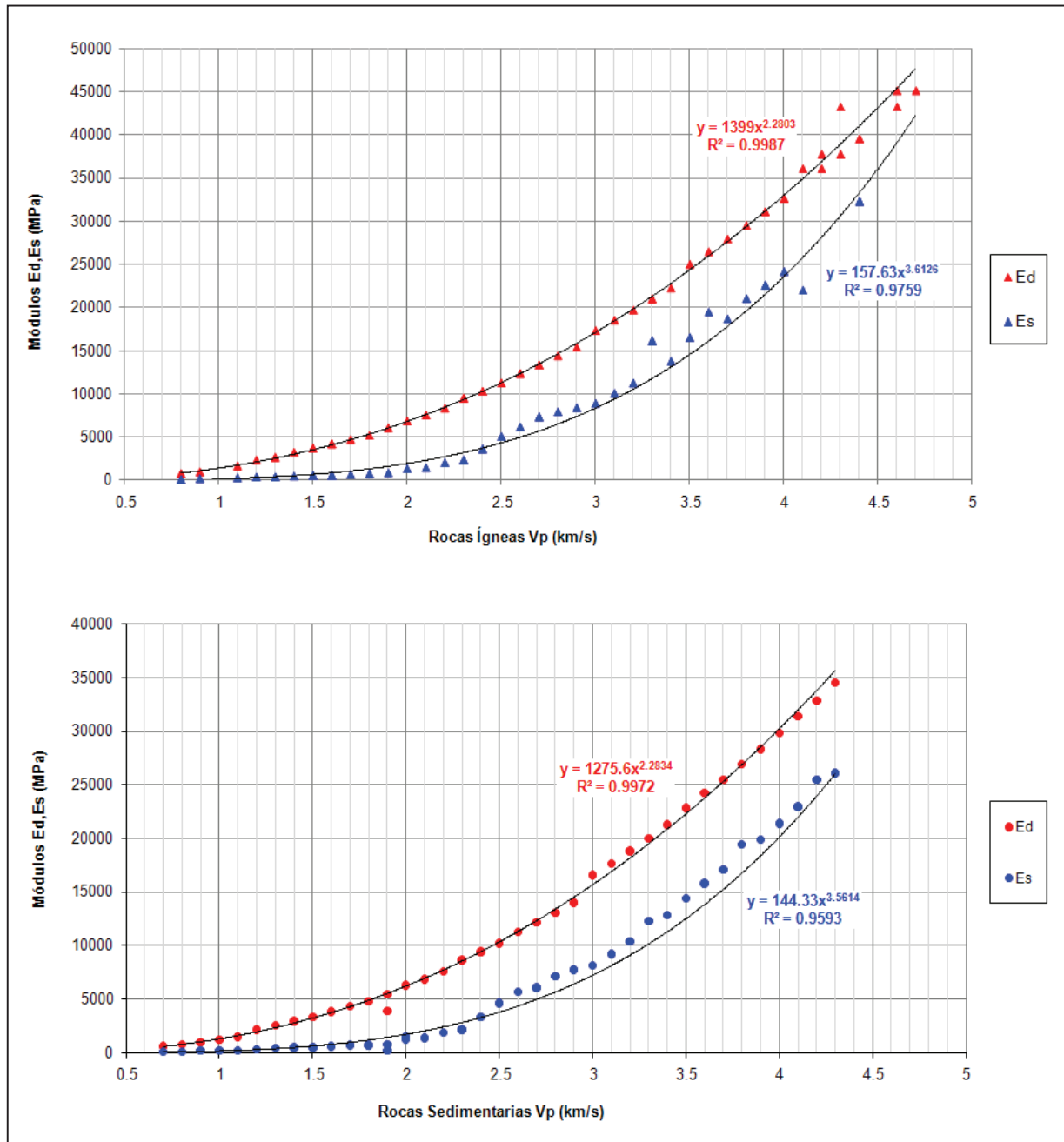


Figura 75. Gráfico de relación de los módulos  $E_d$ ,  $E_s$  y la  $V_p$ , para rocas ígneas y sedimentarias.

La relación directa entre los módulos  $E_d$  y  $E_s$ , tanto para rocas ígneas como sedimentarias, se muestra en la Figura 76.

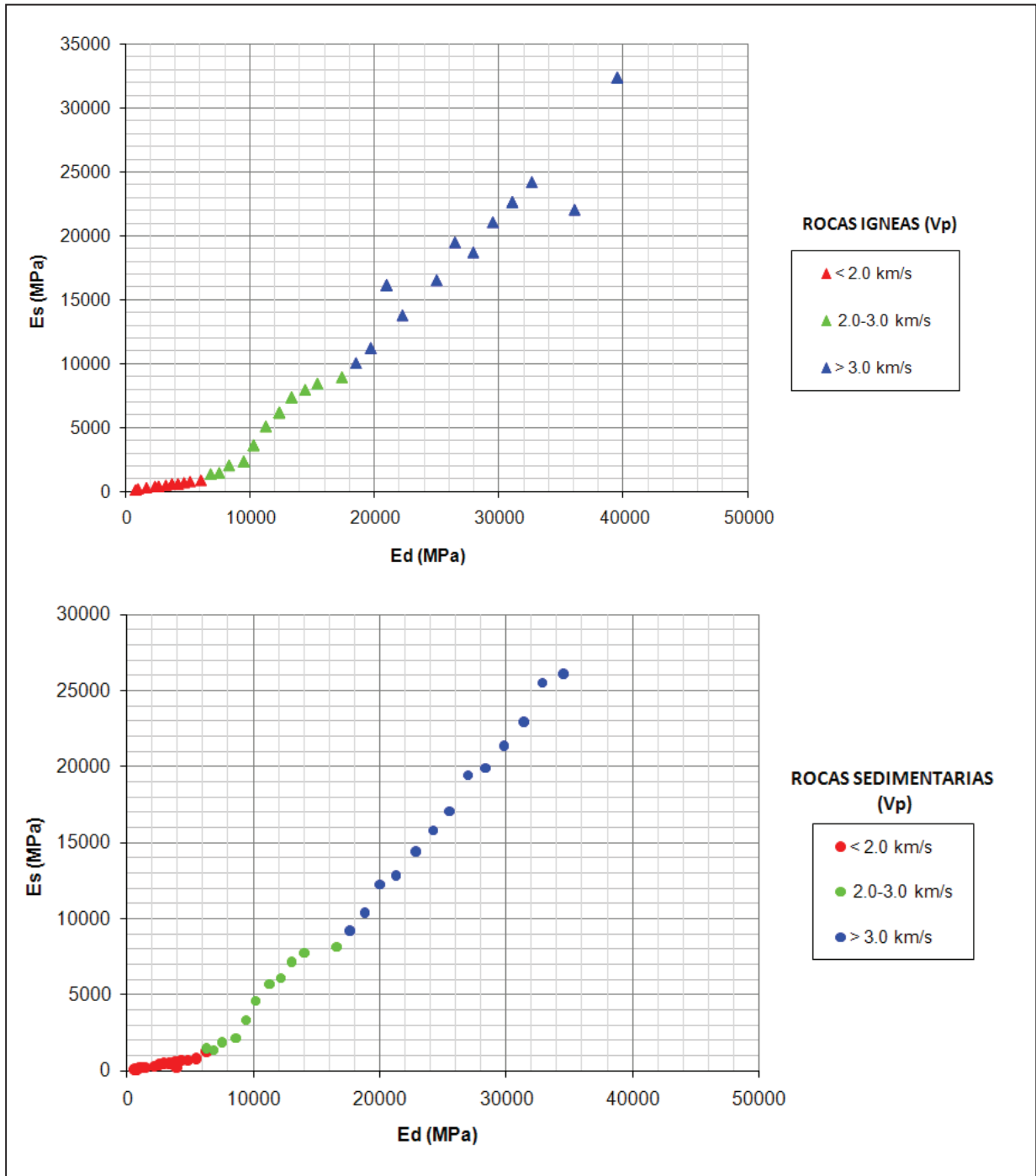


Figura 76. Gráficos de relación  $E_d$ - $E_s$  para rocas ígneas y sedimentarias.

Dicha relación varía con los cambios de  $V_p$ , por lo que para velocidades inferiores a los 2,0 km/s la tendencia de los valores es lineal con una pendiente leve, los valores en este rango no sobrepasan los 1000 MPa del módulo  $E_s$ . Para velocidades de entre 2,0 a 3,0 km/s, se muestra un aumento transicional en la pendiente con tendencia lineal a logarítmica y cuyos valores con respecto al  $E_s$  comprenden los 1000 a 10000 MPa, finalmente para valores de  $V_p$  mayores a 3,0 km/s, se observa una tendencia lineal, más regular en las rocas sedimentarias que en las ígneas (Figura 76).

A continuación se comparan los valores de estudios previos, de  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $E_d$  y  $E_s$ , con los valores obtenidos de únicamente de  $V_p$  en los macizos rocosos asociados a la geología de fundación de los sitios de Presa Electriona y Belén.

Con base en la relación lineal  $V_p$  y  $V_s$  para rocas ígneas (Figura 74), se determinó que para los valores de  $V_p$  en el sitio de Presa Electriona de 3,3 y 4,3 km/s, los valores  $V_s$  asociados rondan los 2,0 y 2,6 km/s; mientras que para el sitio de Presa Belén con valores  $V_p$  de 3,7 y 4,8 km/s, los valores  $V_s$  asociados corresponden a 2,2 y 2,9 km/s respectivamente (Figura 77).

