SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ÁREA AFECTADA POR LA SUBSIDENCIA DEL 30 DE JULIO DE 2022 EN LA MINA ALCAPARROSA, COMUNA DE TIERRA AMARILLA, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

Felipe Fuentes C.
Cristóbal Machuca del V.
Luis López V.
Cecilia Donoso B.

SERNAGEOMIN
Ministerio de Minería
Gobierno de Chile

INFORME REGISTRADO IR-23-104

SUBDIRECCIÓN NACIONAL DE GEOLOGÍA

2023

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DEL ÁREA AFECTADA POR LA SUBSIDENCIA DEL 30 DE JULIO DE 2022 EN LA MINA ALCAPARROSA, TIERRA AMARILLA, REGIÓN DE ATACAMA, CHILE

INFORME REGISTRADO IR-23-104
Inscripción No. 2023-A-5354

© Servicio Nacional de Geología y Minería, Avda. Santa María 0104, Santiago, Chile.
Director Nacional: Patricio Aguilera P.
Subdirectora Nacional de Geología: Alejandra Ávila N.

Derechos reservados. Prohibida su reproducción.

Edición
Este informe no ha sido editado en conformidad con los estándares y/o nomenclatura de la Subdirección Nacional de Geología, del Servicio Nacional de Geología y Minería.

Corrección idiomática: Soraya Amar N., Claudia Gómez D.

Apoyo financiero:
Fondos sectoriales del Servicio Nacional de Geología y Minería.

Referencia bibliográfica
Fuentes, F.; Machuca, C.; López, L. Donoso, C. 2023. Caracterización hidrogeológica del área afectada por la subsidencia del 30 de julio de 2022 en la mina Alcaparrosa, Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-23-104 (Inédito): 142 p., 9 anexos. Santiago.

CONTENIDO

RESUMEN 9
1. INTRODUCCIÓN 10
2. MARCO GEOLÓGICO, ESTRUCTURAL Y GEOMORFOLÓGICO 13
2.1 Unidades geológicas distritales definidas en Punta del Cobre 15
2.2 Geología estructural del sector Alcaparrosa 17
3. CLIMA, ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES LOCALES Y EVOLUCIÓN DE NIVELES ESTÁTICOS 21
3.1 Clima 21
3.2 Análisis de precipitaciones locales 22
3.3 Evolución del nivel estático 24
4. OBSERVACIONES DE TERRENO 25
4.1 Medición, recopilación y análisis de niveles estáticos en pozos de agua 26
4.2 Monitoreo de calidad del agua 42
4.3 Prospecciones geofísicas 67
5. MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA SUBSIDENCIA 87
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 90
6.1 Conclusiones 90
6.2 Recomendaciones 91
7. REFERENCIAS 93

FIGURAS

Fig. 1. Vista aérea hacia el noroeste del socavón producido por la subsidencia. 11
Fig. 2. Imagen satelital con ubicación de la zona de estudio en el sector de la mina Alcaparrosa en la comuna de Tierra Amarilla. 12
Fig. 3. Extracto del mapa geológico en el sector de Tierra Amarilla y Alcaparrosa. 14
Fig. 4. Perfil conceptual de la geología distrital en el sector de la mina Alcaparrosa. 15
Fig. 5. Mapa de estructuras geológicas principales presentes en el sector de Alcaparrosa. . ..18

Fig. 6. Modelo de RQD en donde se observa la ubicación del caserón Gaby 4 respecto a las zonas de estructuras y bajo RQD y las zonas de daño 19

Fig. 7. Modelo de estructuras de mediano y largo plazo a partir del mapeo tanto del interior de la mina como de la ubicación de la infraestructura al interior de ella. 20

Fig. 8. Estaciones meteorológicas con mayor margen de registro en la cuenca de Copiapó y sus subdivisiones principales: subcuencas de Copiapó y de Paipote. 22

Fig. 9. Dispersigramas de la estación Copiapó 23

Fig. 10. Hidrograma de los pozos de monitoreo del sector de la mina Alcaparrosa. 24

Fig. 11. Fotografías de medición de los niveles estáticos en terreno. 27

Fig. 12. Ubicación de los pozos monitoreados en terreno tanto por Sernageomin como por la empresa minera. 28

Fig. 13. Nivel del agua subterránea para cada pozo medido en metros bajo la superficie del terreno (m b.s.t.). 32

Fig. 14. Nivel del agua subterránea para cada pozo medido en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.). 33

Fig. 15. Variación semanal de los descensos observados en los pozos monitoreados por la empresa. 34

Fig. 16. Ubicación de los pozos 8, 12 y HA-02A con sus respectivas distancias (m) a la subsidencia y el registro de descensos posevento (s) en metros 37

Fig. 17. Superficie freática modelada mediante la fórmula de Dupoit Thiem, según los descensos de los pozos 8, 12 y HA-02A.. 38

Fig. 18. Corte transversal de la superficie freática modelada. 38

Fig. 19. Fotografías de los niveles inferiores de la mina inundados por el ingreso de agua hacia las instalaciones y diagrama de las instalaciones. 39

Fig. 20. Registro de caudales de agua derivados a los niveles inferiores de la mina Alcaparrosa, volumen bombeado a Planta PAC, y registro piezométrico del pozo HA-02 A. 40

Fig. 21. Ubicación de los puntos de agua monitoreados durante la visita a terreno. 44

Fig. 22. Fotos de puntos de muestreo de aguas superficiales y subterráneas. 45

Fig. 23. Ubicación de puntos de monitoreo al interior de la mina. 46

Fig. 24. Esquema de representación de parámetros fisicoquímicos para las muestras de agua. 48

Fig. 25. Diagrama de distribución espacial y evolución temporal de las condiciones de CE (µS/cm) y pH al interior de la mina. 49

Fig. 26. Variación del contenido de δ18O y δ2H en muestras de agua obtenidas en el sector Alcaparrosa. 51

Fig. 27. Esquema de representación de valores isotópicos para las muestras de agua. 52

Fig. 28. Diagrama de distribución espacial y temporal de la isotopía del interior de la mina. ... 53

Fig. 29. Validación de los resultados del balance iónico en muestras de Alcaparrosa. 54

Fig. 30. Diagrama de Piper de muestras de Alcaparrosa, preevento y postsubsidencia. 56

Fig. 31. Esquema de representación de salinidad y composición de elementos mayores para las muestras de agua. 57

Fig. 32. Diagrama de distribución espacial y temporal de la hidroquímica al interior de la mina… 58

Fig. 33. Comparación de concentraciones de cloruro con la razón de sulfato/cloruro. 59

Fig. 34. Concentración de cationes de calcio-magnesio en comparación con el aumento de sulfatos y carbonatos en aguas del interior de la mina. 60

Fig. 35. Índice de solubilidad del yeso.. 61

Fig. 36. Diagrama de Schoeller de elementos normados. 62

Fig. 37. Variación de parámetros fisicoquímicos y elementos químicos en relación con el tiempo de muestreo, el pH y los sólidos disueltos totales. 64

Fig. 38. Variación de elementos químicos en relación con el tiempo de muestreo, el arsénico, el sulfato y el cobre 65

Fig. 39. Variación de elementos químicos en relación con el tiempo de muestreo, el hierro total, le manganeso y el cloruro. 66

Fig. 40. Ubicación de perfiles GPR y líneas geofísicas de refracción sísmica MASW. 68

Fig. 41. Ubicación de los perfiles GPR P1, P2, y P3 en el sector grietas sur 1; ortomosaico generado por vuelo de dron en agosto de 2022. 69

Fig. 42. Perfil P1 con profundidad de investigación de 40 m. 71

Fig. 43. Perfil P2 con profundidad de investigación de 60 m. 71

Fig. 44. Perfil P3 con profundidad de investigación de 30 m. 72

Fig. 45. Ubicación de los perfiles PG1, PG2 y PG3 en el sector grietas sur 2, sobre imagen ortomosaico por dron tomada en agosto de 2022. 73

Fig. 46. Perfil PG1 con profundidad de investigación de 60 m. 75
Fig. 47. Perfil PG2 con profundidad de investigación de 30 m. 76
Fig. 48. Perfil PG3 con profundidad de investigación de 20 m. 77
Fig. 49. Planta de ubicación del estudio geofísico de tomografía eléctrica ERT. 79
Fig. 50. Sección de resistividad Línea 1 de sur a norte, configuración dipolo-dipolo, gradiente y polo-dipolo, distancia dipolar 10 m. 80
Fig. 51. Sección de resistividad Línea 2 de sur a norte, configuración dipolo-dipolo, gradiente y polo-dipolo, distancia dipolar 10 m. 81
Fig. 52. Mapa de ubicación del estudio sísmico mediante MASW. 83
Fig. 53. Línea 1 del perfil de velocidad (V_S); estudio sísmico mediante MASW.. 84
Fig. 54. Línea 2 del perfil de velocidad (V_S); estudio sísmico mediante MASW. 85
Fig. 55. Comparación de los perfiles L1 ERT y L1 MASW, donde se observan las posibles zonas de transporte de agua desde el acuífero freático hacia los sectores de labores subterráneas de la mina Alcaparrosa. 86
Fig. 56. Modelo hidrogeológico conceptual de la subsidencia en la mina Alcaparrosa. Izquierda: preevento de la subsidencia. Derecha: posevento de la subsidencia. 88
Fig. 57. Vista en perspectiva de la integración de estructuras geológicas en el perfil sísmico L1 MASW. 89

TABLAS

Tabla 1. Cuadro resumen de principales depósitos y formaciones presentes en el sector de Alcaparrosa. 13
Tabla 2. Descripción estratigráfica del Pozo 12, ubicado en la parte central del valle, 430 m aguas arriba del lugar de subsidencia 16
Tabla 3. Estaciones meteorológicas locales aledañas a la zona de estudio, pertenecientes a las empresas Lundin Mining y Pucobre. 22
Tabla 4. Registro de precipitaciones aledañas al área de estudio previo al evento de subsidencia. 23
Tabla 5. Niveles dinámicos medidos en pozos monitoreados por Sernageomin en Alcaparrosa en distintas fechas 27
Tabla 6. Coordenadas y cotas de pozos monitoreados por la empresa minera. 29

Tabla 7. Tasa de descenso semanal (m/día) del nivel estático de los pozos cercanos a la subsidencia, monitoreados por la empresa minera..... 31

Tabla 8. Parámetros utilizados para la estimación de descensos en los pozos 8 y 12 36

Tabla 9. Parámetros utilizados para estimar el caudal de ingreso a la mina Alcaparrosa..... 37

Tabla 10. Volúmenes semanales derivados hacia niveles inferiores de la mina. 40

Tabla 11. Tasa histórica de bombeo mediante el sistema de drenaje principal de la mina Alcaparrosa. 41

Tabla 12. Estimación de volumen extraído desde el acuífero a causa de la subsidencia. 41

Tabla 13. Descripción de puntos de monitoreo de calidad del agua. 43

Tabla 14. Valores de CE y pH en puntos de monitoreo y en muestras asociadas. 47

Tabla 15. Resultados isotópicos de muestras del sector Alcaparrosa. 50

Tabla 16. Resultados de los análisis de elementos mayores en muestras de Alcaparrosa. 55

ANEXOS

I. Geología del sector Alcaparrosa..... 96

Fig. 1. Extracto de la Carta Copiapó 1:100.000 (Arévalo, 2005) y su leyenda.. 97

Fig. 2. Perfil geológico de la mina Alcaparrosa. 102

II. Antecedentes hidrogeológicos locales del sector Alcaparrosa 103

Fig. 3. Esquema conceptual de la condición hidrogeológica de la mina Alcaparrosa y tabla resumen con las características de conductividad hidráulica y RQD (Rock Quality Design) mínima, máxima y promedio de las unidades hidrogeológicas.. 106

Fig. 4. Perfil hidrogeológico oeste-este, del sector Alcaparrosa sur. 107

III. Modelos geológicos y estructurales del sector Alcaparrosa 115

Fig. 5. Perfil geológico construido con base en el modelo geológico de la mina. 116

Fig. 6. Mapa en planta de estructuras geológicas principales presentes en el sector de Alcaparrosa. 117

IV. Perfiles estratigráficos pozos sector Alcaparrosa 118

Fig. 7. Diagrama esquemático de la construcción del pozo de producción Alcaparrosa N° 8, Tierra Amarilla, Chile. 118

Fig. 8. Diagrama esquemático de la construcción del pozo de producción Alcaparrosa N° 12, Tierra Amarilla, Chile 119

Fig. 9. Diagrama esquemático de la construcción del pozo de producción Alcaparrosa N° 14, Tierra Amarilla, Chile 120

Fig. 10. Ficha de mapeo cutting (descripción de muestras) del pozo HA-02A.. 121

Fig. 11. Ficha 2 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A..... 122

Fig. 12. Ficha 3 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A..... 123

Fig. 13. Ficha 4 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A..... 124

Fig. 14. Ficha 5 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A..... 125

Fig. 15. Ficha 6 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A..... 126

Fig. 16. Ficha 7 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A..... 127

Fig. 17. Ficha 8 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A..... 128

Fig. 18. Ficha mapeo cutting (descripción de muestras) del pozo HA-01 entre los 0 y 46 m .. 129

Fig. 19. Ficha mapeo cutting (descripción de muestras) del pozo HA-01 entre los 46 y los 94 m 130

V. Fórmula de Dupoit Thiem 131

Fig. 20. Descripción de parámetros de entrada para la estimación del radio de influencia en una sección esquemática de un cono de abatimiento o cono de depresión ideal. 131

VI. Mapeo sedimentario de sondajes perforados presubsidencia..... 133

Fig. 21. Perfiles en 3D que ilustran los sondajes, el contacto roca relleno, la zona meteorizada, la subsidencia y los caserones Gaby 1, 4 y 12... 134

Tabla 1. Descripción estratigráfica sedimentaria de los sondajes AD-952 y AD-954. 135

Fig. 22. Fotografías aéreas del dron que ilustran las distintas capas de gravas, arenas y arcillas presentes en la pared de la subsidencia..... 135

VII. Antecedentes teóricos de GPR (Ground Penetrating Radar)..... 136

Fig. 23. Metodología GPR. 137

VIII. Resultados hidrogeoquímicos e isotópicos 138

Tabla 2. Resultados hidrogeoquímicos e isotópicos 138

IX. Informes geofísicos de Geodatos SAIC 142

RESUMEN

El evento de subsidencia ocurrido en la mina Alcaparrosa de Tierra Amarilla corresponde a una emergencia de carácter geológico-minera que ha sido el centro de atención de diversos actores, tanto de las comunidades cercanas como de entidades público y privadas. El hecho, ocurrido el 30 de julio de 2022, tuvo como principal consecuencia la formación de una cavidad cilíndrica en la superficie, que alcanzó 64 m de profundidad y 37 m de diámetro. Luego del suceso, se registró un aumento del caudal de agua al interior de la mina, el que colapsó los sistemas de bombeo de desagüe, que tenían una capacidad de 50 l/s. Los primeros monitoreos ambientales dan cuenta del aumento de hasta un 885% en la tasa de descenso en los pozos cercanos luego del evento y la formación de un cono de depresión en la superficie freática con centro en la subsidencia.

La Unidad de Hidrogeología del Departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos del Servicio Nacional de Geología y Minería (Sernageomin), junto con la Dirección Regional de Atacama, recopiló información y mediciones en terreno desde el 8 de agosto al 2 de septiembre, lo que incluyó el muestreo de aguas del acuífero del río Copiapó y aguas encontradas al interior de la mina. Mediante análisis isotópicos de las muestras fue posible determinar que las aguas presentes en los niveles 270, 200 y en los niveles inferiores donde la empresa minera desvió el agua al fondo de la mina (entre las cotas 35 y 102 (m s.n.m.) aproximadamente, según lo reportado por la empresa minera al 20/10/2022), corresponden a una mezcla entre agua del acuífero y aguas que se encontraban al interior de la mina previo a la subsidencia. Por su parte, los resultados de los análisis químicos muestran una salinización progresiva del agua del acuífero en su trayecto hacia los niveles de inundación, efecto que se atribuye a la disolución de minerales como yeso-anhidrita. Se registra, además, una leve acidificación del agua producto de reacciones de óxido-reducción de sulfuros. Lo anterior, sumado a los antecedentes isotópicos previamente indicados, demuestran la filtración de agua desde el acuífero hacia el interior de la mina y su posterior desviación hacia los niveles inferiores por parte de la empresa minera. Se advierte que, a mayor tiempo de contacto entre el agua y los minerales sulfurados, se incrementa el riesgo de drenaje ácido y la subsecuente incorporación de metales pesados al agua.

Finalmente, al 31 de enero de 2023 se estima que han ingresado 2.548.000 m^3 de agua a la mina producto de la conexión hidráulica generada por la subsidencia ocurrida sobre el caserón Gaby 4. Si bien gran parte del flujo de ingreso fue limitado por las obras de contingencia construida por la mina, la tasa de ingreso sigue estando 17 l/s por sobre la media previa al evento.

1. INTRODUCCIÓN

La mina Alcaparrosa, propiedad de Compañía Contractual Minera Ojos del Salado (Lundin Mining), se ubica en la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama. En ella se explota de forma subterránea, mediante el método s*ublevel stoping,* un depósito de cobre asociado al distrito Candelaria, el que corresponde a un yacimiento de tipo IOCG*.* Este método consiste en la construcción de galerías y caserones subterráneos, alguno de los cuales se emplazan por debajo del valle del río Copiapó.

El día 30 de julio de 2022, a las 16:30 horas, personal de la mina detectó una subsidencia al interior de la propiedad (Fig. 1). Este hundimiento, ubicado hacia el borde occidental del valle, en las coordenadas UTM 6.961.583 N/374.282 E (WGS 84, 19S), a 474 m s.n.m., fue dimensionado mediante un sobrevuelo Lidar*,* en 32 m de diámetro, 64 m de profundidad y un volumen aproximado de 68.000 m^3. De acuerdo con la cartografía y los modelos topográficos de la infraestructura subterránea presentada por la empresa, fue posible establecer que la subsidencia se ubica directamente sobre el caserón denominado Gaby 4 (Fig. 2), que según el diseño se emplaza entre los niveles 200 y 270 de la mina (equivalentes a m s.n.m). La última medición de cavidades llevada a cabo en octubre de 2021 evidenció que el caserón tenía un volumen vacío de 78.000 m^3; sobre él, según el modelo geológico de la mina, existía un techo de roca de entre 50 y 100 m de espesor hasta la superficie.

Durante las visitas a terreno y mediante una inspección visual de la galería de acceso al caserón Gaby 4 en el nivel 270, fue posible determinar que esta se encuentra colapsada y bloqueada con material rocoso fragmentado. Fuentes internas de la mina indicaron que debido a este bloqueo no ha sido posible medir las dimensiones reales del caserón desde la fecha de la última detonación productiva (enero 2022). Adicionalmente, desde el material fracturado que se acumuló en la galería de acceso en el nivel 270 escurría un flujo de agua de entre 2 y 4 l/s hacia las demás galerías que componen dicho nivel.

Durante los días posteriores al evento, se registró un aumento considerable del caudal de agua que ingresó a la mina en el nivel 200, lo que produjo la inundación parcial de algunas galerías. Si bien la mina cuenta con un sistema de desagüe mediante bombas mecánicas, su capacidad fue sobrepasada por el exceso de agua aflorada, lo que hizo necesario la evacuación estas a niveles inferiores (bajo cota 100) como medida de contingencia.

Desde el día 8 de agosto, profesionales del departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos, de la Subdirección Nacional de Geología, del Servicio Nacional de Geología y Minería apoyaron en terreno al personal de la Dirección Regional de Atacama de la misma institución, en el análisis de la componente hidrogeológica. A partir del trabajo en terreno, se elaboró este informe cuyo objetivo es informar la condición hidrogeológica actual de la mina Alcaparrosa luego del evento de subsidencia ocurrido en julio, determinar el origen de las aguas que afloran en el nivel 270 y 200 e identificar los procesos hidrogeoquímicos que podrían afectar la cantidad y/o calidad del recurso hídrico subterráneo.

Este informe presenta 1) un análisis de niveles históricos preevento y posevento en pozos del sector Alcaparrosa, 2) una estimación del caudal de agua que ingresa a la mina y su efecto en los niveles de agua en el acuífero del río Copiapó y 3) una caracterización hidrogeoquímica e isotópica de las aguas del acuífero del río Copiapó y del interior de la mina preevento y posevento.

FIG. 1. Vista aérea hacia el noroeste del socavón producido por la subsidencia.

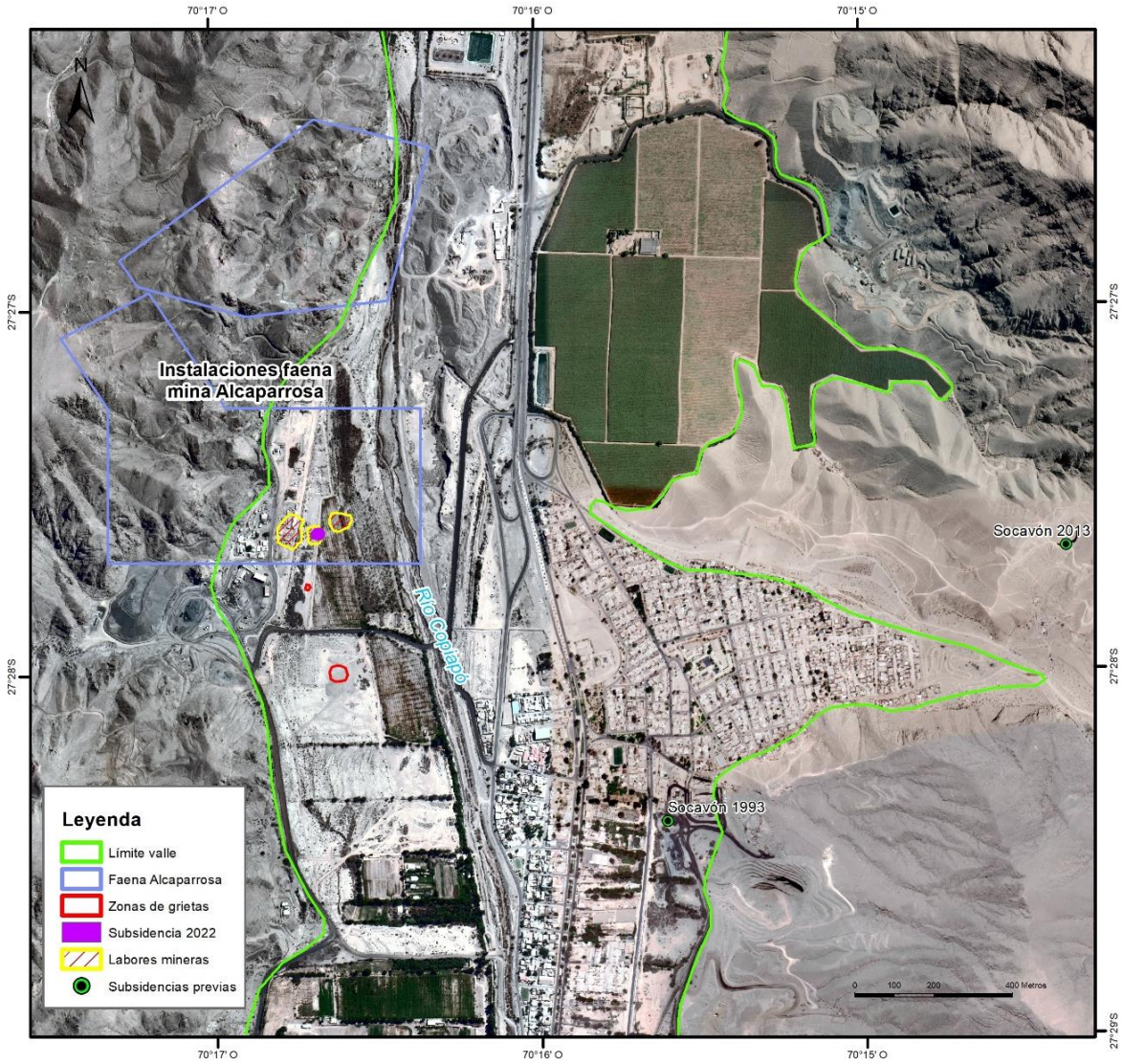


FIG. 2. Imagen satelital con ubicación de la zona de estudio en el sector de la mina Alcaparrosa en la comuna de Tierra Amarilla. Se observa la subsidencia en estudio en color fucsia, así como subsidencias más antiguas acontecidas en 1993 y 2013 en color verde.

2. MARCO GEOLÓGICO, ESTRUCTURAL Y GEOMORFOLÓGICO

La geología e hidrogeología del sector Alcaparrosa ha sido caracterizada en numerosos estudios regionales (Aguirre, 1999; Arévalo, 2005 (Fig. 3); Troncoso *et al*., 2012 y Espinoza *et al*., 2021) y en estudios distritales realizados por la minera en el contexto de la evaluación ambiental de diferentes proyectos asociados al yacimiento (Xterrae Geología, 2016; Arcadis, 2017; VAI Groundwater Solutions, 2020).

La mina Alcaparrosa se ubica en la cuenca del río Copiapó, la que en el sector de Tierra Amarilla forma un valle de vertientes pronunciadas a través del cual el río Copiapó fluye de sur a norte, recibiendo aportes sedimentarios de numerosas quebradas afluentes. En el sector Alcaparrosa Sur, el valle se estrecha hasta los 900 m de ancho. En este sector la geología local consiste en una cobertura de sedimentos modernos de hasta 160 m de espesor, de origen fluvial, aluvial y lacustre, los cuales forman un paisaje plano, cortado por el cauce actual del río. Estos materiales cubren depósitos de conglomerados más antiguos pertenecientes a las denominadas Gravas de Atacama y en su conjunto constituyen el acuífero principal del río Copiapó. Bajo la cobertura sedimentaria se emplazan rocas volcánicas de las formaciones Abundancia y Punta del Cobre, las que presentan un fuerte control estructural de orientación NO que alberga la principal mineralización del distrito y constituye las vías preferenciales del flujo de agua subterránea en la roca.

TABLA 1. CUADRO RESUMEN DE PRINCIPALES DEPÓSITOS Y FORMACIONES PRESENTES EN EL SECTOR DE ALCAPARROSA. (MODIFICADO DE ARÉVALO, 2005).

Unidad/Formación	**Edad**	**Litología**
Depósitos aluviales	Pleistoceno- Holoceno	Ripio, grava y arena
Depósitos fluviales	Pleistoceno-Holoceno	Ripio de bolones, grava, arena, limo
Depósitos aluviales y coluviales antiguos	Mioceno Superior-Plioceno	Ripio, gravilla, arena, limo y arcilla
Gravas de Atacama	Mioceno Medio	Gravas, arena, limo y arcilla
Formación Nantoco	Cretácico Inferior	Calcilutitas, calcilutitas limosas, calcarenitas, arena, conglomerado, calizas
Formación Abundancia	Cretácico Inferior	Calcilutitas y grawakas, volcarenita fina a muy gruesa y volcarenita conglomerádica
Formación Punta del Cobre	Jurásico Superior-Cretácico Inferior	Andesitas, dacitas, brechas macizas, lutita, lavas andesítico-basálticas, metandesitas
Microgranitos y aplitas del portezuelo Cuchara	Cretácico Inferior	Microgranitos, microgranitos porfídicos, aplitas rosadas a blanquecinas
Monzodiorita San Gregorio	Cretácico Inferior	Monzodioritas de hornblenda, biotita y clinopiroxeno

La tabla 1 muestra un resumen de las unidades y formaciones geológicas regionales descritas en la Hoja Copiapó (Arévalo, 2005). La descripción completa de estas unidades se presenta en el anexo I.

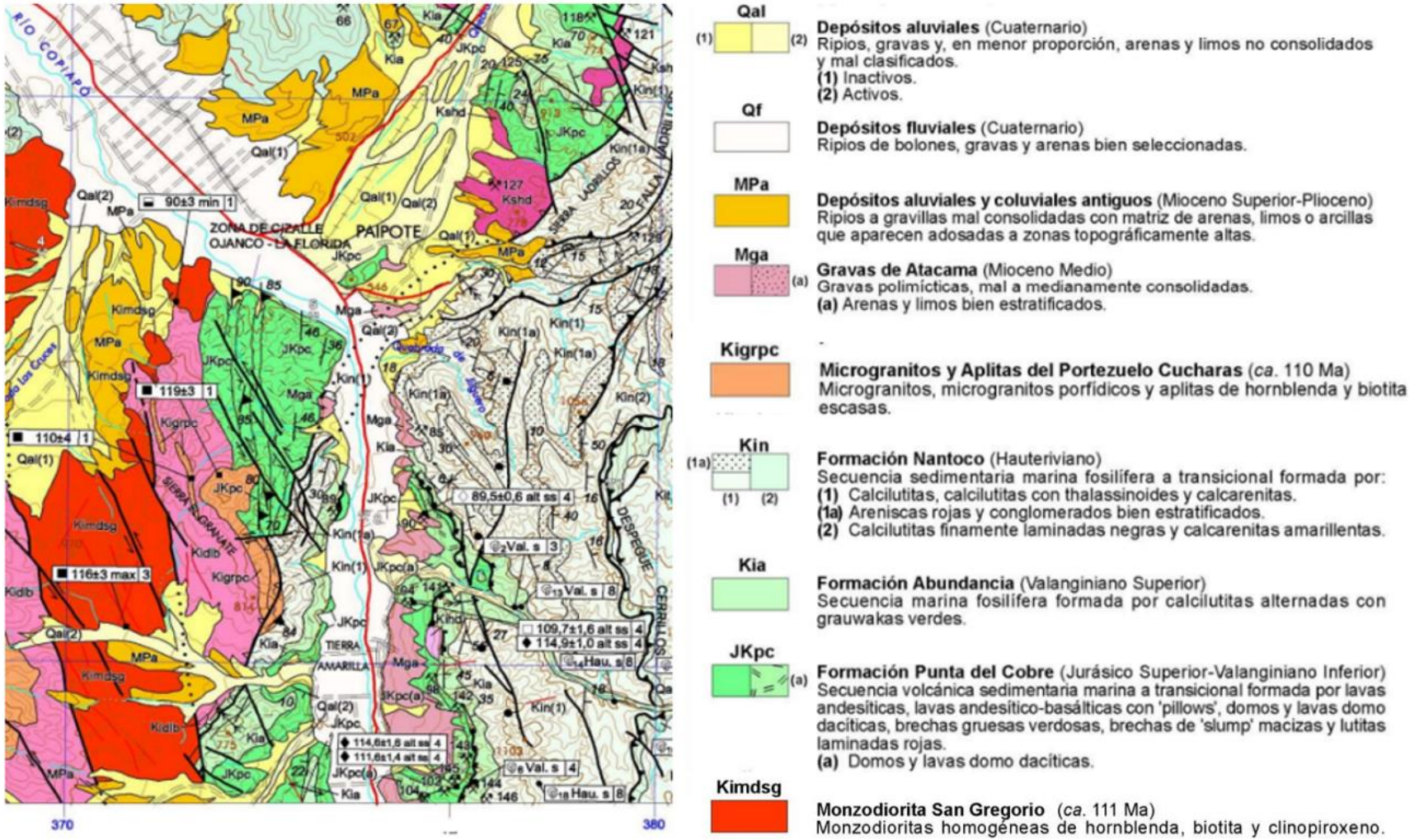


FIG. 3. Extracto del mapa geológico en el sector de Tierra Amarilla y Alcaparrosa. (Modificado de Arévalo, 2005).

2.1 Unidades geológicas distritales definidas en Punta del Cobre

La mina Alcaparrosa está ubicada en la parte norte del distrito minero Punta del Cobre, en el flanco oeste del valle de Copiapó. La geología local o distrital ha sido estudiada en gran medida por la empresa minera Candelaria, a partir de la integración de numerosas campañas de exploración llevadas a cabo en las últimas décadas. Estas prospecciones incluyen la perforación de pozos hidrogeológicos en la cobertura sedimentaria del valle.

La descripción de las unidades geológicas informales de interés económico, en cuanto a la disposición, relaciones de contacto y su mineralización, fueron recopiladas en el reporte técnico del complejo minero de Candelaria (SRK Consulting, 2018), mientras que aquellas de interés hidrogeológico fueron abordadas en la construcción del modelo hidrogeológico conceptual de Alcaparrosa (VAI Groundwater Solutions, 2020). A partir de estos estudios técnicos se describen a continuación las unidades definidas y se presenta una sección típica de la estratigrafía de la mina en la figura 4.

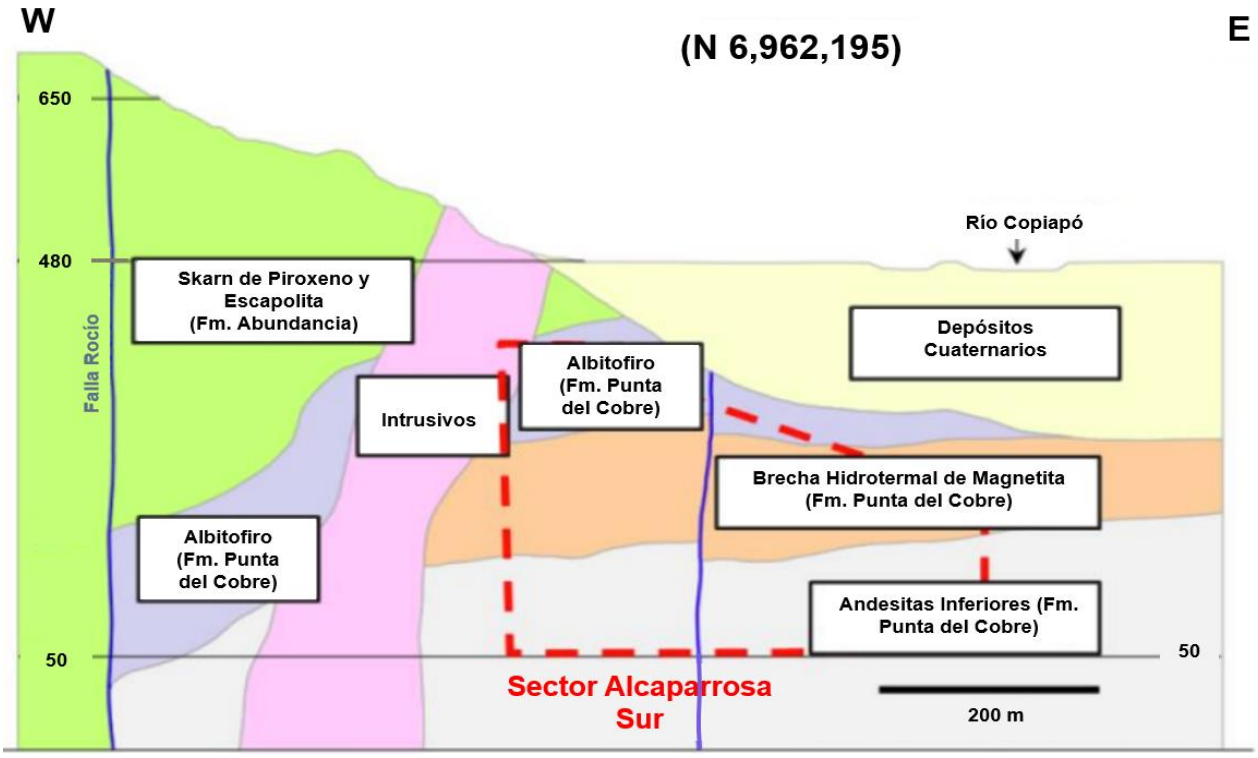


FIG. 4. Perfil conceptual de la geología distrital en el sector de la mina Alcaparrosa. (Modificado de VAI Groundwater Solutions, 2020).

A partir de la estratigrafía de los pozos del sector fue posible establecer que la cobertura de sedimentos del valle pertenece a suelos de origen fluvial, aluvial y lacustre y que en el eje del valle superan los 150 m de espesor. Estos depósitos son de textura clástica de selección mala a muy mala y presentan, en general, una matriz limo-arcillosa a arenosa. La capa más superficial corresponde a niveles de limo y arcilla arenosa, en algunos sectores con alto contenido de gravas. Estos cubren potentes intercalaciones de conglomerado arenoso y arena de baja compactación, muy redondeados, con alto contenidos de finos y lentes de arcilla. En profundidad, disminuye el contenido de finos, y se origina una unidad de alto potencial hidrogeológico que conduce el flujo principal del agua subterránea que circula bajo el río Copiapó. En la sección más profunda se disponen niveles de grava y conglomerado arenoso bien cementados, correlacionables con la unidad Gravas de Atacama que aflora al este del valle.

La tabla 2 indica la estratigrafía descrita para uno de los pozos hidrogeológicos (pozo 12) perforado en el eje del valle, en el sector de Alcaparrosa. La información completa de la estratigrafía disponible de todos los pozos perforados en el relleno sedimentario se puede encontrar en el anexo IV. Adicionalmente, en el anexo VI se presenta el mapeo de los depósitos sedimentarios interceptados en sondajes de exploración realizados previos al evento de subsidencia.

TABLA 2. DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA DEL POZO 12, UBICADO EN LA PARTE CENTRAL DEL VALLE, 430 m AGUAS ARRIBA DEL LUGAR DE SUBSIDENCIA. (MODIFICADA DE VAI GROUNDWATER SOLUTIONS, 2020).

Desde (m)	**Hasta (m)**	**Litología**	**Cementación/Consolidación**
0	34	Arcilla arenosa con gravas medianas a gruesas	No consolidado
34	68	Arcilla arenosa	No consolidado
68	76	Gravas arenosas con arcilla	Débil a moderada
76	102	Gravas arenosas	No consolidado
102	108	Gravas arenosas	Moderada a fuerte
108	114	Gravas arenosas	No consolidado
114	118	Gravas arenosas	Moderada a fuerte
118	148	Gravas	Débil
148	154	Gravas arenosas	Moderada
154	164	Gravas arenosas	-
164	-	Basamento rocoso: microdiorita clorítica y biotítica con leve diseminación de sulfuros.	-

Bajo la cobertura sedimentaria se encuentra el basamento rocoso (basamento hidrogeológico), compuesto por rocas intrusivas, volcánicas y metavolcánicas de edad mesozoica. La unidad rocosa predominante en el sector es la Formación Punta del Cobre, la cual se subdivide de la siguiente manera a) andesita inferior (rocas afaníticas, porfídicas, blastoporfídicas y brechadas de color gris oscuro); b) brechas volcanoclásticas con clastos de rocas porfídicas alteradas a feldespato potásico en una matriz con alto contenido de

magnetita; c) hornfels de albitófiro (roca dacita pofirítica de color gris claro con fenocristales de plagioclasa y ocasionalmente "ojos de cuarzo" en una masa base de sílice afanítica).

La unidad suprayacente a la Formación Punta del Cobre es de naturaleza metasedimentaria y es probable que corresponda a la Formación Abundancia. Ella se divide en a) hornfels de cuarzo y b) *skarn* de piroxeno-escapolita-granate con bandas metasomáticas. Los hornfels y granitos se ubican concordantemente sobre el albitófiro y son los equivalentes metamorfoseados de la parte superior de las formaciones Punta del Cobre y Abundancia. En la parte sur-central de la mina un *stock* de granodiorita corta toda la secuencia.

Las rocas intrusivas están compuestas por diques andesíticos, graníticos, dioríticos y monzodioríticos, y por un *stock* de diorita, que corresponde a una intrusión posmineral con textura equigranular compuesta por plagioclasa y fenocristales de hornblenda. Además, está cortado por diques de andesita con textura porfídica y no contiene ninguna mineralización. Los diques graníticos tienen textura aplítica a porfídica y muestran trazas diseminadas de pirita y magnetita, aunque no contienen ninguna mineralización de cobre. Por su parte, los diques dioríticos son equigranulares de grano fino y estériles. Los diques monzodioríticos contienen xenolitos de vetillas de magnetita y calcopirita.

2.2 Geología estructural del sector Alcaparrosa

Las rocas del sector de Alcaparrosa se caracterizan por un fuerte control estructural que ha sido ampliamente documentado a través de estudios regionales (Hoja Copiapó, Arévalo, 2005) y también a escala distrital a través del mapeo de estructuras al interior de la mina, los que permitieron definir los modelos geológicos y de estructuras de corto y mediano plazo. En términos generales, la geología estructural responde a una configuración de fallas regionales de extensiones kilométricas que controla la orientación norte-sur y noroeste-sureste de fallas de menor dimensión (Fig. 5). Estas fallas son las principales discontinuidades que extienden las zonas de roca meteorizada y de baja calidad geomecánica en profundidad (Fig. 6), controlan la distribución de las zonas que hospedan la mineralización principal, generan vías preferenciales de flujo de agua a través de la roca y conectan hidráulicamente el acuífero con la mina subterránea (VAI Groundwater Solutions, 2020).

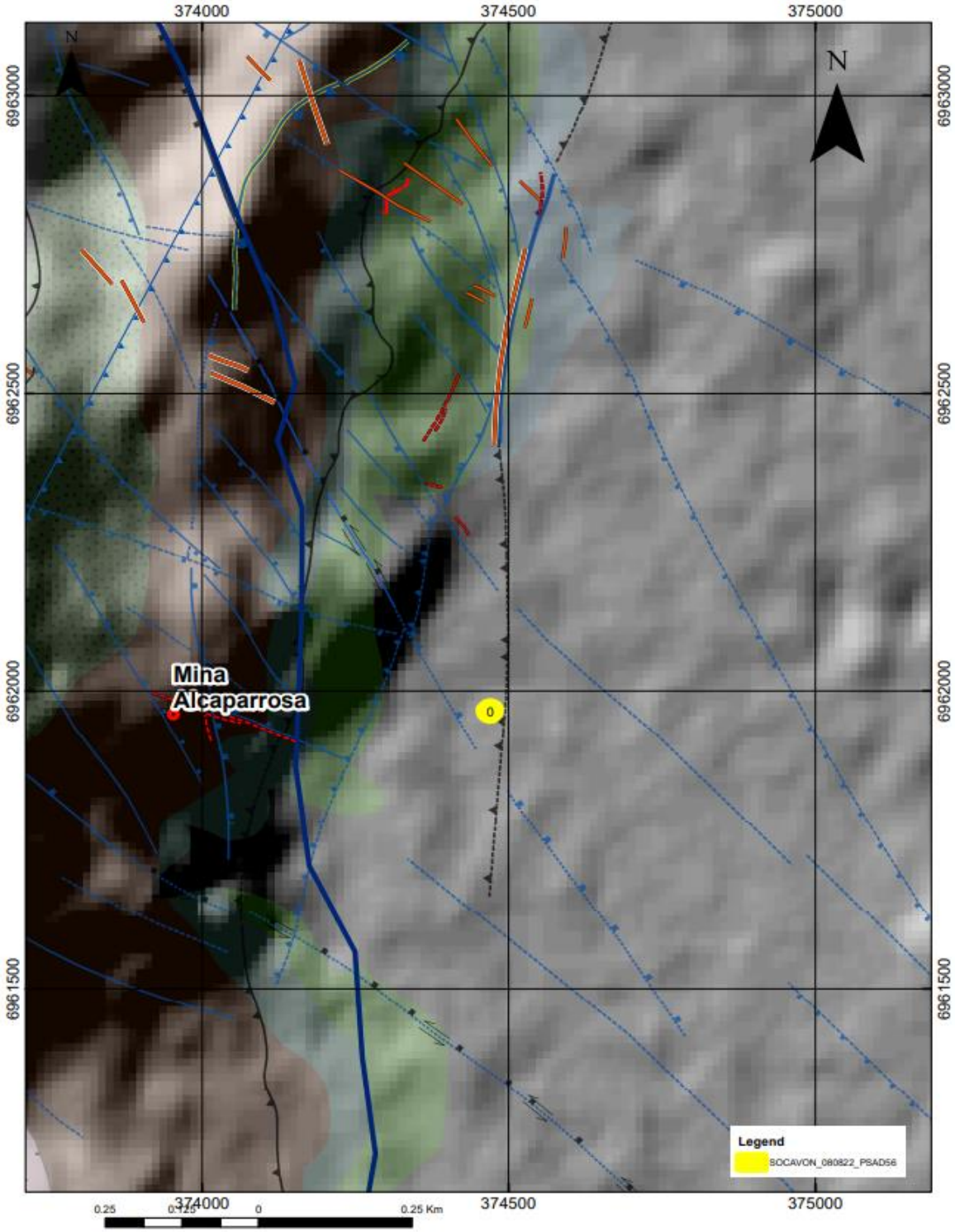


FIG. 5. Mapa de estructuras geológicas principales presentes en el sector de Alcaparrosa. En amarillo se muestra la ubicación de la subsidencia. (Tomado de VAI Groundwater Solutions, 2020).

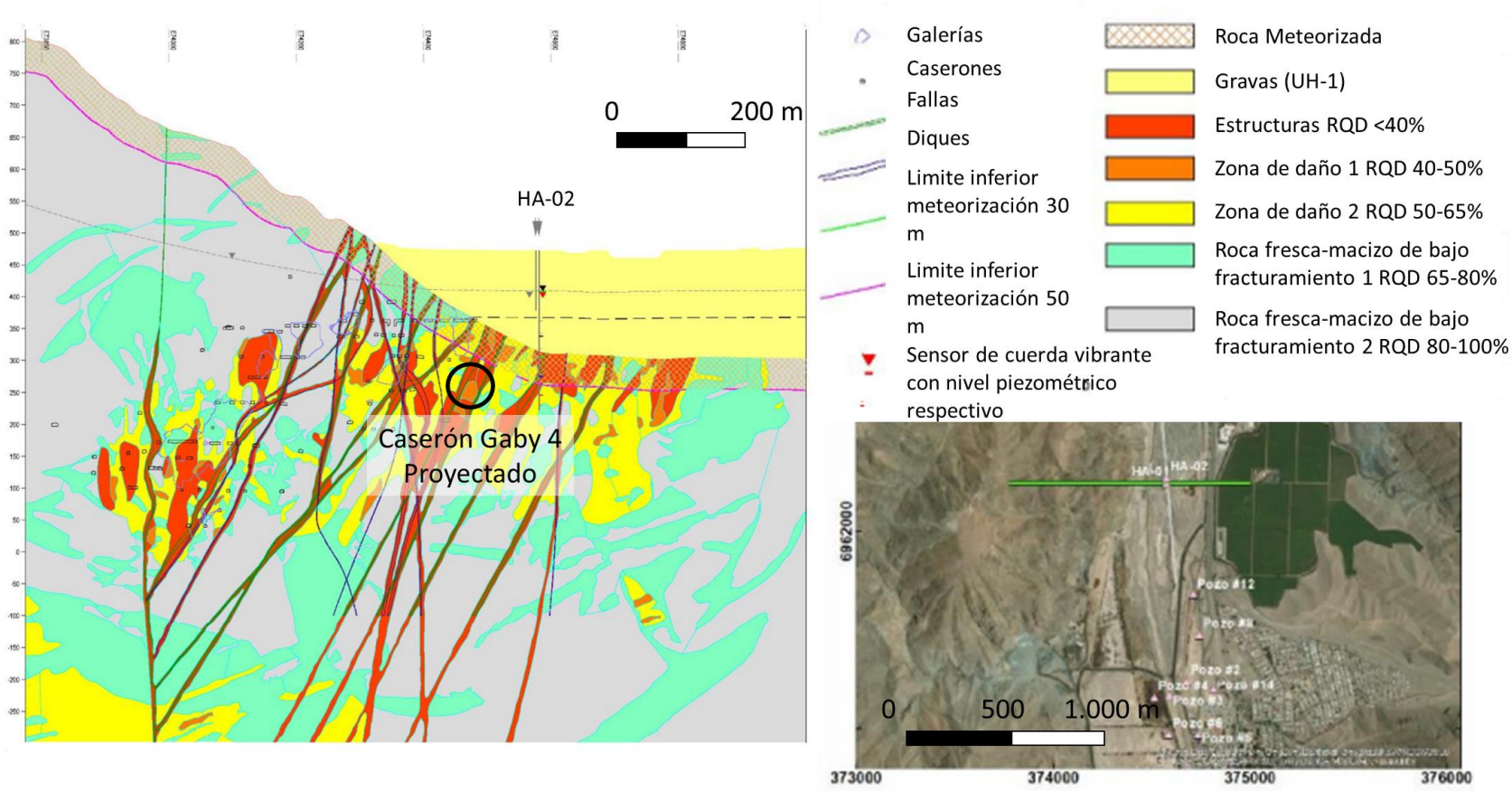


FIG. 6. Modelo de RQD en donde se observa la ubicación del caserón Gaby 4 respecto a las zonas de estructuras y bajo RQD (rojo) y las zonas de daño (amarillo y naranjo). (Modificado de VAI Groundwater Solutions, 2020).

Por otra parte, por medio del modelo estructural de corto y mediano plazo fue posible identificar los distintos sets de estructuras que se ubican sobre el caserón Gaby 4 (Fig. 7). Este modelo detalla la información sobre las distintas estructuras que son mapeadas al interior de la mina a medida que avanza la construcción de los túneles. Los modelos geológicos y estructurales de la mina Alcaparrosa se presentan en el anexo III.

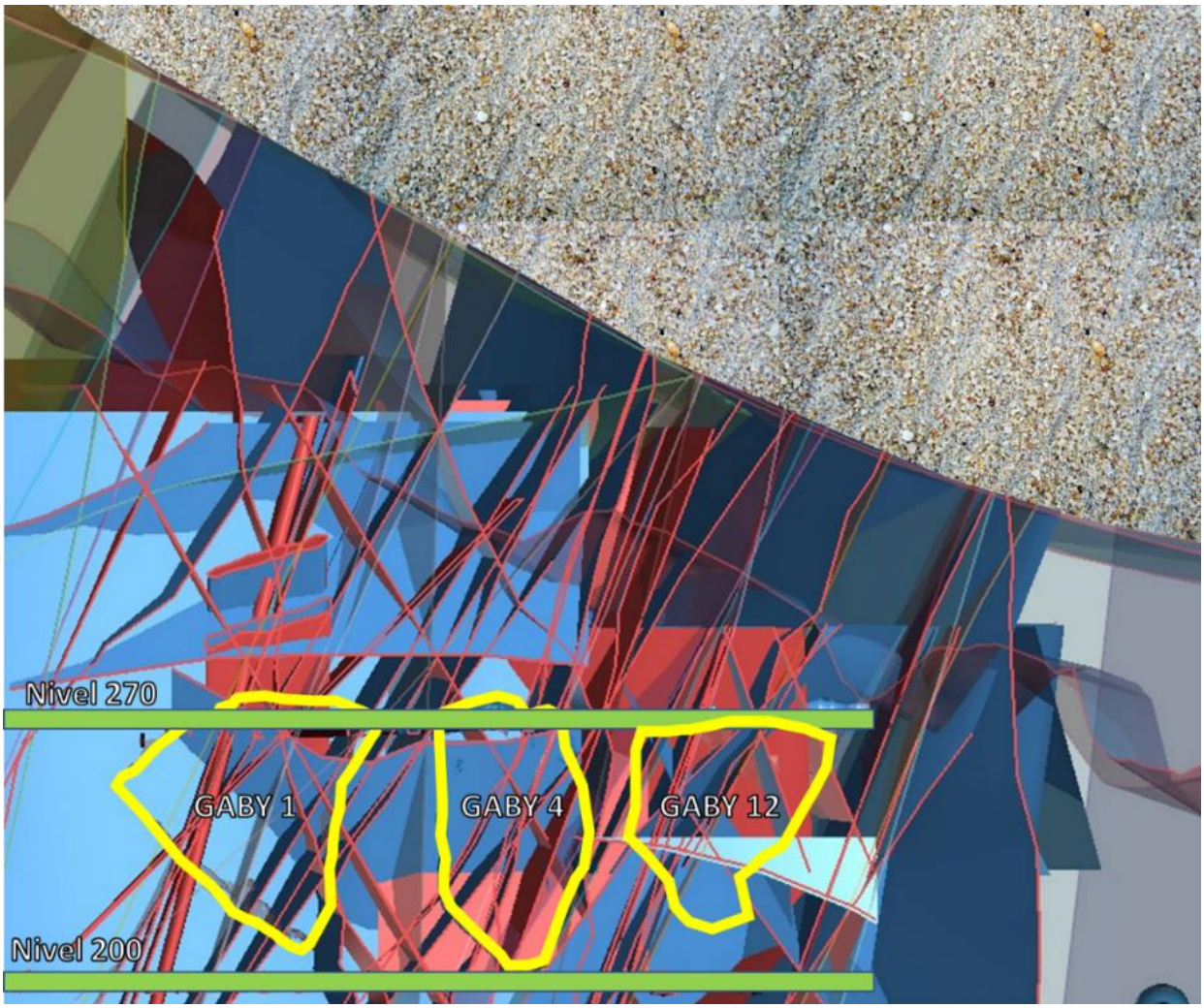


FIG. 7. Modelo de estructuras de mediano y largo plazo a partir del mapeo tanto del interior de la mina como de la ubicación de la infraestructura al interior de ella. Sobre el nivel de la roca meteorizada se presenta el relleno sedimentario del valle. Se observa la geometría de cuña que generan los sets estructurales de las fallas distritales. Figura elaborada con datos entregados por Lundin Mining (comunicación escrita, 2022).

3. CLIMA, ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES LOCALES Y EVOLUCIÓN DE NIVELES ESTÁTICOS

3.1 Clima

Según Hidromas (2013), la región de Atacama presenta climas desérticos, pero el incremento de las precipitaciones hacia la cordillera hace que la condición de desierto no sea tan rigurosa. Se destacan tres condiciones climáticas: una en el sector costero, con influencias marítimas, otra en la pampa intermedia y, por último, el sector cordillerano con incremento de las precipitaciones y régimen térmico frío.

En el área de estudio se observa un clima asociado a la pampa intermedia, denominado clima Desértico Marginal Bajo, el que cubre la zona que va desde donde comienzan las tierras altas de la cordillera hasta donde alcanza la influencia marítima intensa por el oeste. De Copiapó al norte es de una rigurosa sequedad, en cambio hacia el sur de esa ciudad, la inexistencia de la cordillera de la Costa permite alguna forma de efecto marítimo en la humedad, sin nubosidad, que atenúa las características desérticas (Hidromas, 2013).

La amplitud térmica es mucho mayor que en el litoral. La diferencia entre el mes más cálido y el más frío es de 7 a 8 °C en Copiapó, mientras que se estima inferior a 6 °C en la zona costera. Mucho mayor es la amplitud térmica diaria que alcanza del orden de 13 a 15 °C, lo que es una buena muestra de la continentalidad (Hidromas, 2013).

Las zonas con este clima se ubican bajo el nivel de la inversión de temperatura, con temperaturas moderadas y humedad suficiente para permitir la generación de algún tipo de vegetación de estepa en los sectores bajos (Hidromas, 2013).

Las precipitaciones aumentan con la latitud y con la altura, concentrándose en los meses de invierno. Los totales anuales llegan a 12 mm en Copiapó (291 m s.n.m.) y 34 mm en Los Loros (948 m s.n.m.) (Hidromas, 2013).

3.2 Análisis de precipitaciones locales

A partir del estudio de la caracterización de remociones en masa (Fernández y Espinoza, 2020), se entrega la ubicación y elevación de ocho estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca del río Copiapó (Fig. 8). Adicionalmente, se utilizó información de tres estaciones meteorológicas pertenecientes a la empresa Lundin Mining y una de la empresa Pucobre, las que fueron facilitadas por ambas compañías como parte de este estudio. La ubicación de estas estaciones se presenta en la tabla 3.

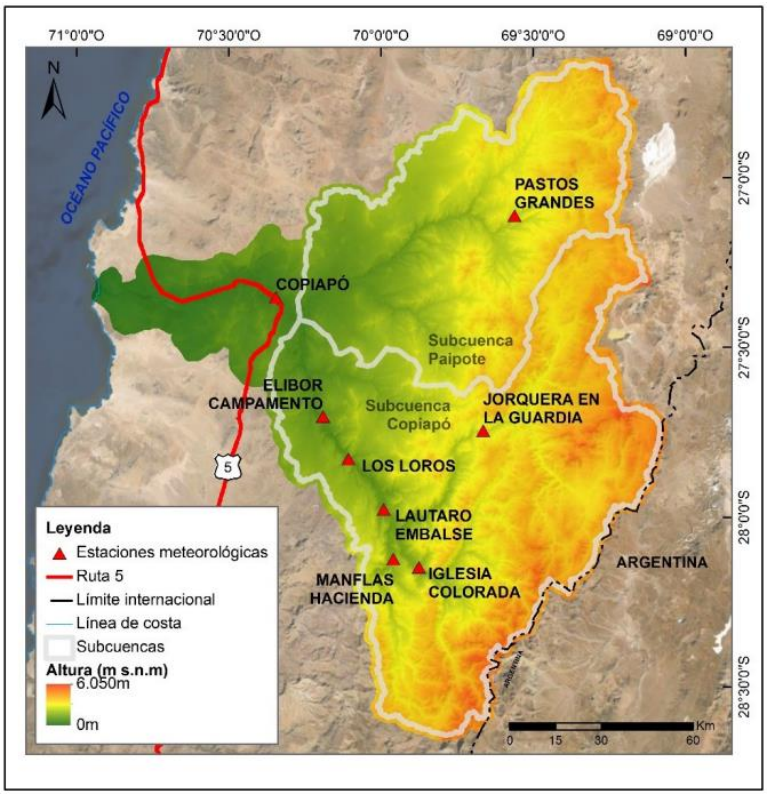


FIG. 8. Estaciones meteorológicas con mayor margen de registro en la cuenca de Copiapó y sus subdivisiones principales: subcuencas de Copiapó y de Paipote. Tomado de Fernández y Espinoza, 2020.

TABLA 3. ESTACIONES METEOROLÓGICAS ALEDAÑAS A LA ZONA DE ESTUDIO, PERTENECIENTES A LAS EMPRESAS LUNDIN MINING Y PUCOBRE.

Estación meteorológica	Este (m)	Norte (m)	Cota (m s.n.m.)
Pucobre DLC II	370.051	6.964.655	541
Candelaria TAMA	374.908	6.960.231	492
Candelaria mina	371.699	6.955.246	788

Pucobre Depósito Las Cruces II (DLC II), Candelaria Tierra Amarilla (TAMA) y Candelaria mina. Las coordenadas se presentan en UTM WGS84.

A partir del registro de precipitaciones en las estaciones, fue posible establecer que el volumen de aquellas ocurridas desde el día 14 hasta el 16 de julio en Candelaria mina (Tabla 4), apenas sobrepasaron el umbral necesario (19,2 mm) para la ocurrencia de remociones en masa en la estación Copiapó, definido en el estudio de Fernández y Espinoza (2020) (Fig. 9) Esto es concordante con el hecho de que las precipitaciones de julio de 2022 desencadenaron la activación de la quebrada Alcaparrosa. Sin embargo, si se considera el registro anual de precipitaciones, el periodo de retorno para eventos de esta magnitud (22,7 mm) en la estación Copiapó es de solo cinco años, lo que permite catalogar las precipitaciones de julio en Tierra Amarilla como normales para la fecha.

TABLA 4. REGISTRO DE PRECIPITACIONES ALEDAÑAS AL ÁREA DE ESTUDIO PREVIO AL EVENTO DE SUBSIDENCIA.

Monto de precipitaciones* (mm)			
Estación	**22-06-23**	**11-07-23**	**14 a 16-07-23**
Pucobre DLC II	0,5	8,9	13,5
Candelaria TAMA	1,5	9,1	16,8
Candelaria mina	0,3	7,6	21,8

* Datos proporcionados por la empresa Lundin Mining (comunicación escrita, 2022) y la empresa Pucobre (comunicación escrita, 2022).

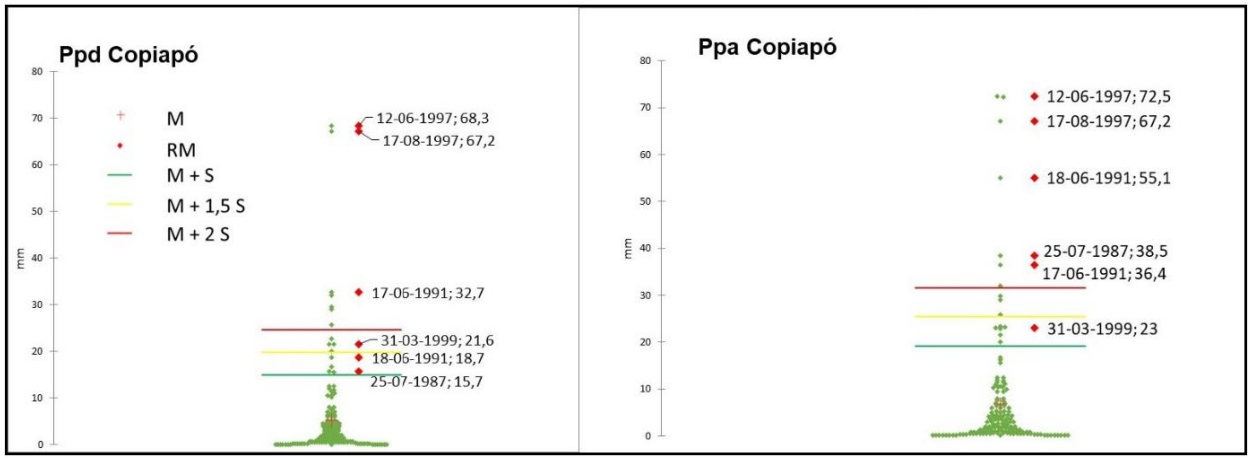


FIG. 9. Dispersigramas de la estación Copiapó. Los puntos verdes representan todos los días con precipitación (mm) diaria (izquierda) y acumulada (derecha). Además, se muestran los eventos de remociones en masa tipo flujo con datos (RM), la media aritmética de los datos (M) y los umbrales propuestos (M+S, M+1,5S y M+2S), tanto para las precipitaciones diarias (Ppd) como para las acumuladas (Ppa). (Tomado de Fernández y Espinoza, 2020).

3.3 Evolución del nivel estático

Entre los años 1991 y 2016 Golder Associates S.A. (2006) y Xterrae Geología (2016), reconocieron un déficit en el balance de agua para la cuenca del río Copiapó, a partir de la reducción sistemática de niveles en los pozos. Sin embargo, esta situación fue revertida entre el año 2015 y el 2020 con la recuperación parcial del nivel freático en el sector de Alcaparrosa.

En la figura 10 se observa la evolución del nivel estático en el sector de la mina Alcaparrosa, con un marcado descenso de los niveles desde el 2002 hasta el 2015. Posteriormente, como consecuencia de la recarga producida por las precipitaciones que desencadenaron los aluviones de marzo de 2015 y mayo de 2017, se evidencia una recuperación del nivel, con ascenso desde esa fecha hasta el 2020, cuando otra vez el nivel empieza a decaer (Fig.10). Se estima un flujo pasante promedio en el acuífero en el sector de Alcaparrosa de 295 l/s. Esto muestra un alza con respecto a la situación más seca del acuífero, donde los cálculos indican un flujo pasante del orden de los 60 l/s (VAI Groundwater Solutions, 2020). Hasta enero de 2023, continúan descendiendo los niveles estáticos en el acuífero freático asociado al río Copiapó. La descripción hidrogeológica detallada del sector Alcaparrosa de presenta en el anexo II.

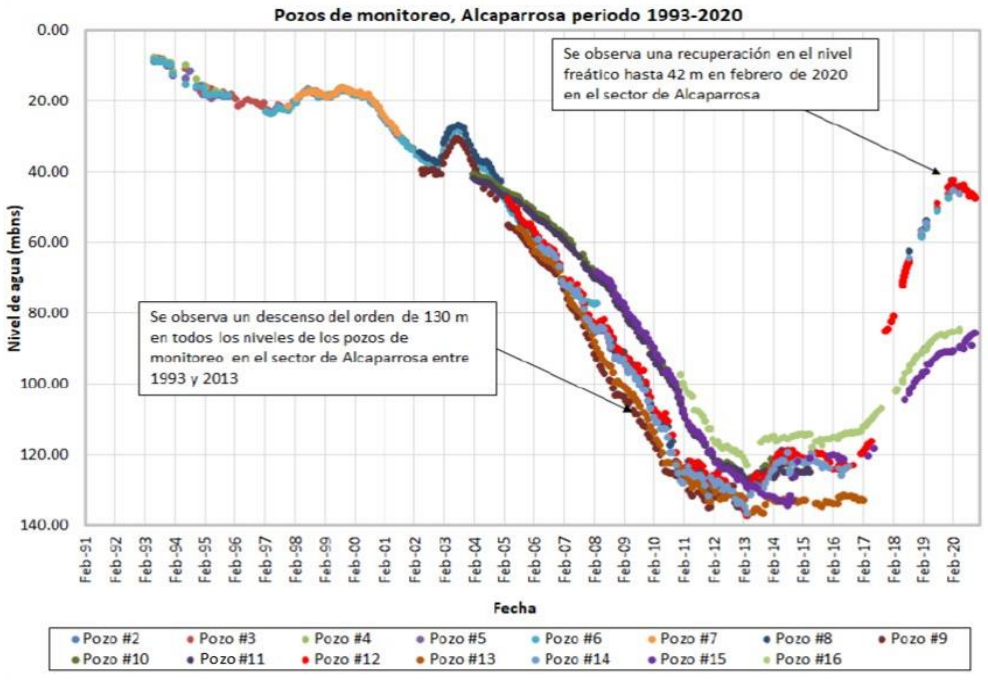


FIG. 10. Hidrograma de los pozos de monitoreo del sector de la mina Alcaparrosa. (Tomado de VAI Groundwater Solutions, 2020).

4. OBSERVACIONES DE TERRENO

Desde el día 8 de agosto de 2022, profesionales del departamento de Geología Aplicada y Recursos Geológicos apoyaron en terreno a la Dirección Regional de Atacama de Sernageomin en el análisis de los aspectos hidrogeológicos del problema. En este marco, el apoyo se materializó mediante las siguientes actividades:

- Solicitud de antecedentes geológicos, hidrogeológicos y monitoreos pertinentes a la compañía minera para establecer los posibles efectos del evento sobre el sistema hidrogeológico.
- Levantamiento de información geológica e hidrogeológica que permitiera realizar una caracterización hidrogeológica del sector y contrastar con la información que entrega la compañía minera.

Se efectuó una campaña de terreno de aproximadamente un mes, con cuatro turnos de alrededor de una semana llevados a cabo por los profesionales Cristóbal Machuca (CM) y Felipe Fuentes (FF). Los turnos de terreno fueron del 08 al 12 de agosto (CM), del 13 al 19 de agosto (FF), del 19 al 26 de agosto (CM) y del 26 de agosto al 2 de septiembre (FF).

Las actividades en terreno fueron las siguientes:

- Participar en reuniones con autoridades regionales y nacionales, tanto de Sernageomin como de la Dirección General de Aguas (DGA), la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA), el delegado presidencial, el gobernador regional, la ministra de minería, el alcalde de Tierra Amarilla, y diversas autoridades sectoriales, para dar asistencia acerca de los problemas geológicos e hidrogeológicos ocasionados por la subsidencia.
- Medición de niveles de agua en pozos de la mina y de particulares, tanto aguas arriba como aguas debajo de la subsidencia.
- Toma de muestras de agua para análisis de elementos mayores, menores, trazas especiales e isótopos de deuterio y oxígeno, y medición de parámetros fisicoquímicos, tanto de agua subterránea en pozos como en los sectores donde está la infiltración, en los niveles 270, 200 y el embalse dentro de la mina Alcaparrosa (en los niveles 45, 60 y 80, a medida que ha ido aumentando en cota el agua embalsada).
- Descripción de la sección sedimentaria de los sondajes AD 952 y 954.

- Recopilación de antecedentes en terreno, tanto en conversaciones como con reuniones con profesionales de las áreas de geotecnia, geomecánica y geología de la empresa minera.
- Acompañar a profesionales de la Subdirección Nacional de Minería de Sernageomin en inspecciones de las obras del plan de contingencia de la mina, que consiste en la construcción de cuatro muros para encapsular las zonas de los caserones Gaby 1, 4 y 12 para evitar la inundación completa de la mina.
- Realizar mediciones con GPS diferencial y vuelos diarios con un dron EVO II Pro, con GPS diferencial incorporado, para realizar modelos 3D e inspeccionar la subsidencia principal junto a las zonas de grietas.
- Inspección en terreno de las grietas presentes al norte y sur de la subsidencia, toma de fotografías, mediciones con GPS diferencial y estudio de su evolución.

4.1 Medición, recopilación y análisis de niveles estáticos en pozos de agua

Dentro del contexto de la emergencia, en el marco de lo ordenado en el punto 7 del acta de fiscalización N° 1547 DGA, de 11 de agosto de 2022, la empresa reporta el monitoreo diario de los niveles de agua subterránea de 12 pozos. Junto con esto, Sernageomin realizó mediciones puntuales a pozos de terceros que no poseen estadísticas de niveles históricos y también se recopilaron los niveles monitoreados por la empresa minera y los niveles en la base de datos del estudio hidrogeológico de Copiapó (Espinoza *et al*., 2021).

En la figura 11 se presentan algunas fotografías de los pozos visitados en terreno con la medición del nivel mediante pozómetro Solinst de 300 m de profundidad, y en la tabla 5 se entregan los datos obtenidos. La figura 12 muestra la ubicación de los pozos monitoreados en terreno.

FIG. 11. Fotografías de medición de los niveles estáticos en terreno. Izquierda: medición del nivel en el pozo 12. Derecha: lugar de medición del nivel en el pozo HA-01.

TABLA 5. NIVELES DINÁMICOS MEDIDOS EN POZOS MONITOREADOS POR SERNAGEOMIN EN ALCAPARROSA EN DISTINTAS FECHAS.

Nombre de pozo	Este (m) UTM WGS84	Norte (m) UTM WGS84	Cota (m s.n.m.)	Altura brocal (m)	10-08-2022	11-08-2022	17-08-2022	19-08-2022	21-08-2022	24-08-2022
Pozo HA01	374.393	6.961.862	474,43	0,32	61,95	62,15	-	-	-	-
Pozo 8	374.563	6.961.088	478,94	0,505	63,20	63,32	-	-	-	-
Pozo 12	374.532	6.961.286	477,59	0,53	63,42	63,54	-	-	65,09	-
Pozo 14	374.632	6.960.813	481,39	0,638	63,87	63,97	-	-	65,28	-
Pozo 9	374.861	6.958.112	525	0,8	-	-	-	-	81,82	-
Pozo 16, hacienda Molina	374.698	6.960.461	490	0,62	-	66,42	67,98	67,21	-	67,19
Pozo 15, hacienda Molina	374.637	6.960.132	490	0,73	-	-	-	-	-	68,51
Pozo A. Copayapu	374.838	6.962.270	473	0,55	-	-	-	61,28	-	-
Pozo quebrada Infiernillo	375.168	6.955.464	530	0,54	-	-	-	79,20	-	-

Las coordenadas fueron medidas con GPS de mano.

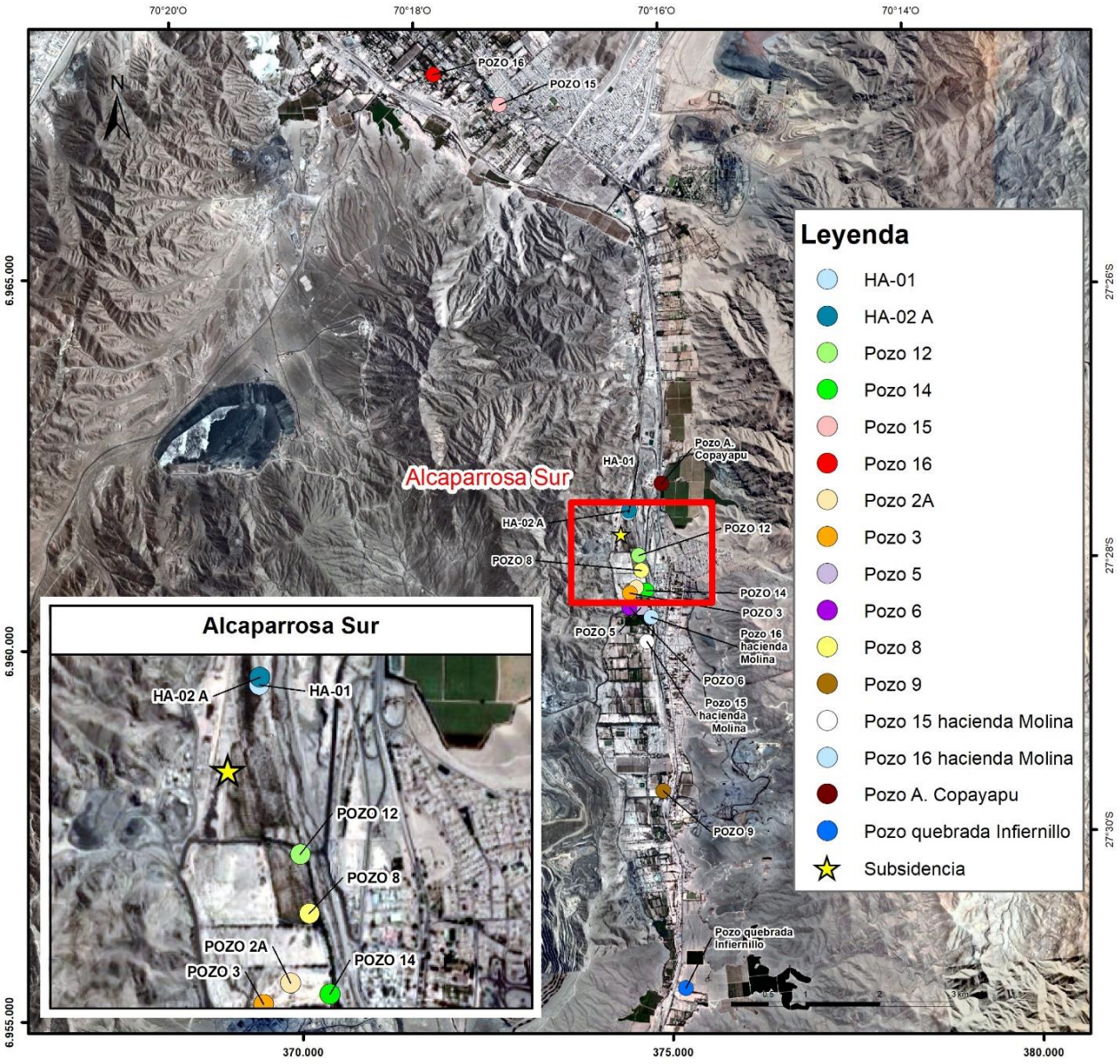


FIG. 12. Ubicación de los pozos monitoreados en terreno tanto por el servicio como por la empresa minera. La estrella amarilla muestra la ubicación de la subsidencia.

4.1.1 Análisis de los niveles de los pozos

La empresa reporta el monitoreo diario de los niveles de agua subterránea de 12 pozos (Fig.12 y Tabla 6), a partir de lo mandatado por el punto 7 del acta de fiscalización N° 1547 DGA, del 11 de agosto de 2022. Se recopiló y analizó información desde el 01 de enero de 2022 hasta el 31 de enero de 2023, con el objetivo de caracterizar la evolución del agua subterránea preevento y postsubsidencia.

TABLA 6. COORDENADAS Y COTAS DE POZOS MONITOREADOS POR LA EMPRESA MINERA (MODIFICADO DEL INFORME REGISTRO DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS DE LUNDIN MINING).

Nombre de pozo	Datum WGS84 Huso 19S		Cota (m s.n.m.)
	Este (m) WGS84	Norte (m) WGS84	
Pozo HA-1	374.391	6.961.865	472,28
Pozo HA-2	374.392	6.961.891	472,11
Pozo 12	374.527	6.961.290	477,59
Pozo 14	374.631	6.960.824	481,39
Pozo 15	372.643	6.967.375	437
Pozo 16	371.735	6.967.819	423
Pozo 2A	374.496	6.960.851	481,08
Pozo 3	374.408	6.960.783	481,25
Pozo 5	374.405	6.960.586	483,35
Pozo 6	374.402	6.960.582	483,04
Pozo 8	374.564	6.961.084	478,94
Pozo 9	374.862	6.958.117	525

La evolución de los niveles de agua subterránea en el año 2022 se observa en las figuras 13 y 14. En ellas se aprecia que los pozos que presentan mediciones previas al evento de subsidencia muestran descensos mucho menos pronunciados que los posevento.

En los pozos cercanos a la subsidencia, el aumento en el descenso alcanza casi 8 veces los valores preevento (pozo HA-02 A en las figuras 13, 14 y 15 y Tabla 7). Dado que existe una tendencia a aumentar la tasa de descenso al acercarse al hundimiento, es posible establecer que el nivel freático del acuífero forma un cono de depresión con vórtice en la subsidencia, debido a un drenaje activo por una conexión hidráulica. Algunos pozos más

alejados de la subsidencia presentan aumento en sus niveles posevento; esto puede deberse al cese del bombeo del pozo o de otros cercanos.

El pozo más representativo del impacto del evento en el acuífero corresponde al HA-02 A, ubicado 350 m aguas abajo de la subsidencia. Para el análisis de la evolución del agua subterránea se consideró todo el periodo preevento como “Semana 0” y la semana en la cual ocurre la subsidencia (24 a 30 de julio de 2022) como “Semana 1” (Fig. 15 y Tabla 7). Inmediatamente después del evento, el pozo HA-02 A es el que muestra las mayores tasas de descenso, las que a partir de la semana 8 se equiparan con los descensos registrados en los pozos más cercanos (Figs. 13, 14 y 15, y Tabla 7). Las semanas 13, 14, 15, 17, 18 y 19 el pozo HA-02 A presenta un ascenso en sus niveles. Este periodo corresponde entre el 16 de octubre y el 3 de diciembre de 2022, excepto la semana entre el 6 y el 12 de noviembre de 2022 (Figs. 13, 14 y 15, y Tabla 7). Este periodo de ascenso en los niveles podría deberse a la respuesta del acuífero a las faenas desarrolladas por la empresa dentro de la mina.

A continuación, se describe la evolución de los niveles del pozo HA-02 A después del evento de subsidencia: (1) entre el 30 de julio y el 18 de octubre, el pozo presenta un descenso en sus niveles desde 62,23 hasta los 71,2 m b.s.t. (2) Entre el 18 de octubre y el 05 de noviembre, la captación muestra una tendencia al ascenso, lo que queda demostrado por la variación de su nivel de agua subterránea desde los 71,2 hasta los 70,25 m b.s.t. (3) Entre el 05 y el 17 de noviembre, el pozo vuelve a descender desde los 70,25 hasta los 70,6 m b.s.t. (4) Entre el 17 de noviembre y el 2 de diciembre, los niveles del pozo HA-02 A suben nuevamente desde los 70,6 hasta los 69,95 m b.s.t. (5) Entre el 2 de diciembre y el 31 de enero de 2023 (fecha de término de este análisis), los niveles de agua subterránea vuelven a bajar desde los 69,95 hasta los 71,15 m b.s.t. (Figs. 13, 14 y 15, y Tabla 7).

Dado que no se aprecia una estabilización de los niveles de los pozos cercanos a la subsidencia, se puede concluir que el cono de depresión, debido al agua del acuífero que se está descargando por la subsidencia hacia la mina, solo continuará creciendo.

TABLA 7. TASA DE DESCENSO SEMANAL (M/DÍA) DEL NIVEL ESTÁTICO DE LOS POZOS CERCANOS A LA SUBSIDENCIA, MONITOREADOS POR LA EMPRESA MINERA.

Semana	Pozos											
	HA-01	HA-02 A	Pozo 16	Pozo 8	Pozo 14	Pozo 15	Pozo 9	Pozo 12	Pozo 2ª	Pozo 3	Pozo 5	Pozo 6
0	No aplica	0,014	No aplica	0,020	0,020	0,003	0,029	0,026	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
1	No aplica	0,030	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica
2	0,218	0,222	0,005	0,121	0,064	0,120	No aplica	0,141	0,094	0,093	0,066	0,075
3	0,169	0,160	0,010	0,098	0,087	0,012	0,060	0,123	0,100	0,095	0,073	0,075
4	0,111	0,117	0,004	0,083	0,068	-0,005	0,018	0,095	0,073	0,070	0,062	0,062
5	0,106	0,095	-0,002	0,087	0,077	-0,019	0,006	0,095	0,079	0,074	0,068	0,069
6	0,092	0,087	0,002	0,071	0,060	0,009	-0,052	0,076	0,060	0,057	0,053	0,049
7	0,094	0,079	-0,005	0,075	0,068	-0,001	0,023	0,081	0,069	0,068	0,064	0,063
8	0,067	0,068	0,004	0,064	0,066	0,008	0,046	0,063	0,068	0,069	0,059	0,061
9	0,063	0,066	-0,010	0,057	0,055	-0,004	0,022	0,056	0,057	0,057	0,053	0,049
10	0,069	0,063	0,001	0,058	0,057	-0,006	0,050	0,071	0,056	0,060	0,054	0,049
11	0,064	0,061	0,004	0,048	0,051	0,008	0,036	0,055	0,041	0,053	0,043	0,047
12	0,054	0,046	0,014	0,045	0,044	0,004	-0,002	0,047	0,048	0,053	0,047	0,044
13	-0,064	-0,081	0,007	0,019	0,037	0,005	0,070	-0,024	0,039	0,041	0,046	0,042
14	-0,017	-0,042	0,002	-0,004	0,016	0,001	0,044	-0,019	0,011	0,016	0,028	0,026
15	-0,010	-0,006	0,002	0,020	0,024	0,013	0,035	0,010	0,017	0,022	0,028	0,027
16	0,024	0,029	-0,003	0,023	0,024	0,004	0,041	0,015	0,030	0,030	0,031	0,034
17	-0,033	-0,030	0,003	0,009	0,027	0,003	0,054	-0,008	0,028	0,026	0,031	0,028
18	-0,033	-0,027	0,005	-0,010	0,016	-0,001	0,045	-0,006	0,014	0,013	0,025	0,024
19	-0,017	-0,007	No aplica	0,000	0,010	0,023	0,041	-0,010	0,006	0,009	0,014	0,017
20	0,002	0,019	0,004	0,017	0,022	0,007	0,049	0,021	0,018	0,015	0,024	0,018
21	0,030	0,040	0,000	0,019	0,013	0,009	0,034	0,019	0,011	0,015	0,014	0,016
22	0,027	0,022	No aplica	0,021	0,022	0,012	0,075	0,018	0,023	0,021	0,021	0,024
23	0,017	0,015	No aplica	0,017	0,020	-0,004	0,053	0,016	0,021	0,019	0,023	0,023
24	0,006	0,021	0,002	0,014	0,016	0,004	0,020	0,006	0,017	0,019	0,015	0,017
25	0,031	0,032	0,005	0,022	0,022	0,013	0,042	0,024	0,019	0,022	0,026	0,026
26	0,013	0,018	0,010	0,026	0,032	-0,001	0,092	0,021	0,026	0,018	0,023	0,020
27	0,016	0,023	0,008	0,021	0,028	0,013	0,047	0,020	0,026	0,026	0,029	0,026

Nota: si el descenso es negativo, representa un ascenso de los niveles en la semana. Semana 0 corresponde al descenso preevento y semana 1 es en la que ocurre el evento de subsidencia. Datos proporcionados por la empresa Lundin Mining.

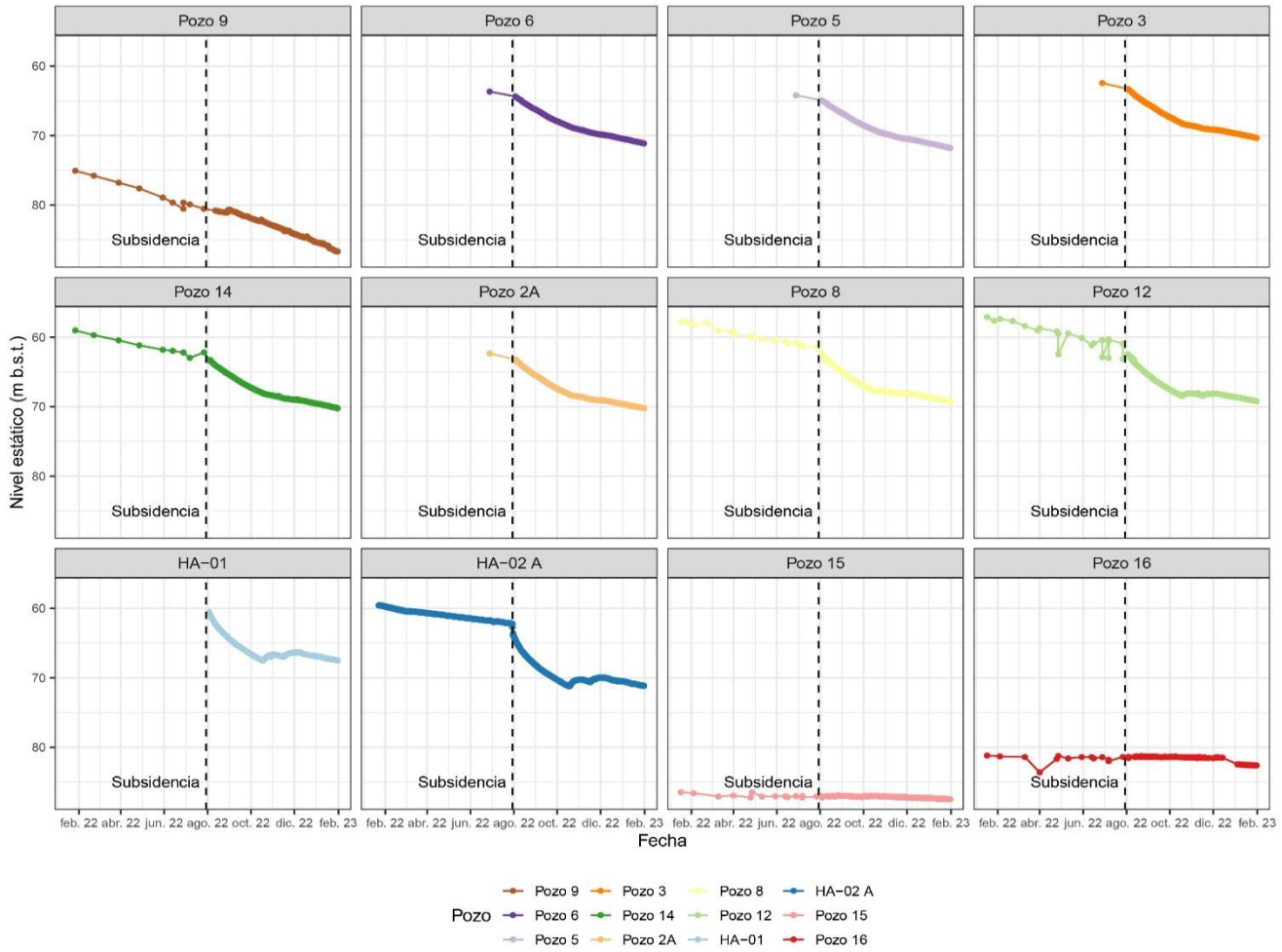


FIG. 13. Nivel del agua subterránea para cada pozo medido en metros bajo la superficie del terreno (m b.s.t.). Los pozos están ordenados según la dirección de flujo regional (de sur a norte). Figura elaborada a partir de datos proporcionados por la empresa Lundin Mining.

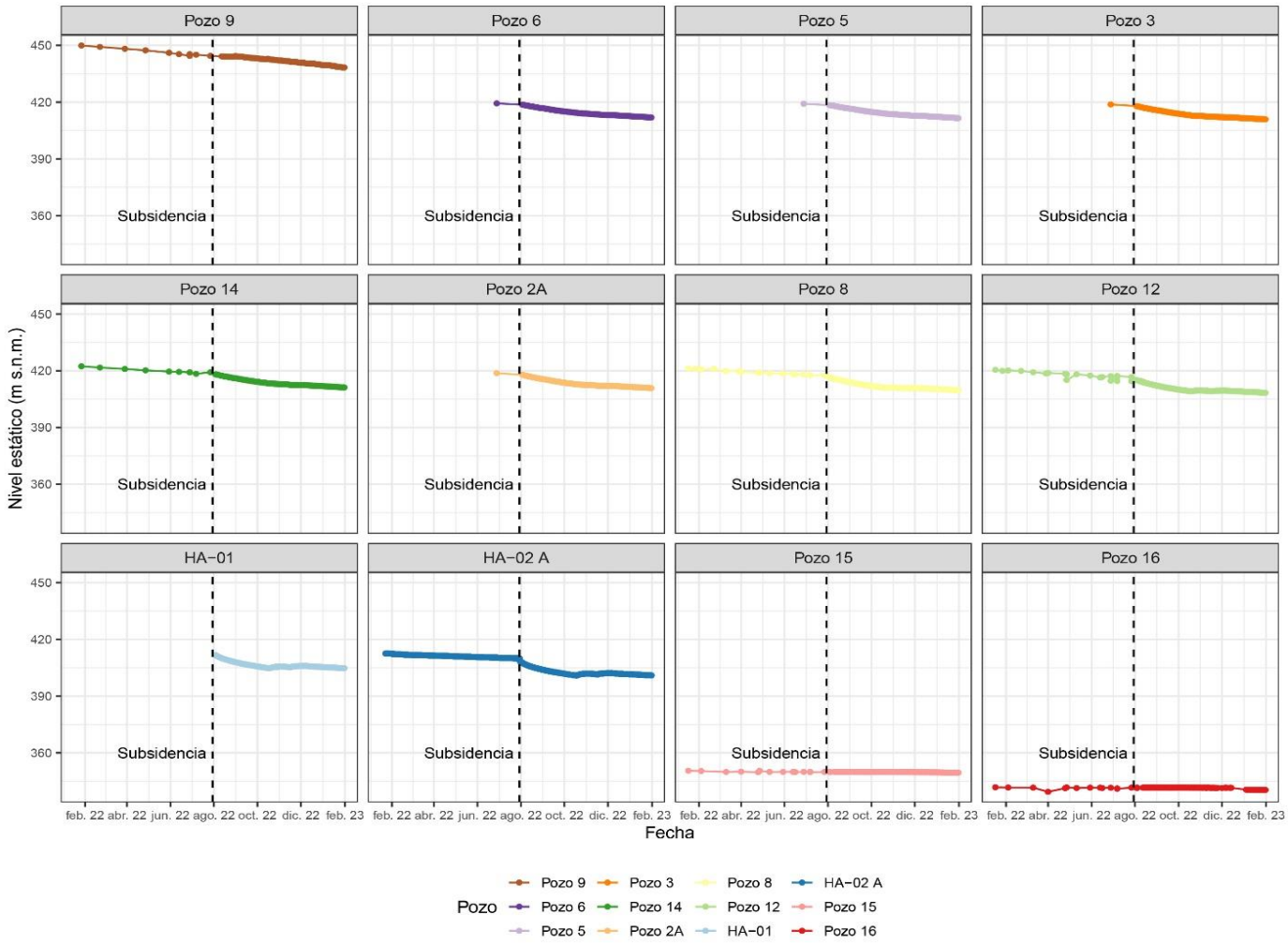


FIG. 14. Nivel del agua subterránea para cada pozo medido en metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.). Los pozos están ordenados según la dirección de flujo regional (de sur a norte). Figura elaborada a partir de datos proporcionados por la empresa Lundin Mining.

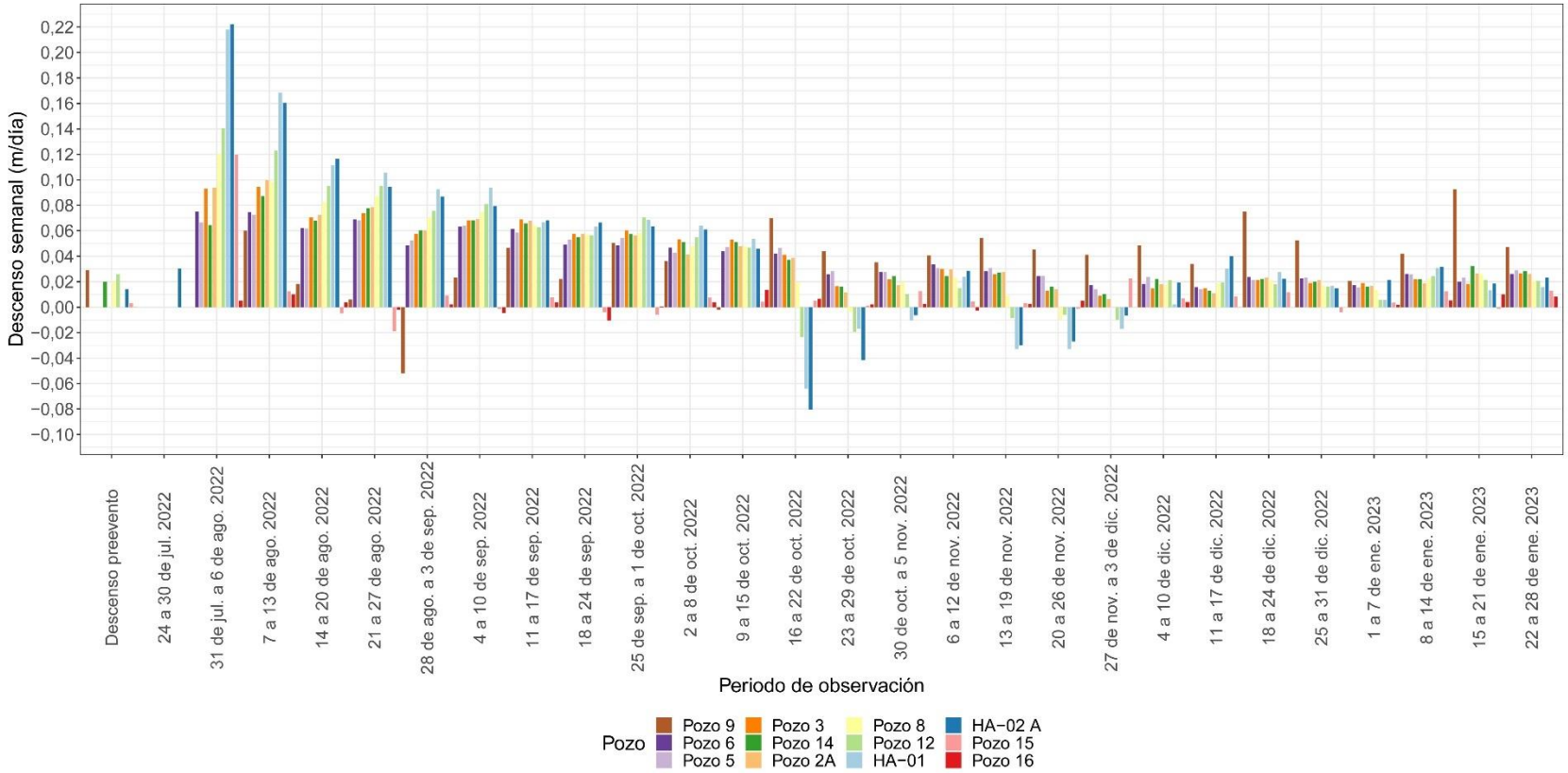


FIG. 15. Variación semanal de los descensos observados en los pozos monitoreados por la empresa. Semana 0 corresponde al descenso preevento y semana 1 es en la que ocurre el evento de subsidencia. Figura elaborada a partir de datos reportados por la empresa Lundin Mining.