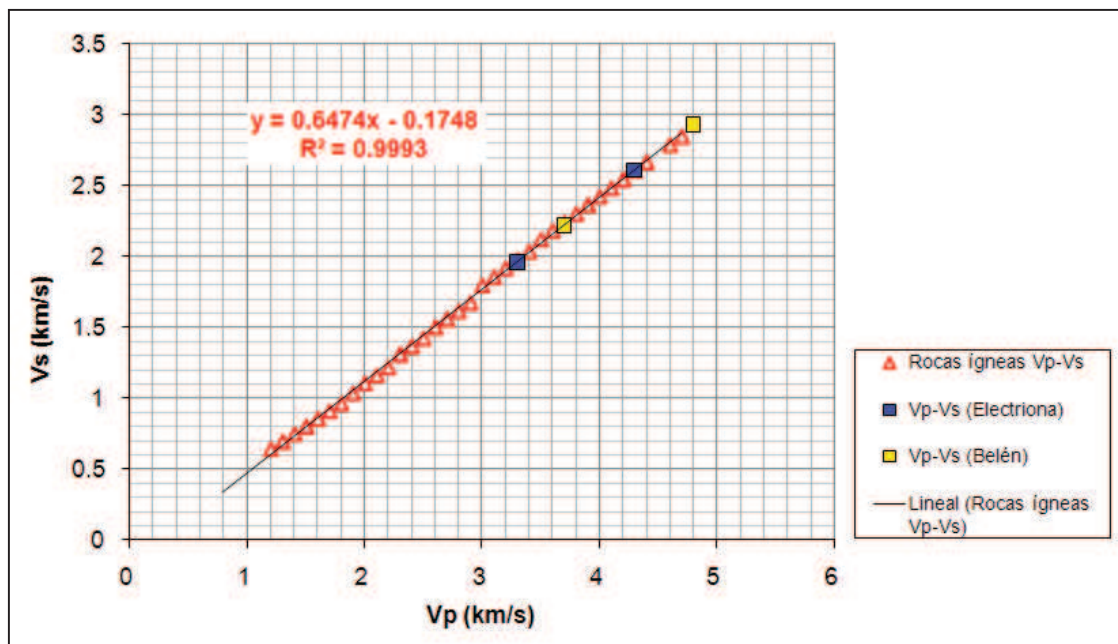


Figura 77. Gráfica de relación  $V_p$  y  $V_s$  para rocas ígneas, asociadas a los sitios de Presa Electriona y Belén.

A partir de la relación potencial entre los valores de los módulo  $E_d$  y  $E_s$  con la velocidad  $V_p$  (Figura 75), se determinó que para los sitios de Presa Electriona con  $V_p$  de 3,3 y 4,3 km/s, los valores del módulo  $E_d$  corresponden a 21.289 y 38.931 MPa, y para el módulo  $E_s$  a 11.771 y 30.628 MPa. En el caso del sitio de Presa Belén ( $V_p= 3,7$  y 4,8 km/s), se definieron valores para el módulo  $E_d$  de 27.635 y 50.030 MPa y para el módulo  $E_s$  de 17.796 y 45.572 MPa (Figura 78).

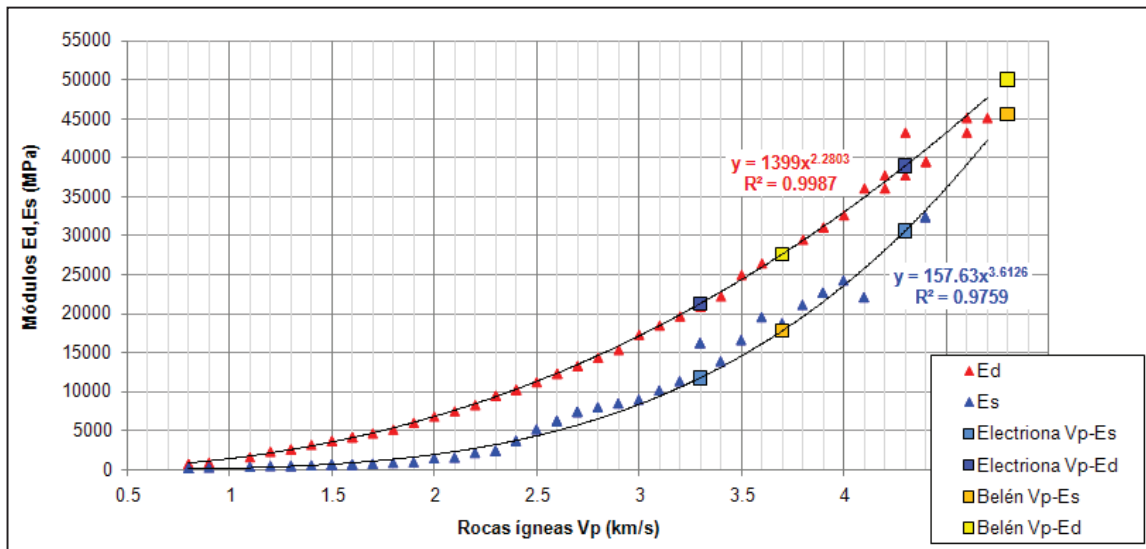


Figura 78. Gráfico de relación de Vp con los módulos Ed y Es, y los valores obtenidos en ambos sitio de Presa.

La relación entre los módulos dinámicos (Ed) y estáticos (Es) en cada sitio de Presa así como en los estudios previos realizados por el ICE, se muestra en la Figura 79.

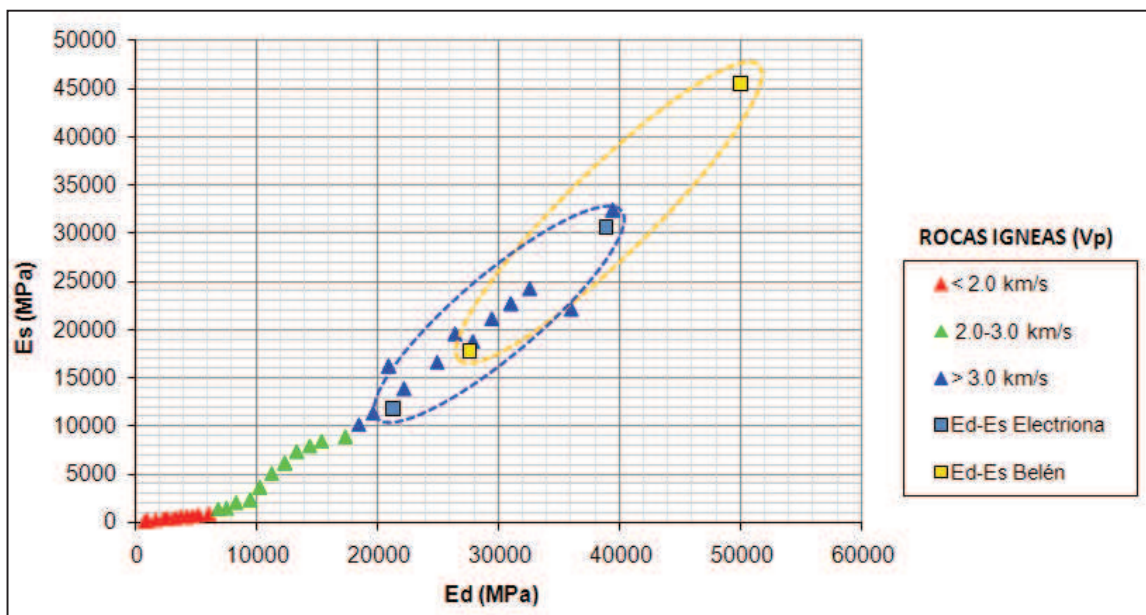


Figura 79. Gráfico de relación entre los módulos Ed y Es, en relación a los obtenidos mediante el valor Vp de cada sitio de Presa.

Para ambos sitios de Presa los valores Vp de los macizos rocoso sobrepasan la velocidad de 3,0 km/s. En el sitio de Presa Electriona cuyos valores Vp corresponden a 3,3 y 4,3 km/s, los módulos Ed y Es muestran una tendencia lineal y dentro del rango de los valores generales previamente

obtenidos. Para el sitio de Presa Belén con valores de Vp de 3,7 y 4,8 km/s, los módulos Ed y Es asociados muestran igualmente un tendencia lineal, sin embargo el valor que muestra la velocidad máxima obtenida de Vp (4,8 km/s), sobresale del rango general de valores.

Ávila (2004) realiza una clasificación de los macizos rocosos a partir del valor del módulo Ed, definiendo los siguientes parámetros: (Cuadro 16)

Cuadro 16. Rango de valores Es para la caracterización del macizo rocoso (Ávila, 2004)

Rango de valor Es (MPa)	Caracterización del macizo
< 1000	Roca Mala
1000-5000	Roca Regular
>5000	Roca Buena

Basándose en los valores anteriormente obtenidos a partir de los datos del ICE, y según la clasificación de Ávila (2004), se resumen los valores obtenido para cada sitio de Presa (Cuadro 17)

Cuadro 17. Resumen de los parámetros obtenidos a partir de la relación de los estudios realizados por el ICE.

Sitio de Presa	Vp (km/s) Lavas	Vs (km/s)	Ed (MPa)	Es (MPa)	Cualidad del macizo (Es)
Sitio de Presa Electriona	3,3	2,0	21.289	11.771	Roca Buena
	4,3	2,6	38.931	30.628	Roca Buena
Sitio de Presa Belén	3,7	2,2	27.635	17.796	Roca Buena
	4,8	2,9	50.030	45.572	Roca Buena



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 CONCLUSIONES

- A partir del cartografiado geológico realizado se determina, una importante similitud del mapa de Echandi (1981), quien detalla muy bien los contactos de la Formación Colima Superior y Colima Inferior con el Miembro Puente de Mulas, con el mapa propuesto en el presente estudio.
- Se determina la presencia de un paleosuelo bastante espeso (aproximadamente 10 m) y de geometría lenticular que separa a la Formación Colima Superior con el Miembro Puente de Mulas sobre la margen izquierda del río Virilla paralelo a la colindancia entre el Tajo de Pedregal.
- La Formación Tiribí presenta un marcado aumento de espesor hacia los sectores E a SE de la zona de estudio aflorando predominantemente hacia la base del Río Tiribí. Dicha Formación presenta diferentes grados de soldamiento, que le confieren niveles lenticulares sobresalientes hacia los sectores intermedios y superiores de la misma.
- La textura columnar de la Formación Tiribí se observa predominantemente en la base y techo de la Formación, así como en aquellos sitios en los que disminuyen significativamente su espesor.
- La Formación Colima se observa predominantemente sobre la base y en ambas márgenes del río Virilla hasta la confluencia con el río Tiribí, en donde se profundiza y desaparece sobre la margen derecha en el sector de Honduras, y reaparece cerca del sitio de presa Belén.
- Los Miembros Colima Superior y Colima Inferior son difícilmente diferenciables mediante la descripción petrográfica, ya que las diferencias entre ambas lavas son muy sutiles y se encuentran relacionadas al porcentaje de augitas presentes en cada muestra, las cuales son más predominantes en el Miembro Colima Superior que en el Miembro Colima Inferior.
- Particularmente el Miembro Colima Superior puede presentar una tendencia a caracterizarse petrográficamente como andesitas basálticas, sin embargo ambos Miembros muestran una predominancia a ser denominados como andesitas con dos piroxenos.

- Se determinó la presencia de 4 posibles trazas de falla (F1, F2, F3 y F4) con tendencias E-W, N-S, NE-SW y NW-SE respectivamente, tres de las cuales (F2, F3 y F4) son inferidas debido a los indicios de bloques rodados con espejos de falla y a la interrupción drástica en la secuencia estratigráfica, y un plano de falla (F1) es observado directamente sobre la margen izquierda del Río Virilla.
- Los posibles planos de falla inferidos y observados, presentan una predominancia a localizarse sobre la margen izquierda del Río Virilla, y muestran una tendencia a movimientos predominantemente inversos.
- Una de las posibles trazas de falla con dirección NW-SE (F4), inferida debido a la interrupción de la continuidad lateral de los depósitos asociados a la Formación Colima, se localiza por debajo del sitio de presa en Belén, sin embargo no se observa de forma evidente que desplace los depósitos de la Formación Tiribí.
- El modelo geológico muestra que ambos sitios de presa se fundan sobre las lavas andesíticas de la Formación Colima, el sitio de Presa Electriona se funda sobre las lavas andesíticas de la Formación Colima Superior, mientras que el sitio de Presa Belén se funda sobre las lavas andesíticas de la Formación Colima Inferior.
- Por debajo de las lavas de la Formación Colima Superior sobre las que se funda el sitio de Presa Electriona, se determinó la presencia de un paleosuelo rojizo lenticular con espesores que rondan los 5 a 10 m.
- El modelado geofísico del sitio de Presa Electriona presenta valores de RMS  $>1,5$  para los perfiles 1 y 3, sin embargo al tratar de disminuir este error asociado a la inversión, el modelo no se ajusta al modelo geológico propuesto.
- Los materiales sobre los que se funda el sitio de Presa Electriona presentan velocidades  $V_p$  de 3,3 a 4,3 km/s.
- Con base en los diferentes parámetros geotécnicos determinados a partir de los valores de  $V_p$  obtenidos, se define que las rocas del sitio de fundación de la Presa Electriona se consideran en general rocas con tendencia a mala y buena calidad geomecánica (Índice Q), moderadamente duras a duras (resistencia a la compresión simple), no ripables y con numeroso o poco grado de fracturación (RQD). En general estas rocas se pueden considerar como macizos con condiciones geomecánicas regulares a buenas.

- El modelado geofísico para el sitio de Presa Belén presenta un valor del RMS  $>1,5$  asociado únicamente al perfil 1, lo que indica que tanto el modelo geológico como el geofísico propuesto se ajustan significativamente.
- Las rocas sobre las que se funda el sitio de Presa Belén presenta velocidades  $V_p$  de 3,7 a 4,8 km/s.
- Estas rocas del sitio de Presa Belén, se caracterizan según los diferentes parámetros geotécnicos a rocas buenas (Índice Q), duras a muy duras (resistencia a la compresión simple), no ripables y con un grado medio a bajo de fracturación (RQD). En general estas rocas se pueden considerar como macizos con condiciones geomecánicas buenas a muy buenas.
- A partir de los valores recopilados en estudios previos realizados por el ICE, se determinan parámetros de comparación de las velocidades  $V_p$  obtenidas en cada sitio de Presa.
- Con base en los datos de los parámetros  $V_p$ ,  $V_s$ ,  $E_d$ ,  $E_s$  realizados por el ICE en los túneles de los diferentes proyectos y sus respectiva relaciones lineales y potenciales, se determinaron valores indirectos de  $V_s$ ,  $E_d$  y  $E_s$ , de cada sitio de presa.
- Para el sitio de Presa Electriona se determinó basado en la relación de la curvas de los datos del ICE y el valor  $V_p$ , parámetros de  $V_s$  de 2,0 y 2,6 km/s, para el Módulos Dinámico ( $E_d$ ) valores de 21.289 y 38.931 MPa, y para el Módulo Estático ( $E_s$ ) valores de 11.771 y 30.628 MPa.
- Basado en los valores obtenidos para el Módulo Estático ( $E_s$ ), definido para los materiales sobre los que se funda el sitio de Presa Electriona, y según la clasificación de Ávila (2004), las rocas presentes en este sector corresponden a macizos con condiciones geomecánicas buenas.
- Para el sitio de Presa Belén se definieron parámetros indirectos basado en los estudios del ICE, con valores de velocidad  $V_s$  de 2,2 y 2,9 km/s, para el Módulo Dinámico ( $E_d$ ) valores de 27.635 y 50.030 MPa y para el Módulo Estático ( $E_s$ ) valores de 17.796 y 45.572 MPa.
- Basado en los valores obtenidos para el Módulo Estático ( $E_s$ ), definido para los materiales de fundación del sitio de Presa Belén y según la clasificación de Ávila (2004), las rocas de esta presa presenta condiciones geomecánicas buenas.
- En general se considera que las litologías sobre las que se fundan ambos sitios de Presa, presentan condiciones geomecánicas buenas, debido a la condición sana del macizo, y a

los valores de los diferentes parámetros geotécnicos y sus respectivas clasificaciones asociadas.

## 5.2 RECOMENDACIONES

- El índice Q y el porcentaje de RQD, corresponden a criterios de clasificación muy conservadores que limitan la calidad de la roca buena a velocidades  $V_p$  superiores o iguales a 4,5 km/s, sin embargo muchas litologías existentes en el Valle Central no cumplen con este parámetro de clasificación a pesar de que presentan muy buena calidad geomecánica, por lo que estos criterios deben considerarse como parámetros de referencia y no medidas determinantes de la calidad del macizo.
- Se recomienda realizar una perforación sobre la margen derecha del Sitio de Presa Belén para confirmar la presencia de la falla inferida F4.
- Los materiales sobre los que se fundan ambos sitios de Presa presentan condiciones geomecánicas buenas. Ante la posibilidad de que la CNFL considere reestructurar o reubicar estos sitios de presa en un futuro cercano, se recomienda que las estructuras se funden sobre estos materiales lávicos pertenecientes a la Formación Colima.

## CAPÍTULO 6. REFERENCIAS

- ALÁN M., M.A., 1978: Geología del área NW de San Gabriel de de Aserrí. 40 págs. Univ. de Costa Rica, Esc. Centroamericana de Geol. [Inf. Camp. Geol].
- ALVARADO, C.Mª E., 1972: Estudios sedimentológicos en la Formación Pacacua (Mioceno, Costa Rica).-185 págs. Univ. de Costa Rica, San José. [Tesis Lic.].
- ÁLVAREZ, E. F., 1982: Geología de Bustamante y alrededores, Provincia de San José, CR.-53 págs. Univ. de Costa Rica, San José. [Tesis Lic.].
- ARLANDI, R. M., 2005: Geofísica Aplicada a la Obra Civil: Métodos Geoeléctrico y Sísmica de Refracción, Casos Practicos.-68 págs. GEOCONSULT Ingenieros Consultores S.A., Madrid.
- ARREDONDO. S., HERNÁNDEZ. S., MADRIGAL. J., 1988: Informe geológico de una zona al oeste del Valle Central.-15 págs. Univ. de Costa Rica, curso de geología de Campo II, San José.
- ASTIER, L.J., 1975: Geofísica Aplicada a la Hidrogeología.-344 págs. Ed. Paraninfo, Madrid.
- ÁVILA, B. M., 1981: Informe geofísico de avance, zona de tubería forzada y tanque de oscilación.-8 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1983a: Informe sobre investigaciones geofísicas en el Proyecto Ventanas-Garita, Desarenador, Trincheras y Línea de Túnel.-13 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1983b: Resumen de datos geofísicos en el sitio de Toma Río Ciruelas, margen izquierda.-3 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1984a: Refracción sísmica y microsísmica en la zona de intersección de túneles (PID).-6 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1984b: Informe geofísico de resistividad eléctrica efectuada en el punto PID, Línea de Centro de túnel-6 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1984c: P.H. Ventanas Garita, microsísmica Túnel 1-Boca 2.-8 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1985a: Microsísmica margen izquierda río Virilla, P.H. Ventanas Garita.-7 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].



- ÁVILA, B. M., 1985b: P. H. Virilla, Informe geofísico Etapa Preliminar.-15 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1985c: P.H. Ventanas Garita, microsísmica Túnel 2-Boca 1, y Túnel 2-Boca 2.-8 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1986a: Microsísmica de la galería margen izquierda del sitio de presa Virilla, P.H. Ventanas Garita.-7 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1986b: Microsísmica Post-inyección Túnel 1, Estaciones 1+019 a 1+307, 1+800 a 2+268, 2+650 a 3+010. P.H. Ventanas Garita.-7 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1986C: P. H. Virilla, Informe geofísico de avance a la Prefactibilidad.-14 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. & LEANDRO G., 1997a: Estudio geofísico de refracción sísmica, microsísmica y resistividad eléctrica para la zona de salida del túnel de conducción, P.H. Brasil-13 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B. M., 1997b: Informe geofísico de microsísmica en el túnel de conducción estaciones 0+325 a 0+940. P.H. Brasil.-6 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- ÁVILA, B., 2004: Proyecto Hidroeléctrico Pirris, Túnel de Conducción.-5 págs. C.S. Exploración Subterránea, ICE, San José [Inf. interno.].
- BARTON, N., 2007: Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy.-729 págs. Ed. Taylor & Francis Group, Londres.
- BELLON, H., & TOURNON, J., 1978: Contribution de la géochronométrie K-Ar à l' étude du magmatisme de Costa Rica, Amérique Centrale. Bull Société géologique de France. 6: 955-959 págs.
- BERGOEING, J. P; MALAVASSI V., JIMENEZ, R., 1980: Síntesis geológica del Valle Central de Costa Rica, escala 1:100000. IGN, San José.
- BOLLO, M F., 1979: Informe sobre las características geotécnicas del proyecto hidroeléctrico Angostura-Izarco sobre el río Reventazón.- 45 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- BOLT, A. B., 1976: Nuclear explosions and earthquakes: The Parted Veil. – Ed. W.F Freeman and Co, San Francisco.
- CANTOS, F.J., 1989: Tratado de geofísica aplicada.- 535 págs. Ed. Inst. Geol. y Minero de España, Madrid.