Cabe destacar que el pozo 16 presenta falta de datos en sus reportes entre el 26 y el 30 de noviembre de 2022; entre el 2 y el 4 de diciembre de 2022; entre el 9 y el 11 de diciembre de 2022 y entre el 15 de diciembre de 2022 y el 03 de enero 2023 (Figs. 13, 14 y 15). Luego, cuando se retoma la frecuencia diaria de monitoreo, el pozo ha bajado casi un metro su nivel de agua subterránea (81,49 m b.s.t. el 14 de diciembre de 2022 versus 82,45 m b.s.t. el 04 de enero de 2023), lo que no es consistente con la tendencia que presentaba antes de la brecha de información. En los reportes revisados no se explica la razón de la falta de monitoreo en esos periodos como tampoco se tienen antecedentes que expliquen lo sucedido en este pozo. Si bien las tendencias de descenso de dicho pozo antes y después de la brecha de información son parecidas, el aumento en la profundidad del nivel de agua subterránea no puede ser explicado con los antecedentes que se tienen, sin embargo, se descarta la influencia del evento (o de su cono de depresión) en el fenómeno, debido a la distancia del pozo con la subsidencia y al tiempo transcurrido entre ambos fenómenos.

Por último, con fecha 31 de enero de 2023, todos los pozos muestran tasas de descenso mayores que las presentadas antes del evento de subsidencia.

4.1.2 Estimación de caudal de ingreso a la mina

La estimación de la magnitud del flujo instantáneo de agua del acuífero que ingresa luego de la formación de la subsidencia se logró al considerar los descensos registrados por los distintos pozos, tanto aguas arriba como aguas abajo del hundimiento. A través del método de Dupoit-Thiem, usando como parámetro de entrada la conductividad hidráulica del acuífero y homologando el fenómeno a una extracción puntual, fue posible modelar analíticamente la geometría cónica de la superficie piezométrica que mejor reflejó los descensos en los pozos cercanos 14 horas después del evento. Si bien este método asume que el acuífero es homogéneo, isótropo y no considera el gradiente hidráulico, entrega una aproximación teórica del rango del caudal de ingreso. En el anexo V se presenta el marco teórico para la aplicación del modelo de Dupoit-Thiem.

Para el caso de Alcaparrosa, se utilizó la conductividad hidráulica promedio estimada para el acuífero del río Copiapó en el modelo hidrogeológico conceptual (VAI Groundwater Solutions, 2020) y los descensos registrados inmediatamente antes y después del evento. Dado que el piezómetro de cuerda vibrante HA-02 A instalado aguas debajo de la subsidencia lleva un registro de los niveles cada 6 horas, se pudo establecer que el último nivel registrado previo al evento fue el 30-07-2022, a las 12:00 h. Luego de ocurrida la subsidencia se

determinaron descensos acelerados hasta alcanzar un régimen permanente el 31-07-2022 a las 06:00 h.

Además, se consideraron los registros manuales de niveles en los pozos 8 y 12 , ubicados a 437 y 618 m de la subsidencia respectivamente (Fig. 16). Dado que para estos pozos el último registro de nivel antes del evento fue el 27-07-2022, fue necesario estimar su nivel piezométrico al 30-07-2022 a las 12:00 h; para esto se proyectó el ultimo registro de acuerdo con la tasa de descenso mensual de cada uno previo a la fecha de la subsidencia. De igual manera, dado que luego del evento la primera medición de niveles en estos pozos se realizó el 03-08-2022, para estimar el nivel piezométrico al 31-07-2022 a las 06:00 h, se proyectó la tasa promedio de descenso diario posterior al evento. Los niveles utilizados y las tasas de descenso estimadas pre- y posevento se presentan en la tabla a continuación.

TABLA 8. PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA ESTIMACIÓN DE DESCENSOS EN LOS POZOS 8 Y 12.

Parámetro	**Unidad/fecha/ cardinalidad**	**Pozo 8**	**Pozo 12**	**Promedio Pozos 8 y 12**
Ubicación UTM WGS84	Este	374.763	374.734	-
	Norte	6.961.429	6.961.630	-
Cota pozo	m s.n.m.	478,94	477,59	-
Cota basamento	m s.n.m.	361,94	313,59	337,77
Nivel freático m b.n.s	27-04-2022	59,86	59,49	-
	27-07-2022	61,38	60,92	-
N° días entre 27-04 y 27-07	día	91	91	-
Tasa de descenso	m/día	-0,017	-0,016	-
Nivel proyectado	30/07/22	61,33	60,87	-
Cota piezométrica proyectada	m s.n.m.	417,61	416,72	417,16
Espesor saturado	m	55,67	103,13	79,40
Nivel freático m b.n.s	03-08-2022	62,37	62,46	-
	11-08-2022	63,315	63,54	-
N° días	días	8	8	-
Tasa de descenso	m/día	-0,119	-0,136	-
Nivel proyectado	31-07-2022	62,01	62,05	-
Cota piezométrica proyectada	m s.n.m.	416,93	415,54	-
Descenso pre- y posevento (30-07 al 31/07)	**m**	**0,68**	**1,18**	-

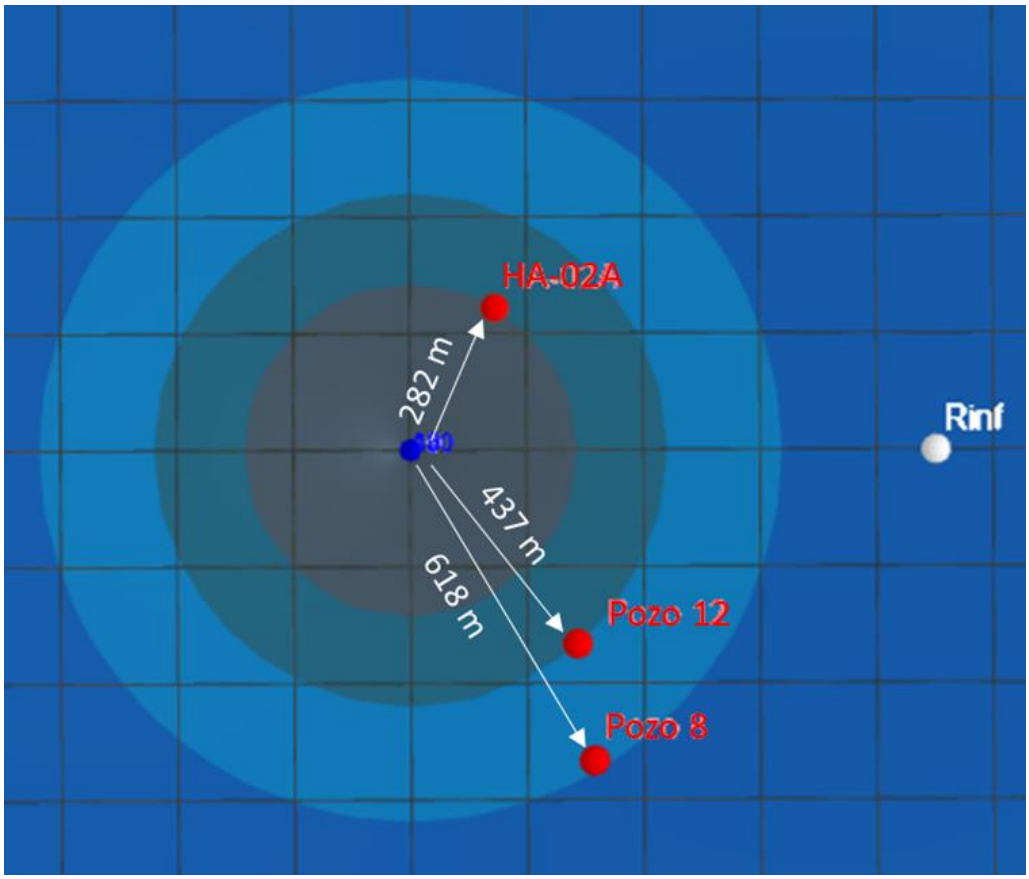


FIG. 16. Ubicación de los pozos 8, 12 y HA-02A, con sus respectivas distancias (m) a la subsidencia y el registro de descensos posevento (s) en metros.

Se estimó que el caudal de ingreso a la mina varió entre 250 y 286 l/s y formó un cono de depresión de un radio de 900 m. La tabla 9 entrega los parámetros utilizados para la estimación de dichos valores mediante la fórmula de Dupoit Thiem, mientras que las figuras 17 y18 muestran el cono de depresión modelado.

TABLA 9. PARÁMETROS UTILIZADOS PARA ESTIMAR EL CAUDAL DE INGRESO A LA MINA ALCAPARROSA.

P1/P2		**HA-02/P8**	**HA-02/P12**
Conductividad hidráulica	m/s(m/s)	0,0005	0,0005
Distancia de P1 a subsidencia	(m)	282	282
Distancia de P2 a subsidencia	(m)	618	437
Cota del basamento	(m s.n.m)	337,77	337,77
Descenso en P1	(m)	1,58	1,58
Descenso en P2	(m)	0,68	1,18
Columna de agua Inicial	(m)	79,40	79,40
Caudal estimado	**(m^3/s)**	**0,286**	**0,251**
Radio de influencia	**(m)**	**903**	**933**

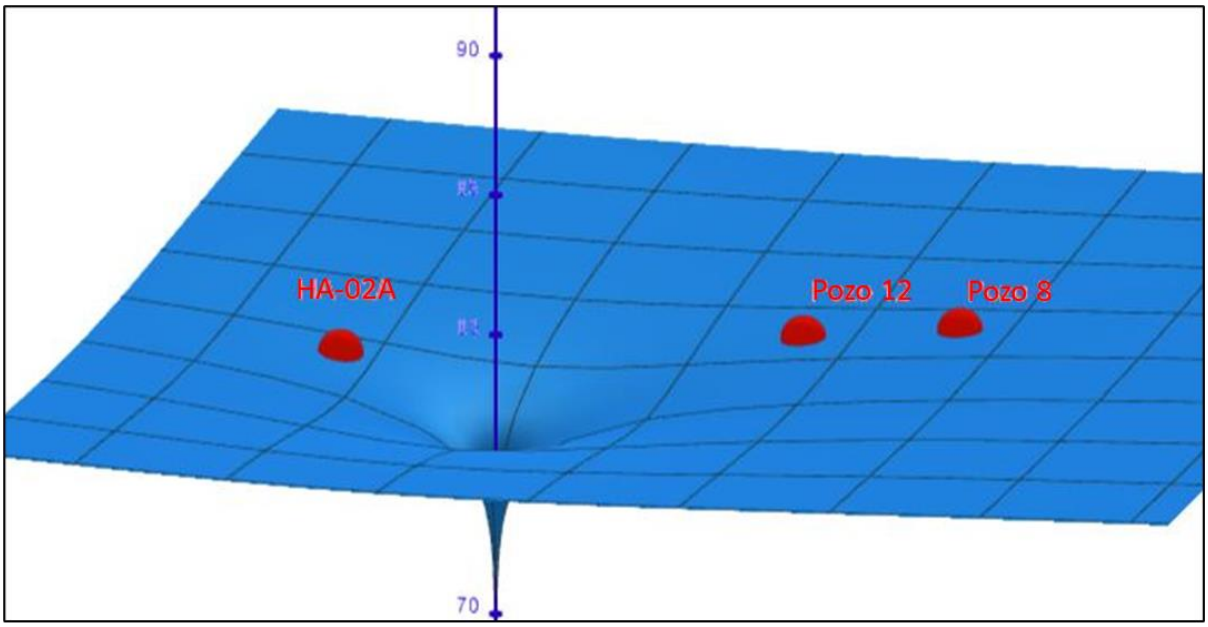


FIG. 17. Superficie freática modelada mediante la fórmula de Dupoit Thiem, según los descensos de los pozos 8, 12 y HA-02A.

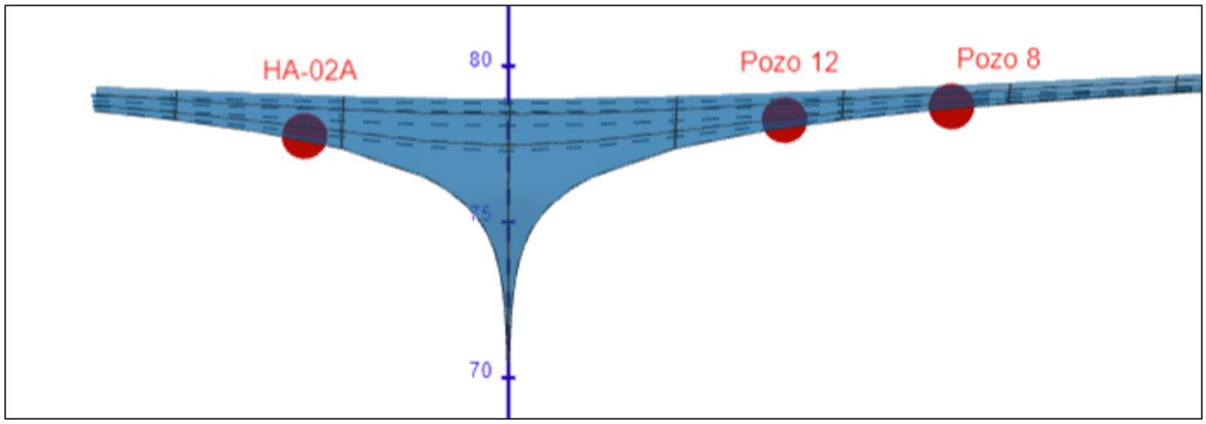


FIG. 18. Corte transversal de la superficie freática modelada.

4.1.3 Estimación de volúmenes de agua acumulados en niveles inferiores de la mina

En condiciones operativas normales, el promedio mensual de agua que es extraída de la mina y enviada a la planta de procesamiento Pedro Aguirre Cerda (planta PAC), propiedad de la misma empresa minera, alcanza los 17 l/s. Luego del evento se registró un aumento de hasta 20 veces el caudal de ingreso de agua a la mina, comparado con el promedio preevento.

Dado que el aumento superó con creces la capacidad instalada para desaguar las instalaciones (50 l/s), enviando esa agua a su planta de proceso, la empresa tomó la decisión de conducir el agua hacia los niveles inferiores, a través de caserones y piques en desuso. Esta medida provocó la inundación progresiva de los niveles inferiores, desde el nivel 35 aprox. hasta alcanzar el nivel 100 el 18 de septiembre de 2022 (Fig. 19), fecha en que se detuvo el bombeo. Se estima que el agua inundó la mina a una tasa de 10 m por semana.

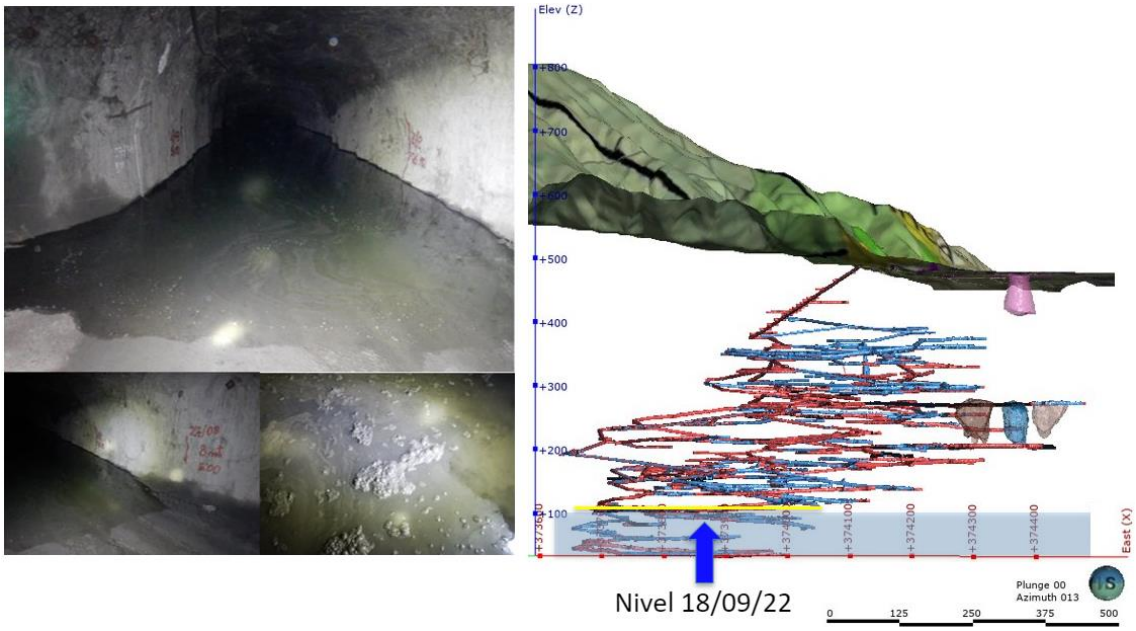


FIG. 19. Izquierda: fotografías de los niveles inferiores de la mina inundados por el ingreso de agua hacia las instalaciones. Derecha: se observa el diagrama de las instalaciones; la flecha azul indica el nivel de la inundación (nivel 100) al 18/09/2022.

La estimación del volumen de agua acumulado al interior de la mina se hizo a partir de la información enviada por la empresa minera en respuesta a la solicitud realizada por personal de Sernageomin en terreno. Desde la fecha del evento, los caudales reportados presentan variaciones significativas que responden a las acciones y obras que la empresa ha efectuado como medidas de contingencia. Los muros construidos para aislar el sector Gaby (que comprende los caserones Gaby 1, 4 y 12), tuvo como principal consecuencia la generación de un volumen embalsado que acaparó en gran medida el flujo de agua ingresado a la mina. El efecto de esta medida se manifiesta tanto a partir del 17 de septiembre cuando se reporta un caudal nulo hacia los niveles inferiores como el 19 de octubre cuando se revierte el descenso en el piezómetro HA-01 (Fig. 20). Durante la primera quincena de noviembre se reporta una reactivación en la derivación hacia el fondo de la mina, debido a una filtración desde un sondaje que conectaba los sectores Gaby y Jocelyn. Hasta que dicho sondaje fue sellado, se reportó un volumen de agua de 132.615 m^3.

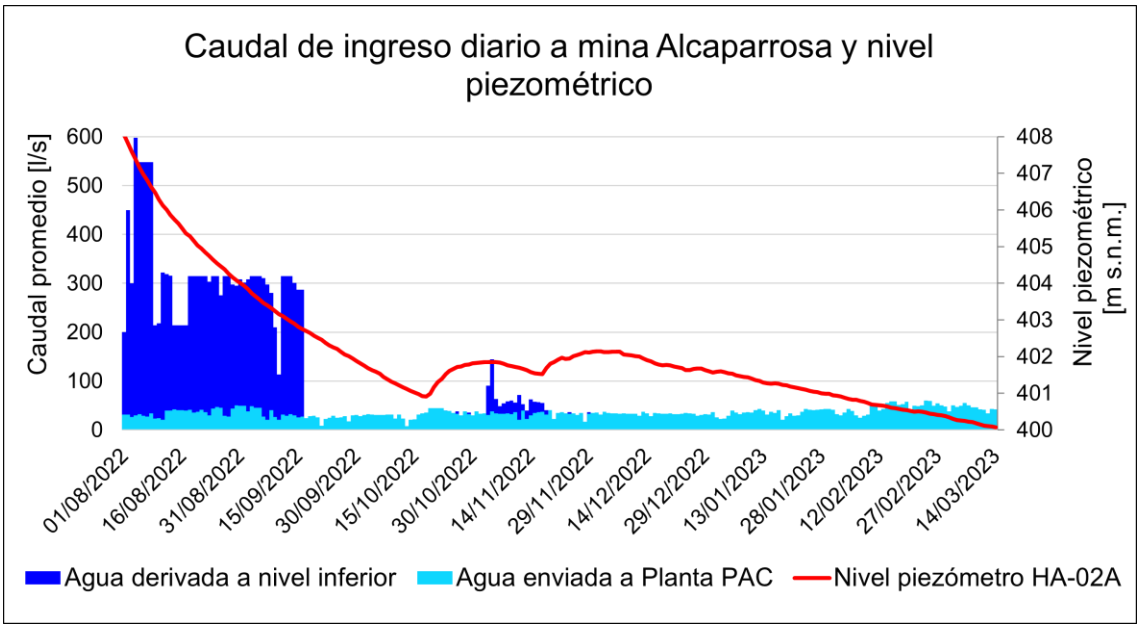


FIG. 20. Registro de caudales de agua derivados a los niveles inferiores de la mina Alcaparrosa, volumen bombeado a Planta PAC, y registro piezométrico del pozo HA-02 A.

La tabla 10 muestra los volúmenes de agua que fueron derivados al fondo de la mina hasta antes de la construcción de los muros (18/09/2022). La tabla 11 muestra la evolución del caudal de agua enviado diariamente al fondo de la mina entre el 1 de agosto y el 18 de septiembre de 2022 (fecha de finalización de la construcción de los muros). Durante este periodo se estima que se derivó un volumen de 1.286.261 m^3 hacia el fondo de la mina a una tasa de 310,15 l/s.

TABLA 10. VOLÚMENES SEMANALES DERIVADOS HACIA NIVELES INFERIORES DE LA MINA.

Semana	**Volumen (m^3)**	**Caudal promedio (l/s)**
31/07-08/08	322.992	299,53
09/08-14/08	138.442	267,06
15/08-21/08	173.040	286,11
22/08-28/08	184.590	305,21
29/08-04/09	186.543	308,44
05/09-11/09	159.102	263,07
12/09-18/09	103.072	238,59
Total, periodo	**1.286.261**	**310,15**

*Datos obtenidos del monitoreo realizado por la empresa minera.

Por medio de los caudales y niveles reportados, se estimó que el volumen aislado en el sector Gaby fue de 857.507 m^3, considerando que entre el 17 de septiembre y el 19 de octubre

de 2022 (32 días) hubo una tasa de llenado similar al caudal que ingresaba a la mina cuando aún no se construían los muros (26.797 m^3/día o 310,15 l/s).

Como se mencionó con anterioridad, además del flujo derivado hacia los niveles inferiores, se registró un aumento en el caudal de bombeo hacia la planta de tratamiento de aguas de la empresa minera, denominada Pedro Aguirre Cerda (PAC), a través del sistema de drenaje principal de la mina (Tabla 11). Desde noviembre de 2021 hasta julio de 2022, este sistema envió a la planta un caudal promedio de 16,3 l/s, mientras que, a partir del 30 de julio, la tasa de bombeo aumentó a 33,25 l/s. De esta forma se estima que desde la fecha del evento la planta PAC ha recibido un total de 531.486 m^3 de agua lo que representa un exceso de 271.617 m^3 de agua respecto a lo esperado en condiciones normales.

TABLA 11. TASA HISTÓRICA DE BOMBEO MEDIANTE EL SISTEMA DE DRENAJE PRINCIPAL DE LA MINA ALCAPARROSA.

Periodo		**Caudal promedio**		
Desde	**Hasta**	**m^3/mes**	**m^3/día**	**l/s**
01-11-2021	01-12-2021	44.375	1.479	17,1
01-12-2021	01-01-2022	44.693	1.442	16,7
01-01-2022	01-02-2022	41.271	1.331	15,4
01-02-2022	01-03-2022	42.113	1.504	17,4
01-03-2022	01-04-2022	42.440	1.369	15,8
01-04-2022	01-05-2022	41.663	1.389	16,1
01-05-2022	01-06-2022	39.917	1.288	14,9
01-06-2022	01-07-2022	43.069	1.436	16,6
Promedio preevento		**42.442,6**	**1.404,7**	**16,3**
Promedio posevento		**85.724**	**2.872,9**	**33,25**

A través de los antecedentes revisados y las estimaciones efectuadas con ellos, se determinó que, al 31 de enero de 2023, el volumen de agua que entró a la mina y fue acumulada en los niveles inferiores o se derivó a la planta PAC para su uso minero, es de aproximadamente 2.548.000 m^3 (el detalle de este volumen se muestra en la Tabla 12). Es importante señalar que, a pesar de la construcción de los muros, el caudal permanente de ingreso aumentó en 17 l/s, por lo que a diario siguen incorporándose 1.468 m^3/día a la mina.

TABLA 12. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN EXTRAÍDO DESDE EL ACUÍFERO A CAUSA DE LA SUBSIDENCIA.

Movimientos de agua	**Volumen (m^3)**
Agua derivada hacia el fondo de la mina entre 31/7/22 al 18/09/22 (premuros)	1.286.261
Agua derivada hacia el fondo de la mina entre 19/09/22 al 31/01/23 (posmuros)	132.615
Bombeo en exceso hacia PAC	271.617
Volumen inundado sector Gaby (cotas 200 a 410 m s.n.m.)	857.507
Total acumulado al 31 de enero de 2022	**2.548.000**

4.2 Monitoreo de calidad del agua

El monitoreo de calidad de agua consistió en el control de parámetros fisicoquímicos, hidrogeoquímicos e isotópicos llevados a cabo por Sernageomin, la Dirección General de Aguas (DGA, 2022) y la minera Ojos del Salado (ANAM, 2022). En este capítulo se presentan los resultados de dichos estudios y de los análisis llevados a cabo por este Servicio. El objetivo fue establecer la condición previa del acuífero y los efectos en la calidad del recurso, atribuibles al evento de subsidencia ocurrida en Alcaparrosa. La lista completa de resultados de laboratorio está en el anexo VIII.

Durante las visitas a terreno llevadas a cabo por este Servicio, se monitorearon parámetros fisicoquímicos *in situ* en 22 puntos de agua y se tomaron 13 muestras para realizar análisis de elementos mayores, menores, trazas especiales e isótopos de deuterio y oxígeno (Tabla 13). La mayor parte del monitoreo se llevó a cabo en los niveles 270 (IM270), 200 (IM200) del interior de la mina, en el nivel de acopio de agua en el fondo de la mina (IM60) y en los pozos en desuso presentes en el sector de Alcaparrosa (pozos 8 y 12). Adicionalmente, se extendió la toma de muestras hacia el sector Candelaria, un pozo de producción perteneciente a la Sociedad Minera Punta del Cobre S.A. (Pucobre) (pozo 8, en uso), un pozo de la Agrícola Copayapu, ubicado aguas abajo de Alcaparrosa y una muestra del río Copiapó en donde este mantiene cauce superficial. La razón para tomar una muestra desde un pozo en producción (pozo 8 Pucobre, en uso) es que esta representa la condición actual de la calidad del agua del acuífero. En la figura 21 se muestra un mapa de ubicación de los puntos de muestreo y en la 22 las fotografías de los puntos muestreados.

TABLA 13. DESCRIPCIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA.

Punto de monitoreo	Nombre de la muestra	Fecha	Este WGS 84 (m)	Norte WGS 84 (m)	Referencia
Candelaria	SOC-FF-06	01-09-2022	372.534	6.955.776	Este trabajo
	SOC-FF-07	01-09-2022	372.558	6.955.153	Este trabajo
	SOC-FF-08	01-09-2022	372.199	6.956.927	Este trabajo
	SOC-FF-09	01-09-2022	368.795	6.954.138	Este trabajo
HA01 pozo Alcaparrosa	P3	11-08-2022	374.391	6.961.861	DGA
	CMCO-1491	11-08-2022	374.391	6.961.861	CCMCO, 2022
IM135 nivel 135 interior de la mina	Xterrae Geología A-2	22-10-2015	374.055	6.962.264	Xterrae Geología, 2016
IM170 nivel 170 interior de la mina	VAI 3	01-08-2018	374.469	6.962.546	VAI Groundwater Solutions, 2020
IM200 nivel 200 interior de la mina	P2	11-08-2022	373.853	6.961.653	DGA
	Xterrae Geología A-1	22-10-2015	374.242	6.961.890	Xterrae Geología, 2016
	VAI 1	01-08-2018	374.440	6.962.016	VAI Groundwater Solutions, 2020
	SOC-FF-11	01-09-2022	373.853	6.961.653	Este trabajo
	CCMO-1492	11-08-2022	373.853	6.961.653	ANAM, 2022
	CCMO -1950	18-08-2022	373.853	6.961.653	ANAM, 2022
	CCMO -2573	25-08-2022	373.853	6.961.653	ANAM, 2022
	CCMO -2570	01-09-2022	373.853	6.961.653	ANAM, 2022
	CCMO -2960	08-09-2022	373.853	6.961.653	ANAM, 2022
	CCMO -2963	14-09-2022	373.853	6.961.653	ANAM, 2022
IM256 nivel 256 interior de la mina	VAI 5	01-08-2018	374.533	6.962.908	VAI, 2020
	SOC-FF-12	01-09-2022	374.115	6.962.095	Este trabajo
IM270 G12 nivel 270, caserón Gaby 12	SOC-FF-02	15-08-2022	374.313	6.961.673	Este trabajo
IM270 G4 nivel 270, caserón Gaby 4	SOC-FF-01	15-08-2022	374.260	6.961.641	Este trabajo
	P1	11-08-2022	374.260	6.961.641	DGA
	SOC-FF-13	01-09-2022	374.260	6.961.641	Este trabajo
	CCMO -1509	11-08-2022	374.260	6.961.641	ANAM, 2022
	CCMO -1951	18-08-2022	374.260	6.961.641	ANAM, 2022
	CCMO -2572	25-08-2022	374.260	6.961.641	ANAM, 2022
	CCMO -2569	01-09-2022	374.260	6.961.641	ANAM, 2022
IM300 nivel 300 interior de la mina	VAI 2	01-08-2018	374.376	6.961.952	VAI, 2020
IM60 niveles fondo de la mina	Xterrae Geología A-3	22-10-2015	373.815	6.962.167	Xterrae Geología, 2016
	Xterrae Geología A-4	22-10-2015	373.750	6.962.079	Xterrae Geología, 2016
	SOC-FF-03	15-08-2022	373.712	6.962.224	Este trabajo
	SOC-FF-05	27-08-2022	373.665	6.962.133	Este trabajo
	SOC-FF-10	01-09-2022	373.665	6.962.133	Este trabajo
	CCMO -2959	08-09-2022	373.712	6.962.224	ANAM, 2022
	CCMO -2962	14-09-2022	373.712	6.962.224	ANAM, 2022
P12 pozo Alcaparrosa	P4	11-08-2022	374.530	6.961.290	DGA
	CCMO -1490	11-08-2022	374.530	6.961.290	ANAM, 2022
	CCMO -1952	18-08-2022	374.530	6.961.290	ANAM, 2022
	SOC-CM-02	21-08-2022	374.530	6.961.290	Este trabajo
	CCMO -2571	25-08-2022	374.530	6.961.290	ANAM, 2022
	CCMO -2568	01-09-2022	374.530	6.961.290	ANAM, 2022
	CCMO -2958	08-09-2022	374.530	6.961.290	ANAM, 2022
	CCMO -2961	14-09-2022	374.530	6.961.290	ANAM, 2022
P14 pozo Alcaparrosa	Xterrae Geología A-6	22-10-2015	374.633	6.960.813	Xterrae Geología, 2016
Pozo 8 Pucobre	SOC-CM-03	21-08-2022	374.652	6.958.601	Este trabajo
Pozo Ag. Copayapu	SOC-CM-01	19-08-2022	374.838	6.962.270	Este trabajo
Río Copiapó	SOC-FF-04	18-08-2022	378.451	6.939.311	Este trabajo
Pozos Tierra Amarilla	CPO-RT-039	08-10-2009	386.971	6.924.971	Troncoso *et al.*, 2012
	CPM-JC-07	25-04-2018	370.829	6.968.552	Espinoza *et al*., 2021

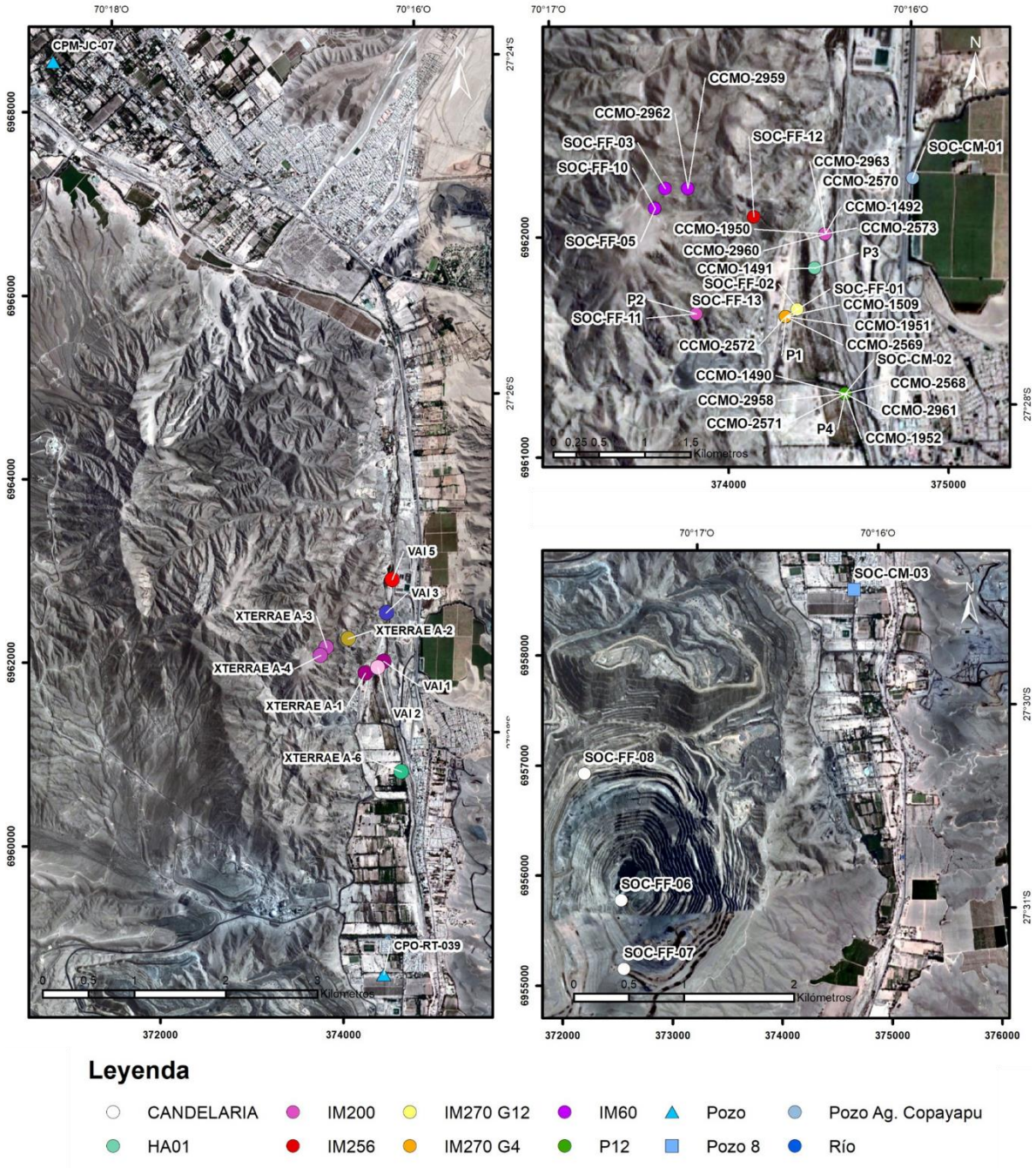


FIG. 21. Ubicación de los puntos de agua monitoreados durante la visita a terreno; el recuadro de arriba a la derecha muestra un acercamiento al sector de Alcaparrosa. Puntos en el interior de la mina fueron proyectados en la superficie.

FIG. 22. Fotos de puntos de muestreo de aguas superficiales y subterráneas.

También se colaboró con la Dirección General de Aguas durante el monitoreo de calidad de aguas y en la comparación con la norma de agua potable Nch 409 en muestras de la mina. Se recolectaron parámetros de pH y conductividad eléctrica y posteriormente se solicitó, mediante oficio a dicha institución, los resultados de laboratorio. Es importante destacar que

la DGA solo analiza los elementos que se encuentran normados, lo que no incluye los elementos mayores, como sí lo hace Sernageomin en su laboratorio. Dado que la batería de elementos mayores de la norma es limitada, y no incluye el bicarbonato, es que los resultados de los análisis entregados por la DGA solo permitieron tener información de las trazas y de algunos elementos mayores para las muestras del 11 de agosto en los niveles 270 y 200 de la mina y en los pozos 8 y HA-01.

En un perfil esquemático (Fig. 23) se presenta la ubicación donde fueron colectadas las muestras al interior de la mina. Ellas se tomaron en los niveles 270, 200 y en los niveles inferiores 80 y 60, ya que en estos afloraba una cantidad considerable de agua. Por otra parte, se tomaron muestras en filtraciones de estructuras que representarían un tipo de flujo diferente al de los niveles inundados (*e.g.,* SOC-FF-02 en IM270 G12).

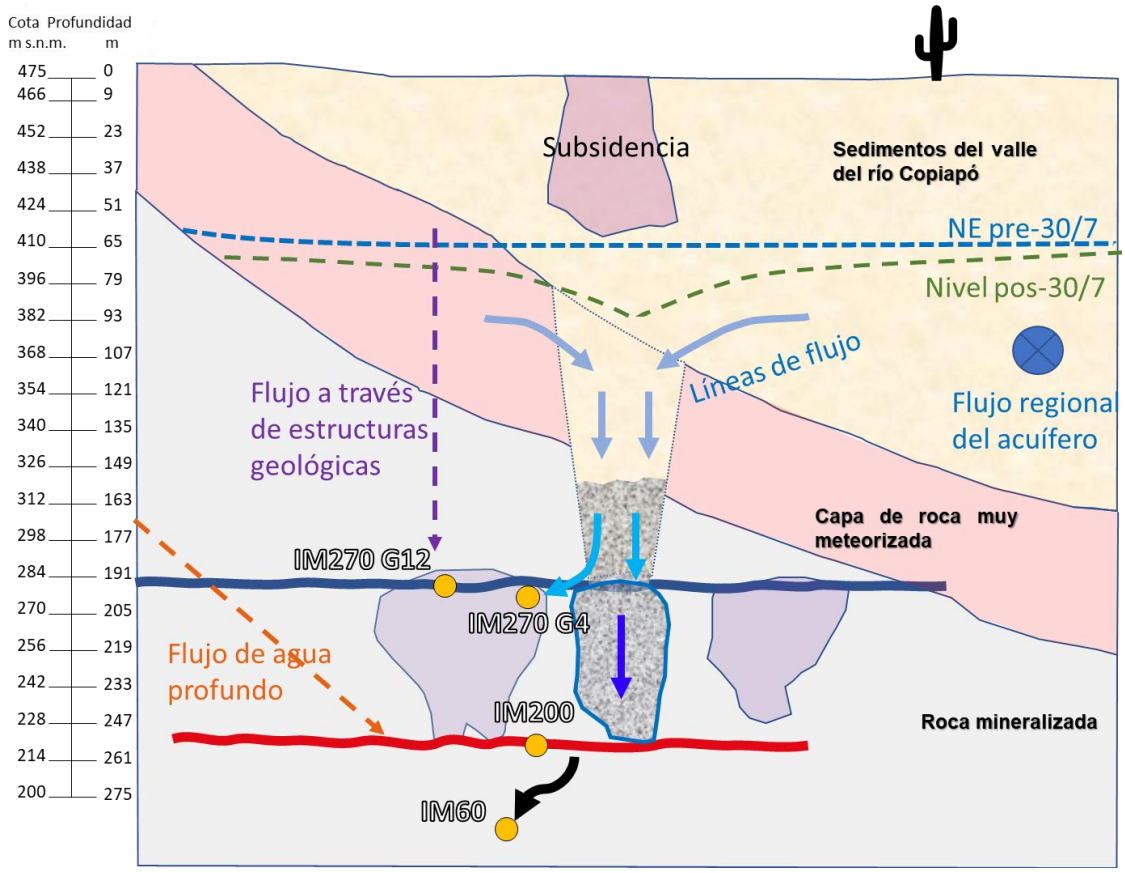


FIG. 23. Ubicación de puntos de monitoreo al interior de la mina. Los puntos fueron nombrados IM, seguidos del nivel que representan (*e.g.*, IM200, corresponde a la muestra al interior de la mina del nivel 200).

4.2.1 Resultados del análisis de los parámetros fisicoquímicos

El objetivo del estudio del pH y de la conductividad eléctrica del agua (CE) fue determinar las condiciones ambientales específicas en los sectores monitoreados. Particularmente, estos parámetros aportan información indirecta sobre la concentración de iones (sólidos disueltos) y sobre la acidez del agua en un punto y momento determinado. Al extender este monitoreo en distintos niveles al interior de la mina y repetirlos en el tiempo fue posible establecer tendencias que indican modificaciones en la calidad del recurso hídrico. Las muestras analizadas en el presente capítulo se encuentran en la tabla 14.

TABLA 14. VALORES DE CE Y pH EN PUNTOS DE MONITOREO Y EN MUESTRAS ASOCIADAS.

Punto de monitoreo	Código de muestra	Fecha	pH	CE	Referencia
HA01	CMCO-1491	11-08-2022	7,6	708	ANAM, 2022
Pozo Alcaparrosa	P3	11-08-2022	7,53	785	DGA, 2022
IM200 Nivel 200 interior de la mina	P2	11-08-2022	7,83	2.507	DGA, 2022
	CMCO-1492	11-08-2022	7,78	2.458	ANAM, 2022
	CMCO-1950	18-08-2022	7,9	2.444	ANAM, 2022
	CMCO-2573	25-08-2022	7,37	2.302	ANAM, 2022
	CMCO-2570	01-09-2022	7,84	2.333	ANAM, 2022
	SOC-FF-11	01-09-2022	7,79	2.305	Este trabajo
	CMCO-2960	08-09-2022	7,61	1.151	ANAM, 2022
	CMCO-2963	14-09-2022	7,68	1.937	ANAM, 2022
Interior de la mina	SOC-FF-12	01-09-2022	7,81	2.133	Este trabajo
IM270 G12 nivel 270 caserón Gaby 12	SOC-FF-02	15-08-2022	7,2	2.877	Este trabajo
IM270 G4 Nivel 270 caserón Gaby 4	CMCO-1509	11-08-2022	7,8	1.236	ANAM, 2022
	P1	11-08-2022	7,81	2.350	DGA, 2022
	SOC-FF-01	15-08-2022	7,8	2.637	Este trabajo
	CMCO-1951	18-08-2022	7,83	2.277	ANAM, 2022
	CMCO-2572	25-08-2022	7,83	2.149	ANAM, 2022
	CMCO-2569	01-09-2022	7,67	2.181	ANAM, 2022
	SOC-FF-13	01-09-2022	7,66	2.158	Este trabajo
IM60 Acopio de agua en el fondo de la mina	SOC-FF-03	15-08-2022	7,1	3.289	Este trabajo
	SOC-FF-05	27-08-2022	6,91	3.316	Este trabajo
	SOC-FF-10	01-09-2022	6,18	3.851	Este trabajo
	CMCO-2959	08-09-2022	6,61	2.970	ANAM, 2022
	CMCO-2962	14-09-2022	6,8	2.584	ANAM, 2022
P12 Pozo Alcaparrosa	CMCO-1490	11-08-2022	7,3	1.275	ANAM, 2022
	P4	11-08-2022	7,24	1.512	DGA, 2022
	CMCO-1952	18-08-2022	7,22	437	ANAM, 2022
	SOC-CM-02	21-08-2022	6,65	1.333	Este trabajo
	CMCO-2571	25-08-2022	7,28	1.496	ANAM, 2022
	CMCO-2568	01-09-2022	7,52	1.495	ANAM, 2022
	CMCO-2958	08-09-2022	7,03	1.470	ANAM, 2022
	CMCO-2961	14-09-2022	7,08	1.275	ANAM, 2022
Pozo 8 en uso	SOC-CM-03	21-08-2022	6,7	2.402	Este trabajo
Pozo (agrícola Copayapu)	SOC-CM-01	19-08-2022	7,27	1.088	Este trabajo

Para representar la distribución de los parámetros de pH y CE en los distintos niveles de la mina y en diferentes instantes de tiempo se generaron figuras que muestran estas variables diferenciadas por color y tamaño respectivamente (Fig. 24). Estas figuras tienen una escala de color que varía entre el amarillo y el calipso a medida que aumenta el pH y un tamaño mayor según aumenta su conductividad eléctrica (Fig. 24). De esta forma es posible visualizar de mejor manera cómo evolucionaron los parámetros fisicoquímicos en los diferentes puntos de monitoreo a medida transcurre el tiempo.

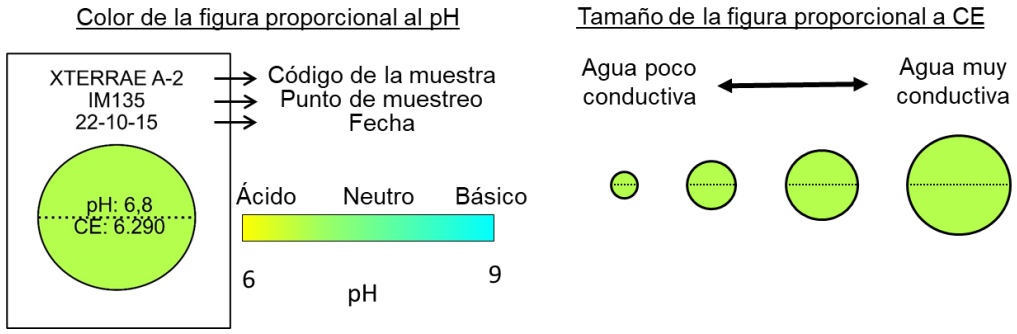


FIG. 24. Esquema de representación de parámetros fisicoquímicos para las muestras de agua.

Para el análisis de la evolución de la CE y el pH al interior de la mina (Fig. 25), además de las muestras tomadas en este trabajo, también se consideraron mediciones anteriores publicadas en otros estudios.

Previo al evento de subsidencia, las aguas que afloraban al interior de la mina mostraban diferencias marcadas entre los niveles superiores (IM 300, 270 y 200) respecto a las condiciones de CE y pH de los niveles inferiores de la mina (IM60). Los primeros mostraban condiciones similares a las del agua del acuífero mientras que el agua en los niveles inferiores (IM60) evidenció una alta CE y un pH básico (Fig. 25). Después de ocurrida la subsidencia, se observa en la CE una tendencia a aumentar con la profundidad y el tiempo. Por otra parte, posterior al evento, el pH del agua disminuye de forma sistemática, lo que indica acidificación en los niveles profundos, posiblemente originada por oxidación en etapas tempranas de drenaje ácido (Fig. 25).

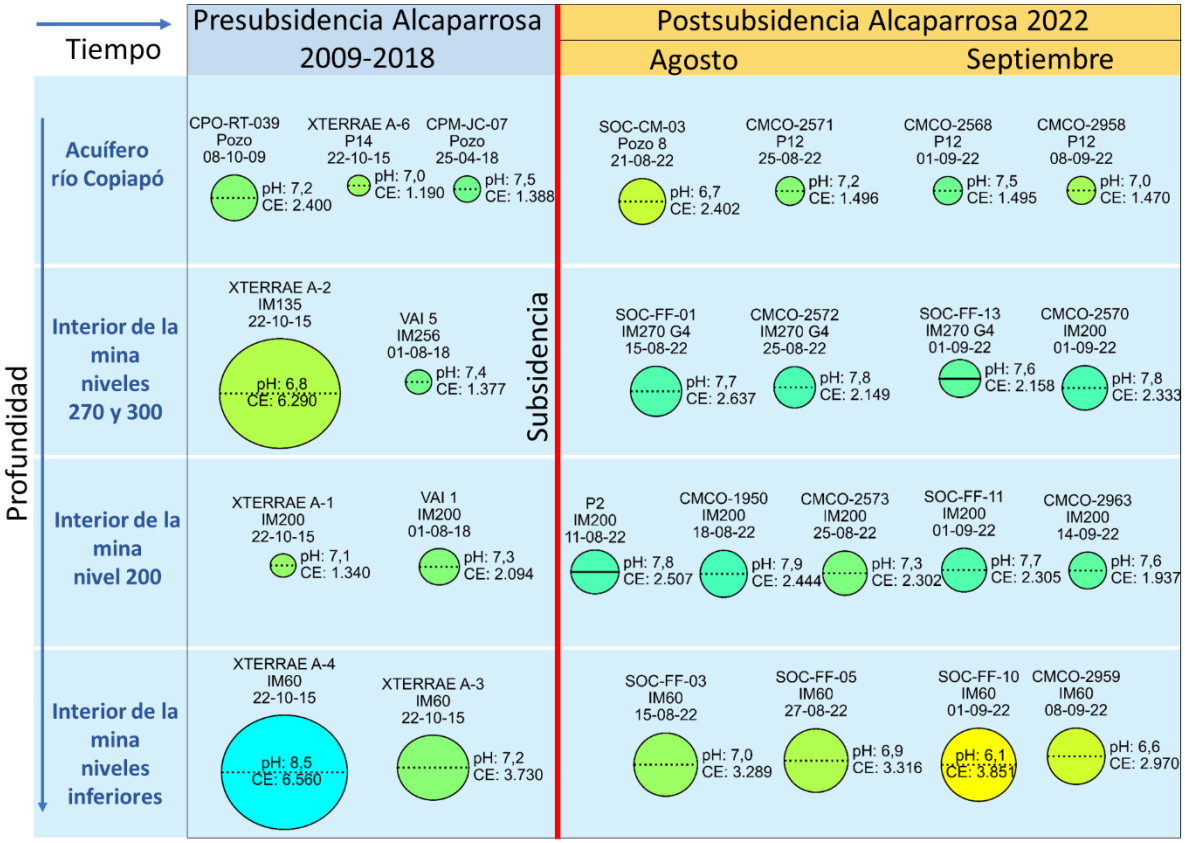


FIG. 25. Diagrama de distribución espacial y evolución temporal de las condiciones de CE (µS/cm) y pH al interior de la mina.

Si bien el análisis de los parámetros fisicoquímicos permite una caracterización puntual de las condiciones fisicoquímicas del agua, de manera complementaria, para determinar el origen del agua e identificar los procesos que explican las variaciones de pH y conductividad eléctrica, se realizó un estudio isotópico de $\delta^{18}O$ (oxígeno 18) y $\delta^{2}H$ (deuterio) en el agua.

4.2.2 Resultados de los análisis isotópicos

El estudio isotópico de las aguas del sector Alcaparrosa consideró tanto el análisis de oxígeno 18 y deuterio en muestras levantadas por la unidad de Hidrogeología de Sernageomin como resultados independientes obtenidos por la compañía minera Ojos del Salado. Además, para establecer las características isotópicas previas de las aguas al interior de la mina se incluyeron los resultados de estudios efectuados con anterioridad a los antes señalados. Las muestras analizadas en este capítulo se presentan en la tabla 15.

TABLA 15. RESULTADOS ISOTÓPICOS DE MUESTRAS DEL SECTOR ALCAPARROSA.

Punto de monitoreo	Muestra	Fecha	$d^{18}O$	$d^{2}H$	Exceso dH^2	Referencia
Candelaria sector rajo	SOC-FF-06	01-09-2022	-2,95	-34,44	-10,84	Este trabajo
	SOC-FF-08	01-09-2022	-3,39	-34,2	-7,08	Este trabajo
	SOC-FF-09	01-09-2022	-0,76	-15,3	-9,22	Este trabajo
Interior de la mina	Xterrae Geología A-2	22-10-2015	-10,02	-77,4	2,76	Xterrae Geología, 2016
IM200	Xterrae Geología A-1	22-10-2015	-10,85	-82,6	4,2	Xterrae Geología, 2016
	CCMO-1950	18-08-2022	-9,67	-76	1,36	ANAM, 2022
	CCMO-2573	25-08-2022	-9,71	-76,3	1,38	ANAM, 2022
	SOC-FF-11	01-09-2022	-10,19	-78,2	3,32	Este trabajo
	CCMO-2570	01-09-2022	-9,63	-76,1	0,94	ANAM, 2022
	CCMO-2960	08-09-2022	-9,71	-76,7	0,98	ANAM, 2022
IM270 G12	SOC-FF-02	15-08-2022	-10,11	-79,6	1,28	Este trabajo
IM270 G4	SOC-FF-01	15-08-2022	-10,24	-78,92	3	Este trabajo
	CCMO-1951	18-08-2022	-9,89	-77,2	1,92	ANAM, 2022
	CCMO-2572	25-08-2022	-9,96	-77,6	2,08	ANAM, 2022
	SOC-FF-13	01-09-2022	-10,28	-80	2,24	Este trabajo
	CCMO-2569	01-09-2022	-9,79	-77	1,32	ANAM, 2022
IM60	Xterrae Geología A-3	22-10-2015	-7,74	-63,6	-1,68	Xterrae Geología, 2016
	Xterrae Geología A-4	22-10-2015	-6,69	-57,6	-4,08	Xterrae Geología, 2016
	SOC-FF-03	15-08-2022	-9,93	-77,9	1,54	Este trabajo
	SOC-FF-10	01-09-2022	-9,87	-76,1	2,86	Este trabajo
	CCMO-2959	08-09-2022	-9,54	-75,6	0,72	ANAM, 2022
P12 Alcaparrosa	CCMO-1952	18-08-2022	-7,1	-55	1,8	ANAM, 2022
	SOC-CM-02	21-08-2022	-7,42	-57,5	1,86	Este trabajo
	CCMO-2571	25-08-2022	-7,12	-55,9	1,06	ANAM, 2022
	CCMO-2568	01-09-2022	-6,99	-54,8	1,12	ANAM, 2022
	CCMO-2958	08-09-2022	-6,99	-55,5	0,42	ANAM, 2022
P14 Alcaparrosa	Xterrae Geología A-6	22-10-2015	-10,2	-77,6	4	Xterrae Geología, 2016
Pozos Tierra Amarilla	CPO-RT-039	08-10-2009	-10,36	-79,3	3,58	Troncoso *et al*., 2012
	CPM-JC-07	25-04-2018	-9,31	-75,1	-0,62	Espinoza *et al.,* 2021
	SOC-CM-01	19-08-2022	-10,38	-77,81	5,23	Este trabajo
Pozo 8 en uso	SOC-CM-03	21-08-2022	-10,55	-83,4	1	Este trabajo

Se identificaron dos tipos de agua en el sistema hidrogeológico, las que representan los miembros extremos de una línea de mezcla: las muestras isotópicamente más pesadas y evaporadas, son el grupo de circulación profunda; mientras que las del acuífero del río Copiapó presentan una isotopía mucho más liviana y menos evaporada. Las muestras con isotopías intermedias corresponden a diferentes grados de mezcla entre los dos tipos de agua definidos (Fig. 26).

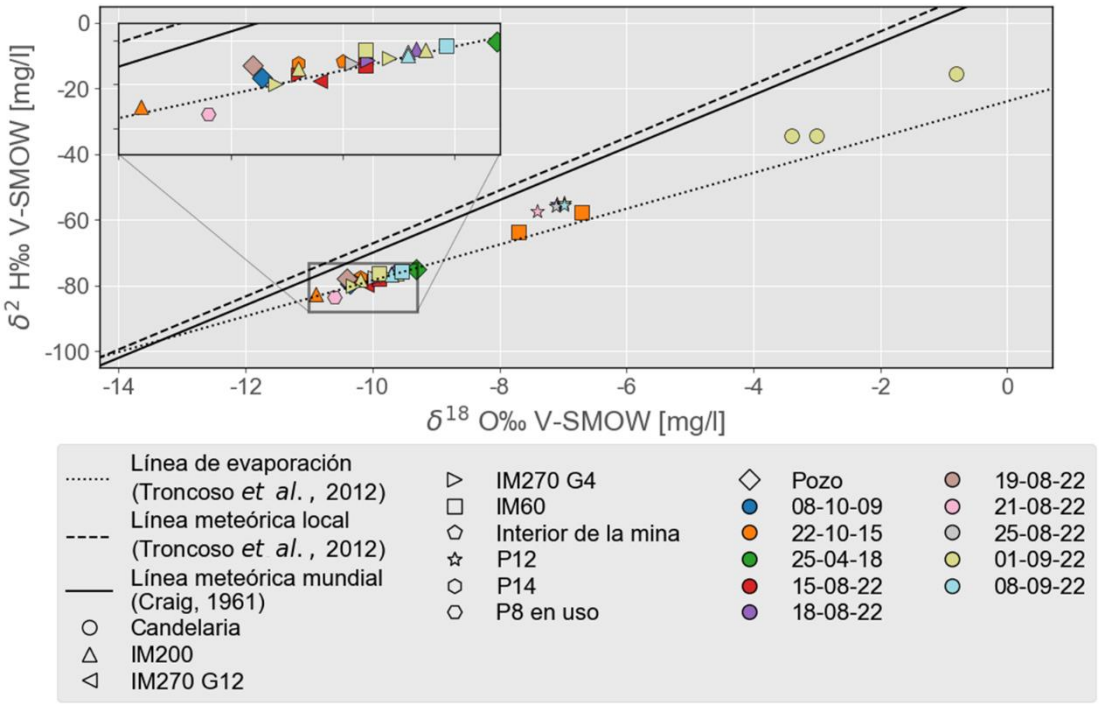


FIG. 26. Variación del contenido de $\delta^{18}O$ y $\delta^{2}H$ en muestras de agua obtenidas en el sector Alcaparrosa.

Para representar la distribución del oxígeno 18, del deuterio y del exceso de deuterio en los distintos niveles de la mina y en diferentes instantes de tiempo se generaron figuras que muestran estas variables en una escala de color y tamaño respectivamente (Fig. 27). A medida que aumenta la evaporación (*i.e.*, cuando aumenta el exceso de deuterio) el color de las figuras varía entre el negro y el azul. El tamaño de estas representa la composición isotópica: mayor cuando la muestra es isotópicamente más pesada (Fig. 27). La forma de las elipses viene dada por la relación entre el contenido de oxígeno 18 y del deuterio de todas las muestras.

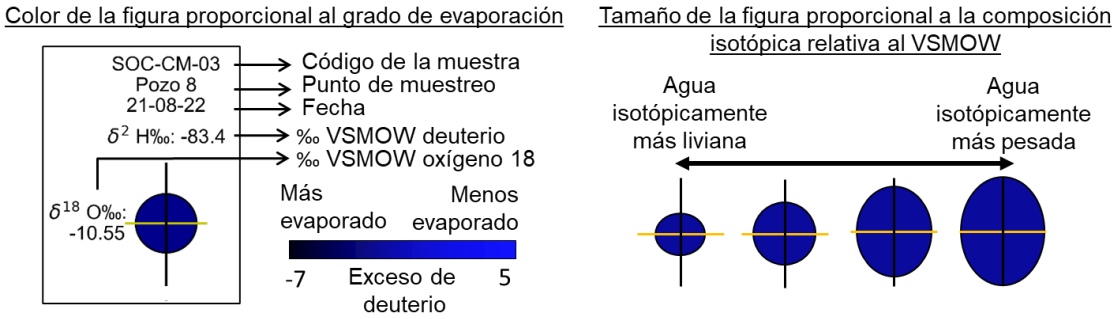


FIG. 27. Esquema de representación de valores isotópicos para las muestras de agua.

Previo al evento, las aguas que afloraban en los niveles intermedios de la mina (IM300 al IM200) correspondían a aquellas provenientes desde el acuífero que se infiltraba a través de estructuras geológicas hasta alcanzar las galerías (Fig. 28). Por otro lado, la isotopía del agua de los niveles inferiores (IM40 e IM60) mostraba un origen predominante de aguas alumbradas al interior de la mina. Luego del evento de subsidencia, se observa que en todos los niveles el agua evidenció una huella isotópica similar a la del acuífero con una mínima mezcla con aguas de circulación profunda. Lo anterior confirma que el agua de los niveles IM270, IM200, IM60 e IM80 corresponde a aguas provenientes del acuífero del río Copiapó.

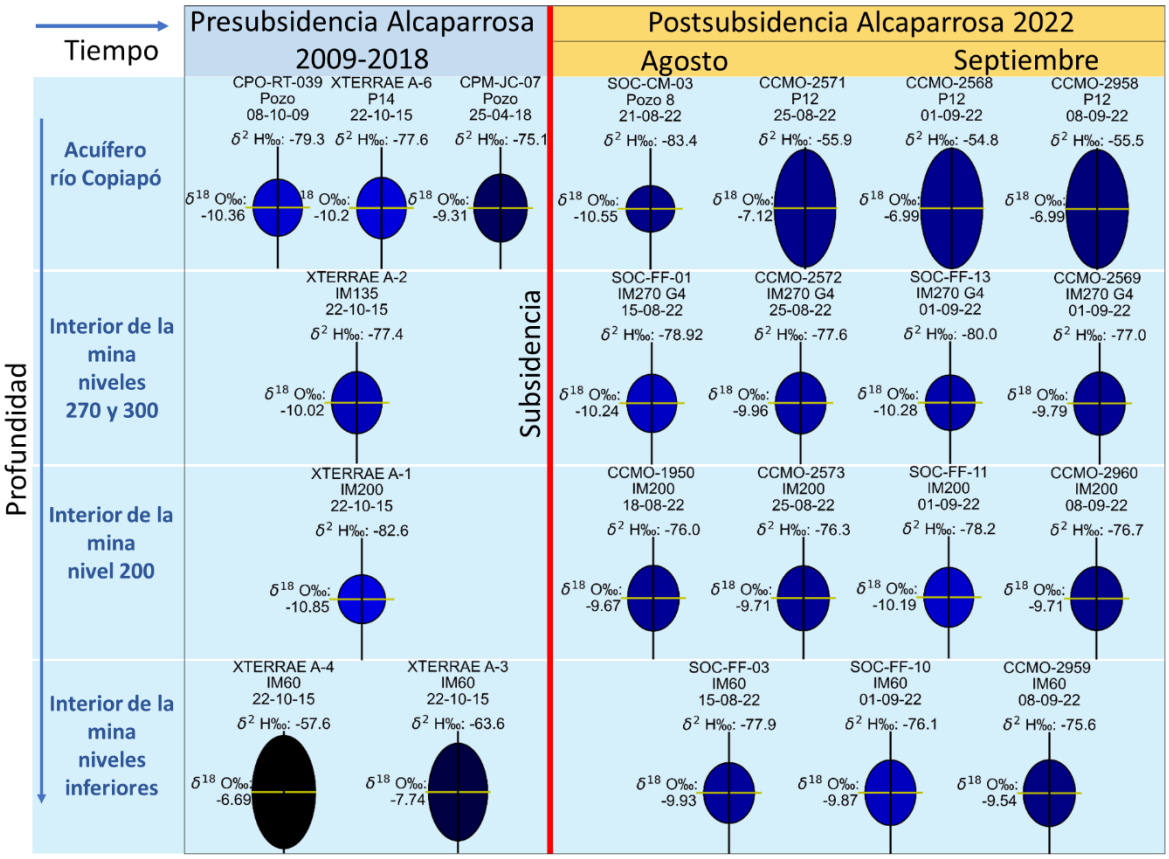


FIG. 28. Diagrama de distribución espacial y temporal de la isotopía del interior de la mina. Los resultados de los isótopos se muestran en la tabla 2 del anexo VIII.

Dado que los isótopos de oxígeno y deuterio permiten determinar un origen común del agua en los distintos niveles monitoreados, es posible establecer que las diferencias en los parámetros de CE y pH se deben a que existen procesos hidrogeoquímicos que afectan la calidad de las aguas durante su trayecto desde el acuífero hacia los niveles inferiores. Al considerar las razones de mezcla isotópicas fue posible precisar que las muestras de los niveles inferiores se componen de un 85% de aguas del acuífero del río Copiapó y un 15% de aguas alumbradas al interior de la mina.

4.2.3 Resultados de los análisis hidrogeoquímicos

El estudio hidrogeoquímico de elementos mayores y menores tiene por objetivo identificar los posibles procesos que ocurren durante el trayecto del agua subterránea y cuantificar el efecto de ellos sobre su calidad. A partir de los resultados de geoquímica de elementos

mayores en las aguas del sector de Alcaparrosa, fue posible establecer el impacto que la subsidencia generó en la composición de estas en los distintos niveles al interior de la mina.

Como se mencionó anteriormente, las muestras analizadas corresponden a aquellas levantadas por Sernageomin en las campañas 2018 y 2022, muestras de la DGA, 2022 levantadas durante el proceso fiscalizador, otras tomadas por la empresa ANAM, 2022 y datos históricos presentados durante los distintos procesos de evaluación ambiental (Xterrae Geología, 2016 y VAI, 2020). En la figura 29 se observa el resultado del balance iónico de algunas de las muestras según la fuente de la información. Solo una de ellas arrojó un error de balance superior al 10% (VAI 3, IM175). Cabe destacar que no fue posible obtener el error de balance de los análisis llevados a cabo por la DGA y por la empresa CCMO a partir del 25 de agosto de 2022, debido a que no presentan concentración de ion cloruro. La tabla 16 resume los resultados en relación con las muestras entregadas en la figura 29.

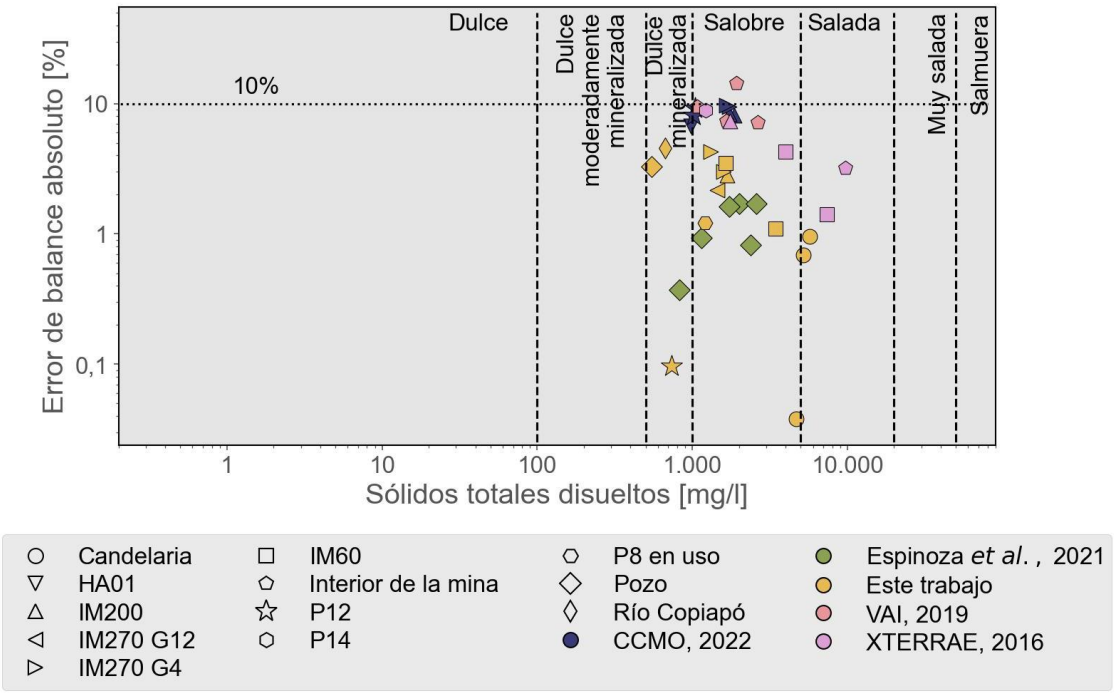


FIG. 29. Validación de los resultados del balance iónico en muestras de Alcaparrosa.

TABLA 16. RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE ELEMENTOS MAYORES EN MUESTRAS DE ALCAPARROSA.

Punto de monitoreo	Muestra	Fecha	Salinidad*	Parámetro [mg/l]								
				TDS	Na	K	Mg	Ca	Cl	SO_4	HCO_3	CO_3
Candelaria	SOC-FF-06	01-09-2022	Salada	5.692,0	1.040,0	85,0	50,0	775,0	1.447,0	2.189,3	47,0	-
	SOC-FF-08	01-09-2022	Salobre	4.675,0	1.030,0	45,0	50,0	435,0	904,0	2.150,4	58,0	-
	SOC-FF-09	01-09-2022	Salada	5.189,0	815,0	190,0	10,0	775,0	1.082,9	2.269,6	11,0	4,9
HA01	CCMO-1491	11-08-2022	Dulce mineralizada	980,0	103,7	4,3	40,7	82,0	129,8	405,8	102,9	-
Interior de la mina	XTERRAE A-2	22-10-2015	Salada	9.704,0	1.119,0	6,1	15,8	1.232,0	2.566,6	2.192,1	61,1	-
	VAI 3	01-08-2018	Salobre	1.924,0	306,1	7,6	38,8	406,2	218,3	886,0	181,7	-
	VAI 5	01-08-2018	Salobre	1.076,0	136,9	6,1	40,7	197,1	85,9	498,0	189,4	-
	VAI 2	01-08-2018	Salobre	2.632,0	236,8	9,6	113,2	466,6	392,6	1.052,0	197,1	-
IM200	XTERRAE A-1	22-10-2015	Salobre	1.754,0	151,0	6,7	69,3	272,5	281,1	895,8	218,5	-
	VAI 1	01-08-2018	Salobre	1.668,0	174,0	7,5	73,3	305,8	200,9	729,0	243,2	-
	CCMO-1492	11-08-2022	Salobre	1.856,0	160,3	9,7	66,1	244,9	249,3	885,3	206,9	-
	CCMO-1950	18-08-2022	Salobre	1.734,0	150,4	8,5	62,5	230,2	222,9	832,4	222,6	-
	SOC-FF-11	01-09-2022	Salobre	1.681,0	157,5	9,6	70,0	302,5	199,4	820,1	208,6	-
IM270 G12	SOC-FF-02	15-08-2022	Salobre	1.439,0	156,0	8,8	75,0	340,0	295,5	900,5	101,4	-
IM270 G4	CCMO-1509	11-08-2022	Salobre	1.736,0	141,2	6,7	61,1	226,6	236,9	795,5	234,7	-
	SOC-FF-01	15-08-2022	Salobre	1.297,0	146,3	7,7	80,0	290,0	212,6	815,2	124,3	-
	CCMO-1951	18-08-2022	Salobre	1.656,0	136,6	6,2	58,6	207,3	197,5	768,0	245,6	-
	SOC-FF-13	01-09-2022	Salobre	1.590,0	147,5	6,9	70,0	287,5	185,2	766,9	227,3	-
IM60	XTERRAE A-4	22-10-2015	Salada	7.402,0	947,1	3,2	1,0	946,4	1.987,6	1.675,7	9,1	-
	XTERRAE A-3	22-10-2015	Salobre	4.004,0	593,3	12,0	113,0	743,0	744,7	2.066,8	153,2	-
	SOC-FF-03	15-08-2022	Salobre	1.644,0	172,8	11,8	87,5	457,5	253,6	1.270,7	74,7	-
	SOC-FF-10	01-09-2022	Salobre	3.433,0	212,5	13,0	122,5	680,0	299,9	2.021,9	63,5	-
P12	CCMO-1490	11-08-2022	Salobre	1.038,0	88,8	3,6	40,2	145,6	132,7	491,3	214,2	-
	CCMO-1952	18-08-2022	Salobre	1.016,0	82,5	3,5	36,9	135,8	125,6	434,2	202,1	-
Pozos Tierra Amarilla	CPO-RT-039	08-10-2009	Salobre	1.776,7	170,0	5,8	82,5	290,0	295,0	799,0	225,0	-
	XTERRAE A-6	22-10-2015	Salobre	1.224,0	102,8	3,9	52,4	171,7	115,0	654,0	241,4	-
	SOC-CM-01	19-08-2022	Dulce mineralizada	544,0	93,0	4,5	45,0	103,0	111,8	481,1	42,0	-
	SOC-CM-02	21-08-2022	Dulce mineralizada	737,0	92,5	4,4	45,0	175,0	134,6	461,7	188,0	-
	CPM-JC-07	25-04-2018	Salobre	1.143,0	75,0	1,8	25,0	243,0	119,0	649,0	55,0	-
Pozo 8	SOC-CM-03	21-08-2022	Salobre	1.204,0	132,5	5,3	45,0	255,0	210,3	628,9	215,0	-
Río Copiapó	SOC-FF-04	18-08-2022	Dulce mineralizada	665,0	90,0	4,1	67,5	187,0	87,7	555,0	169,0	6,7

*La clasificación de salinidad se realizó a partir de la metodología propuesta en el Manual de procedimientos para la elaboración de estudios y mapas hidrogeológicos (Espinoza *et al*., 2021).

El análisis de cationes y aniones mayoritarios mediante el diagrama de Piper (Fig. 30) permitió clasificar las muestras tanto de antes como de después del evento como sulfatado-cálcicas. Sin embargo, se observa que previo a la subsidencia el agua de los niveles intermedios (IM135, IM170) presentaba relativamente menores contenidos de magnesio y carbonatos que la muestra del nivel 270 a la salida del caserón Gaby 4, y mostraba una similitud con las muestras de circulación profunda (IM60 preevento) y con la muestra IM270 G12 obtenida desde agua alumbrada de una fractura (Fig. 30). Luego del evento de subsidencia, las aguas afloradas a la salida del caserón Gaby 4 mostraron mayor contenido de magnesio, carbonatos y sulfatos, y evidenciaron gran afinidad con las muestras obtenidas desde los pozos ubicados en el acuífero del río Copiapó, lo que es congruente con los resultados isotópicos y con una procedencia directa desde el acuífero (Fig. 30).

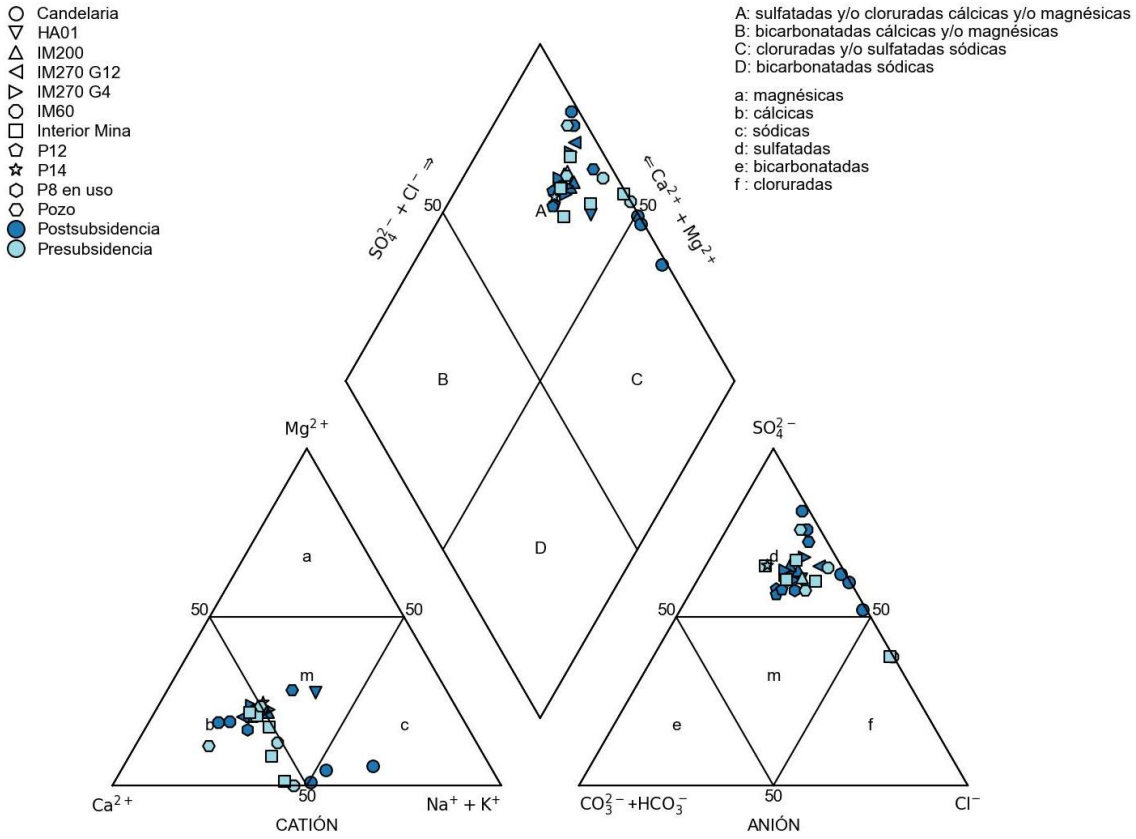


FIG. 30. Diagrama de Piper de muestras de Alcaparrosa, preevento y postsubsidencia. Los puntos de muestreo se representan por figuras, mientras que la temporalidad respecto al evento está indicada por los colores.

Respecto a los niveles inferiores de la mina (IM60) se observa un fuerte contraste hidroquímico preevento y posevento, con una evolución hacia el extremo sulfatado-cálcico del diagrama. Considerando la evidencia isotópica de mezclas entre aguas de circulación profunda y las del acuífero para las muestras de los niveles profundos, es posible determinar que el enriquecimiento en dichos iones se debe a procesos posteriores a la mezcla de estas aguas.

De la misma manera que para la isotopía, se confeccionaron diagramas *Stiff* para ilustrar la variación del contenido iónico del agua preevento y posevento en los distintos niveles de la mina. En la figura 31 se entrega la leyenda de los diagramas y la escala de colores y tamaños utilizada; la forma de este esquema representa la concentración comparativa entre los diferentes aniones y cationes, por lo que mientras mayor sea la concentración de sólidos disueltos mayor es el tamaño de la figura. Además, el cambio de color (pasar de amarillo a naranjo) también involucra un aumento en la concentración, por lo que un diagrama naranjo mostrará siempre concentraciones mayores que uno amarillo, independiente de los tamaños de las figuras.

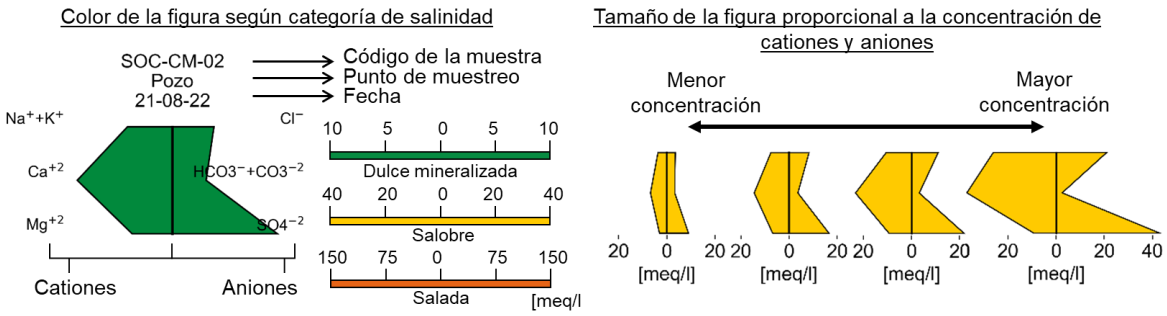


FIG. 31. Esquema de representación de salinidad y composición de elementos mayores para las muestras de agua.

En la figura 32 se presentan los diagramas *Stiff* de las aguas del acuífero del río Copiapó y de los distintos niveles del interior de la mina durante los periodos anteriores a la subsidencia y posteriores a ella. Del análisis de la figura se desprende que previo al evento, las aguas de los niveles intermedios de la mina (IM300 e IM270) y de los niveles inferiores (IM40), eran más salinas y presentaban diferentes proporciones en las concentraciones de sodio, potasio y cloruro. Esto se ve representado en la figura por una variación tanto en el color del diagrama como en su forma. Sin embargo, las aguas del nivel 200 de la mina (IM200) eran de salinidad y composición similar a las aguas del acuífero. Esto sugiere que previo a la subsidencia el agua aflorada al interior de la mina provenía de al menos dos fuentes diferentes.

A partir de agosto de 2022 fue posible observar una homogeneización en la composición química de las aguas al interior de la mina y un aumento de la salinidad en la profundidad. El agua aflorada postsubsidencia en los niveles 270 y 300 tendió a disminuir su salinidad respecto a la situación presubsidencia. Por otra parte, postsubsidencia aumentó el grado de salinización del agua con la profundidad de los niveles muestreados, y se destaca una mayor concentración de calcio y sulfato.

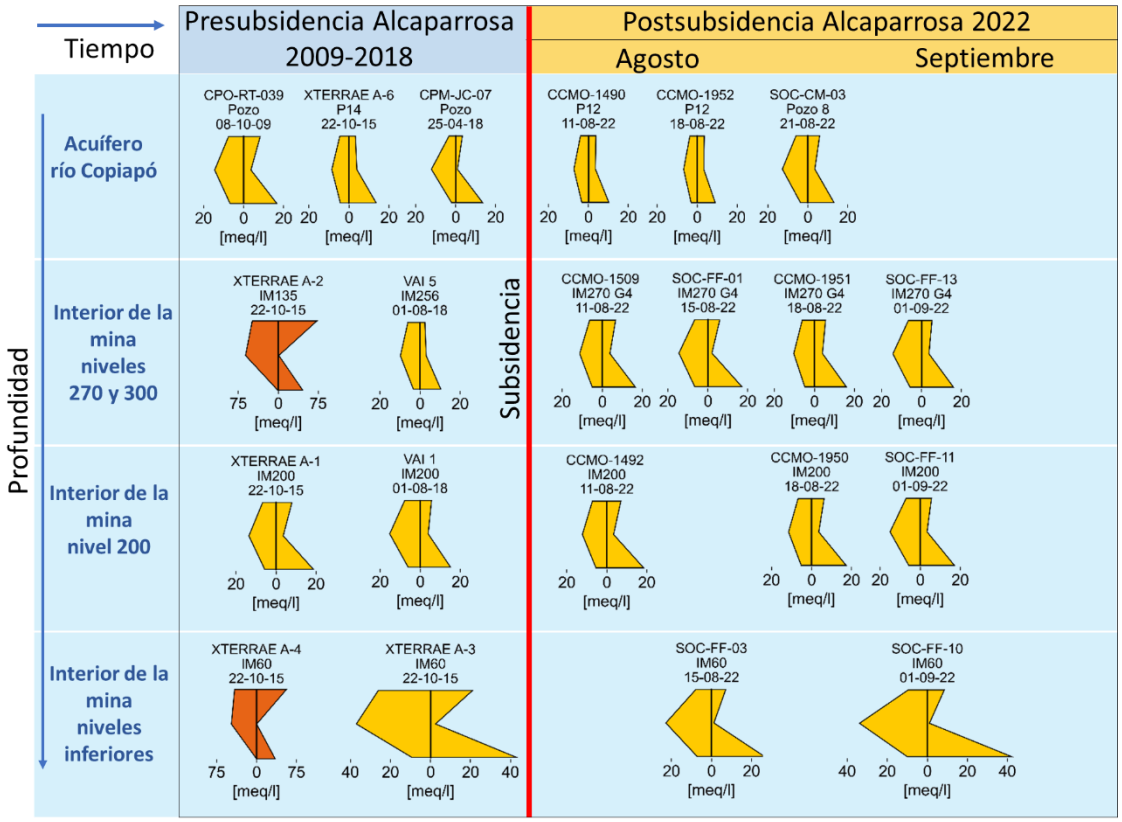


FIG. 32. Diagrama de distribución espacial y temporal de la hidroquímica al interior de la mina.

Para determinar de forma más precisa el proceso que produce la salinización posevento se comparó la concentración de diferentes pares aniónicos con algunos índices hidrogeoquímicos. La comparación entre el índice hidrogeoquímico sulfato-cloruro con el contenido total de cloruro permite identificar si existe una relación entre las muestras de alta salinidad en el sector del rajo Candelaria (representativas de aguas de circulación profunda) con las aguas afloradas al interior de la mina Alcaparrosa producto de la subsidencia. Si la salinización progresiva del agua al interior de la mina fuese resultado de una mezcla de aguas, estas deberían presentar una trayectoria definida entre dos puntos extremos, que en este caso corresponderían al agua del acuífero antes de entrar a la mina y aguas de circulación

profunda. Sin embargo, al graficar el índice en relación con el contenido de cloruro (Fig. 33) se observa que las muestra al interior de la mina (IM60) aumentan progresivamente tanto el contenido de cloruro como el índice sulfato-cloruro, lo que sugiere que existe una fuente de sulfato adicional a la mezcla que se produce con las aguas de circulación profunda.

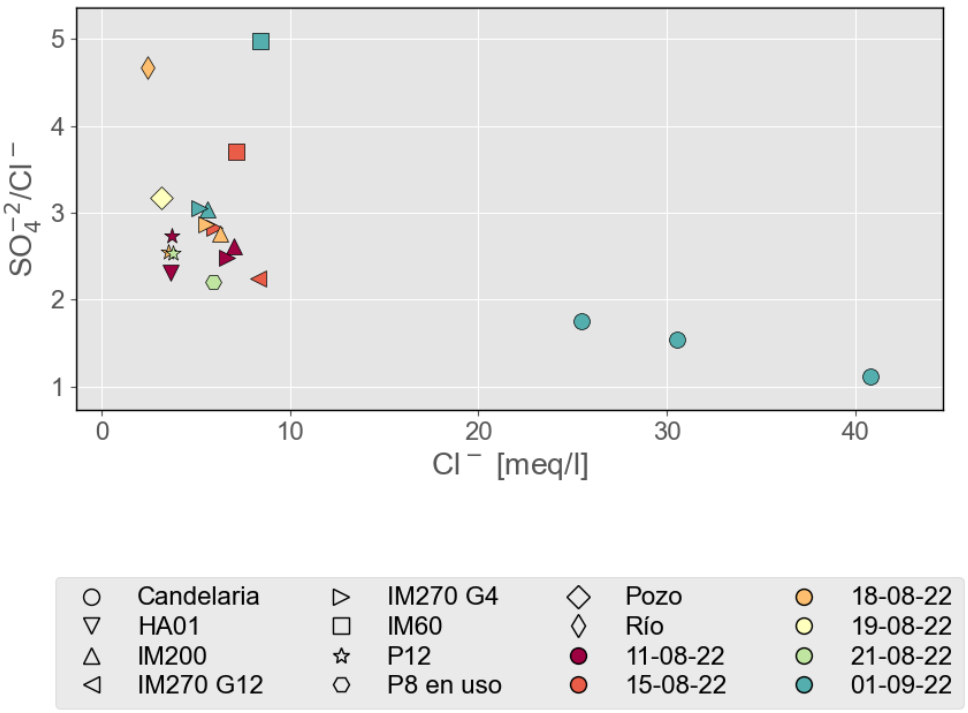


FIG. 33. Comparación de concentraciones de cloruro con la razón de sulfato/cloruro.

Considerando un origen común de las aguas afloradas al interior mina con el de las aguas del acuífero, es posible determinar si la fuente principal de la salinización es por disolución de rocas sulfatadas mediante la comparación de las concentraciones de calcio y sulfato en unidades equivalentes. Para esto se graficaron los contenidos de calcio y magnesio versus el de sulfato (Fig. 34): dado que la razón estequiométrica de Ca y SO_4 en el yeso es 1 y que ambos iones son bivalentes, es esperable que los iones provenientes de la disolución de este mineral caigan en una recta 1:1 en el gráfico. Esto se observa en todas las muestras, incluidas las de Candelaria (Fig. 34), por lo que se puede atribuir la mayor parte de la fuente de sulfato a la disolución de yeso en todas ellas.

A diferencia de lo anterior, las muestras de Candelaria presentan una tendencia a la baja de magnesio con el sulfato, lo que podría indicar una mineralogía diferente entre los sulfatos de Alcaparrosa y Candelaria.

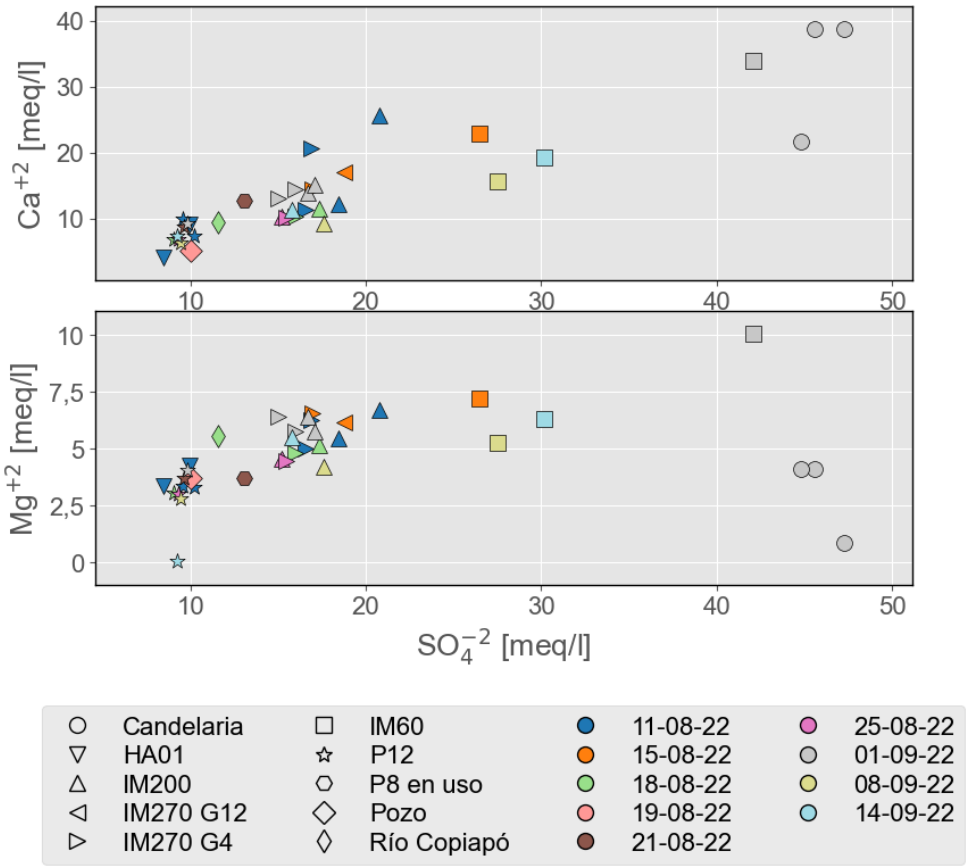


FIG. 34. Concentración de cationes de calcio-magnesio en comparación con el aumento de sulfatos y carbonatos en aguas del interior de la mina.

Por otra parte, el índice de saturación (IS) del yeso en las distintas muestras de agua obtenidas al interior de la mina muestra qué tan cerca del límite de solubilidad se encuentra el agua respecto a este mineral. De esta forma, al comparar la evolución del IS del yeso en los distintos niveles al interior de la mina (IM270, IM200 e IM60) (Fig. 35) se observa que existe una saturación de este similar en las muestras del acuífero (Pozo 8), en el nivel 270 (IM270) y en el nivel 200 (IM200), pero un aumento considerable en el nivel IM60. Por otro lado, el índice se mantiene relativamente constante en el tiempo para cada punto de monitoreo. El grado de saturación más bajo lo presenta el pozo 12, ya que este se encuentra diluido con aguas de precipitación que no alcanzan a integrarse por completo al acuífero, como fue revelado mediante el análisis isotópico.

Si bien se ha demostrado que la disolución de yeso es la fuente principal de sulfato, mineral que se encuentra presente dada la existencia de zonas con una fuerte alteración hidrotermal, este proceso solo explica el aumento de la salinidad en el agua.

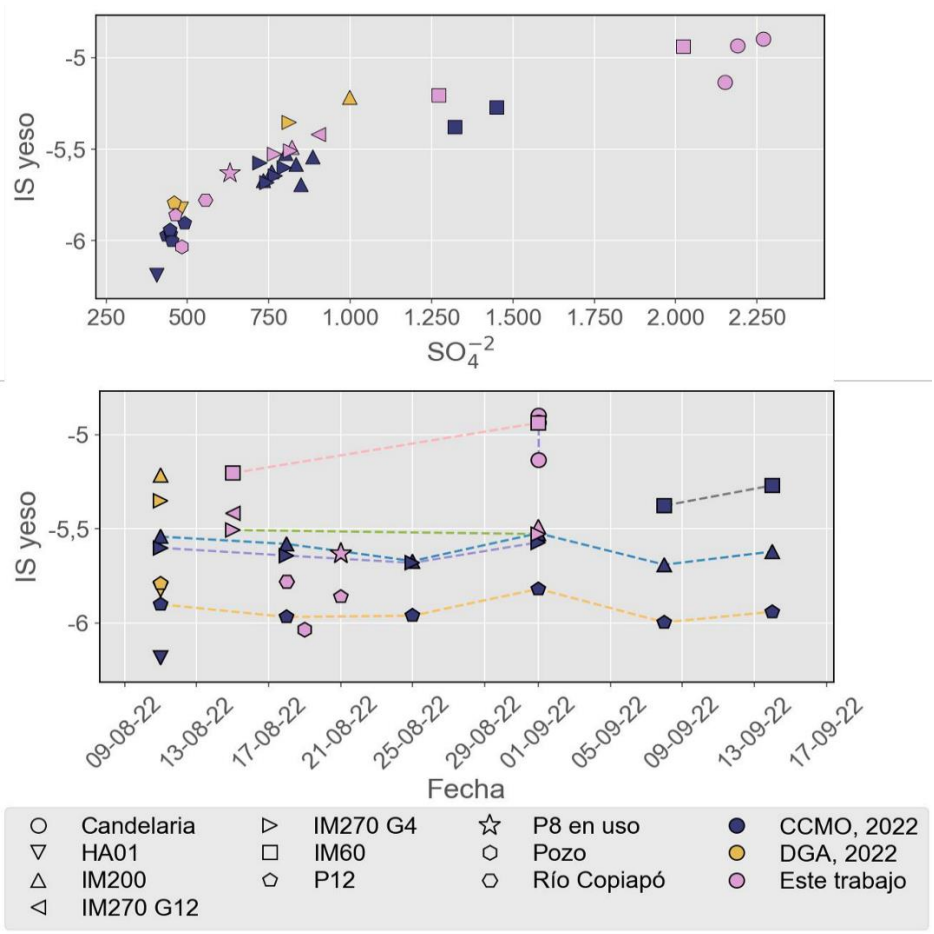


FIG. 35. Índice de solubilidad del yeso. Arriba: versus su contenido de sulfato. Abajo: versus la fecha del muestreo.

Por otra parte, la disminución del pH es consecuencia de reacciones de óxido-reducción que pueden ocurrir en minerales con contenido metálico como la pirita, al entrar en contacto con agua fresca y oxigenada. Para ayudar a la comprensión de los distintos procesos de contaminación que podrían estar ocurriendo al interior de la mina y la posible incorporación de metales pesados al agua, se realizó un análisis de elementos traza.

Mediante un diagrama de Schoeller se comparó la concentración de elementos traza en las muestras de agua de Alcaparrosa respecto a las normas de agua potable y de riego (Nch 409 y Nch 1333) (Fig. 36). La comparación mostró que algunas de las muestras analizadas superaron los límites de agua potable permitidos para la concentración de aluminio, cobre, hierro total, manganeso, zinc, arsénico, cadmio, sulfato y sólidos disueltos totales. Particularmente, el nivel de acopio de agua al interior de la mina (IM60) excedió la norma en todos los elementos y parámetros mencionados.

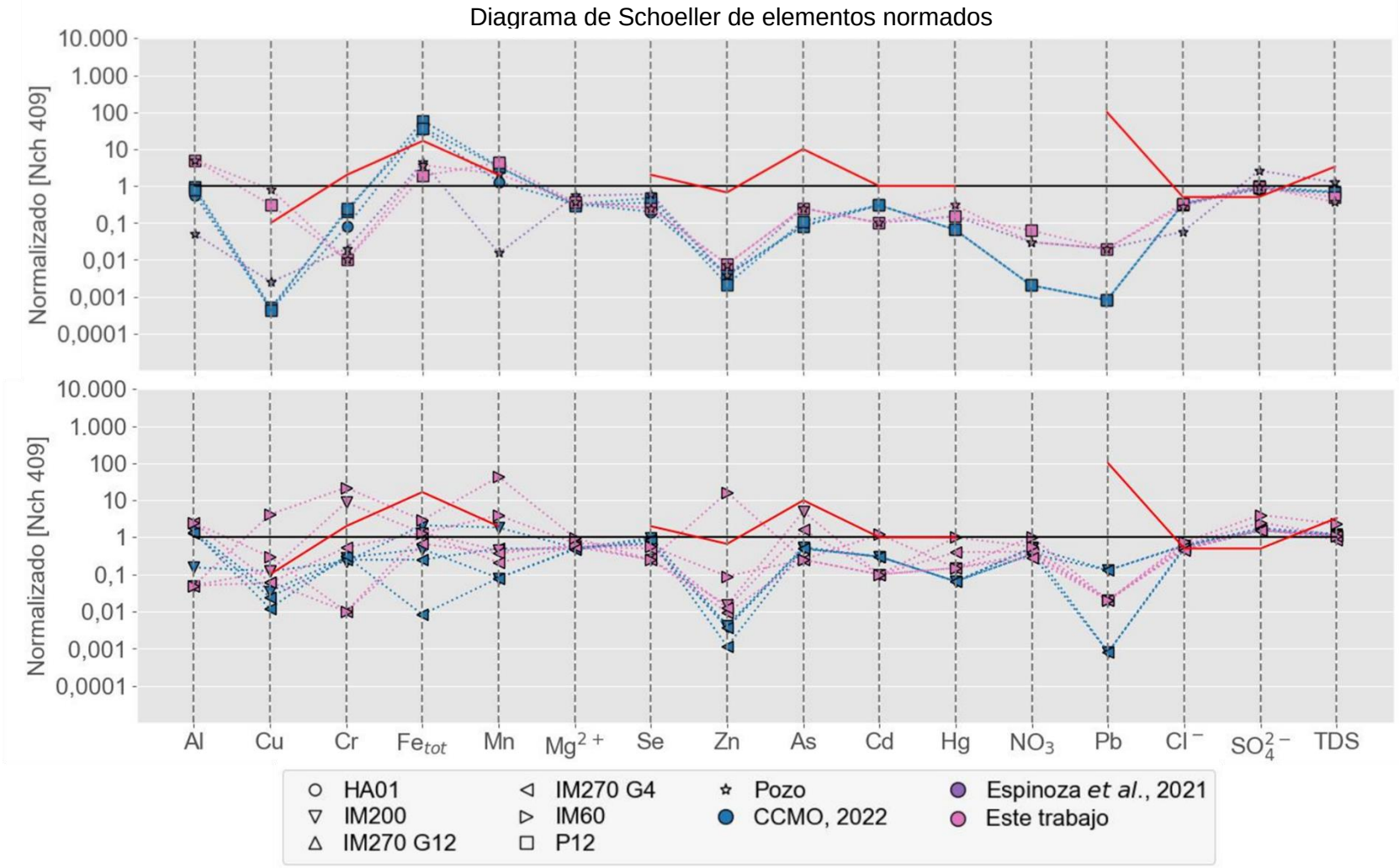


FIG. 36. Diagrama de Schoeller de elementos normados: arriba, muestras del interior de la mina; abajo muestras de pozos. La línea roja representa la norma de riego Nch 1333 (INN ,1987) comparada con la norma de agua potable Nch 409 (INN, 2006).

Para comprender la evolución temporal y espacial de las sustancias y parámetros que son de interés, se comparó la variación temporal de las concentraciones en los diferentes niveles, en relación con las normas de agua potable, la norma de riego y con los valores promedios obtenidos desde la base de datos de hidrogeoquímica publicada para esta cuenca en el trabajo de Espinoza *et al.* (2021).

El análisis de la variación temporal se realizó para el pH, los sólidos disueltos totales (Fig. 37), el arsénico, el sulfato, el cobre, (Fig. 38), el hierro total, el manganeso y el cloruro (Fig. 39). Este mostró que la concentración de metales y solutos en general aumenta tanto con la profundidad como con el tiempo, es decir, que es mayor la concentración de estos componentes a medida que el agua circula desde el acuífero hacia el nivel 60 (cuando se va profundizando), y hacia el final del periodo de monitoreo (a medida que transcurre más tiempo de residencia). Esto no sucede con el contenido de arsénico el cual es más alto en los niveles intermedios (IM200, IM270) o con el hierro total, que es más abundante en los pozos monitoreados, probablemente como consecuencia de la oxidación del revestimiento del pozo durante un periodo prolongado de estar en desuso. El nivel de acopio en el fondo de la mina (IM60) muestra una notable afectación de su calidad en cuanto al contenido de metales. Por otro lado, aunque los niveles 200 y 270 tienen valores más elevados respecto a muestras de pozos representativas del acuífero, estos son similares al promedio de la cuenca en el periodo 2008-2018.

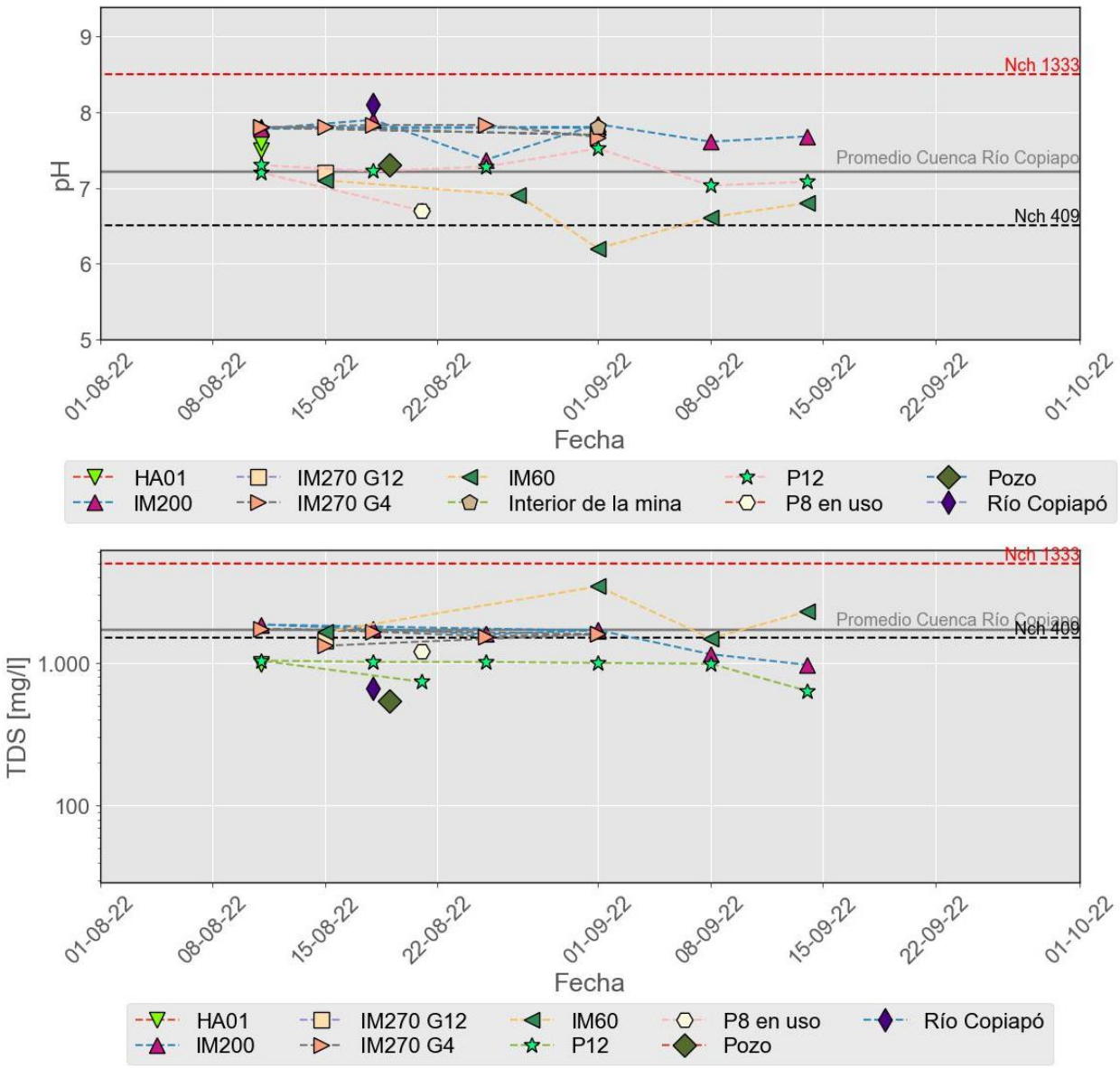


FIG. 37. Variación de parámetros fisicoquímicos y elementos químicos en relación con el tiempo de muestreo. Arriba: pH-. Abajo: sólidos disueltos totales.

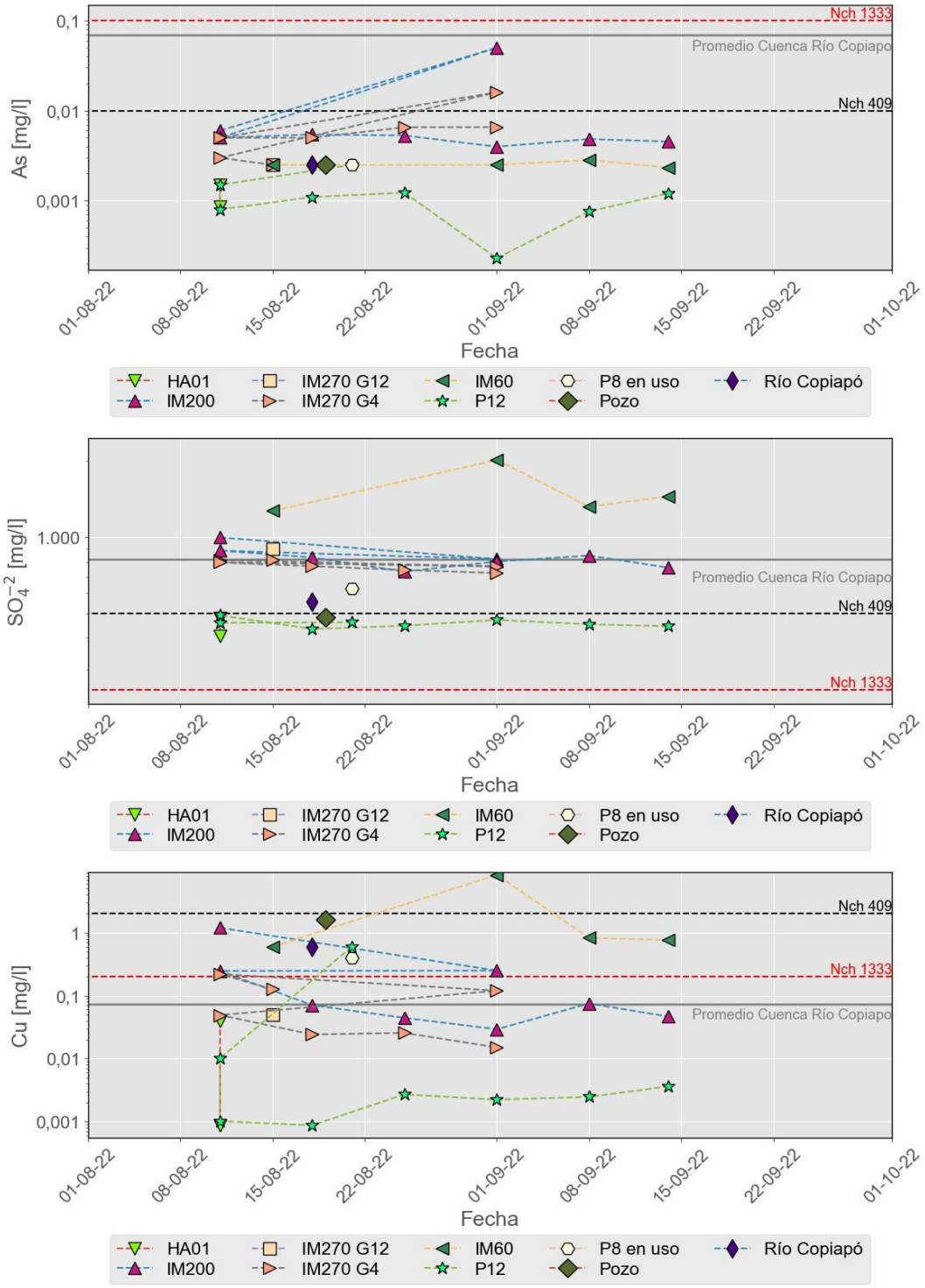


FIG. 38. Variación de elementos químicos en relación con el tiempo de muestreo. Arriba: arsénico. Centro: sulfato. Abajo: cobre.

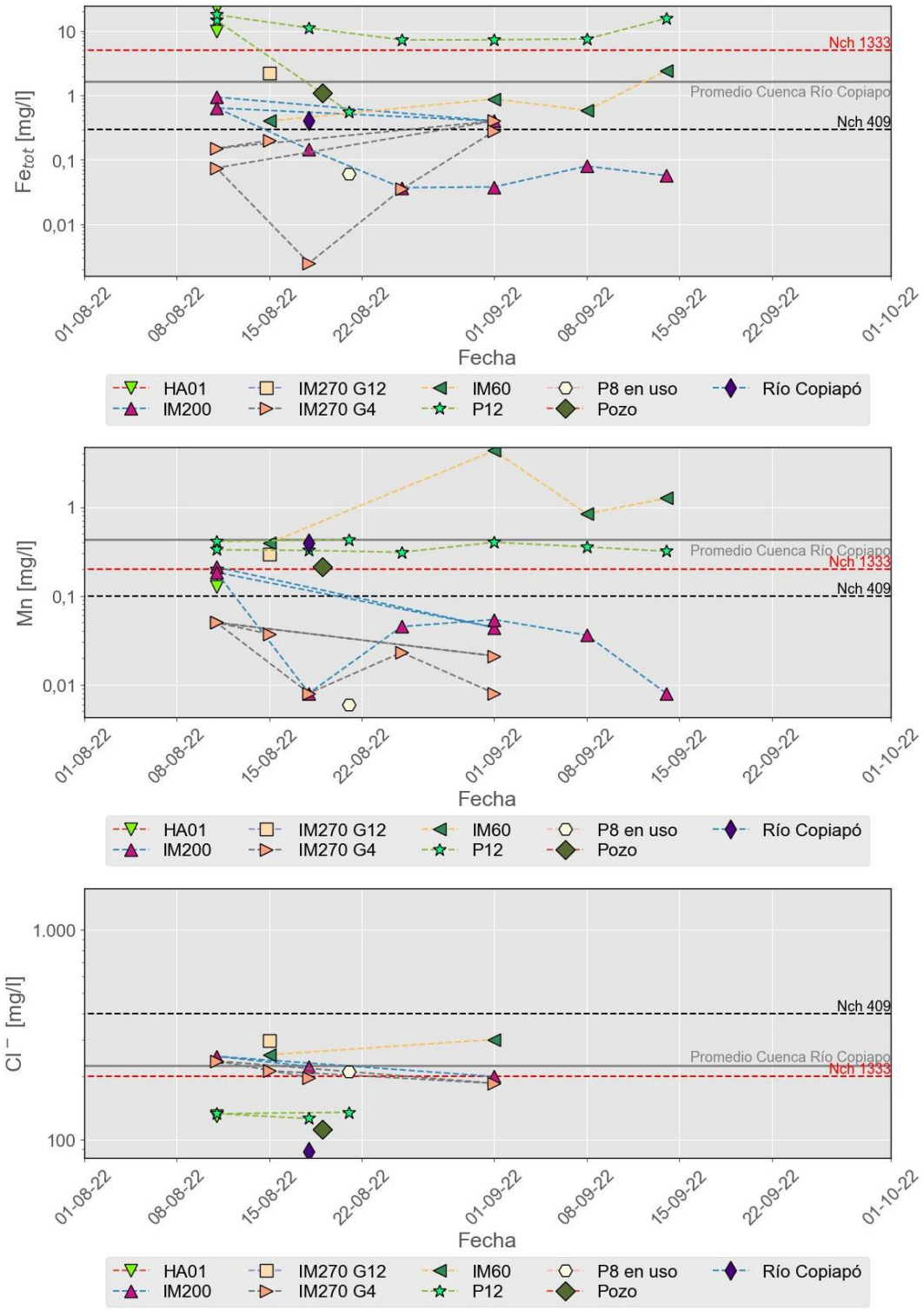


FIG. 39. Variación de elementos químicos en relación con el tiempo de muestreo. Arriba: hierro total. Centro: manganeso. Abajo: cloruro.

4.3 Prospecciones geofísicas

Como parte de las labores realizadas en terreno por parte de Sernageomin, se efectuaron perfiles geofísicos con un equipo de radar de penetración terrestre (GPR). En el anexo VII se explica la metodología utilizada, mientras que en este capítulo se presenta la interpretación de los perfiles que entregan información más relevante.

Además, la empresa Geodatos realizó dos perfiles de tomografía de resistividad eléctrica (ERT) y dos perfiles sísmicos de refracción del tipo MASW, cuyos informes se presentan en el anexo IX.

4.3.1 Perfiles geofísicos del radar de penetración terrestre (GPR)

Entre los días 23 y 26 de agosto de 2022 se llevó a cabo una campaña de reconocimiento y medición en el sector de las grietas, las cuales, según su ubicación y la temporalidad con que fueron descubiertas, se denominaron grietas sur 1 (ubicadas 150 m al sur del socavón, (Fig. 40) y grietas sur 2 (ubicadas a 200 m al sur del socavón, Fig. 40).

Para realizar la medición geofísica en las grietas, se procedieron a efectuar tres perfiles en cada uno de los sectores (grietas sur 1 y 2) de entre 20 a 50 m de longitud, tanto sobre algunas de las grietas como de manera perpendicular a estas, a profundidades de investigación de 161 ns (10 m), 322 ns (20 m), 482 ns (30 m), 643 ns (40 m), 964 ns (60 m) y 1600 ns (99 m), esto con la finalidad de detectar su proyección en profundidad. El equipo empleado corresponde a una antena Cobra plug-in modelo SE-40 que permite medir en una banda de 90 MHz y una *tablet* para registro de datos.

Los perfiles levantados en el sector grietas sur 1 fueron denominados P1, P2 y P3 y su longitud aproximada fue de 20 m cada uno (Fig. 41). En este sector las grietas superficiales identificadas poseen una forma ovalada, por lo que los perfiles P1 y P2 las cruzaron perpendicularmente en dirección norte-sur y el perfil P3 las atraviesa en dirección este-oeste.

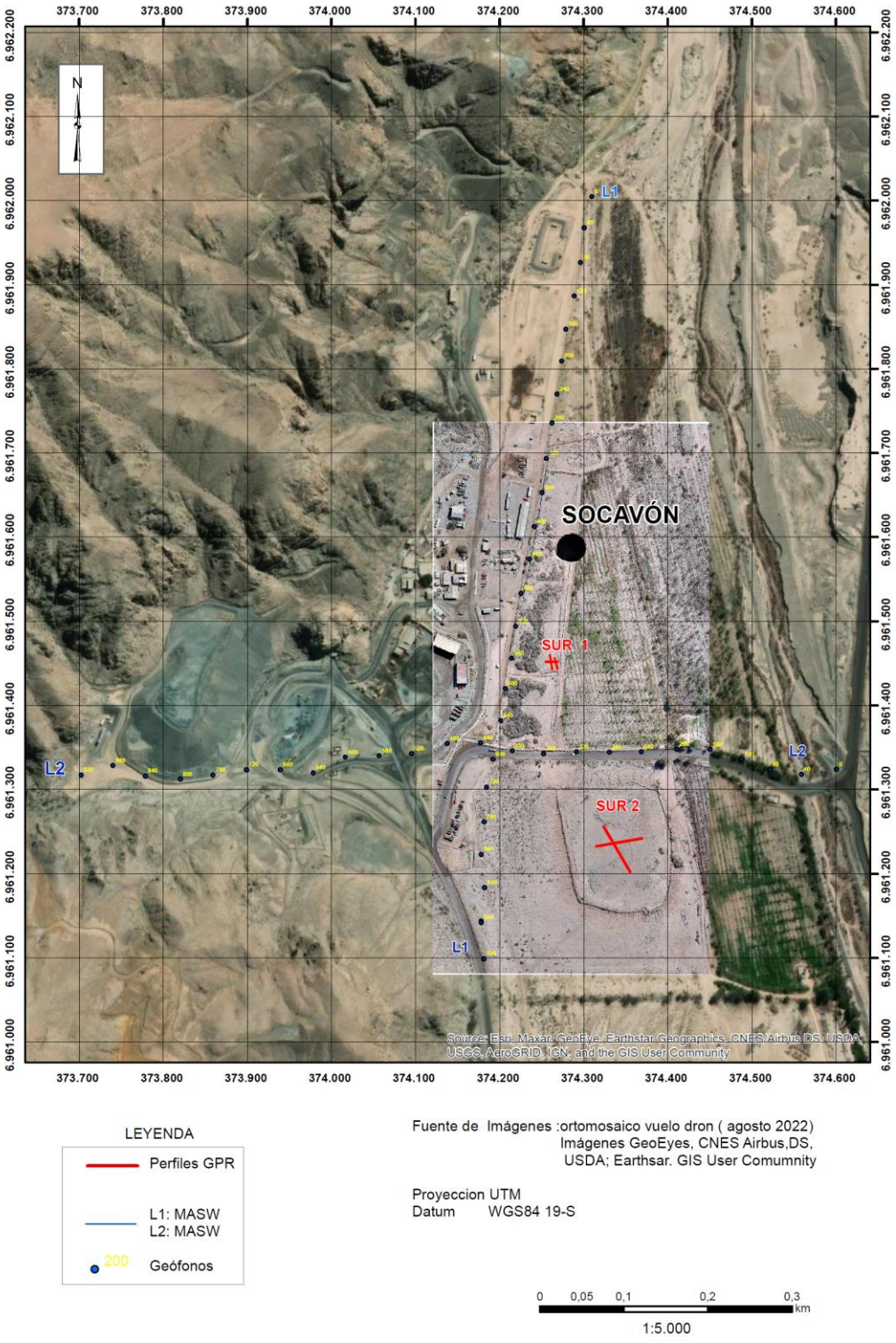


FIG. 40. Ubicación de perfiles GPR y líneas geofísicas de refracción sísmica MASW.

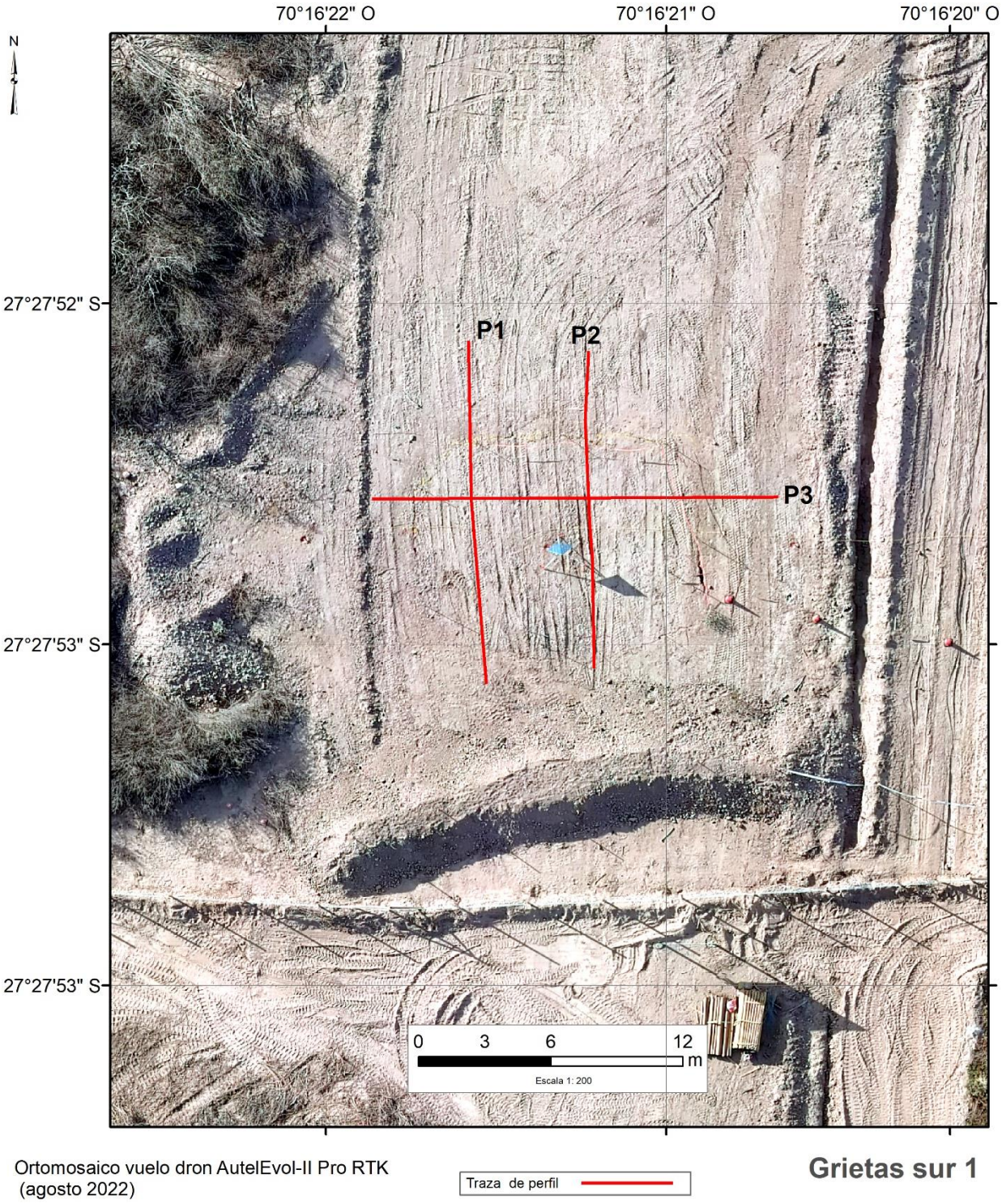


FIG. 41. Ubicación de los perfiles GPR P1, P2, y P3 en el sector grietas sur 1; ortomosaico generado por vuelo de dron en agosto de 2022.

Para el perfil P1 se presenta el registro realizado a 643 ns equivalente a una profundidad de penetración de 40 m (Figs. 41 y 42) donde es posible identificar tres zonas con perturbaciones (indicadas con flechas). La primera, cercana a los 10 m de perfil, se correlaciona con una de las grietas proyectable en profundidad hasta unos 20 o 30 m aprox. Cercano a los 20 m de perfil es posible identificar una zona de perturbación que alcanza cerca de los 10 m de profundidad. La tercera zona se observa hacia el final del perfil y es correlacionada con la grieta presente en ese sector.

Para el perfil P2 (Figs. 41 y 43) se presenta el registro realizado a 964 ns equivalente a una profundidad de penetración de 60 m donde también es posible identificar tres zonas con perturbaciones (indicadas con flechas). La primera cercana a los 10 m de perfil, se correlaciona con una de las grietas, la que se proyecta en profundidad hasta unos 20 m aproximadamente. Entre los 10 y 20 m de perfil es posible identificar una zona de perturbación que alcanza cerca de los 20 m de profundidad. En este lugar se encuentra la grieta de mayor tamaño paralela al levantamiento. La tercera zona se observa hacia el final del perfil y es correlacionada con la grieta presente en ese sector cuya profundidad alcanza cerca de los 10 m.

Para el perfil P3 (Figs. 41 y 44), que cruza perpendicularmente los perfiles P1 y P2, el registro empleado para el análisis fue aquel que se realizó a 482 ns equivalente a una profundidad de penetración de 30 m. En este perfil fue posible identificar tres zonas con perturbaciones (indicadas con flechas). La primera se correlaciona con una de las grietas, y se proyecta en profundidad hasta alrededor de unos 25 m. La segunda corresponde a la parte central del perfil, coincidente con la perturbación central reconocida tanto en P1 como en P2. Esta perturbación alcanza una proyección de 25 m en profundidad. La tercera zona de perturbación se observa débilmente hacia el final del perfil y es correlacionada con la grieta presente en ese sector cuya profundidad alcanza cerca de los 10 m.

En el sector denominado grietas sur 2, se levantaron un total de tres perfiles denominados PG1, PG2 y PG3 (Figs. 41 y 45). Los perfiles PG1 y PG3, cuya longitud aproximada es de 50 m, se realizaron perpendiculares a las grietas del sector, mientras que el PG2, que no supera los 20 m de extensión, fue levantado sobre una de las grietas.

En general, en este sector las grietas identificadas poseen una forma ovalada, por lo que se determinó que los perfiles PG1 y PG3 las cruzaran de manera perpendicular en dirección oeste-este y sur-norte respectivamente y que el perfil PG2 pasara sobre una de ellas.

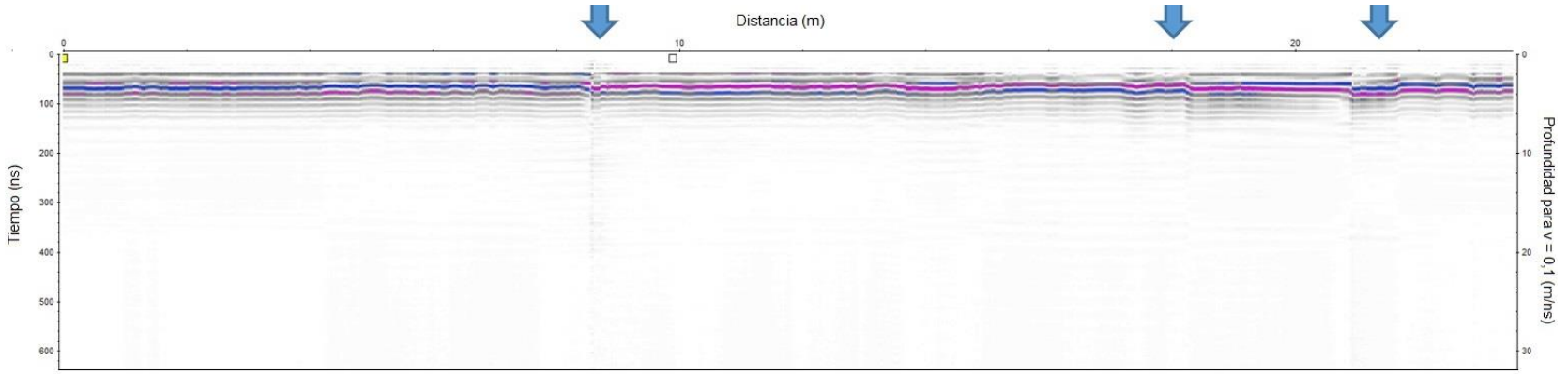


FIG. 42. Perfil P1 con profundidad de investigación de 40 m.

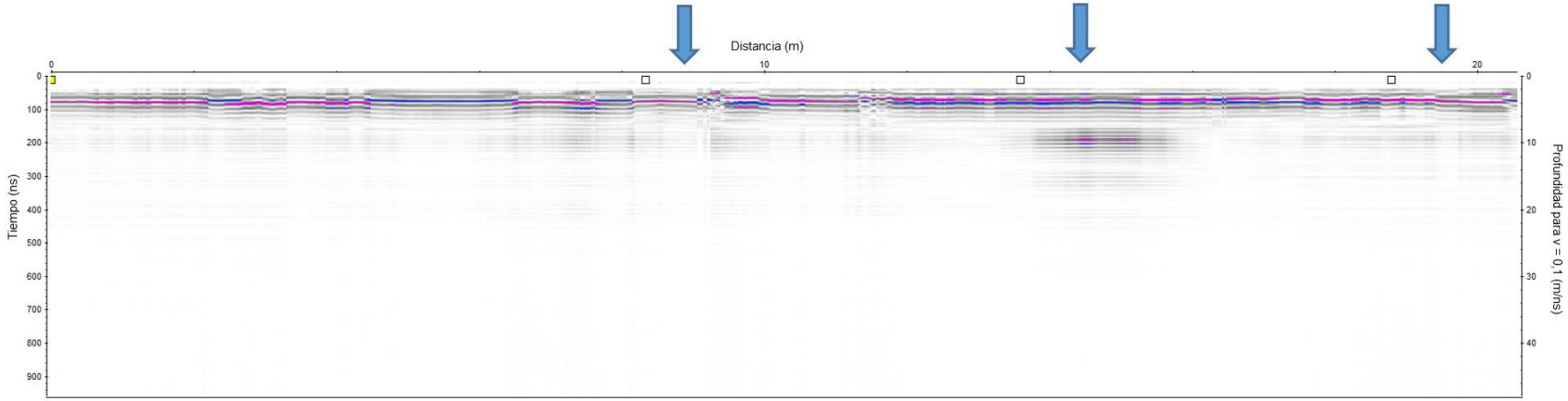


FIG. 43. Perfil P2 con profundidad de investigación de 60 m.

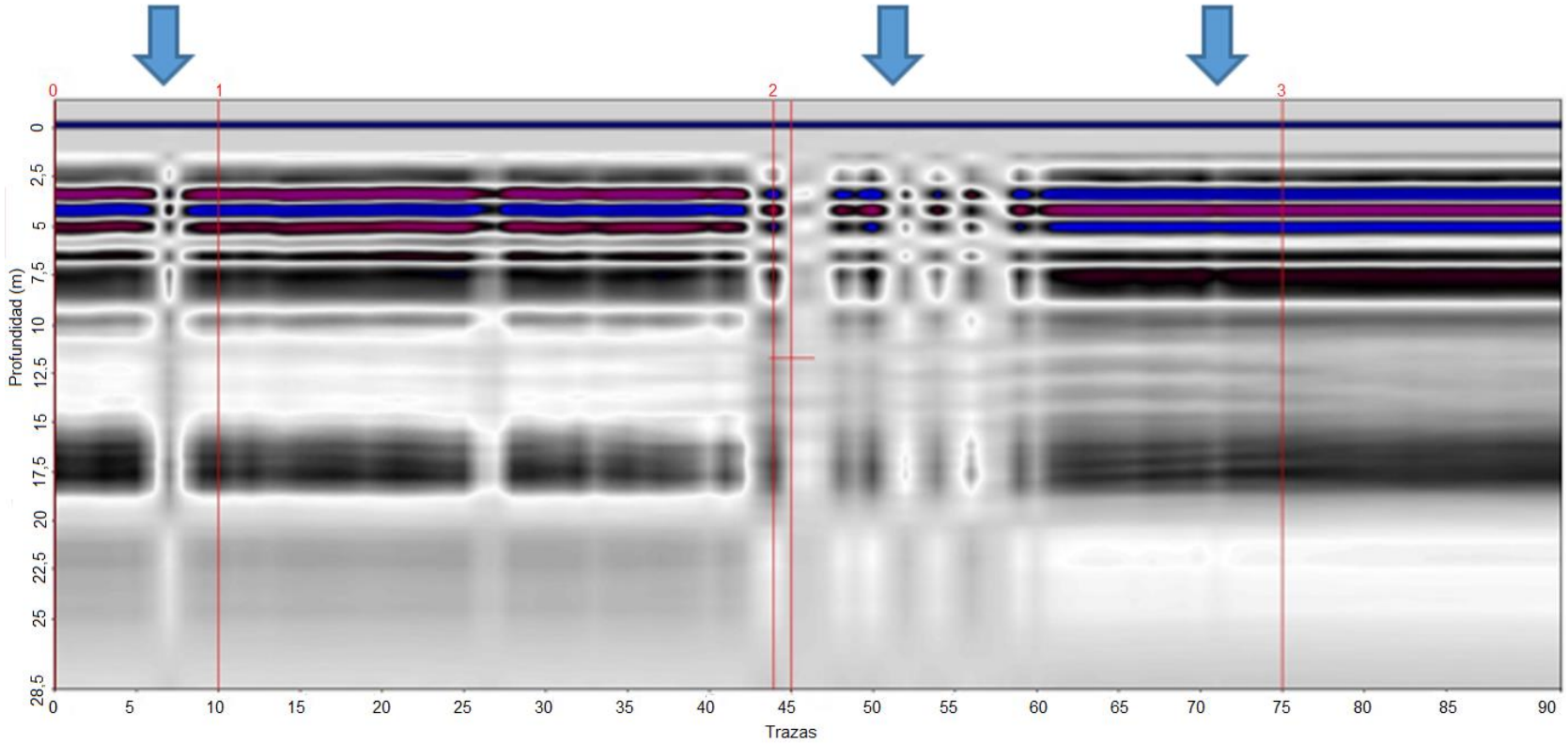


FIG. 44. Perfil P3 con profundidad de investigación de 30 m.

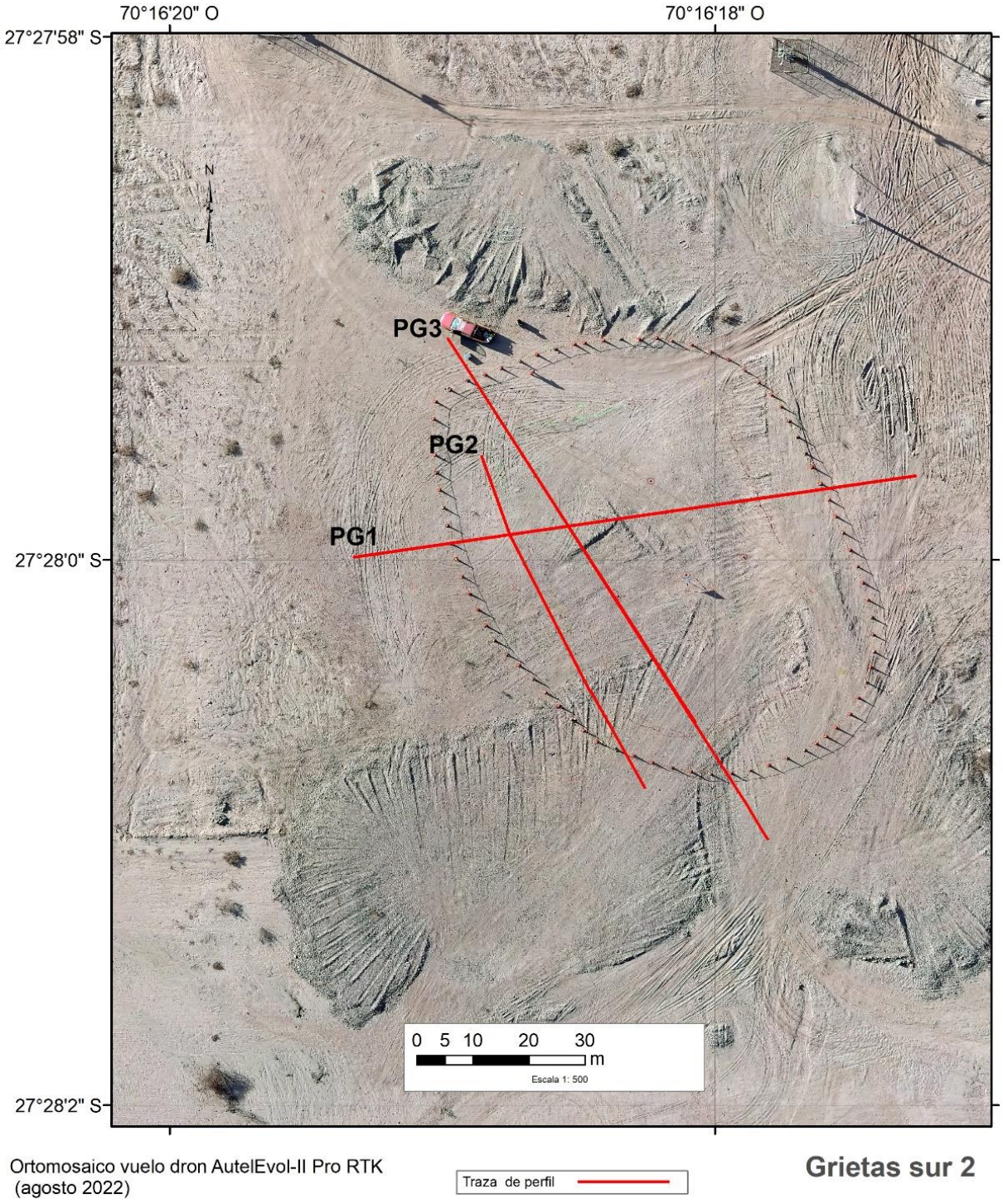


FIG. 45. Ubicación de los perfiles PG1, PG2 y PG3 en el sector grietas sur 2, sobre imagen ortomosaico por dron tomada en agosto de 2022.

Para el perfil PG1 (Figs. 45 y 46), los registros empleados para el análisis fueron aquellos que se hicieron a 964 ns equivalente a una profundidad de penetración de 60 m. Para este perfil, fue posible identificar un cambio en la señal entre la grieta inicial y final prospectada (indicadas con flechas). Esta zona de contraste no supera los 10 m de profundidad.

El perfil PG2 fue levantado en la grieta oeste (Figs. 45 y 47). Aquí el registro empleado para el análisis fue aquel que se efectuó a 482 ns equivalente a una profundidad de penetración de 30 m. En general, en este registro y en los similares levantados sobre la grieta, se observa un estrato más bien homogéneo sin grandes perturbaciones.

El perfil PG3 (Figs. 45 y 48) fue levantado en orientación desde sur a norte. El registro empleado para el análisis fue el hecho a 322 ns equivalente a una profundidad de penetración de 20 m. La ubicación de las grietas se indica con flechas mientras que un resalto dado por el equipo se muestra con la línea roja número 3. En general para la figura 49, en la parte central del perfil, a la altura de una de las grietas, es posible identificar una perturbación en forma de parábola entre los 10 y 12 m de profundidad. Hacia el final del perfil se observa un leve cambio en pendiente entre 5 y 10 m de profundidad.

Finalmente, para los sectores de grietas sur 1 y 2, es posible evidenciar perturbaciones coincidentes con los sectores de las grietas en la superficie, las que en profundidad no se observan más allá de los 30 m, lo cual pudiese estar asociado a un cambio en las características del suelo más que con grandes cavidades de aire y agua; sin embargo, se recomienda hacer mediciones sobre el perfil sísmico paralelo al sector de grietas sur 1 con el fin de correlacionar los modelos en la primera capa de potencia aproximada de 60 a 70 m.

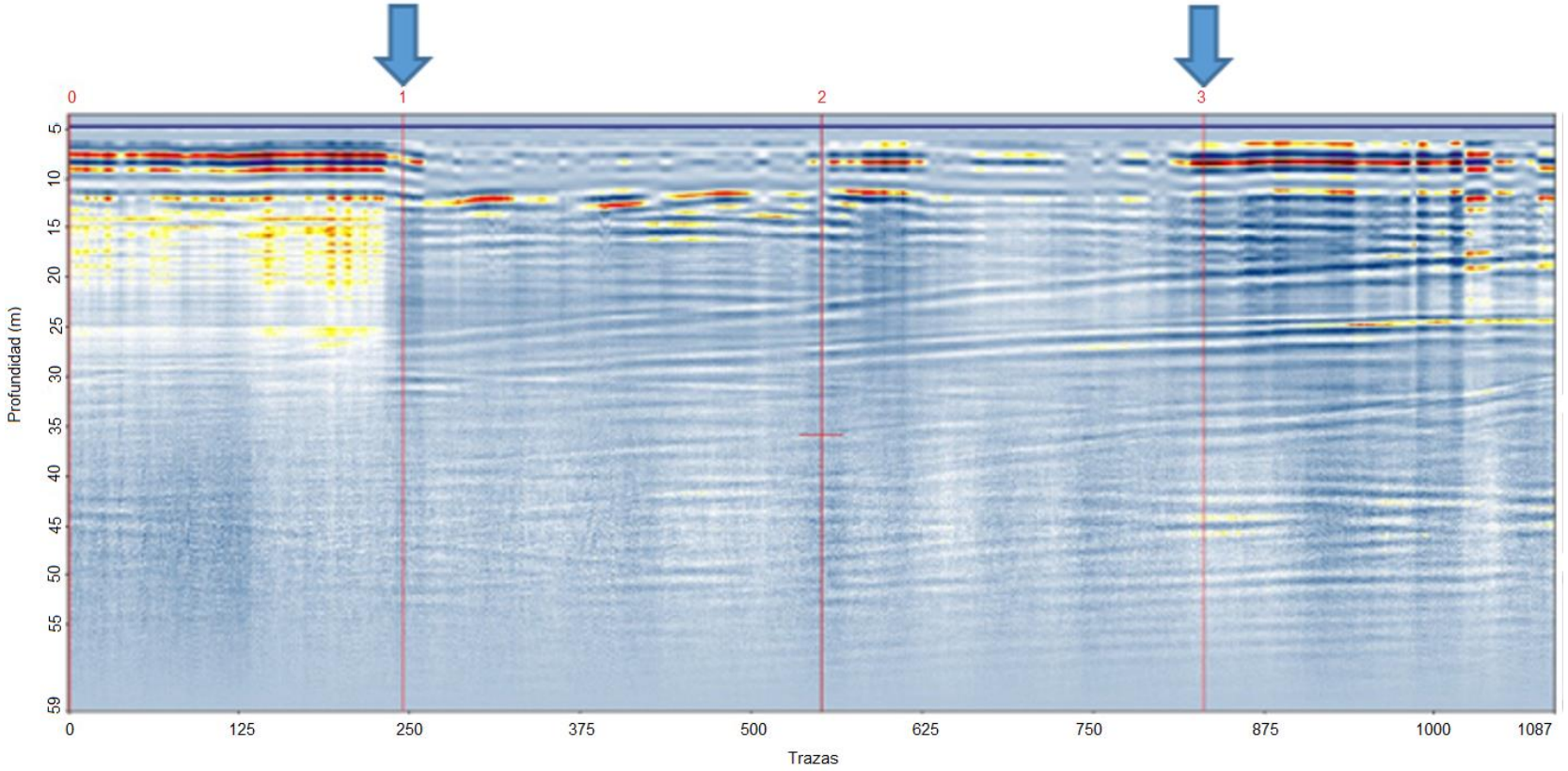


FIG. 46. Perfil PG1 con profundidad de investigación de 60 m.

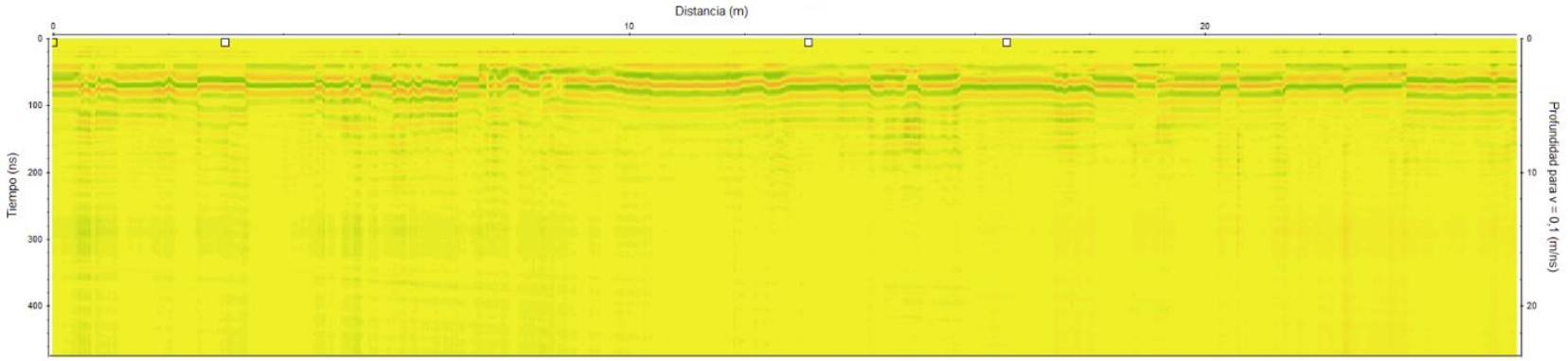


FIG. 47. Perfil PG2 con profundidad de investigación de 30 m.

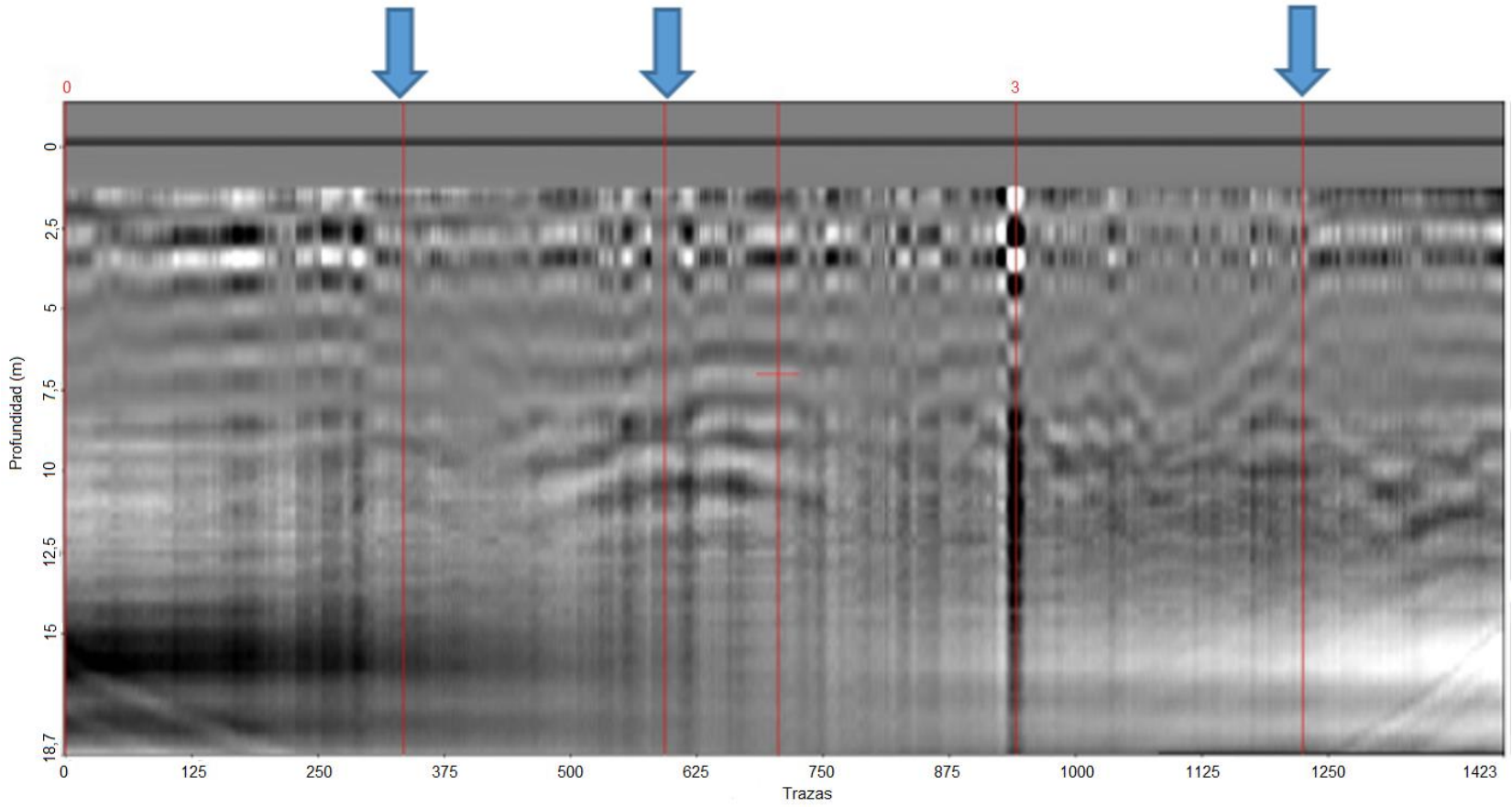


FIG. 48. Perfil PG3 con profundidad de investigación de 20 m.

4.3.2 Perfiles de transiente electromagnética ERT

Como parte de los trabajos realizados en terreno, la empresa contratista Geodatos SAIC realizó dos perfiles de 550 m de largo, mediante tomografía eléctrica ERT. El perfil L1 se hizo siguiendo el camino interno de la empresa minera, al costado izquierdo de la subsidencia (con orientación cercana de sur a norte) y el perfil L2 se efectuó con una orientación cercana de suroeste a noreste, pasando por el lado derecho de la subsidencia. En la figura 49, se observa una imagen con la traza de los perfiles en la superficie.

La configuración de ambos perfiles fue dipolo-dipolo, gradiente y polo-dipolo, con una distancia dipolar de 10 m. La extensión de ellos permitió una profundidad de investigación de 220 m en el centro del perfil. En la inversión geofísica realizada (sin condiciones de borde) las anomalías encontradas deben analizarse de manera referencial, dado que el error obtenido en la modelación 2D de las líneas fue un RMS de 28,1% para L1 y de 6,95% para L2.

La línea L1 (Fig. 50) presenta tres zonas de alta resistividad (de color rojo en el perfil) que alcanzan valores superiores a los 100.000 Ohm*m. Dichas zonas podrían correlacionarse con cavidades o áreas donde se encuentren poros vacíos o con aire. En particular, el sector más al sur tiene una forma de chimenea hacia la superficie que se podría correlacionar con el sector de grietas sur 1, mientras que la zona de alta resistividad central es posible vincularla con la zona donde se generó la subsidencia.

Además, al proyectar en la línea L1 el nivel estático registrado en los pozos HA-01 y HA-02 (aproximadamente de 60 m en agosto, cuando se realizaron los perfiles geofísicos ERT), se podría considerar la capa de resistividad entre los 400 y 500 Ohm*m como el posible nivel estático en el acuífero.

Por otra parte, se observa una zona de baja resistividad (entre 3-15 Ohm*m, de color azul) entre los 340 y 520 m del eje horizontal del perfil, lo que podría atribuirse a un sector donde se haya producido un fracturamiento del contacto roca-relleno, producto de la subsidencia y que esto esté generando el drenaje del agua presente en el acuífero freático asociado al río Copiapó hacia los sectores de operaciones mineras del yacimiento Alcaparrosa.

Para el perfil L2 (Fig. 51), no se observan anomalías significativas en cuanto a zonas de alta resistividad correlacionables con áreas donde se podrían estar generando nuevas subsidencias y, por otra parte, también se correlaciona el nivel de resistividad entre los 400 y 500 Ohm*m como la posible ubicación del nivel estático.

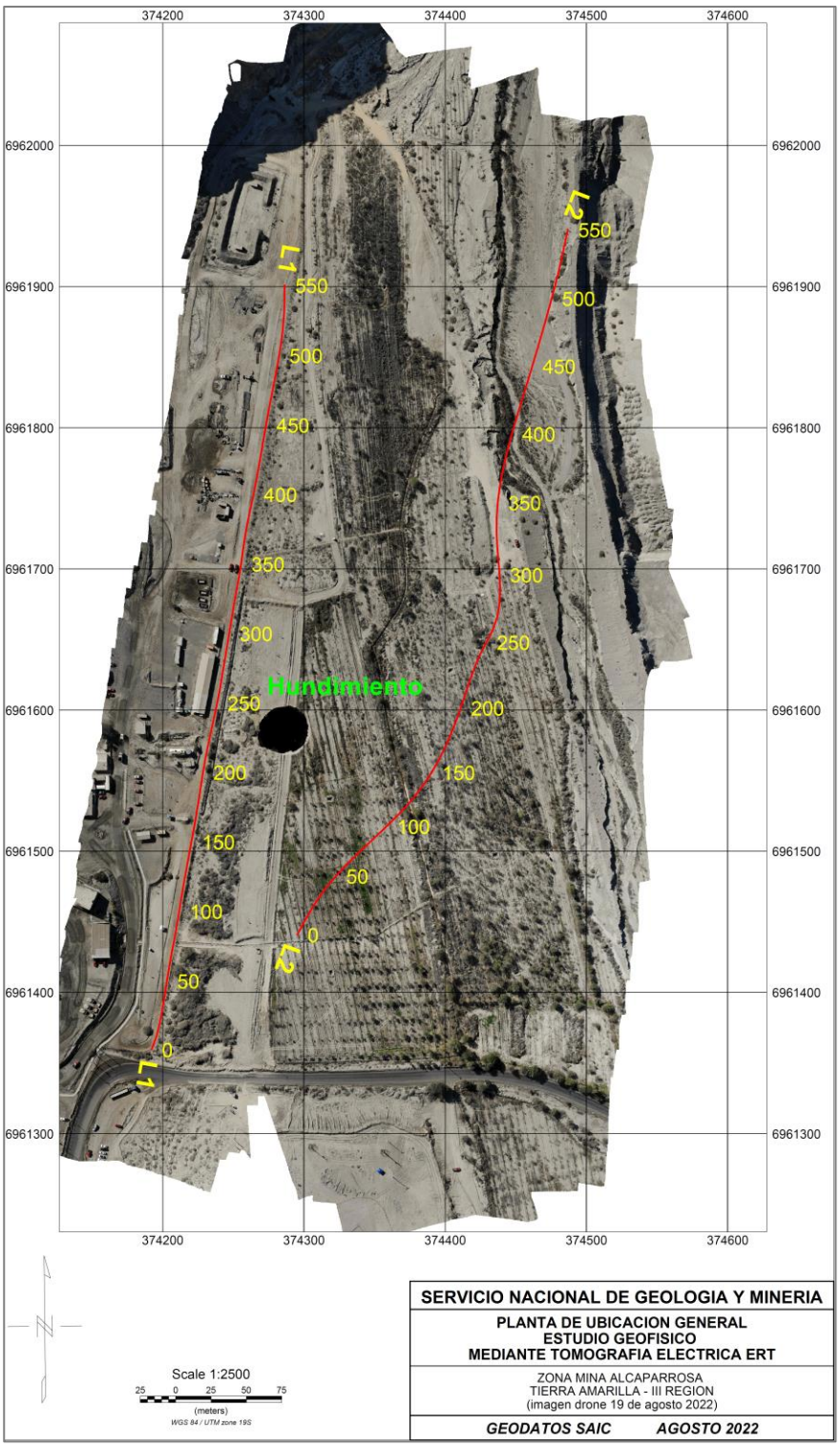


FIG. 49. Planta de ubicación del estudio geofísico de tomografía eléctrica ERT, (ver Anexo IX).

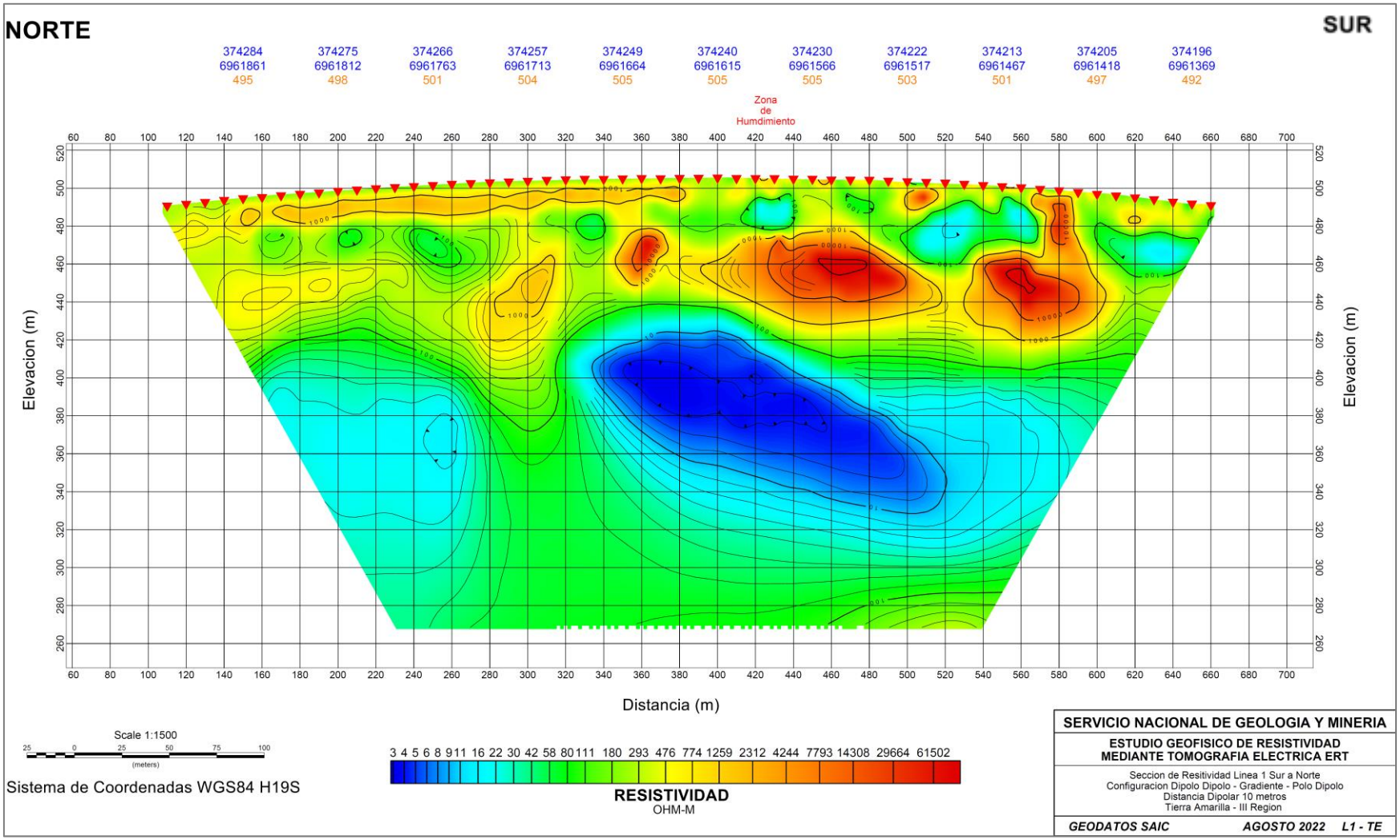


FIG. 50. Sección de resistividad Línea 1 de sur a norte, configuración dipolo-dipolo, gradiente y polo-dipolo, distancia dipolar 10 m, (ver Anexo IX).

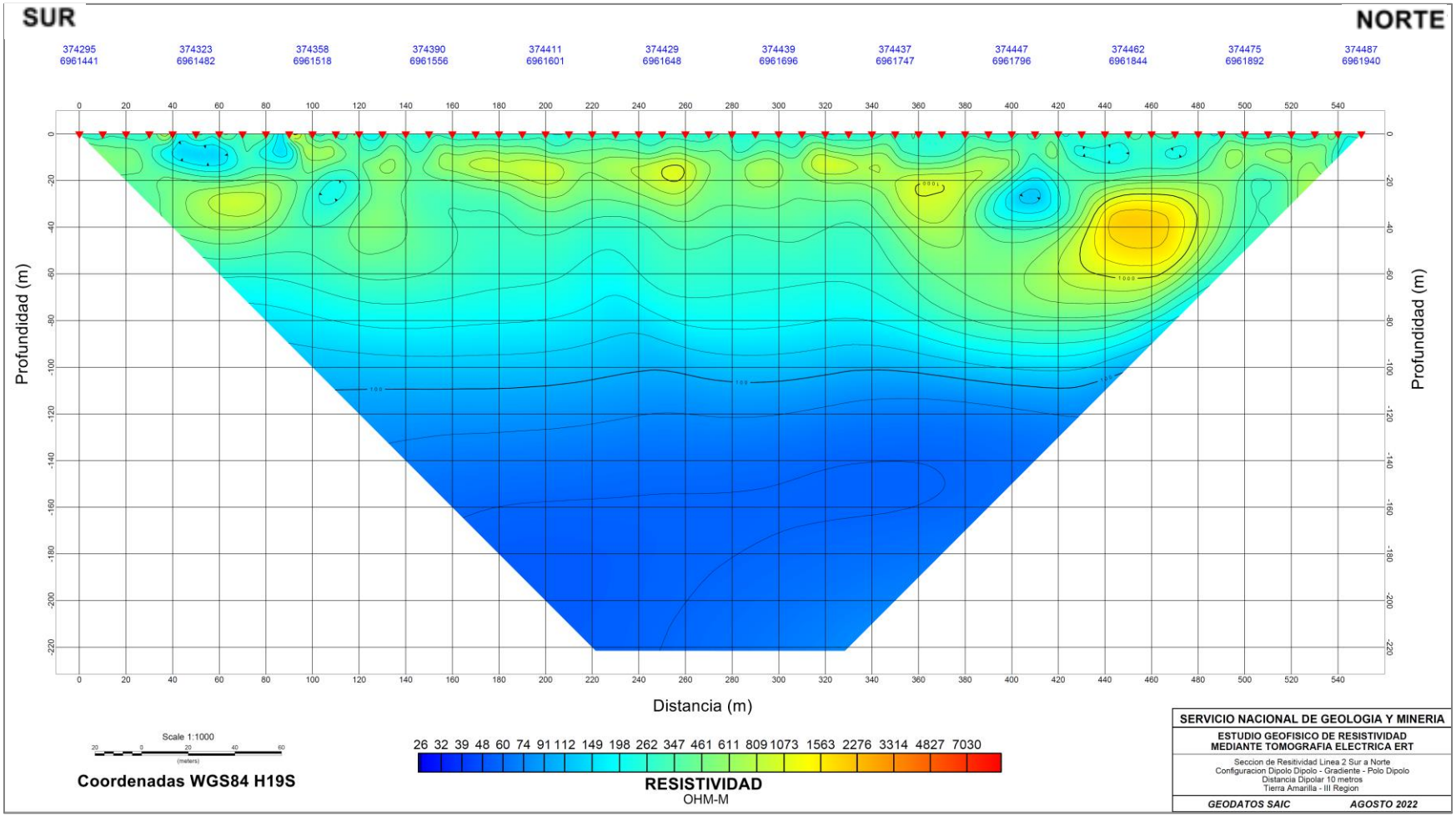


FIG. 51. Sección de resistividad Línea 2 de sur a norte, configuración dipolo-dipolo, gradiente y polo-dipolo, distancia dipolar 10 m, (ver Anexo IX).

4.3.3 Perfiles de refracción sísmica MASW

Por otra parte, la empresa contratista Geodatos SAIC (Anexo IX) realizó dos perfiles de refracción sísmica de 920 m cada uno, mediante el método MASW, los que fueron orientados de forma perpendicular entre ellos (Fig. 52). Estos se realizaron los días 29 y 30 de agosto de 2022. La configuración para cada perfil fue de 24 geófonos ubicados a un intervalo de 40 m, con lo que se obtiene una profundidad de investigación máxima de 400 m.

Las mediciones de MASW y sus resultados describen los distintos estratos del subsuelo en cuanto a sus velocidades (V_S), observándose cambios en forma vertical, que representan las capas del subsuelo. La información del método y de las consideraciones técnicas están en el anexo IX. Informes de geofísica Geodatos SAIC.

En los dos perfiles (Figs. 53 y 54), de forma general, se describen tres unidades:

- Unidad A. Superficial: en ella se observan velocidades, V_S, inferiores a 750 m/s; corresponden a sedimentos superficiales de baja consolidación.
- Unidad B. Intermedia: subyaciendo a la unidad anteriormente descrita, se reconoce un sector con velocidades que van de 750 (m/s) a 1.750 (m/s). Las características de esta unidad se correlacionan con sedimentos de regular consolidación y/o roca muy alterada/fracturada.
- Unidad C. Profunda: bajo la unidad anteriormente descrita, se observa un estrato con velocidades que varían desde 1.750 a 3.000 (m/s), lo que se asocia a un estrato rocoso que podría presentar algún bajo grado de alteración y/o fracturamiento.

Para el perfil L1 MASW (Fig. 53), el cambio de geometría de las unidades, entre los 320 y 380 m del perfil, muestra la posible presencia de una estructura geológica, a la que se le pueden atribuir la variación en las profundidades y potencias de las unidades a lo largo de este perfil.

Además, en la figura 55 se observa la integración del perfil ERT L1 con la línea sísmica L1, donde la anomalía de baja resistividad de valores (3-15 ohm*m) se puede asociar a la presencia de aguas subterráneas, ya que, por principios de la técnica MASW, la onda S no se propaga por una masa líquida. Es por esto por lo que la velocidad (S) en donde está la anomalía de baja resistividad puede tener menor magnitud, ya que está atenuada por la posible presencia de agua.

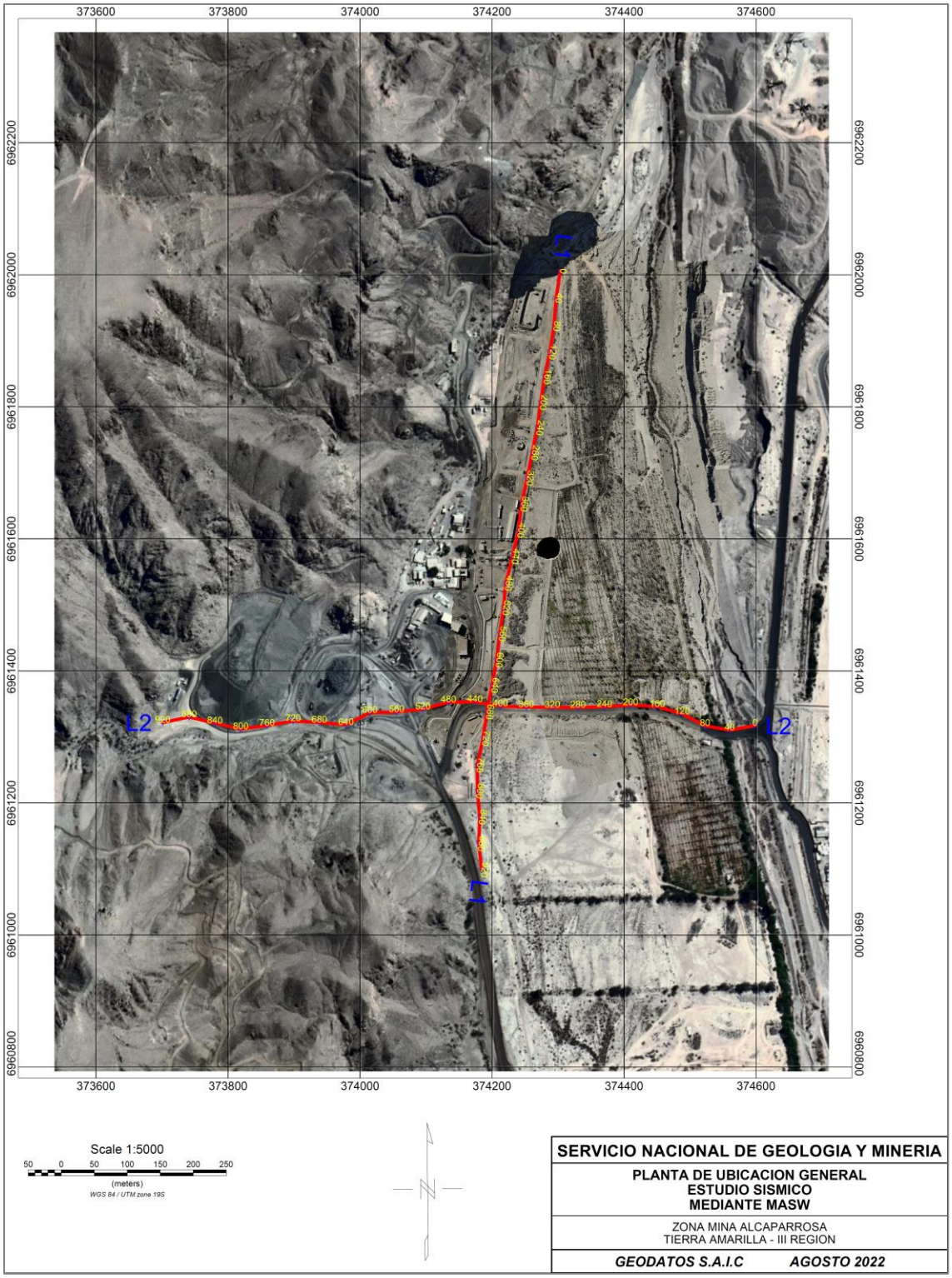


FIG. 52. Mapa de ubicación del estudio sísmico mediante MASW, (ver Anexo IX).

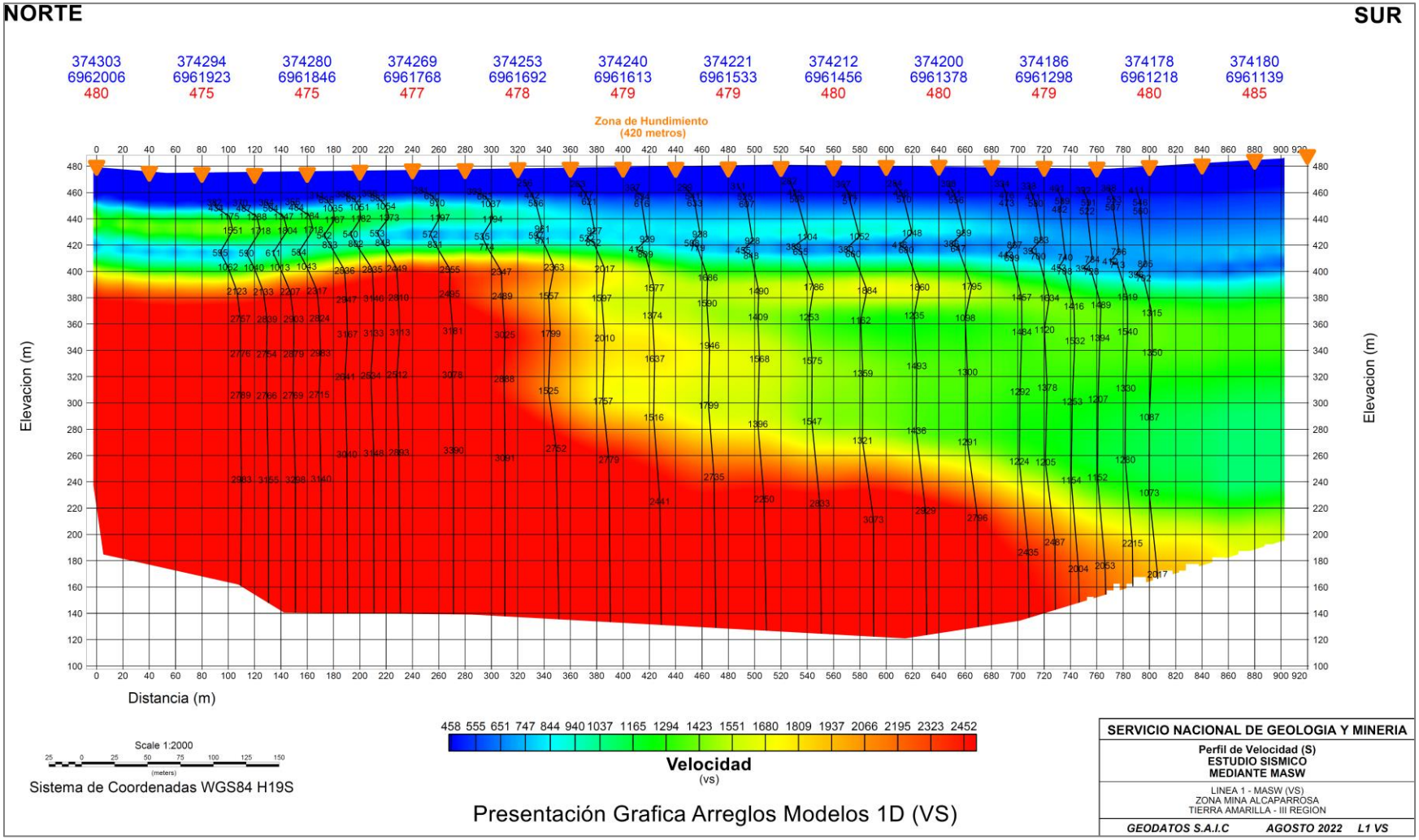


FIG. 53. Línea 1 del perfil de velocidad (V_S); estudio sísmico mediante MASW, (ver Anexo IX).

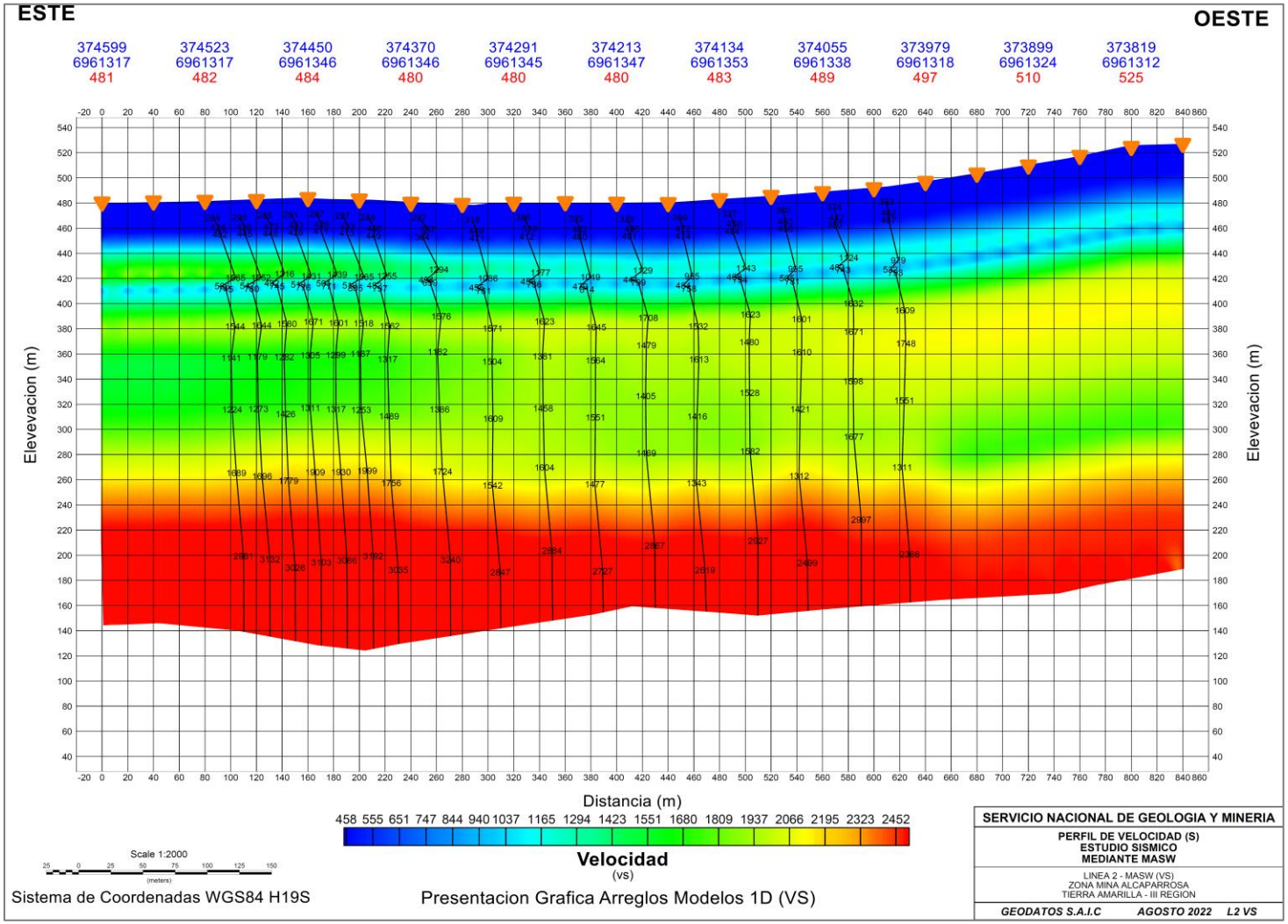


FIG. 54. Línea 2 del perfil de velocidad (V_S); estudio sísmico mediante MASW, (ver Anexo IX).

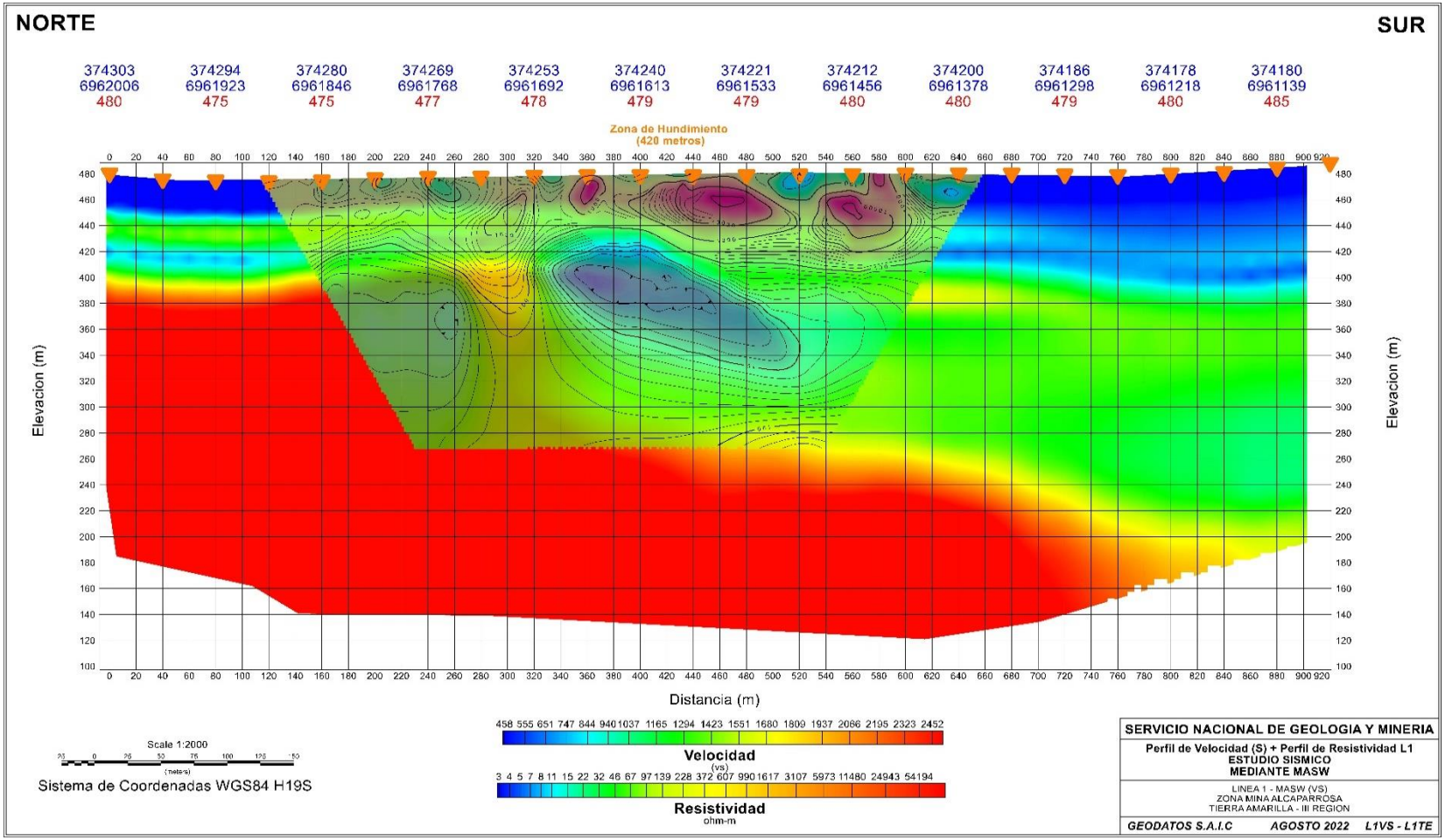


FIG. 55. Comparación de los perfiles L1 ERT y L1 MASW, donde se observan las posibles zonas de transporte de agua desde el acuífero freático hacia los sectores de labores subterráneas de la mina Alcaparrosa, (ver Anexo IX).

5. MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA SUBSIDENCIA

Mediante el análisis de la información estructural, de los niveles, de hidrogeoquímica y de geofísica fue posible desarrollar un modelo conceptual de las aguas subterráneas anterior al evento y posterior a él con lo que se logró identificar los efectos sobre el sistema hidrogeológico (Fig. 56).

El sistema, antes del evento de subsidencia, correspondía a uno donde la conexión hidráulica entre el acuífero y la mina estaba dada por numerosas estructuras geológicas que atravesaban la cobertura rocosa del caserón que alcanzaba los 105 m de espesor (Fig. 56). En este escenario, el flujo a través de las fallas era lo suficientemente lento para que el agua aumentara de forma considerable su salinidad y sufriera reacciones de oxidación y precipitación de minerales férricos. Por otro lado, las aguas conducidas por estructuras en los niveles profundos de la mina presentan una isotopía más pesada y evaporada, característica de las aguas encontradas al interior de la mina (Fig. 56).

Posterior al evento, se evidenció la formación de un cono de depresión centrado en la subsidencia, dado que la tasa de descenso del nivel piezométrico fue mayor en los pozos de observación que se encontraban más cercanos a la subsidencia. A partir de una modelación analítica fue posible estimar un flujo de entrada máximo entre 250 y 286 l/s, congruente con el promedio de 287 l/s calculado a partir de los volúmenes acumulados en el interior de la mina hasta la fecha. Este cambio en los niveles modificó la dirección del flujo regional, sobrepasando el caudal de aguas subterráneas disponibles en la sección del valle (Fig. 56).

Las aguas que ingresan continuamente por la nueva conexión hidráulica generada bajo la subsidencia aumentan su salinidad en la medida en que aumenta la profundidad, debido sobre todo a la disolución de yeso contenido en la roca fracturada y fragmentada al interior del caserón Gaby 4. Por medio de sondajes posteriores al evento, fue posible determinar que el nivel de sedimentos del acuífero se encuentra al menos 50 m más profundos que en la condición preevento definido por el modelo geológico.

Finalmente, al acumularse en el fondo mina, las aguas ingresadas desde el acuífero se mezclan con las de circulación profunda, aumentan el tiempo de interacción con minerales sulfatados y sulfurados, y dan paso a reacciones de disolución y óxido-reducción, lo que termina por aumentar su salinidad y disminuir su pH. Mientras mayor sea el tiempo de contacto entre el agua y los minerales sulfurados, se incrementa el riesgo de drenaje ácido y la subsecuente incorporación de metales pesados al agua.

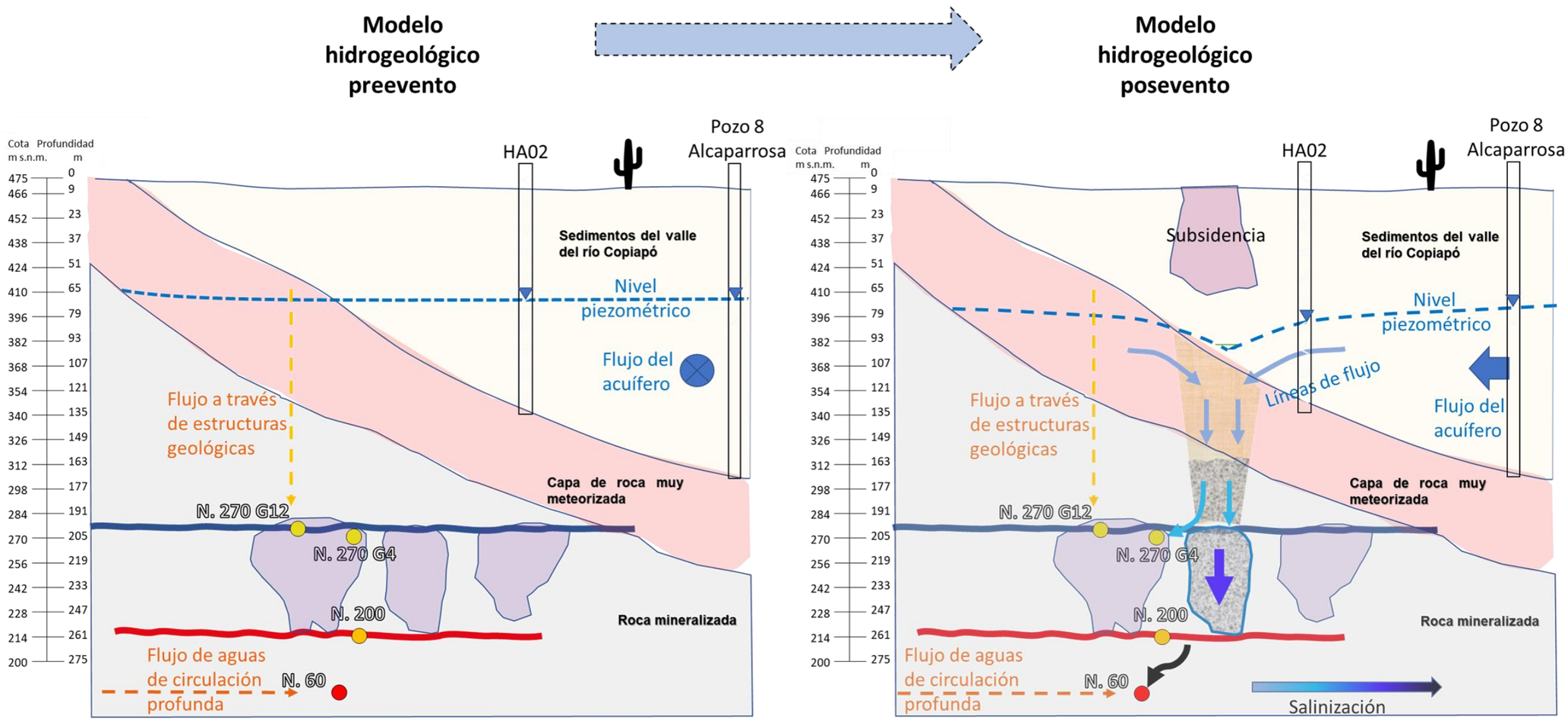


FIG. 56. Modelo hidrogeológico conceptual de la subsidencia en la mina Alcaparrosa. Izquierda: preevento de la subsidencia. Derecha: posevento de la subsidencia.

En la figura 57 se observa la relación de las líneas L1 y L2 MASW con las estructuras geológicas mapeadas por la empresa minera; de este modo se ilustran algunas correlaciones entre la presencia de estructuras con las diferencias de la velocidad de la onda s registradas en los perfiles geofísicos.

Esta información es coincidente con lo mencionado previamente en cuanto a la presencia de zonas de estructuras geológicas correlacionables con las zonas de la subsidencia y el posterior trasvasije de agua desde el acuífero freático asociado al río Copiapó con las labores subterráneas vinculadas a la faena minera Alcaparrosa.

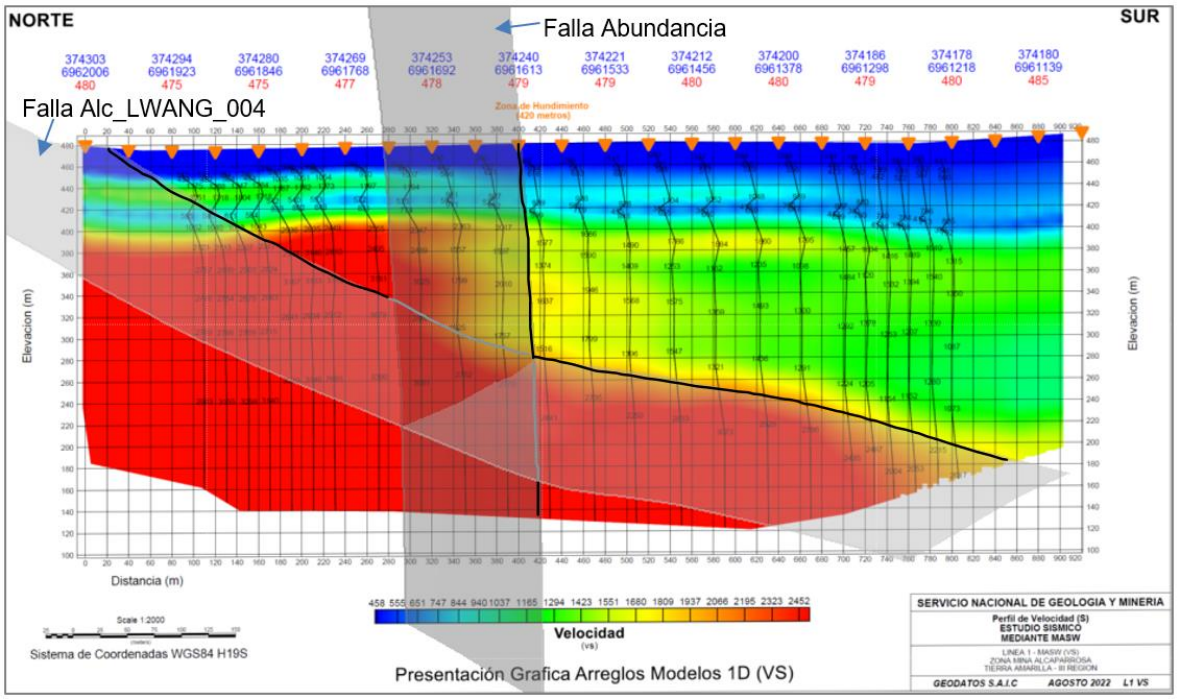


FIG. 57. Vista en perspectiva de la integración de estructuras geológicas en el perfil sísmico L1 MASW. A la izquierda, de color gris y con un manteo subhorizontal, se observa la falla ALC_LWANG_004, y al centro, también en gris y a la derecha de la zona del hundimiento, se aprecia la traza subvertical de la Falla Abundancia, (en colores negro y gris se observa la traza de las estructuras en el perfil). Figura elaborada para este trabajo con datos geofísicos del anexo IX, y con información estructural entregada por la empresa Lundin Mining (comunicación escrita, 2022).