- CASTILLO, R., 1969: Geología de los mapas Abra y partes de Río Grande, Costa Rica.-40 págs. Dirección de Geol. Minas y Petróleo, San José. [Inf. Tec.].
- CROSBY, I., 1940: Geology of the Virilla Canyon, Meseta Central Occidental, Costa Rica.- Proc. 8th Amer. Sc. Congr. 4:483-494.
- DENGO, O. C & CHAVERRI, G. R., 1951: Resumen de tesis 1944: Reseña geológica de la región suroeste de la Meseta Central de Costa Rica. Rev. Univ. de Costa Rica, (5): 313-326 págs.
- DENYER, P & ARIAS, M., 1991: Estratigrafía de la región central de Costa Rica.- Rev. Geol. de Amer. Central. 12:1-59 págs.
- DENYER, P & ARIAS, M., 1990: Geología de la Hoja Abra, escala 1:50000, IGN, San José.
- DENYER, P. & MONTERO, P., 1988: Mapa Geo-Estructural y Sismos del Valle Central.-Escala 1:50000. IGN, San José.
- DIBIASE. R., 2005: Seismic Refraction Analysis of Sediment Fill in Ciclone Graben, Needless Distric, CanyonLands National Park.-15 págs. University of California, Berkeley. <http://keck.wooster.edu/publications/eighteenthannual>.
- DÓNDOLI, C., 1943: Visión rápida geoagronómica de la Meseta Central.- Boletín. Depto. Nacional de Agricultura. 36: 1-15 págs
- DÓNDOLI, C., 1949: Informe geológico sobre las posibilidades acuíferas de los terrenos y alrededores de la finca de la Junta de Protección Social, distrito de Pavas. Rev. Suelo Tico, IICA, UCR y MAG. Vol. 2: 440-454 págs.
- DÓNDOLI, C., 1950: Informe geológico sobre las canteras de Colima y del Río Virilla. Rev. Suelo Tico, IICA, UCR y MAG., (4): 251-252 págs.
- DÓNDOLI., C., 1958: Condiciones Geológicas del área del Alto Virilla y condiciones para un embalse de aguas para el Área Metropolitana.-63 págs. Dirección de Geología Minas y Petróleo. Esc Centroamericana de Geol. [Inf. Tec.].
- DONDOLI, C., & CHAVES, C. R., 1968: Mapa geológico del Valle Central,- Escala 1:150000, IGN, San José.
- ECHANDI, E. E., 1981: Unidades volcánicas de la Vertiente Norte de la cuenca del Río Virilla.-123 págs. Univ. de Costa Rica, San José. [Tesis Lic.].

- FERNÁNDEZ, M., 1969: Las Unidades hidrogeológicas y los manantiales de la vertiente Norte de la cuenca del río Virilla.-45 págs. Investigación en Aguas Subterráneas [Inf. Tec.].
- FLORES, H., HERNÁNDEZ, E., VEGA, E., 1988: Cartografía Geológica de parte de las hojas Abra y Río Grande (Ciudad Colón).-50 págs. Univ. de Costa Rica, Curso Geol. de Campo II, San José.
- FUSTER, J.M & STRONG P.M., 1961: Introducción a la prospección geofísica.-483 págs. Ed. Omega S.A, Barcelona.
- GANS, P., 1999:  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Geochronology of some Costa Rica volcanic rocks.- Univ. de Santa Bárbara. [inédito].
- GANS, P.B., ALVARADO, G., PÉREZ, W., MACMILLAN, I., & CALVERT, A., 2003: Neogene Evolution of the Costa Rica Arc and Development of the Cordillera Central. Geological Society of America 99th, April, 2003.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L, FERRER, M., ORTUÑO L., & OTEO, C., 2002: Ingeniería Geológica.-744 págs. Pearson Edicación, Madrid.
- GRIFFITHS, D. H & KING, R. F., 1972: Geofísica aplicada para ingenieros y geólogos.-229 págs. Ed. Paraninfo, Madrid.
- HANNAH, S., VOGEL, T., PATINO, L., ALVARADO, G., PÉREZ, W., & SMITH, D., 2002: Origin of silicic rocks in Central Costa Rica: a study of a chemical variable ash-flow sheet in the Tiribí Tuff. Bull Volcanol, Ed. Springer-Verlag. 64:117-133 págs.
- HAGEDOORN, J. G., 1958: The plus-minus methods of interpretation seismic refraction sections. Rev. Geophysical Prospecting, European Association of Exploration Geophysicist, London 58-82.
- HOWELL. W., 1952: Volcanic history of the Meseta Central Occidental, Costa Rica.- Univ. de California, Pub. Ciencias Geol. Vol. 29 (4): 145-180 págs.
- ICE, s.f: Instituto Costarricense de Electricidad-15 págs. Folleto Informativo de la Dirección de Mercadeo Corporativo y Relaciones Públicas, San José.- <http://www.grupoice.com>.
- KUSSMAUL, S., & SPRECHAMANN, P., 1982: Estratigrafía de Costa Rica (América Central), II: Unidades litoestratigráficas ígneas.- V Congreso Latinoamericano de Geología, Buenos Aires. Acta n°1: 73-79 págs.
- LEANDRO, C., 1999: Estudio de deslizamiento margen derecha del río Virilla aguas abajo planta San Antonio.-15 págs. Depto.de Geología, ICE, San José. [Inf. Tec.].

- LEANDRO, C., 2007: Informe tomografía sísmica tri-dimensional represas Belén y Electriona.-15 págs. INGEOFICA DOS MIL, S.A, San José. [Inf. Tec.].
- LEANDRO, G. SAÉNZ L. F., & AVILA, M., 1985: P. H. Ventanas Garita, Estudio geofísico complementario del Sitio de Presa, Río Virilla.-15 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- LEANDRO, G., 1992: Cálculo de módulos elásticos dinámicos y estáticos con pruebas sísmicas de campo y laboratorio.-13 págs. Ed. ICE, San José [Nota. Tec.].
- LEANDRO, G., 1998: Microsísmica del túnel de conducción tramo 0+590 a 1+020 P.H. Brasil.- 10 págs. Depto. de Geología, ICE, San José. [Inf. interno.].
- LOSILLA, P. M., 1977: Consideraciones sobre el potencial de aguas subterráneas en la cuenca del Río Virilla y zonas propuestas para su explotación.- 42 págs. Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, SENAS. [Inf. Tec.].
- LOSILLA, P. M., 1986: Mapa Hidrogeológico del Valle Central, Costa Rica.- Rev. Geol. de Amér. Central, 4: 93-94 págs.
- MALAVASSI, V. E., 1965: Reseña Geológica del Valle Central.- 22 págs. Departamento de Geol. y Minas, Ministerio de Industrias, San Pedro de Montes de Oca. [Inf. Tec.].
- MALAVASSI, E & MADRIGAL, R., 1967: Reseña Geológica del Área Metropolitana de Costa Rica.-12 págs. Dirección de Geología y Minas, Ministerio de Industria y Comercio. [Inf. Tec.].
- MARSHALL, J. S., & IDLEMAN, B. D., 1999: 40Ar/39Ar age constraints on Quaternary landscape evolution of the central volcanic arc and Orotina debris fan, Geological Society American, Annual n° 06426.
- MARSHALL, J.S., IDLEMAN, B. D., GARDNER, T.W., & FISHER, D.M., 2003: Landscape evolution within a retreating volcanic arc, Costa Rica. Rev. Ámer. Central 31: 419-422.
- MARTINEZ, P & AZUAGA, M., 1997: Medición del módulo de elasticidad de Young.-11 págs. Dpto. de Física, Univ. de Buenos Aires, Buenos Aires.[Inf. Lab].
- MOLINA, F., SALAZAR, M., LEÓN L. F., 1988. Geología de la hoja Abra y Río Grande, área al suroeste, Costa Rica.-12 págs. Univ. de Costa Rica, Curso de Geología de Campo II, San José.
- OYO Corporation, 2004: SeisImager Manual Versión 3.0 [Computer program manual]: Japan: OYO Corporation.
- PARASNIS, D.S., 1970: Principios de Geofísica aplicada.-205 págs. Ed. Paraninfo, Madrid.

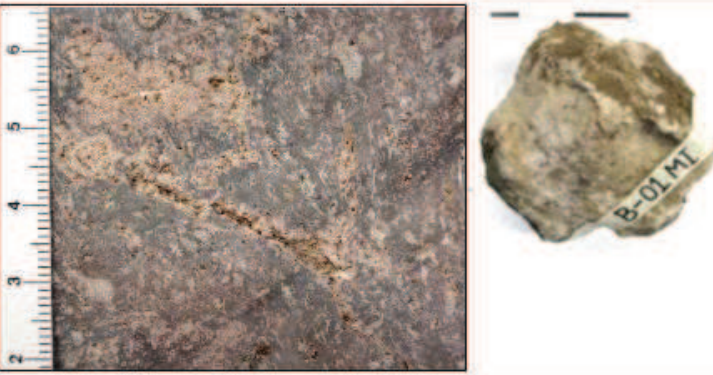
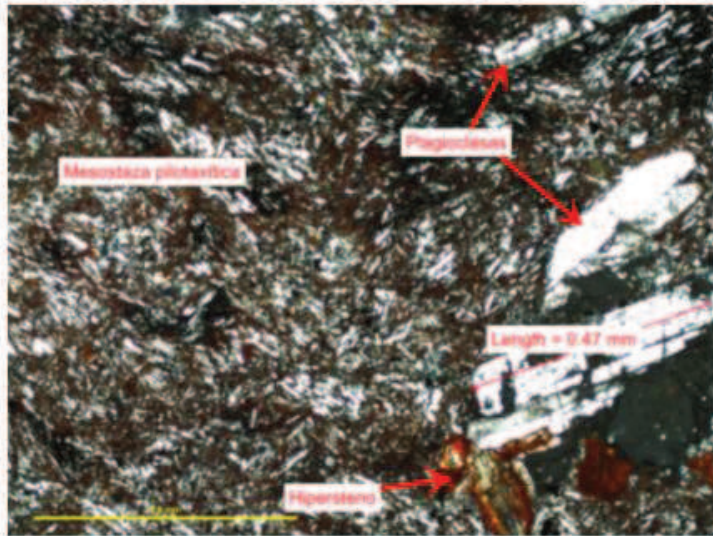
- REDPATH, B.B., 1973, Seismic refraction exploration for engineering site investigations, Technical Report E-73-4, U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station Explosive Excavation Research Laboratory, Livermore, California.
- PERALTA, S.A., 2007: Levantamiento sísmico de refracción somera y levantamiento geológico en el área de El Mamón, al norte del poblado de Urumaco, Estado de Falcón.-111 págs. Univ. Simón Bolívar, Sartenejas. [Tesis Grad].
- PÉREZ, F. W., 2000: Vulcanología y petroquímica del evento ignimbrítico, del evento Pleistoceno Medio (0,33 Ma) del Valle Central de Costa Rica.-170 págs. Univ. de Costa Rica, San José. [Tesis Lic.].
- PEREZ, P. C., 2006: Perspectiva Global de la ciencia.-Proyecto de cooperación en materia de investigación e innovación entre los Departamentos de Física y Química, Tecnología, Ciencias y Matemáticas del I.E.S. -<http://pagina.jccm.es/edu/ies/cperezpastor/dptos/fq/matcien/braquis/braquis.htm>.
- PÉREZ, W., ALVARADO, G., & GANS, P.B., 2006: The 322 ka Tiribí Tuff: Stratigraphy, geochronology and mechanism of deposition of the largest and most recent ignimbrite in the Valle Central, Costa Rica. Bull. of Volcanology, 69: 25-50 págs.
- PINILLA, B., 1992: Geoquímica regional de las Hojas Abra y Barva, Valle Central, Costa Rica.-101 págs. Univ. de Costa Rica, San José. [Tesis Lic.].
- ROSALES, C. 2000: Sobre el comportamiento sísmico de los depósitos de suelo del área de Cañaveralejo, Calí Colombia.-245 págs. Univ. del Valle, Calí. [Tesis Grad].
- SCHAUFELBERGER, P., 1935: Un estudio geológico sobre la Meseta Central Occidental.- Rev. Inst. Def. del Café. 2: 12-19 págs.
- SCHOSINSKY, G., & VARGAS, A., 2001: Hidrogeología de un sector de la margen izquierda del río Virilla, provincia de San José, Costa Rica.- Rev. Geol. Amér. Central. 24: 93-102 págs.
- SPRECHMANN, P., 1984: Manual de Geología de Costa Rica.-320 págs. Ed. Univ. de Costa Rica, San José.
- TELFORD, W. M., SHERIFF, R. E., GELDART, L. P., 1990. Applied Geophysics.-620 págs. Cambridge University.
- VARGAS, S. A., 1994: Evaluación de características químicas de aguas superficiales e hidrogeológicas en la Subcuenca parte alta del Río Virilla y Río Durazno, cantón Vázquez de Coronado, provincia de San José, Costa Rica.-235 págs. Univ de Costa Rica. [Tesis Lic.].
- WEYL, R., 1956: El Valle Central.- 29-44 págs. Instituto Geográfico Nacional y Ministerio de Obras Públicas y Transporte. [Inf. Trim.].