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Luego del evento de subsidencia, los pozos en el acuífero del río Copiapó incrementaron sus tasas de descenso hasta en un 885%. Mediante el análisis piezométrico fue posible establecer que el nivel freático del acuífero formó una geometría de cono cuyo vórtice se ubica sobre la subsidencia. Esto fue resultado de una extracción anormal de agua desde el acuífero a causa de una conexión hidráulica excepcional entre el acuífero y la mina Alcaparrosa en el lugar de la subsidencia. Dado que no se observó una estabilización de los descensos, se puede concluir que la extracción de agua superó la capacidad de aporte del acuífero, por lo que el cono de depresión continuó creciendo hasta que el efecto de la contención de los muros se registró en los niveles del piezómetro HA-02 el 19 de octubre de 2022.

Mediante datos analíticos se estimó que el caudal de ingreso a la mina luego del evento alcanzó un máximo de entre 250 y 286 l/s, y produjo un cono de depresión de un radio de 900 m, lo que es confirmado al evaluar los volúmenes acumulados al interior de la mina. De esta manera, considerando que al 14 de septiembre de 2022 ingresaron 1.236.411 m^3 de agua a la mina, fue posible establecer un promedio de 287,37 l/s para el flujo en el periodo anterior a la construcción de los muros. De acuerdo con el caudal promedio y con los 32 días que demoró en registrarse la recuperación del nivel del acuífero como consecuencia de la construcción de los muros, fue posible determinar que el volumen embalsado en el sector Gaby alcanza los 857.507 m^3. De esta forma, se considera que en el periodo entre la fecha del evento y el 31 de enero de 2023, se han extraído del acuífero 2,548 millones de metros cúbicos de agua, de los cuales gran parte siguen almacenados en el nivel de acopio al interior de la mina. Dado que el caudal de ingreso actual duplica el del ingreso previo al evento, es importante evaluar el efecto que dicho aumento tendrá en la disponibilidad de aguas subterráneas en la cuenca, tanto en el mediano como en el largo plazo.

Por medio del monitoreo de parámetros de CE y pH, y del análisis isotópico e hidrogeoquímico del agua al interior de la mina, fue posible determinar que, posterior al evento, el agua proviene en un 85% aproximadamente desde el acuífero del río Copiapó, mientras que el 15% pertenece a aguas de circulación profunda. Por otra parte, a medida que el agua ingresa a la mina y desciende a los niveles más profundos, ocurren procesos hidrogeoquímicos que producen una salinización progresiva y una disminución sostenida del pH, especialmente en el nivel de acopio al interior de la mina. Estos procesos corresponden

sobre todo a la disolución de sulfatos de calcio y magnesio (aumento de salinidad) y a reacción óxido-reducción de sulfuros (acidificación). Los procesos de acidificación y salinización de las aguas que ingresan a la mina predominan en el nivel de acopio en los niveles inferiores de ella y podrían deteriorar rápidamente la calidad del agua a medida aumenta el tiempo de interacción con sulfuros de hierro y cobre. Mientras mayor sea el tiempo de contacto entre el agua y los minerales sulfurados al interior de la mina, incrementa el riesgo de contaminación por la incorporación de metales pesados al agua.

La existencia de zonas de transporte de fluidos desde el acuífero superficial hacia niveles inferiores de la mina en las cercanías de la zona de subsidencia fue inicialmente sugerida por las prospecciones geofísicas realizadas en el área de estudio (perfiles ERT y MASW, Geodatos SAIC, Anexo IX). Posteriormente, esta hipótesis fue confirmada mediante la comparación de la estratigrafía de los sondajes perforados antes y después del evento, a través de los cuales se evidenció la presencia sedimentos no consolidados a una cota aproximada de 300 m s.n.m justo por debajo de la subsidencia. Esto es consistente con un modelo de derrumbe progresivo del techo del caserón Gaby 4 producto de una sobrexcavación asociada a cuñas de roca, relacionada, además, con el ingreso permanente de agua desde el acuífero mediante las estructuras mayores que servían como vías preferenciales de flujo (Sernageomin, 2023).

Según la información recopilada y levantada en terreno, fue posible establecer que, previo al evento, existía un flujo de agua cercano a 16 l/s a través de estructuras geológicas. Dicho caudal provenía desde el acuífero fluvio-aluvial asociado al río Copiapó, el cual, luego del colapso del caserón Gaby 4, aumentó significativamente debido al colapso del contacto roca relleno. Esto se condice con la información geofísica que muestra que luego del evento se miden zonas de baja resistividad en el sector donde se produjo la subsidencia, las cuales no se habían registrado en estudios anteriores.

6.2 Recomendaciones

Para analizar la evolución del sistema hidrogeológico, se recomienda que la empresa minera mantenga medidas de monitoreo de niveles y de análisis hidrogeoquímicos con frecuencia diaria y semanal, respectivamente. Estos últimos deben contemplar el muestreo del acuífero en pozos de bombeo ubicados aguas abajo, al interior de la mina Alcaparrosa,

en los niveles 270 y 200 y en los niveles inferiores de acopio de agua, y deben contemplar análisis químicos de elementos mayores, menores, trazas e incluir hierro ferroso y férrico.

Además, se recomienda evaluar, por medio de la actualización de los modelos numéricos, la proyección del caudal de ingreso a la mina en el futuro y su efecto en el balance hídrico local y regional, comparándolo con el escenario sin subsidencia documentado por los estudios existentes.

Por otra parte, se recomienda que la empresa minera continúe con los sondajes exploratorios desde la superficie, con el objetivo de determinar la extensión y geometría de la zona colapsada, asociable a las anomalías geofísicas observadas en los estudios realizados por la empresa minera y por el contratista Geodatos SAIC.

Finalmente, se recomienda evaluar obras de remediación permanentes adicionales a la construcción de los muros, con el objetivo de sellar la conexión hidráulica en el contacto entre la roca basal y el relleno sedimentario. Una vez finalizadas las obras de ingeniería, realizar un nuevo muestreo de calidad de agua, para evaluar si existe una contaminación de las aguas del acuífero del río Copiapó a causa de la mezcla con agua embalsada al interior de la mina.

7. REFERENCIAS

Aguirre, I. 1999. Hidrogeología del valle del Río Copiapó entre el Tranque Lautaro y Piedra Colgada. Universidad de Chile, Departamento de Geofísica, Departamento de Geología. Tesis de magíster y memoria de título (Inédito): 266 p. Santiago.

ANAM. 2022. Reportes de ensayo y/o medición. Superintendencia del Medio Ambiente, Sistema Nacional de Información de Fiscalización Ambiental, Anexos reporte titular medidas provisionales expediente MP-062-2022.
https://snifa.sma.gob.cl/General/Descargar/20710005560 (Última visita 06/02/2023).

Arcadis. 2017. Modelo hidrogeológico numérico 2D: resultados calibración, simulación y análisis de sensibilidad. Sistema de Evaluación Ambiental, expediente 2132353190, Anexo 4d Modelo hidrogeológico numérico: 34 p. Santiago.
http://seia.sea.gob.cl/archivos/2017/05/04/Anexos_Cap_4_Ev_Impactos.rar (Última visita 17/04/2023).

Arévalo, C. 2005. Carta Copiapó, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica 91: 53 p., 1 mapa escala 1:100.000. Santiago.

Chow, J.; Angelier, J.; Hua, J.-J.; Lee, J.-C.; Sun, R. 2001. Paleoseismic event and active faulting: from ground penetrating radar and high-resolution seismic reflection profiles across he Chih-shang fault, eastern Taiwan. Tectonophysics 333: 241-259. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00277-8

Clark, A.; Mayer, A.; Mortimer, C.; Sillitoe, R.; Cooke, R.; Senlling, N. 1967. Implications of the isotopic ages of ignimbrites flows, southern Atacama Desert, Chile. Nature 215: 723-724.

Davis, J.L.; Annan, A.P. 1989. Ground Penetrating Radar for High Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy. Geophysical Prospecting 37: 531-551. doi: https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1989.tb02221.x

DGA. 2022. Minuta DCPRH N°23. Dirección General de Aguas, Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos (Inédito): 6 p. Santiago.

Espinoza, M.C.; Troncoso, R.; Pérez, Y.; Castro, R.; Feuker, P.; Lorca, M.E.; Cifuentes, J.; Fuentes, F. 2021. Base de datos de hidrogeología de la cuenca del río Copiapó, región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Base de Datos 10: 28 p., 1 base de datos (1 DVD versión 1.0). Santiago.

Fernández, J.; Espinoza, L. 2020. Compilación y análisis de registro histórico de remociones en masa tipo flujo en la cuenca del río Copiapó, región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-20-83 (Inédito): 81 p. Santiago.*

Golder Associates S.A. 2006. Diagnóstico de los recursos hídricos de la cuenca del río Copiapó y proposición de un modelo de explotación sustentable. Revista CIPER Chile. https://ciperchile.cl/wp-content/uploads/resumen-ejecutivo-golder.pdf (Última visita 06/02/2023).

Hidromas. 2013. Actualización de la modelación integrada y subterránea del Acuífero de la cuenca del río Copiapó. Dirección General de Aguas (DGA) S.I.T. N° 332. Santiago. https://snia.mop.gob.cl/repositoriodga/handle/20.500.13000/6588 (Última visita 31/01/2023).

Hoffstetter, R.; Fuenzalida, H; Cecioni, G. 1957. Lexique Stratigraphique International. *In* Amerique Latine. Centre National de la Recherche Scientifique 5 (7): 449 p. París.

INN. 1987. Norma Chilena Oficial NCh 1333.Of78. Modificada en 1987. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Instituto Nacional de Normalización: 9 p. Santiago.

INN. 2006. Norma Chilena Oficial NCh 409/1. Of2005. Agua potable- Parte 1: Requisitos. Instituto Nacional de Normalización: 13 p. Santiago.

Jol, H.; Bristow, C. 2003. GPR in sediments: Advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide. Geological Society, Special Publication 211 (1): 9-27. London. doi: 10.1144/GSL.SP.2001.211.01.02

Lundin Mining. 2022. Trabajos de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2022. Compañía Contractual Minera Ojos del Salado, Presentación de resultados preliminares (Inédito): 3 p. Copiapó.

Mortimer, C. 1973. The Cenozoic history of the Southern Atacama Desert, Chile. Journal of Geology Society of London 129: 505-526.

Sánchez, F. J. 2022. Hidráulica de captaciones: fundamentos. Departamento de geología Universidad de Salamanca: 16 p. https://hidrologia.usal.es/temas/Hidraulica_captaciones.pdf (Última visita: 19/04/2023).

Segerstrom, K.; Ruiz, C. 1962. Cuadrángulo Copiapó, Provincia de Atacama. Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile 6: 115 p., 1 mapa escala 1:50.000.

Sernageomin. 2023. Informe de investigación accidente alto potencial, Alcaparrosa, 23 de marzo 2023. Informe (Inédito): 37 p. Santiago.**

SRK Consulting. 2018. Technical Report for the Candelaria Copper Mining Complex, Atacama Region, Region III, Chile. Lundin Mining Corporation Canada: 202 p. https://lundinmining.com/site/assets/files/3641/candelaria_2018_tr.pdf (Última visita 06/02/2023).

Troncoso, R.; Espinoza, M.; Pérez, Y.; Castro, R.; Lorca, M.; Vega, N.; Feuker, P.; Arévalo, C.; Mercado, E.; Creixell, C.; Ortiz, M.; Wall, R. 2012. Evaluación hidrogeológica de la cuenca

del río Copiapó, con énfasis en la cuantificación, dinámica y calidad química de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-12-49 (Inédito): 814 p., 2 Vol., 2 DVD anexos, 5 mapas diferentes escalas: 239 p. Santiago.*

VAI Groundwater Solutions. 2020. Informe de los resultados del Modelo Hidrogeológico Conceptual y Modelo Numérico, Mina Alcaparrosa 2020. Sistema de evaluación de impacto ambiental, expediente 2132353190. VAI Groundwater Solutions: 116 p. Santiago.

Xterrae Geología. 2016. Estudio hidrogeológico del área del proyecto Alcaparrosa, comuna de Tierra Amarilla. Sistema de evaluación de impacto ambiental, expediente 2132353190. Xterrae Geología: 90 p. Santiago.

* Documento inédito disponible en la Biblioteca del Servicio Nacional de Geología y Minería.

** Informe disponible en el Departamento de Investigación de Accidentes y Sanciones, Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.

ANEXOS

ANEXO I. Geología del sector Alcaparrosa

Según la carta Copiapó (Fig. 1, modificado de Arévalo, 2005), la geología de la zona de estudio está conformada por secuencias sedimentarias, secuencias volcanosedimentarias e intrusivos. En esta sección se presenta el detalle de las formaciones geológicas que componen el marco regional, así como la descripción de las unidades informales que fueron definidas en la caracterización geológica distrital de la mina Alcaparrosa.

Depósitos aluviales Qal (Cuaternario)

Corresponden a depósitos no consolidados de ripios, gravas y arenas mal clasificadas, que han sido transportados como flujos gravitacionales y que ocupan laderas de baja pendiente y rellenan quebradas. Se han separado en Depósitos aluviales antiguos o inactivos (Qal 1) y Depósitos aluviales activos (Qal 2). Los primeros son los sedimentos aluviales volumétricamente más importantes dentro de la carta y constituyen mantos extendidos de manera lateral, que forman el relleno de quebradas y valles anchos como los de las pampas Los Morados y Medanosa y el Ilano de Llampos. Son medianamente consolidados a no cohesivos y están formados por clastos heterocomposicionales y subangulosos en una matriz limo arenosa.

Los depósitos activos corresponden a gravas y ripios no consolidados, de baja selección, que rellenan cursos disecados en los depósitos anteriores. La formación de estos depósitos se produce por la acumulación de flujos gravitacionales densos (corrientes de barro y/o flujos de detritos) aguas abajo de zonas más altas, que rellenan cursos aluviales antiguos y forman conos aluviales y mantos extendidos. Los flujos se producirían por episodios pluviales esporádicos, pero de gran intensidad.

Se asigna a estos depósitos una edad pleistocena a holocena, ya que erosionan unidades continentales del Mioceno-Plioceno (Mpla) y se encuentran actualmente en actividad.

GEOLOGÍA REGIONAL

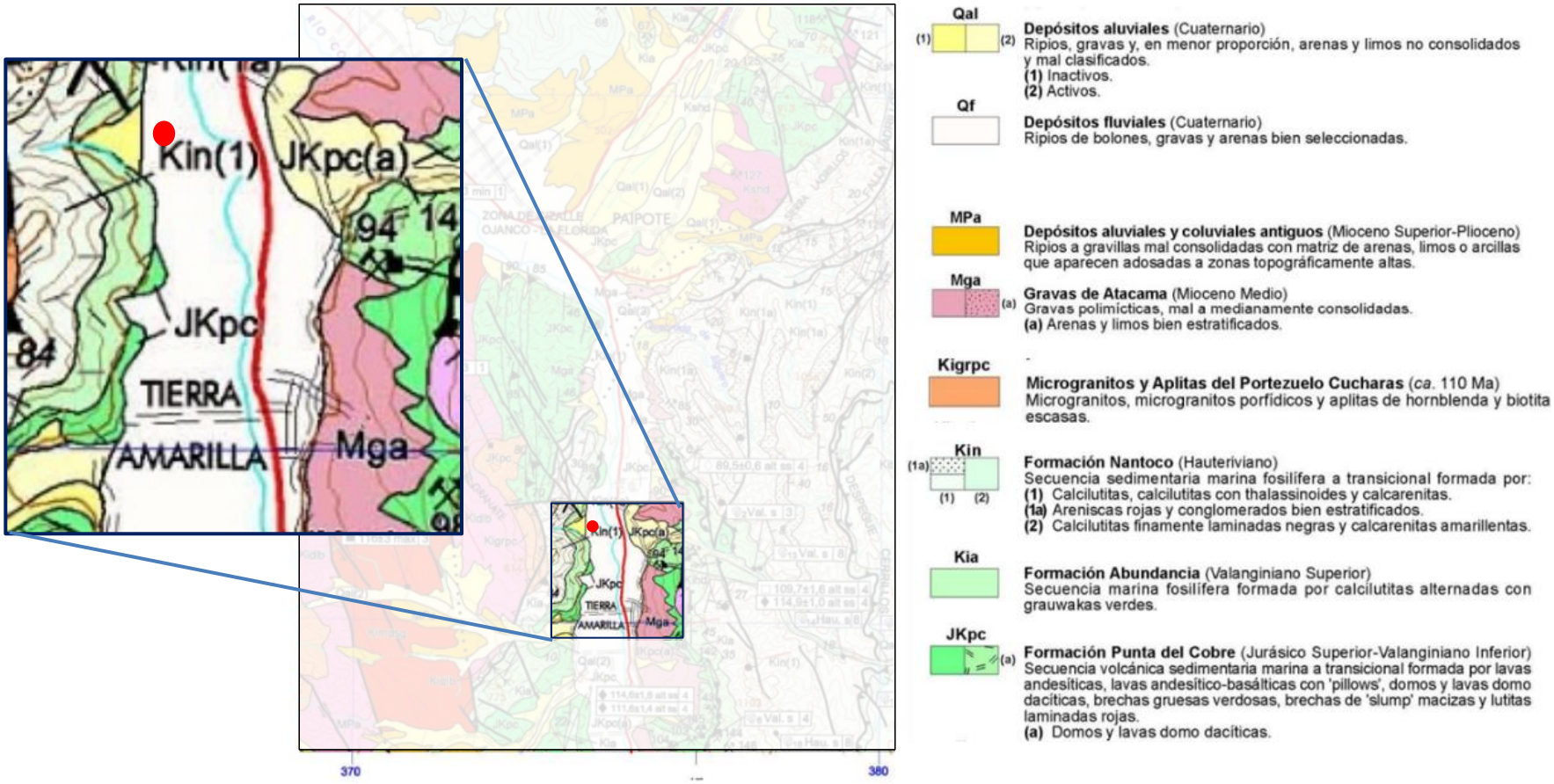


FIG. 1. Extracto de la Carta Copiapó 1:100.000 (Arévalo, 2005) y su leyenda. Se indica con un círculo rojo el sector donde ocurrió la subsidencia.

Depósitos fluviales Qf (Cuaternario)

Comprenden depósitos no cohesivos a moderadamente consolidados del relleno del valle del río Copiapó, que constituyen parte tanto del lecho actual como de las terrazas adyacentes. En su interior están compuestos por ripios de bolones, gravas y arenas bien seleccionadas y estratificación cruzada, los que forman bancos de base acanalada. Se intercalan niveles de arena y limos bien seleccionados y estratificados. Los clastos más gruesos son heterocomposicionales, presentan formas discoidales y generalmente aparecen imbricados.

Se considera que estos depósitos son de edad pleistocena a holocena, ya que están depositados, en parte, en unidades continentales del Mioceno-Plioceno y del Cuaternario (MPa, Qal) y se encuentran actualmente en actividad.

Depósitos aluviales y coluviales antiguos MPa (Mioceno Superior-Plioceno)

Gravillas a ripios mal consolidados con matriz de arenas, limos o arcillas, que constituyen conos aluviales individuales o coalescentes, depósitos coluviales y llanuras de inundación, adosados a zonas topográficamente altas y que aparecen cubiertos por los Depósitos aluviales cuaternarios (Qal). En general, tienen morfología de abanico con zonas apicales estrechas que rellenan secciones altas de quebradas y zonas distales más anchas. En el llano de Chulo, estas gravas se superponen a depósitos asignados a las Gravas de Atacama, por lo que se los considera como depósitos aluviales independientes y posteriores a esta unidad.

Gravas de Atacama Mga (Mioceno Medio) (modificado de Mortimer, 1973)

Se denomina así a una unidad de gravas polimícticas, mal a medianamente consolidadas con niveles de cenizas intercaladas, que se reconocen como terrazas remanentes y que cubren unidades pre Miocenas, en una amplia extensión, en la precordillera de Atacama, entre la franja de Maricunga y la cordillera de la Costa. Su techo lo constituye una superficie de pedimentación (Mortimer, 1973) la que, en algunos lugares, se encuentra cubierta por la ignimbrita San Andrés (Clark *et al*., 1967). En la carta Copiapó, los depósitos que constituyen terrazas y que coinciden con las

características de las Gravas de Atacama se reconocen en las laderas del río Copiapó, al este de Tierra Amarilla. Las gravas exponen en su base una superficie erosiva que define paleo valles en rocas terciarias. La falta de coincidencia entre estos paleovalles (zonas de mayor espesor de grava) y los cursos actuales, indica que las gravas ocuparían una red de drenaje antigua cuyo diseño fue diferente al actual.

Los depósitos consisten en gravas y ripios mal consolidados, con mala a moderada selección, cuya litología es, en general, heterogénea y frecuentemente diferente de la composición de las rocas de los sustratos. La matriz de las gravas es de arena, limo o arcilla. En la base de los depósitos afloran bancos de arenas y limos bien estratificados.

Formación Nantoco Kin (Hauteriviano) (Biese, 1942 *in* Hoffstelter *et al*., 1957)

Secuencia monótona de calizas grises cuyo espesor varía entre 600 y 1.200 m, se apoya, en concordancia, sobre los estratos de la Formación Abundancia y subyace, de la misma manera, a las rocas de la Formación Totoralillo.

Esta formación está compuesta por tres miembros: el Miembro Inferior (Kin 1) formado por 600 a 1.000 m de calcilutitas y calcilutitas limosas (*mudstones*) en capas (10-80 cm de espesor) lateralmente muy continuas con trazas de tipo thalassinoide, en especial comunes hacia la parte media inferior de la secuencia, que culminan con un nivel persistente de calcarenitas bioclásticas e intraclásticas (*grainstones*), visibles al norte de la quebrada Meléndez. Facies de areniscas rojas y conglomerados bien estratificados (Kin 1a) engranan con las calizas del Miembro Inferior desde la quebrada Meléndez hacia el norte. De este modo, a la altura de la quebrada Cinchado, esta subunidad está representada casi en su totalidad por las facies clásticas. El Miembro Superior (Kin 2) es lateralmente muy continuo, alcanza *ca.* 200 m de espesor en promedio para adelgazarse hasta desaparecer en la sierra Ladrillo y está formado por calcilutitas negras con fina laminación y calcarenitas amarillentas.

Formación Abundancia Kia (Valanginiano Superior) (Biese, 1942 *in* Hoffstetter *et al*., 1957)

Biese (*in* Hoffstetter *et al*., 1957) designó con el nombre Capas de Abundancia a una serie de lutitas finamente laminadas ubicada al este de la mina Abundancia. La

formación se presenta como una serie calcáreo-arenosa, de alrededor de 200 m, que aparece cubierta en concordancia por las calizas de la Formación Nantoco. Su relación de base no está expuesta, pues el contacto con la Formación Punta del Cobre coincide, en general, con una falla plana intraestratal (Despegue Punta del Cobre) que oculta la relación estratigráfica. Sin embargo, 1 km aguas abajo de la desembocadura de la quebrada en el río Copiapó, en ambos flancos del valle, el contacto se observa concordante.

La secuencia está formada por clacilutitas y grawakas verdes con abundantes estructuras de *flames* y seudonódulos hacia la parte baja da la formación. Se dispone en capas muy continuas, internamente gradadas a techos de calcilutitas blanquecinas macizas o que desarrollan laminación muy fina. En la parte basal y media de la secuencia, se intercalan capas de volcarenitas verdes oscuras de grano fino a muy grueso y, en algunos sectores, conglomerádicas con gradación normal y bases erosivas. Estas intercalaciones aportan el característico aspecto bandeado a la secuencia.

Formación Punta del Cobre JKpc (Jurásico Superior-Valanginiano Inferior) (Segerstrom y Ruiz, 1962)

Secuencia volcánica y sedimentaria, de estratificación gruesa, que sobreyace concordantemente a los estratos de la Formación La Negra y subyace, con el mismo tipo de relación, a la Formación Abundancia. En la carta Copiapó, aflora en dos localidades: al sur, en ambos flancos del valle del río Copiapó y de la quebrada de Paipote, y al norte, en las laderas este y norte de la quebrada Los Fierros.

La sección basal es exclusivamente volcánica de unos 150 a 200 m de espesor y se compone por lavas andesíticas de gran continuidad areal, en que se emplazan domos y lavas domo dacíticas (JKpc a); y una sección superior clástica y volcánica, de unos 130 a 150 m de espesor, de brechas macizas asociadas a pliegues sinsedimentarios (*slumps*), lutitas laminadas rojas y coladas de lavas lenticulares andesítico-basálticas con *pillows*. En el bloque colgante de la Falla Paipote, la formación está compuesta por una secuencia de metandesitas, brechas y sedimentos clásticos finos metamorfizados (biotitizados, silicilicados y epidotizados), que aflora bajo la Formación Abundancia. En los afloramientos de la quebrada Los Fierros, la formación se expone como una

secuencia de brechas, clasto y matriz-soportadas, de estratificación gruesa y color verdoso característico.

Unidades geológicas distritales definidas en mina Alcaparrosa

Con respecto a la geología local definida por la empresa minera Alcaparrosa, se presenta en la figura 2 un perfil esquemático, donde se ilustran las unidades informales que usa la compañía en función de su mineralización. Estas se describen brevemente a continuación según un reporte técnico del complejo minero de Candelaria (SRK Consulting, 2018).

La mina Alcaparrosa está ubicada en la parte norte del distrito minero Punta del Cobre, en el flanco oeste del valle de Copiapó. Una sección típica de su estratigrafía se muestra en la figura 2. La Formación Punta del Cobre se subdivide en una unidad de Andesita Inferior, que se sucede por brechas volcanoclásticas, hornfels de albitófiro y piroxeno-escapolita intercaladas con granates. La Andesita Inferior consiste en rocas afaníticas, porfídicas, blastoporfídicas y brechadas de color gris oscuro. El albitófiro es una roca dacítica pofirítica de color gris claro con fenocristales de plagioclasa y ocasionalmente "ojos de cuarzo" en una masa con base de sílice afanítica. La brecha volcanoclástica contiene clastos de rocas porfídicas alteradas a feldespato potásico en una matriz con alto contenido de magnetita. Hornfels y granitos se ubican de manera concordante sobre el albitófiro y son los equivalentes metamorfoseados de la parte superior de las formaciones Punta del Cobre y Abundancia. En la parte sur central de la mina un *stock* de granodiorita corta toda la secuencia. La unidad metasedimentaria suprayacente a la Formación Punta del Cobre corresponde probablemente a la Formación Abundancia, esta unidad se divide en dos subunidades: un hornfels de cuarzo y un *skarn* de piroxeno-escapolita-granate con bandas metasomáticas.

Las rocas intrusivas son diques andesíticos, graníticos, dioríticos y monzodioríticos, y un *stock* de diorita que corresponde a una intrusión posmineral con textura equigranular compuesta por plagioclasa y fenocristales de hornblenda. Además, está cortado por diques de andesita con textura porfídica y no contiene ninguna mineralización. Los diques graníticos tienen textura aplítica a porfídica y muestran trazas diseminadas de pirita y magnetita, aunque no presentan ninguna mineralización de cobre. Los diques dioríticos son equigranulares de grano fino y estériles. Los diques monzodioríticos contienen xenolitos de vetillas de magnetita y calcopirita.

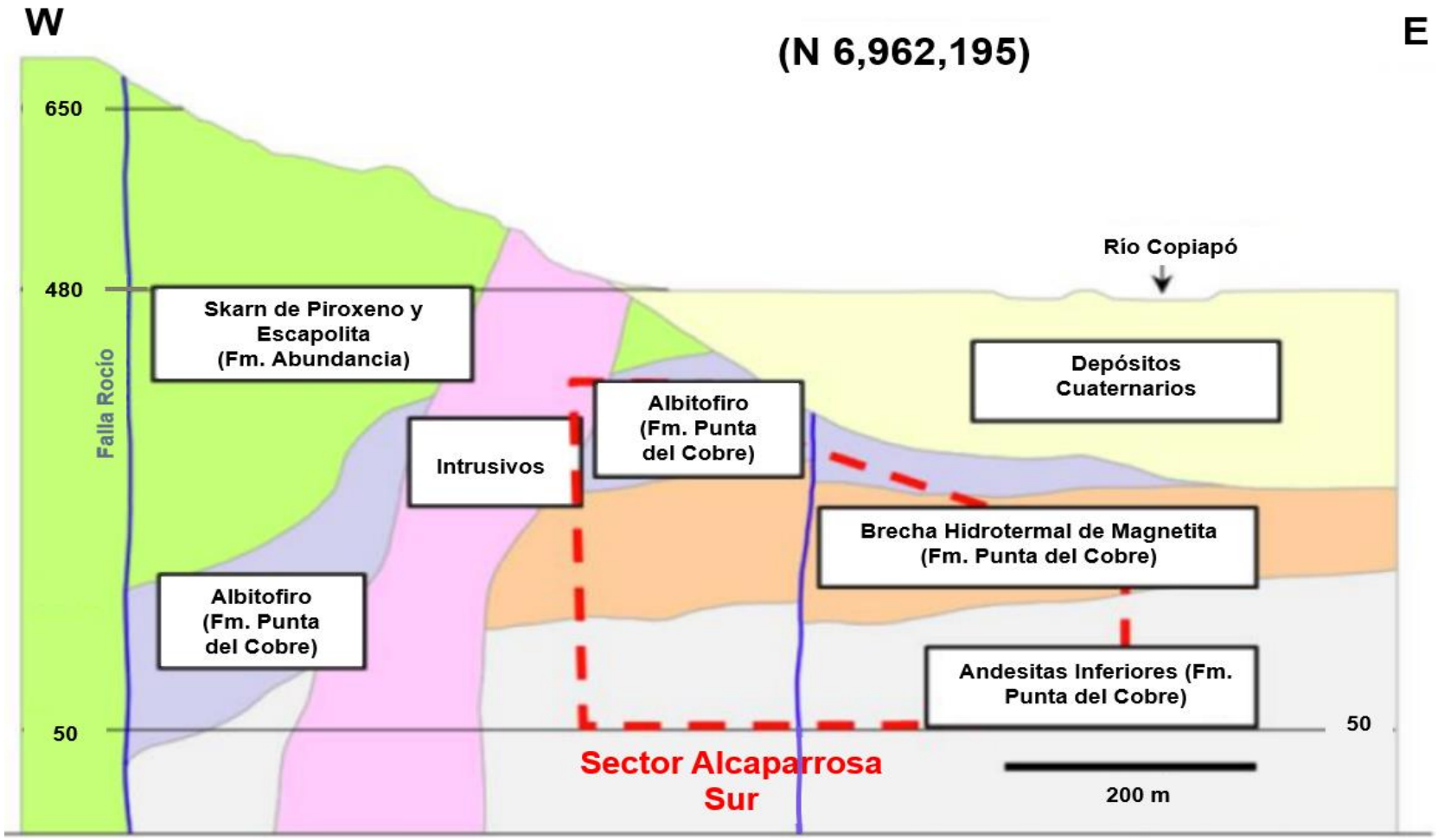


FIG. 2. Perfil geológico de la mina Alcaparrosa. (Modificado de VAI Groundwater Solutions, 2020).

ANEXO II. Antecedentes hidrogeológicos locales del sector Alcaparrosa

Para la descripción de la hidrogeología local del sector se presenta el resumen del modelo conceptual y numérico elaborado por la empresa VAI Groundwater Solutions (2020), en el contexto de la evaluación ambiental del proyecto “Continuidad operacional Alcaparrosa 2025”; el Estudio hidrogeológico del área del proyecto Alcaparrosa (Xterrae Geología, 2016), y la Base de datos de hidrogeología de la cuenca del río Copiapó (Espinoza *et al.,* 2021).

Extracciones efectivas, piezometría y dirección de flujo acuífero del río Copiapó en el sector Alcaparrosa (VAI Groundwater Solutions, 2020)

Históricamente, las extracciones del acuífero del valle de río Copiapó han sido para actividades agrícolas, abastecimiento minero y para consumo de agua potable. Se observa un aumento marcado en las extracciones, de 449 l/s en 1993 a 1.132 l/s en 2005 y luego una reducción del bombeo a 754 l/s en 2018.

El efecto del bombeo del acuífero aluvial ha generado grandes fluctuaciones en la profundidad del agua del valle, que varían entre menos de 20 m b.s.t. en los años 90 y más de 120 m b.s.t. entre 2013 y 2015. Se observa un descenso de hasta 102,5 m en el nivel del acuífero en el periodo entre 2002 y 2013 con una tasa promedio de 0,8 m/mes. Esta profundización del nivel fue producto de la extracción de agua, principalmente por uso agrícola y minero durante los años 90 y hasta 2012.

La dirección de flujo de agua subterránea en el acuífero granular del río Copiapó es de sur a norte, por el eje del valle, con aportes menores de flujo laterales desde las quebradas. Durante junio de 2020, las cotas del nivel en el entorno de la mina Alcaparrosa variaron entre 436,2 y 430,3 m s.n.m., estas corresponden a profundidades entre 44,0 y 56,1 m b.s.t. Desde 2013 en adelante se registra una recuperación en el nivel del acuífero en el sector de Alcaparrosa desde una profundidad máxima de 137 m b.s.t. en marzo de 2013 a 118 m b.s.t. en junio de 2014. Además, se observa que el nivel comenzó a mostrar un importante restablecimiento desde 2017, con un aumento desde 119,6 a 42,6 m b.s.t. en enero de 2020 con una recuperación de 77 m. La recarga generada por los eventos de precipitaciones en la parte media y alta de la cuenca durante los años 2015 y 2017 tiene como consecuencia la recuperación de los niveles

del acuífero de Copiapó observada desde 2017 a enero 2020. En el sector de Alcaparrosa, existe un nuevo descenso en los niveles de los pozos desde febrero de 2020 hasta la actualidad.

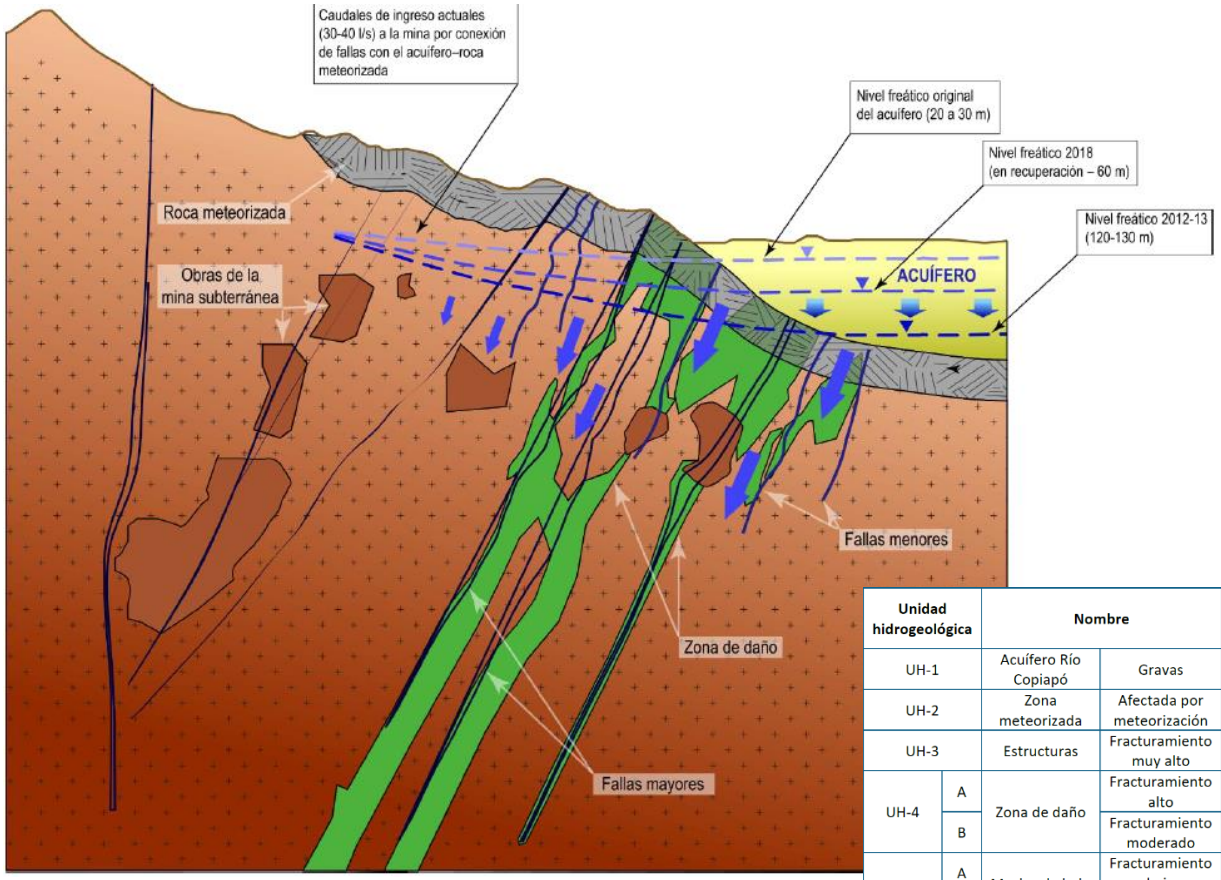
Flujo de agua subterránea pasante en la sección del acuífero Copiapó en Alcaparrosa (VAI Groundwater Solutions, 2020)

El balance de agua para la cuenca del río Copiapó presenta valores negativos según Golder Associates (2006) y Xterrae Geología (2016), esto repercute en que los niveles de agua subterránea han ido disminuyendo en función del tiempo. Debido a los aluviones producidos entre los años 2015 y 2020 se observó una recuperación parcial de los niveles freáticos, en particular en el sector de la mina Alcaparrosa. Se estima un flujo pasante promedio en el acuífero en el sector de Alcaparrosa de 242 l/s para un nivel freático a 60 m (condición de 2018) y para la condición actual (profundidad de nivel de 45 m b.s.t. aprox.) se estima un flujo pasante de 295 l/s. Esto muestra un alza con respecto a la situación más seca del acuífero, donde los cálculos indican un flujo pasante del orden de los 60 l/s.

Unidades hidrogeológicas y parámetros hidráulicos (VAI Groundwater Solutions, 2020)

En el modelo conceptual, se han definido un total de cinco unidades hidrogeológicas (UH) principales en el sector de la mina Alcaparrosa. Las unidades son las siguientes: UH-1 del acuífero del río Copiapó, en el sector del proyecto se estiman espesores de hasta 150 m en el eje del valle y una permeabilidad promedio estimada en 5E-04 m/s (43 m/d); UH-2 en una zona de roca meteorizada, con fracturamiento moderado a alto, de espesores que varían entre 5 y 70 m, con un promedio de 31 m y una permeabilidad promedio estimada de 1E-06 m/s (9E-02 m/d); UH-3 corresponde a zonas de falla, las que en el contexto del desarrollo de la mina Alcaparrosa poseen alta relevancia, debido a que representan vías preferenciales de flujo que conectan el acuífero del río Copiapó con la mina subterránea. Se estima una permeabilidad promedio de 1E-07 m/s (9E-03 m/d). El resto de las unidades son rocas de mayor competencia, las que incluyen a la zona de daño asociada a estructuras (UH-4) y la roca fresca (UH-5) de muy baja permeabilidad.

Se presenta en la figura 3 un perfil del modelo conceptual hidrogeológico que incluye un resumen con las permeabilidades hidráulicas y los valores RQD (Rock Quality Design) definidos para cada unidad hidrogeológica y en la figura 4 se observa un perfil con las unidades hidrogeológicas definidas en el estudio de VAI Groundwater Solutions (2020).



Unidad hidrogeológica		Nombre		K min (m/día)	K prom (m/día)	K max (m/día)	RQD min (%)	RQD prom (%)	RQD max (%)
UH-1		Acuífero Río Copiapó	Gravas	1.80E+01	4.32E+01	1.37E+02	-	-	-
UH-2		Zona meteorizada	Afectada por meteorización	8.64E-03	8.64E-02	8.64	6	35	65
UH-3		Estructuras	Fracturamiento muy alto	8.64E-04	8.64E-03	8.64E-02	0	35	40
UH-4	A	Zona de daño	Fracturamiento alto	8.64E-05	4.32E-03	8.64E-03	40	45	50
	B		Fracturamiento moderado	8.64E-05	8.64E-04	8.64E-03	50	58	65
UH-5	A	Macizo de bajo fracturamiento	Fracturamiento bajo	8.64E-07	8.64E-05	8.64E-04	65	73	80
	B		Fracturamiento muy bajo	8.64E-08	8.64E-07	8.64E-05	80	82	100

FIG. 3. Esquema conceptual de la condición hidrogeológica de la mina Alcaparrosa y tabla resumen con las características de conductividad hidráulica y RQD (Rock Quality Design) mínima, máxima y promedio de las unidades hidrogeológicas. (Tomada de VAI Groundwater Solutions, 2020).

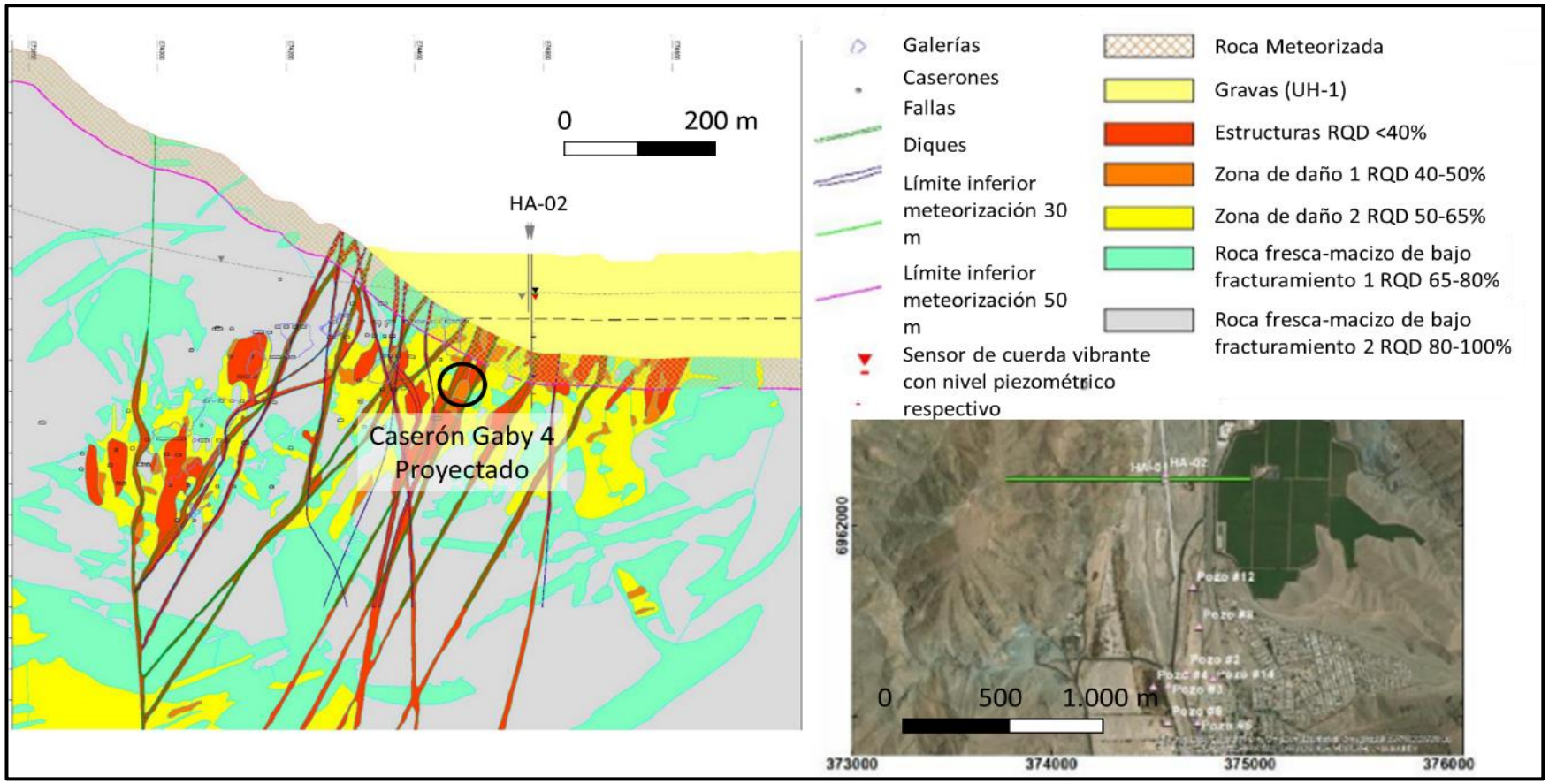


FIG. 4. Perfil hidrogeológico oeste-este del sector Alcaparrosa sur. (Tomada de VAI Groundwater Solutions, 2020).

Conexión hidráulica acuífero y mina Alcaparrosa

A partir de la descripción presentada por VAI Groundwater Solutions (2020), existe una serie de estructuras subverticales, con manteos principalmente hacia el oeste y rumbos en dirección NO-SE pertenecientes a la UH-3, que facilitan la conexión hidráulica entre el sistema del acuífero y la mina subterránea. Cada sistema de falla principal tiene asociada una zona de daño amplia (UH-4), muy prevalente hasta la cota 100 en el sector del valle según los modelos geotécnicos de CCMO. Estas fallas principales corresponden a vías preferenciales de flujo desde la parte más profunda del acuífero hacia las obras subterráneas ubicadas hacia el oeste del eje del valle.

Caudales de ingreso a la mina Alcaparrosa

Se comenzaron a registrar los caudales de bombeo de la mina subterránea desde enero de 2013. En el periodo entre enero de 2013 y febrero de 2014 se observaron caudales promedio entre 4,2 y 8,8 l/s, con un aumento de caudal promedio de 10,7 l/s para el periodo comprendido entre marzo de 2014 y junio de 2017. Desde mayo de 2018 a octubre de 2020 se observan variaciones en el caudal promedio mensual entre 19 y 37,4 l/s, con un promedio anual de 25,3 l/s (VAI Groundwater Solutions, 2020). La perforación de sondajes representa una vía preferencial de flujo hacia las labores subterráneas, es por ello por lo que se ha realizado un programa de sellado con la instalación de tacos de madera y la inyección de una resina, lo que ha generado una reducción casi total en el caudal de ingreso.

El caudal de ingreso de la mina está influenciado por el desarrollo de caserones y galerías que interceptan fallas mayores o zonas de fracturamiento importantes y la perforación de sondajes de exploración, especialmente en dirección este hacia el eje del valle. Los sondajes actúan como vías preferenciales de flujo cuando interceptan las fallas mayores. En términos de la conexión hidráulica entre la mina subterránea de Alcaparrosa y el acuífero del valle del río Copiapó hay dos factores a considerar al momento de comprender el sistema hídrico subterráneo. El primer factor es la distancia desde el acuífero del río Copiapó y las labores subterráneas, mientras más alejado de la fuente de agua (acuífero), tanto vertical como horizontalmente, menores son los caudales debido a la tortuosidad en el trayecto que recorre el agua siguiendo complejos sistemas estructurales con distinta orientación y grados de apertura. El segundo factor

es la carga hidráulica, se han registrado variaciones del orden de 100 m en el nivel de agua en las gravas del río Copiapó, lo que ha tenido una relación directa sobre la magnitud de los afloramientos en la mina. La tendencia al aumento en el nivel del acuífero desde 2017 hasta fines de 2019 conlleva un mayor potencial de infiltraciones en la mina y de mayor escala.

Modelo numérico mina Alcaparrosa

En el modelo desarrollado por la consultora Arcadis (2017), en el contexto de la evaluación ambiental del proyecto Continuidad Operación Alcaparrosa con resolución de calificación ambiental (RCA) favorable en diciembre de 2017, se presentan los caudales a la mina para los casos sin proyecto y con proyecto, en conformidad con los resultados obtenidos en los perfiles modelados. En el informe se estimó que los valores de caudales infiltrados sin proyecto alcanzaban a 3,99 l/s, y los con proyecto a 12,10 l/s.

En el año 2020, la consultora VAI genera un nuevo modelo numérico de los caudales de ingreso a la mina, en relación con la evaluación ambiental del proyecto Continuidad operacional a corto plazo mina Alcaparrosa, aprobado en agosto de 2021. Los resultados indican que los caudales de infiltración promedio futuros de la mina se mantendrán al alza, bajo los 32 l/s anuales, con un promedio máximo en el año 2025 de 31,2 l/s para la extensión de la vida operacional. El modelo no muestra descensos mayores a 1 m asociados a la actividad minera en las inmediaciones de la mina, estos no afectan la capacidad productiva de los pozos cercanos, donde los principales cambios de nivel están asociados a la simulación de variaciones distritales de las condiciones ambientales.

Caracterización química y clasificación de las aguas subterráneas

En el trabajo realizado por Espinoza *et al.* (2021) se consideraron 223 muestras para hacer la caracterización de las aguas subterráneas, de las cuales 212 corresponden a aquellas tomadas en pozos y 3 en norias y piques.

Por otra parte, el informe del modelo conceptual realizado por VAI Groundwater Solutions (2020) presenta los resultados del análisis de agua para muestras tomadas en el sector de la mina durante octubre de 2015 y en el río Copiapó en 1994. Además, este informe menciona que se destaca que la muestra A1 (nivel 200, sector Jocelyn) es más somera y está más cerca del eje del valle, mientras que las muestras A2 (nivel 134, sector Jimena), A3 y A4 (nivel 40 y 60, sector Rocío) se encuentran hacia los cerros en el borde oeste del valle. La muestra A6 representa el pozo 14 ubicado en el acuífero del río Copiapó.

Parámetros fisicoquímicos

En el estudio hidrogeológico regional de la cuenca del río Copiapó (Troncoso *et al.*, 2012) se observó que las aguas del área de estudio tenían un pH variable entre 3,5 y 8,5 y un valor promedio de 7,6. La mayor parte de las muestras estaban comprendidas entre 6 y 8 y dominadas por la presencia de bicarbonatos. La conductividad mínima medida fue de 92 µS/cm, en la mina el Refugio en el sector de Maricunga; mientras que la muestra con la máxima conductividad, de 10.050 µS/cm fue aquella ubicada en la minera Casale en el este de la cuenca. El valor promedio para el área de estudio es de 2.124,3 µS/cm. La distribución espacial evidencia que la conductividad aumenta en dirección de las líneas de flujo, dado que a medida que el agua avanza, va enriqueciéndose en los elementos aportados por la roca de caja y los sedimentos a través de los cuales circula el agua. Se determinó la salinidad del agua subterránea, evaluando el contenido de SDT (sólidos disueltos totales a 103 ºC) medido en las muestras analizadas. Del total de ellas el 28% se clasifica como agua dulce y el 72% como agua salobre. Las aguas dulces se distribuyen principalmente en los sectores altos de la cuenca, no obstante, se observan algunas muestras salobres, mientras que en los sectores más bajos, las aguas son en su mayoría salobres.

Según la información presentada por Xterrae Geología (2016), “en el sector de Alcaparrosa las muestras de los caserones Jimena y Rocío (A2, A3 y A4) son indicadores de la existencia de agua subterránea que se encuentra almacenada en la roca fracturada y que se caracteriza por tener un pH neutro a alcalino (7,37 a 8,64), pero con una conductividad eléctrica elevada (entre 6.160 y 10.380 µS/cm). Las muestras A1 (nivel 200, sector Jocelyn) y A6 (pozo 14) son representativas del acuífero del río Copiapó, con un pH neutro (7,46 y 7,78), aunque con una conductividad eléctrica mucho menor para ambas (2.500 y 1.680 µS/cm)”.

Por otra parte, la química de las cinco muestras tomadas entre los niveles 170 y 300 en la mina Alcaparrosa en 2018 (VAI Groundwater Solutions, 2020) tienen características similares, con un pH neutro a levemente alcalino (7,86 a 8,14) y una conductividad eléctrica entre 1.474 y 3.170 µS/cm.

Contenido de iones mayoritarios y hierro

En el caso de las aguas de la cuenca del río Copiapó (Troncoso *et al.*, 2012), el carbonato varía desde 1,08 a 31,51 mg/l, con un promedio para la zona de 0,5 mg/l. El bicarbonato se presenta entre 16,51 y 1.503 mg/l, con un promedio de 240 mg/l, con un aumento de las concentraciones hacia la desembocadura del río Copiapó. Para las aguas dulces, las concentraciones de bicarbonato medido en la cuenca varían de 26,2 a 269,9 mg/l, lo que es coherente con el intervalo esperado. Para las aguas salobres el bicarbonato está entre 15,51 y 1.503 mg/l, con un promedio de 240 mg/l. No se observa una mayor correlación espacial, su distribución es variable en la zona de estudio.

Regionalmente, el sulfato presenta muy buena correlación con la conductividad. Se reconoce, en general, un aumento del sulfato a lo largo de las líneas de flujo. Las concentraciones de SO_4 varían de 13 a 3.366 mg/l, con un valor promedio en el área de 785 mg/l. Al igual que la conductividad eléctrica, la concentración de sulfatos aumenta hacia aguas abajo.

Por su parte, el cloruro en las aguas de la cuenca presenta valores entre 2,8 y 1.510 mg/l, con un promedio de 196 mg/l. Los ríos Pulido, Jorquera y Manflas tienen concentraciones de Cl^- menores que 50 mg/l, y una vez que ellos se juntan y dan origen al río Copiapó, se observa un aumento en la concentración de este anión;

principalmente con valores entre 2,3 y 550 mg/l, clasificados como concentraciones muy bajas a media.

El calcio muestra una buena correlación con el sulfato y la conductividad eléctrica, ya que se evidencia un paulatino aumento en su concentración a medida circula a través del valle del río Copiapó. Presenta valores entre 8 y 770 mg/l, con un promedio de 248,2 mg/l.

El sodio, al igual que el sulfato, la conductividad eléctrica y el calcio, aumenta hacia aguas abajo. Este presenta valores entre 9,2 y 2.350 mg/l, con un promedio de 193,66 mg/l, con un aumento progresivo hacia el oeste. En general toda el área evidencia valores bajos a muy bajos, menores que 150 mg/l.

El magnesio presenta valores entre 0,4 y 260 mg/l, con un promedio de 62,27 mg/l, con un claro aumento hacia el oeste y predominancia de valores de concentración moderados (20-60 mg/l). En la parte baja de la cuenca se registran las concentraciones más altas, mayores que 60 mg/l. Al igual que para el sulfato, el calcio y otros, el aumento progresivo de las concentraciones de este catión se debe a la absorción de este elemento desde los sedimentos que atraviesa el agua en su camino.

El hierro posee concentraciones que varían entre 0,12 y 45,9 mg/l, con un promedio de 1,41 mg/l. Si bien las concentraciones más bajas de este elemento se presentan en las cabeceras de la cuenca, no se observa una correlación espacial en la variación de la concentración.

Según el estudio de Xterrae Geología (2016), “en el sector de Alcaparrosa, las muestras de los caserones Jimena y Rocío (A2, A3 y A4) son representativas de la existencia de agua subterránea que se encuentra almacenada en la roca fracturada y se caracteriza por tener altas concentraciones de sulfato (1.676 a 2.192 mg/l), calcio (742 a 1.232 mg/l), cloruro (745 a 2.566 mg/l) y sodio (593 a 1.119 mg/l). Por otra parte, las muestras A1 (nivel 200, sector Jocelyn) y A6 (pozo 14) son representativas del acuífero del río Copiapó donde el sulfato sigue siendo el anión dominante (896 y 654 mg/l), sin embargo, el agua también posee un mayor contenido de bicarbonato (179 y 198 mg/l), junto con calcio (273 y 172 mg/l), cloruro (281 y 198 mg/l) y sodio (151 y 103 mg/l)”.

Las muestras de 2018 son del tipo sulfatado-cálcico/sulfatado-sódico con mayores concentraciones de sulfato (498 a 1062 mg/l), cloruro (86 a 392 mg/l), calcio (197 a 467 mg/l), bicarbonato (149 a 200 mg/l) y sodio (137 y 306 mg/l) (VAI Groundwater Solutions, 2020). También se destaca la presencia de nitrato (3 a 72 mg/l) que podría estar relacionado con recarga hacia el acuífero por infiltraciones de agua desde los canales de regadío y el riego con agua enriquecida en fertilizantes.

Clasificación de las aguas subterráneas

En el sector donde se ubica la mina Alcaparrosa (sector 4, del informe de Troncoso *et al.,* 2012) se clasificaron 27 muestras, que representan el 12% del total. Al igual que en el sector anterior, las aguas son sulfatado-cálcicas, y también se observa un aumento en el porcentaje de cloruros.

De las muestras tomadas en el interior de la mina durante el estudio de Xterrae Geología (2016), se identificaron dos grupos: A1 y A3, de composición sulfatada-cálcica y que tienen una composición similar al acuífero del río Copiapó, y las muestras A2 y A4, de composición clorurada cálcica y que, comparado con las anteriores, presentan una menor concentración de magnesio. Por otra parte, las muestras de 2018 (VAI Groundwater Solutions, 2020) son del tipo sulfatado-cálcico/sulfatado-sódico y muestran mayores concentraciones de iones disueltos.

Análisis isotópicos

Las aguas subterráneas recolectadas desde pozos profundos y norias en la cuenca del río Copiapó presentan valores de δ^{18o} entre -5,15 y -13,0‰ y valores de δH entre -55,8 y -102‰. Las aguas de vertientes se encuentran en un intervalo similar, con valores de δ^{18o} entre -5,46 y -11,01‰ y valores de δ^{2}H entre -57,7 y -84,8‰. La composición isotópica de las aguas subterráneas de la cuenca del río Copiapó se ubica por lo general bajo la línea meteórica local (LML) ($\delta^{2}H=8,0745* \delta^{18}O+13,473$) y excepcionalmente sobre esta línea. Su distribución permite trazar una línea de tendencia con una pendiente de 4,9, inferior a la de la LML y a la de la línea de evaporación determinada para las aguas superficiales, lo que se puede interpretar como una línea de evaporación a partir de un agua ligera, de composición isotópica similar a la del agua de lluvia colectada en las partes más altas de la cuenca, que se vuelve cada vez más pesada a

lo largo de esta línea de evaporación. Es posible distinguir que las aguas procedentes de labores mineras (agua en fracturas) se sitúan más hacia la derecha en esta línea de evaporación que las del valle de Copiapó y son incluso más pesadas que las de la parte baja de la cuenca. La correlación positiva entre los valores de δ^{18o} de las aguas subterráneas y los parámetros como el total de sólidos disueltos totales (SDT) valida la hipótesis de que este enriquecimiento en isótopos pesados se debe a procesos de evaporación.

Como parte del estudio de 2016, Xterrae Geología también tomó muestras para el análisis de isótopos ambientales. En este estudio se señala que “Las muestras A1, A2 y A6 son muy similares a las del acuífero de río Copiapó, en cambio las muestras A3 y A4 están más enriquecidas en $\delta^{18}O$ y deuterio, siguiendo la tendencia evaporativa mostrada por las aguas superficiales y subterráneas colectadas en distintos sectores de la cuenca. Esto relaciona las aguas someras y profundas con un origen común y que ha generado procesos de diferenciación isotópica dados por las variaciones en los tiempos de infiltración hacia el acuífero y las estructuras”.

ANEXO III. Modelos geológicos y estructurales del sector Alcaparrosa

El análisis de los modelos de geología y de estructuras de corto y mediano plazo generado por la minera permitió caracterizar detalladamente la estratigrafía y las estructuras del sector Alcaparrosa.

A partir de la estratigrafía de los pozos presentes en el sector fue posible establecer que la cobertura de sedimentos del valle corresponde a suelos finos a muy finos, producto de grandes eventos de inundación. Esta cobertura de limos y arcillas cubre potentes intercalaciones de conglomerados arenosos y arenas de baja compactación con alto contenido de finos y lentes de arcilla. En profundidad disminuye el contenido de finos, lo que daría origen a una unidad de alto potencial hidrogeológico que conduce el flujo de agua subterránea que circula bajo el río Copiapó. Bajo la capa anterior se disponen conglomerados arcillosos bien cementados que podrían correlacionarse con la unidad de Gravas de Atacama que aflora al este del valle. La información completa de la estratigrafía del relleno sedimentario se puede encontrar en el anexo IV Perfiles estratigráficos pozos sector Alcaparrosa.

Por otra parte, bajo la cobertura sedimentaria se encuentran las unidades de roca que contienen los minerales de mena en vetas albergadas en rocas volcánicas y metamórficas muy alteradas de las formaciones Abundancia y Punta del Cobre (Fig. 5).

Las rocas del sector de Alcaparrosa se caracterizan por un fuerte control estructural que ha sido ampliamente documentado a través del mapeo de fallas y otras estructuras al interior de la mina. En términos generales, la geología estructural responde a una configuración de fallas regionales de extensiones kilométricas que controlan la orientación norte-sur y noroeste-sureste de fallas de menor dimensión (Fig. 6). Por un lado, tales fallas hospedan las zonas de mineralización principal; y por otra parte, extienden las zonas de roca meteorizadas y de baja calidad geomecánica en profundidad (ver Fig. 4). Además, conducen los flujos de agua a través de la roca, conectando hidráulicamente el acuífero con la mina subterránea (VAI Groundwater Solutions, 2020).

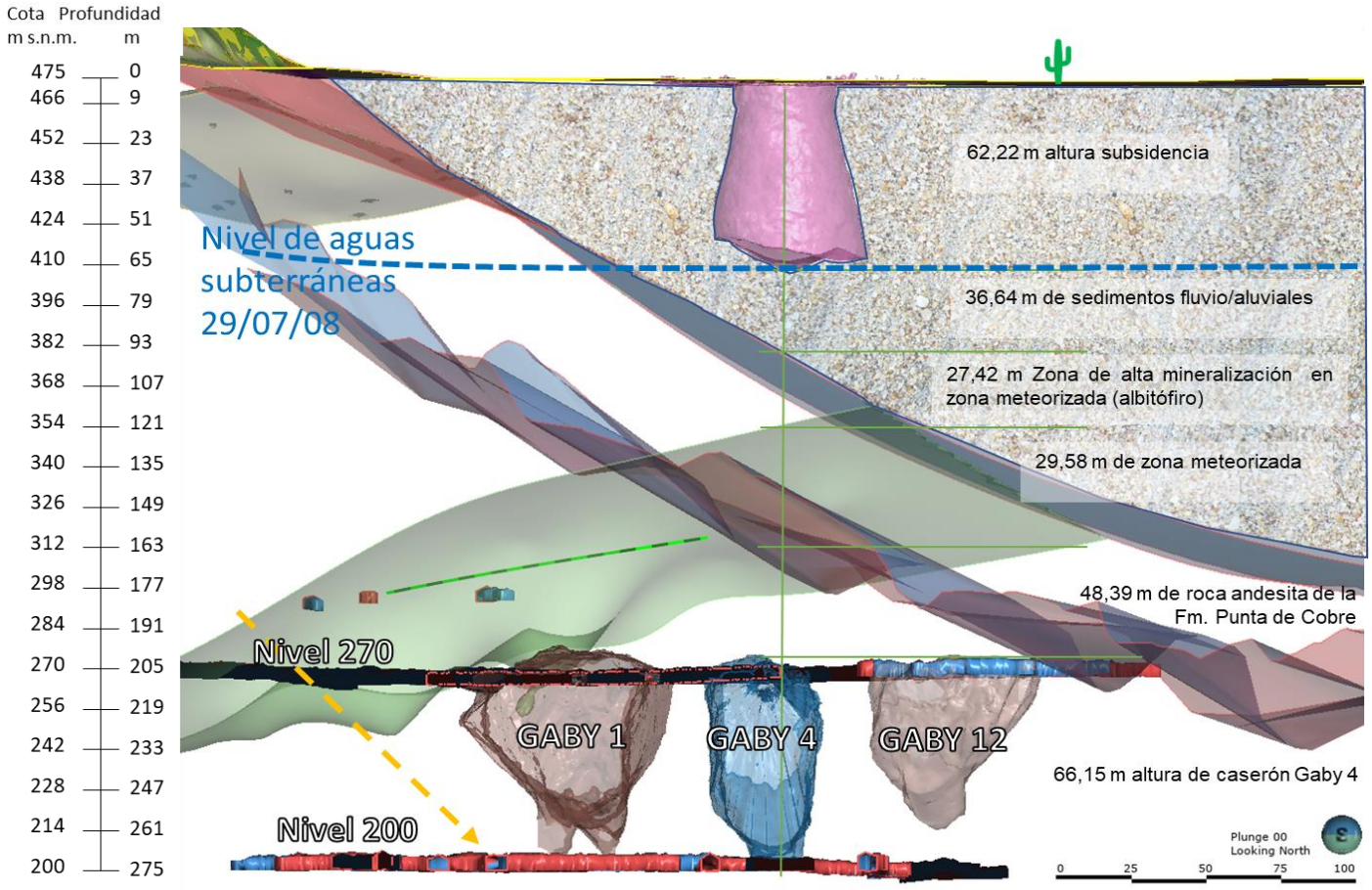


FIG. 5. Perfil geológico construido con base en el modelo geológico de la mina.

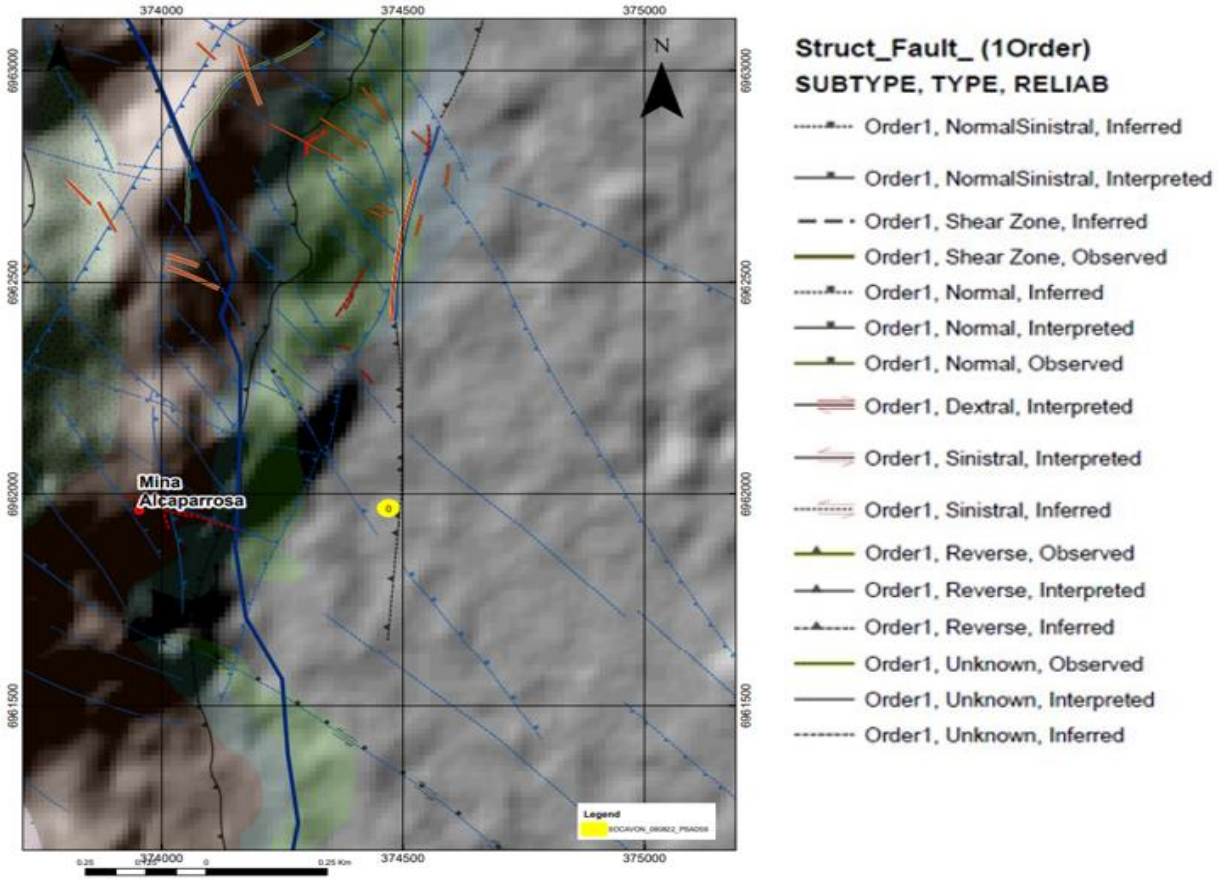


FIG. 6. Mapa en planta de estructuras geológicas principales presentes en el sector de Alcaparrosa. En amarillo se muestra la ubicación de la subsidencia. (Tomado de Lundin Mining, 2022).

ANEXO IV. Perfiles estratigráficos pozos sector Alcaparrosa

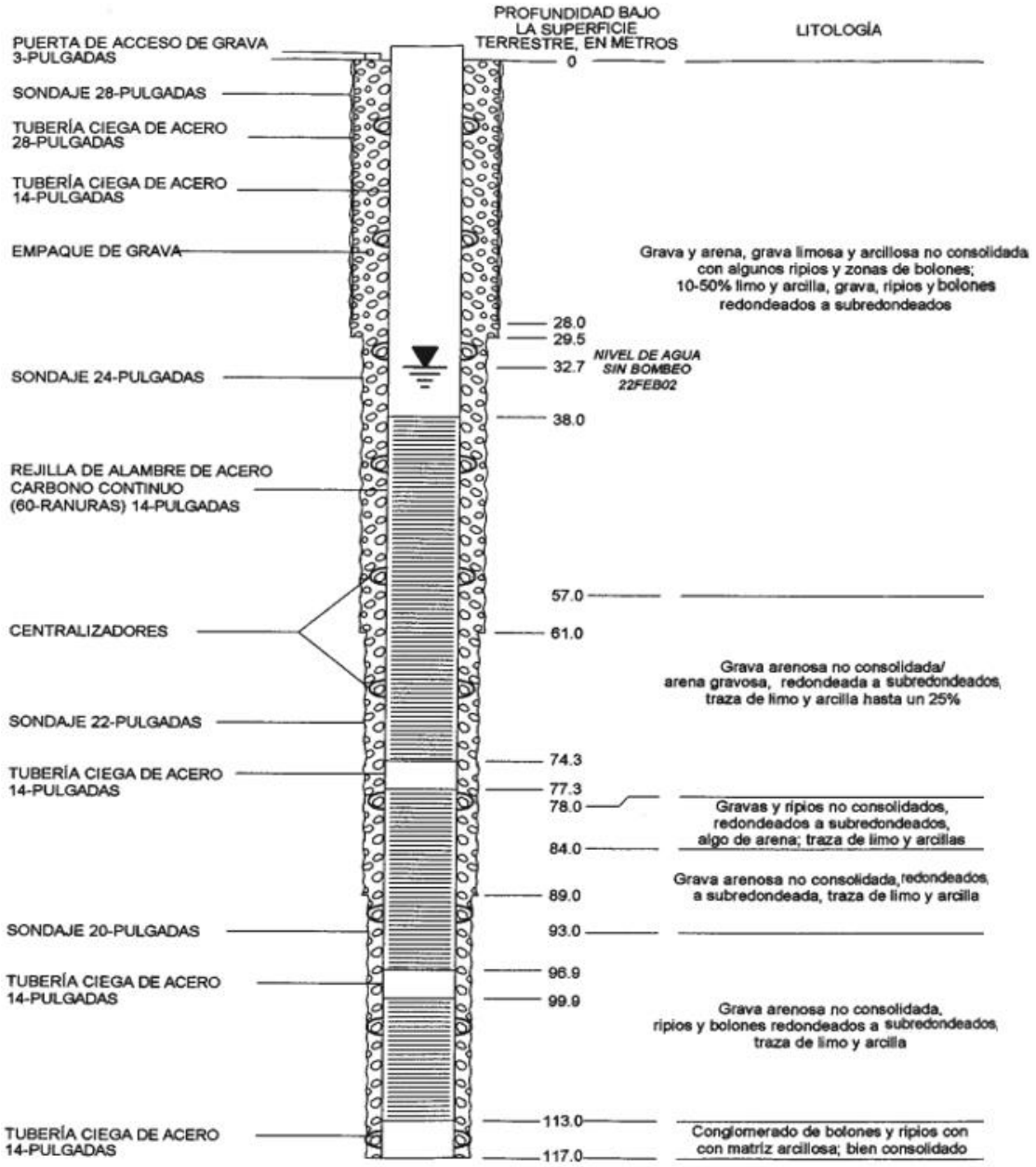


FIG. 7. Diagrama esquemático de la construcción del pozo de producción Alcaparrosa N° 8, Tierra Amarilla, Chile. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

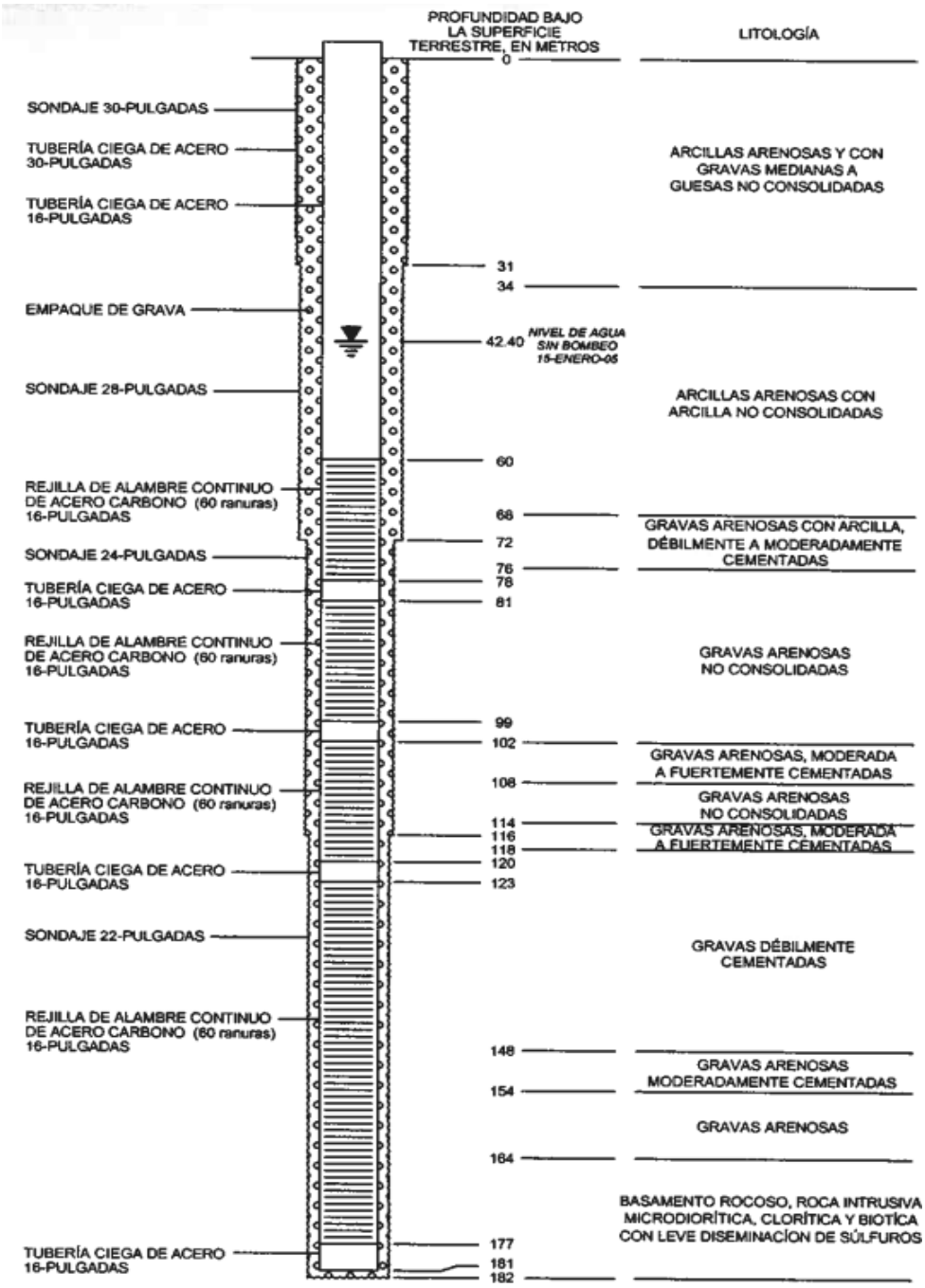


FIG. 8. Diagrama esquemático de la construcción del pozo de producción Alcaparrosa N° 12, Tierra Amarilla, Chile. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

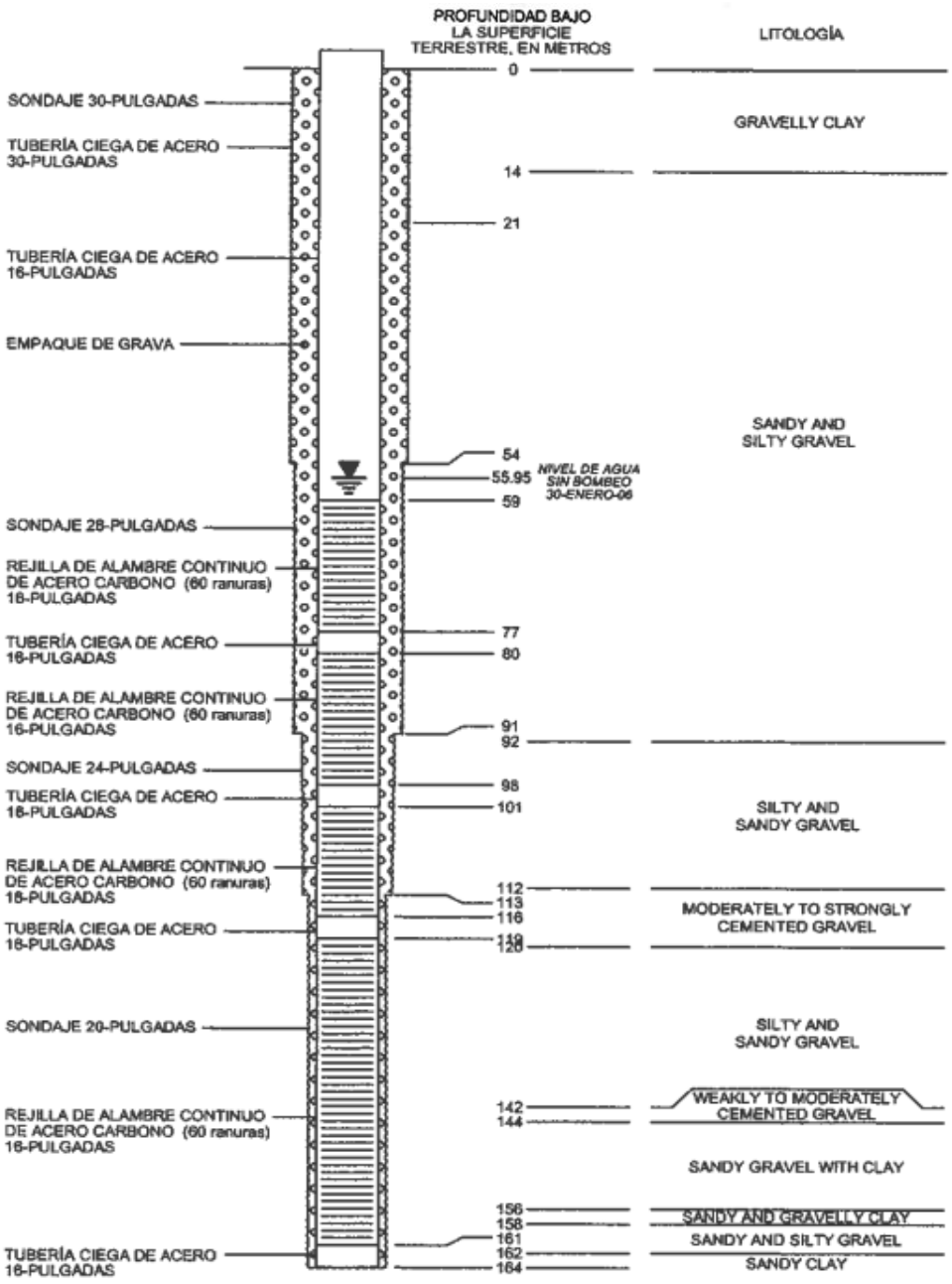


FIG. 9. Diagrama esquemático de la construcción del pozo de producción Alcaparrosa N° 14, Tierra Amarilla, Chile. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

Groundwater Solutions

FICHA MAPEO CUTTING

Ubicación:	Alcaparrosa superficie	017-09202 Alcaparrosa			Pozo:
Este:	374578.013	-90	Mapeado por:	A Lopez	HA-02
Norte:	6962271.082	0	Fecha Mapeo:		
Cota:	471.936		Máquina:	KWL 700RC	

PROF. (m)		Litología	Tamaño Chips (cm)	TAMAÑO %								Color	Fracturas relleno	alt.	min.	OBSERVACIONES
				Gravas			Arena			Finos						
desde	hasta			G	M	F	G	M	F	L	A					
0	10	Sedimentos no consolidados	0.2 - 2	50	20	20	10					Clastos pardo, rojizos, gris, blanquecinos	-	-	-	Gravas polimícticas, moderada a baja selección. Las gravas se componen de clastos andesíticos, riolíticos, graníticos, granodioríticos, calcareos, bien redondeados. No se observa presencia de matriz fina, pérdida de material fino por espacio anular durante perforación simultánea.
10	22	Sedimentos no consolidados	0.1 - 1.1		50	30	20	10				Clastos pardo, rojizos, gris, blanquecinos	-	-	-	Gravas polimícticas subredondeadas de baja esfericidad, de composición intrusiva y extrusiva. Disminuye tamaño de chips y se hacen más homogéneos. Se pierde fracción fina por espacio anular, debido a sistema de perforación simultaneo.
22	24	Sedimentos no consolidados	0.5 - 1.8	40	30	30						Clastos, gris blanquecino claro	-	-	-	Gravas con clastos intrusivos y extrusivos de mayor tamaño respecto a tramo anterior. Se pierde toda la fraccción fina.
24	64	Sedimentos no consolidados	0.3 - 1.2		40	30	20	10				Clastos pardo, rojizos, gris, blanquecinos	-	-	-	Gravas no consolidadas, polimicticas, con clastos de intrusivo y lava de tamaño relativamente mal clasificado, la pérdida de material fino durante la perforación indica que se trata de material no consolidado.
64	90	Sedimentos no consolidados	0.1 - 1.1			30	40	10	10	10		Clastos pardo, rojizos, gris, blanquecinos	-	-	-	Gravas no consolidadas, polimiícticas, con clastos de rocas intrusivas y extrusivas. Granulometria más homogénea y más fina respecto a tramo anterior, mayor contenido de chips fracturados señalan posibles bolones de mayor tamaño respecto a tramo anterior.
90	104	Sedimentos no consolidados	0.4 - 1.4		50	40	10					Clastos pardos, rojizos, gris, blanco, verdes	-	-	-	Gravas polimícticas no consolidadas con clastos de composición ígnea intrusiva y extrusiva, pérdida completa de matriz fina por espacio anular. Tamaño mayor de chips, además de presentar cantos redondeados indica reducción del tamaño de los mismos.
104	110	Sedimentos no consolidados	0.1 - 1.1		20	30	35	10	5			Clastos color pardo, rojo, gris blanquecino, gris oscuro	-	-	-	Gravas no consolidadas polimicticas de composición intrusiva y extrusiva. Se reconocen chips con cantos redondeados. Aumenta contenido de chips tamaño grava fina fracturados, indicando calsots de mayor tamaño. Algunos clastos con rastros de ox Fe escaso.

FIG. 10. Ficha de mapeo cutting (descripción de muestras) del pozo HA-02A. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

Groundwater Solutions

LOG PERFORACIÓN

Este (m):	374578.01	Prof Final (m):	250.0	Supervisor: AL	Pozo: HA-02
Norte (m):	6962271.1	Dip:	90		
Cota(msnm):	471.936	Azimuth:	0		
Fechadnicio:		Fecha Termino:			Página 1 de 7

Fecha	Metraje		ϕ	Litología	Grado de Fract.	Grado de Alt.	% de Arcillas	Agua	Descripción	Observación
	Inicial	Final								
01-ago-18	115	129.4	Tricono	Sin recuperación					No se recupera muestra con tricono. Según operador roca comienza en 115 mt. Inicio de recuperación de testigo en 129.4m	
01-ago-18	129.4	131.6	HQ3	Metandesitas de biotita (meteorizadas)	muy alto	alto	5 a 10	alta	Roca de textura brechosa, solo se distingue un tramo corto de andesita en matriz cloritizada. Fuerte fracturamiento y ++ox Fe en fracturas. No se observan planos de falla, solo fracturas.	130,8m vetillas de 1 a 0,2 cm de hematita
01-ago-18	131.6	132.9	HQ3	Metandesitas de biotita (meteorizadas)	moderado a bajo	alto	0 a 5	bajo	Andesita porfidica media, fenocristales de 2 a 4mm gris verdosa oscura a clara. Leve textura brechosa en zonas con presencia de matriz Ox Fe y hematita (muy escasa magnetita). Baja el fracturamiento respecto al tramo anterior.	Se observan algunos boxwork de Py de 0,5mm
01-ago-18	132.9	137.1	HQ3	Metandesitas de biotita (meteorizadas)	Muy alto	Alto (cl)	10	alto	Andesita porfídica fina, fenocristales de plagioclasa <2mm en abundancia relativa de 10 a 15% inmersos en una masa fundamental afanítica gris verdosa oscura con alteración clorítica de fondo y muy escasa epidota. Magnetita en la masa fundamental.	

FIG. 11. Ficha 2 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

Groundwater Solutions

LOG PERFORACIÓN

Este (m): 374578.013	Prof Final (m):	250.0	Supervisor: AL	Pozo: HA-02	
Norte (m): 6962271.08	Dip:	90			
Cotadmsnm): 471.936	Azimuth:	0			
Fechadnicio:	Fecha Termino:			Página 2 de 7	

Fecha	Metraje		ϕ	Litología	Grado de Fract.	Grado de Alt.	% de Arcillas	Agua	Descripción	Observación
	Inicial	Final								
01-ago-18	137,1	138.2	HQ3	Dique andesitico porfírico	bajo	moderado a bajo	0%	bajo	Andesita porfídica fina, fenocristales de plagioclasa 5 a 10%, de tamaño 0,5 a 1mm inmersos en una masa fundamental afanítica gris verdosa oscura. Disminuye grado de fracturamiento, aunque persiste ++Ox Fe, Cl y --Arc en las fracturas.	
01-ago-18	138.2	140.2	HQ3	Dique andesitico porfírico	alto	moderado	0 a 5	moderado a bajo	Andesita porfídica fina a media, con fenocristales de plagioclasa de 0.5 a 4mm en masa fundamental afanítica gris verdosa oscura. Aumenta fracturamiento respecto a tramo anterior, con +Ox Fe, clorita y --arcilla en fracturas.	
01-ago-18	140.2	145.5	HQ3	Brecha de magnetita con cúmulos y vetillas K Feld	bajo	alto, ++Mt, ++Py, ++Cl	0	bajo	Roca con fuerte altereación por fluido Mt, Cl, Py, no se distingue textura original de la roca (andesita?), de color gris oscuro con manchones verdosos. Veta de abundante magnetita, pirita y clorita. Escasas vetillas calcita 1mm. Empieza a disminuir levemente ox Fe en las fracturas.	145.1-146m: aumenta fracturamiento y ox Fe rojos en fracturas, con arcilla. RDQ 0 a 10%
01-ago-18	145.5	146.7	HQ3	Brecha de magnetita con cúmulos y vetillas K Feld	moderado	moderado	0-5	moderado a bajo	Veta de magnetita, pirita sobre andesita (igual a tramo anterior). Aumenta grado de fracturamiento respecto al tramo anterior. Ox Fe solamente en fracturas, no en la roca.	

FIG. 12. Ficha 3 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

Groundwater Solutions	LOG PERFORACIÓN			
	Este (m): 374578.013	Prof Final (m): 250.0	Supervisor: AL	Pozo: HA-02
	Norte (m): 6962271.08	Dip: 90		
	Cota (msnm): 471.936	Azimuth: 0		
	Fecha Inicio:	Fecha Termino:		Página 3 de 7

Fecha	Metraje		ϕ	Litología	Grado de Fract.	Grado de Alt.	% de Arcillas	Agua	Descripción	Observación
	Inicial	Final								
05-ago-18	146.7	153.3	HQ3	Brecha de falla/ vetillas de K feld	alto	alto	5%	alto	Disminuye contenido de magnetita y pirita en la roca. Zona de falla en andesitas fuertemente alteradas, aumenta ox Fe, Clorita, arcilla. Alto fracturamiento.	Se observan planos de falla con relleno arcilloso y salbanda (1 a 2 cm) en 150.4m y 150.6m. Geneal roca y fractura domina ox Fe, arcilla menor.
05-ago-18	153.3	156.1	HQ3	Metandesitas, textura relicta porfirica (Albitófiro?)	moderado	modera do a alto	0%	modera do a alto	Andesita porfídica fina, color gris verdoso oscuro. Fenocristales de plagioclasa de 0.5 a 2mm (20%) en masa fundamental afanítica cloritizada y co magnetita. Vetillas de pirita, calcopirita y feldespato potásico de 0.5 a 4mm.	Desaparece ox Fe de las fracturas. Fin parte baja de zona meteorizada (?)
05-ago-18	156.1	160.5	HQ3	Metandesitas, textura relicta porfirica (Albitófiro?)	bajo	alto	0%	bajo	Andesita porfídica media, fenocristales de plagioclasa de 1 a 2mm (5 a 10%) en masa fundamental afanítica. Fuerte alteración clorita, feldespato potásico. Pirita, calcopirita y magnetita en aglomerados y vetillas. Vetillas porosas con relleno de clorita (actinolita).	159.7-160.1m: veta pirita + calcopirita potente
05-ago-18	160.5	170.3	HQ3	Metandesitas porfiricas (albitifiro?)	alto	alto	5%	alto	Andesita porfídica media, similar al tramo anterior. Aumenta el grado de fracturamiento , corresponde a una zona de falla. Masa fundamental cloritizada, con piroxeno, magnetita, y vetilleo intesno de pirita, clcopirita, clorita, FK, cuarzo	zona de falla, pero sin ox Fe, rellenos de salbanda, clorita y actinolita, calcita y arcilla (aumenta levemente respecto a tramo anterior, pero no predomina en el tramo). En grnral fracturas son con rellenos de clorita, sin mucho fino que se pueda remover.

FIG. 13. Ficha 4 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

Groundwater Solutions

LOG PERFORACIÓN

Este (m): 374578.013	Prof Final (m): 250.0	Supervisor: AL	Pozo: HA-02
Norte (m): 6962271.08	Dip: 90		
Cota(msnm): 471.936	Azimuth: 0		
Fecha Inicio:	Fecha Termino:		Página 4 de 7

Fecha	Metraje		ϕ	Litología	Grado de Fract.	Grado de Alt.	% de Arcillas	Agua	Descripción	Observación
	Inicial	Final								
06-ago-18	170.3	175.8	HQ3	Metandesitas porfiricas (albitifiro?)	bajo	moderado	0%	bajo	Andesita porfídica media, similar a tramo anterior, pero disminuye el fracturamiento fuertemente. Roca compacta de alta calidad geotécnica.	
06-ago-18	175.8	181.5	HQ3	Metandesitas porfiricas (albitifiro?)	moderado a alto	alto	10%	muy alto	Andesita porfidica media a fina, fenocristales de plagioclasa de 0.5 a 2mm en tramos escasos donde se distingue textura original. Fuerte alteración cloritica, biotiticapotásica y con magnetita. Vuelven a aparecer ox Fe en algunas fracturas, además de pátinas de óxido en pirita/calcopirita, indicando flujos de agua oxidantes. Zona de peor calidad hasta 178.8, luego se reduce la cantidad de fracturas.	Se pierde partre de la muestra y baja la presión de fluido (pérdida de fluido durante perforación). Zona de falla entre 177.1 a 177.4m, relleno arcilloso (en parte lavado durante circulación de fluido)
06-ago-18	181.5	192.4	HQ3	Brecha de Magnetita	bajo	alto	0%	bajo	Andesita porfidica fina, fenocristales de plagioclasa de 0.5 a 1mm (15%) inmersos en una masa fundamental afanítica gris verdosa oscura cloritizada y biotitizada. Alteración de magnetita, FK, y silicificación en tramos escasos. Vetillas de Qz, FK, Py, Cpy, yeso?(arcilla blanca?).	
06-ago-18	192.4	199.9	HQ3	Brecha de Magnetita	Alto	alto	5-10%	alto	Zona de falla sobre andesitas. Se observa la presencia de planos de falla de hasta 3cm potencia con relleno arcilloso y salbanda. Presencia importante de magnetita en la roca, y escaso ox Fe en fracturas (leve). Vetillas de calcita, con Py, Clorita, calcopirita, FK.	se perdió presión de fluido durante perforación en el tramo.

FIG. 14. Ficha 5 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

Groundwater Solutions	LOG PERFORACIÓN			
	Este (m): 374578.013	Prof Final (m): 250.0	Supervisor: AL	Pozo: HA-02
	Norte (m): 6962271.08	Dip: 90		
	Cota(msnm): 471.936	Azimuth: 0		
	Fecha Inicio:	Fecha Termino:		Página 5 de 7

Fecha	Metraje		ϕ	Litología	Grado de Fract.	Grado de Alt.	% de Arcillas	Agua	Descripción	Observación
	Inicial	Final								
06-ago-18	199.9	206.5	HQ3	Brecha de Magnetita	bajo	alto	0-5%	bajo	Andesita porfidica fina a media, fenocristales de plagioclasa de 0.5 a 3mm inmersos en masa fundamental afanitica gris verdosa oscura biotitzada, cloritizada y silicificada. Disminuye contenido de magnetita en la matriz. Vetillas de FK, Qz, Py y CPy de 2 a 10mm (selladas). relleno de yeso en fracturas, con arcilla, y clorita. Bajo fracturamiento.	Escasa textura brechizada al inicio del tramo (matriz magnetita con clastos andesíticos
06-ago-18	206.5	210.6	HQ3	Brecha de Magnetita	alto	alto	10-15%	alto	Textura brechos, clasots de andesita similar tramo anterior en matriz magnetitica, aumenta grado de fracturamiento, aparecen una serie de planos de falla abiertos, se estima espesor menor a 1cm, relleno arcilloso y salbanda semiendurecida actinolitica y yeso. Cumulos de Py y CPy, ademas de vetillas de FK y Qz. Muy escaso ox Fe	
06-ago-18	210.6	217.5	HQ3	Brecha de Magnetita	bajo	alto	0-5%	bajo	Andesita porfídica fina gris oscura, fenocristales de plagioclasa <1mm en una masa fundamental afanpitica cloritizada y con magnetita. Alteraciones destruyen textura original de la roca, econtrándose solo algunos relictos en sectores acotados (a lo largo de todo el pozo). Alguna fracturas cuentan con escasos ox Fe y Arcilla, además del relleno actinolitico/clorítico. ROca de buena calidad con bajo fracturamiento.	

FIG. 15. Ficha 6 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

LOG PERFORACIÓN

Este (m): 374578.013	Prof Final (m): 250.0	Supervisor: AL	Pozo: HA-02
Norte (m): 6962271.08	Dip: 90		
Cota(msnm): 471.936	Azimuth: 0		
Fecha Inicio:	Fecha Termino:		Página 6 de 7

Fecha	Metraje		ϕ	Litología	Grado de Fract.	Grado de Alt.	% de Arcillas	Agua	Descripción	Observación
	Inicial	Final								
06-ago-18	217.5	228.4	HQ3	Metandesitas de Qz/Biotita	alto	alto	10-15%	alto	Zona de falla sobre andesitas, se observan planos de falla con nucleo arcillosos y rellenos con salbanda de <0.5cm. Se observa también relleno de clorita, arcillas (blancas y verdes), calcita y yeso en fracturas. Roca andesita con alteraciones clorita y magnetiuta (Mt en menor contenido respecto a otros tramos de zona de falla). Vetillas cerradas de Qz, FK, Py y CPy. Casi no se observa Ox Fe en fallas o fracturas.	Aumenta contenido de arcilla respecto a tramos de falla anteriores, zona con baja recuperación de muestra entre 225.7 y 226.7m y perdia de material fino (metidas cortas indican bloqueo por arcillas durante perforación)
06-ago-18	228.4	233	HQ3	Brecha de Mt	Moderado a alto	alto	5%	modera do	Andesitas afectadas por biotita, clorita y magnetita, con vetillas de Qz, FK, Py y CPy. Vetillas de calcita <1mm. Roca disminuye su fracturamiento respecto a tramo anterior y siguiente (zona de daño de falla).	
09-ago-18	233	233.5	HQ3	Metandesitas de Qz/biotita	alto	alto	50%	bajo	Falla con alto contenido de arcilñla verdosa, aunque parte del fino se pierde con el lavado de la perforación. Correpsonde a una falla de 20cm aproximadamente.	
10-ago-18	233.5	241.8	HQ3	Metandesitas de Qz/biotita	bajo	alto	0%	bajo	Andesita porfidica media, fenocristales de plagiocalsa de 1 a 3mm inmersos en masa fundamental gris oscura cloritizada, biotitizada y con magnetita (pero en menor medida que tramos anteriores. Vetillas de cuarzo, Py, CPy, FK, Cl, Calcita.	Se observan algunos ox Fe en los pocos planos de falla observados, con relleno de salbanda, arcilla y clorita (espesor <2-3mm). Dique aplítico en 241.5 a 241.6m.

FIG. 16. Ficha 7 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

Groundwater Solutions

LOG PERFORACIÓN

Este (m): 374578.013	Prof Final (m):	250.0	Supervisor: AL	Pozo: HA-02	
Norte (m): 6962271.08	Dip:	90			
Cota(msnm): 471.936	Azimuth:	0			
Fechadnicio:	Fecha Termino:			Página 7 de 7	

Fecha	Metraje		ϕ	Litología	Grado de Fract.	Grado de Alt.	% de Arcillas	Agua	Descripción	Observación
	Inicial	Final								
10-ago-18	241.8	245.3	HQ3	Zona de diques microdioritico/aplitico	Bajo	bajo	0%	bajo	Roca de aspecto más fresco que las andesitas. C orresponde a una roca de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa y anfíbol (cloritizados) de 2 a 4 mm, en una ,masa fundamental crecida, con cristales de plagioclasa y máficos (cirstales aprox 0.5 a 1 mm. Roca de alta calidad geotécnica, con escasos planos de falla de reducida potencia (<0.5mm).	243.4m, 243.8m, 244.1m, 244.4m y 244.8m fallas de <1cm potencia, relleno arcilloso, salbanda, clorita, ox Fe.
10-ago-18	245.3	250	HQ3	Granodiorita	Bajo	bajo	0-5%	bajo	Roca color blanco grisáceo, textura equigranular, hipidiomórfica, de grano grueso, con cristales de plagioclasa 3-4mm (30%), FK 1-4mm (10%), cuarzo 1-3 mm (<10%), anfíbol 1 a 6mm cloritizados (40%). Roca de buena calidad geoptecnica con escos planos de falla de reducida potenica. Vetillas escasas de calcita, admeás de escasos sulfuros (Py) principalmente en cúmulos con clorita.	Fracturas con relleno arcilloso, admeás de clorita y epidota, escasos sulfuros y calcita. Plano de falla de <3mm en 248.9m, 249.5 y 249.7m, con relleno salbando y arcilla, además de algunos carbonatos.

FIG. 17. Ficha 8 de log (descripción) de perforación del pozo HA-02A. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

Groundwater Solutions

FICHA MAPEO CUTTING

Ubicación:	Alcaparrosa superficie	017--09202 Alcaparrosa			Pozo:
Este:	374576.809	-90	Mapeado por:	Fnunez/Alopez	HA-01
Norte:	6962245.262	0	Fecha Mapeo:	01-06 al	
Cota:	474.433		Máquina:	KWL 700RC	

PROF. (m)		Litología	Tamaño Chips (cm)	TAMAÑO %								Color	Fracturas relleno	alt.	min.	OBSERVACIONES
desde	hasta			Gravas			Arena			Finos						
				G	M	F	G	M	F	L	A					
0	2	Sedimentos no consolidados	0.2 - 3.5	10	10	20	30	30	0	0	0	pardo - gris	-	-	-	Gravas y arenas polimícticas, moderada a baja selección. Las gravas se componen de clastos andesíticos, riolíticos, graníticos, granodioríticos, calcareos, bien redondeados. Las arenas corresponden, en mayor parte, a granos de cuearzo (hasta 50%), observándose también feldespatos, y líticos volcánicos e inttrusivos, los que son subredondeados a redondeados. No se observa presencia de matriz fina.
2	14	Sedimentos no consolidados	0.4 - 2.5	30	10	20	20	10	5	5	0	pardo - gris	-	-oxid	-	Gravas y arenas polimícticas. Las gravas tienen composición variada, principalmente volcánica (andesita-riolita), intrusiva (granito-granodiorita de grano medio) algunos de ellos enrojecidos por oxidación. Las arenas están compuestas por granos de cuarzo y feldespatos, aunque también se observan algunos granos máficos (anfíboles). Matriz fina escasa o ausente debido a pérdidas en la línea de toma de muestra.
14	20	Sedimentos no consolidados	0.2 - 2.5	30	20	20	10	10	5	5	0	pardo - gris	-Ox. Fe	-oxid	-	Gravas polimícticas con clastos en su mayoría volcánicos, pobremente redondeados de composicion andesítica-dacítica. Se observan algunos clastos graníticos teñidos por oxidación. Se observa matriz de arena y limo poco abundante debido a pérdidas en la línea de toma de muestra.
20	22	Sedimentos no consolidados	0.3 - 1.2	55			40			5		Pardo	-	-	-	Gravas polimícticas. Clastos volcánicos (andesita-riolita) e intrusivos (granodiorita). Poseen matriz de arena de similar composición.
22	26	Sedimentos no consolidados	0.02 - 0.05	0	0	0	2	70	25	3	0	Pardo claro	-	-	-	Arena grano fino a medio. Granos deQz (50%), líticos andesíticos (10%), feldespatos (30%). Fracción gruesa de la muestra no recuperada (grava media de clastos andesíticos). Este cutting corresponde a material expelido del extremo del casing (no del ciclón) por lo que la granulometría del tramo se encuentra sesgada.
26	46	Sedimentos no consolidados	0.1 a 3.5	30	15	25	10	10	5	5	0	Gris pardo	-	-ox Fe	-	Gravas polimícticas de clastos intrusivos (graníticos) y volcánicos (andesita-riolita). Ocurrencia de clastos fracturados subangulosos con algunos bordes redondeados sugieren la presencia de clastos de mayor tamaño que los de la muestra (bolones). Fracción de arena poco abundante se compone de granos subangulosos de Qz, Feldespato, líticos volcánicos y mt. La mayor parte de la fracción fina, si la hay, se pierde por boca de casing durante la perforación.

FIG. 18. Ficha mapeo cutting (descripción de muestras) del pozo HA-01 entre los 0 y 46 m. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

Groundwater Solutions

FICHA MAPEO CUTTING

Ubicación:	Alcaparrosa superficie	017--09202 Alcaparrosa			Pozo:
Este:	374576.809	-90	Mapeado por:	Fnunez/Alopez	HA-01
Norte:	6962245.262	0	Fecha Mapeo:	01-06 al	
Cota:	474.433		Máquina:	KWL 700RC	

PROF. (m)		Litología	Tamaño Chips (cm)	TAMAÑO %								Color	Fracturas relleno	alt.	min.	OBSERVACIONES
desde	hasta			Gravas			Arena			Finos						
				G	M	F	G	M	F	L	A					
46	48	Sedimentos no consolidados	0.05 a 0.5	0	5	30	60	5	0	0	0	Gris pardo	-	--ox Fe	-	Gravas de relleno sedimentario no consolidado, polimícticas, con clastos de la composición intrusiva y extrusiva. Tramo difiere del anterior por una reducción en el tamaño de los clastos (nivel más arenoso/grava fina, intercalado en las estratos de grava gruesa). La muestra recuperada tiene clastos enteros, con tamaño predominante arena gruesa y grava fina. Se pierde parte importante de la fracción fina por el espacio anular durante la perforación ODEX.
48	66	Sedimentos no consolidados (gravas)	0.1 a 1.5	0	20	55	15	10	0	0	0	pardo amarillento con tonalidades dadas por clastos	-	-	-	Gravas no consolidadas de tipo polimictico con clastos de composición ígnea (intrusivos graníticos y lavas andesíticas de diversas tonalidades). Se observan algunos clastos completos de 0.8 a 1 cm. Escasa matriz, aunque probablemente se pierde importante fracción fina por espacio anular de casing.
66	88	Sedimentos no consolidados (gravas)	0.05 a 1.8	0	30	25	15	5	10	10	5	pardo amarillento oscuro	-	-	-	Gravas no consolidadas, polimicticas, aumenta el contenido de finos respecto a tramo anterior, probablemente por retención de finos debido a la humedad en el pozo (aportes de agua a 68 m). Aproximadamente 30% matriz (arena media a arcilla), con textura levemente arcillosa. Clastos intrusivos y extrusivos.
88	94	Sedimentos no consolidados (gravas)	0.03 a 1.8	0	30	40	15	10	5	0	0	pardo con tonalidades según clasto:	-	-	-	Gravas no consolidadas, disminuye contenido de materiale fino, predominando arena gruesa y grava fina en lka escasa matriz (<30%). Clastos de intrusivo y rocas volcánicas, además de cuarzo como clastos aislados de arena gruesa. Se midio caudal con flotador durante maniobras de rescate de martillo (a 94m), dando 7 lt/s.

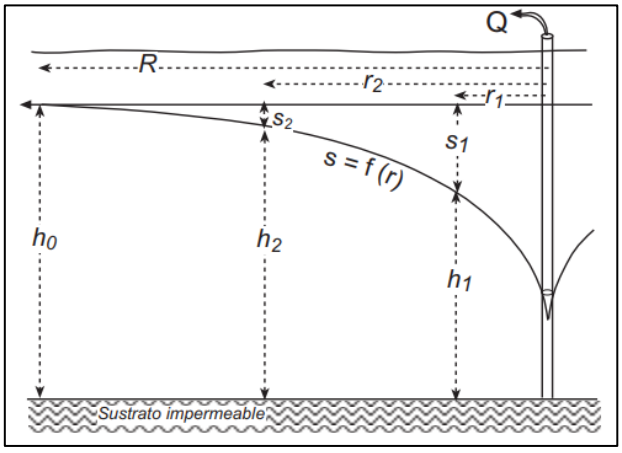
FIG. 19. Ficha mapeo *cutting* (descripción de muestras) del pozo HA-01 entre los 46 y 94 m. (Lundin Mining, comunicación escrita, 2022).

ANEXO V. Fórmula de Dupoit Thiem

Mediante la fórmula de Dupoit-Thiem (ecuación 1), para descensos de acuíferos no confinados en régimen permanente, es decir, luego de estabilizado el descenso, es posible estimar el radio de influencia de una captación a partir de la conductividad hidráulica del medio, el caudal de extracción desde el punto de captación, y el descenso que se produce en un punto de observación conocido (Fig. 20). Por otra parte, si se conocen dos puntos de observación, es posible determinar el caudal de extracción y el radio de influencia si se conoce la conductividad hidráulica del sistema.

Este método corresponde a una simplificación de un escenario real en donde se consideran los siguientes supuestos:

- Espesor del acuífero homogéneo.
- Isotropía de propiedades hidráulicas.
- Gradiente hidráulico inicial del acuífero despreciable.



Donde:
Q: caudal extraído del acuífero
s_1: descenso en PO_1
s_2: descenso en PO_2
r_1: distancia de PO_1 a la extracción
r_2: distancia de PO_2 a la extracción
h_0: espesor inicial del acuífero
h_1: espesor saturado en PO_1
h_2: espesor saturado en PO_2
R: radio de influencia

FIG. 20. Descripción de parámetros de entrada para la estimación del radio de influencia en una sección esquemática de un cono de abatimiento o cono de depresión ideal. Imagen tomada de Sánchez (2022).

Ecuación 1: ecuación de Dupoit Thiem para la estimación del radio de influencia.

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{2\pi K H_0} \ln \frac{r_2}{r_1}$$

Ecuación 2: expresión para encontrar el caudal de extracción del acuífero, obtenida a partir de despejar el caudal (Q) desde la ecuación de Dupoit Thiem.

$$Q = \frac{2\pi K H_0 (s_1 - s_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$$

ANEXO VI. Mapeo sedimentario de sondajes perforados presubsidencia

Parte de la información entregada por la compañía minera consistió en el mapeo estratigráfico de los sondajes exploratorios perforados antes del evento de subsidencia. El análisis de la descripción estratigráfica tuvo por objetivos determinar la profundidad del contacto roca-sedimento en las cercanías de la subsidencia y comparar dicha información con la profundidad del contacto indicada por los modelos geológicos. Si bien la cantidad de sondajes perforados por la compañía son numerosos, el objetivo principal de estos es definir la geología del yacimiento y no la estratigrafía del relleno no consolidado, por lo que la descripción del sedimento es limitada. Aun así, fue posible determinar qué la profundidad del contacto se encuentra por debajo de lo indicado por el modelo geológico.

En la figura 21 se entregan dos perfiles uno mirando hacia el norte y otro hacia el oeste, estos muestran la ubicación de los sondajes AD952 y AD954 en función de la subsidencia, los caserones Gaby 1, 4 y 12, y las capas geológicas definidas en el área de estudio por el modelo geológico. En verde se resalta la extensión del sondaje que presenta unidades de sedimentos no consolidados, y el detalle del mapeo geológico en la tabla 1. Adicionalmente la figura 21 muestra una fotografía del borde de la subsidencia en donde se aprecia la intercalación de gravas, arenas, limos y arcillas, que evidencia la compleja arquitectura de estructuras sedimentarias que existen en los primeros metros del relleno natural del valle.

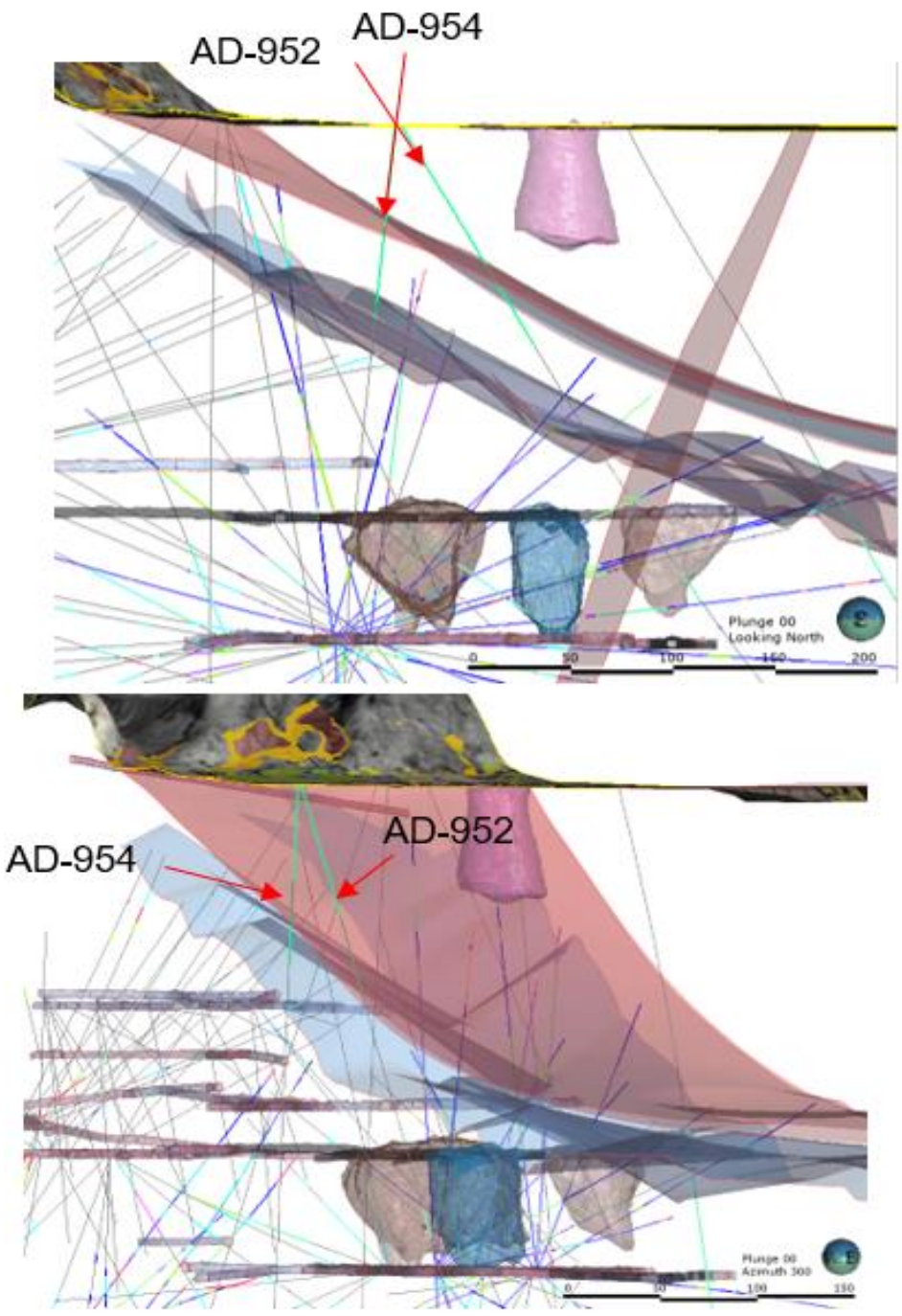


FIG. 21. Perfiles en 3D que ilustran los sondajes, el contacto de la roca con el relleno, la zona meteorizada, la subsidencia y los caserones Gaby 1, 4 y 12. Arriba: vista al norte; abajo: vista al noroeste.

TABLA 1. DESCRIPCIÓN ESTRATIGRÁFICA SEDIMENTARIA DE LOS SONDAJES AD-952 Y AD-954.

AD-952		
Desde	Hasta	Descripción
0	2,5	Grava arenosa
2,5	30,75	Grava
30,75	31,1	Arcilla gravosa
31,1	44,3	Grava
44,3	45,5	Arcilla gravosa
45,5	75,1	Grava arenosa
75,1	76,8	Arena gravosa
76,8	81,1	Grava
81,1	81,6	Arcilla arenosa
81,6	83,5	Grava
83,5	86,6	Grava arenosa
86,6	89,5	Grava
89,5	99,6	Grava arenosa
99,6	105,5	Grava arenosa oxidada
105,5	107,6	Grava areno arcillosa
107,6	109,1	Grava arcillosa
109,1	110,5	Arena arcillosa
110,5	115,6	Grava arenosa
115,6	118,8	Arcilla arenosa
118,8	126	Grava arenosa
126	142	Roca fresca andesita

AD-954		
Desde	Hasta	Descripción
0	43,7	Grava arenosa
43,7	46,2	Grava areno arcillosa
46,2	48,5	Grava arenosa
48,5	49,6	Grava areno arcillosa
49,6	52,9	Arcilla gravosa
52,9	58,3	Grava arenosa
58,3	59	Arena gravosa
59	64,9	Grava arenosa
64,9	65,9	Arcilla gravosa
65,9	69,8	Grava arenosa
69,8	71	Arcilla gravosa
71	74,3	Grava areno arcillosa
74,3	75,3	Arena arcillo gravosa
75,3	80,6	Grava arenosa
80,6	82,2	Arcilla gravosa
82,2	83	Grava arenosa
83	89	Grava areno arcillosa
89	108	Roca meteorizada andesita
108	127,7	Roca fresca andesita

FIG. 22. Fotografías aéreas del dron que ilustran las distintas capas de gravas, arenas y arcillas presentes en la pared de la subsidencia.

ANEXO VII. Antecedentes teóricos de GPR (Ground Penetrating Radar)

El GPR (Ground Penetrating Radar, o llamado también Georradar) es una técnica superficial de prospección geofísica, no invasiva, basada en las teorías del electromagnetismo de alta resolución para crear imágenes del subsuelo a poca profundidad. Estas imágenes son generadas a partir de la reflexión en las interfaces de materiales con diferentes propiedades dieléctricas de un pulso electromagnético de alta frecuencia (Jol y Bristow, 2003).

A partir de un pulso de energía electromagnética de alta frecuencia (entre 10 y 500 MHz), se genera un tren de ondas que se propaga en el subsuelo. Debido a cambios en la mineralogía, en las características de la interfase y/o en las propiedades eléctricas de las diferentes litologías presentes, algunas de estas ondas son reflejadas hacia la superficie (Davis y Annan, 1989; Chow *et al*., 2001). Una vez que son captadas por el receptor en la superficie, un monitor refleja la energía recibida en función del tiempo de arribo entre la transmisión del tren de ondas y la recepción de las reflexiones; esto es función de la velocidad de propagación y de la profundidad de los reflectores en el subsuelo.

Los GPR miden el tiempo de retardo que demora la señal, llamada TWT o *two-way travel time*, al pasar a través de distintas capas y objetivos en el subsuelo y, además, mide la amplitud de la señal que regresa a la antena (A-scan en Fig. 23). Las reflexiones, desde objetos o capas, se producen cada vez que el pulso entra en un material con propiedades dieléctricas diferentes al del material que salió. La fuerza de reflexión está determinada por el contraste en las propiedades dieléctricas y se vuelve más fuerte cuanto mayor es esta diferencia.

Las imágenes obtenidas mediante GPR consisten en perfiles de distancia horizontal del levantamiento versus *two-way travel time* (TWT o doble tiempo de viaje) medido en nanosegundos. La velocidad de propagación de ondas electromagnéticas está determinada por las propiedades dieléctricas de los sedimentos (Chow *et al.*, 2001), y las variaciones o contrastes en la propiedad dieléctrica generan reflexiones asociadas a contactos litológicos en el subsuelo (Davis y Annan, 1989; Chow *et al.*, 2001). Mientras el contraste entre las propiedades dieléctricas en la interfase entre las distintas litologías sea más marcado, mayor será la magnitud de la señal reflejada. A partir de estos efectos, es posible inferir la estratigrafía del subsuelo según la geometría de las reflexiones, lo que permite visualizar discontinuidades y anomalías que pueden ser atribuidas, por ejemplo, a la actividad tectónica de fallas.

La profundidad hasta el objetivo se puede calcular si se conoce la velocidad, V, o el valor RDP (permitividad dieléctrica relativa) que varía entre 1 y 81 (1 para aire y 81 para agua) (ecuación 3).

Ecuación 3: profundidad al objetivo en función de la velocidad y el tiempo de viaje.

$$Profundidad = V \times TWT/2$$

RDP o $(\varepsilon) = (C/V)^2$, donde $V = C/\sqrt{RDP}$ y c=0,3 m⁄ns (300 mm⁄ns", 30" m⁄µs)

El GPR proporciona un perfil continuo (B-scan en Fig. 23) del subsuelo mientras se escanea sobre él, midiendo la fuerza de amplitud y el tiempo requerido para el retorno de cualquier señal reflejada dentro de la ventana de tiempo/profundidad utilizada por el radar. La información (C-scan en Fig. 23) se puede distinguir a partir de múltiples líneas topográficas densas ubicadas en las direcciones X e Y.

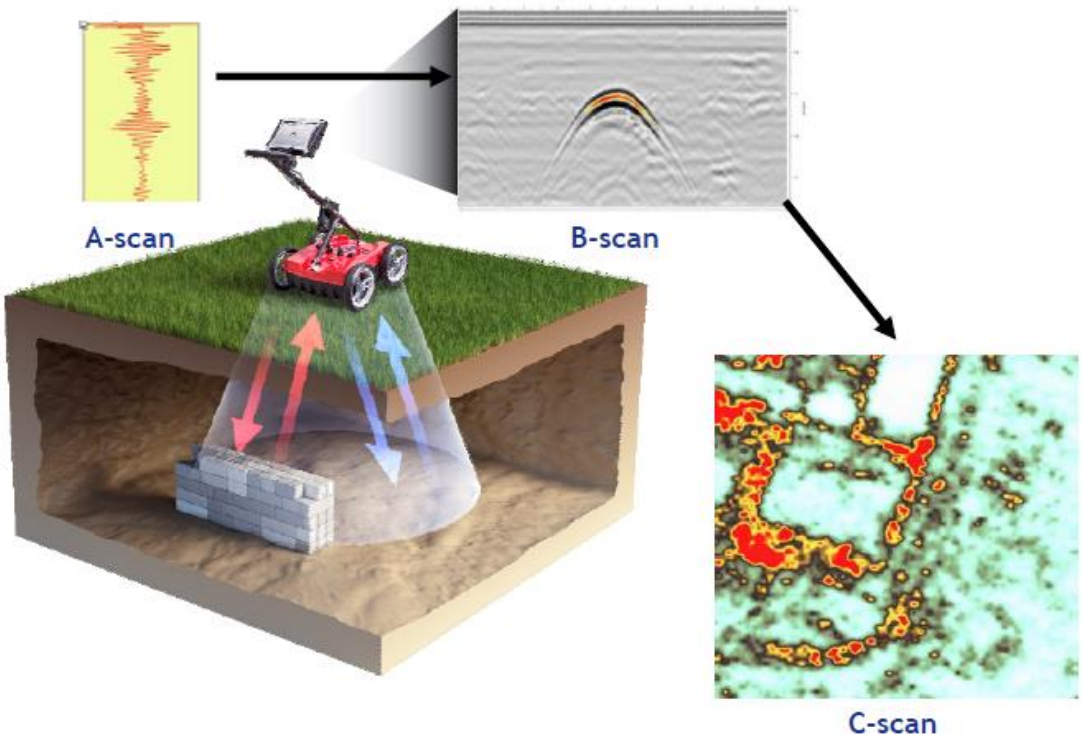


FIG. 23. Metodología GPR. Extraído desde Cobra Plug-in GPR manual_version01_november 2015.

ANEXO VIII. Resultados hidrogeoquímicos e isotópicos

TABLA 2. RESULTADOS HIDROGEOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS.

Código de muestra	SOC-FF-01	SOC-FF-02	SOC-FF-03	SOC-CM-01	SOC-CM-02	SOC-CM-03	SOC-FF-04
Tipo	IM270 G4	IM270 G12	IM60	Pozo	P12	P8 en uso	Río
Fecha	15-08-2022	15-08-2022	15-08-2022	19-08-2022	21-08-2022	21-08-2022	18-08-2022
Coord. este	374.260	374.313	373.712	374.838	374.530	374.652	378.451
Coord. norte	6.961.641	6.961.673	6.962.224	6.962.270	6.961.290	6.958.601	6.939.311
Calcio	290	340	457,5	103	175	255	187
Magnesio	80	75	87,5	45	45	45	67,5
Sodio	146,3	156	172,8	93	92,5	132,5	90
Potasio	7,7	8,8	11,8	4,5	4,4	5,3	4,1
Sulfato	815,2	900,5	1270,7	481,1	461,7	628,9	555
Cloruro	212,6	295,5	253,6	111,8	134,6	210,3	87,7
Nitrato	20,6	7,7	28	1,5	3,1	20,5	14,4
Bicarbonato	124,3	101,4	74,7	42	188	215	169
Carbonato	0	0	0	0	0	0	6,7
Aluminio	0,5	1	0,5	1	1	1,5	0,5
Astato	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Arsénico	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Bario	0,0246	0,0099	0,0115	0,038	0,0025	0,013	0,012
Berilio	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Boro	0,8373	0,8592	1,0582	0,18	0,59	0,7	1,06
Cadmio	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Cobalto	0,001	0,001	0,0351	0,001	0,001	0,001	0,035
Cobre	0,1265	0,05	0,6	1,6	0,6	0,4	0,6
Cromo	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Estaño	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Fósforo	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Hierro	0,2	2,2	0,4	1,1	0,56	0,06	0,4
Manganeso	0,037	0,2933	0,3931	0,21	0,43	0,006	0,39
Molibdeno	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Plata	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Plomo	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Selenio	0,0025	0,0025	0,0058	0,0025	0,0025	0,006	0,006
Vanadio	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015
Zinc	0,0285	0,0176	0,2671	0,022	0,023	0,046	0,27
Mercurio	0,0004	0,00015	0,001	0,0003	0,00015	0,0005	0,00015
Bromuro	0,307	0,4698	0,3853	0,21	0,28	0,21	0,098
Rubidio	0,0091	0,0077	0,027	0,003	0,002	0,003	0,003
Estroncio	2,3676	2,7347	2,7632	1,3189	1,8234	2,4562	2,1341
Cesio	0,0019	0,0012	0,0033	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Hafnio	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Tantalio	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Torio	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Uranio	0,0166	0,0126	0,0039	0,0005	0,004	0,014	0,015
Galio	0,7604	0,374	0,4117	1,2	0,22	0,44	0,77
Germanio	0,0323	0,1139	0,0432	0,02	0,005	0,05	0,04
Níquel	0,0025	0,0025	0,0249	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025
Talio	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005
Sílice	-	-	-	-	-	-	-
pH	7,8	7,2	7,1	7,3	6,7	6,7	8,1
ORP	198,9	-26,6	178,9	25	79,2	89,1	91,4
DO %	40,8	34,2	49,9	0	0	0	0
DO ppm	3,4	3,9	4,2	0	0	0	0
CE uS/cm	2.637	2.877	3.289	1.088	1.333	2.402	1.310
SDT	1.319	1.439	1.644	544	737	1.204	665
T °C	22,2	22,1	22,4	19,7	20	23,7	19,4
Oxígeno 18	-10,2	-10,1	-9,9	-10,4	-7,4	-10,6	-10,8
Deuterio	-78,9	-79,6	-77,9	-77,8	-57,5	-83,4	-85,9

CONTINUACIÓN TABLA 2.

Código de muestra	P1	P2	P3	P4	XTERRAE A-1	XTERRAE A-2
Tipo	IM270 G4	IM200	HA01	P12	IM200	Interior de la mina
Fecha	11-08-2022	11-08-2022	11-08-2022	11-08-2022	22-10-2015	22-10-2015
Coord. este	374.260	373.853	374.391	374.530	374.242	374.055
Coord. norte	6.961.641	6.961.653	6.961.861	6.961.290	6.961.890	6.962.264
Calcio	411,5	512,3	181,1	200,3	272,5	1232
Magnesio	75,8	81,3	51,6	40,9	69,3	15,8
Sodio	161,8	178,1	115,3	84,3	151	1119
Potasio	8,1	13,3	6,4	4,6	6,7	6,1
Sulfato	812,3	997,9	478,9	458,9	895,8	2192,1
Cloruro	-	-	-	-	281,1	2566,6
Nitrato	-	-	-	-	0,9	0
Bicarbonato	0	0	0	0	218,5	61,1
Carbonato	0	0	0	0	0	0
Aluminio	0,3	0,3	0,3	0,3	0,1	0,238
Astato	-	-	-	-	-	-
Arsénico	0,003	0,006	0,0015	0,0015	0,1	0,1
Bario	-	-	-	-	-	-
Berilio	-	-	-	-	-	-
Boro	-	-	-	-	-	-
Cadmio	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
Cobalto	-	-	-	-	-	-
Cobre	0,22	1,2	0,04	0,01	0,005	0,005
Cromo	0,015	0,015	0,015	0,015	0,005	0,005
Estaño	-	-	-	-	-	-
Fósforo	-	-	-	-	-	-
Hierro	0,15	0,94	22,28	14,6	0,015	0,219
Manganeso	0,05	0,21	0,18	0,41	0,154	0,364
Molibdeno	0,25	0,25	0,25	0,25	0,015	0,015
Plata	0,005	0,005	0,005		0,005	0,005
Plomo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,025	0,025
Selenio	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	0,1	0,1
Vanadio	-	-	-	-	-	-
Zinc	0,005	0,06	0,02	0,01	0,0025	0,0025
Mercurio	-	-	-	-	-	-
Bromuro	-	-	-	-	-	-
Rubidio	-	-	-	-	-	-
Estroncio	-	-	-	-	-	-
Cesio	-	-	-	-	-	-
Hafnio	-	-	-	-	-	-
Tantalio	-	-	-	-	-	-
Torio	-	-	-	-	-	-
Uranio	-	-	-	-	-	-
Galio	-	-	-	-	-	-
Germanio	-	-	-	-	-	-
Níquel	0,015	0,015	0,015	0,015	0,025	0,025
Talio	-	-	-	-	-	-
Sílice	12,5	9,9	0,5	6,9	8,5	6,3
pH	7,8	7,8	7,5	7,2	7,2	6,9
ORP	-	-	-	-	-	-
DO %	-	-	-	-	-	-
DO ppm	-	-	-	-	-	-
Conductividad eléctrica uS/cm	2350	2507	785	1512	1340	6290
SDT	-	-	-	-	1754	9704
T °C	20,8	21	19,5	20,3	22,9	22,7
Oxígeno 18	-	-	-	-	-10,9	-10
Deuterio	-	-	-	-	-82,6	-77,4

CONTINUACIÓN TABLA 2.

Código de muestra	XTERRAE A-3	XTERRAE A-4	XTERRAE A-6	VAI 1	VAI 2	VAI 3	VAI 5	SOC-FF-05
Tipo	IM60	IM60	P14	Interior de la mina	Interior de la mina	Interior de la mina	Interior de la mina	IM60
Fecha	22-10-2015	22-10-2015	22-10-2015	01-08-2018	01-08-2018	01-08-2018	01-08-2018	27-08-2022
Coord. este	373.815	373.750	374.633	374.440	374.376	374.469	374.533	373.665
Coord. norte	6.962.167	6.962.079	6.960.813	6.962.016	6.961.952	6.962.546	6.962.908	6.962.133
Calcio	743	946,4	171,7	305,8	466,6	406,2	197,1	-
Magnesio	113	1	52,4	73,3	113,2	38,8	40,7	-
Sodio	593,3	947,1	102,8	174	236,8	306,1	136,9	-
Potasio	12	3,2	3,9	7,5	9,6	7,6	6,1	-
Sulfato	2.066,8	1.675,7	654	729	1052	886	498	-
Cloruro	744,7	1.987,6	115	200,9	392,6	218,3	85,9	-
Nitrato	0,4	2,2	2,5	13,5	72,2	4,7	2,6	-
Bicarbonato	153,2	9,1	241,4	243,2	197,1	181,7	189,4	0
Carbonato	0	0	0	0	0	0	0	0
Aluminio	0,272	0,005	0,005	0,27	0,2	0,41	0,17	-
Astato	-	-	-	-	-	-	-	-
Arsénico	0,1	0,1	0,1	0,019	0,023	0,025	0,018	-
Bario	-	-	-	-	-	-	-	-
Berilio	-	-	-	-	-	-	-	-
Boro	-	-	-	-	-	-	-	-
Cadmio	0,005	0,005	0,005	-	-	-	-	-
Cobalto	-	-	-	-	-	-	-	-
Cobre	0,07	0,005	0,159	0,1	0,12	0,0037	0,0013	
Cromo	0,005	0,005	0,005	-	-	-	-	-
Estaño	-	-	-	-	-	-	-	-
Fósforo	-	-	-	-	-	-	-	-
Hierro	0,015	0,015	0,015	0,001	0,001	0,001	0,001	-
Manganeso	2,475	0,046	0,006	0,09	0,069	0,073	0,048	-
Molibdeno	0,015	0,038	0,015	0,0035	0,006	0,0049	0,0026	-
Plata	0,005	0,005	0,005	-	-	-	-	-
Plomo	0,025	0,025	0,025	-	-	-	-	-
Selenio	0,1	0,1	0,1	-	-	-	-	-
Vanadio	-	-	-	-	-	-	-	-
Zinc	0,0025	0,0025	0,0025	1,82	0,0003	0,0003	0,0003	
Mercurio	-	-	-	-	-	-	-	-
Bromuro	-	-	-	-	-	-	-	-
Rubidio	-	-	-	-	-	-	-	-
Estroncio	-	-	-	-	-	-	-	-
Cesio	-	-	-	-	-	-	-	-
Hafnio	-	-	-	-	-	-	-	-
Tantalio	-	-	-	-	-	-	-	-
Torio	-	-	-	-	-	-	-	-
Uranio	-	-	-	-	-	-	-	-
Níquel	0,025	0,025	0,025	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	
Sílice	8,3	4,4	12,1	-	-	-	-	-
pH	7,3	8,6	7,1	7,3	7,1	7,2	7,5	6,9
ORP	-	-	-	-	-	-	-	114,9
DO %	-	-	-	-	-	-	-	-
DO ppm	-	-	-	-	-	-	-	-
CE uS/cm	3730	6560	1190	2094	3022	2288	1377	3316
SDT	4004	7402	1224	1668	2632	1924	1076	
T °C	25	26,3	36,1	21,5	21,2	24	22	22,7
Oxígeno 18	-7,7	-6,7	-10,2	-	-	-	-	-
Deuterio	-63,6	-57,6	-77,6	-	-	-	-	-

CONTINUACIÓN TABLA 2.

Código de muestra	SOC-FF-06	SOC-FF-07	SOC-FF-08	SOC-FF-09	SOC-FF-10	SOC-FF-11	SOC-FF-12	SOC-FF-13
Tipo	Candelaria	Candelaria	Candelaria	Candelaria	IM60	IM200	Interior de la mina	IM270 G4
Fecha	01-09-2022	01-09-2022	01-09-2022	01-09-2022	01-09-2022	01-09-2022	01-09-2022	01-09-2022
Coord. este	372.534	372.558	372.199	368.795	373.665	373.853	374.115	374.260
Coord. norte	6.955.776	6.955.153	6.956.927	6.954.138	6.962.133	6.961.653	6.962.095	6.961.641
Calcio	775	-	435	775	680	302,5	-	287,5
Magnesio	50	-	50	10	122,5	70	-	70
Sodio	1040	-	1.030	815	212,5	157,5	-	147,5
Potasio	85	-	45	190	13	9,6	-	6,9
Sulfato	2.189,3	-	2.150,4	2.269,6	2.021,9	820,1	-	766,9
Cloruro	1.447	-	904	1.082,9	299,9	199,4	-	185,2
Nitrato	82,1	-	31,1	35,2	51,6	18,6	-	14,2
Bicarbonato	47	0	58	11	63,5	208,6	0	227,3
Carbonato	0	0	0	4,9	0	0	0	0
Aluminio	0,01	-	0,01	0,03	0,01	0,01	-	0,01
Astato	0,005	-	0,005	0,034	0,005	0,005	-	0,005
Arsénico	0,0025	-	0,056	0,1	0,0025	0,05	-	0,016
Bario	0,034	-	0,0025	0,081	0,014	0,033	-	0,021
Berilio	0,001	-	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,001
Boro	6	-	3,1	1,7	0,88	0,93	-	0,69
Cadmio	0,005	-	0,001	0,001	0,012	0,001	-	0,001
Cobalto	0,009	-	0,001	0,001	0,45	0,003	-	0,001
Cobre	0,06	-	0,01	0,01	8,3	0,25	-	0,12
Cromo	0,008	-	0,016	0,2	1,1	0,44	-	0,027
Estaño	0,0015	-	0,0015	0,0015	0,0015	0,0015	-	0,0015
Fósforo	0,025	-	0,025	0,025	0,025	0,025	-	0,025
Hierro	0,005	-	0,024	0,2	0,88	0,4	-	0,4
Manganeso	0,4	-	0,0015	0,012	4,3	0,044	-	0,021
Molibdeno	0,028	-	0,008	0,096	0,0025	0,0025	-	0,0025
Plata	0,001	-	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,001
Plomo	0,001	-	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,001
Selenio	0,0025	-	0,0025	0,0025	0,0025	0,0025	-	0,005
Vanadio	0,0015	-	0,009	0,004	0,004	0,0015	-	0,0015
Zinc	0,37	-	0,016	0,05	49	0,045	-	0,037
Mercurio	0,00015	-	0,0007	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015	0,00015
Bromuro	0,137	-	0,023	0,0025	0,0025	0,0025	-	0,0025
Rubidio	0,16	-	0,001	0,2	0,038	0,016	-	0,007
Estroncio	6,6	-	2,3	3,9	2,5	2,7	-	2
Cesio	0,003	-	0,0005	0,002	0,007	0,003	-	0,001
Hafnio	0,0005	-	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	-	0,0005
Tantalio	0,0005	-	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	-	0,0005
Torio	0,0005	-	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	-	0,0005
Uranio	0,001	-	0,0005	0,0005	0,002	0,017	-	0,014
Galio	0,98	-	0,19	1,97	0,22	0,82	-	1
Germanio	0,07	-	0,08	0,05	0,2	0,02	-	0,04
Níquel	0,017	-	0,0025	0,005	1,1	0,07	-	0,0025
Talio	0,0005	-	0,0005	0,0005	0,0005	0,0005	-	0,0005
Sílice	-	-	-	-	-	-	-	-
pH	7,5	7,8	7,6	9,1	6,2	7,8	7,8	7,7
ORP	85,6	83,5	80,6	81,5	140,3	73,7	68,7	78,2
DO %	-	-	-	-	-	-	-	-
DO ppm	2	4,3	3,3	3,5	0,3	4,3	3,7	6
CE uS/cm	8144	8464	6228	6739	3851	2305	2133	2158
SDT	5692	-	4675	5189	3433	1681	-	1590
T °C	18,9	25	22,5	21,1	23,2	21,3	20,6	20,6
Oxígeno 18	-3	-	-3,4	-0,8	-9,9	-10,2	-	-10,3
Deuterio	-34,4	-	-34,2	-15,3	-76,1	-78,2	-	-80

Coordenadas en UTM DATUM WGS84 19S.

Todas las unidades de concentración se presentan en mg/l a menos que se indique la unidad.

ANEXO IX. Informes geofísicos de Geodatos SAIC

El reporte que se presenta a continuación fue realizado por la empresa Geodatos SAIC dentro del contexto de la emergencia geológica minera producto de la subsidencia en la mina Alcaparrosa en el sector de Tierra Amarilla el 30 de julio de 2022.

En el presente estudio se muestran dos perfiles realizados en la cercanía de la subsidencia, utilizando la metodología de transiente de resistividad eléctrica o ERT (por sus siglas en inglés). El perfil 1 sigue el camino de servicio minero de orientación aproximada norte-sur, y el perfil 2, de orientación noreste-suroeste, pasa cercano al borde este de la subsidencia.

La interpretación de los perfiles fue realizada por la Unidad de Hidrogeología con apoyo de la Unidad de Geofísica de Sernageomin dado que la empresa solo entregó un reporte técnico (sin la descripción de la metodología y los errores asociados a la interpolación de los datos). El objetivo de estos perfiles fue la prospección geofísica de la respuesta de los materiales cercanos a la subsidencia para determinar la resistividad eléctrica de estos e intentar determinar la profundidad del contacto roca-relleno, así como la posición estimada del nivel freático.

Scale 1:2500

25 0 25 50 75

(meters)

WGS 84 / UTM zone 19S

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA

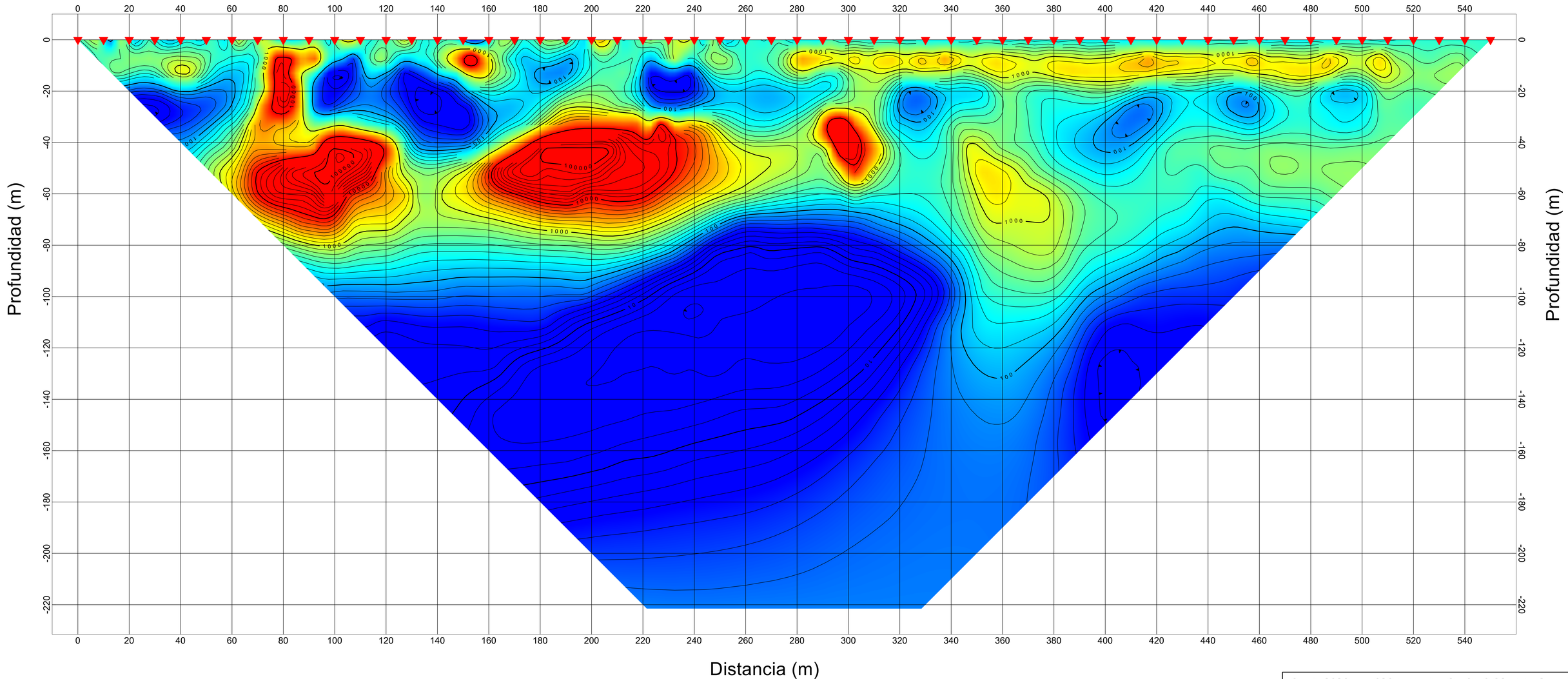
PLANTA DE UBICACION GENERAL
ESTUDIO GEOFISICO
MEDIANTE TOMOGRAFIA ELECTRICA ERT

ZONA MINA ALCAPARROSA
TIERRA AMARILLA - III REGION
(imagen drone 19 de agosto 2022)

GEODATOS SAIC ***AGOSTO 2022***

SUR **NORTE**

374192	374203	374212	374220	374229	374239	374247	374255	374264	374273	374282	374286
6961360	6961408	6961457	6961507	6961556	6961605	6961654	6961704	6961753	6961802	6961851	6961901



Scale 1:1000

20 0 20 40 60

(meters)

Coordenadas WGS84 H19S

26 32 39 48 60 74 91 112 149 198 262 347 461 611 809 1073 1563 2276 3314 4827 7030

RESISTIVIDAD

OHM-M

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA

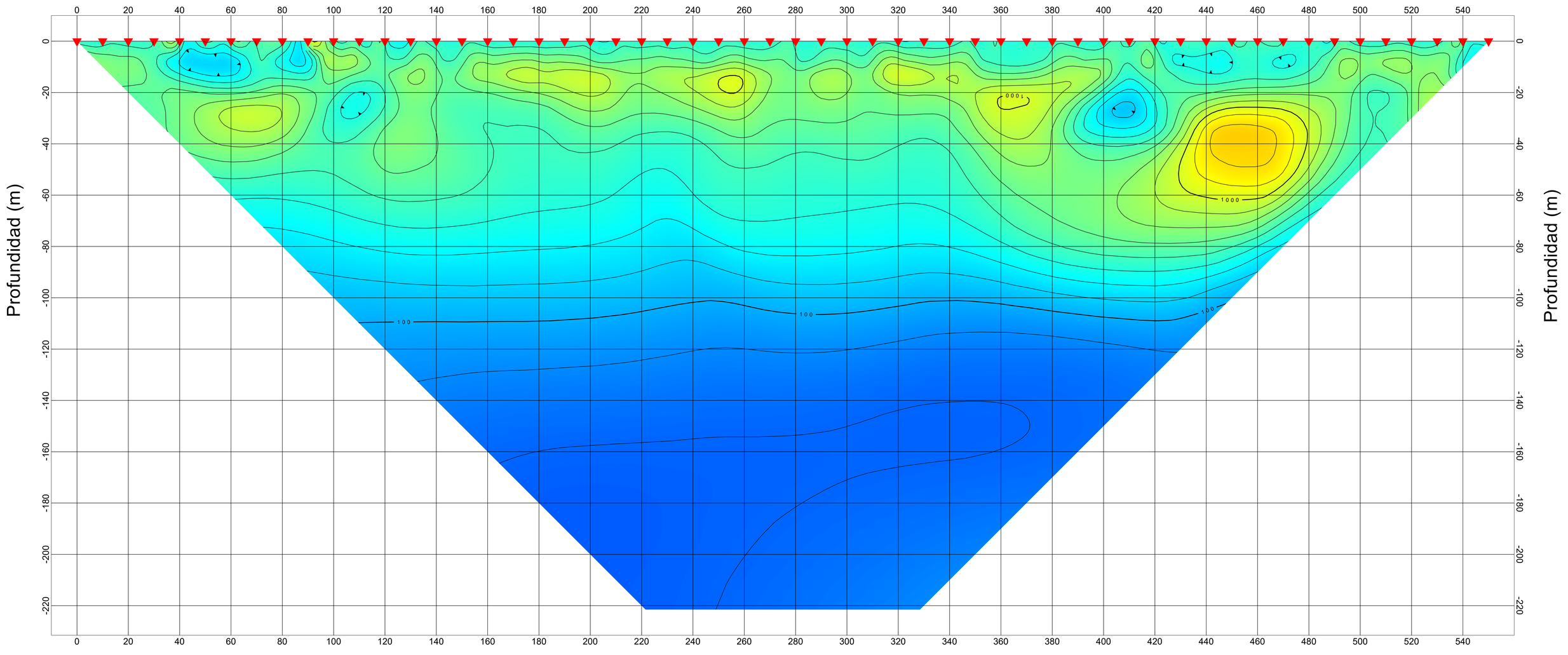
ESTUDIO GEOFISICO DE RESISTIVIDAD MEDIANTE TOMOGRAFIA ELECTRICA ERT

Seccion de Resitividad Linea 1 Sur a Norte
Configuracion Dipolo Dipolo - Gradiente - Polo Dipolo
Distancia Dipolar 10 metros
Tierra Amarilla - III Region

GEODATOS SAIC ***AGOSTO 2022***

SUR **NORTE**

374295 6961441	374323 6961482	374358 6961518	374390 6961556	374411 6961601	374429 6961648	374439 6961696	374437 6961747	374447 6961796	374462 6961844	374475 6961892	374487 6961940



Profundidad (m)

Profundidad (m)

Distancia (m)

Scale 1:1000

20 0 20 40 60

(meters)

Coordenadas WGS84 H19S

26 32 39 48 60 74 91 112 149 198 262 347 461 611 809 1073 1563 2276 3314 4827 7030

RESISTIVIDAD

OHM-M

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA

ESTUDIO GEOFISICO DE RESISTIVIDAD MEDIANTE TOMOGRAFIA ELECTRICA ERT

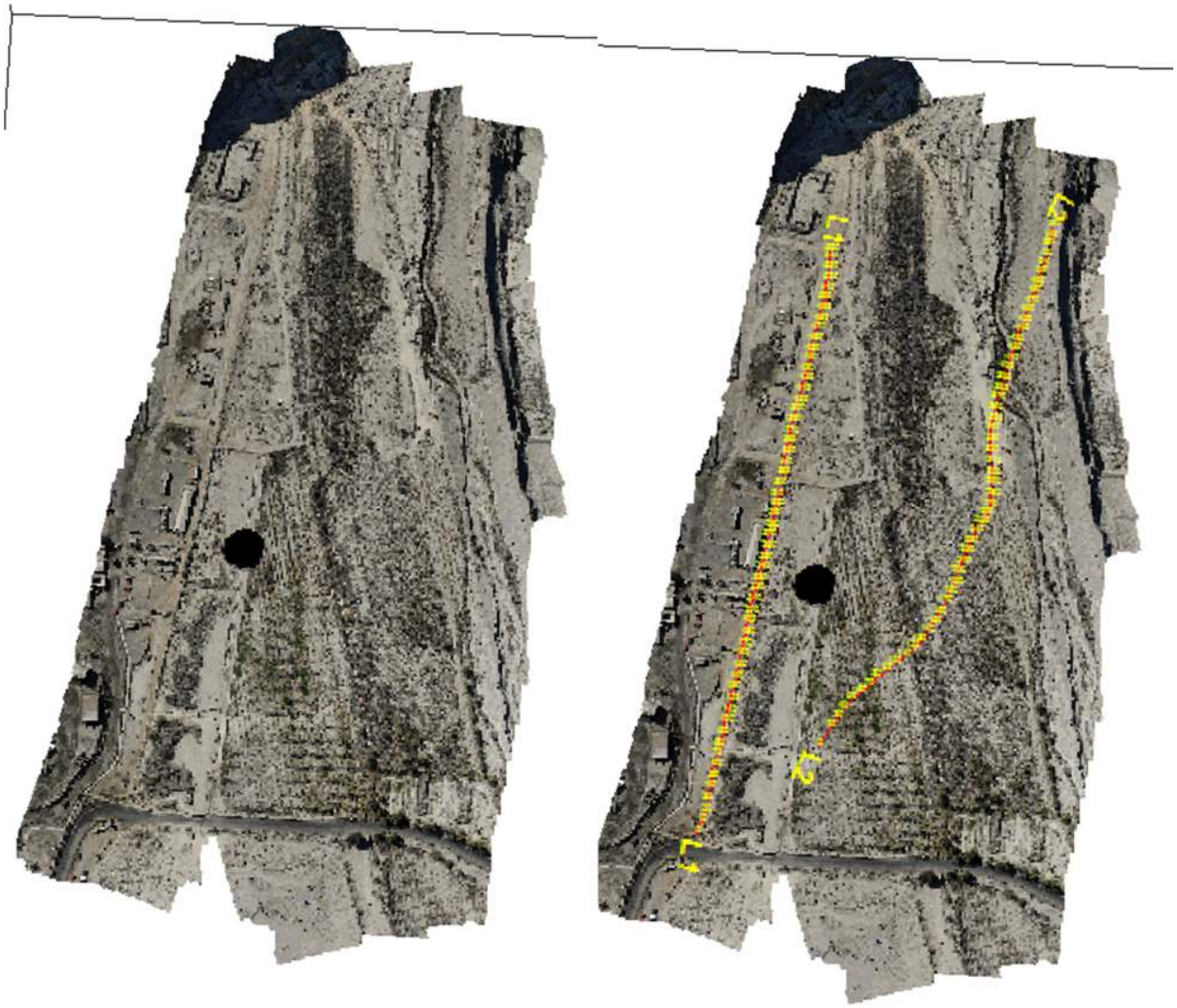
Seccion de Resitividad Linea 2 Sur a Norte
Configuracion Dipolo Dipolo - Gradiente - Polo Dipolo
Distancia Dipolar 10 metros
Tierra Amarilla - III Region

GEODATOS SAIC ***AGOSTO 2022***

CHILE/CASA MATRIZ
Román Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

IMAGEN DRONE 19 DE AGOSTO 2022
LINEAS MEDIDAS



CHILE/CASA MATRIZ
Román Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

IMAGEN DRONE 19 DE AGOSTO 2022
HUNDIMIENTO (VISTO DE SUR A NORTE)

CHILE/CASA MATRIZ
Román Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

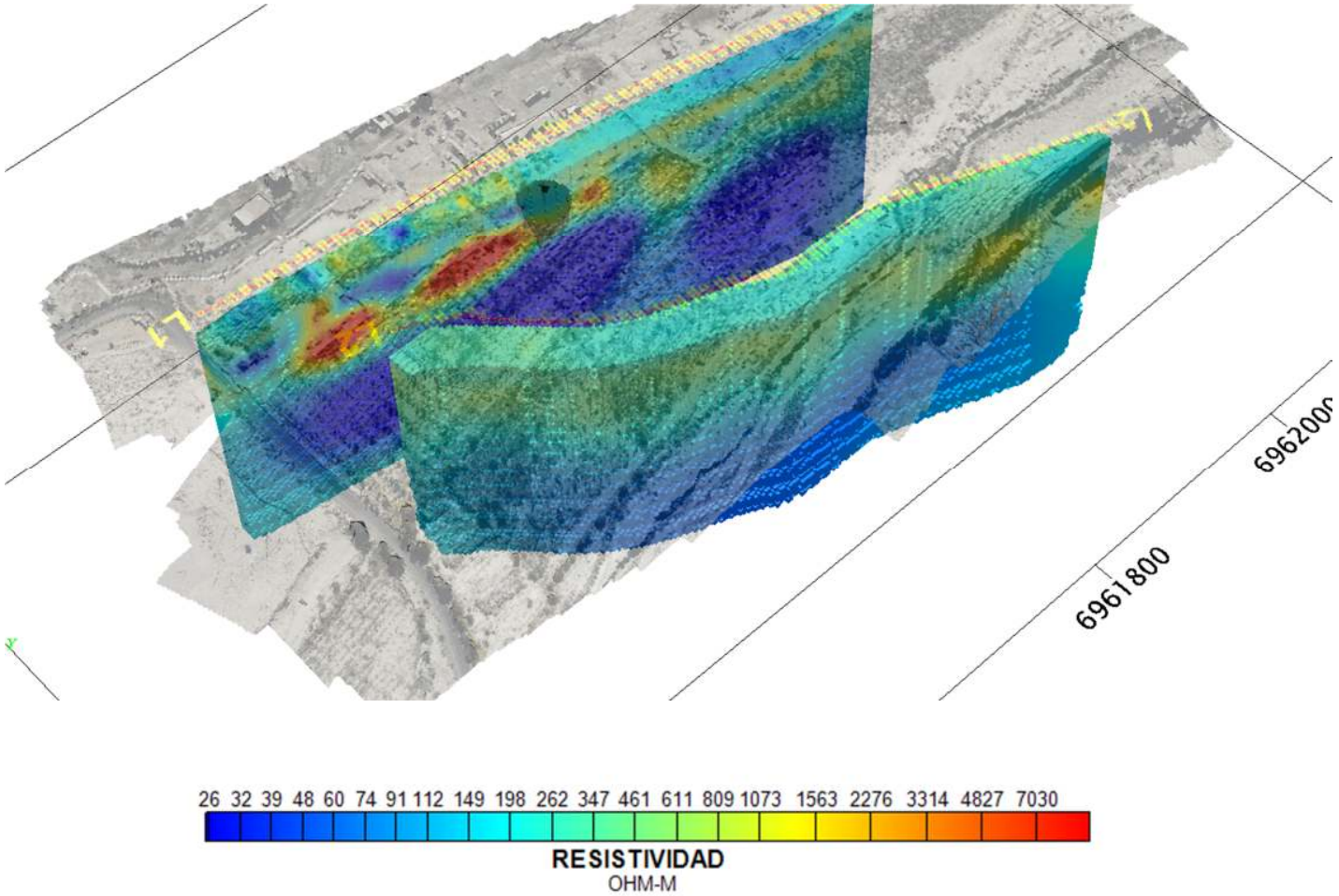
GEODATOS
Geofísica de Avanzada

IMAGEN DRONE 19 DE AGOSTO 2022
HUNDIMIENTO (VISTO DE OESTE A ESTE)

CHILE/CASA MATRIZ
Román Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

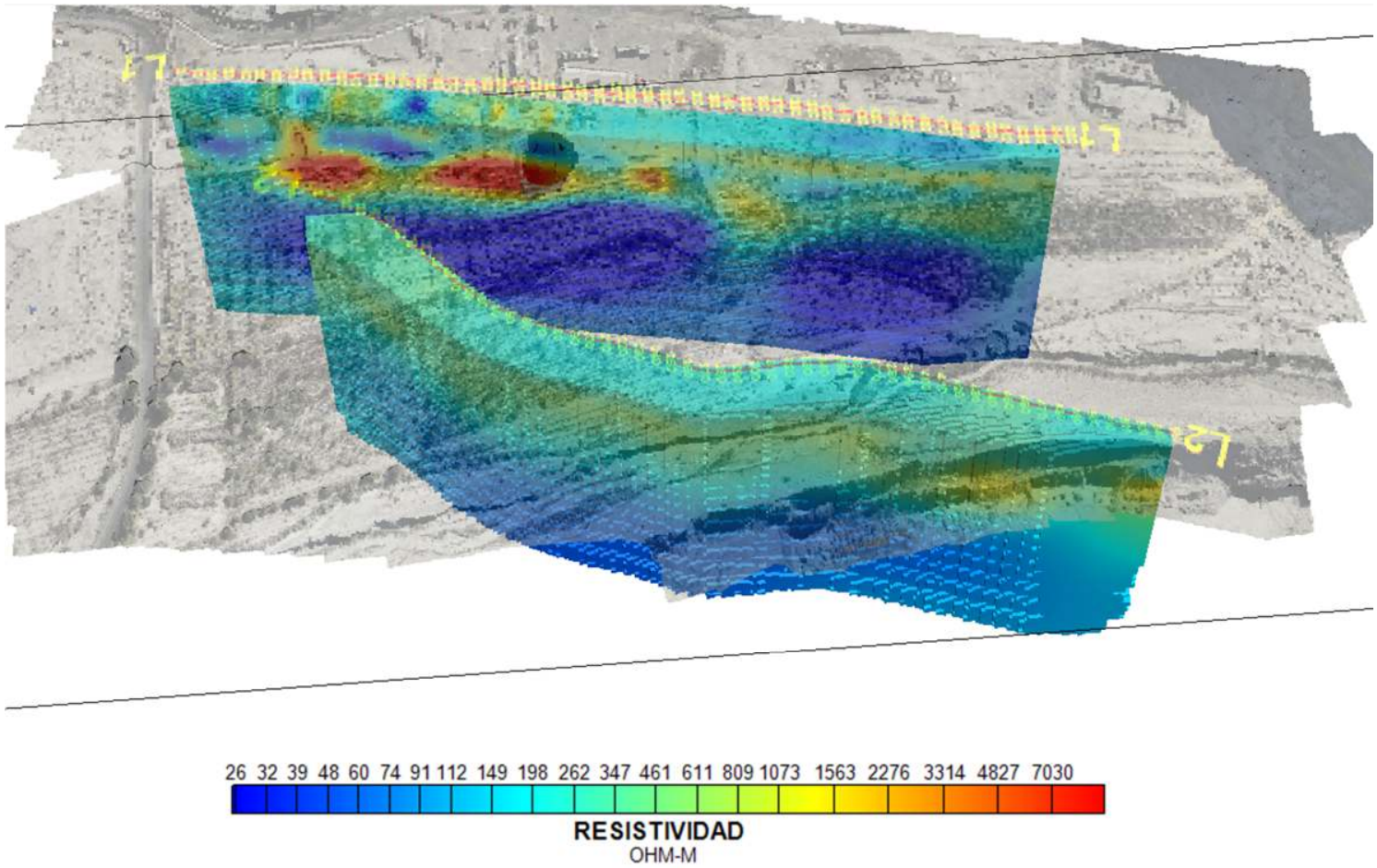
IMAGEN DRONE 19 DE AGOSTO 2022
SECCIONES DE RESITIVIDAD L1 Y L2
DE SW A NE



CHILE/CASA MATRIZ
Román Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

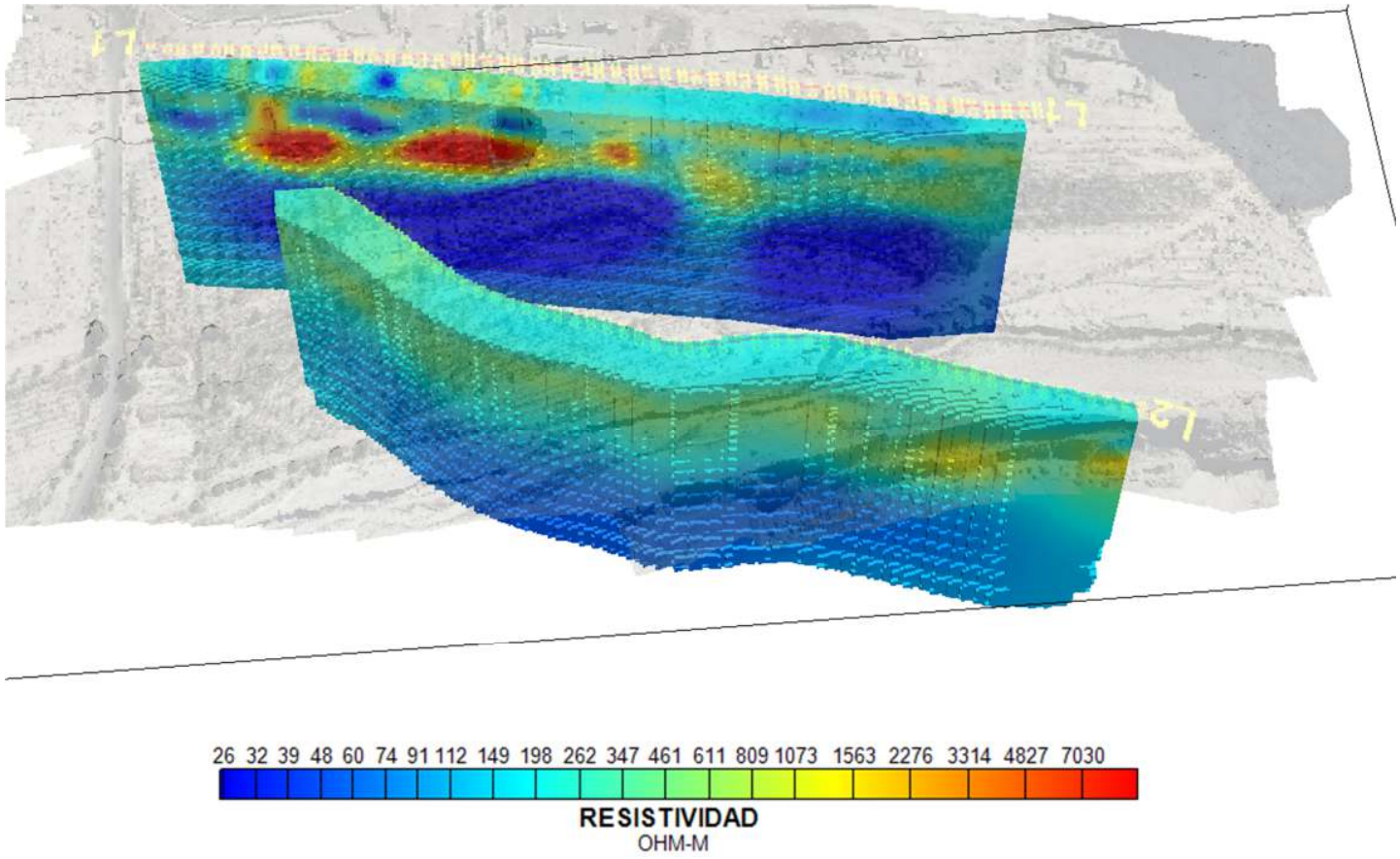
IMAGEN DRONE 19 DE AGOSTO 2022
SECCIONES DE RESITIVIDAD L1 Y L2
DE OESTE A ESTE



CHILE/CASA MATRIZ
Román Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

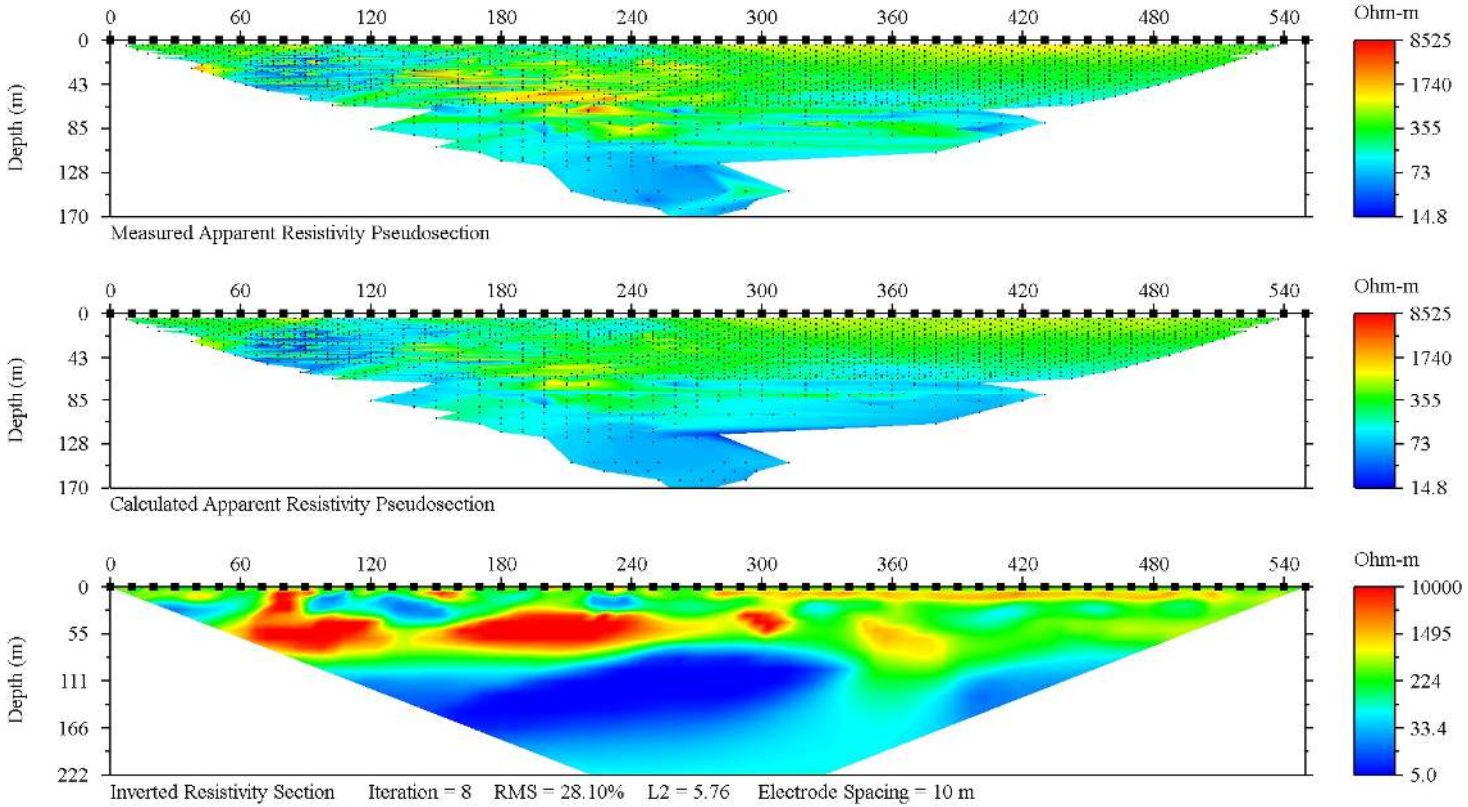
IMAGEN DRONE 19 DE AGOSTO 2022 (80% tranparencia)
SECCIONES DE RESITIVIDAD L1 Y L2
DE OESTE A ESTE



CHILE/CASA MATRIZ
Román Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

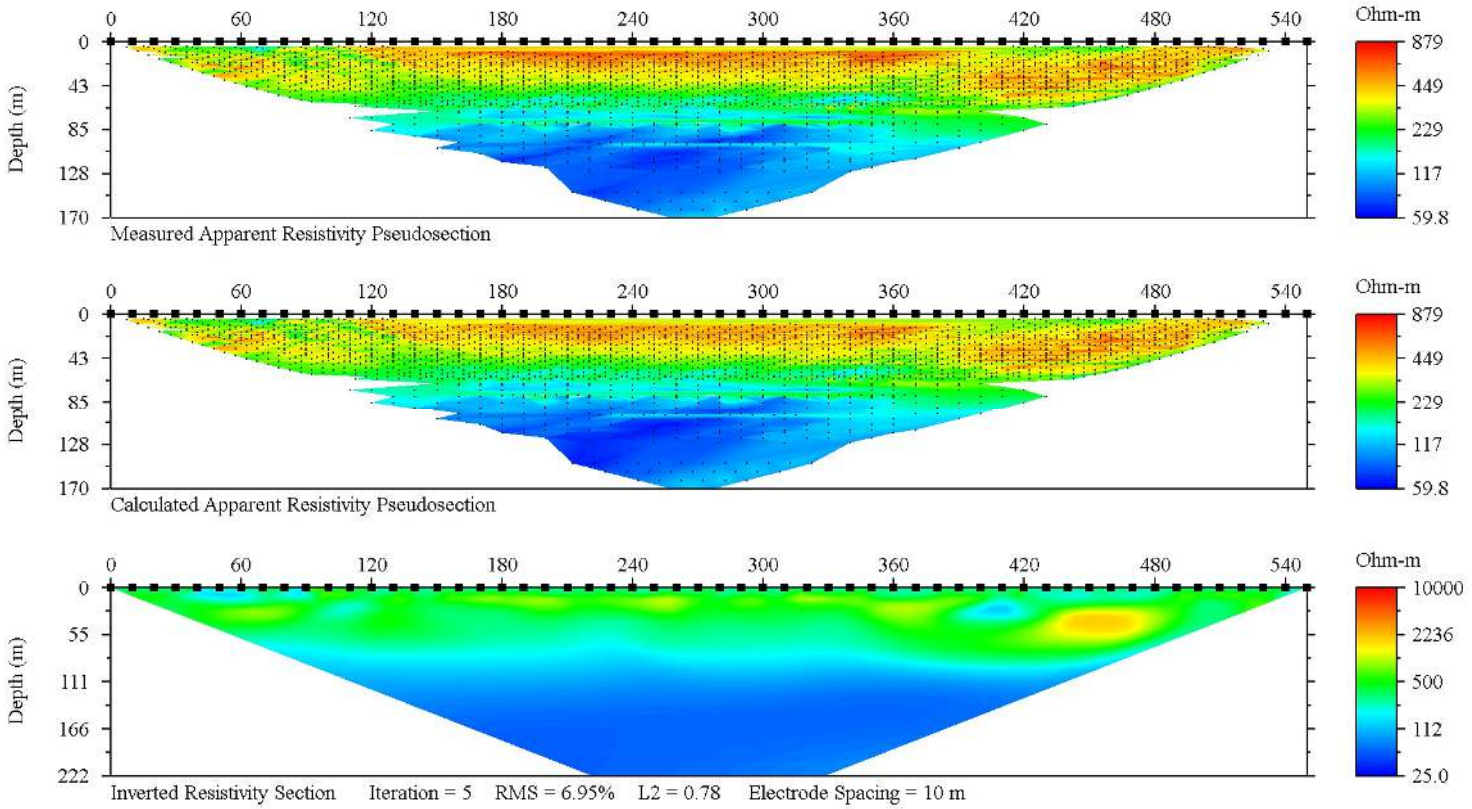
LINEA 1 SN (550 METROS) – MODELOS DE CALCULO



CHILE/CASA MATRIZ
Román Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

LINEA 2 SN (550 METROS) – MODELOS DE CALCULO



CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

INFORME
GEOFISICO
SISMICA MASW
SERNAGEOMIN – TIERRA AMARILLA
SEPTIEMBRE 2022

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

INDICE GENERAL

1 INTRODUCCIÓN

2 TRABAJO DE TERRENO

3 METODO → SISMICA REFRACCION Y MASW

3.1 Instrumental Sísmica MASW
3.2 Método MASW
3.3 Sistema de medición (MASW)
3.4 Proceso e Inversión de Datos (MASW)
3.5 Representación de resultados (MASW)

4 RESULTADOS

4.1 Resultados e Interpretaciones. (SISMICA MASW)
L1 → Línea de Norte a Sur, 920 metros, 24 Geófonos Cada 40 metros.
L2 → Línea de Oeste a Este, 920 metros, 24 Geófonos Cada 40 metros.
4.2 Resultados e Interpretaciones. (ERT)
L1 TE→ Línea de Norte a Sur, 550 metros, 56 Caneles (dipolo – dipolo & polo dipolo).

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones MASW
5.2 Conclusiones ERT + MASW
5.3 Recomendaciones MASW

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

1 INTRODUCCIÓN

A solicitud de **Servicio Nacional Geología y Minería de Chile (SERNAGEOMIN),** se realizó una campaña de **Mediciones Sísmica,** mediante el **Sísmica de Refracción MASW** en el Sector de Minera Alcaparrosa, III Región de Atacama.

El objetivo de este estudio es determinar las propiedades elásticas del subsuelo desde mediciones realizadas desde superficie. Los resultados obtenidos son perfiles 2D que muestras cambios de Velocidad del subsuelo.

Con dicho propósito, se midieron perfiles de 2 Perfiles sísmicos MASW de 920 metros cada uno, que fueron orientados de forma perpendicular entre ellos.

La configuración de terreno del método de sísmica Refracción MASW fue con una configuración de 24 geófonos cada 40 metros , con la cual se obtiene una profundidad de investigación máxima 400 metros.

Como complemento se utilizo Perfil de Resistividad Eléctrica ERT dipolo 10 metros, medido en el sector.

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

2 TRABAJO DE TERRENO

El personal de campo estuvo formado por un operador geofísico especializado y asistentes técnicos. El equipo de apoyo logístico y técnico estuvo formado por vehículos 4WD y carro de arrastre cable sísmicos, instrumental GPS, computadora portátil y radios de intercomunicación.

Se conto con apoyo constante y gestiones de SERNAGEOMIN para realizar corte de caminos y ingresos a sector privados, para poder efectuar las mediciones.

Las fechas de medición en terreno comenzaron el día lunes 29 de Agosto de 2022 hasta el días Martes 30 de Agosto de 2022

Imágenes de terreno.

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

3 METODO → SISMICA REFRACCION Y MASW

3.1 Instrumental (Sísmica Refracción y MASW)

Para este estudio se utilizó un Sismógrafo GEOMETRICS modelo GEODE de 24 canales, que tiene las siguientes especificaciones:

- Instrumento digital de 24 bits.
- Control por computador “laptop” Panasonic, tipo “rugged”.
- Sistema de suma de señal.
- Ganancia de preamplicadores: 24 ó 36 [dB].
- Ancho de banda: 1.75 [Hz] a 20 [kHz]
- Filtros digitales para la adquisición y “display”.
- Rango dinámico: 144 [dB]
- Impedancia de entrada: 20 [K-ohm], 0.02 [mf].

, Fotografías Instrumental Geofísico Empleado

Los accesorios periféricos utilizados en el levantamiento sísmico fueron los siguientes:

- Fuente de poder del sismógrafo: Batería externa de 12 [V].
- Cable de geófonos: Cable multiconductor reversible con 24 conectores para instalar los geófonos, a intervalos de distancia 100 metros, en carro de arrastre doble eje.
- Geófonos: Sensores de vibraciones, básicamente un péndulo formado por una bobina móvil de frecuencia natural de 4.5 Hz.

Parámetros de Medición

Los parámetros empleados en el estudio sísmico fueron los siguientes:

- Tendido Sísmico de 24 canales.
- Separación entre Geófonos: 40 [m]
- Longitud de los tendidos: 920 [m]
- Frecuencia Natural del Arreglo de Geófonos: 4.5 Hz.
- Longitud de cada registro: 60 [s].
- Intervalo de muestreo: 4 [ms].
- Sismógrafo digital de 24 bits.

3.2 Método MASW

Aspectos Generales del Método

El método sísmico MASW (multichannel analysis of surface waves) es una técnica que proporciona una caracterización simplificada de las propiedades elásticas de rocas y sedimentos. La base teórica del método es el multi-análisis de las ondas superficiales (MASW). La gran ventaja del método es el uso de sismógrafos estándares modernos. Para la caracterización sísmica de un sitio se recomienda el uso de geófonos de baja frecuencia apropiados y longitud de tendidos sísmicos de acuerdo a la profundidad y resolución requeridos.

El método permite obtener modelos de velocidades de ondas de corte (ondas S), hasta profundidades que dependen, teóricamente, del largo de los tendidos sísmicos, separación y frecuencia de los geófonos, así como también del contenido de frecuencias que se visualicen claramente en el modo fundamental al momento del picado de la curva de dispersión.

Combinando este método con refracción convencional, es posible calcular los módulos de elasticidad, ya que se conocen las velocidades de propagación de ondas P y S. Dentro de las principales ventajas de MASW se encuentran:

- Puede detectar y resolver estratos de baja velocidad subyaciendo a estratos de mayor velocidad (no necesariamente velocidades en orden estrictamente crecientes a diferencia de la técnica de refracción sísmica)

- Se puede correlacionar muy bien con medidas geotécnicas como el índice SPT, RQD u otros ensayos in situ en suelos y rocas.
- No necesita emplear explosivos para la generación de la señal sísmica, se utiliza el mismo ruido ambiente para captar las ondas superficiales.

3.3 Sistema de medición (MASW)

La señal sísmica registrada corresponde a ondas superficiales de tipo Rayleigh por lo que el método puede ser aplicado en zonas urbanas aprovechando el ruido ambiente (fuente pasiva), tales como el paso de vehículos, personas caminando u otras vibraciones ambientales como fuente de energía, además de forma complementaria (como fuente de energía activa) se golpeó en diversos tramos de la extensión de cada perfil, en el lapso correspondiente al intervalo de muestreo.

Se debe considerar que las vibraciones ambientales (microtremores) son señales que varían en un amplio rango de frecuencias, en general se asume que se propagan principalmente como ondas superficiales de tipo Rayleigh. Las microvibraciones de origen natural son inferiores a 1 Hz (por ejemplo, marea, viento, etc.) y las que se producen por efectos antrópicos son mayores a 1 Hz llegando a 30 Hz (por ejemplo, maquinarias, paso de vehículos, entre otras fuentes activas no estacionarias), lo que interesa con fines ingenieriles y de caracterización geomecánica se restringe a un rango comprendido entre los 0.1 y 30 Hz aproximadamente.

Fuente de Energía

MASW por definición se relaciona con la medición de ondas superficiales, es decir, ruido ambiental (microvibraciones, las que suponen ser ricas en ondas superficiales tipo Rayleigh). Se complementó la medición con golpes (como fuente de energía activa) a lo largo de la extensión donde se midieron los perfiles (para enriquecer el rango de longitudes de ondas), utilizó como fuente de energía un mazo de 25 libras, con el que se golpeó en diversos tramos de la extensión del perfil, en el lapso correspondiente al intervalo de muestreo.

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

3.4 Proceso e Inversión de Datos (MASW)

Los datos de MASW son analizados por tramos de 12 geófonos para cada tendido sísmico (excepto en los extremos de éste, en donde se analizan tramos de 6, 8 geófonos), obteniéndose un total de 24 tramos analizados para tendidos completos de 24 geófonos (Tabla 1).

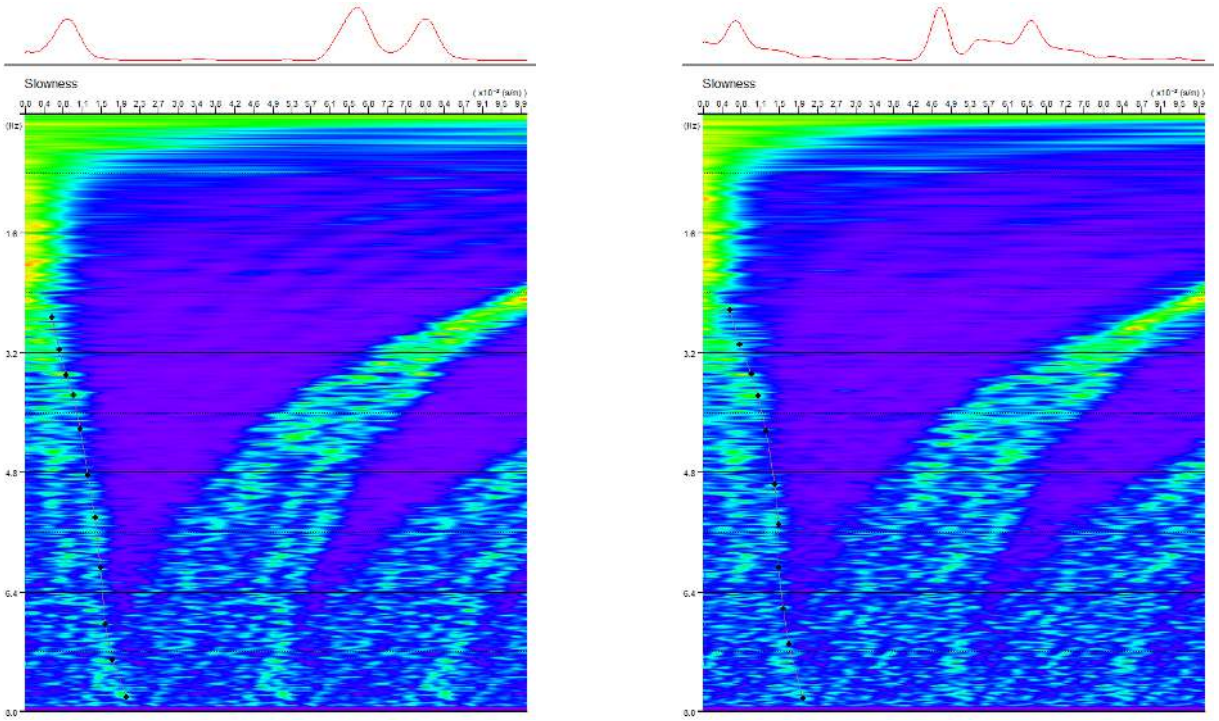
Tramo Analizado	Geófonos	Ubicación modelo 1D para geófonos c/40 m (0 - 920 m)
Tramo 1	1-6	100
Tramo 2	1-7	120
Tramo 3	1-8	140
Tramo 4	1-9	160
Tramo 5	1-10	180
Tramo 6	1-11	200
Tramo 7	1-12	220
Tramo 8	2-13	260
Tramo 9	3-14	300
Tramo 10	4-15	340
Tramo 11	5-16	380
Tramo 12	6-17	420
Tramo 13	7-18	460
Tramo 14	8-19	500
Tramo 15	9-20	540
Tramo 16	10 21	580
Tramo 17	11-22	620
Tramo 18	12-23	660
Tramo 19	13-24	700
Tramo 20	14-24	720
Tramo 21	15-24	740
Tramo 22	16-24	760
Tramo 23	17-24	780
Tramo 24	18-24	800

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

Curvas de Dispersión

Para el proceso y obtención de los modelos 1D de velocidades de ondas de corte a lo largo de cada perfil, se utilizó el módulo Surface Plus de Geogiga Technology Corp, el que básicamente consiste en un multi-análisis espectral de las ondas superficiales – MASW.



Ejemplo curvas de dispersión MASW

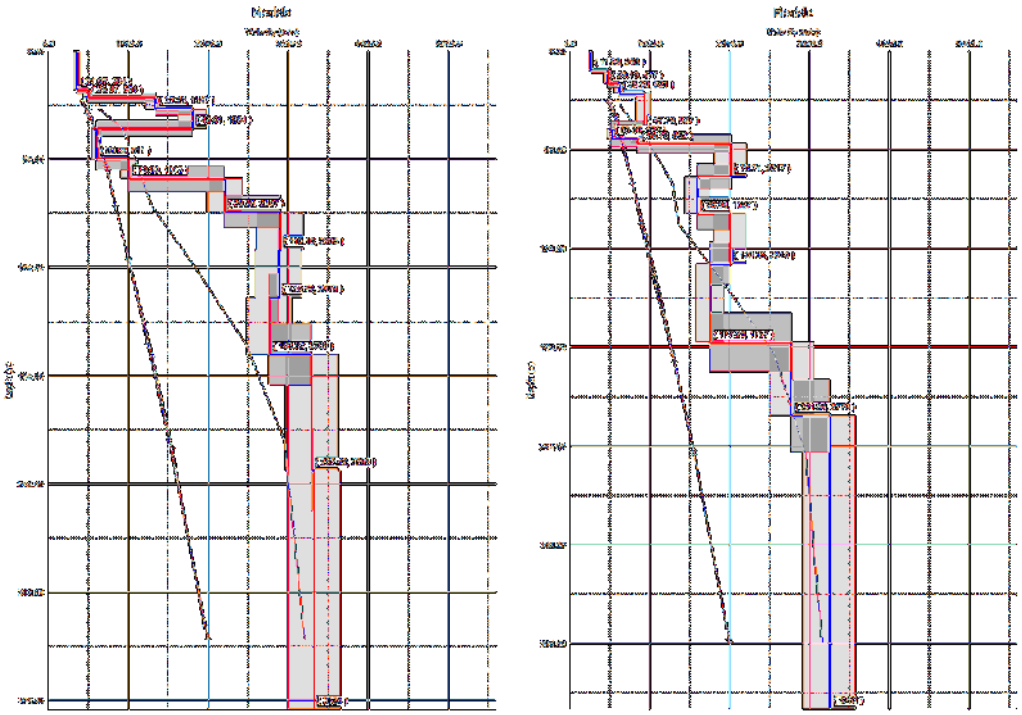
En rigor, lo que se obtiene a partir del análisis de estas curvas de dispersión es un “picado” en el dominio P-F que representa el espectro de velocidad de ondas superficiales en el dominio lentitud-frecuencia, éstas son velocidades de ondas Rayleigh cuya velocidad de propagación es del orden del 92-97% de las ondas Vs, por lo que en la práctica se consideran semejantes.

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

Modelos 1D (Velocidad Vs / Profundidad)

A continuación del picado de la curva de dispersión, se obtiene un modelo de capas 1D generado por la inversión de cada curva de dispersión para cada tramo analizado de un tendido sísmico.



Ejemplo modelos 1D (Velocidad Vs / profundidad)

En la Imágenes, la curva azul representa al modelo inicial para la inversión, y la curva roja corresponde al modelo final obtenido. Además, los puntos azules corresponden al picado de la onda de dispersión para cada disparo, mientras que los puntos rojos a los modelados por la inversión.

3.5 Representación de resultados (MASW)

Sección 2D de Velocidad Vs

Las Figuras L1 a L2 muestran las secciones de velocidad de ondas de corte (Vs) resultantes de la interpolación de las inversiones 1D de cada uno de los tramos analizados. Se utilizó una zonificación de colores para la velocidad de onda S única (450 a 2500 [m/s)], y representativa con el objeto de cotejar las secciones entre sí y definir zonas de interés.

4 RESULTADOS

4.1 Resultados MASW

Las figuras correspondientes al sector estudiado muestran las secciones de velocidad de ondas de corte “Vs” de los perfiles, obtenidas a partir de los modelos 1D. Las secciones de velocidad Vs, presentadas en las figuras, alcanzan para este proyecto profundidades de investigación de hasta los 400 metros, lo que depende principalmente del largo de los tendidos sísmicos, separación y frecuencia de los geófonos, así como también del contenido de frecuencias que se visualicen claramente en el modo fundamental al momento del picado de la curva de dispersión.

Se considera importante mencionar que las secciones MASW presentadas fueron generadas a partir de una inversión numérica 1D (que representa distintos tramos de un tendido sísmico), las que posteriormente se interpolan y se obtienen las secciones 2D de cada perfil analizado, por lo que, podrían presentarse algunas leves diferencias, respecto a las velocidades detectadas en las zonas de cruces de los perfiles.

Se debe recalcar que los resultados geofísicos obtenidos corresponden netamente a respuestas geosísmicas, las que pudieran asociarse a diversos materiales constituyentes del subsuelo, o bien a un mismo material que presenta diferentes condiciones (grado de consolidación, granulometría, alteración, fracturamiento, meteorización, rigidez, etc.); por lo que se reitera que el aspecto geofísico debe analizarse en conjunto, y de forma complementaria, con otros antecedentes que permitan conclusiones más certeras e integrales acerca de la mecánica de suelos existente en el área de estudio, tales como información de sondajes cuya descripción estratigráfica permitiese una mejor calibración de las interpretaciones acá realizadas.

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

En la siguiente figura se visualiza la ubicación de 2 perfiles MASW en el área de estudio.

L1 → Perfil Norte – Sur (920 metros)

L1 → Perfil Este – Oeste(920 metros)

A continuación, se presentan los resultados MASW en los siguientes perfiles.