## **ANEXOS.**

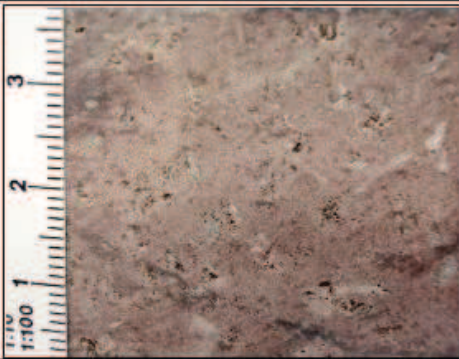

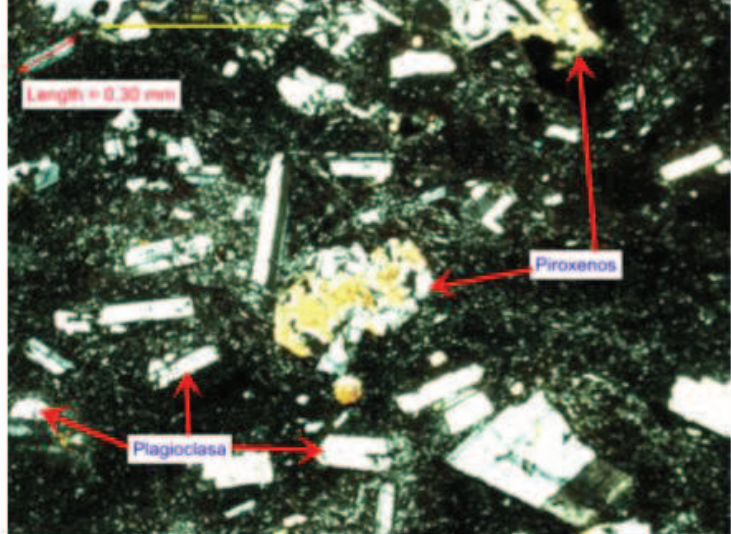
- 1. DESCRIPCIONES PETROGRÁFICAS**
  
- 2. ANÁLISIS DE VELOCIDAD VP DE LOS DIFERENTES ESTUDIOS GEOFÍSICOS REALIZADOS CON LOS POSIBLES PARÁMETROS GEOTÉCNICOS APLICADOS A CADA LITOLÓGÍA.**

## ANEXO 1. Descripciones Petrográficas

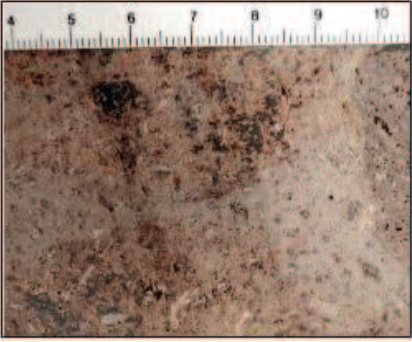

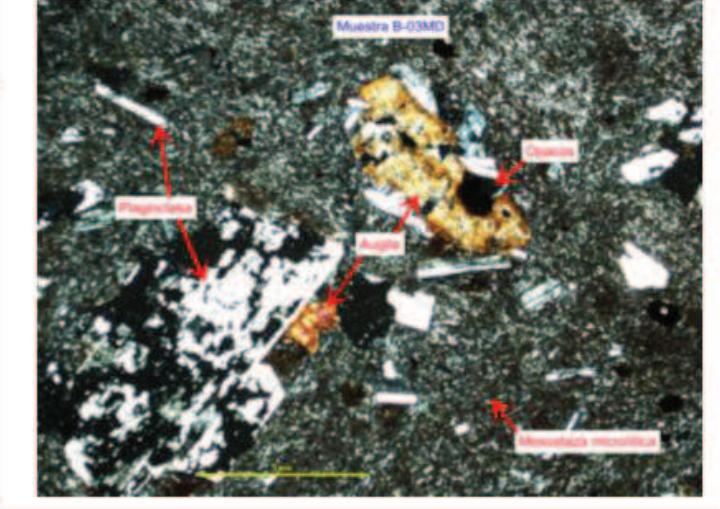
<p><b>Cód. muestra:</b> B-01MI  <b>Coordenadas:</b> 516.165-217.320  <b>Procedencia:</b> Sitio de presa Belén, margen izquierda.</p>	
<p><b>Afloramiento:</b> base del cañón sobre las lavas de la muestra B-02, bloques angulares dm, contacto entre los bloques puntual y por matriz, la matriz es fácilmente disgregable, con apariencia de una toba soldada.</p> <p><b>Nombre:</b> Bloque de brecha volcánica (Autobrecha)          Descripción macroscópica:          Los clastos sub-angulares presentan una coloración morado rojizo oscuro con textura porfirítica afanítica, con fenocristales de plagioclasa de tamaños máx. de 5x2 mm, y minerales ferromagnesianos &lt;0.5 mm, algunos oquedades observadas se deben al desprendimiento mecánico de los fenocristales o por alteración y lixiviación de los mismos.</p>	
<p>*Descripción microscópica: <b>Bloques</b>  <b>Nombre:</b> Andesita con dos piroxenos  <b>Textura:</b> Porfirítica, holocristalina, pilotaxítica, poco glomeroporfirítica, intergranular, seriada.</p>	
<p>*Composición mineralógica:  <b>Fenocristales 13-15%</b>          Plagioclasa (10-12%), formas tabulares a veces alargadas (Tamaños máx. de 4.0 X 0.71 mm) otras veces más rectangulares (Tamaños máx. de 3.48 X 1.25 mm), macla de Karsbard.          Hipersteno (1%), hipidiomórficas, generalmente sano pero con bordes opacitizados, actualmente oxidados. Sus tamaños máximos son de 0.43 X 0.12 mm.          Augita (1%), hipidiomórficas-xenomórficas, sano, y muchas veces más no siempre, con bordes opacitizados, en cuyo caso están oxidados. A veces con maclas "reloj de arena". Tamaños máx. de 0.64 X 0.35 mm.  <b>Mesostaza 80-82%</b>          Plagioclasa          Opacos  <b>Accesorios 1-2%</b>          Opacos (1-2%)  <b>Secundarios 18-22%</b> (*) Su porcentaje se incluye dentro de los opacos de la mesostaza y por ello no aparece en el porcentaje          Óxidos-hidróxidos de hierro: 18-20 (*), Arcillas: 1-2 (*)</p>	