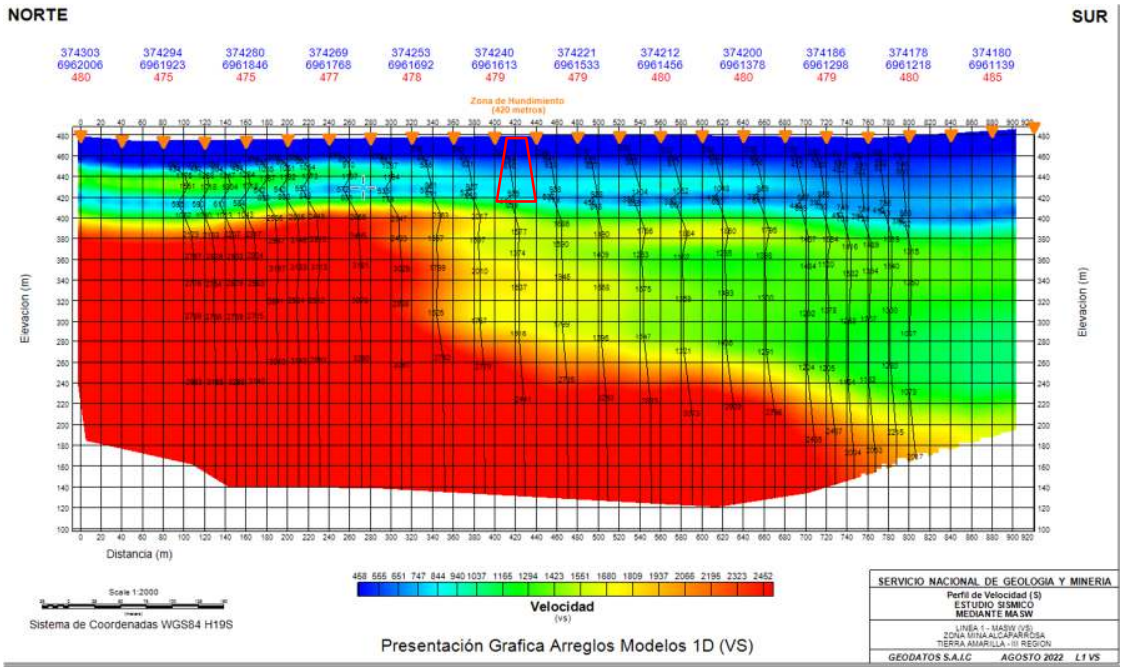
CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

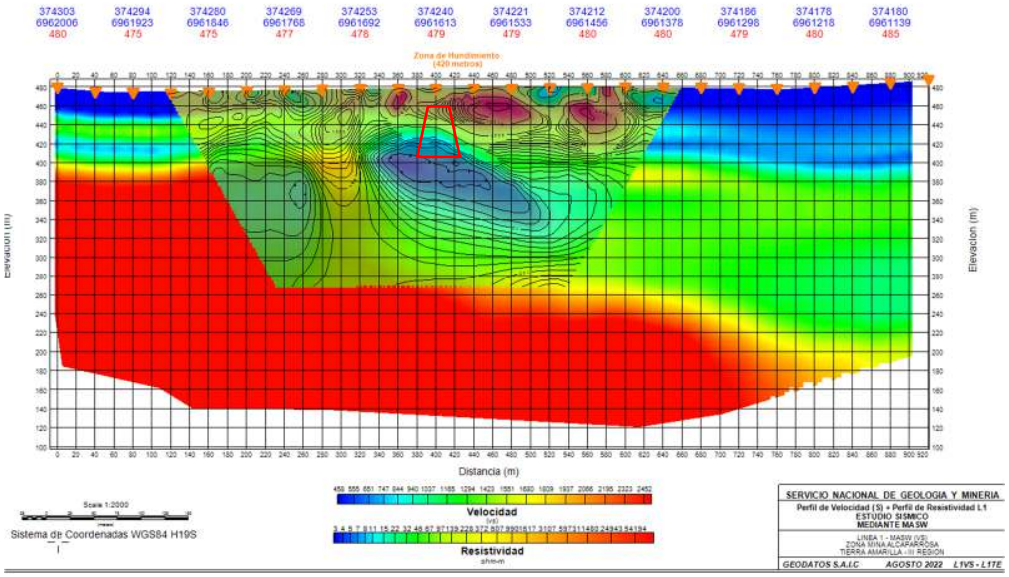
L1 MASW → Línea de Norte a Sur (920 metros, geófonos 40 metro)

Camino de Servicio Interior Mina Alcaparrosa

Profundidad de Exploración 400 metros



Sísmica MASW + Perfile Tomografía Eléctrica ERT



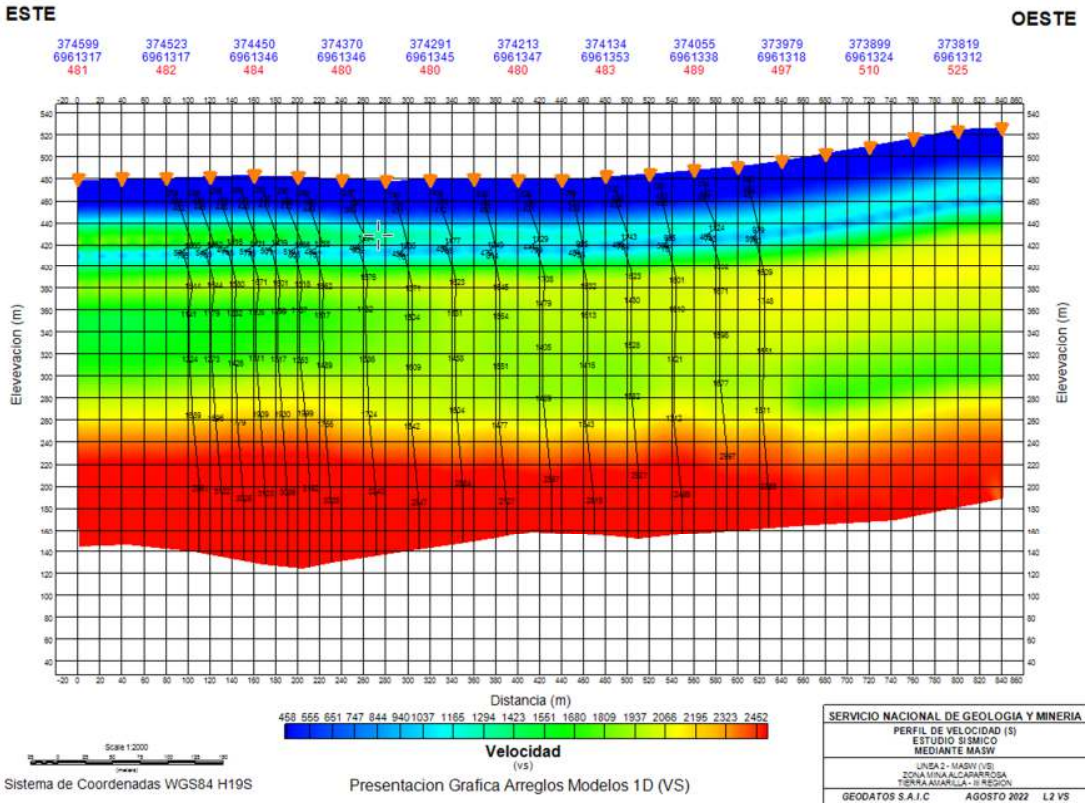
CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

L2 MASW → Línea de Este a Oeste (920 metros, geófonos 40 metro)

Camino Pucobre

Profundidad de Exploración 400 metros

Nota: por la presencia de Shaft de Ventilación los últimos 2 Geófonos **NO** se puede procesar.



CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

5 Conclusiones y Recomendaciones.

5.1 Conclusiones MASW

Las mediciones de MASW y sus resultados describen los distintos estratos del subsuelo en cuanto a sus velocidades (S), se aprecian grandes cambios en forma vertical, los cuales representan las capas del sub-suelo.

El proceso de inversión de los datos sísmicos MASW, está dentro de los parámetros de control de calidad, lo que indica que los datos tienen muy bajo error asociado y en consecuencia son representativos de las propiedades elástica del subsuelo

Los 2 Perfiles de forma general se describen 3 unidades.

- Unidad A: Superficial: Se observa hasta profundidades de l, en donde se observan velocidades “Vs” inferiores a 750 m/s, los que corresponden a Sedimentos Superficiales de baja consolidación.

- Unidad B: Intermediar: Subyaciendo la unidad anteriormente descrita, se observa un sector con velocidades que van de 750 [m/s] a 1750 [m/s]. Las características de esta unidad se correlacionan con Sedimentos de regular Consolidación y/o Roca muy Alterada/Fracturada.

- Unidad C: Profunda: bajo la unidad anteriormente descrita, se observa un estrato con velocidades que varían desde 1750 a 3000 [m/s], lo que se asocia a un estrato rocoso que podría presentar algún bajos grados de alteración y/o fracturamiento.

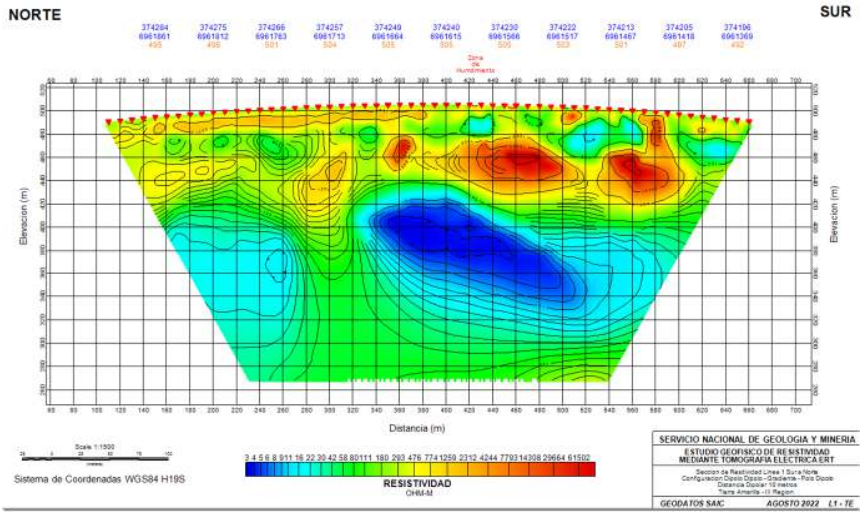
Para el Perfil L1 MASW, el cambio de geometría de las unidades; muestra la posible presencia de una estructura geológica, a la cual se le pueden atribuir el cambio en las profundidades y potencias de las unidades a lo largo del perfil.

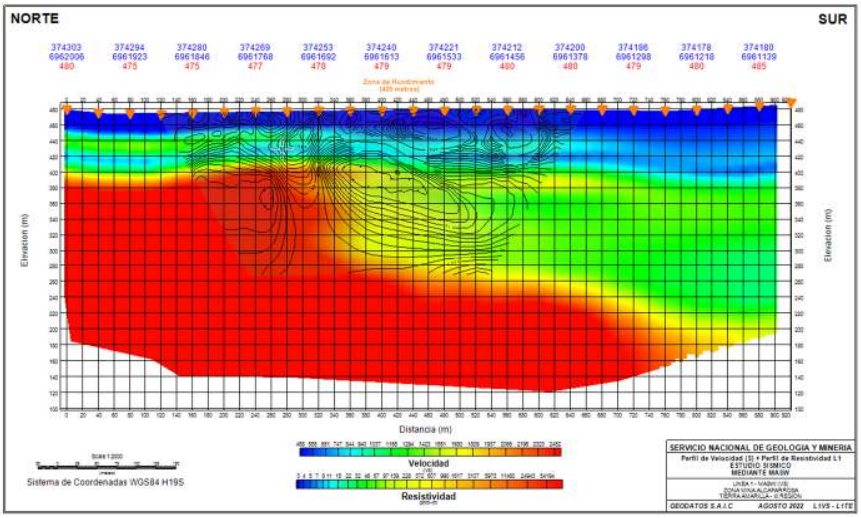
CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

5.2 Conclusiones ERT + MASW

El Perfil ERT L1 muestra una anomalía de baja resistividad de valores [3 – 15 ohm m] lo que se puede asociar a presencia de aguas subterráneas. Por principios de la técnica MASW, la onda S no se propagan por una masa liquida. Es por esto que la velocidad (S) en donde esta la anomalía de baja resistividad puede tener menor magnitud, ya que esta atenuada por la posible presencia de agua.



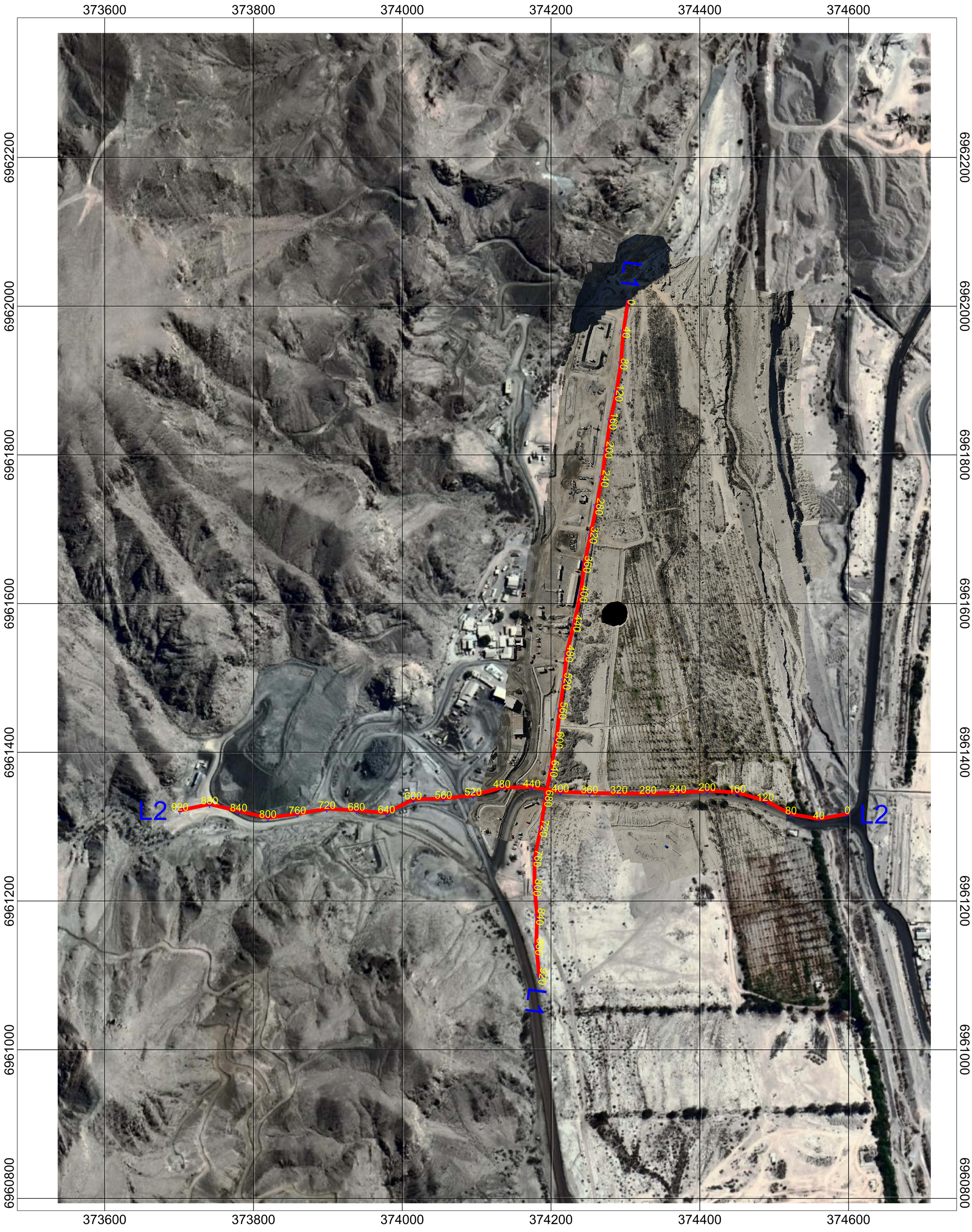


CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

5.3 Recomendaciones MASW

Como recomendación general, es tener datos de sondajes para poder correlacionar las unidades descritas con datos de geología. La metodología Sísmica MASW es ideal para la interpretación de suelos en cuanto a descripción de contactos entre Grabas y Roca.

Geodatos, septiembre 2022.



Scale 1:5000

50 0 50 100 150 200 250

(meters)

WGS 84 / UTM zone 19S

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA

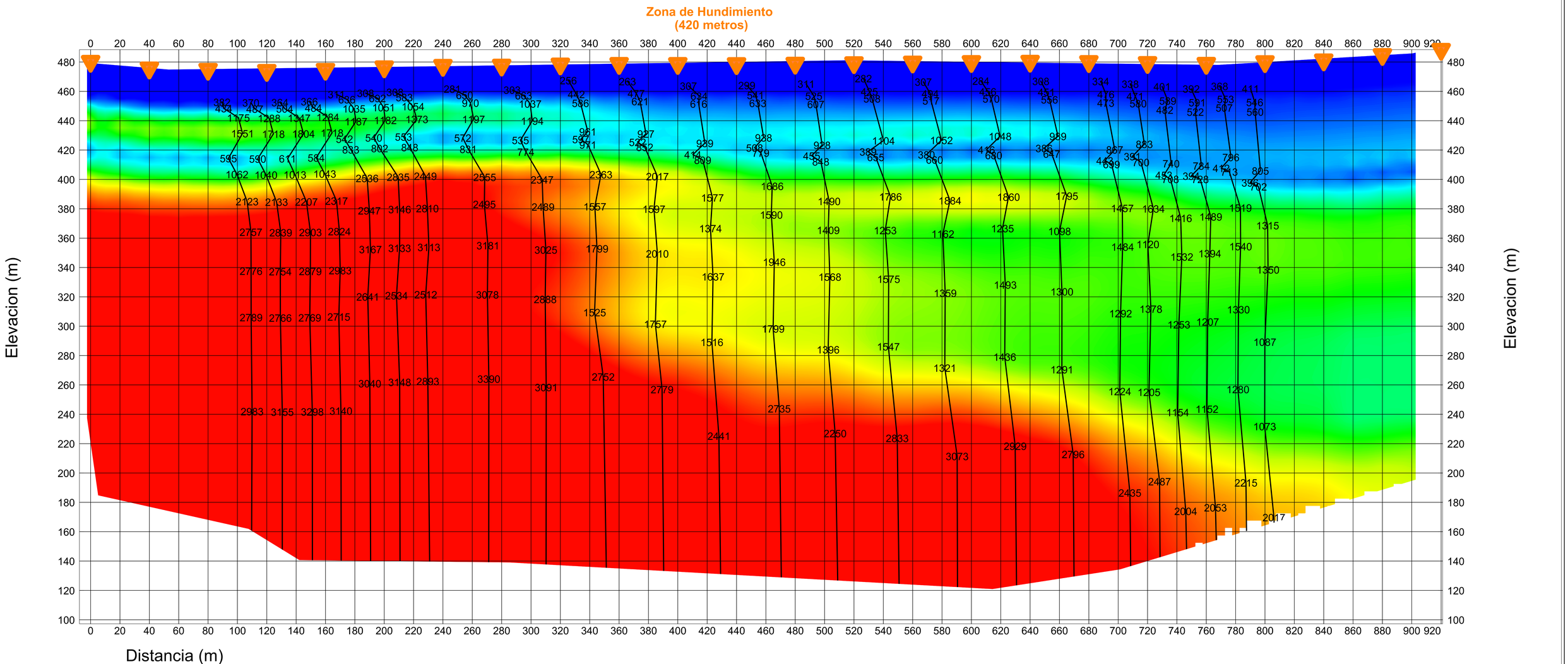
PLANTA DE UBICACION GENERAL
ESTUDIO SISMICO
MEDIANTE MASW

ZONA MINA ALCAPARROSA
TIERRA AMARILLA - III REGION

GEODATOS S.A.I.C ***AGOSTO 2022***

NORTE **SUR**

374303	374294	374280	374269	374253	374240	374221	374212	374200	374186	374178	374180
6962006	6961923	6961846	6961768	6961692	6961613	6961533	6961456	6961378	6961298	6961218	6961139
480	475	475	477	478	479	479	480	480	479	480	485



Scale 1:2000

25 0 25 50 75 100 125 150

(meters)

Sistema de Coordenadas WGS84 H19S

458 555 651 747 844 940 1037 1165 1294 1423 1551 1680 1809 1937 2066 2195 2323 2452

Velocidad
(vs)

Presentación Grafica Arreglos Modelos 1D (VS)

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA

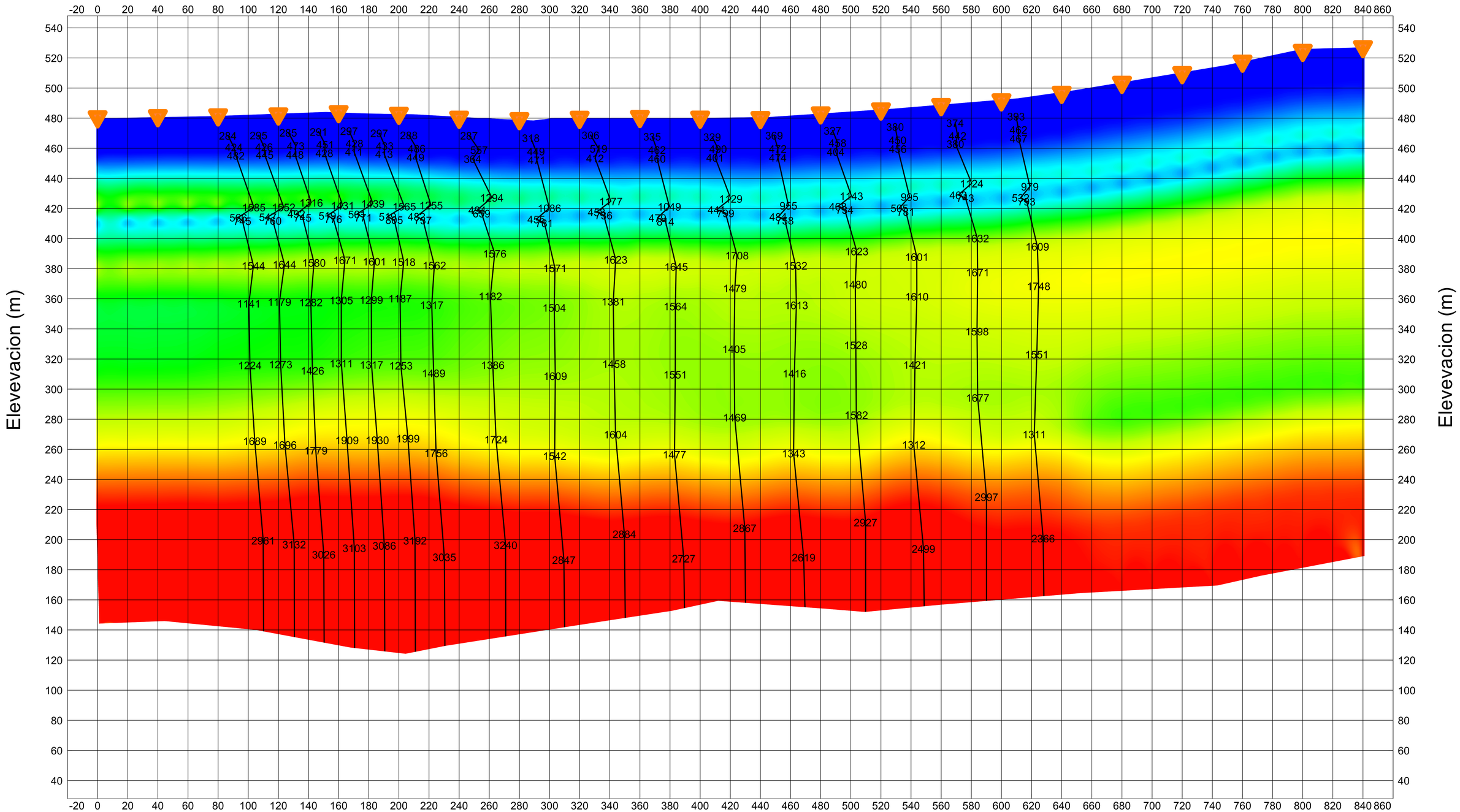
Perfil de Velocidad (S)
ESTUDIO SISMICO
MEDIANTE MASW

LINEA 1 - MASW (VS)
ZONA MINA ALCAPARROSA
TIERRA AMARILLA - III REGION

GEODATOS S.A.I.C ***AGOSTO 2022*** ***L1 VS***

ESTE **OESTE**

374599	374523	374450	374370	374291	374213	374134	374055	373979	373899	373819
6961317	6961317	6961346	6961346	6961345	6961347	6961353	6961338	6961318	6961324	6961312
481	482	484	480	480	480	483	489	497	510	525



458 555 651 747 844 940 1037 1165 1294 1423 1551 1680 1809 1937 2066 2195 2323 2452

Velocidad
(vs)

Scale 1:2000

25 0 25 50 75 100 125 150
(meters)

Sistema de Coordenadas WGS84 H19S

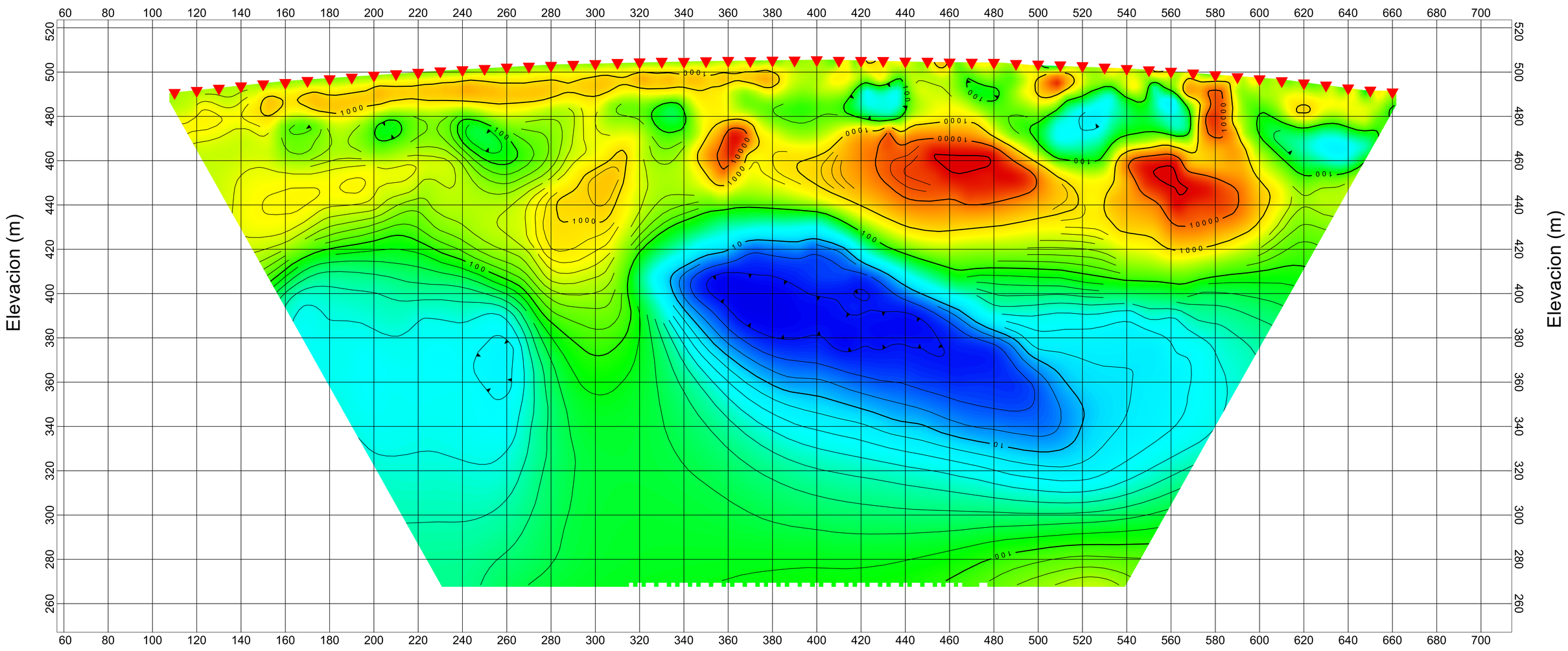
Presentacion Grafica Arreglos Modelos 1D (VS)

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA		
PERFIL DE VELOCIDAD (S) ESTUDIO SISMICO MEDIANTE MASW		
LINEA 2 - MASW (VS) ZONA MINA ALCAPARROSA TIERRA AMARILLA - III REGION		
GEODATOS S.A.I.C	*AGOSTO 2022*	*L2 VS*

NORTE **SUR**

374284	374275	374266	374257	374249	374240	374230	374222	374213	374205	374196
6961861	6961812	6961763	6961713	6961664	6961615	6961566	6961517	6961467	6961418	6961369
495	498	501	504	505	505	505	503	501	497	492

Zona de Humdimiento



Distancia (m)

Scale 1:1500

25 0 25 50 75 100

(meters)

Sistema de Coordenadas WGS84 H19S

3 4 5 6 8 9 11 16 22 30 42 58 80 111 180 293 476 774 1259 2312 4244 7793 14308 29664 61502

RESISTIVIDAD

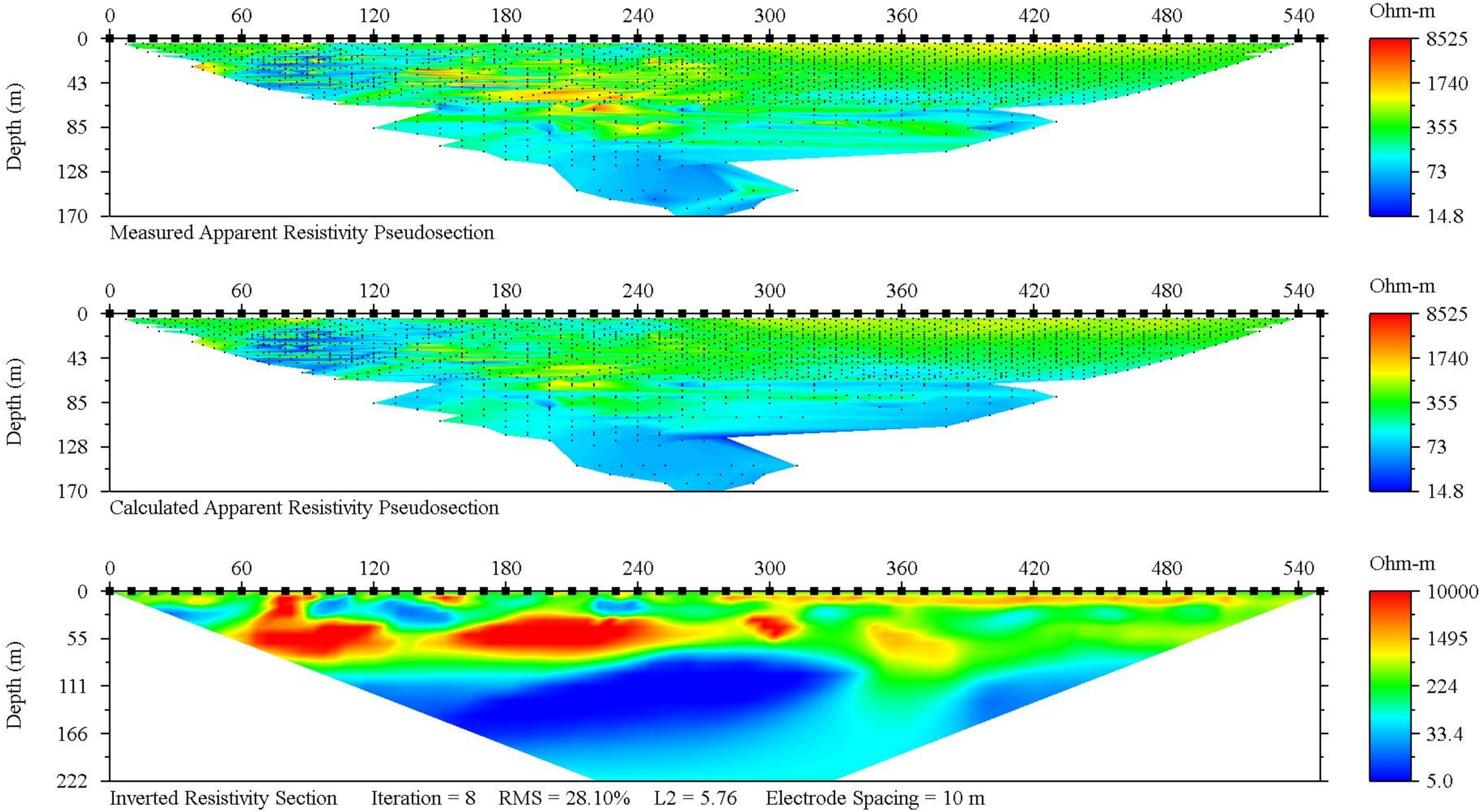
OHM-M

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGIA Y MINERIA

ESTUDIO GEOFISICO DE RESISTIVIDAD MEDIANTE TOMOGRAFIA ELECTRICA ERT

Seccion de Resitividad Linea 1 Sur a Norte
Configuracion Dipolo Dipolo - Gradiente - Polo Dipolo
Distancia Dipolar 10 metros
Tierra Amarilla - III Region

GEODATOS SAIC ***AGOSTO 2022*** ***L1 - TE***


0
60
120
180
240
300
360
420
480
540
Depth (m)
0
43
85
128
170
Ohm-m
8525
1740
355
73
14.8
Measured Apparent Resistivity Pseudosection
Calculated Apparent Resistivity Pseudosection
0
55
111
166
222
10000
1495
224
33.4
5.0
Inverted Resistivity Section
Iteration = 8
RMS = 28.10%
L2 = 5.76
Electrode Spacing = 10 m

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

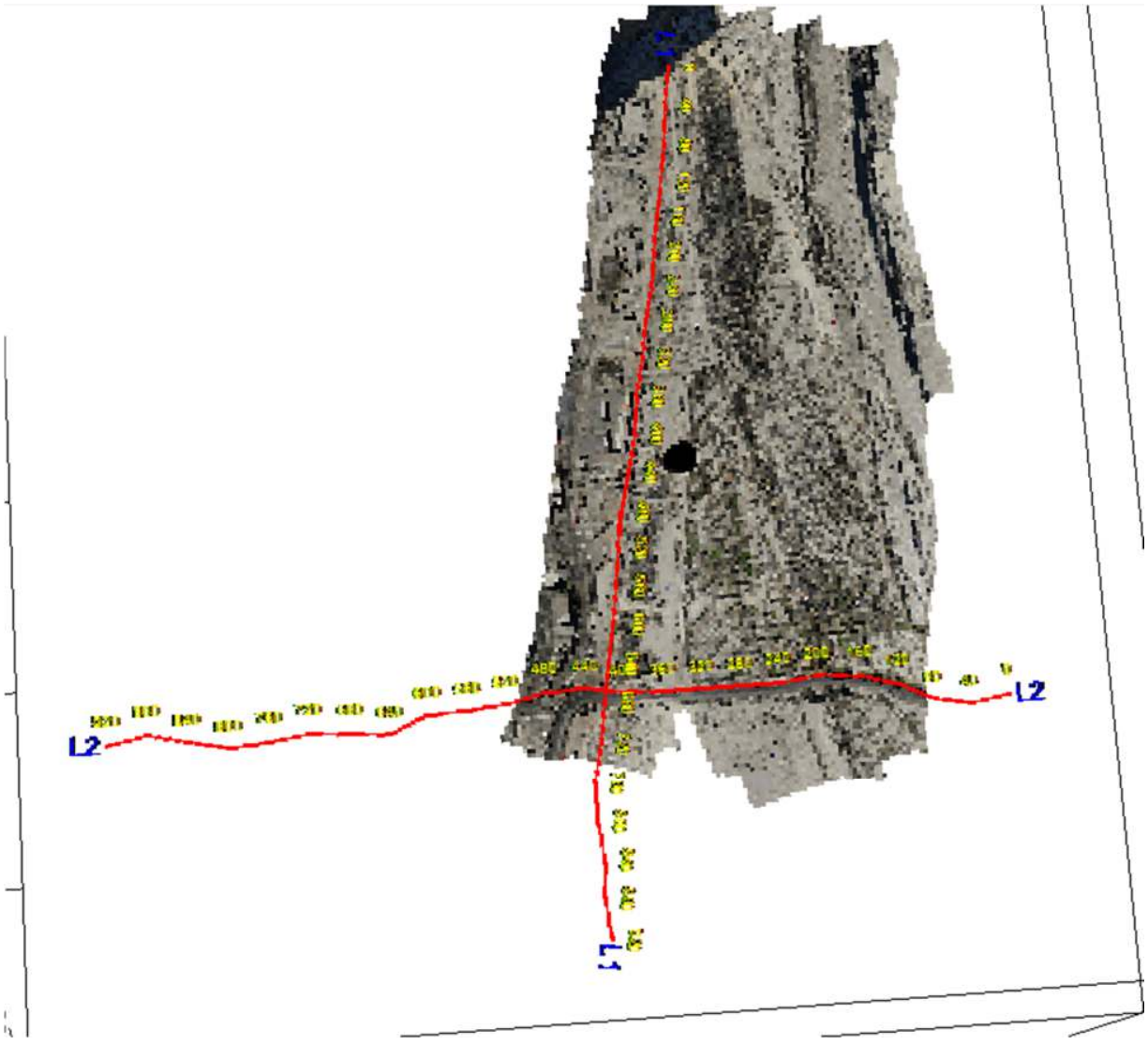
PLANTA GENERAL DE UBICACIÓN

Anexo modelos Voxel 3D

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

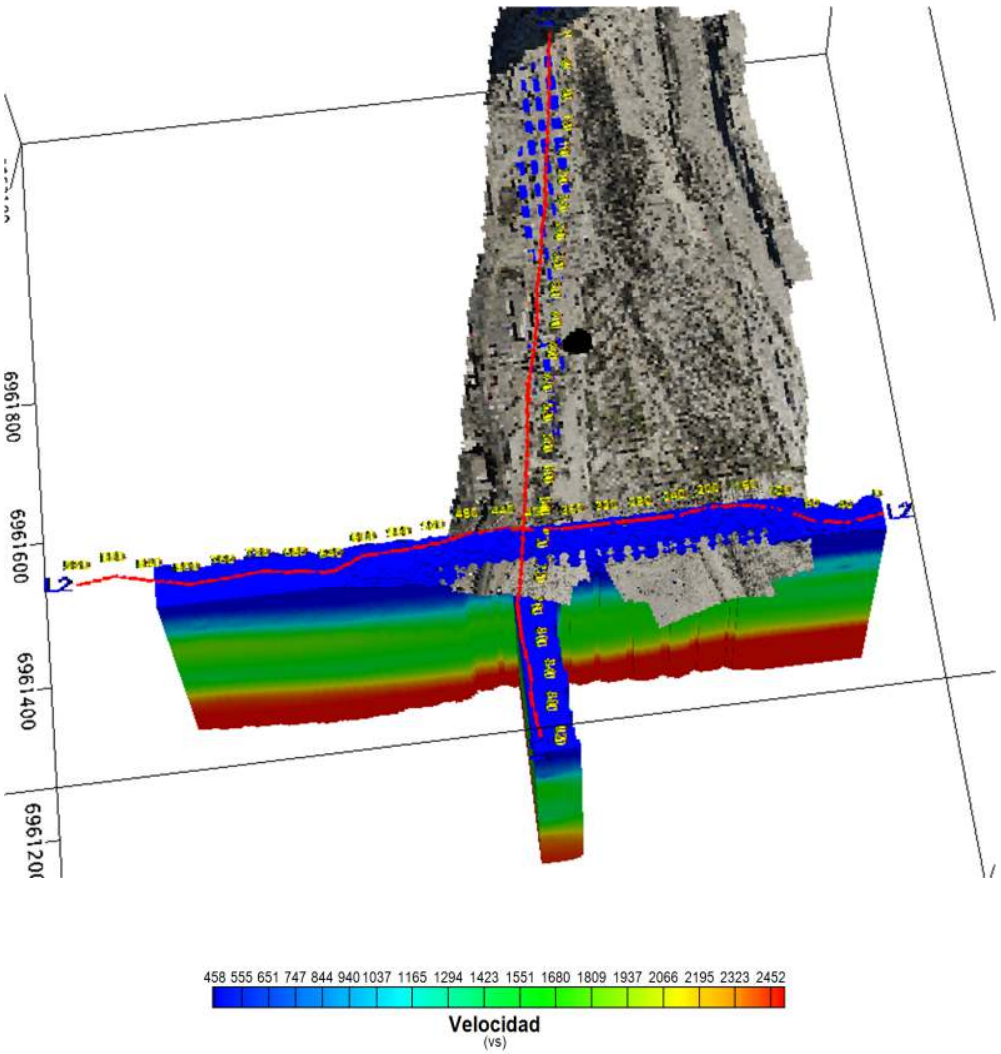
PLANTA GENERAL DE UBICACIÓN
Modelo 3D
Líneas Sísmicas Medidas



CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

PLANTA GENERAL DE UBICACIÓN
Modelo 3D
Líneas Sísmicas Medidas + Secciones de Velocidad VS

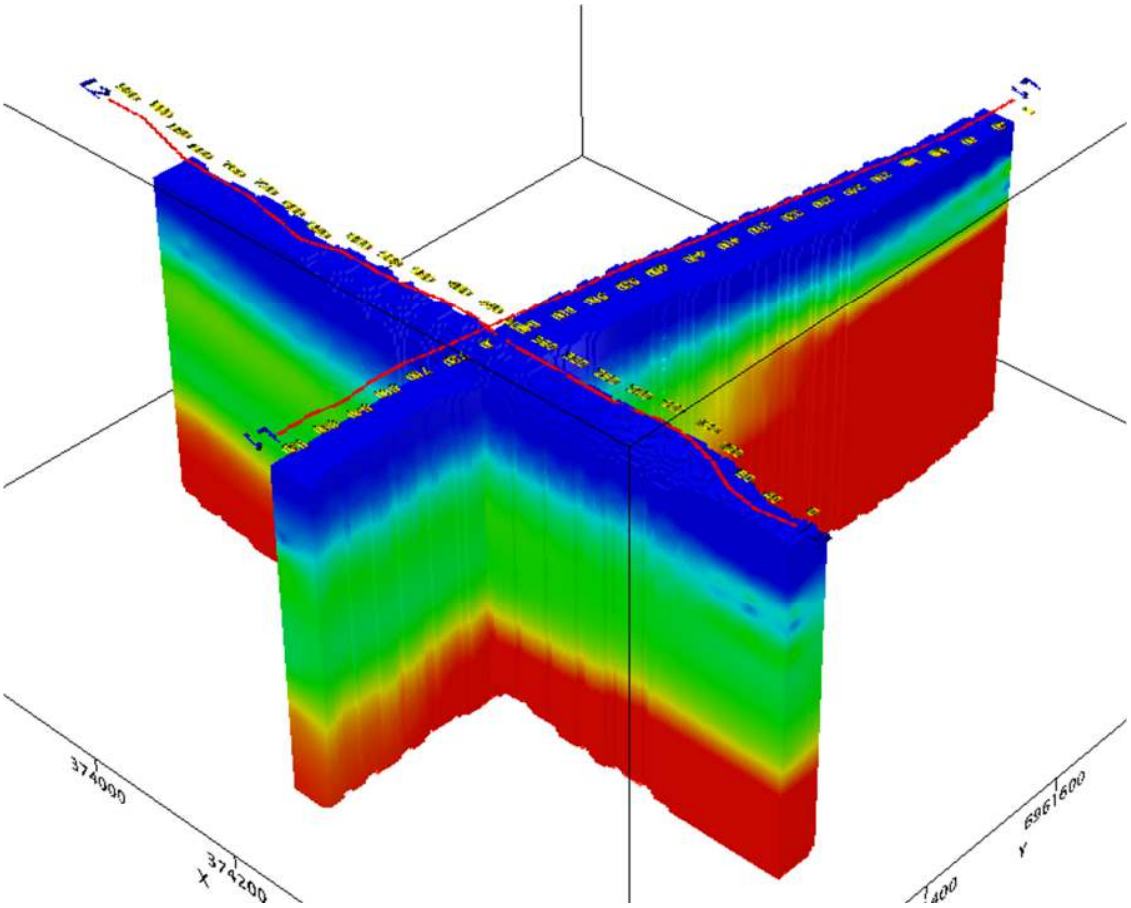


(mirado desde Sur a Norte)

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

PLANTA GENERAL DE UBICACIÓN
Modelo 3D
Líneas Sísmicas Medidas + Secciones de Velocidad VS



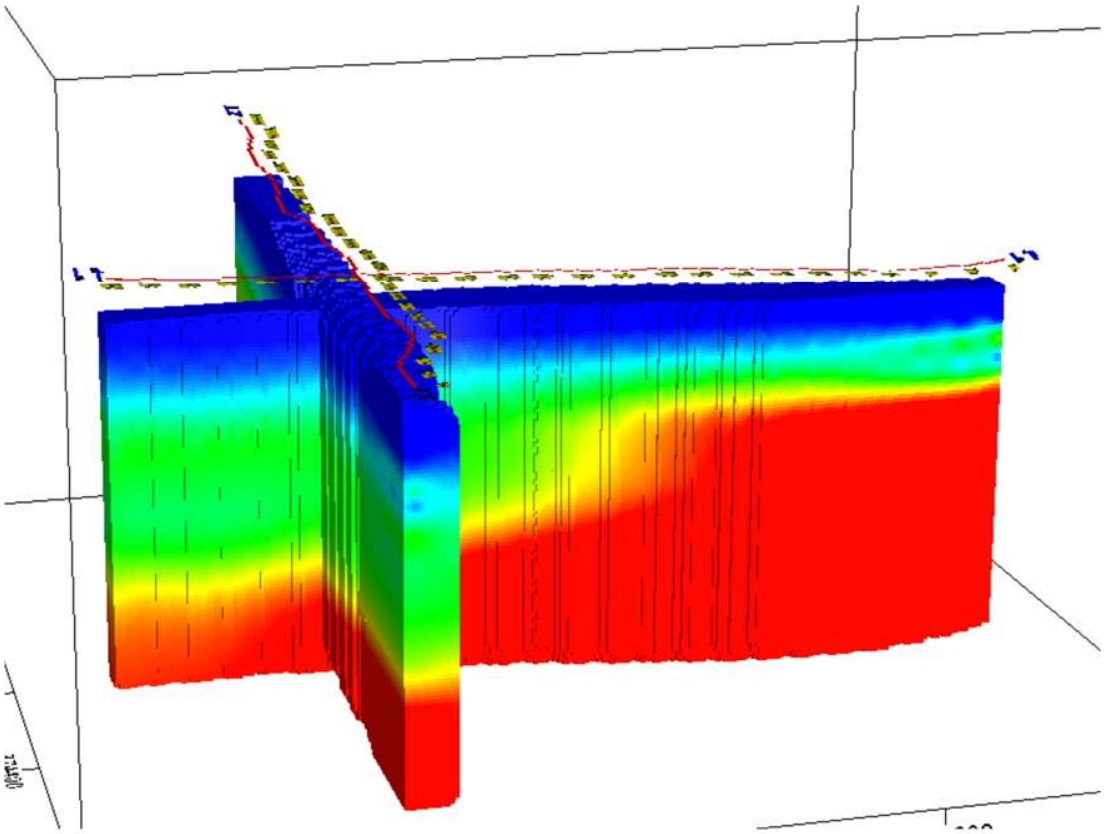
Mirado desde Sureste a Noroeste.

Anexo modelos Voxel 3D

CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

GEODATOS
Geofísica de Avanzada

PLANTA GENERAL DE UBICACIÓN
Modelo 3D
Líneas Sísmicas Medidas + Secciones de Velocidad VS



Mirado de Este a Oeste

Anexo modelos Voxel 3D

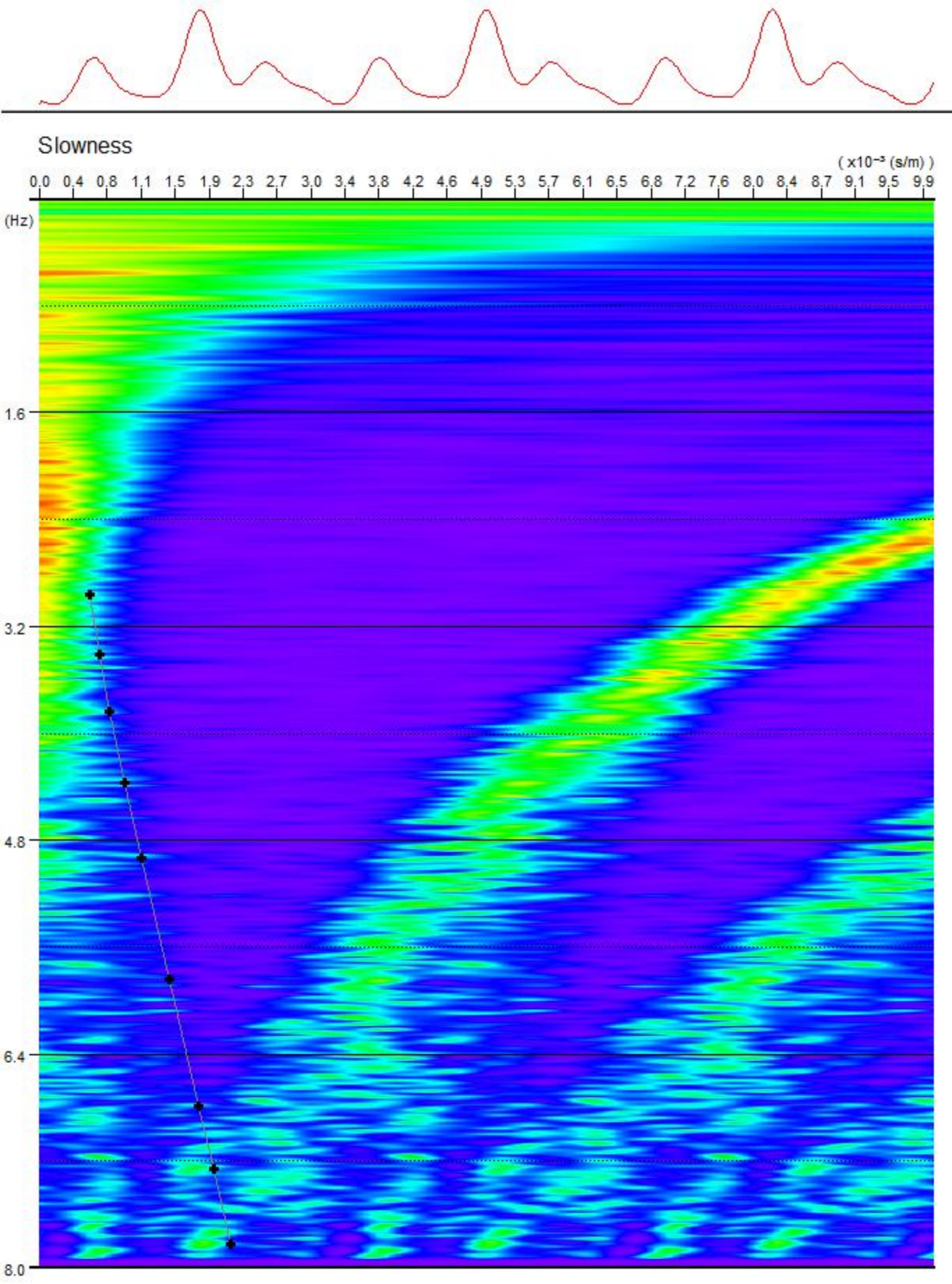
CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

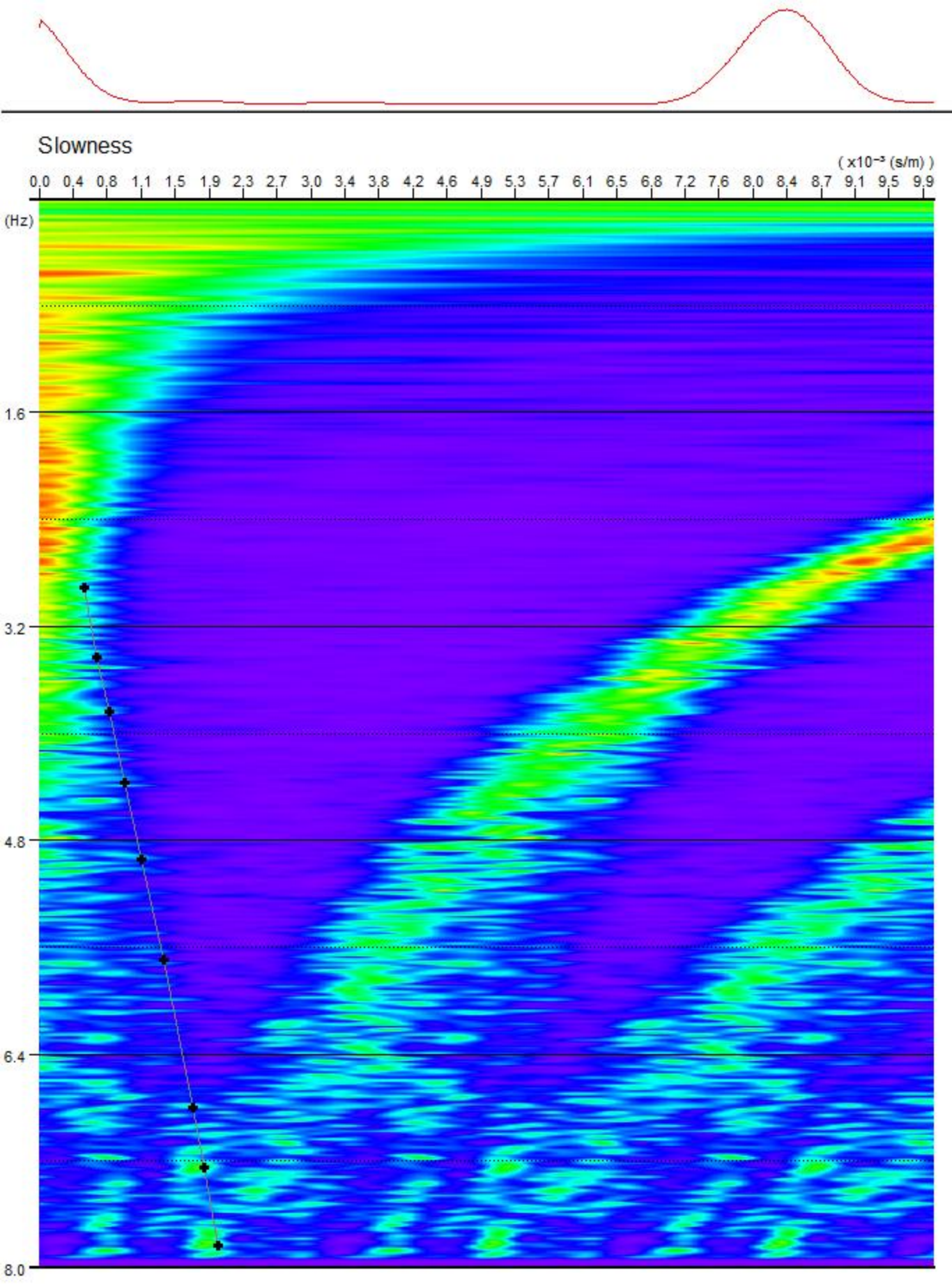
GEODATOS
Geofísica de Avanzada

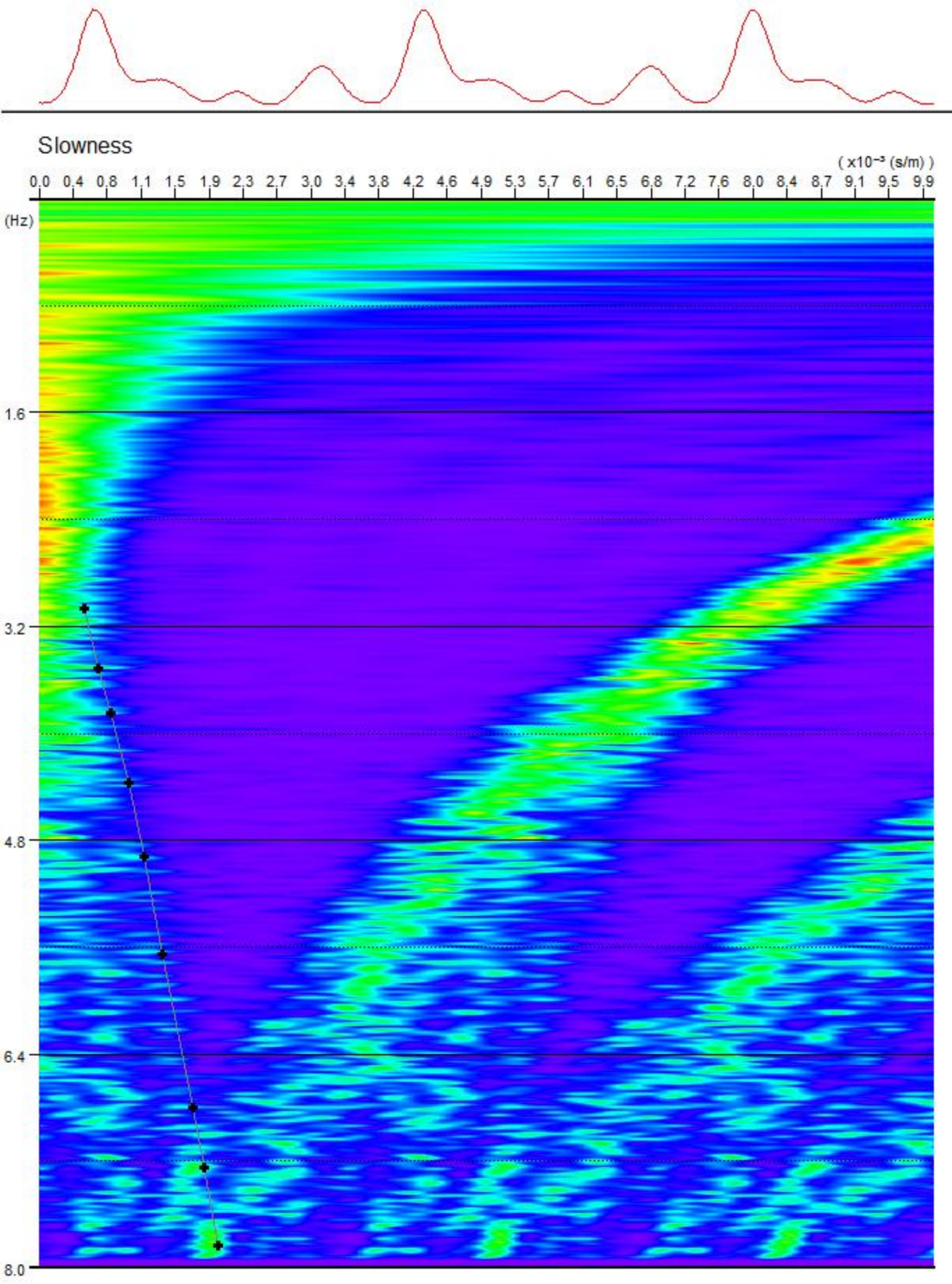
ANEXOS

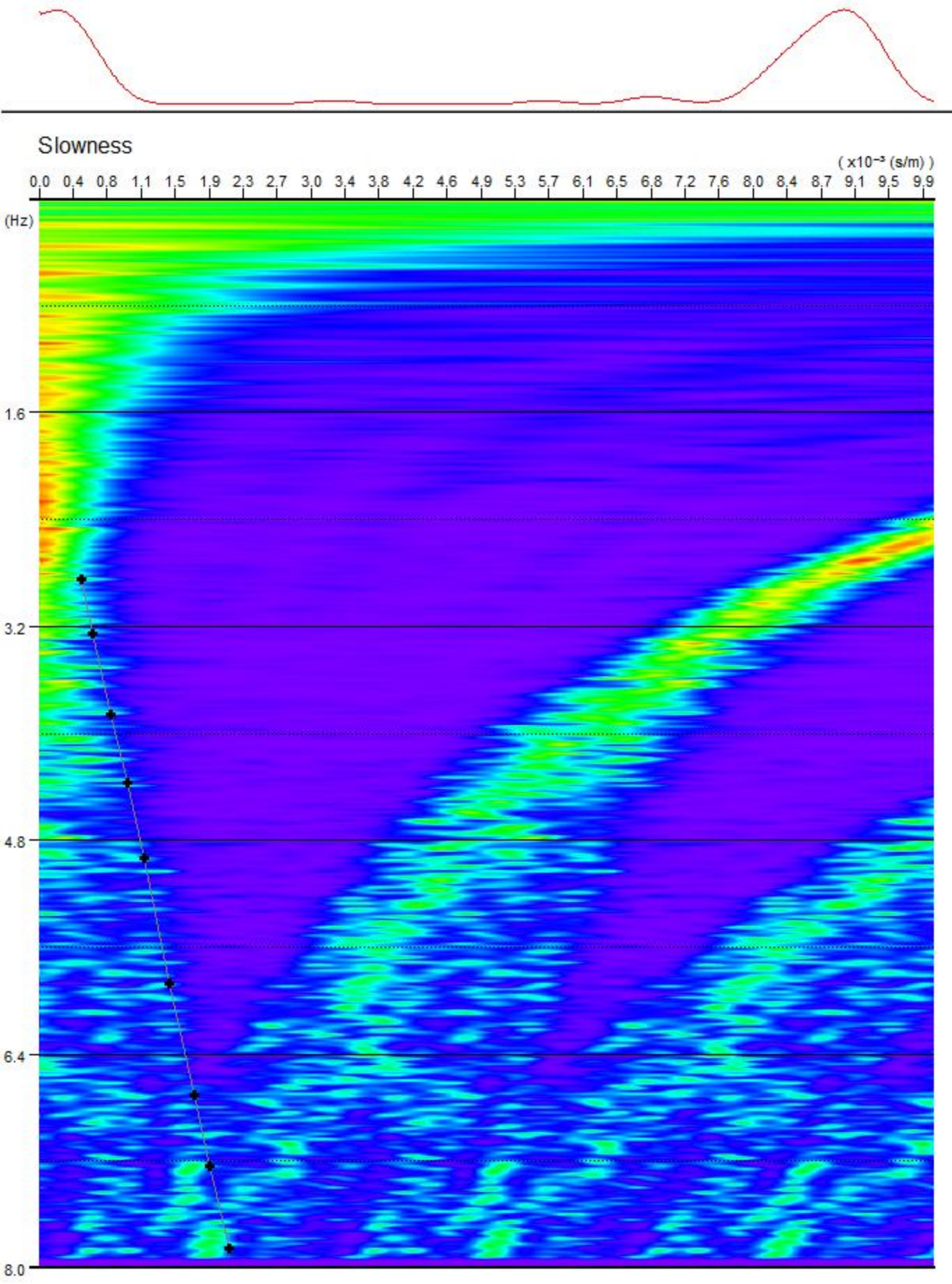
LINEA 1 MASW

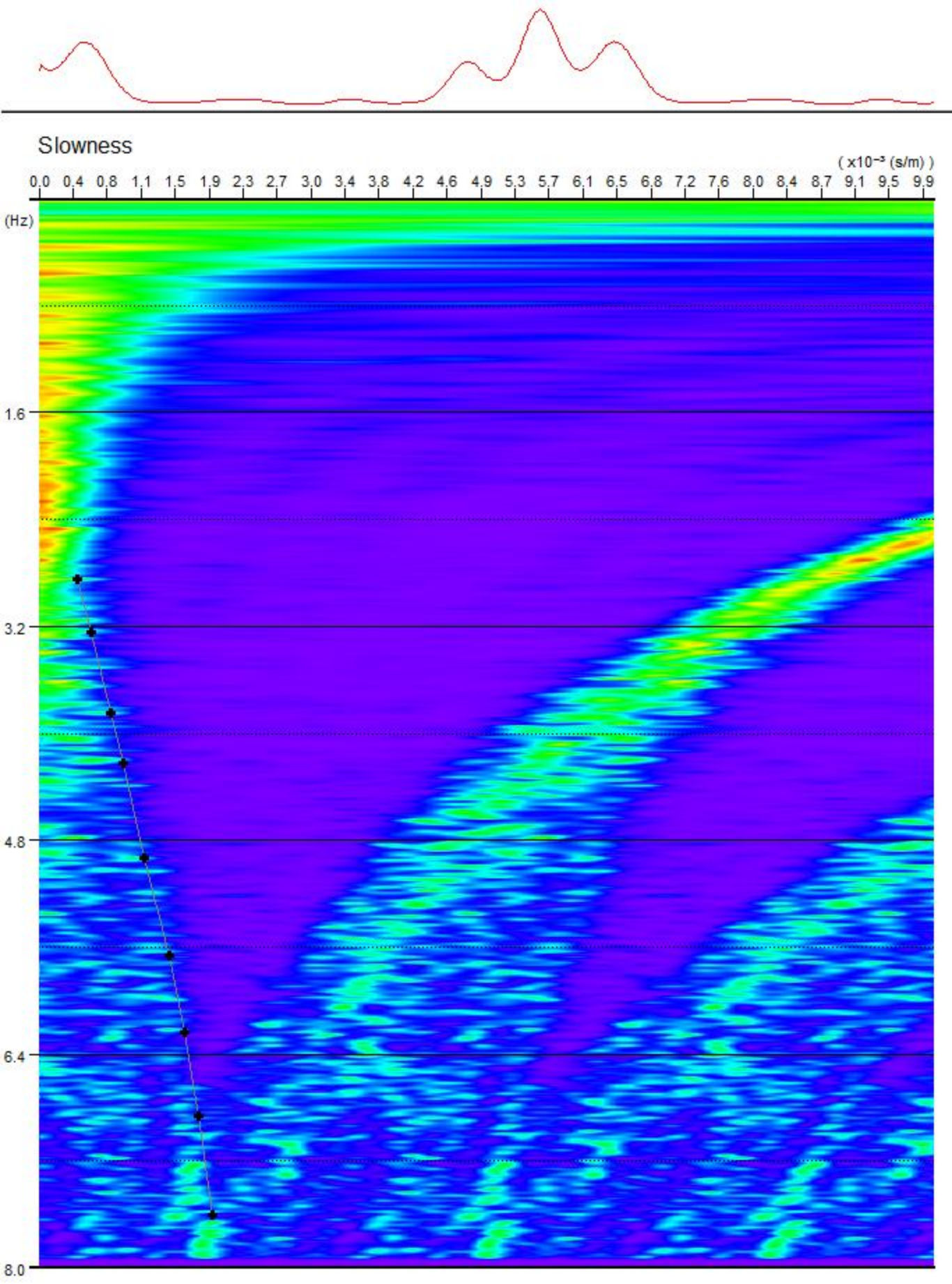
Modelos Dispersión

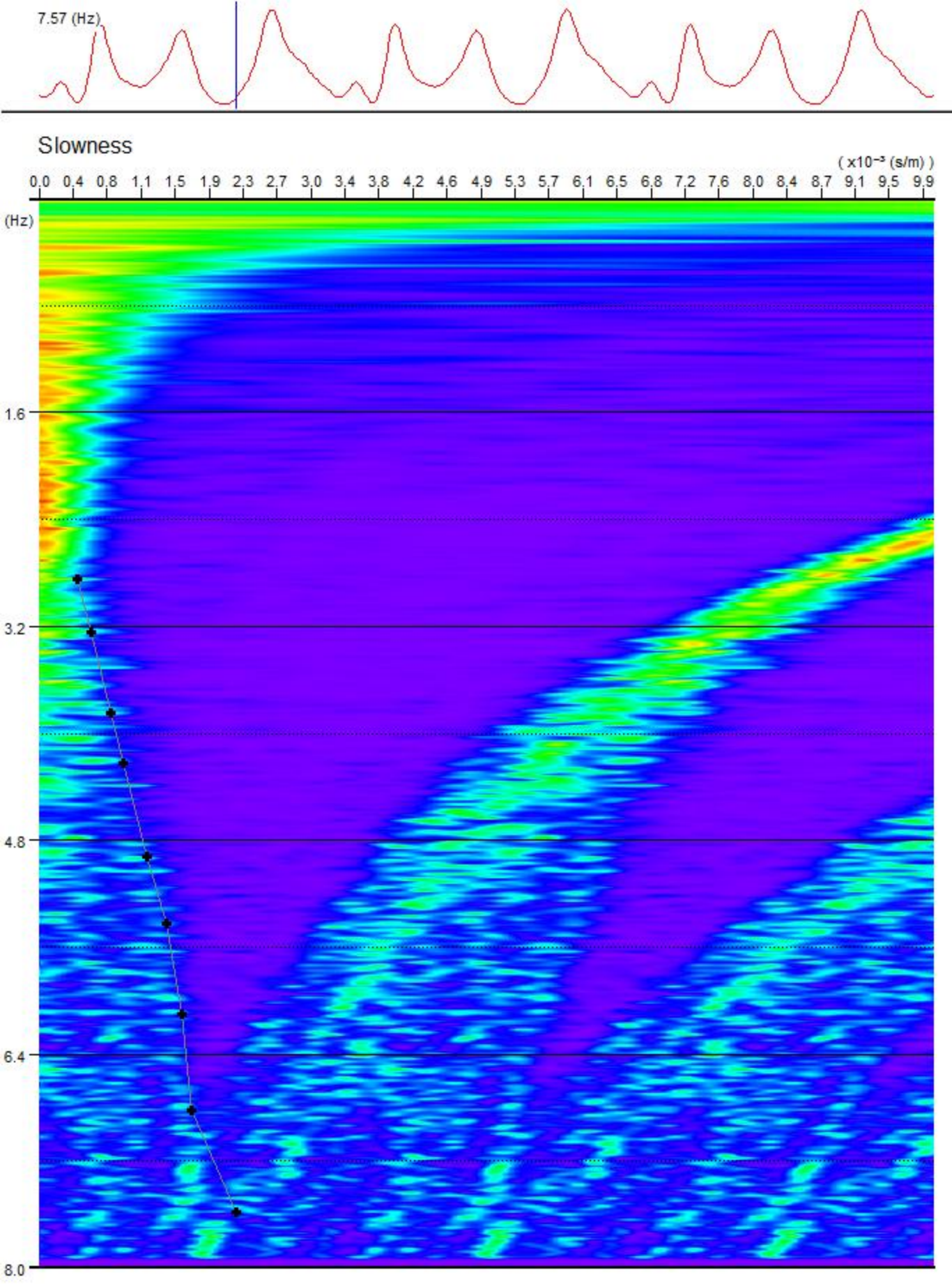

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

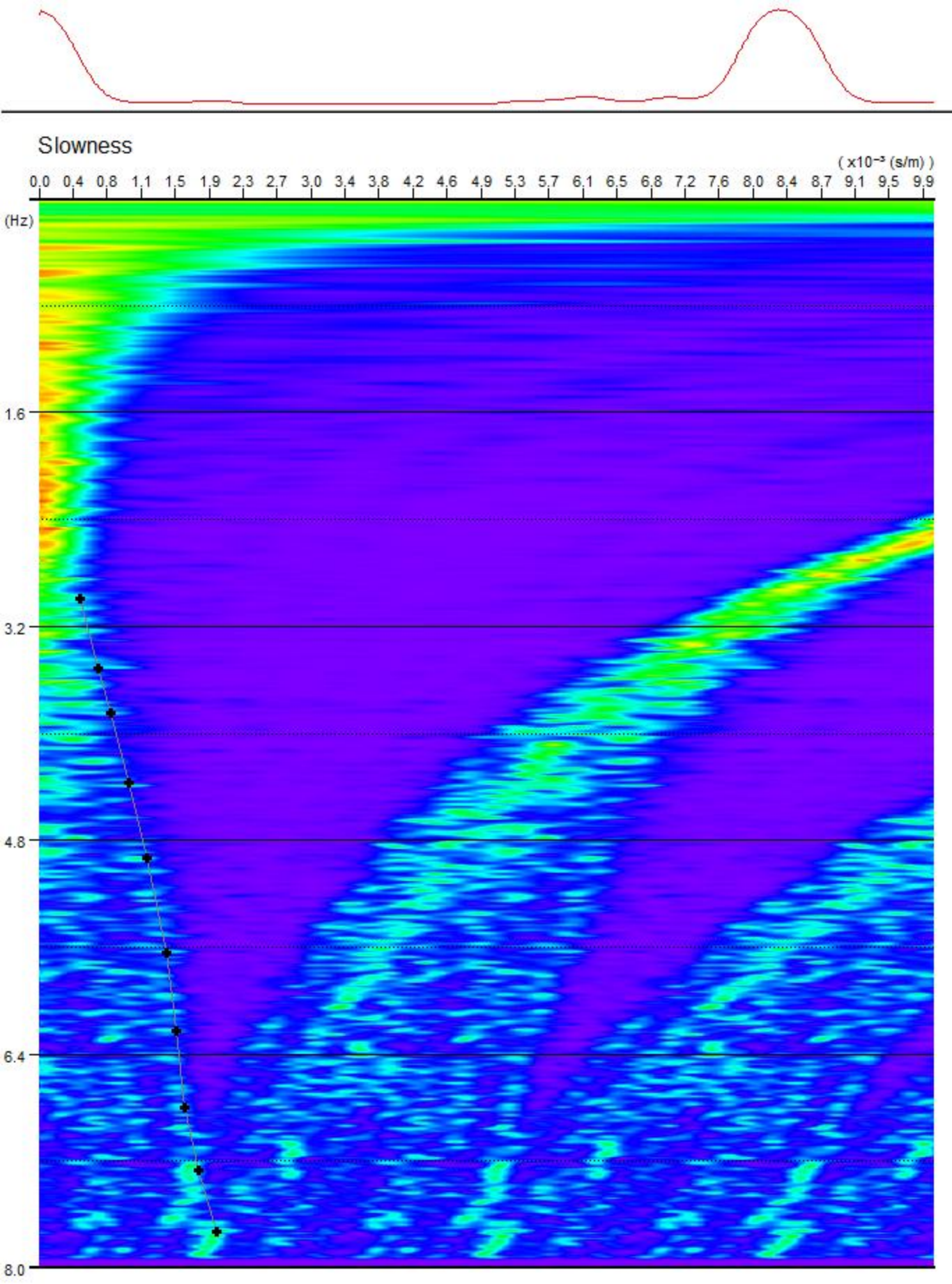

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

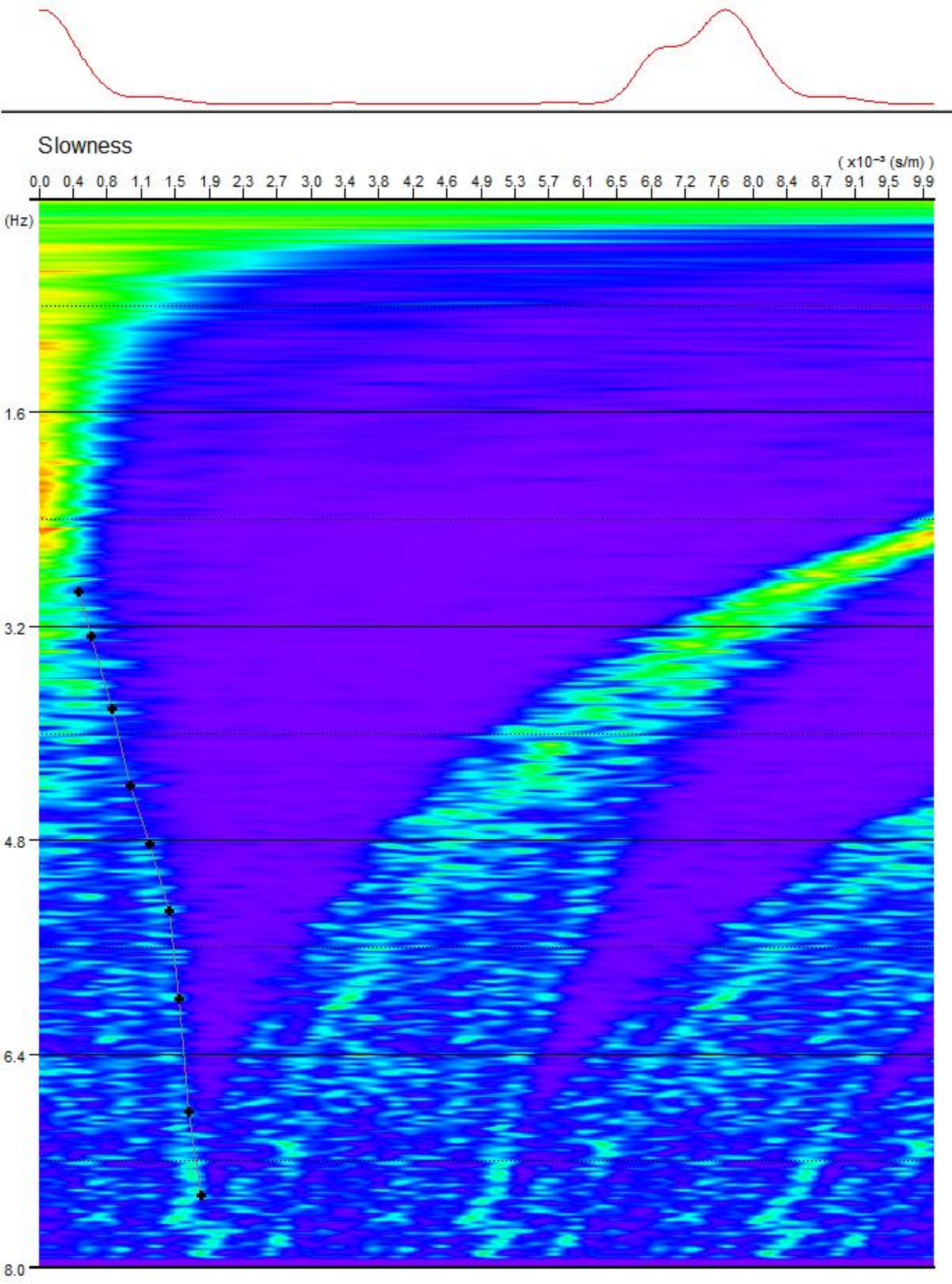

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

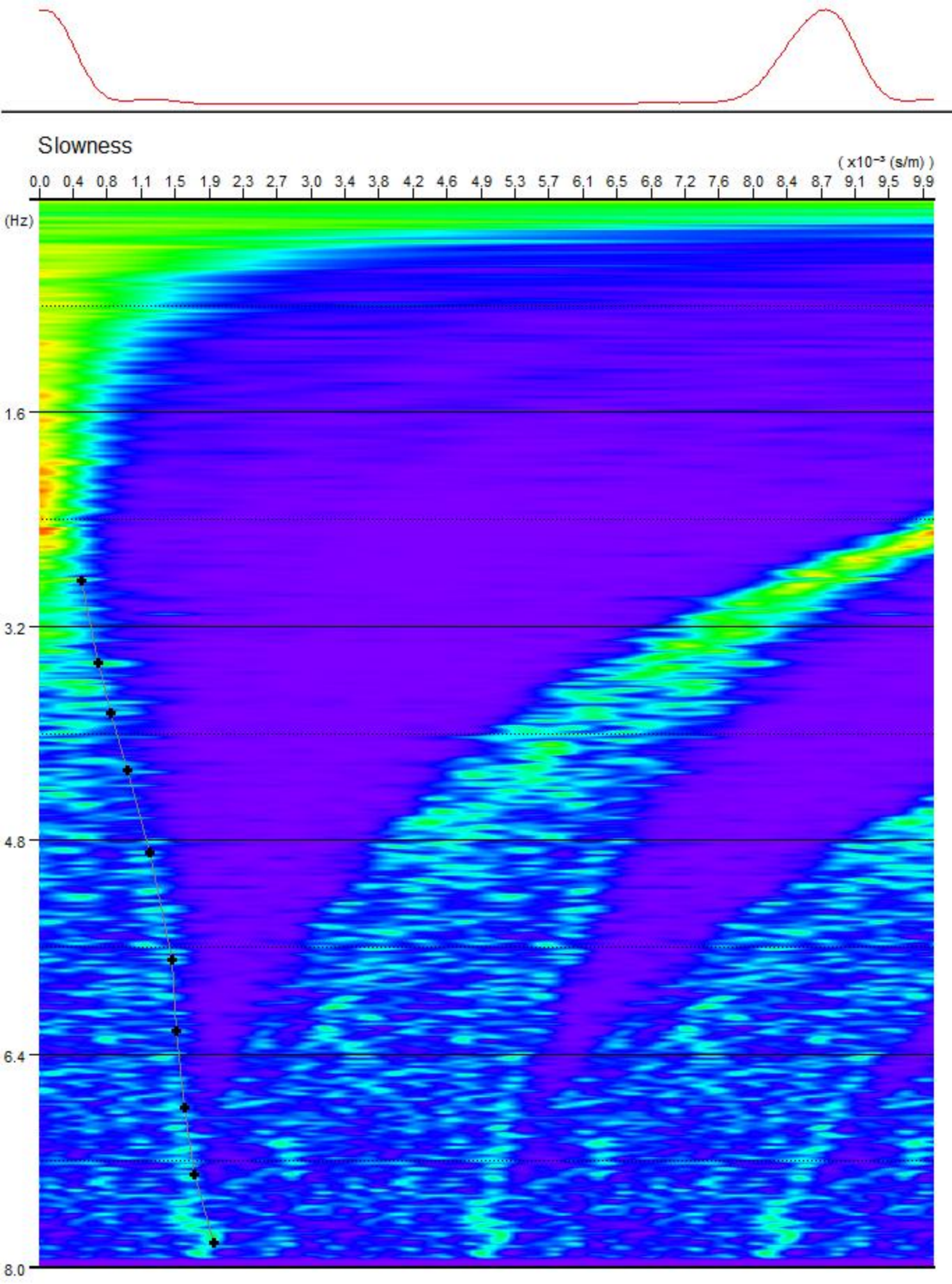

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

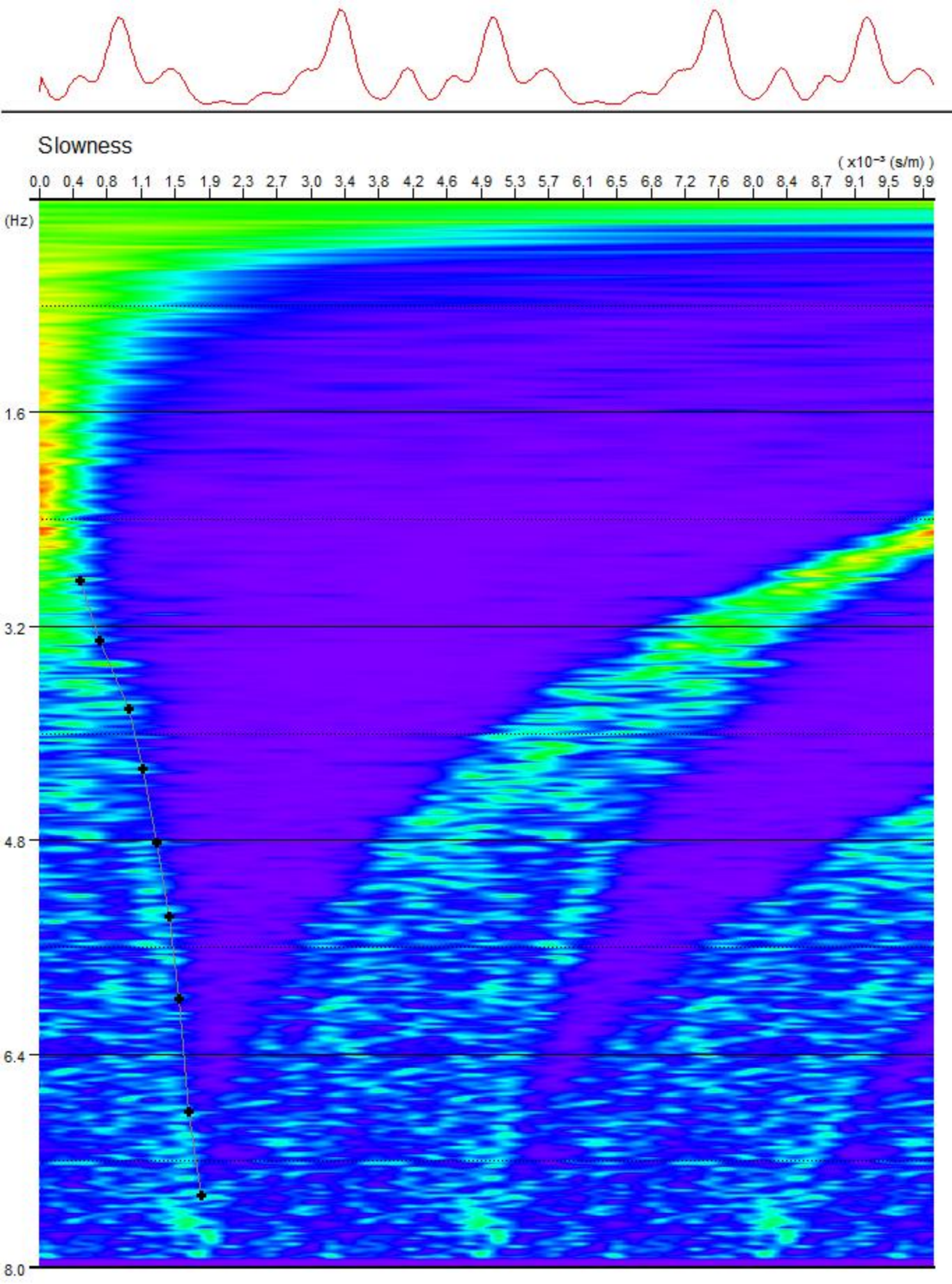

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

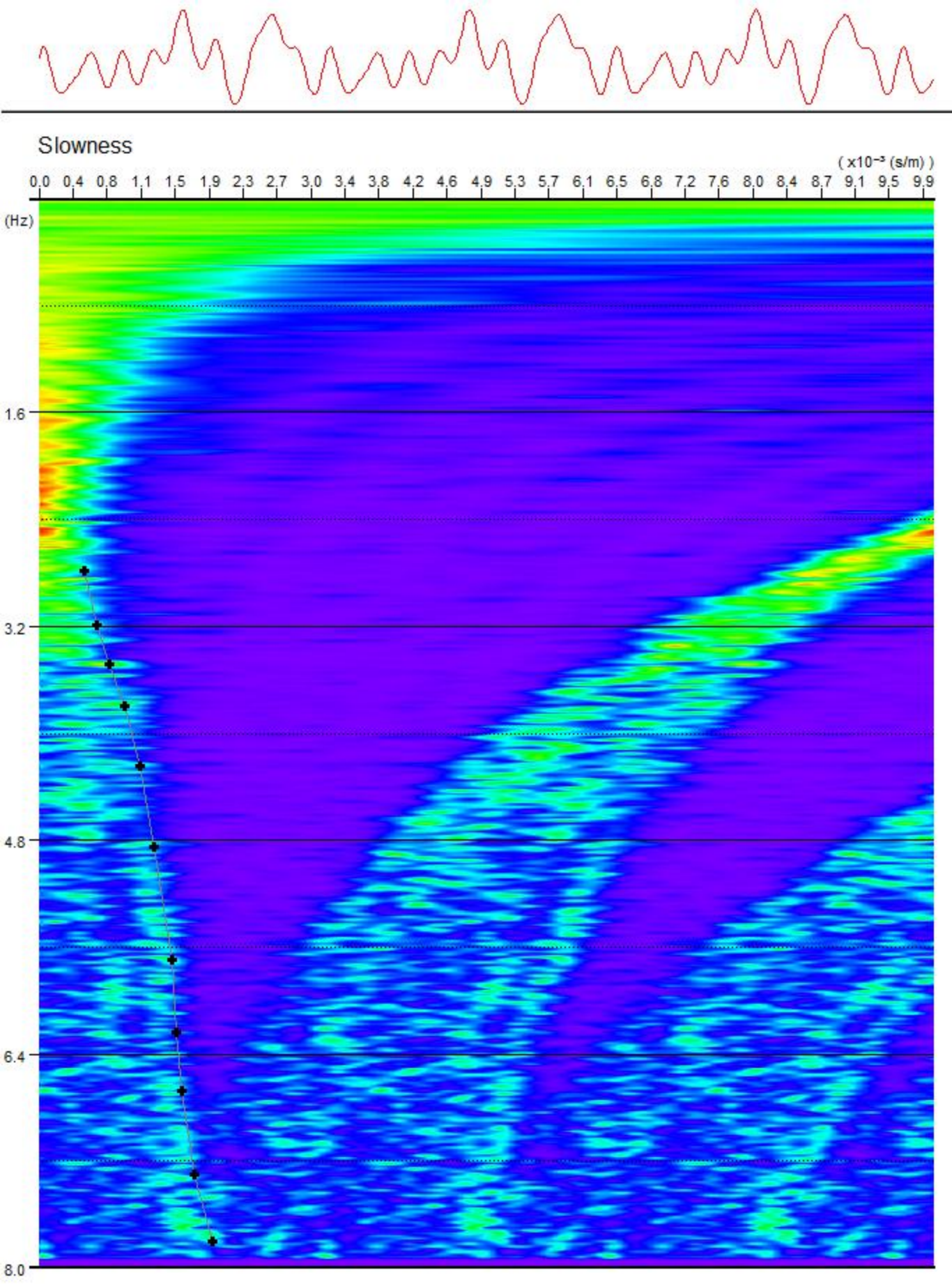

7.57 (Hz)
Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

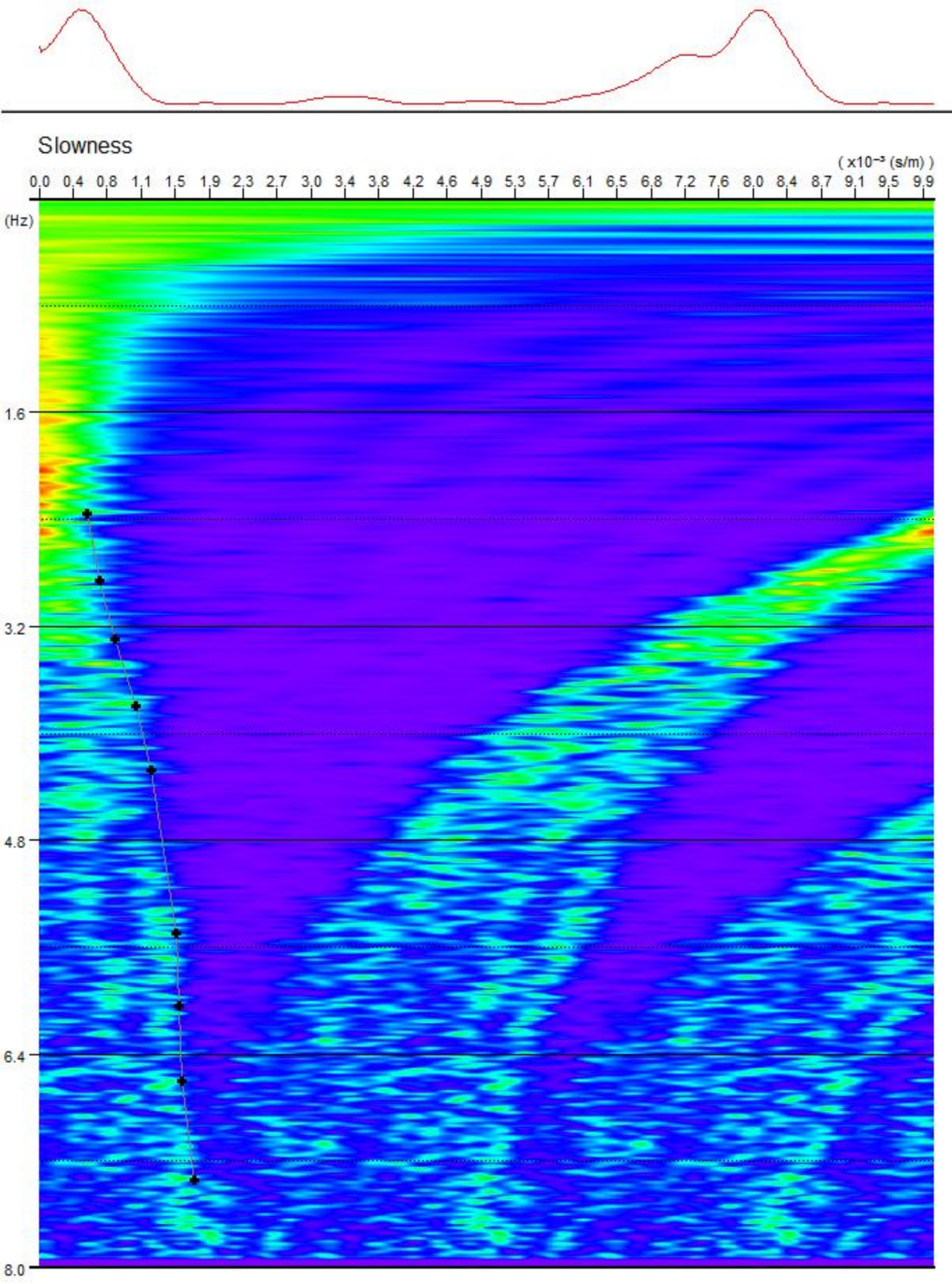

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

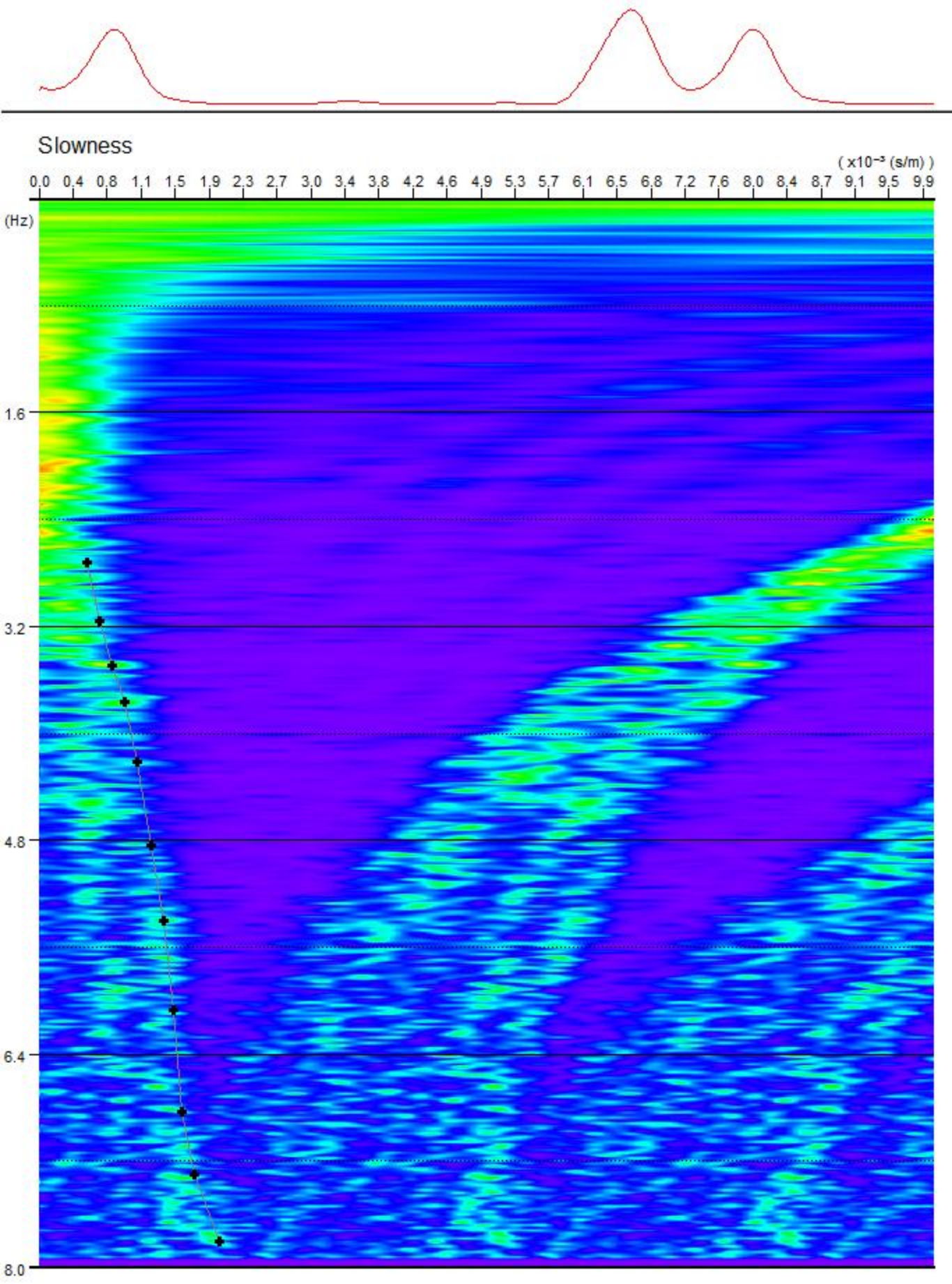

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

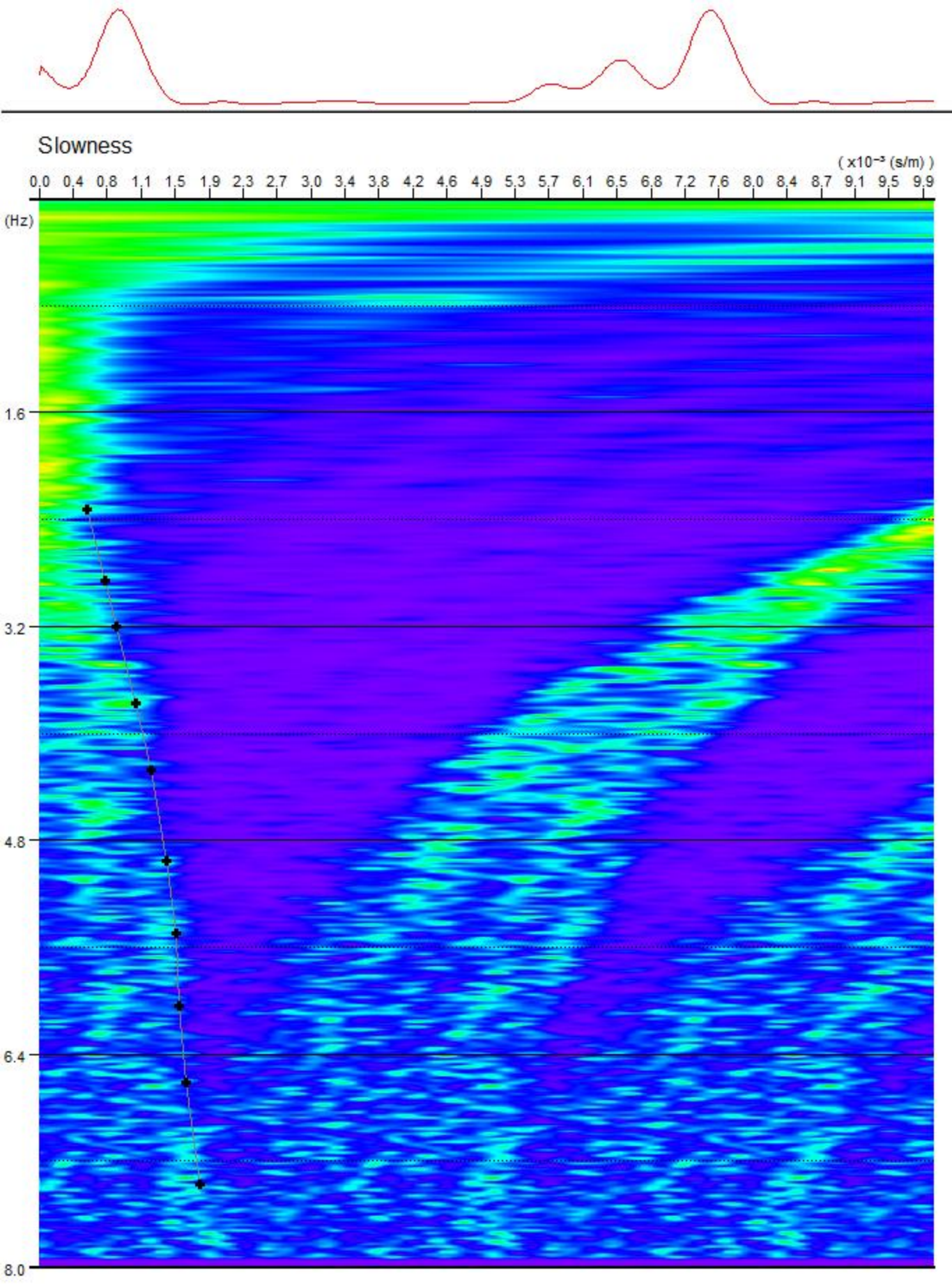

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

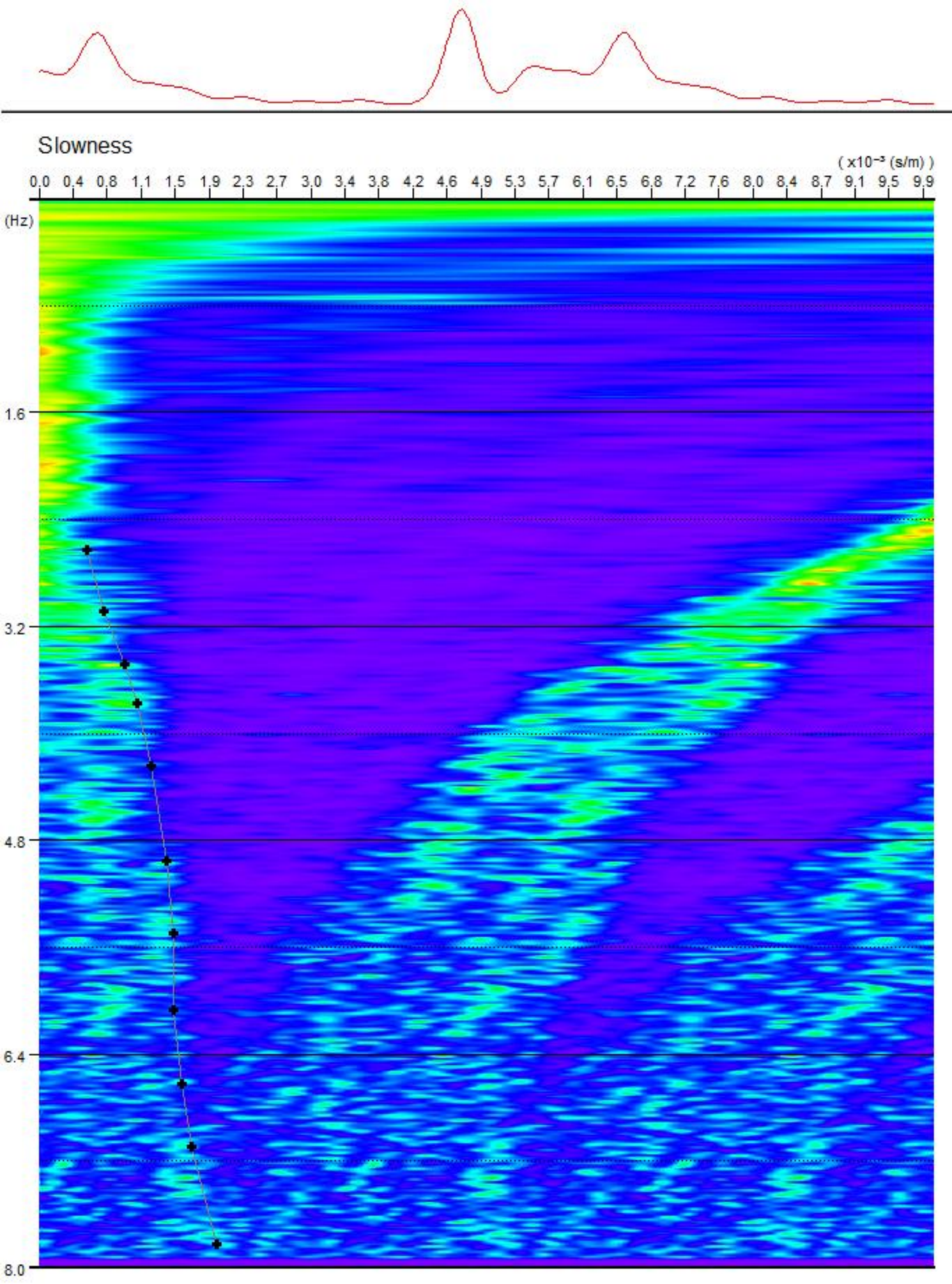

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

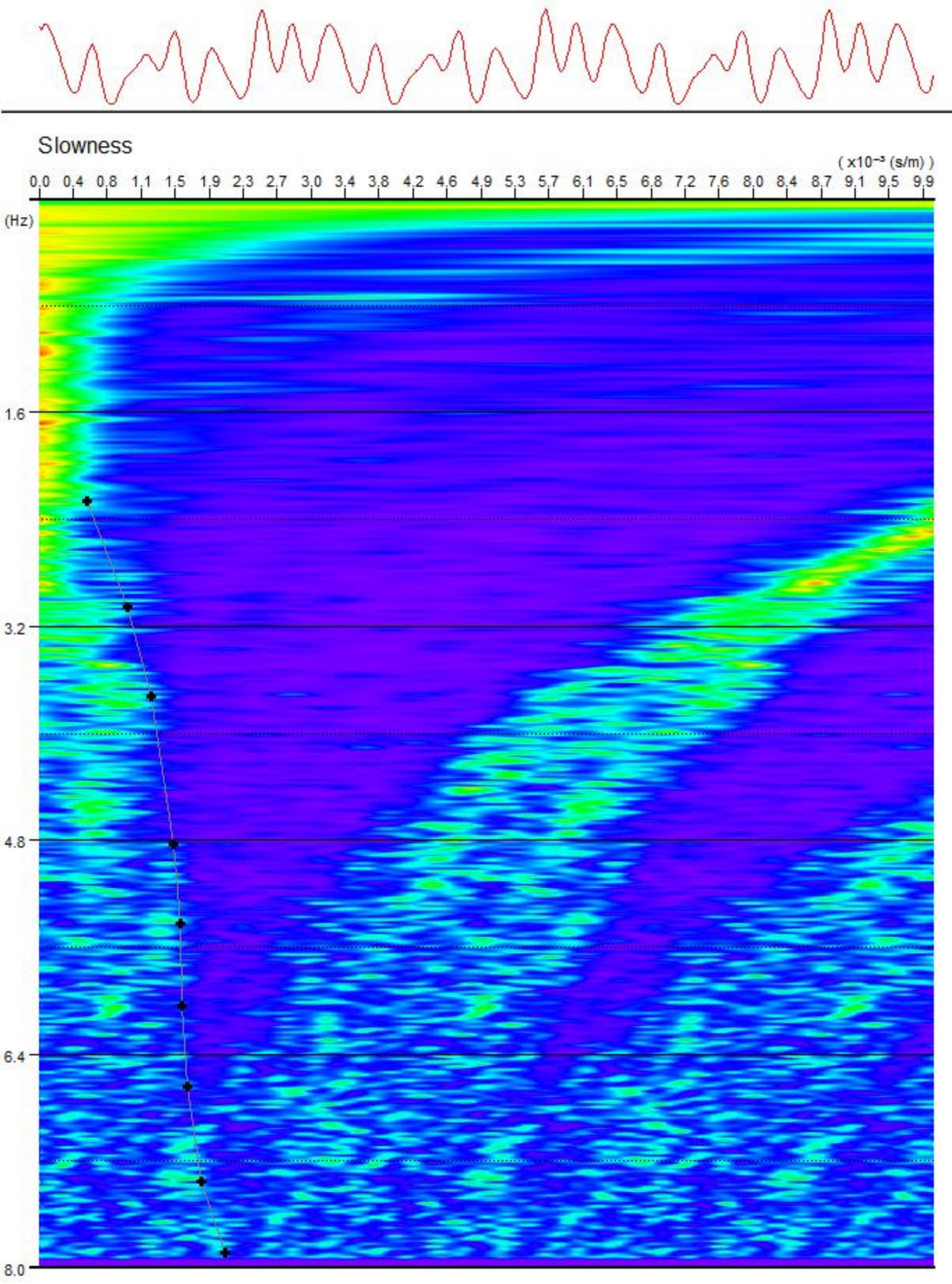

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

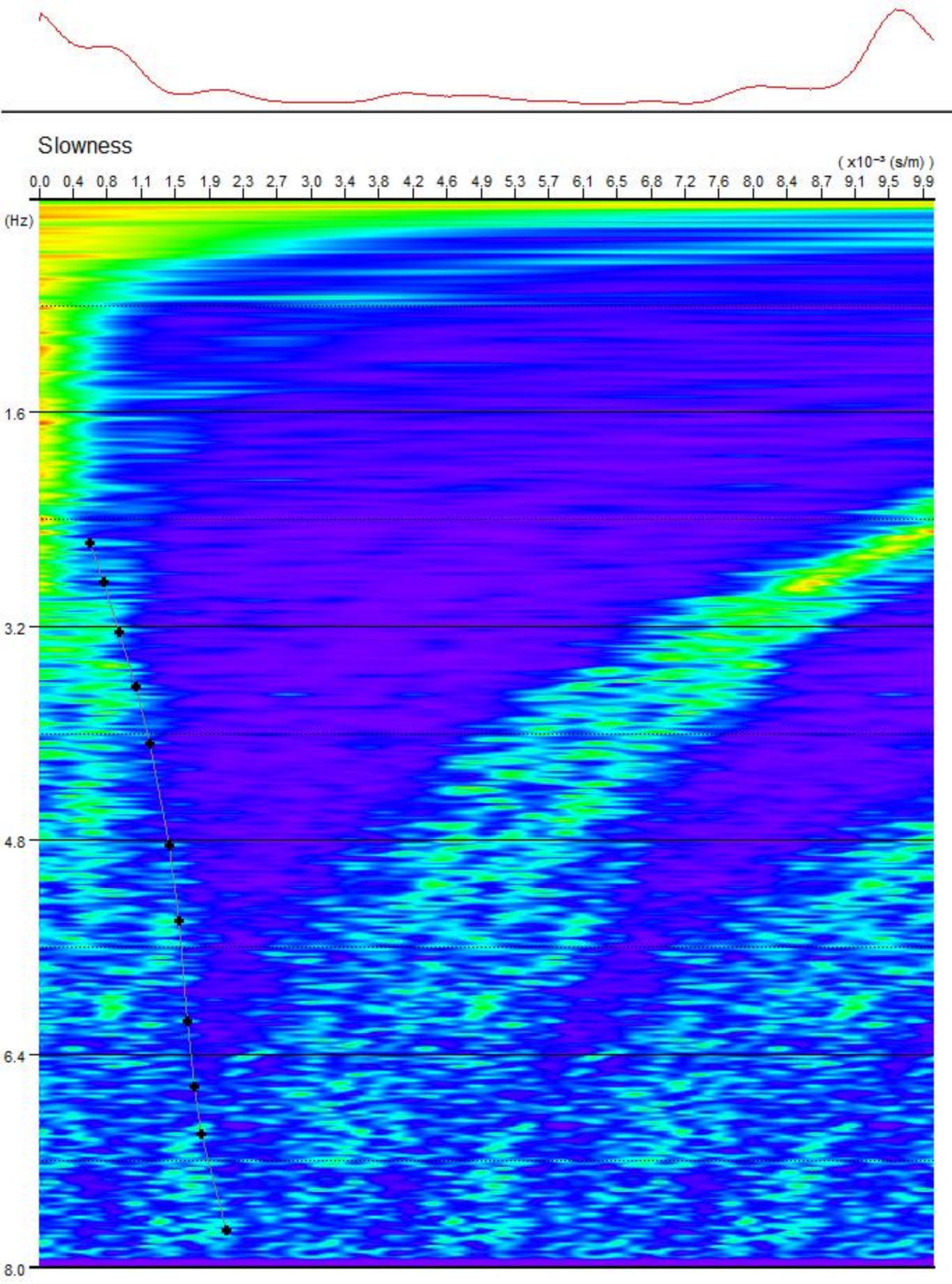

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

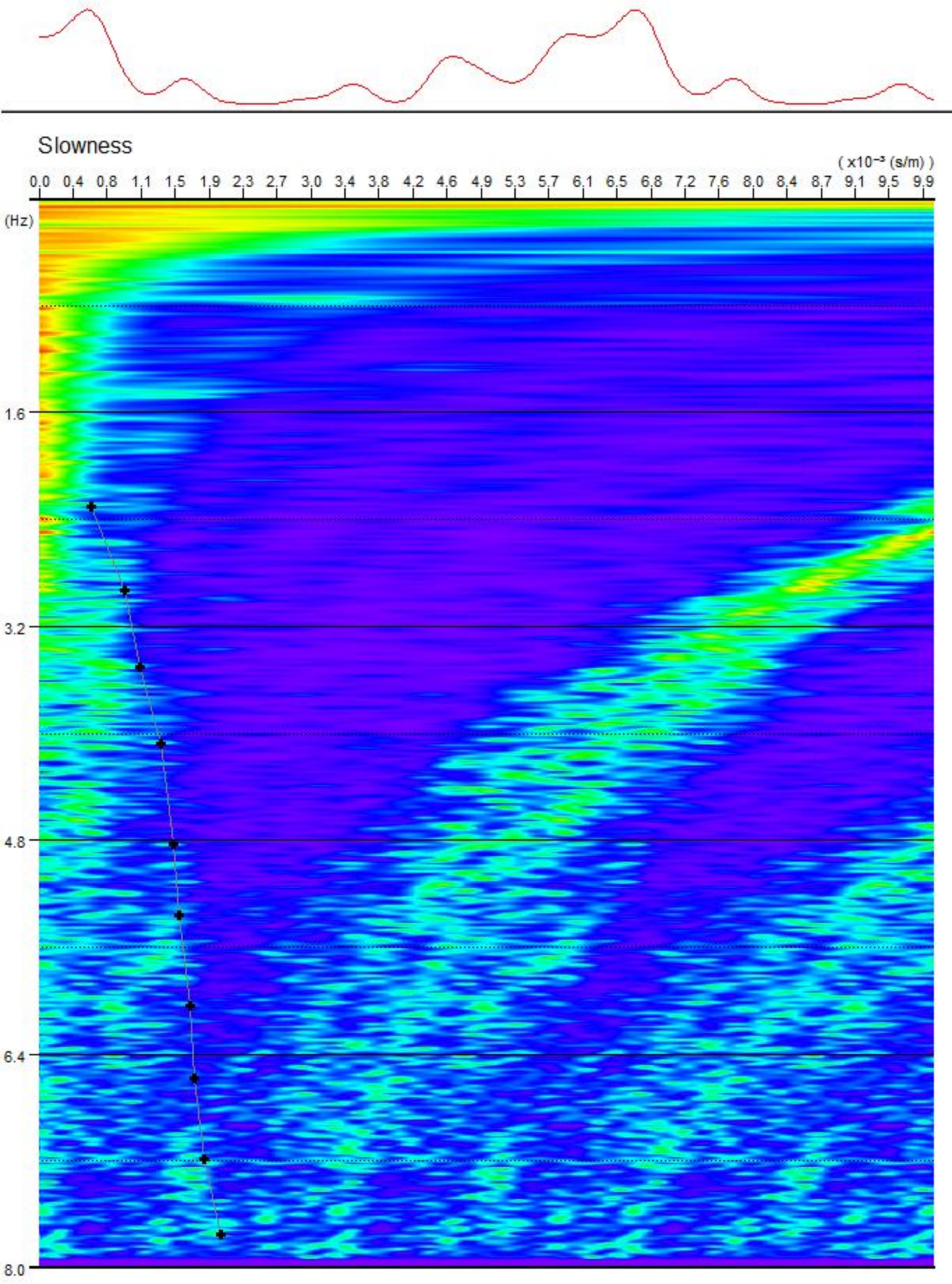

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

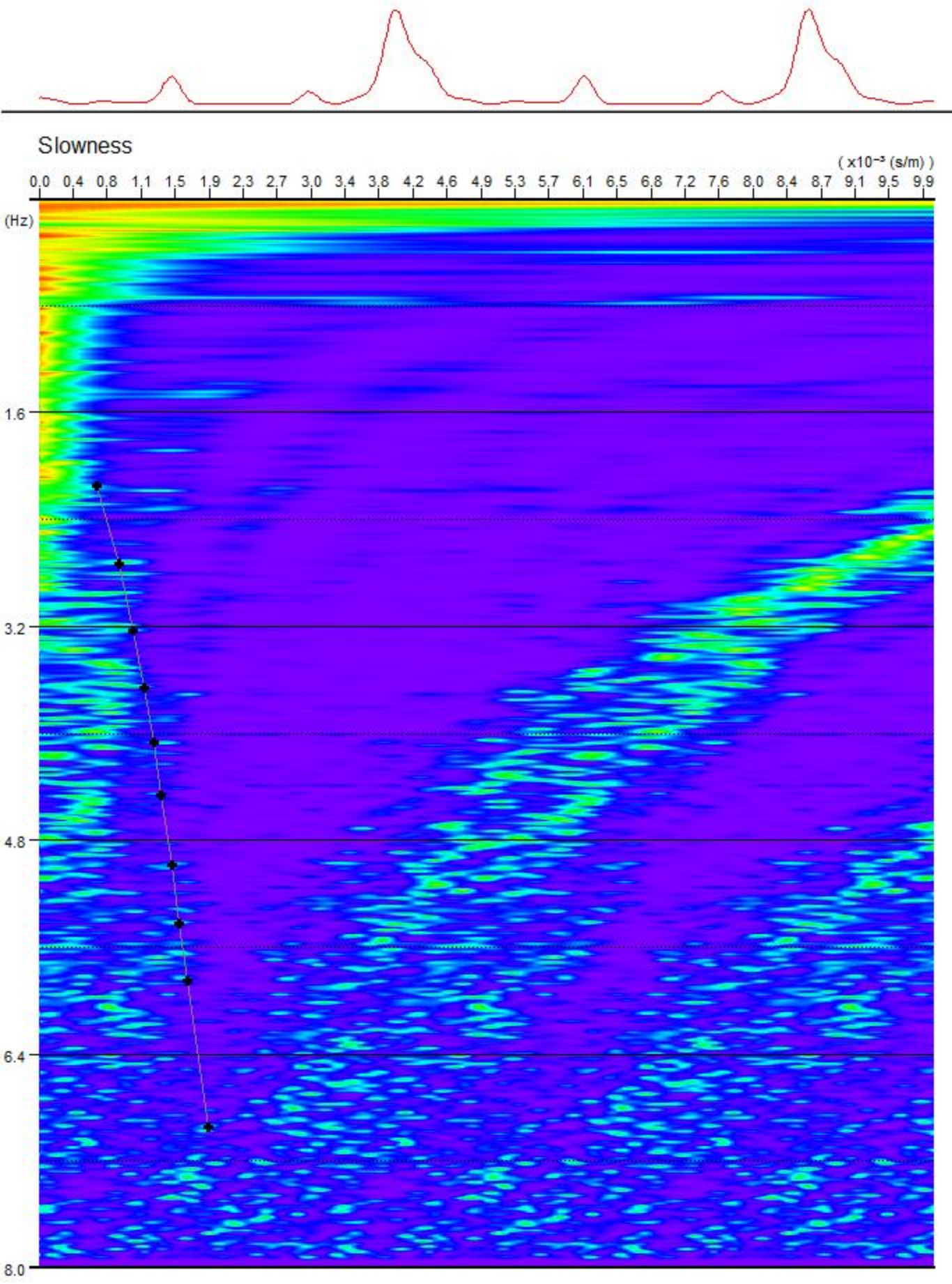

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

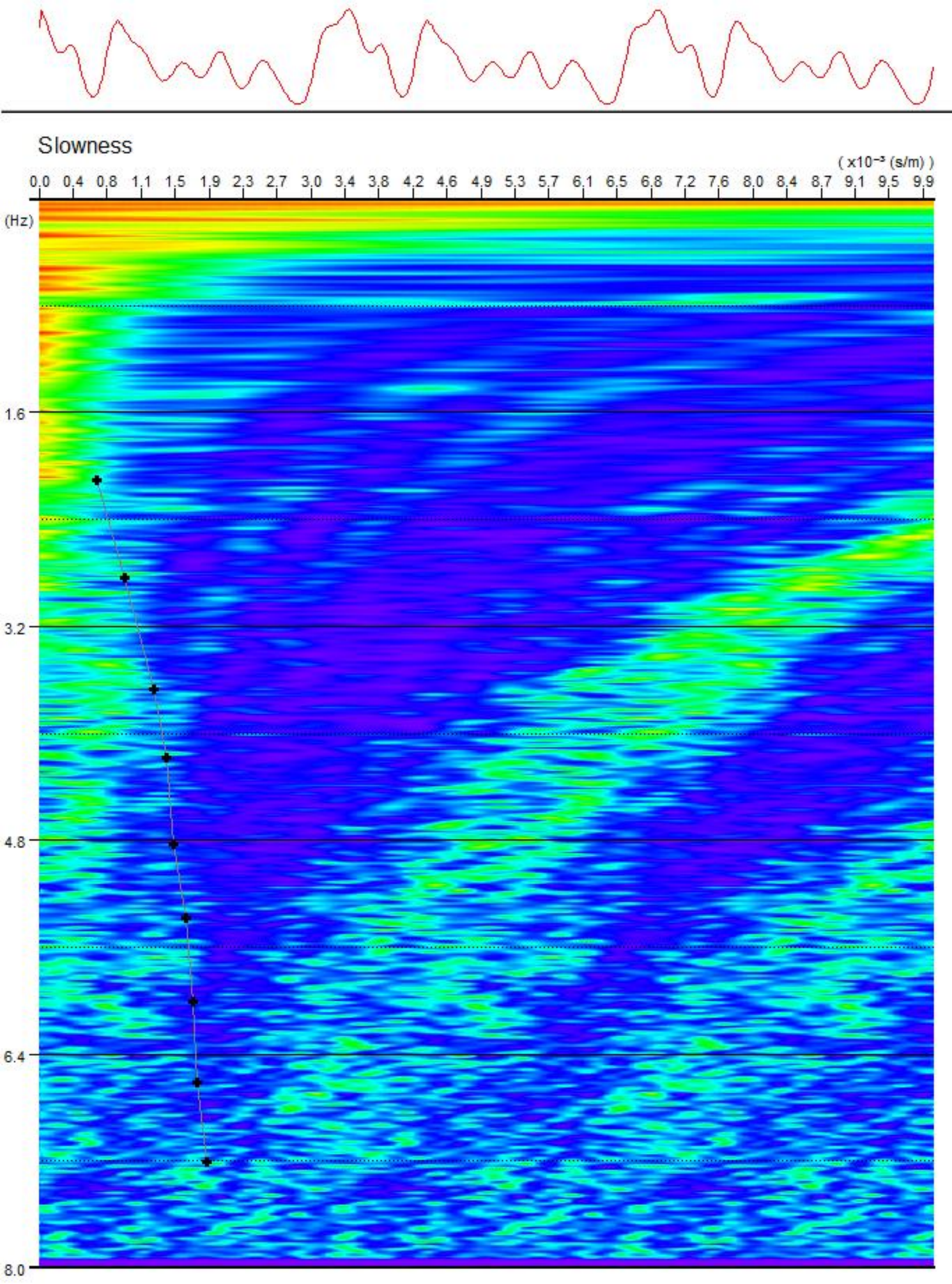

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

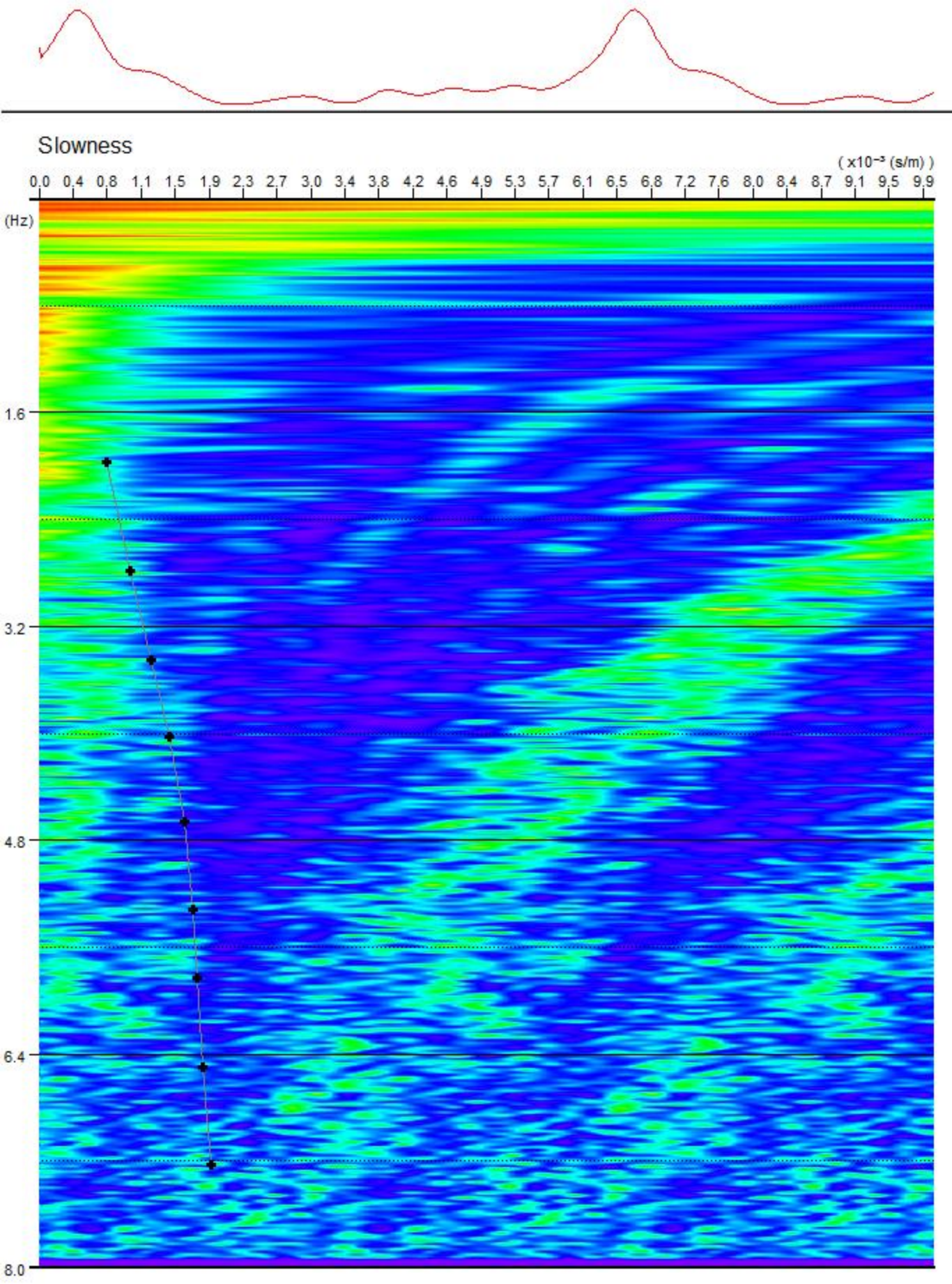

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

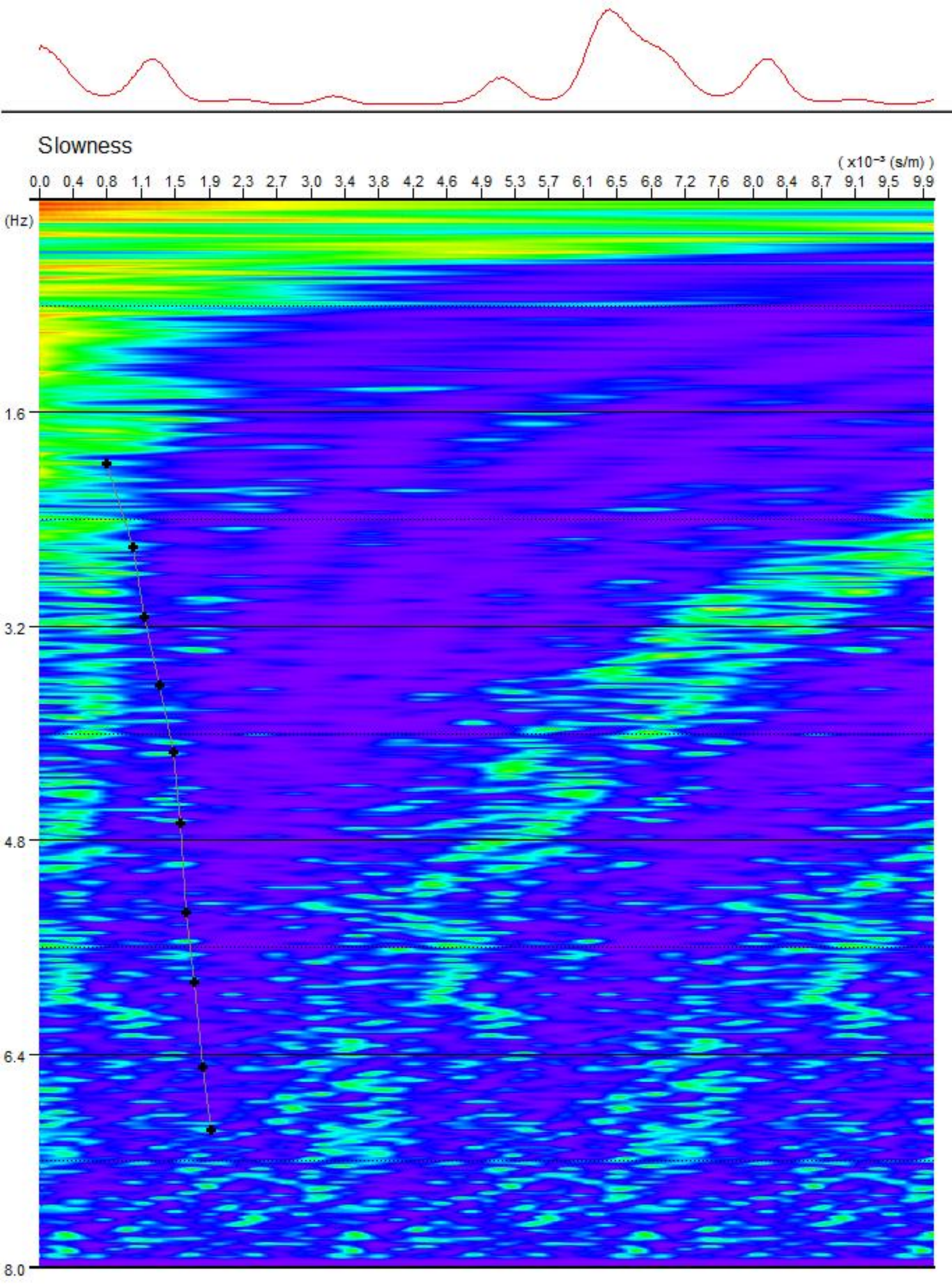

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

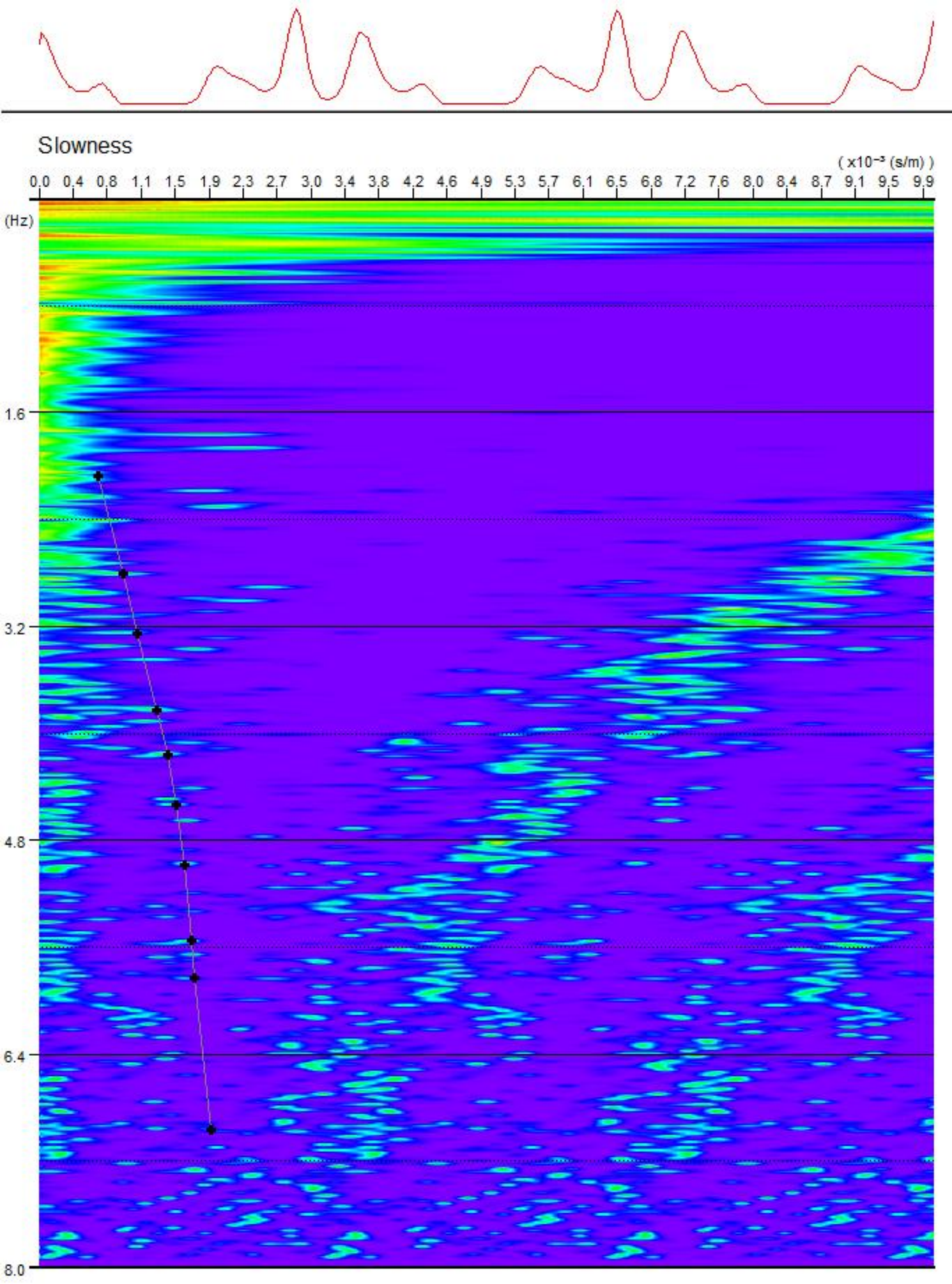

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

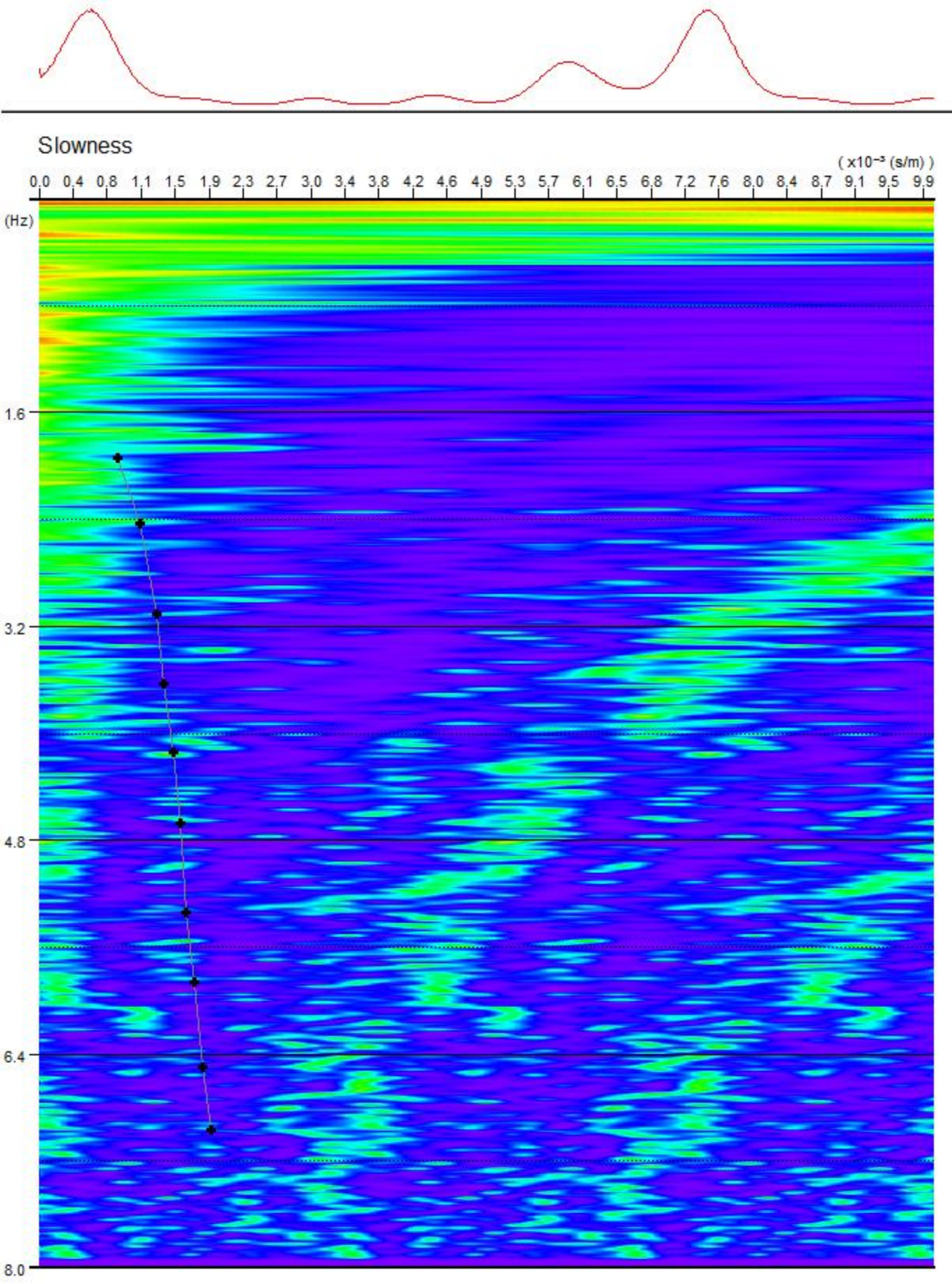

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0


Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0


Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0


Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0


Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0


Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.8 1.1 1.5 1.9 2.3 2.7 3.0 3.4 3.8 4.2 4.6 4.9 5.3 5.7 6.1 6.5 6.8 7.2 7.6 8.0 8.4 8.7 9.1 9.5 9.9
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

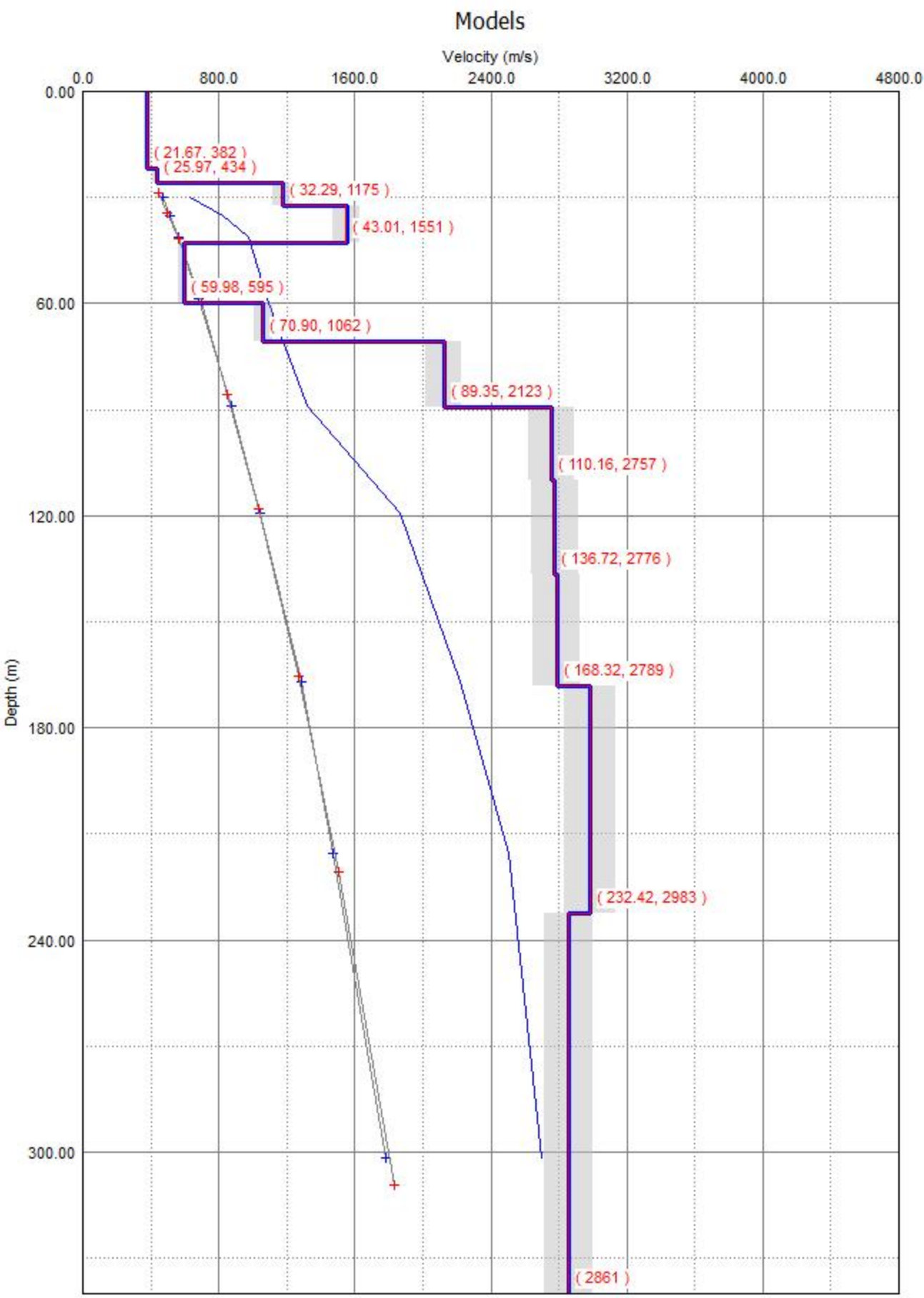
CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

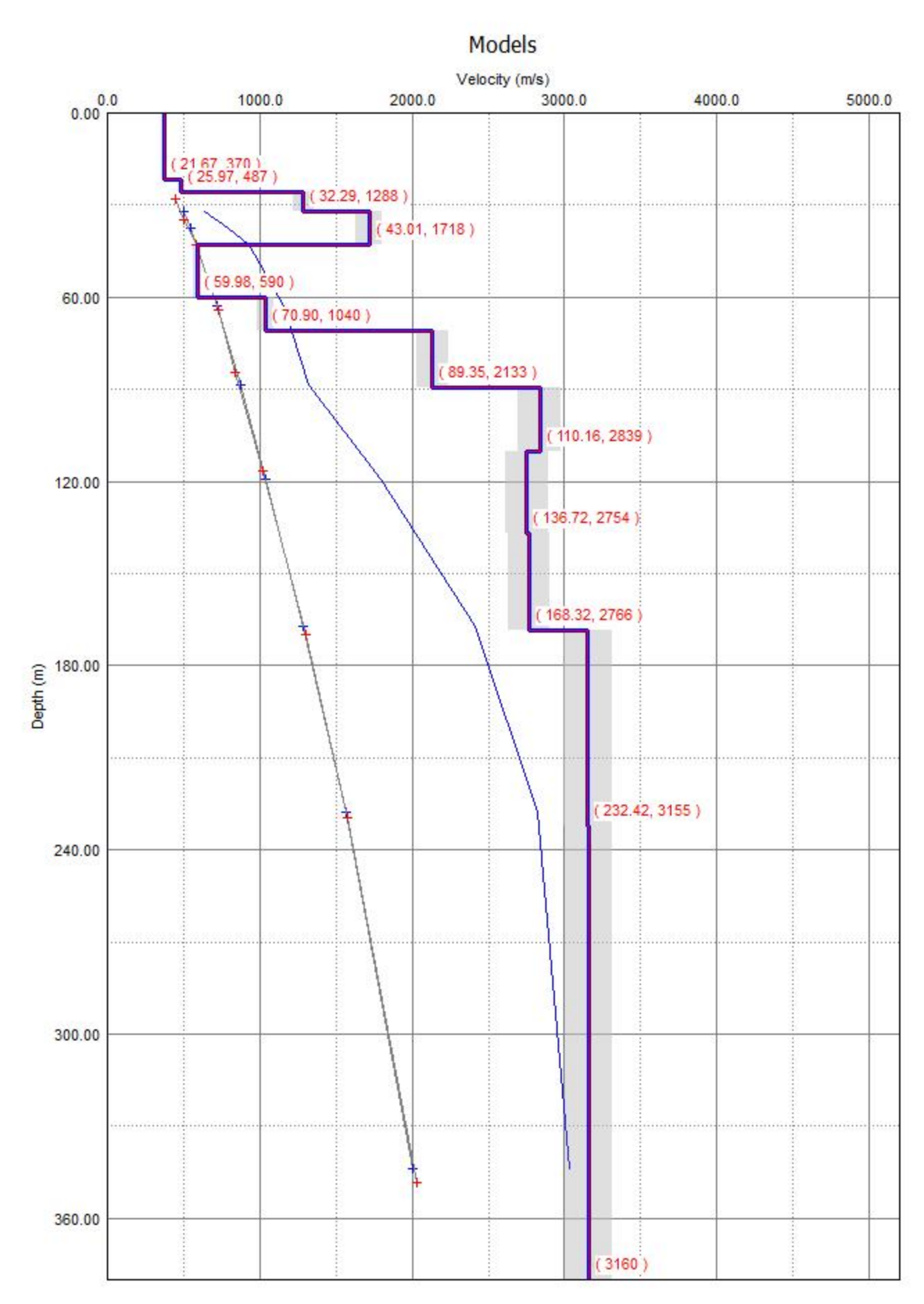
GEODATOS
Geofísica de Avanzada

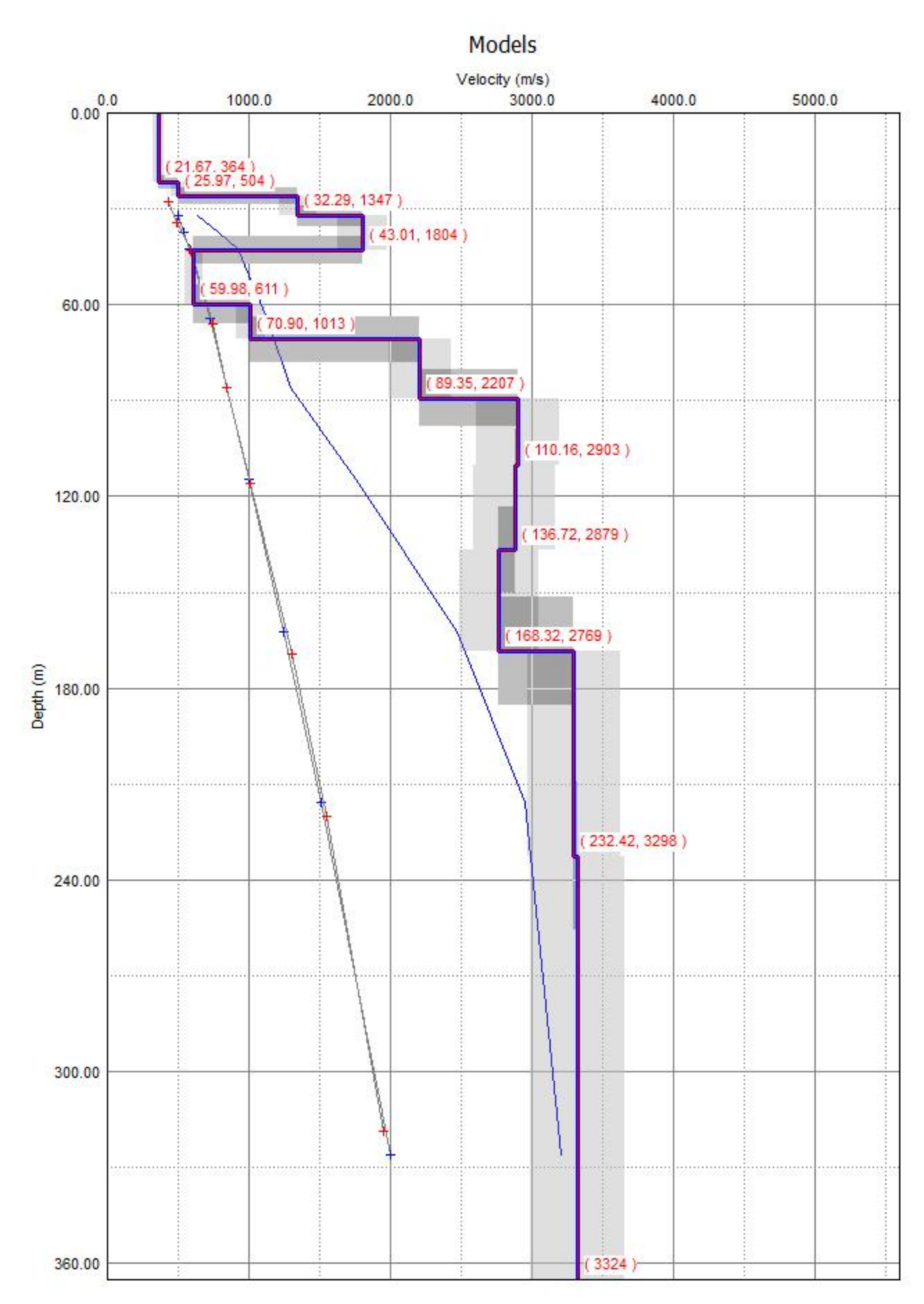
ANEXOS

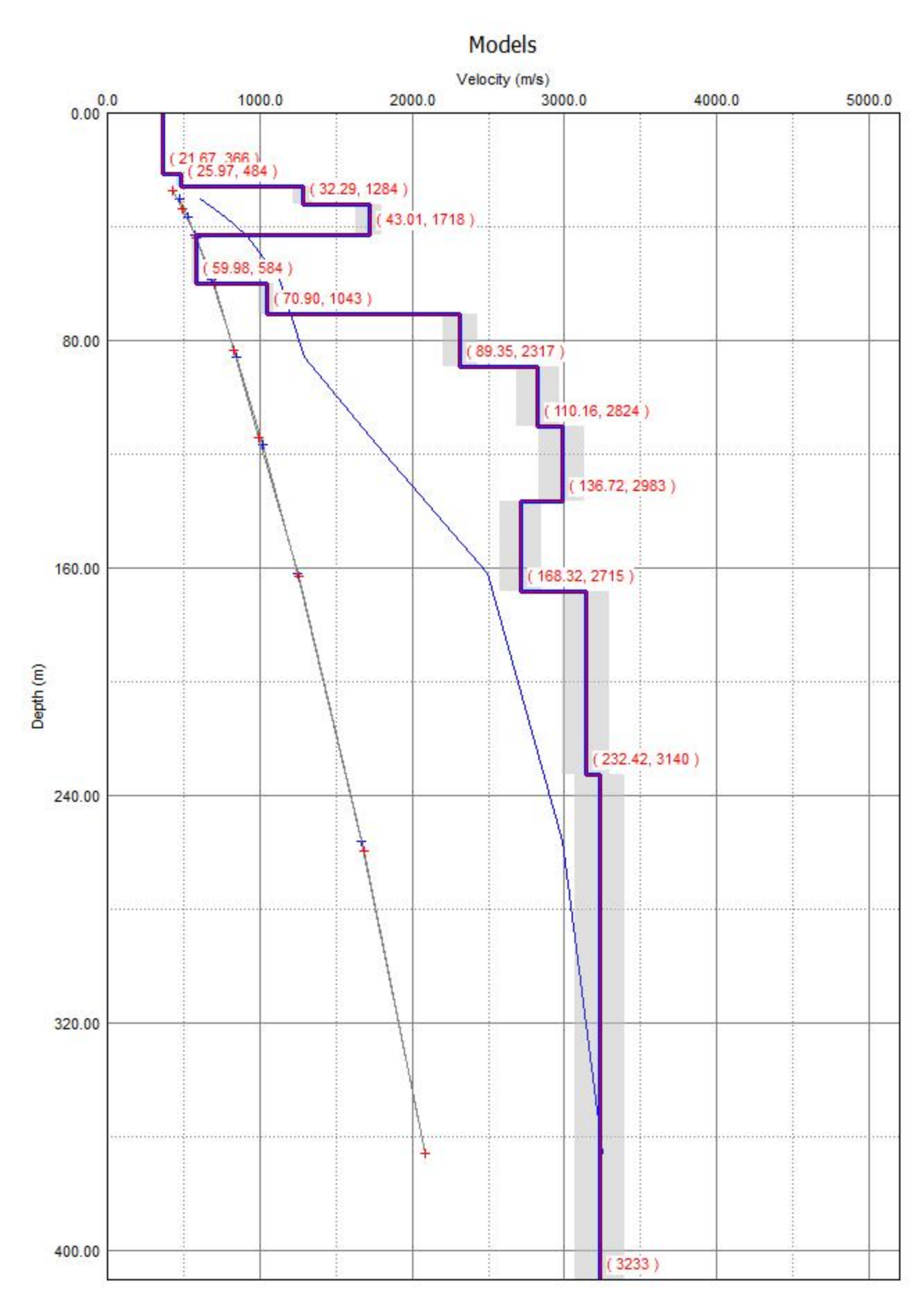
LINEA 1 MASW

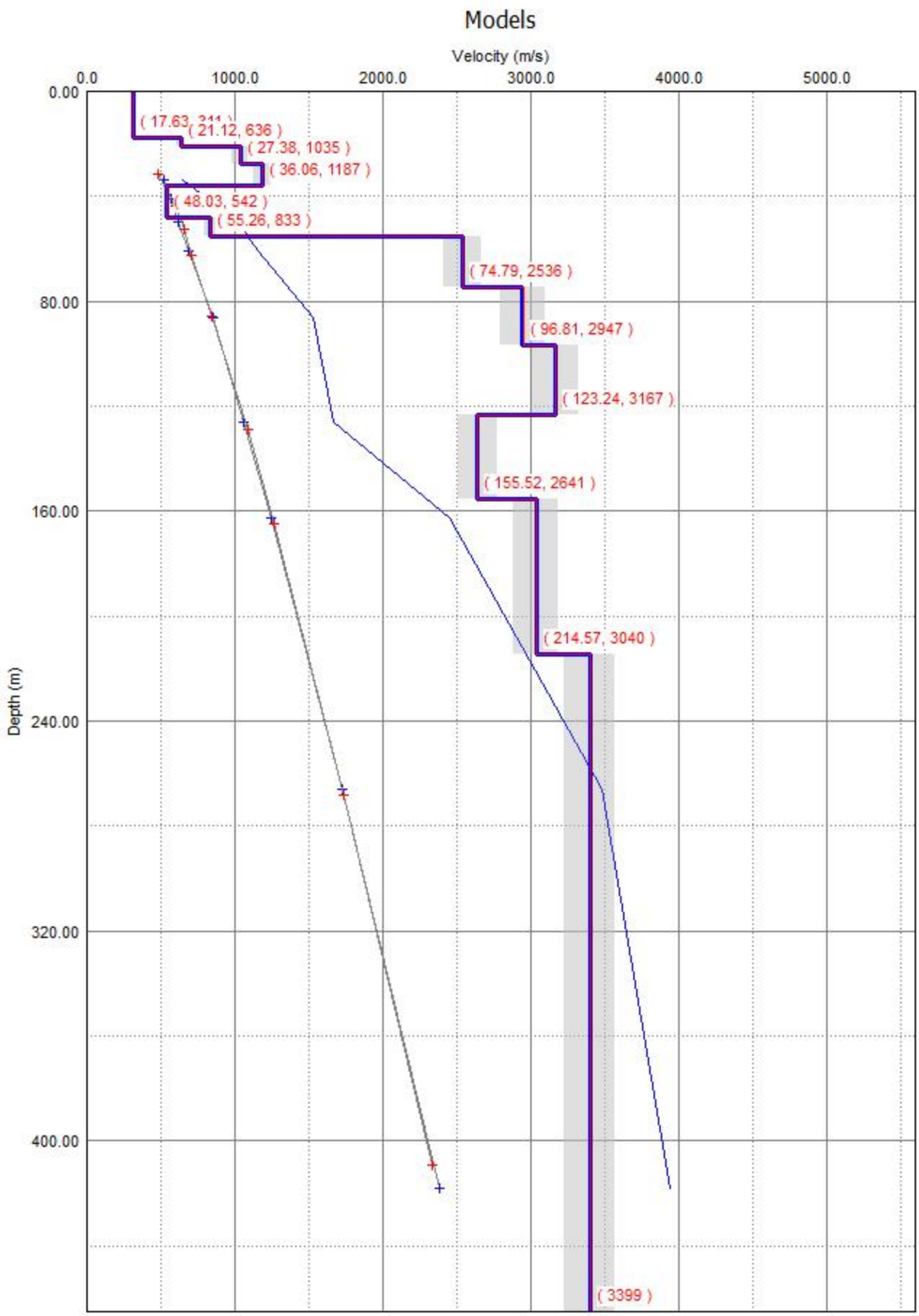
Modelos 1D VS

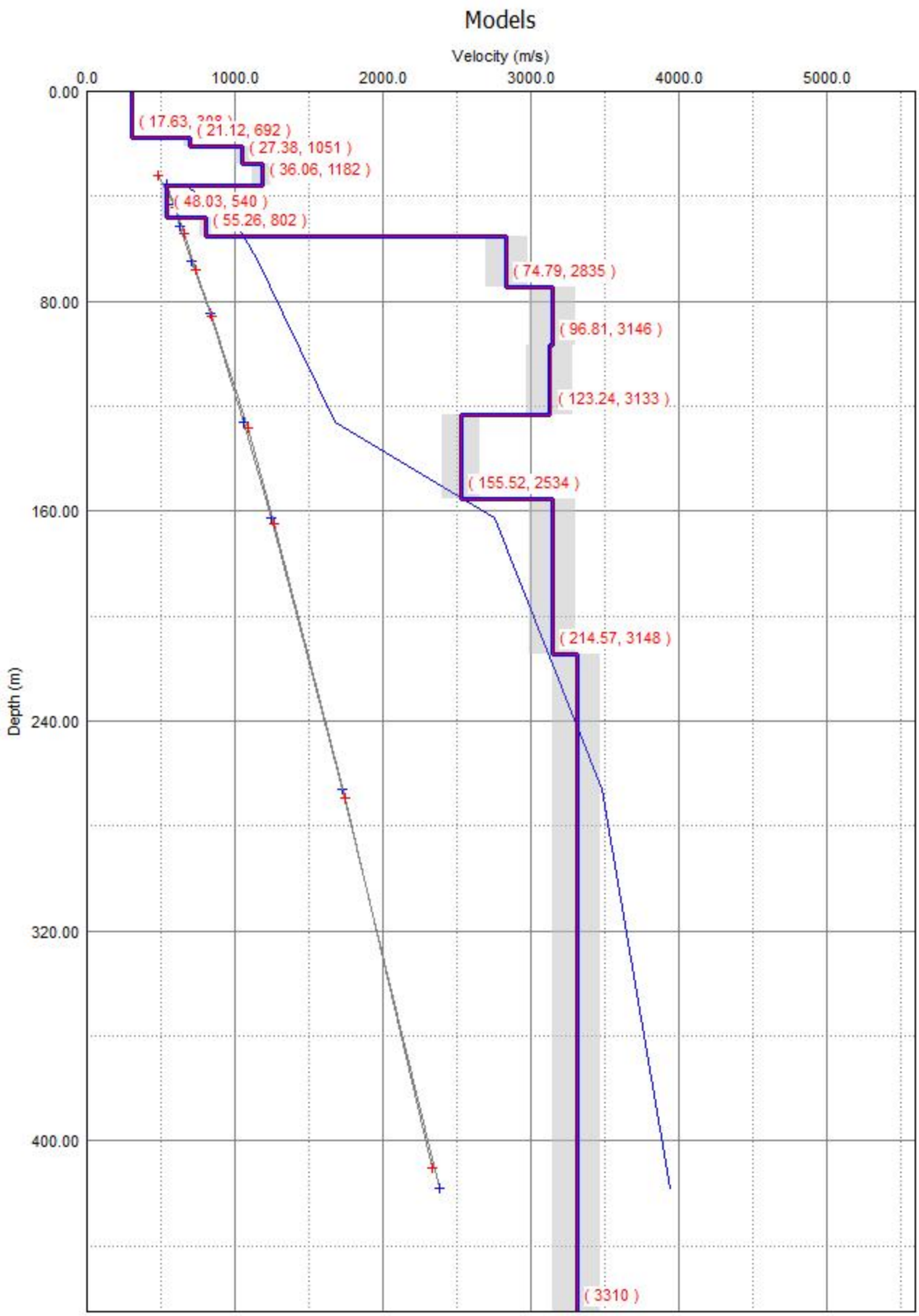

Models
Velocity (m/s)
0.0
800.0
1600.0
2400.0
3200.0
4000.0
4800.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
Depth (m)
(21.67, 382)
(25.97, 434)
(32.29, 1175)
(43.01, 1551)
(59.98, 595)
(70.90, 1062)
(89.35, 2123)
(110.16, 2757)
(136.72, 2776)
(168.32, 2789)
(232.42, 2983)
(2861)

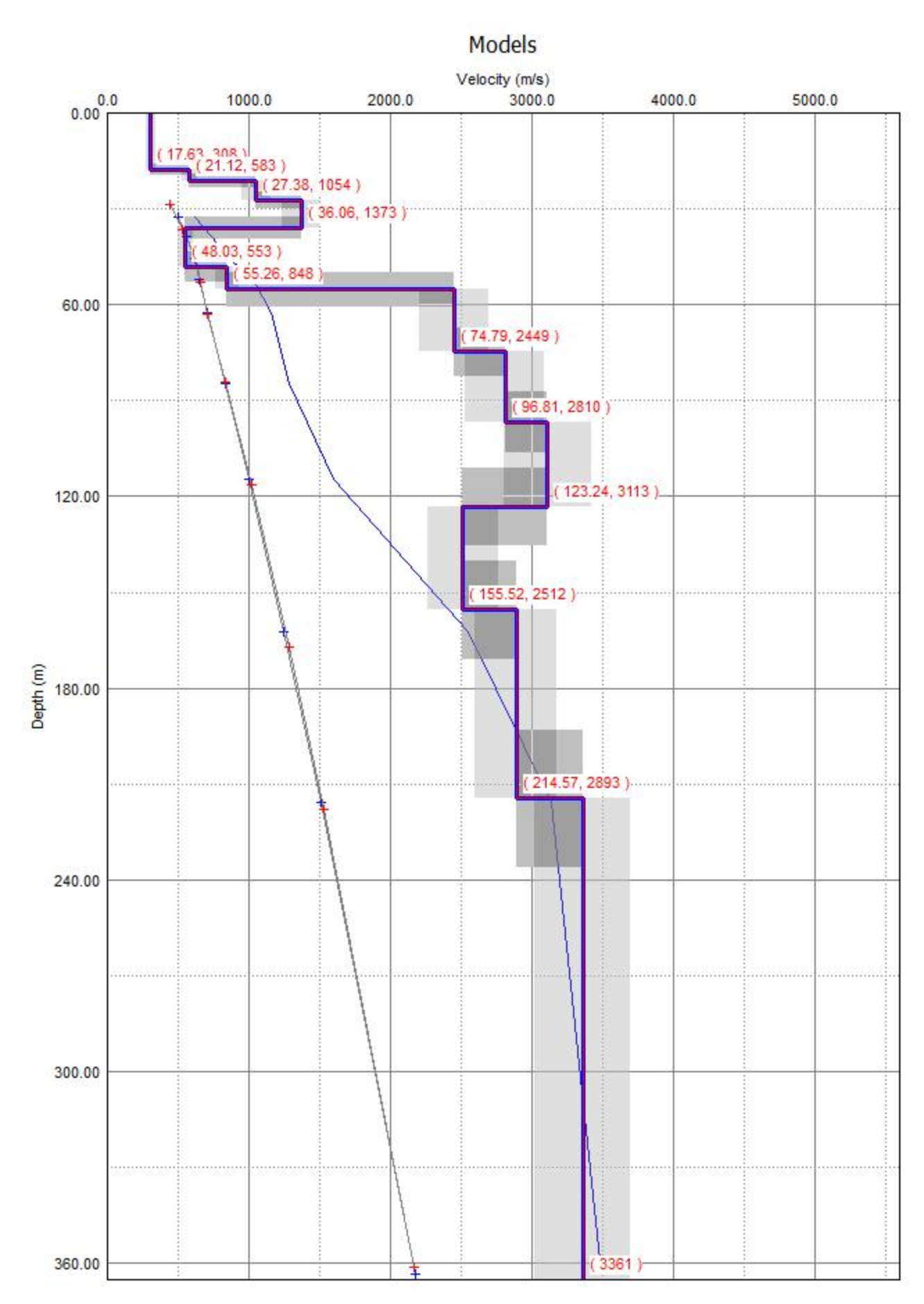

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(21.67, 370)
(25.97, 487)
(32.29, 1288)
(43.01, 1718)
(59.98, 590)
(70.90, 1040)
(89.35, 2133)
(110.16, 2839)
(136.72, 2754)
(168.32, 2766)
(232.42, 3155)
(3160)

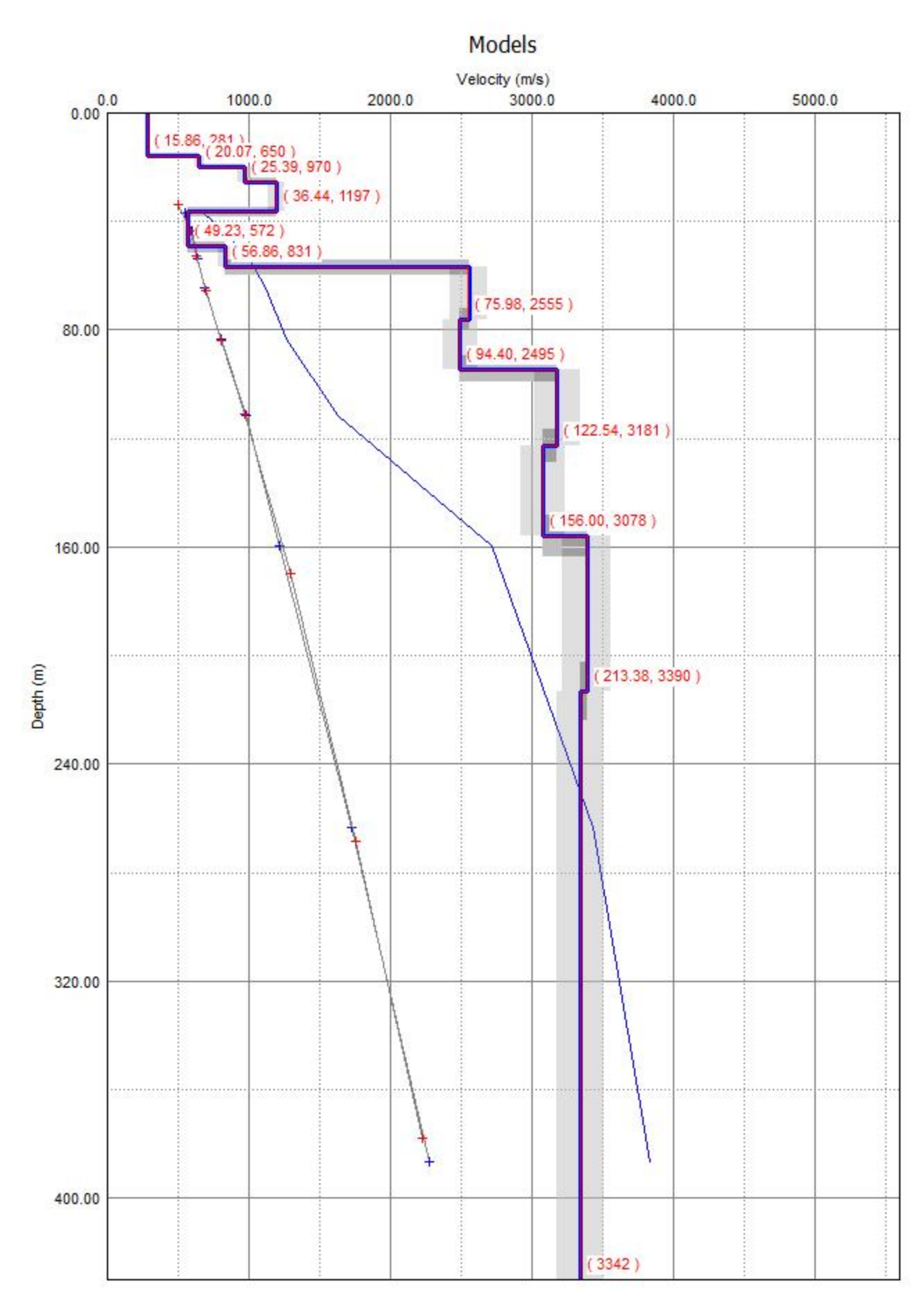

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(21.67, 364)
(25.97, 504)
(32.29, 1347)
(43.01, 1804)
(59.98, 611)
(70.90, 1013)
(89.35, 2207)
(110.16, 2903)
(136.72, 2879)
(168.32, 2769)
(232.42, 3298)
(3324)

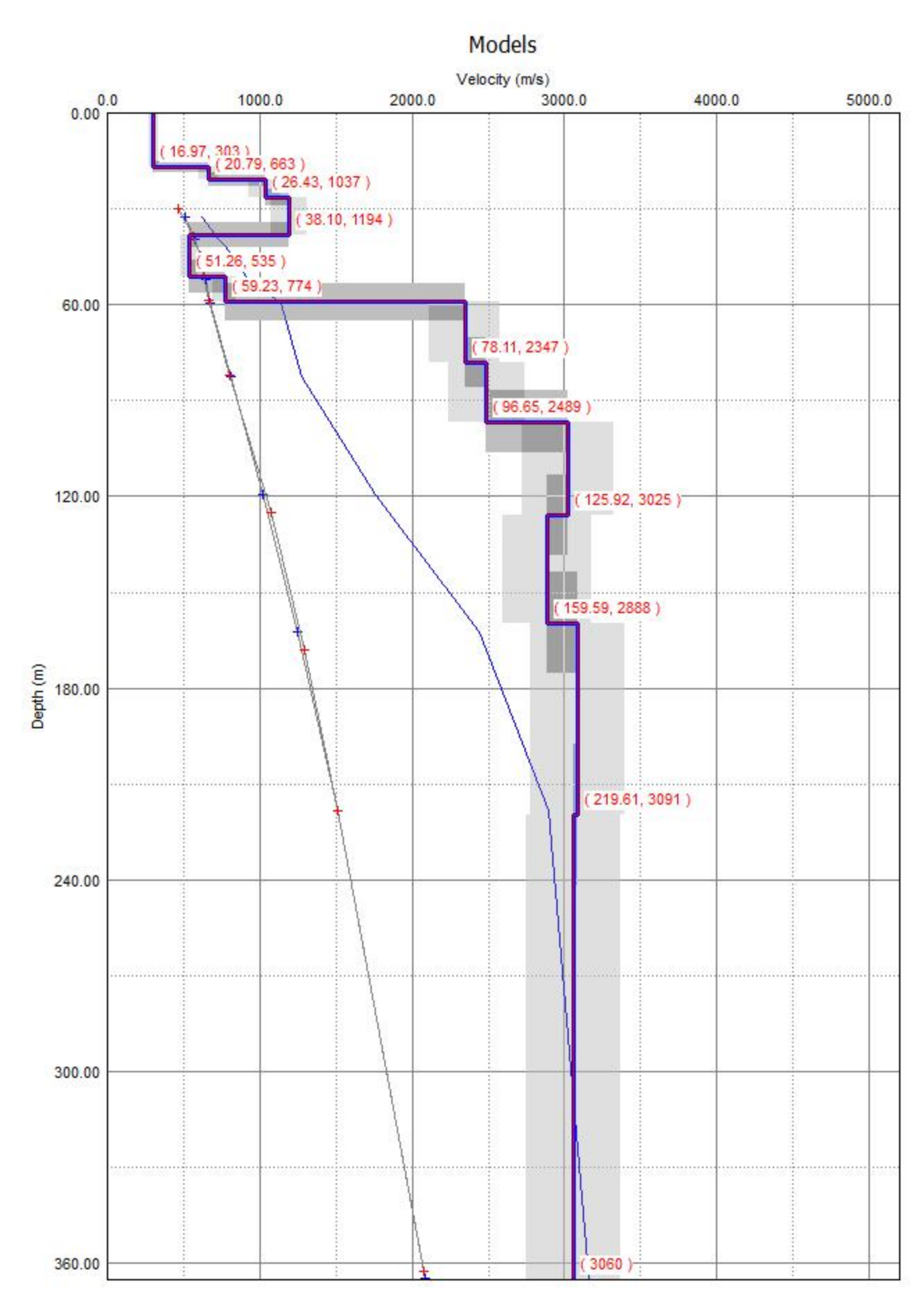

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(21.67, 366)
(25.97, 484)
(32.29, 1284)
(43.01, 1718)
(59.98, 584)
(70.90, 1043)
(89.35, 2317)
(110.16, 2824)
(136.72, 2983)
(168.32, 2715)
(232.42, 3140)
(3233)

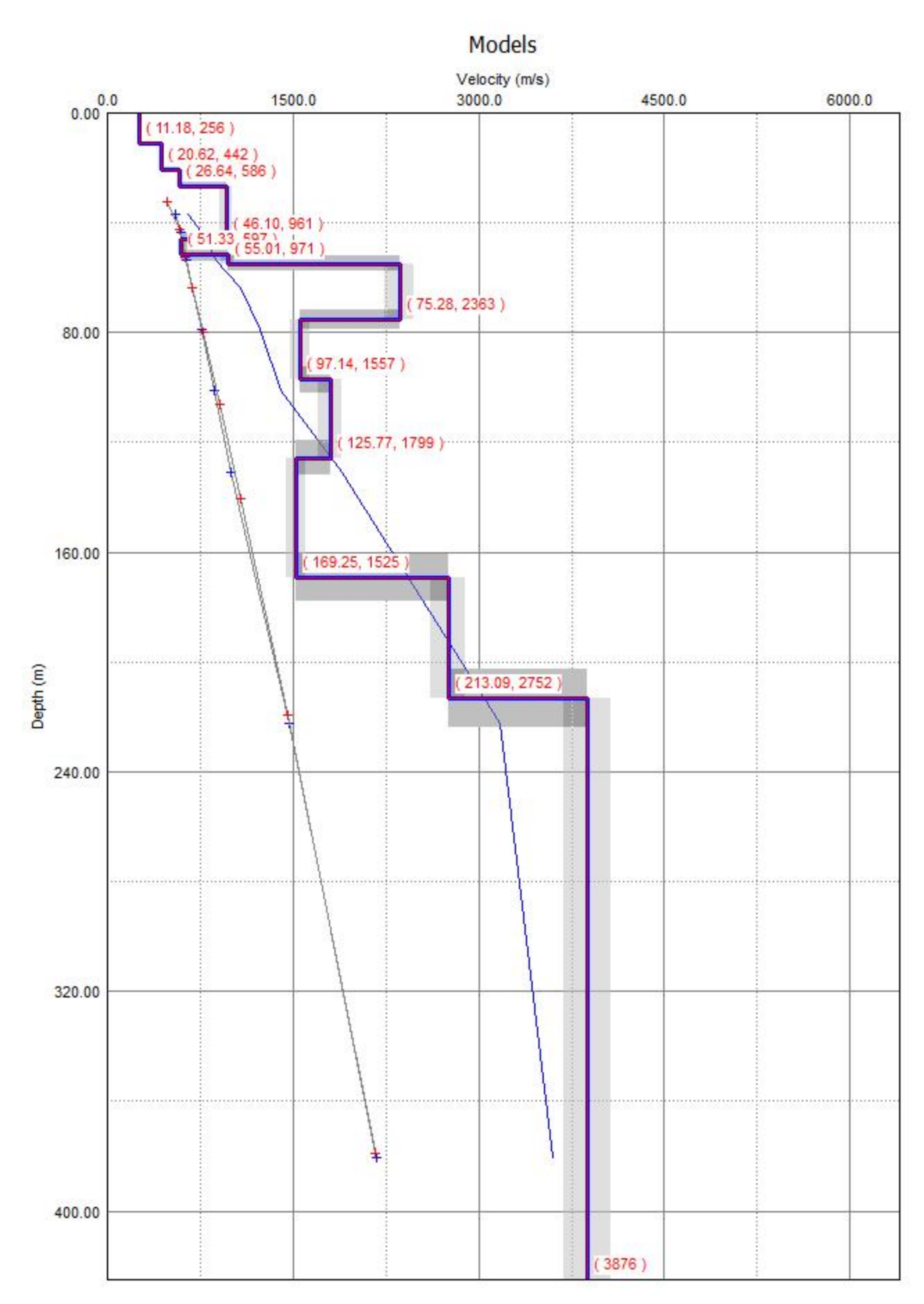

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(17.63, 311)
(21.12, 636)
(27.38, 1035)
(36.06, 1187)
(48.03, 542)
(55.26, 833)
(74.79, 2536)
(96.81, 2947)
(123.24, 3167)
(155.52, 2641)
(214.57, 3040)
(3399)

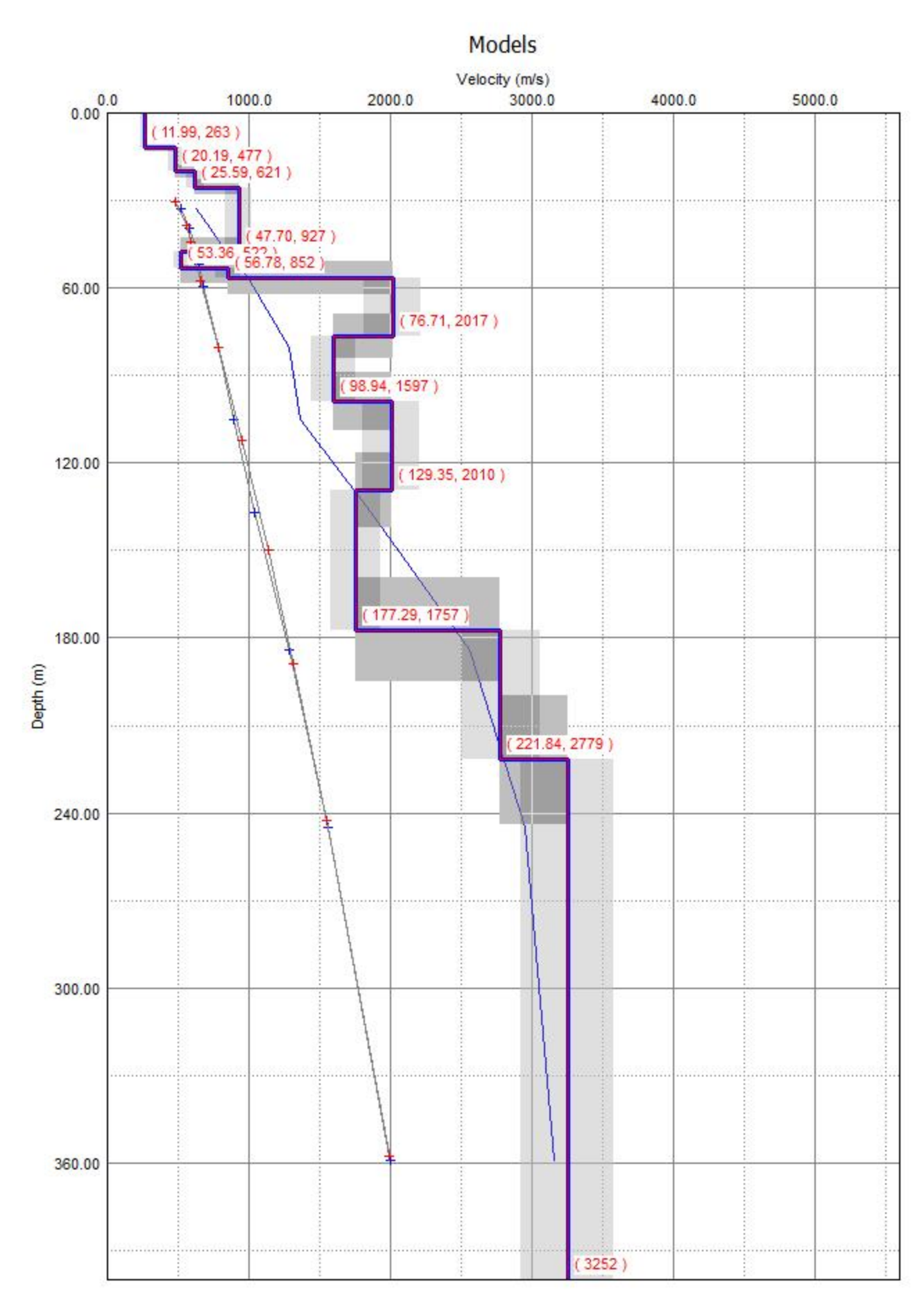

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(17.63,
(21.12, 692)
(27.38, 1051)
(36.06, 1182)
(48.03, 540)
(55.26, 802)
(74.79, 2835)
(96.81, 3146)
(123.24, 3133)
(155.52, 2534)
(214.57, 3148)
(3310)

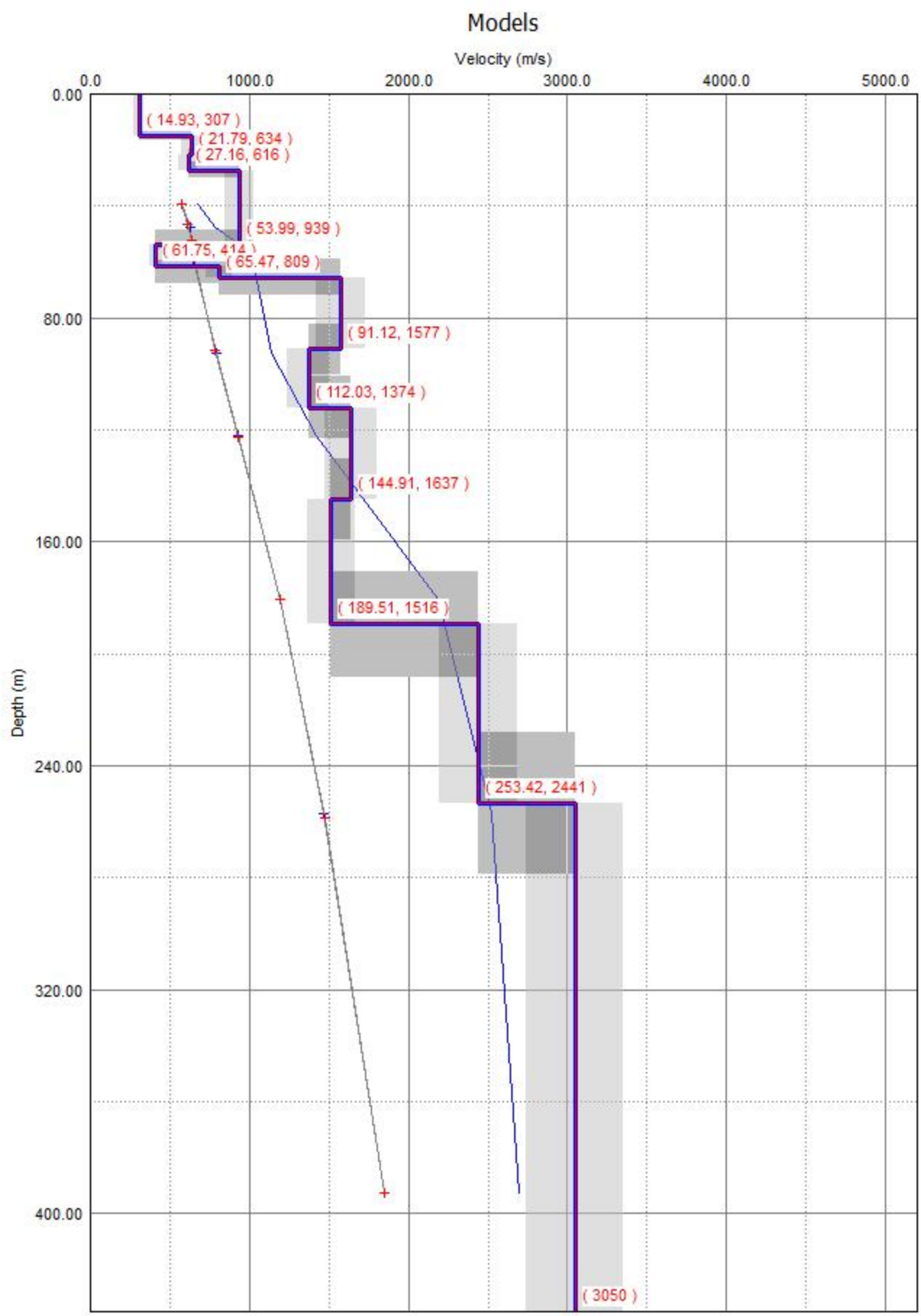

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
Depth (m)
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
(17.63, 308)
(21.12, 583)
(27.38, 1054)
(36.06, 1373)
(48.03, 553)
(55.26, 848)
(74.79, 2449)
(96.81, 2810)
(123.24, 3113)
(155.52, 2512)
(214.57, 2893)
(3361)

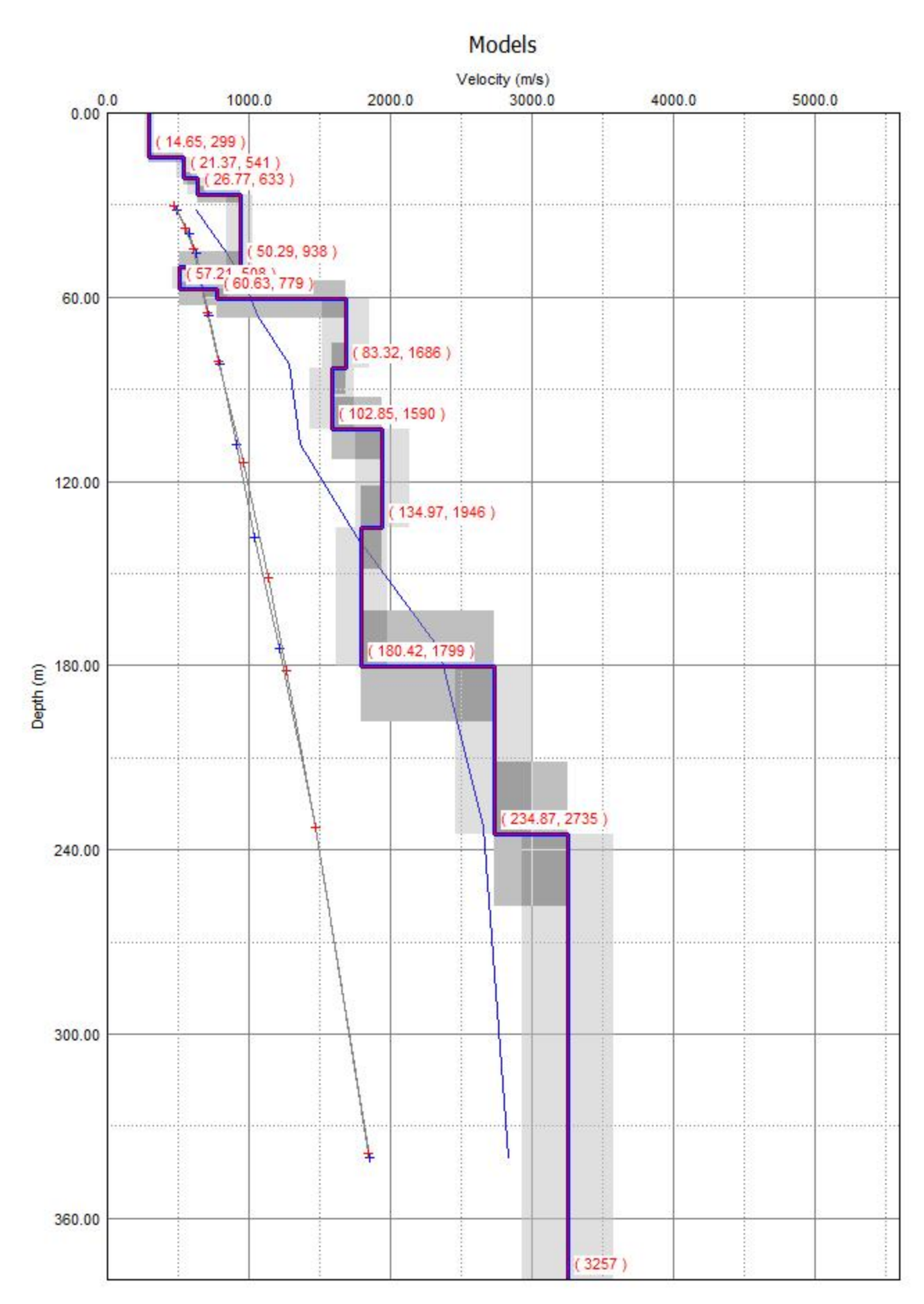

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(15.86, 281)
(20.07, 650)
(25.39, 970)
(36.44, 1197)
(49.23, 572)
(56.86, 831)
(75.98, 2555)
(94.40, 2495)
(122.54, 3181)
(156.00, 3078)
(213.38, 3390)
(3342)