\*Descripción microscópica realizada por **Geol. Manuel A. Barrantes Viquez**



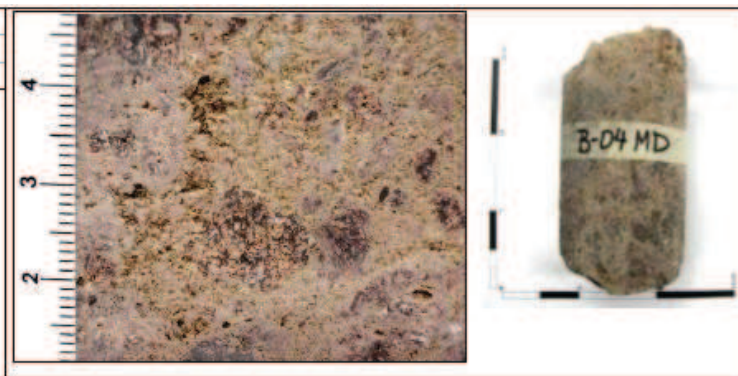
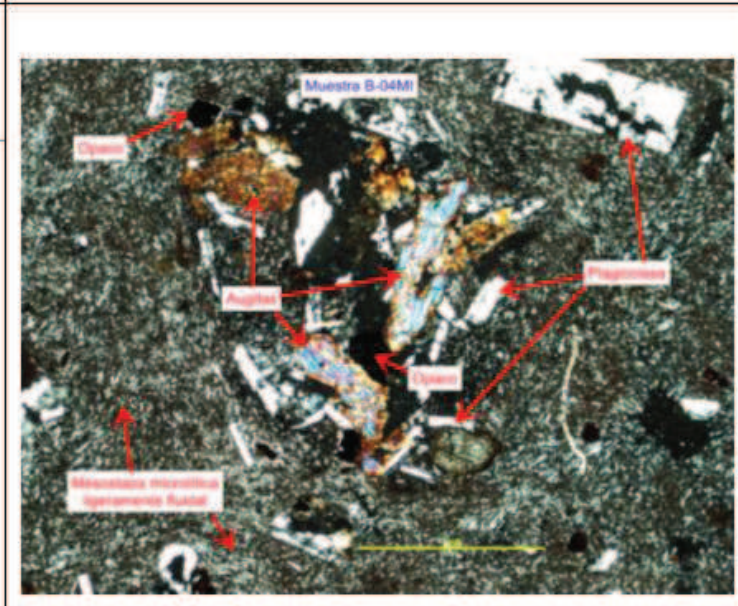
<b>Cód. muestra:</b> B-02MI	 	
<b>Coordenadas:</b> 516.175-217.317		
<b>Procedencia:</b> Sitio de presa Belén, margen izquierda		
Afloramiento: base del cañón sitio de presa Belén, lavas masivas poco fracturadas, color gris rojizo.		
Nombre: Andesita		
<b>Descripción macroscópica:</b> Roca porfírica afanítica de color morado, con bandeamientos oscuros de minerales ferromagnesianos con textural fluidal. Contiene fenocristales de plagioclasa de tamaños máx. 1x3 mm, y escasas vesículas. Algunas oquedades se asocian a la disgregación de los minerales de la matriz o por alteración de los mismos.		
<b>*Descripción microscópica:</b> <b>Nombre:</b> Andesita con dos piroxenos. <b>Texturas:</b> Porfírica, holocristalina, poco glomeroporfírica, intergranular, poco fluidal.		
<b>*Composición mineralógica:</b> <b>Fenocristales 10-13%</b> Plagioclasa (8-10%), fenocristales idiomórficos hasta hipidiomórficos, formas alargadas, y con tamaños máx. 1.8 X 0.32 mm, maclado simple, combinada a veces con albita y poca zonación, del tipo normal. Hipersteno (1-2%), fenocristales hipidiomórficos hasta xenomórficos, con tamaños máx. de 0.90 X 0.34 mm. Augita (1%), formas xenomórficas, más raramente en formas hipidiomórficas, a veces con maclas de tipo reloj de arena. Sus tamaños máximos son de 0.90 X 0.40 mm. <b>Mesostaza 84-85%</b> Plagioclasa Opacos <b>Accesorios 1%</b> Opacos: (1%) <b>Secundarios 26-27% (*)</b> Su porcentaje se incluye dentro de los opacos de la mesostaza y por ello no aparece en el porcentaje. Óxidos-hidróxidos de hierro: 22-25 (*) Arcillas: 1, Cuarzo: < 1		
		

\*Descripción microscópica realizada por **Geol. Manuel A. Barrantes Viquez**

<b>Cód. muestra:</b> B-03MD			
<b>Coordenadas:</b> 516.232-217.264			
<b>Procedencia:</b> Sitio de presa Belén, margen derecha			
Afloramiento: Paredón Este del cañón cerca del sitio de presa, a la par de la tubería del A y A. Consiste en una lava masiva color violácea.			
Nombre: Andesita			
Descripción macroscópica:			
Corresponde a un bloque de la autobrecha, consiste en los bloques sub-angulares de color morado oscuro, rodeados por una matriz color morado claro, se presenta textura fluidal, tanto los bloques como la matriz son porfírica afanítica con muestran fenocristales de plagioclasa con tamaños máx. de 4x2 mm, la diferencia entre los bloques y la matriz se debe principalmente a cambios en la coloración de la roca, presenta muy pocas vesículas y mayormente oquedades asociadas a alteraciones o disgregación de los fenocristales.			
			
*Descripción microscópica:			
<b>Nombre:</b> Andesita con dos piroxenos			
<b>Texturas:</b> Porfírica, holocristalina, poco glomeroporfírica, intergranular, poco fluidal.			
*Composición mineralógica:			
<b>Fenocristales 12-13%</b>			
Plagioclasa (10%), fenocristales idiomórficos-hipidiomórficos, maclado casi siempre simple (Carlsbard), y más raramente de tipo albita, tamaños máx. son de 4.3 X 4.03 mm. Hipersteno (1%), fenocristales alterados principalmente a óxidos-hidróxidos de hierro y algo de arcillas, casi siempre con los bordes opacitados. Tamaños máx. 0.16 x 0.1 mm. Augita (1-2%), fenocristales hipidiomórficos tamaños máx. son de 1.25 X 0.52 mm			
<b>Mesostaza 83-85%</b>			
Plagioclasa			
Opacos			
<b>Accesorios 1-2%</b>			
Opacos: (1-2%)			
<b>Secundarios 26%</b> (*) Su porcentaje se incluye dentro de los opacos de la mesostaza y por ello no aparece en el porcentaje.			
Óxidos-hidróxidos de hierro: 25*			
Arcillas: 1*			
			

\*Descripción microscópica realizada por **Geol. Manuel A. Barrantes Viquez**



<p><b>Cód. muestra:</b> B-04MI  <b>Coordenadas:</b> 516.183- 217.317  <b>Procedencia:</b> Sitio de presa Belén, margen izquierda.</p>	
<p>Afloramiento: Brechas muy consolidadas, localizadas en la base del río frente al sitio de presa Belén, apariencia de lavas.</p> <p>Nombre: Brecha volcánica</p> <p>Descripción macroscópica:  Brecha volcánica, clastos sub-angulares, matriz de color morado claro y clastos de color morado oscuro, tanto los clastos como la matriz presentan textura porfirítica afanítica con fenocristales de plagioclasa de tamaños máx. 2x3 mm, y minerales ferromagnesianos con textura fluidal, algunos aglomerados de minerales dan la apariencia de bloques aislados.</p>	
<p>*Descripción microscópica:  <b>Nombre:</b> Andesita con dos piroxenos  <b>Textura:</b> Porfirítica, intergranular, a veces glomeroporfirítica, con mesostaza microlítica, holocristalina ligeramente fluidal.</p> <p>*Composición mineralógica:  <b>Fenocristales 12-13%:</b>  Plagioclasa (An 46): 9-10%, formas idiomórficas hasta hipidiomórficas, tamaño máx. 2.34 X 1.37 mm, maclado simple (Carlsbad), menos frecuentemente tipo albita a veces con zonación homogénea discontinua.  Hipersteno (1%), fenocristales con bordes opacitados (actualmente oxidados parcialmente), y con alteración parcial a arcillas, tamaño máx. es de 0.51 X 0.29 mm.  Augita (2%), fenocristales de formas hipidiomórficas a poco xenomórfica. Generalmente sana, a veces con bordes opacitados (actualmente oxidados). Tamaños máx. 0.38 X 0.16 mm  <b>Mesostaza 83-85%:</b>  Plagioclasa  Opacos  <b>Accesorios 1-2%:</b>  Opacos: (1-2%)  <b>Segundarios 25-27% (*)</b> Su porcentaje se incluye dentro de los opacos de la mesostaza y por ello no aparece en el porcentaje.  Oxidos-hidróxidos de hierro: 25*, Arcillas: 1-2*</p>	



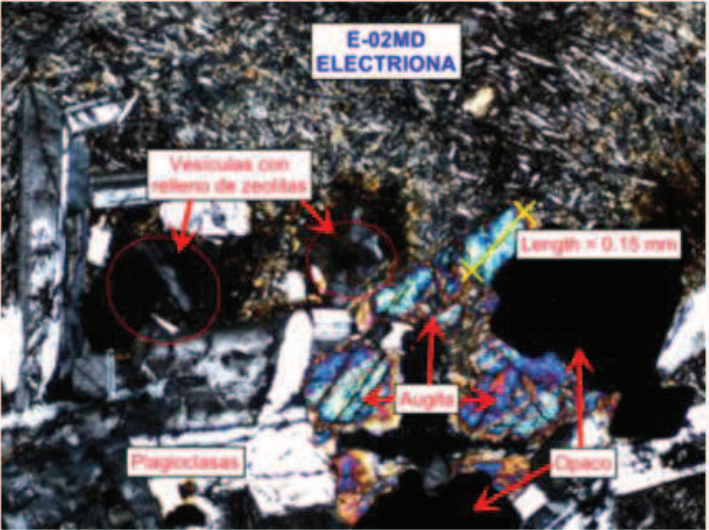
\*Descripción microscópica realizada por **Geol. Manuel A. Barrantes Viquez**



<b>Cód. muestra:</b> E-01MD	
<b>Coordenadas:</b> 518.500-216.690	
<b>Procedencia:</b> Sitio de presa Electriona, margen derecha	
<p>Afloramiento: Brechas monomítica muy alterada, bloques angulares de tamaño dm, envueltos en una matriz arcillosa color rojiza. La muestra corresponde a un bloque de la misma.</p> <p>Nombre: Andesita poco vesiculada.</p> <p>Descripción macroscópica:  Bloque angular, pátina de alteración de aprox. 1 cm, de color morado-rojizo, sana la muestra se torna gris oscuro. El bloque presenta una textura porfirítica afanítica con fenocristales de plagioclasa de tamaños máx. 1x4 mm, algunos de estos fenocristales se encuentran muy alterados por lo que forma oquedades alargadas de aprox. 0.5 mm, algunas de las mismas se encuentran rellenas de minerales secundarios.</p>	
<p>*Descripción microscópica:  <b>Nombre:</b> Andesita con dos piroxenos  <b>Textura:</b> Porfirítica, glomeroporfirítica, intersetal-intergranular, con mesostaza microlítica-holocristalina, poco vesicular.</p>	
<p>*Composición mineralógica:  <b>Fenocristales 10-11 %</b>  Plagioclasa (7-8%), formas idiomórficas hasta hipidiomórficas, con tamaños máximos de 6.0 X 1.50 mm. Presenta una fuerte alteración en muchos de los fenocristales más grandes, particularmente en su parte central, a arcillas y zeolitas, con óxidos y arcillas presentes en microfracturas o bien a lo largo de planos de macla.  Augita (2-3%), hipidiomórficas-xenomórficas, a veces con maclas de tipo "reloj de arena", tamaños máx. de 0.46 X 0.21 mm,  Fantasmas de hipersteno (1%), formas idiomórficas-hipidiomórficas, se encuentra casi completamente sustituido por arcillas y óxidos-hidróxidos de hierro, y algo uralitizado?. El tamaño máx. 1.76 X 1.49 mm.  <b>Mesostaza 77-78 %</b>  Plagioclasa  Opacos  Piroxenos alterados  <b>Accesorios 1-2 %</b>  Opacos: (1-2%)  <b>Secundarios 9-10%</b>  Óxidos-hidróxidos de hierro: 3-4%, Arcillas: 3-4%, Zeolitas: 1-2%, Cloritas: &lt; 1%</p>	

\*Descripción microscópica realizada por **Geol. Manuel A. Barrantes Viquez**



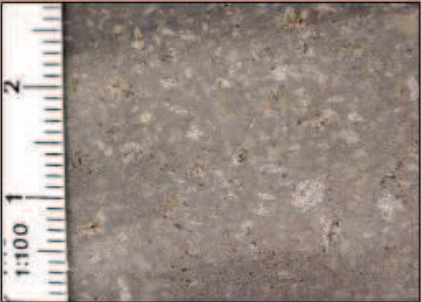

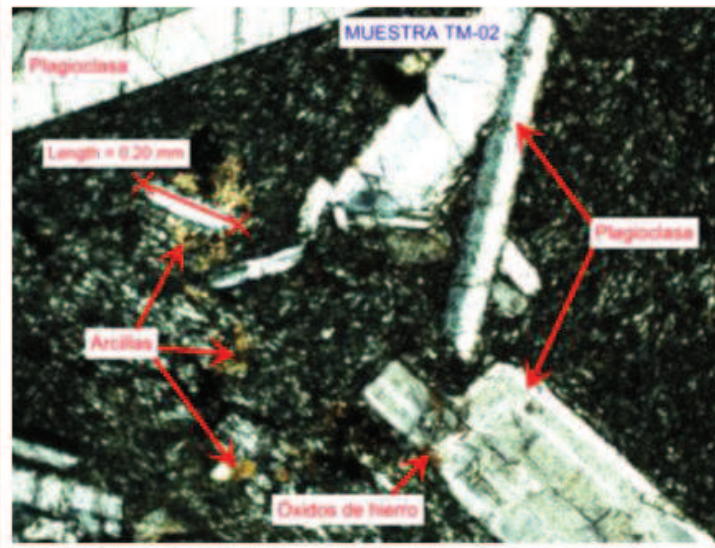
<b>Cód. muestra:</b> E-02MD		
<b>Coordenadas:</b> 518.510-216.680		
<b>Procedencia:</b> Sitio de presa Electriona, margen derecha		
Afloramiento: Lavas sanas en la base del río Virilla, sitio de presa Electriona. Nombre: Andesita Descripción macroscópica: Roca porfírica afanítica con fenocristales de plagioclasas (3 x 4 mm) y ferromagnesianos muy alterados con coloraciones marrones, la muestra presenta un color gris oscuro sana y café claro cuando está alterada.		
*Descripción microscópica: <b>Nombre:</b> Andesita con dos piroxenos <b>Textura:</b> Porfírica, glomeroporfírica, holocristalina, intergranular, intersetal, mesostaza microlítica, a veces ligeramente fluidal, microesferulítica puntualmente (plagioclasas), poco vesicular		
*Composición mineralógica: <b>Fenocristales 12-13%</b> Plagioclasa (9-10%), formas idiomórficas hasta hipidiomórficas, con tamaños máximos de 4.52 X 0.96 mm. Hipersteno (1%), formas idiomórficas-hipidiomórficas, y con tamaños máx. de 0.50 X 0.32 mm, a veces con inclusiones de opacos. Aparece en "glomeros" junto a plagioclasa, augita, y opacos. Augita (2-3%), formas hipidiomórficas hasta xenomórficas, tamaños máx. de 1.92 X 2.1 mm. A menudo con maclas del tipo "reloj de arena", bastante sanos, en ocasiones como inclusión en algunas plagioclasas. <b>Mesostaza 78-80%</b> Plagioclasa Piroxenos Opacos <b>Accesorios 1-2%</b> Opacos: (1-2%) <b>Secundarios 4-5%</b> Óxidos-hidróxidos de hierro: 1-2 Arcillas: 1 Zeolitas: 1-2, Cloritas: <1		

\*Descripción microscópica realizada por **Geol. Manuel A. Barrantes Viquez**

<b>Cód. muestra:</b> TM-01		
<b>Coordenadas:</b> 515.830-217.220		
<b>Procedencia:</b> Tajo Monte Roca, paredón N		
Afloramiento: Tajo Monte Roca, paredón N parte intermedia a baja, lava masiva moderadamente alterada. Nombre: Andesita bandeada		
Descripción macroscópica: Roca porfírica afanítica de color gris oscuro, presenta fenocristales de plagioclasa de tamaños máx. 2x3 mm, y opacos con textura fluidal, en algunas secciones de la roca se presenta una concentración de opacos de formas lenticular y una fuerte alteración de los minerales a óxidos de hierro que le dan una textura bandeada a la muestra.		
*Descripción microscópica: <b>Nombre:</b> Andesita con dos piroxenos <b>Textura:</b> Porfírica, intergranular, holocristalina, pilotaxítica, glomeroporfírica		
*Composición mineralógica: <b>Fenocristales 18-20%</b> Plagioclasa (13-14%), formas idiomórficas a hipidiomórficas, casi siempre maclado (Carlsbad y albita), y poca zonación generalmente normal, tamaños máx. son de 3.78 X 0.64 mm. Hipersteno (1-2%), formas idiomórficas hasta hipidiomórficas con tamaños máximos de 1 mm. Algunos pocos fenocristales presentan bordes opacitados. Augita (3-4%), formas hipidiomórficas a xenomórficas, sanos, a veces con macla del tipo "reloj de arena", tamaños máx. son de 0.33 X 0.30 mm. <b>Mesostaza 74-76%</b> Plagioclasa Opacos <b>Accesorios 1-2%</b> Opacos: (1-2%) <b>Secundarios 1-2%</b> (*) Su porcentaje se incluye dentro de los opacos de la mesostaza y por ello no aparece en el porcentaje. Óxidos-hidróxidos de hierro: <1* Arcillas: 1*		

\*Descripción microscópica realizada por **Geol. Manuel A. Barrantes Viquez**



<b>Cód. muestra:</b> TM-02		
<b>Coordenadas:</b> 515.790-217.230		
<b>Procedencia:</b> Tajo Monte Roca, base paredón N		
Afloramiento: Tajo Monte Roca, lavas sanas con aparente lajamiento muy localizado hacia la base del paredón.		
Nombre: Andesita		
Descripción macroscópica: Roca porfírica afanítica de color gris oscuro, con fenocristales de plagioclasa de tamaños máx. de 1x4 mm, se observa en algunos fenocristales una leve alteración a óxidos de hierro.		
*Descripción microscópica: <b>Nombre:</b> Andesita con dos piroxenos <b>Textura:</b> Porfírica, glomeroporfírica, holocristalina, intergranular, mesostaza muy ligeramente fluidal		
*Composición mineralógica: <b>Fenocristales 15-17%</b> Plagioclasa (10-12%), idiomórficas-hipidiomórficas con maclados (Carlsbard y albita), tamaños máx. de 3.70 X 1.10 mm. Hipersteno (2-3%), hipidiomórficas-xenomórficas, con ocasionales inclusiones de opacos generalmente a lo largo de planos de macla. Tamaño máx. 0.69 X 0.23 mm. Augita (2%), formas hipidiomórficas a xenomórficas, a veces con uralitización incipiente. Se observó una anomalía petrológica hipersteno "en textura coronítica" creciendo sobre augita. Tamaños máx. 0.44 X 0.26 mm. <b>Mesostaza 78-80%</b> Plagioclasa Opacos <b>Accesorios 1-2%</b> Opacos: (1-2%) <b>Secundarios 3-4% (*)</b> Su porcentaje se incluye dentro de los opacos de la mesostaza y por ello no aparece en el porcentaje. Óxidos-hidróxidos de hierro: <1* Arcillas: 1* Uralita: 2-3*		
		

\*Descripción microscópica realizada por **Geol. Manuel A. Barrantes Viquez**

<b>Cód. muestra:</b> TM-03		
<b>Coordenadas:</b> 515.800-217.120		
<b>Procedencia:</b> Tajo Monte Roca, paredón S		
Afloramiento: Tajo Monte Roca, se ubican en la base del camino a 5 m de la muestra TM-04, pendiente abajo, el afloramiento se muestra sub-horizontal discontinuo a lo largo de la base del paredón presenta una apariencia vidriosa negra. Nombre: Basalto? Descripción macroscópica: Roca porfírica afanítica de color gris oscuro con fenocristales de augitas de tamaños < 1 mm, la muestra presenta micro vetillas de cuarzo y fracturas rojizas por la alteración de los minerales a óxidos de hierro, algunos espacios en los fenocristales se encuentran parcialmente rellenos de cuarzo		
*Descripción microscópica: <b>Nombre:</b> Andesita basáltica <b>Textura:</b> Holocristalina, intergranular, poco porfírica e intersetal.		
*Composición mineralógica: <b>Fenocristales 12-15%</b> Plagioclasa (8-10%), formas idiomórficas a hipidiomórficas, con tamaños máx. de 2.41 X 1.05 mm. abundantes micro-inclusiones de opacos y piroxenos principalmente. Algunos presenta un reemplazo parcial de cloritas y arcillas, más raramente de óxidos-hidróxidos de hierro, muchas veces a lo largo de planos de macla y/o microfracturas. Hipersteno (1-2%), en cristales hipidiomórficos hasta xenomórficos, con tamaños máximos de 0.71 X 0.64 mm. Pocas veces se observan inclusiones de opacos, a veces con bordes de reacción Augita (2-3%), generalmente sanos, de formas hipidiomórficas y hasta xenomórficas, con tamaños máximos de 1.63 X 1.43 mm. Olivino (fantasmas): 1%, formas idiomórficas hasta hipidiomórficos fantasmas, con bordes opacitados y reemplazo principalmente a minerales de carácter arcilloso. Tamaños máx. Fenocristales (fantasmas) de 0.59 X 0.41 mm. <b>Mesostaza 82-83%</b> Plagioclasa Piroxenos Opacos <b>Accesorios 1-2%</b> Opacos: (1-2%) <b>Secundarios 8-9:</b> Clorita (3-4%), Óxidos-hidróxidos de hierro: (2-3%), Arcillas: (1-2%)		
		

\*Descripción microscópica realizada por **Geol. Manuel A. Barrantes Viquez**



ANEXO 2. Análisis de Velocidad Vp de los diferentes estudios geofísicos realizados con los posibles parámetros geotécnicos aplicados a cada litología.

Tipo de roca	Litologías	Vp (km/s)	PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA						Referencia
			Ripabilidad (Caterpillar D-9)	Índice Q		Densidad de la roca (kg/m <sup>3</sup> ) ( $\rho = aVp^{0,25}$ )	RQD		
				Valor Q $Q=10^{[(Vp-3500)/1000]}$	Calidad de la roca		% Rango	Grado de fracturación	
<b>ROCAS IGNEAS</b>	Toba alterada	0,7-1,3	Ripado fácil	0,0016-0,0063	Roca excepcionalmente mala	N.A	N.A	N.A	Ávila (1981)
	Toba lacustre	0,6-2,1	Ripado fácil-normal	0,0013-0,0398	Roca extremadamente mala	N.A	N.A	N.A	Ávila (1983a)
	Ignimbrita gris masiva	1,8-2,0	No son ripables	0,0200-0,0316	Roca extremadamente mala	N.A	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1981)
	Ignimbritas alteradas	1,4-1,6	Ripado normal	0,0079-0,0126	Roca excepcionalmente mala	N.A	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1984c)
	<b>Brechas volcanoclásticas</b>	<b>0,8-0,9</b>	<b>Ripado fácil</b>	<b>0,0020-0,0025</b>	<b>Roca excepcionalmente mala</b>	<b>N.A</b>	<b>&lt; 25%</b>	<b>Roca fuertemente fracturada</b>	<b>Bonilla (2012)</b>
	Lavas sanas	2,8-4,3	No son ripables	0,1995-14,000*	Roca muy mala Roca buena	N.A	25-50% 75-95%	Roca con numerosas fracturas Roca con pocas fracturas	Ávila (1981)
	Lavas sanas	1,5-3,1	Ripado normal a no rippable	0,0100-0,3981	Roca extremadamente mala a muy mala	N.A	< 25% 25-50%	Roca fuertemente fracturada Roca con numerosas fracturas	Ávila (1984a, 1984b)
	Lavas	2,0-3,0	No son ripables	0,0316-0,3162	Roca extremadamente mala a muy mala	N.A	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1985a)
	Lavas andesíticas sanas	2,5-3,5	No son ripables	0,1000-1,000	Roca muy mala	N.A	< 25% 25-50%	Roca fuertemente fracturada Roca con numerosas fracturas	Ávila (1985c)
	Lavas lajeadas sanas	2,2-4,0	No son ripables	0,0501-3,1623	Roca mala	N.A	25-50% 50-75%	Roca con numerosas fracturas Roca fracturada en grado medio	Ávila (1984c)
	Lavas lajeadas meteorizadas	1,8-2,4	No son ripables	0,0200-0,0794	Roca extremadamente mala	N.A	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986b)
	Lava meteorizada	0,6-1,4	Ripado fácil-normal	0,0013-0,0079	Roca excepcionalmente mala	N.A	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1984a, 1984b)
	Lava meteorizada	1,6-2,0	Ripado normal a no rippable	0,0126-0,0316	Roca extremadamente mala	N.A	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1983b)
	Lavas andesíticas fracturada	1,2-2,1	Ripado normal a no rippable	0,0050-0,0398	Roca excepcionalmente mala	N.A	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1985c)
	<b>Lavas andesíticas</b>	<b>3,3-4,3</b>	<b>No son ripables</b>	<b>0,63-14,000*</b>	<b>Roca muy mala a buena</b>	<b>N.A</b>	<b>25-50% 75-95%</b>	<b>Roca con numerosas fracturas Roca con pocas fracturas</b>	<b>Bonilla (2012)</b>
	<b>Lavas fracturadas</b>	<b>1,6</b>	<b>Ripado normal</b>	<b>0,0126-0,0003</b>	<b>Roca excepcionalmente mala</b>	<b>N.A</b>	<b>&lt; 25%</b>	<b>Roca fuertemente fracturada</b>	<b>Bonilla (2012)</b>
	Lavas andesíticas masivas	3,7-4,8	No son ripables	1,5849-24,000*	Roca mala a buena	N.A	50-75% 75-95% >95%	Roca fracturada en grado medio Roca con pocas fracturas Roca sin fracturas	Bonilla (2012)
Aglomerado volcánico	0,9-1,15	Ripado fácil	0,0025-0,0045	Roca excepcionalmente mala	N.A	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1983a)	

\*Estos valores presentan un Q>4, por lo que se utiliza la expresión  $Q=(Vp*3600/50)$



Tipo de roca	Litologías	Vp (km/s)	PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA						Referencia	
			Ripabilidad (Caterpillar D-9)	Índice Q		Densidad de la roca (kg/m3)		RQD		
				Valor Q $Q=10^{(Vp-3500)/1000}$	Calidad de la roca	$(\rho = aVp0,25)$		% Rango		Grado de fracturación
ROCAS SEDIMENTARIAS	Conglomerado	1,2-2,1	Ripado normal a no rippable	0,0050-0,0398	Roca excepcionalmente mala	1747,88	2010,35	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1984c)
	Conglomerados sanos con vetillas de calcita	2,6-3,0	No son ripables	0,1259-0,3162	Roca muy mala	2120,61	2197,84	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986a)
	Conglomerados calcáreos	2,4-2,6	No son ripables	0,0794-0,1259	Roca excepcionalmente mala	2078,59	2120,61	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986b)
	Conglomerado sanos	2,0	No son ripables	0,0316	Roca excepcionalmente mala	1985,98	1985,98	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986a)
	Roca sedimentaria areniscas y conglomerados	3,5-4,0	No son ripables	1,000-3,1623	Roca mala	2284,20	2361,74	50-75%	Roca fracturada en grado medio	Leandro et al. 1986
	Roca sedimentaria	1,8-2,2	No son ripables	0,0200-0,0501	Roca extremadamente mala	1934,35	2033,87	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986c)
	Roca sedimentaria	1,9-2,2	No son ripables	0,0251-0,0501	Roca extremadamente mala	1960,67	2033,87	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986c)
	Roca sedimentaria	2,2-2,9	No son ripables	0,0501-0,2512	Roca extremadamente mala a muy mala	2033,87	2179,29	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986c)
	Roca sedimentaria saturada	2,4-2,6	No son ripables	0,0794-0,1259	Roca extremadamente mala	2078,59	2120,61	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986c)
	Roca sedimentaria arenisca y conglomerado	3,5-4,0	No son ripables	1,000-3,1623	Roca mala	2284,20	2361,74	50-75%	Roca fracturada en grado medio	Leandro et al. (1986)
	Areniscas y lutitas	1,4-2,1	Ripado duro a no ripable	0,0079-0,0398	Roca excepcionalmente mala	1816,55	2010,35	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1985c)
	Areniscas lutitas y brechas verdes	2,3-3,5	No son ripables	0,0631-1,000	Roca extremadamente mala a muy mala	2056,59	2284,20	< 25% 25-50%	Roca fuertemente fracturada Roca con numerosas fracturas	Ávila & Leandro (1997a)
	Areniscas lutitas y brechas verdes	2,8-3,4	No son ripables	0,1995-0,7943	Roca mala a muy mala	2160,26	2267,70	< 25% 25-50%	Roca fuertemente fracturada Roca con numerosas fracturas	Ávila & Leandro (1997a)
	Areniscas lutitas y brechas verdes	2,5-3,4	No son ripables	0,1000-0,7943	Roca mala a muy mala	2099,91	2267,70	< 25% 25-50%	Roca fuertemente fracturada Roca con numerosas fracturas	Ávila (1997b)
	Areniscas lutitas y brechas verdes	2,8-4,0	No son ripables	0,1995-3,1623	Roca mala a muy mala	2160,26	2361,74	< 25% 25-50% 50-75%	Roca fuertemente fracturada Roca con numerosas fracturas Roca fracturada en grado medio	Leandro (1998)
	Alternancia de areniscas y conglomerados	2,4-3,2	No son ripables	0,0794-0,5012	Roca muy mala extremadamente mala	2078,59	2233,59	< 25% 25-50%	Roca fuertemente fracturada Roca con numerosas fracturas	Ávila (1986a)
	Areniscas de grano fino	1,9-3,5	No son ripables	0,0251-1,000	Roca muy mala extremadamente mala	1960,67	2284,20	< 25% 25-50%	Roca fuertemente fracturada Roca con numerosas fracturas	Ávila (1984c)
	Areniscas finas	2,0-2,2	No son ripables	0,0316-0,0501	Roca extremadamente mala	1985,98	2033,87	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986b)
	Areniscas de grano medio	2,2-2,8	No son ripables	0,0501-0,1995	Roca extremadamente mala	2033,87	2160,26	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1984c)
	Areniscas de grano fino y grueso	2,4-3,6	No son ripables	0,0794-1,2589	Roca muy mala a extremadamente mala	2078,59	2300,34	< 25% 25-50%	Roca fuertemente fracturada Roca con numerosas fracturas	Ávila (1984c)
	Areniscas de grano fino y grueso	2,6-3,5	No son ripables	0,1259-1,000	Roca muy mala	2120,61	2284,20	< 25% 25-50%	Roca con numerosas fracturas	Ávila (1986b)
	Arenisca de grano medio y grueso	2,3-3,0	No son ripables	0,0631-0,3162	Roca muy mala a extremadamente mala	2056,59	2197,84	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1984c)
	Arenisca medias a gruesas	2,3-2,5	No son ripables	0,0631-0,1000	Roca extremadamente mala	2056,59	2099,91	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986b)
	Areniscas meteorizadas	0,9-2,3	Ripado fácil a no ripable	0,0025-0,0631	Roca excepcionalmente mala	1626,59	2056,59	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1984c)
	Areniscas finas semi-alteradas	1,4-1,6	Ripado normal	0,0079-0,0126	Roca excepcionalmente mala	1816,55	1878,22	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986a)
	Lutitas y areniscas meteorizadas	1,0-1,4	Ripado normal	0,0032-0,0079	Roca excepcionalmente mala	1670,00	1816,55	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986a)
Areniscas y conglomerados semi-alterados	1,5-2,0	Ripado duro a no ripable	0,0100-0,0316	Roca extremadamente mala	1848,16	1985,98	< 25%	Roca fuertemente fracturada	Ávila (1986a)	