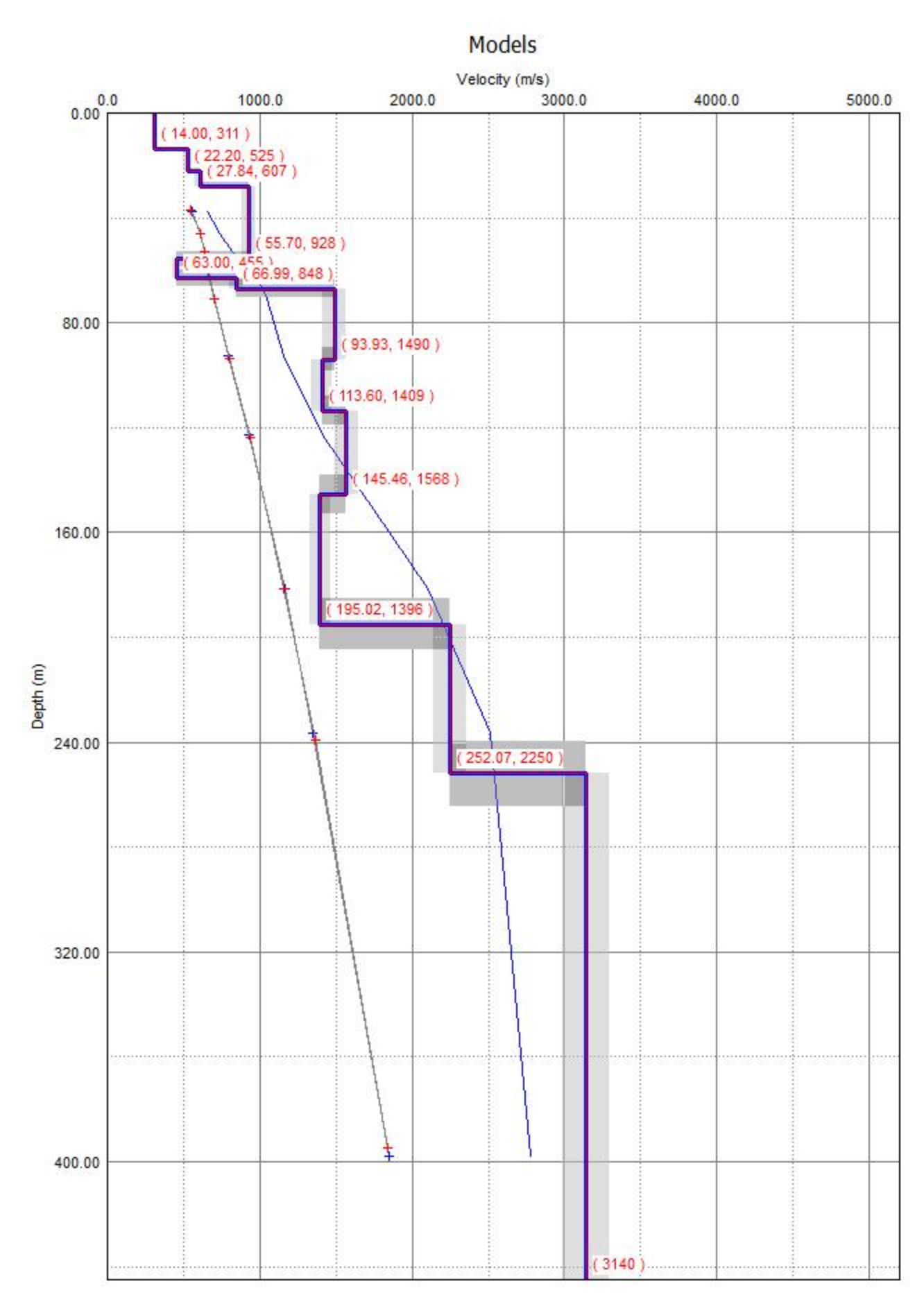

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(16.97, 303)
(20.79, 663)
(26.43, 1037)
(38.10, 1194)
(51.26, 535)
(59.23, 774)
(78.11, 2347)
(96.65, 2489)
(125.92, 3025)
(159.59, 2888)
(219.61, 3091)
(3060)

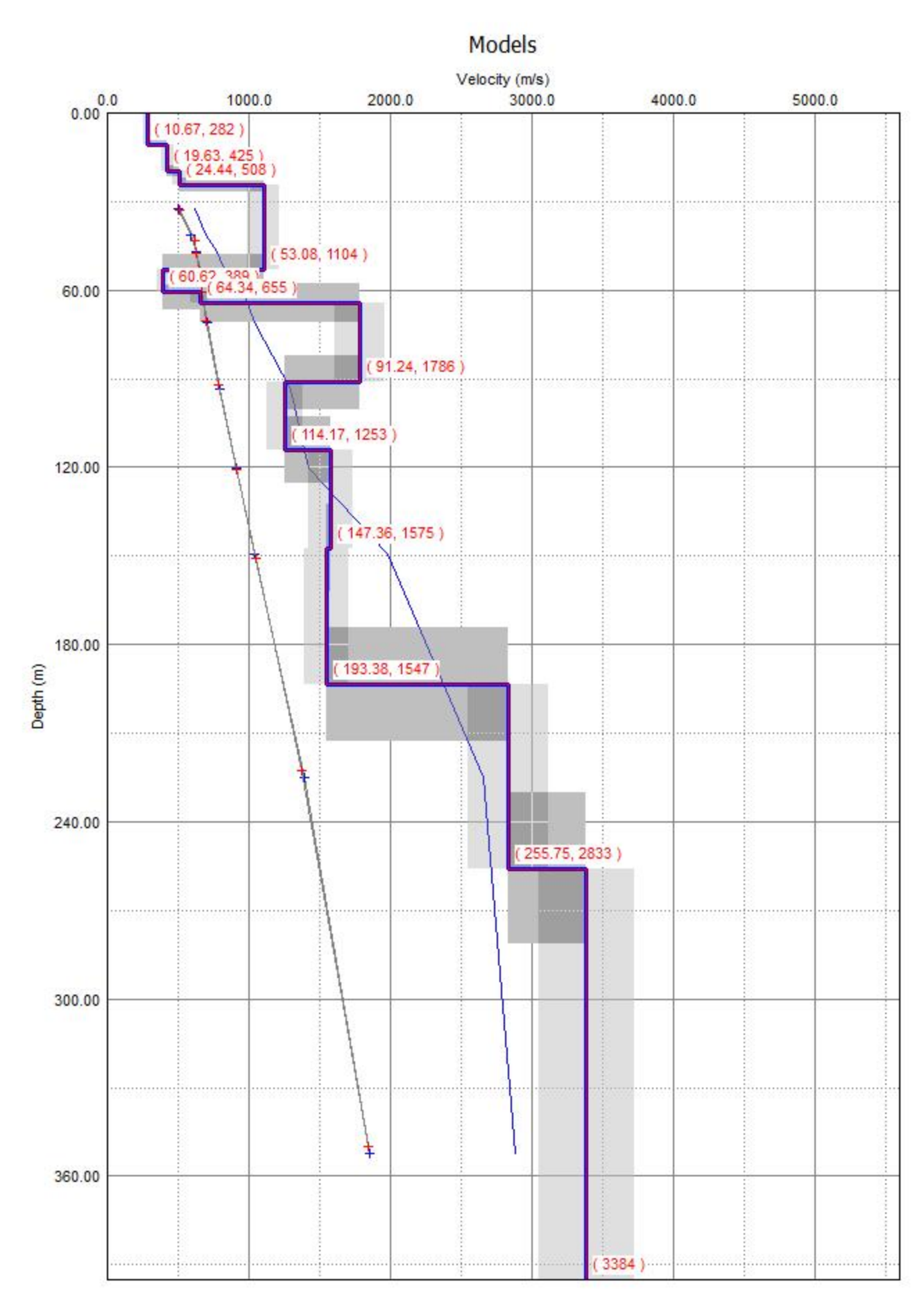

Models
Velocity (m/s)
0.0
1500.0
3000.0
4500.0
6000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(11.18, 256)
(20.62, 442)
(26.64, 586)
(46.10, 961)
(55.01, 971)
(75.28, 2363)
(97.14, 1557)
(125.77, 1799)
(169.25, 1525)
(213.09, 2752)
(3876)

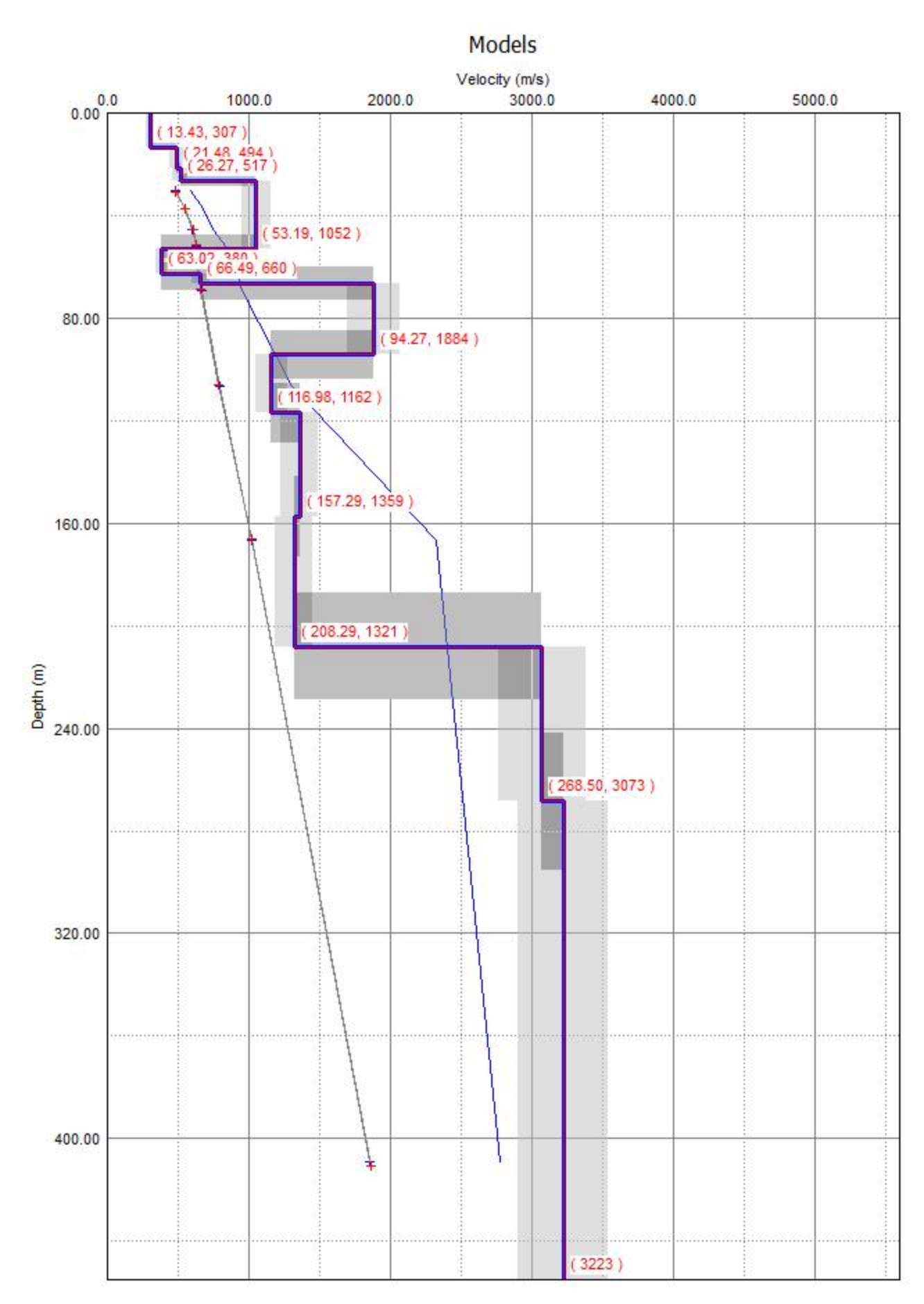

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(11.99, 263)
(20.19, 477)
(25.59, 621)
(47.70, 927)
(53.36, 522)
(56.78, 852)
(76.71, 2017)
(98.94, 1597)
(129.35, 2010)
(177.29, 1757)
(221.84, 2779)
(3252)

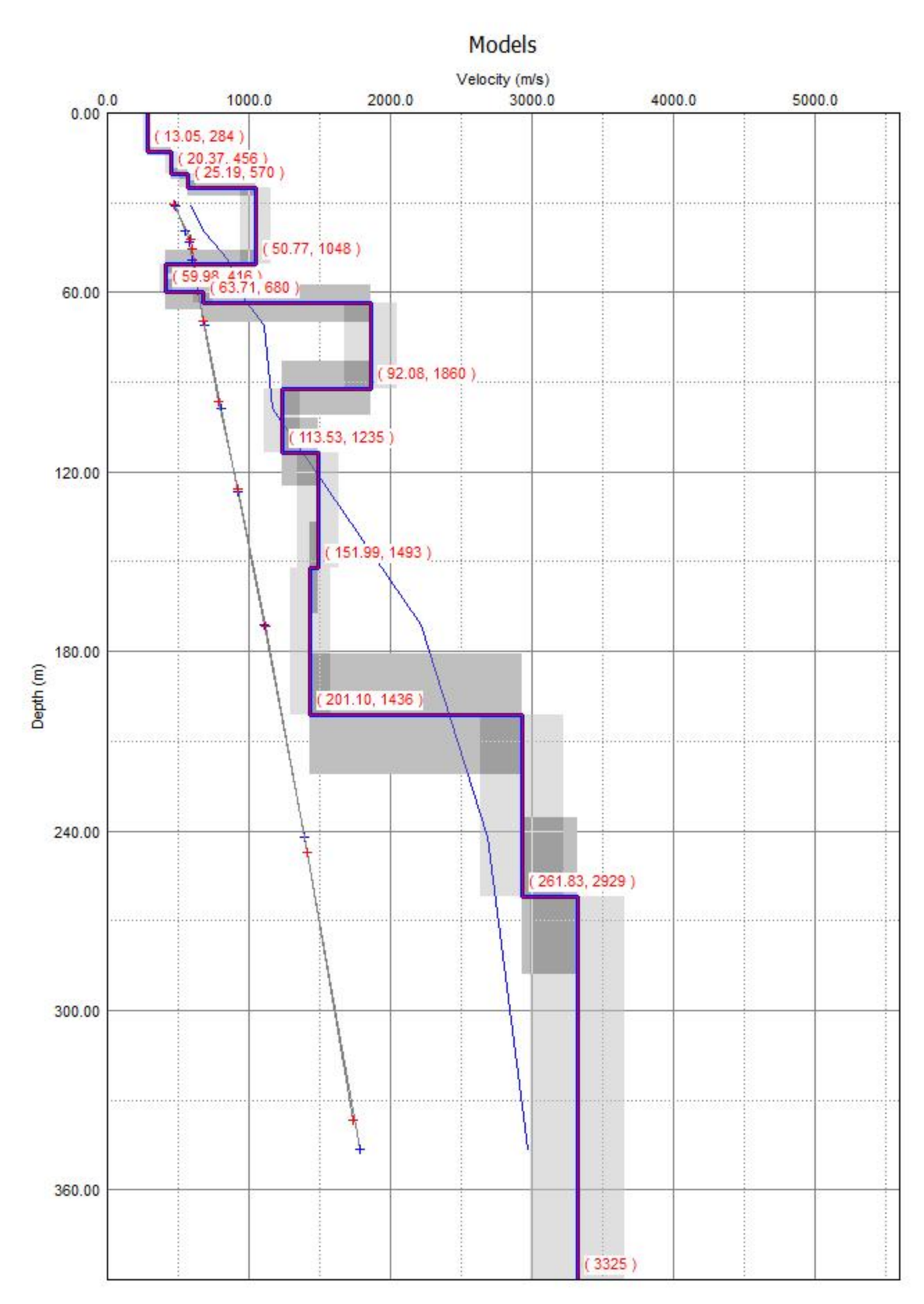

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(14.93, 307)
(21.79, 634)
(27.16, 616)
(53.99, 939)
(61.75, 414)
(65.47, 809)
(91.12, 1577)
(112.03, 1374)
(144.91, 1637)
(189.51, 1516)
(253.42, 2441)
(3050)

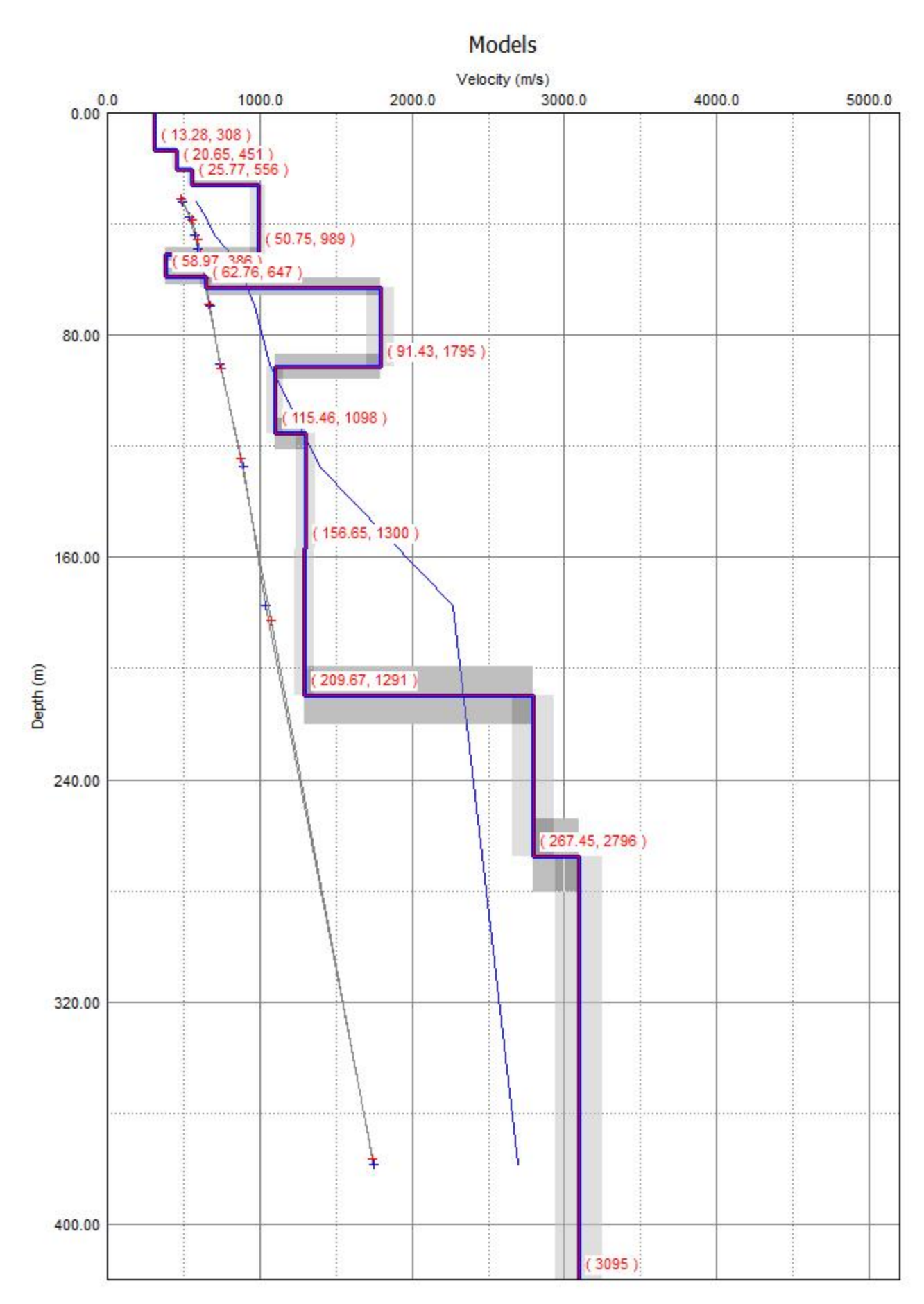

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
Depth (m)
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
(14.65, 299)
(21.37, 541)
(26.77, 633)
(50.29, 938)
(60.63, 779)
(83.32, 1686)
(102.85, 1590)
(134.97, 1946)
(180.42, 1799)
(234.87, 2735)
(3257)

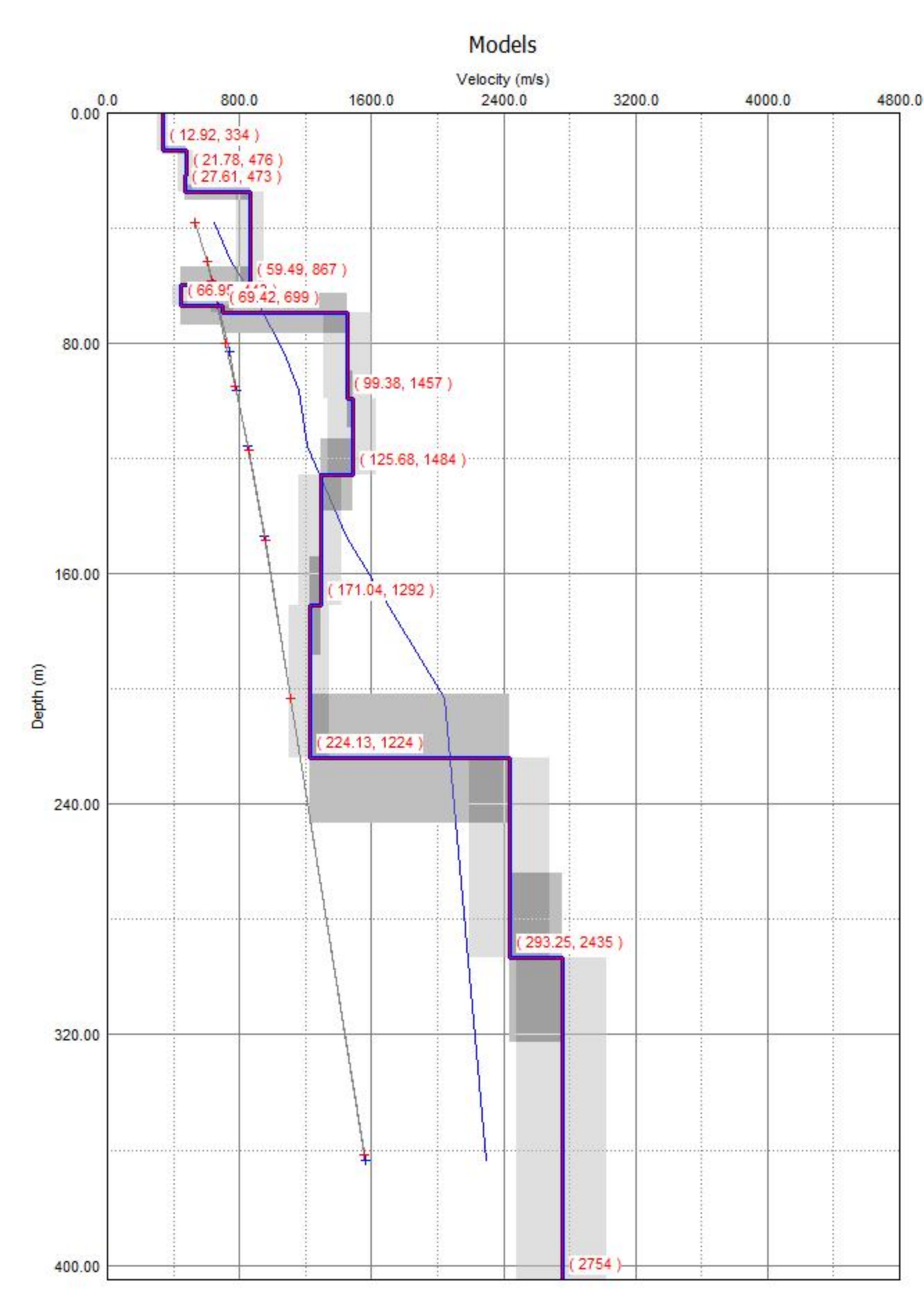

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(14.00, 311)
(22.20, 525)
(27.84, 607)
(55.70, 928)
(63.00, 455)
(66.99, 848)
(93.93, 1490)
(113.60, 1409)
(145.46, 1568)
(195.02, 1396)
(252.07, 2250)
(3140)

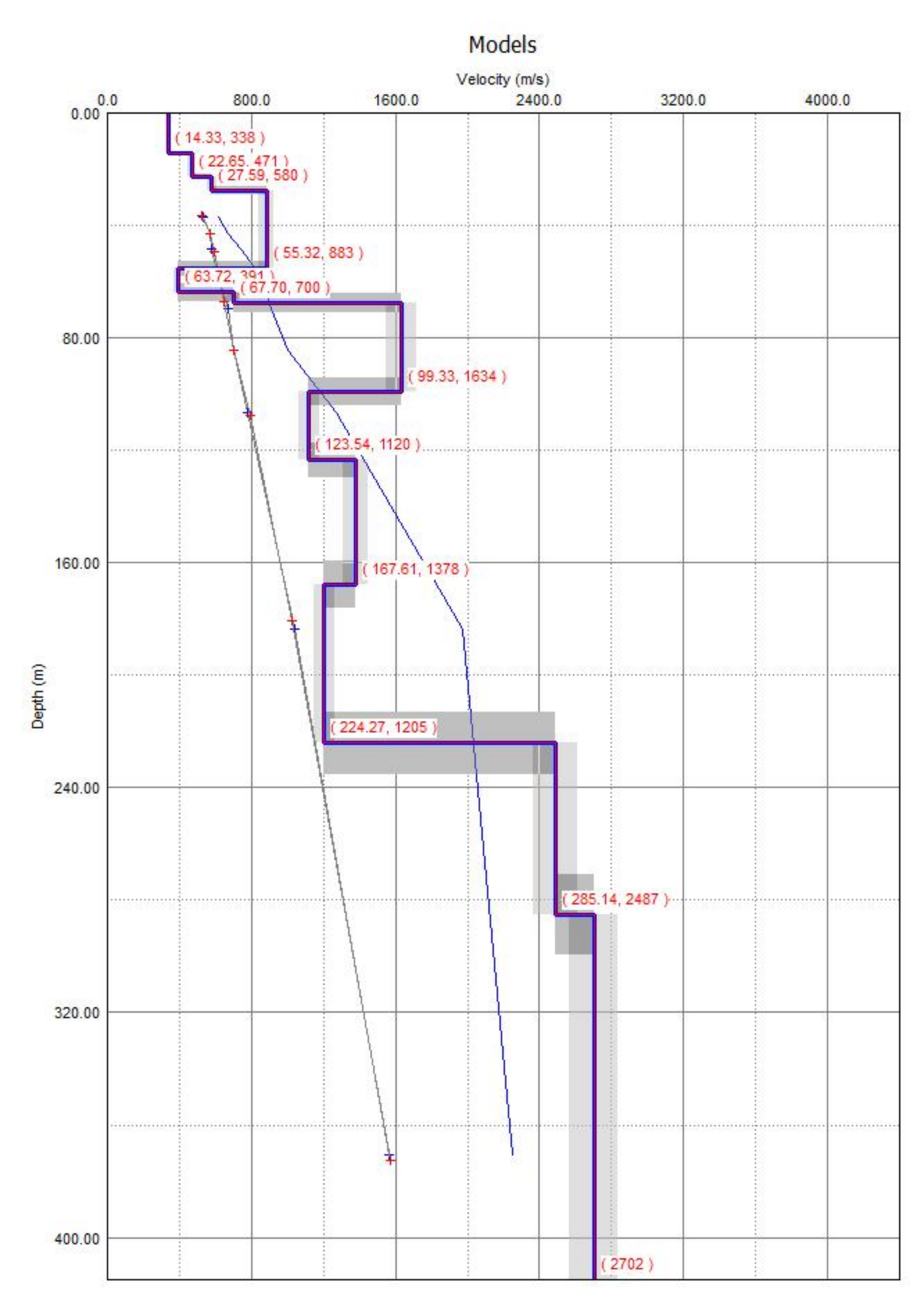

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(10.67, 282)
(19.63. 425)
(24.44, 508)
(53.08, 1104)
(64.34, 655)
(91.24, 1786)
(114.17, 1253)
(147.36, 1575)
(193.38, 1547)
(255.75, 2833)
(3384)

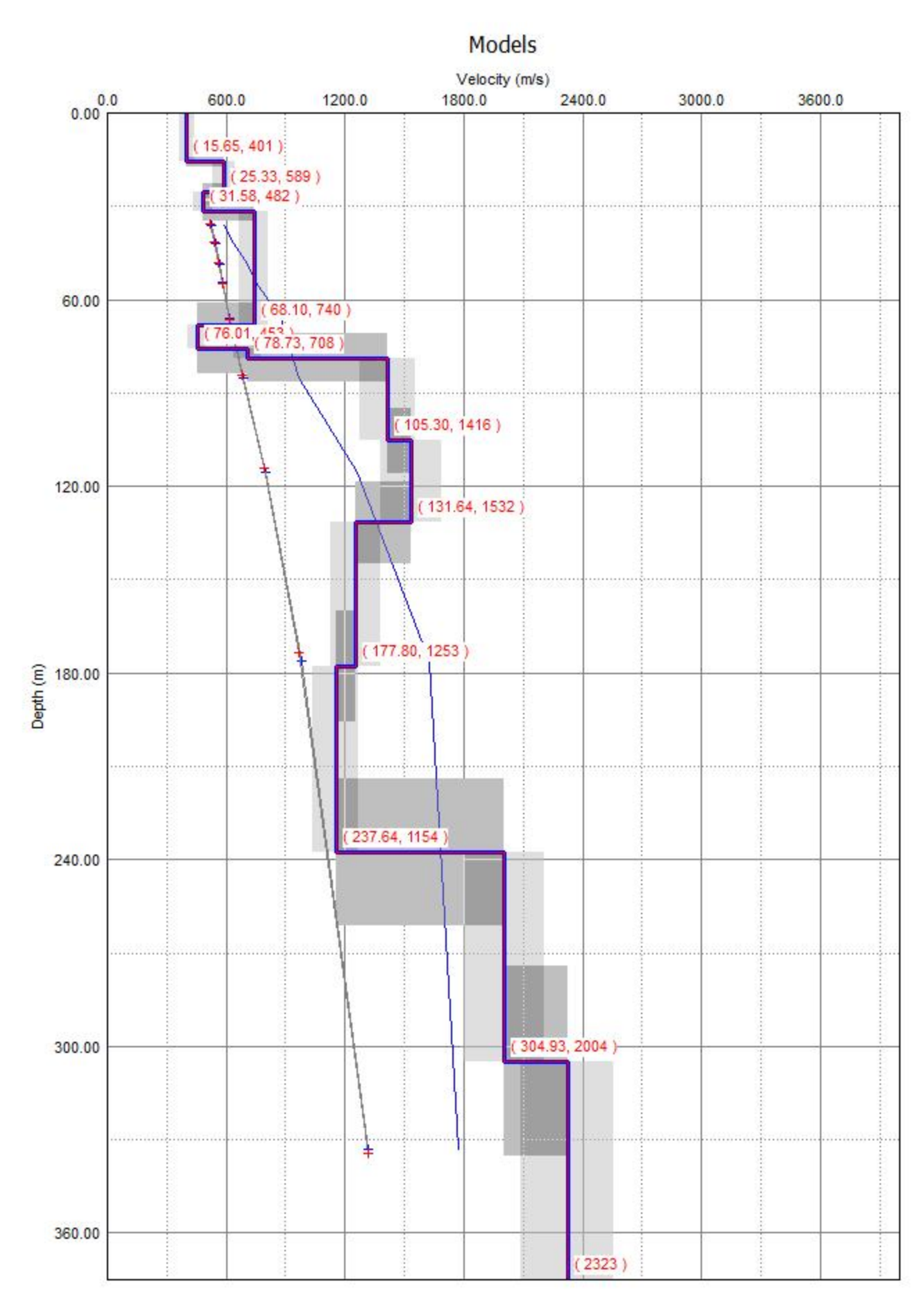

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(13.43, 307)
(21.48, 494)
(26.27, 517)
(53.19, 1052)
(63.02, 380)
(66.49, 660)
(94.27, 1884)
(116.98, 1162)
(157.29, 1359)
(208.29, 1321)
(268.50, 3073)
(3223)

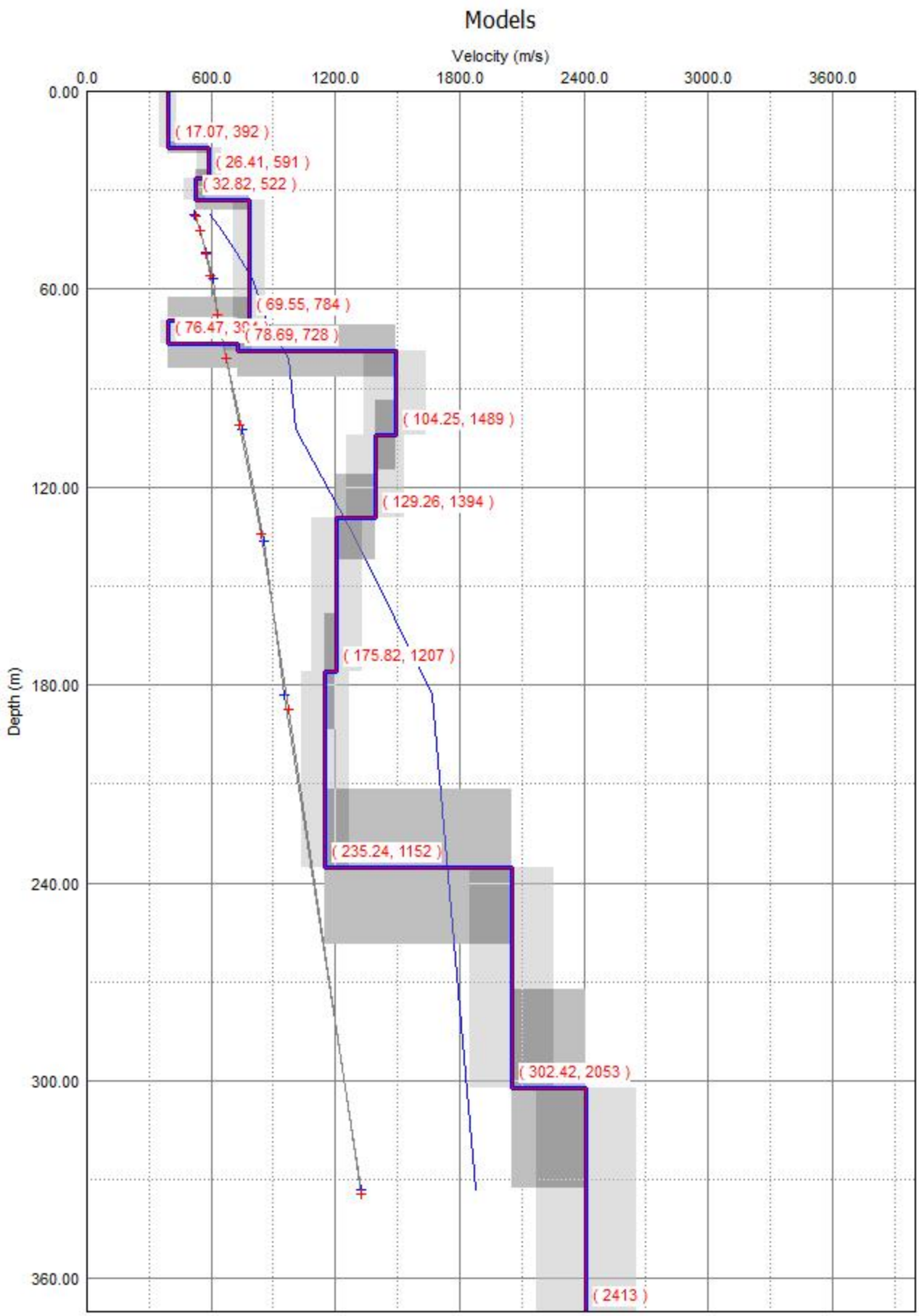

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(13.05, 284)
(20.37, 456)
(25.19, 570)
(50.77, 1048)
(59.98, 416)
(63.71, 680)
(92.08, 1860)
(113.53, 1235)
(151.99, 1493)
(201.10, 1436)
(261.83, 2929)
(3325)

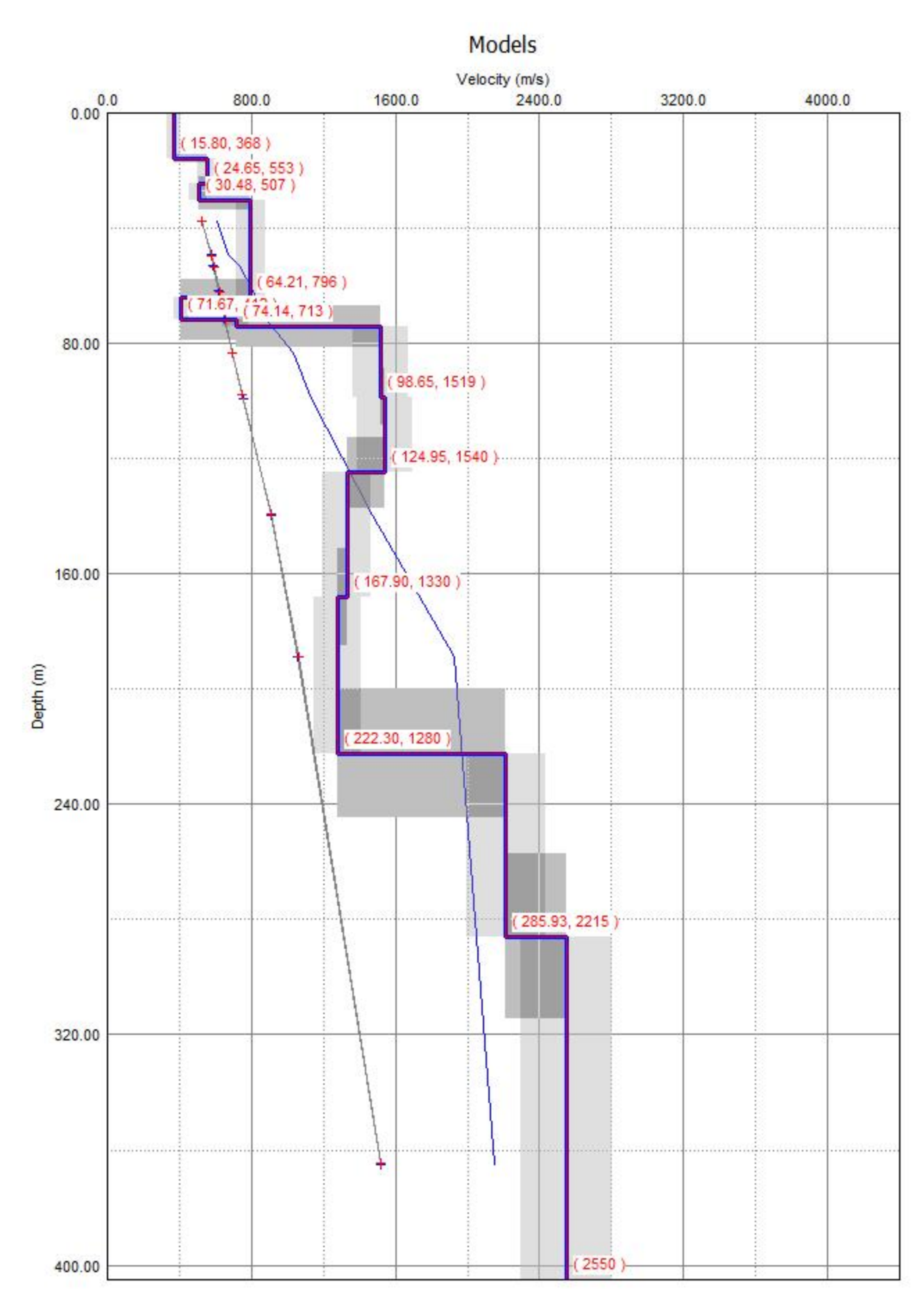

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(13.28, 308)
(20.65, 451)
(25.77, 556)
(50.75, 989)
(58.97, 386)
(62.76, 647)
(91.43, 1795)
(115.46, 1098)
(156.65, 1300)
(209.67, 1291)
(267.45, 2796)
(3095)

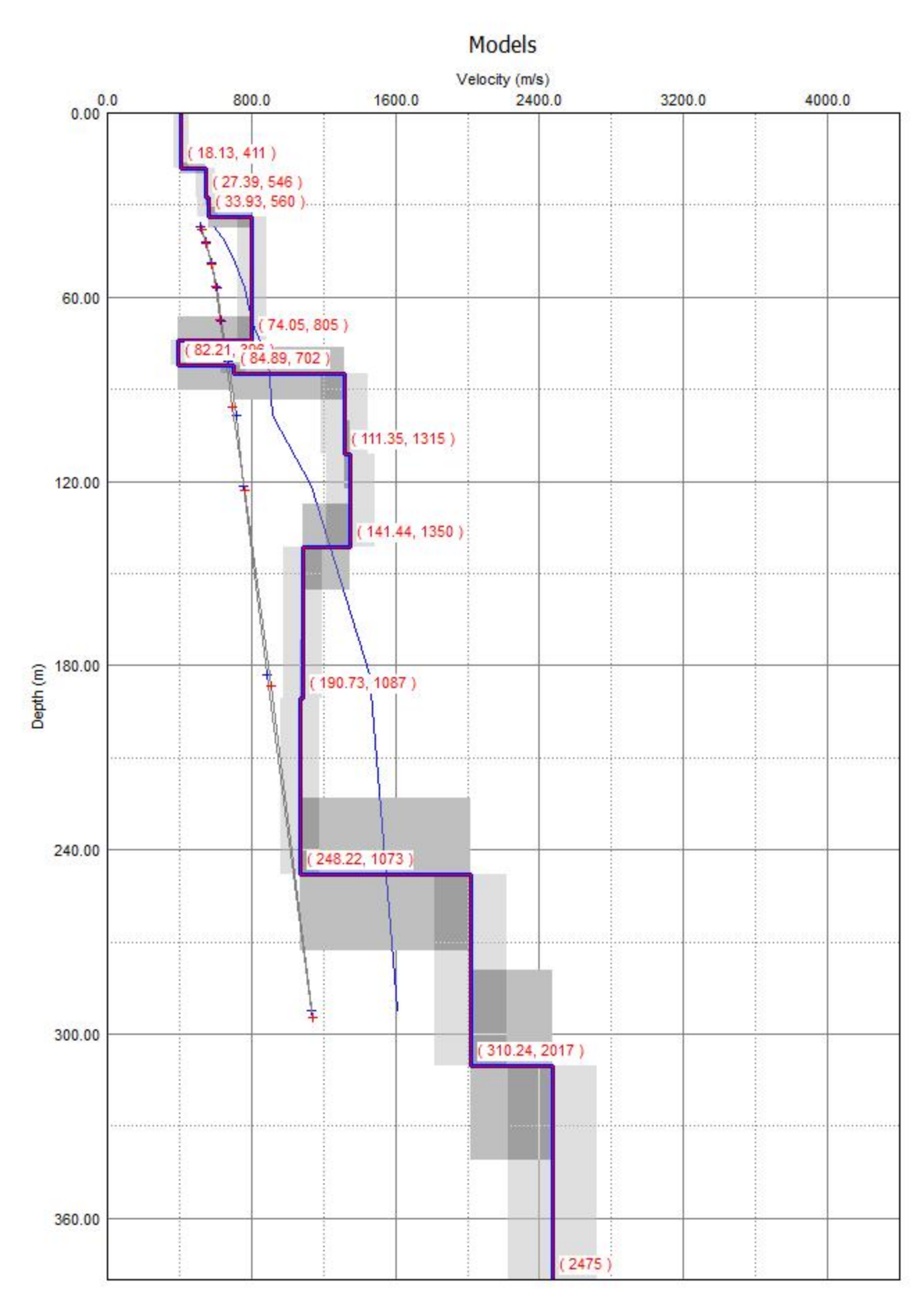

Models
Velocity (m/s)
0.0
800.0
1600.0
2400.0
3200.0
4000.0
4800.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(12.92, 334)
(21.78, 476)
(27.61, 473)
(59.49, 867)
(69.42, 699)
(99.38, 1457)
(125.68, 1484)
(171.04, 1292)
(224.13, 1224)
(293.25, 2435)
(2754)


Models
Velocity (m/s)
0.0
800.0
1600.0
2400.0
3200.0
4000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(14.33, 338)
(22.65, 471)
(27.59, 580)
(55.32, 883)
(63.72, 391)
(67.70, 700)
(99.33, 1634)
(123.54, 1120)
(167.61, 1378)
(224.27, 1205)
(285.14, 2487)
(2702)


Models
Velocity (m/s)
0.0
600.0
1200.0
1800.0
2400.0
3000.0
3600.0
Depth (m)
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
(15.65, 401)
(25.33, 589)
(31.58, 482)
(68.10, 740)
(76.01, 453)
(78.73, 708)
(105.30, 1416)
(131.64, 1532)
(177.80, 1253)
(237.64, 1154)
(304.93, 2004)
(2323)


Models
Velocity (m/s)
0.0
600.0
1200.0
1800.0
2400.0
3000.0
3600.0
Depth (m)
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
(17.07, 392)
(26.41, 591)
(32.82, 522)
(69.55, 784)
(78.69, 728)
(104.25, 1489)
(129.26, 1394)
(175.82, 1207)
(235.24, 1152)
(302.42, 2053)
(2413)


Models
Velocity (m/s)
0.0
800.0
1600.0
2400.0
3200.0
4000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(15.80, 368)
(24.65, 553)
(30.48, 507)
(64.21, 796)
(74.14, 713)
(98.65, 1519)
(124.95, 1540)
(167.90, 1330)
(222.30, 1280)
(285.93, 2215)
(2550)


Models
Velocity (m/s)
0.0
800.0
1600.0
2400.0
3200.0
4000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(18.13, 411)
(27.39, 546)
(33.93, 560)
(74.05, 805)
(82.21, 306)
(84.89, 702)
(111.35, 1315)
(141.44, 1350)
(190.73, 1087)
(248.22, 1073)
(310.24, 2017)
(2475)

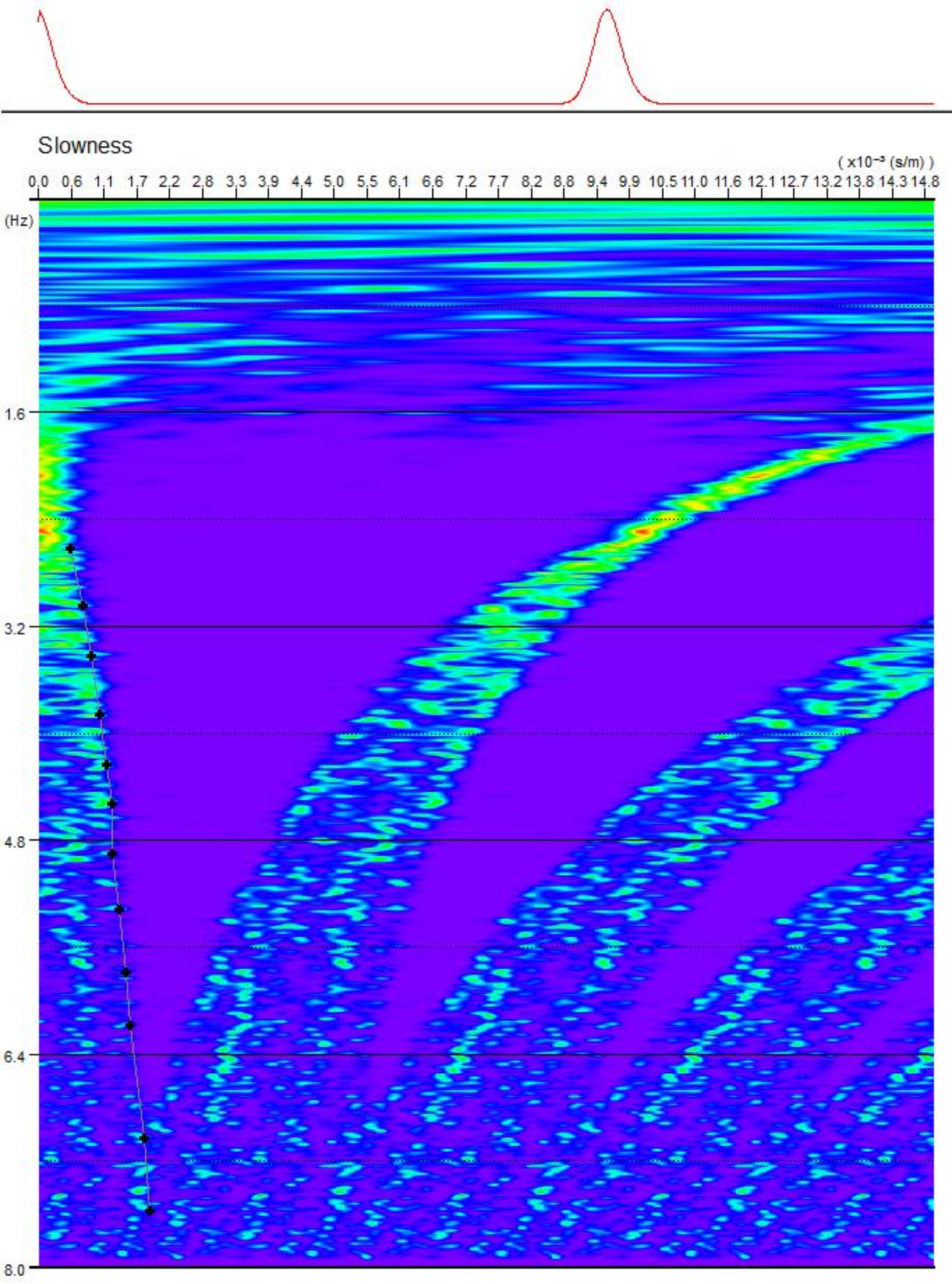
CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

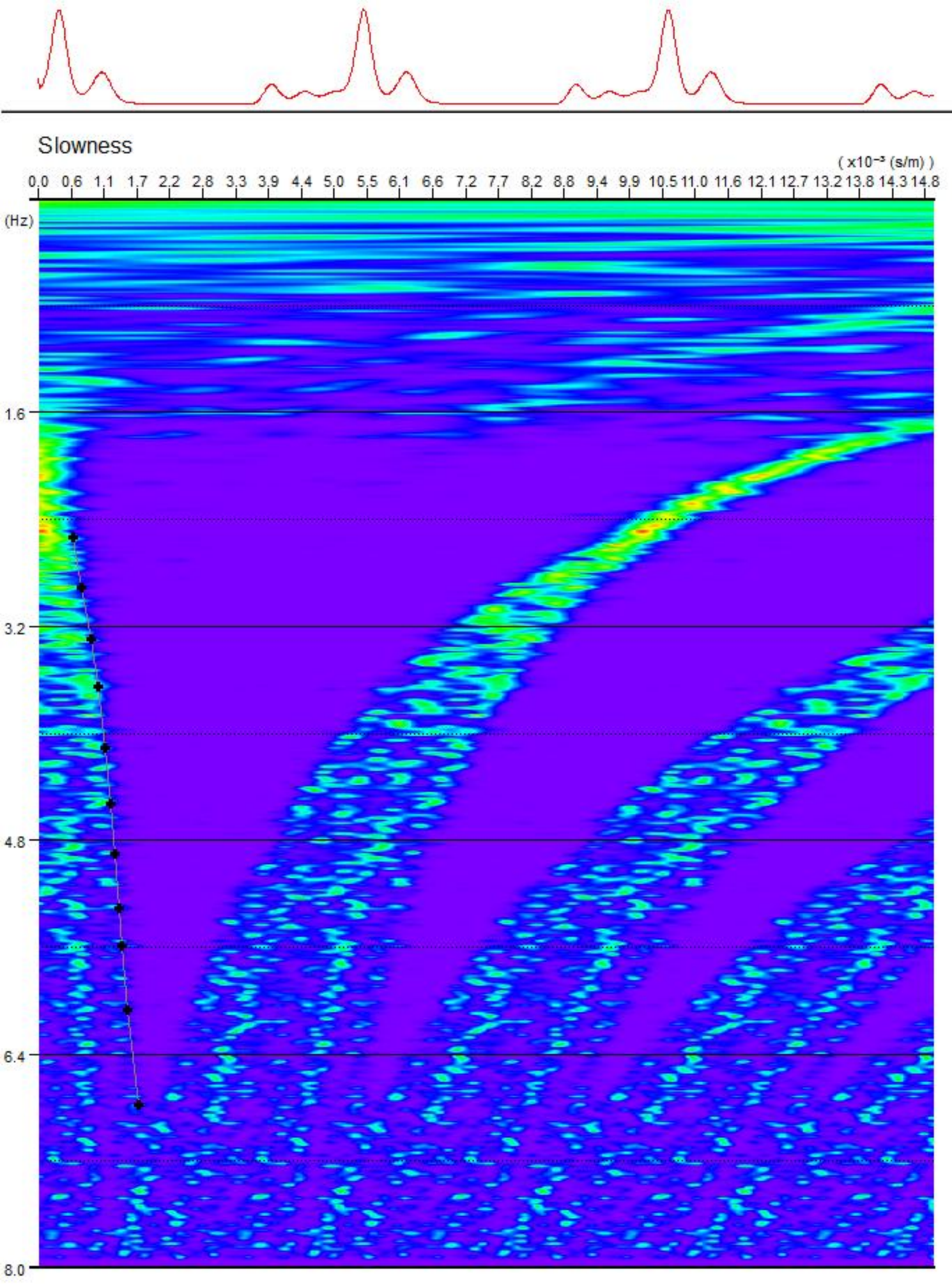
GEODATOS
Geofísica de Avanzada

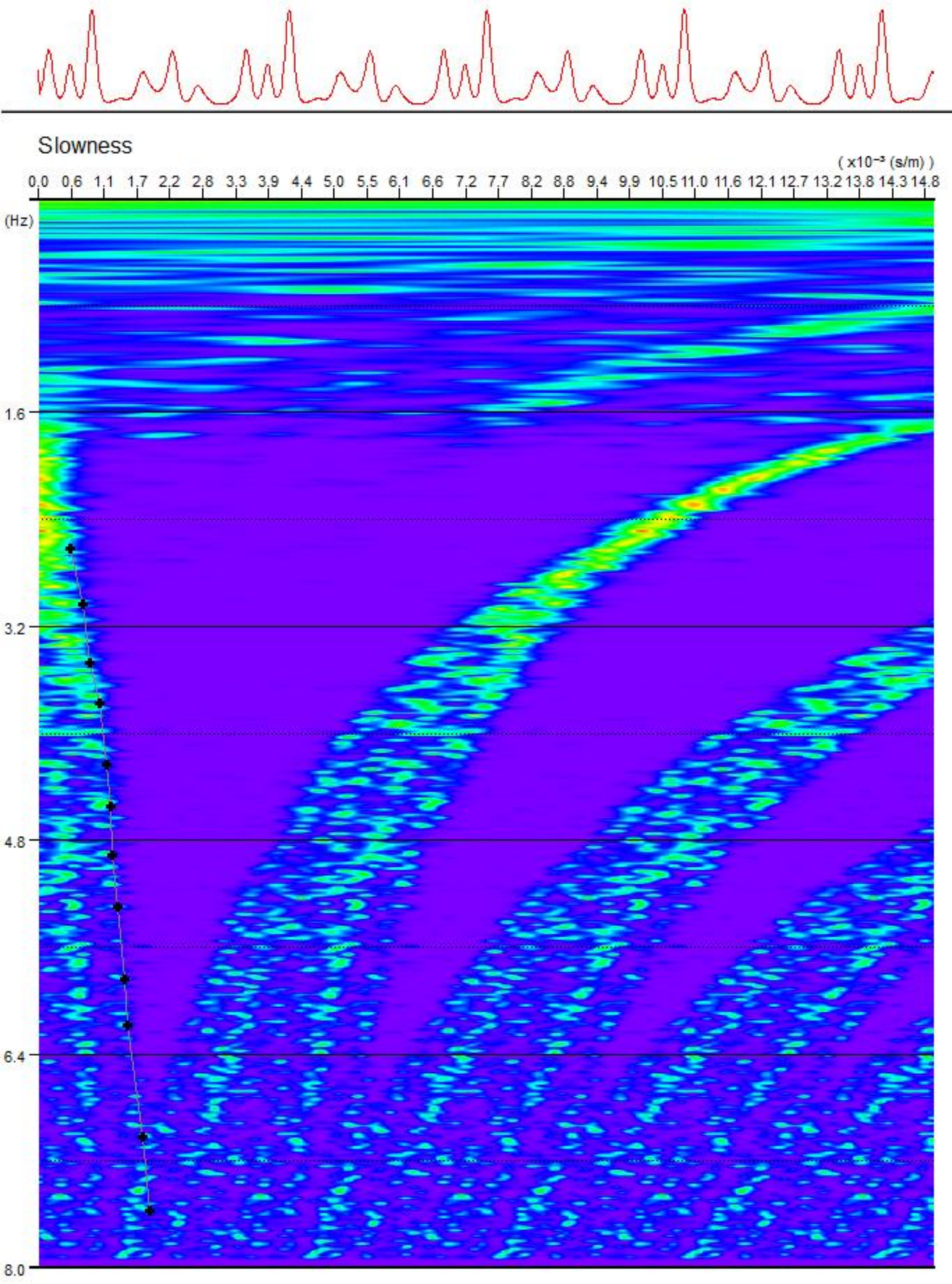
ANEXOS

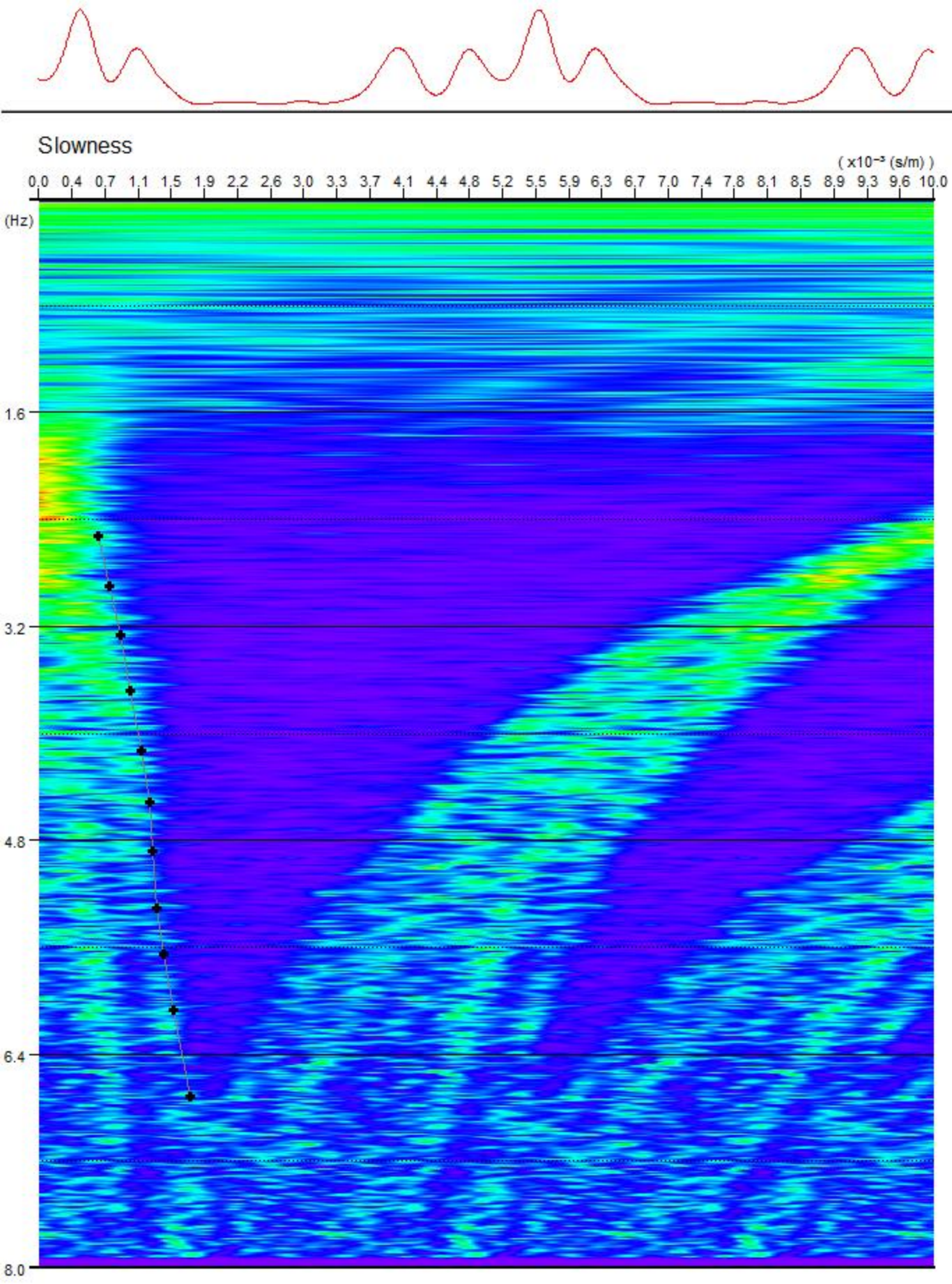
LINEA 2 MASW

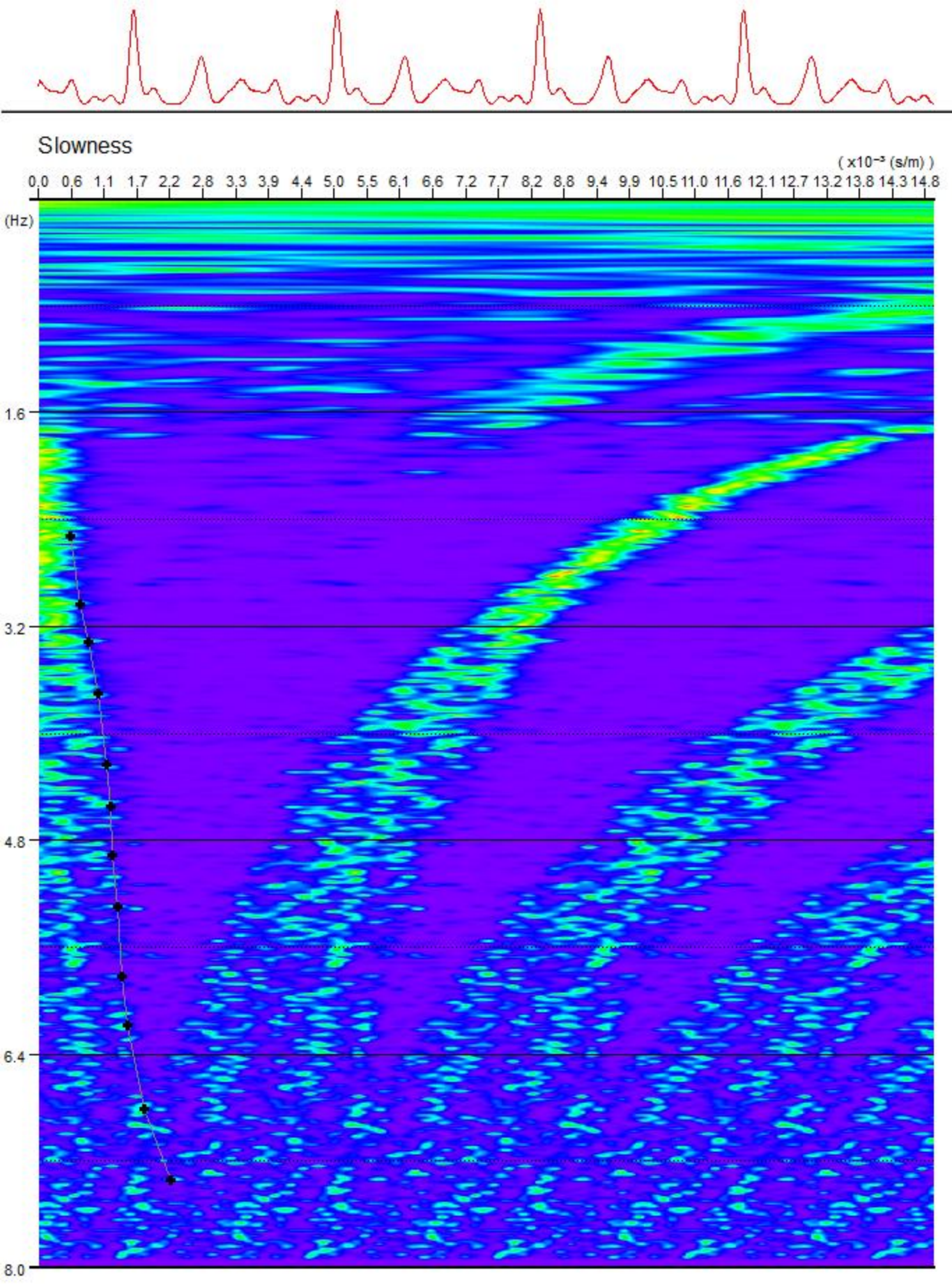
Modelos Dispersión

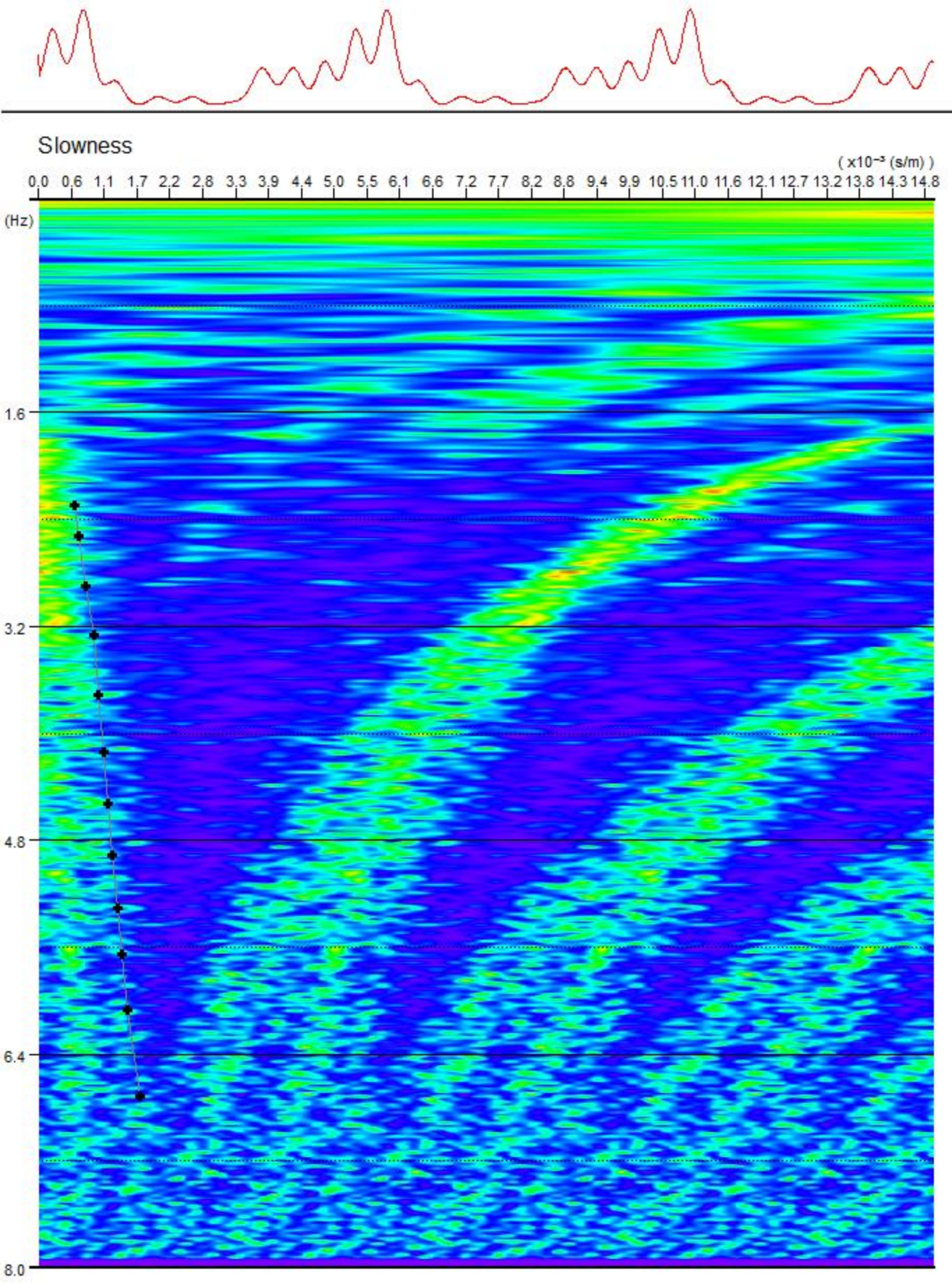

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

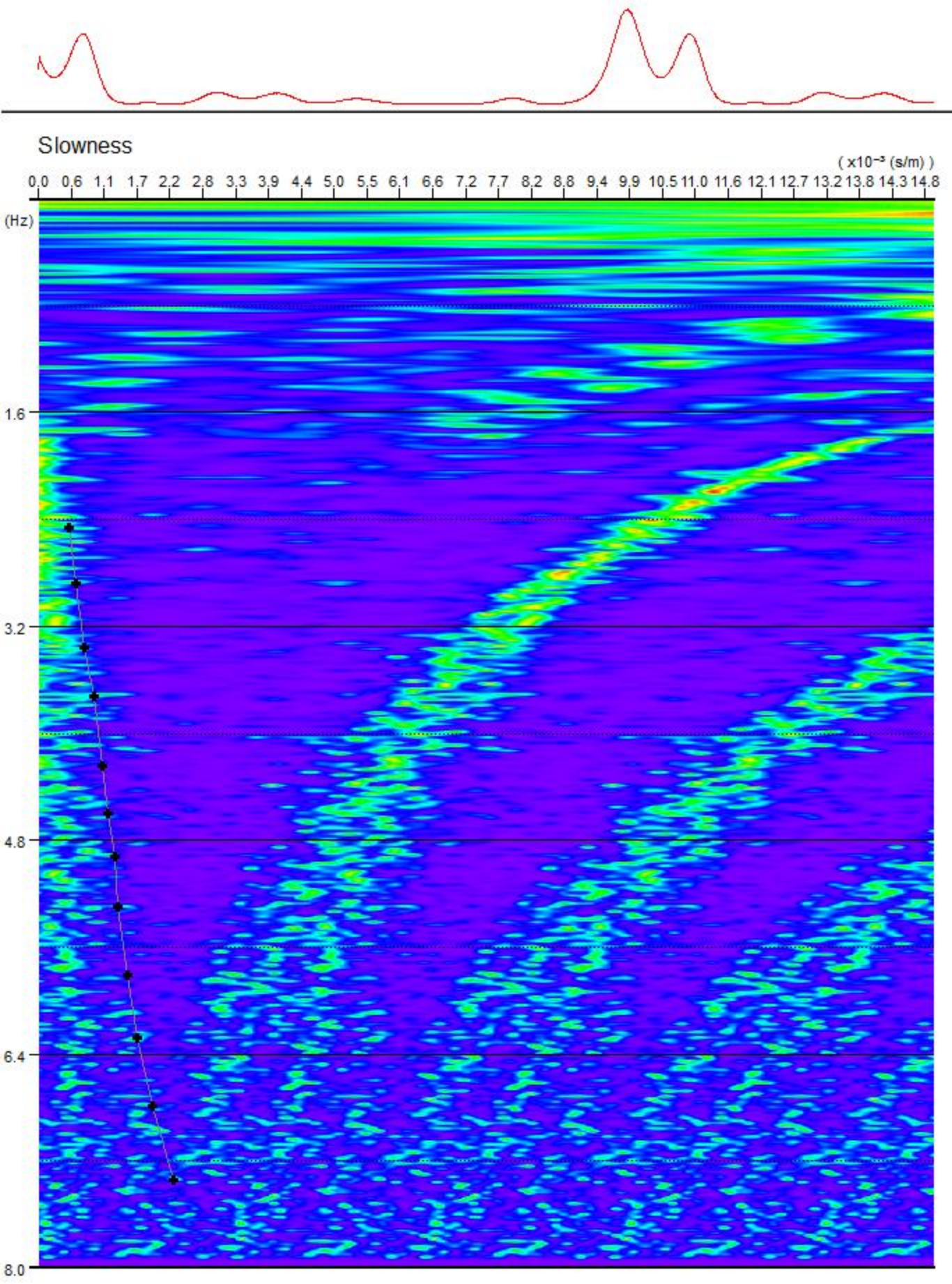

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

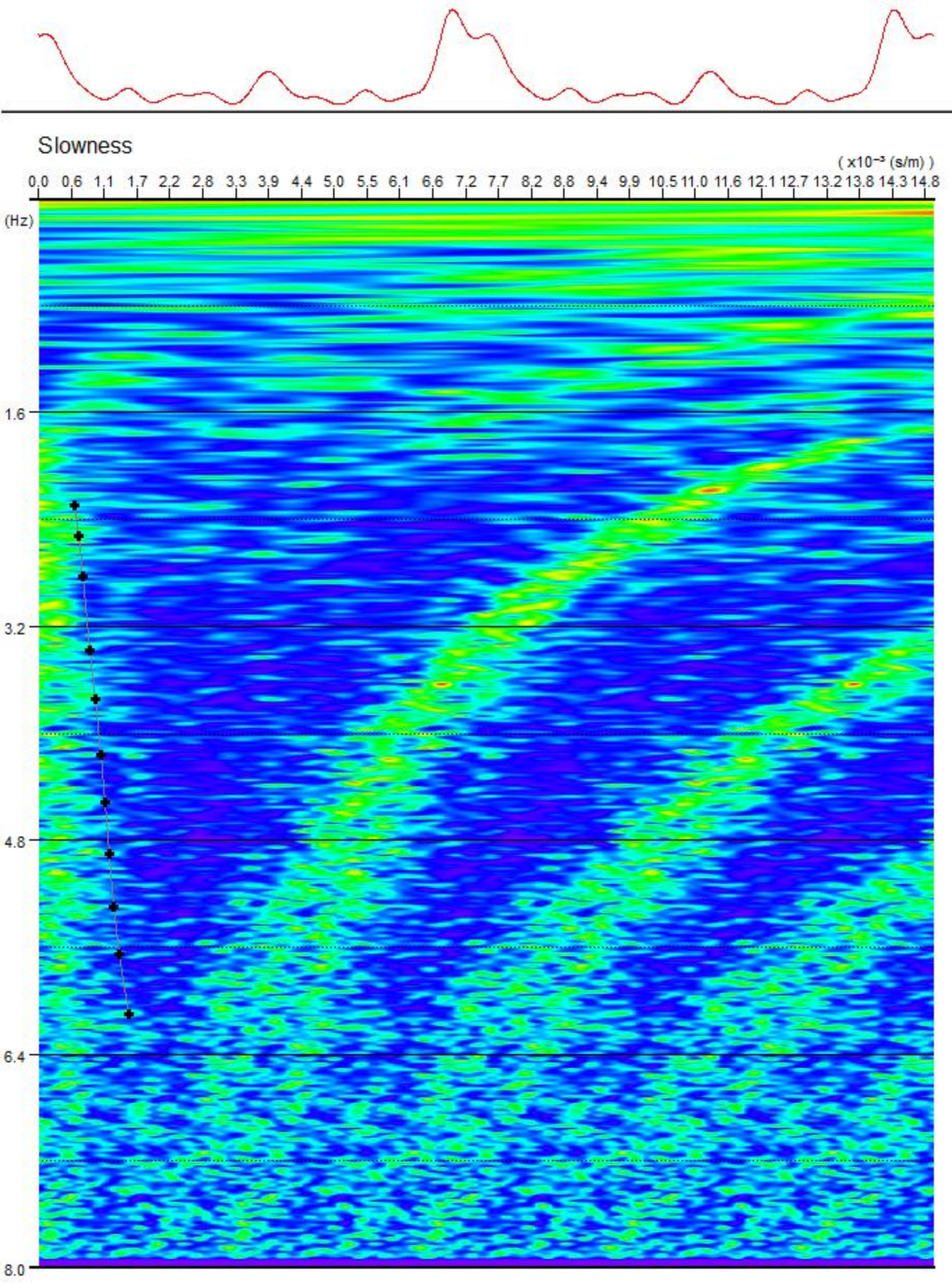

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

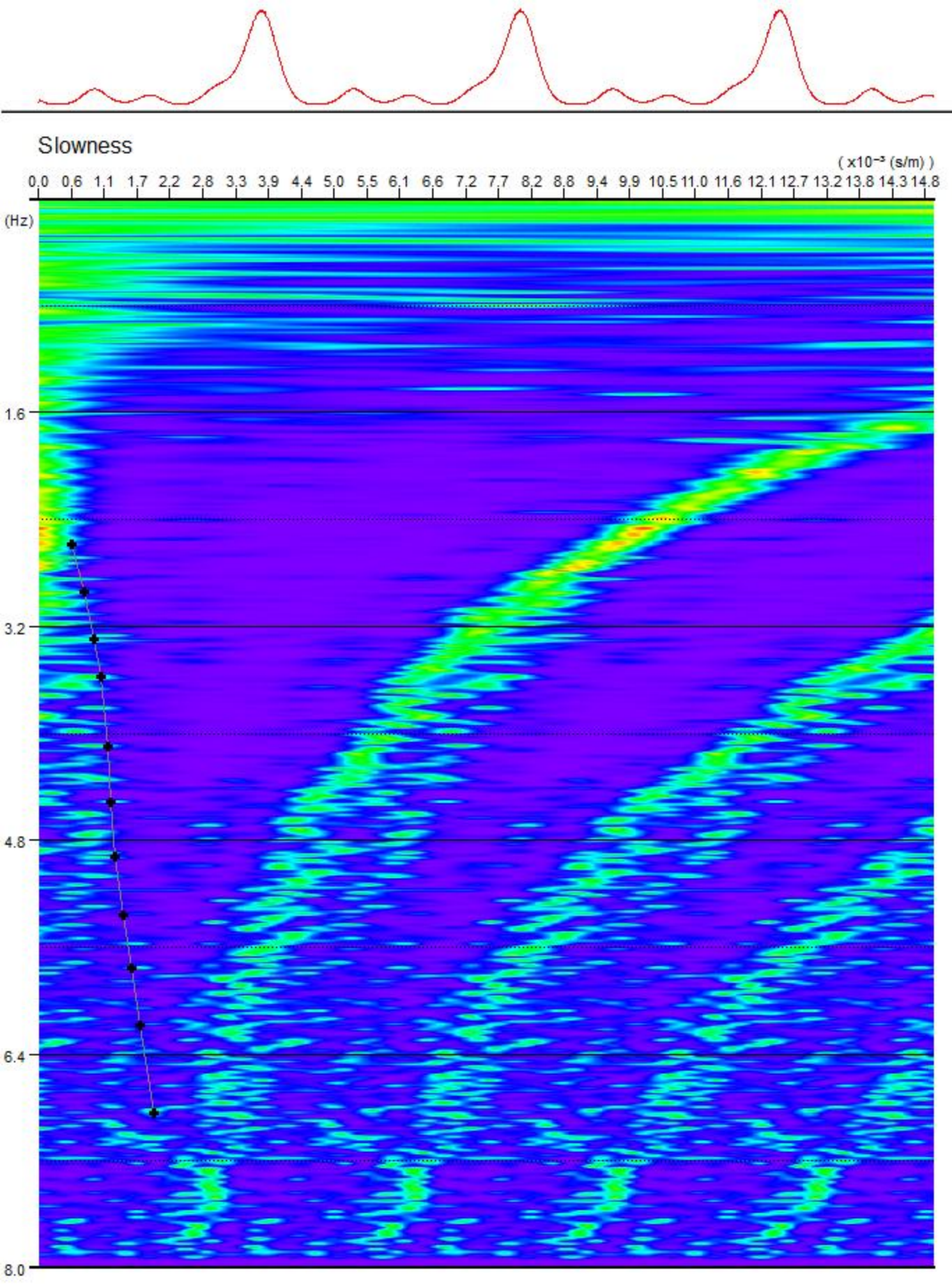

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.4 0.7 1.1 1.5 1.9 2.2 2.6 3.0 3.3 3.7 4.1 4.4 4.8 5.2 5.5 5.9 6.3 6.7 7.0 7.4 7.8 8.1 8.5 8.9 9.3 9.6 10.0
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

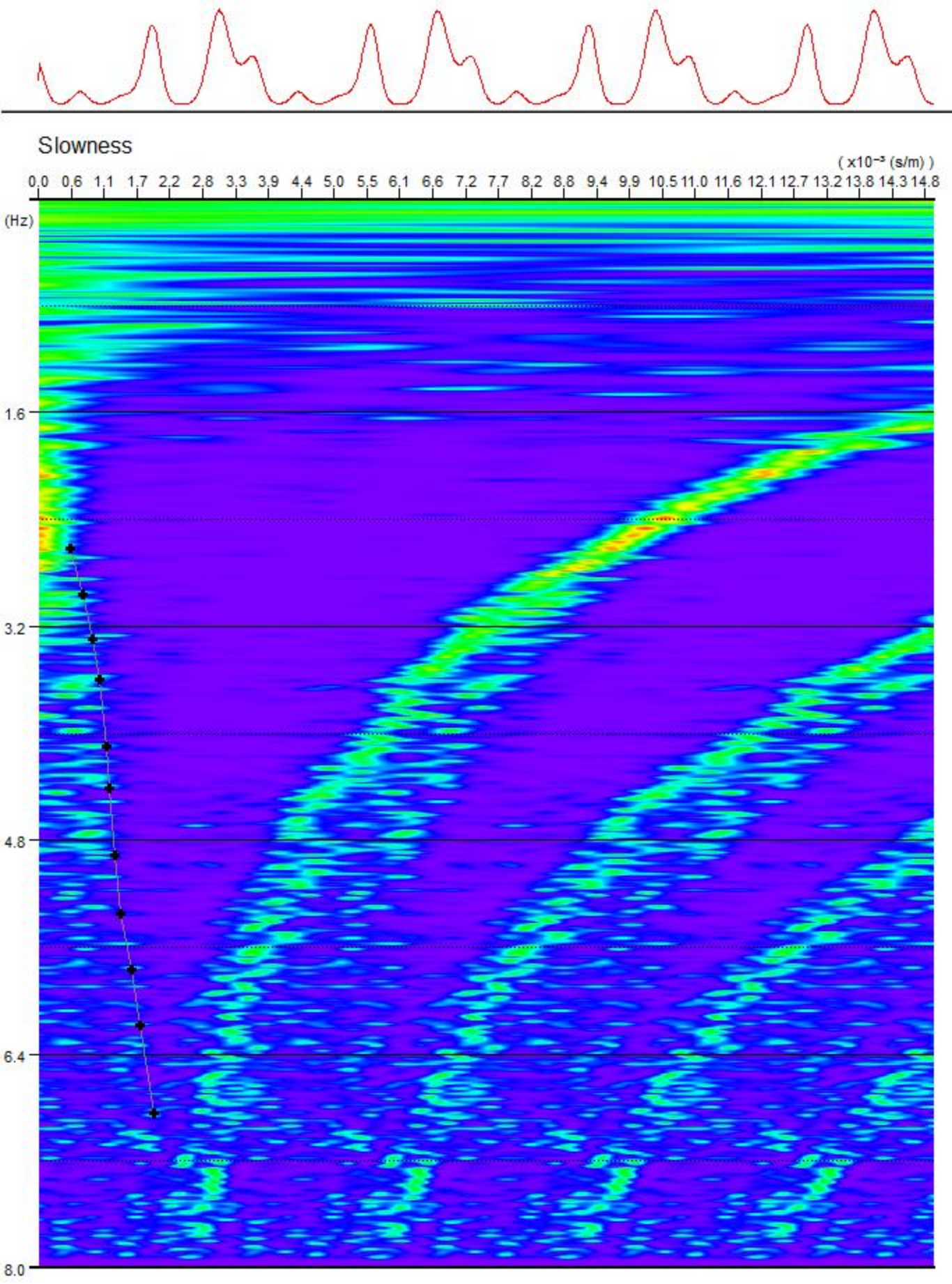

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

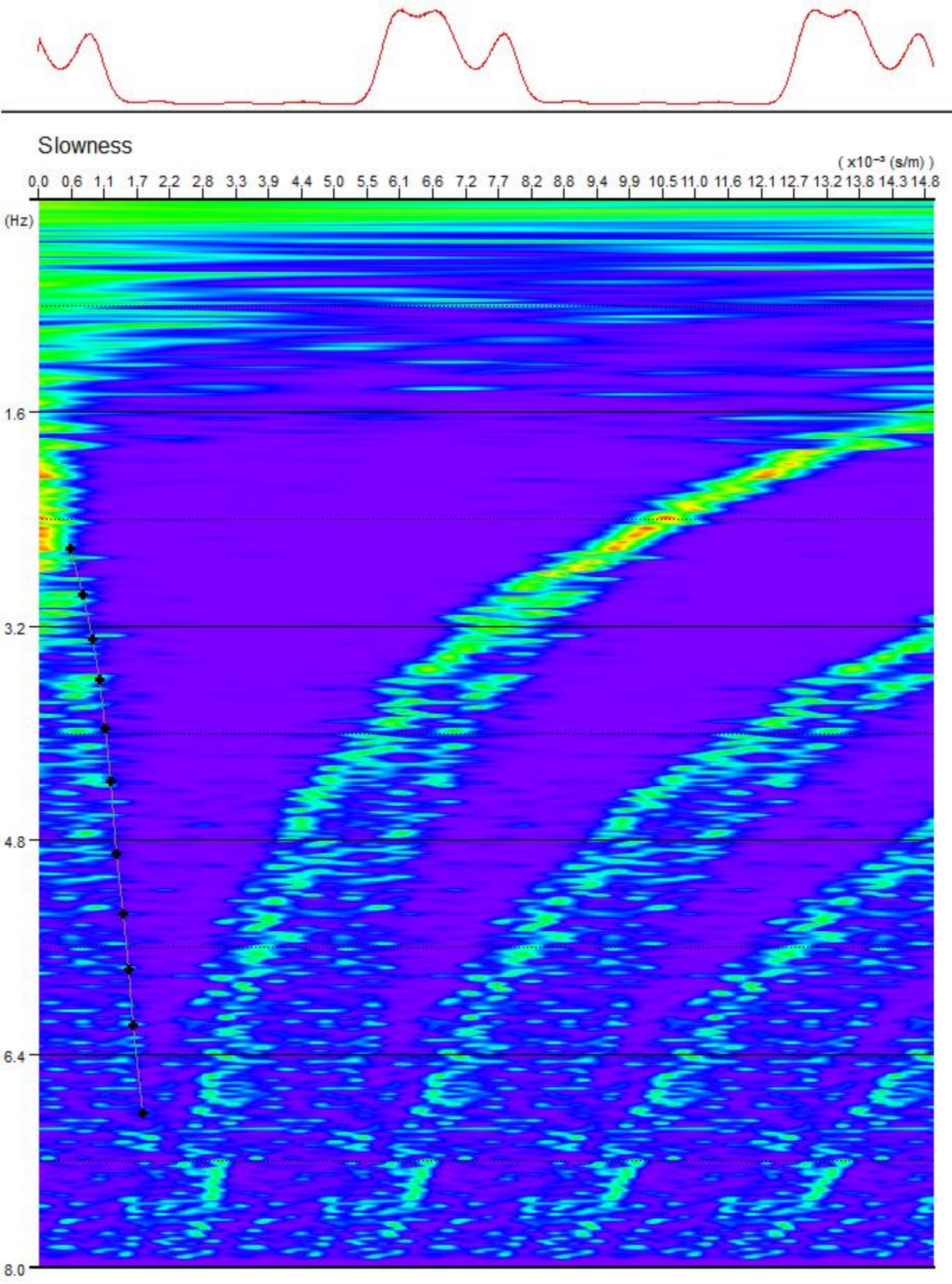

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

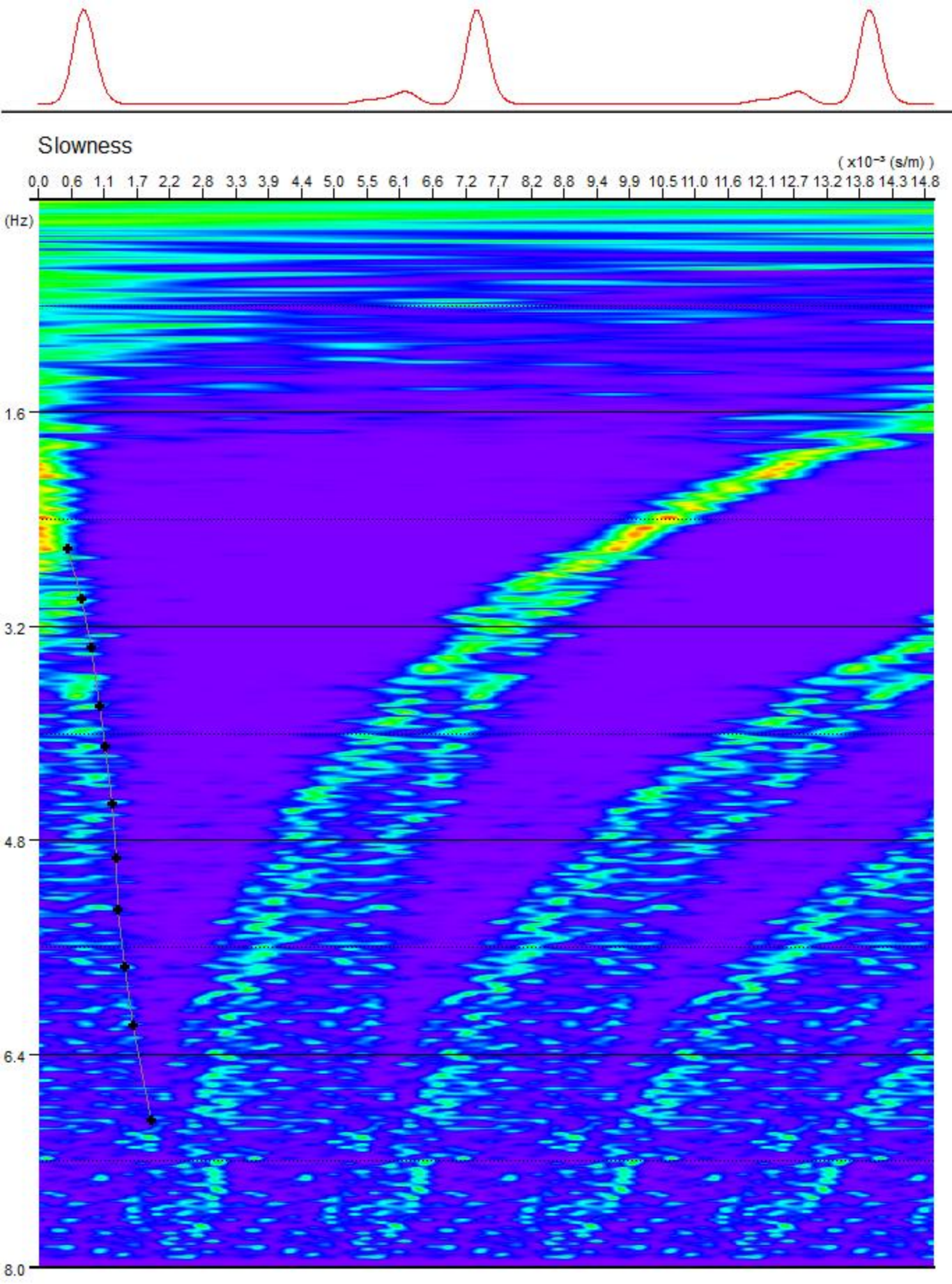

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

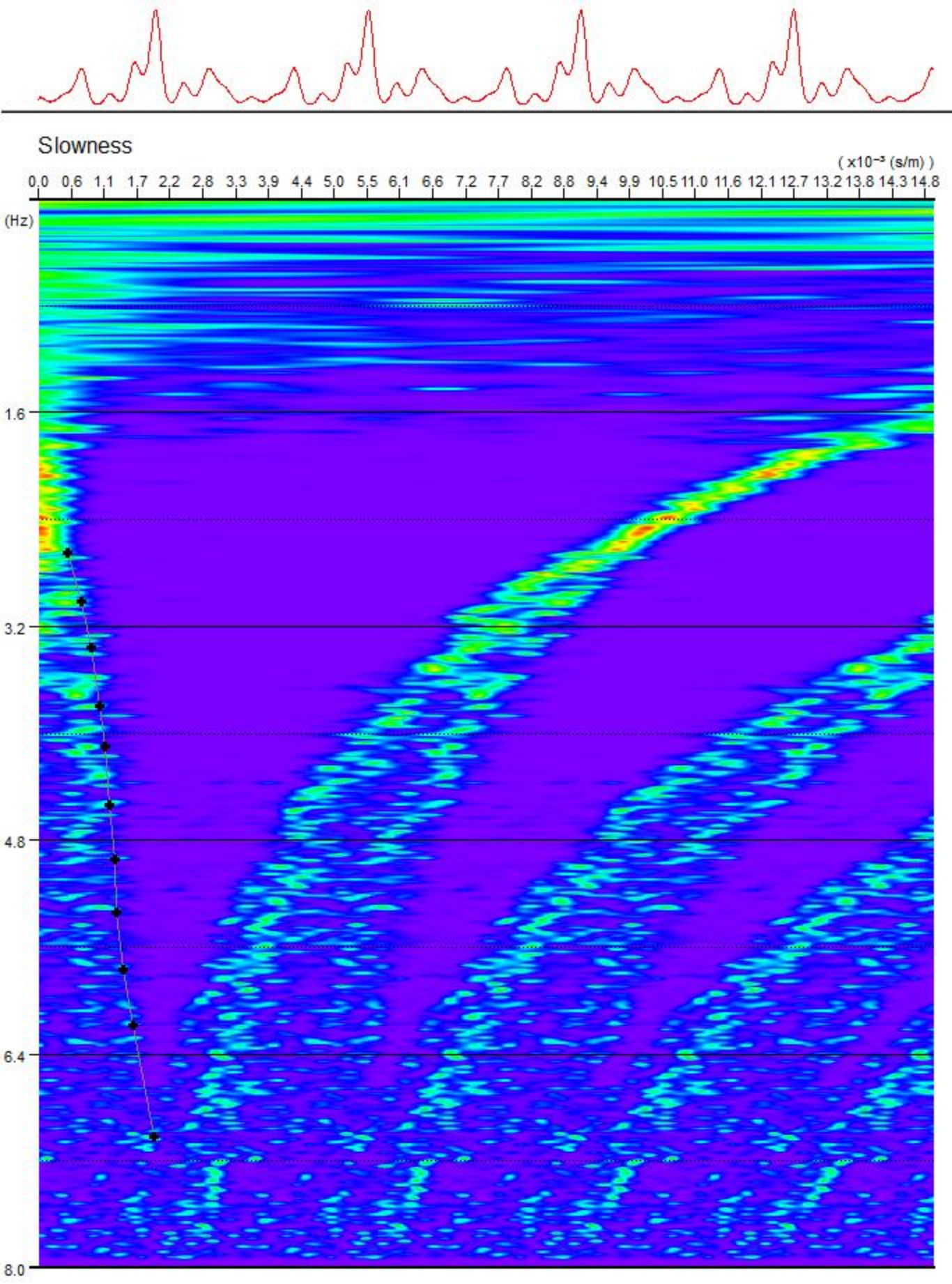

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

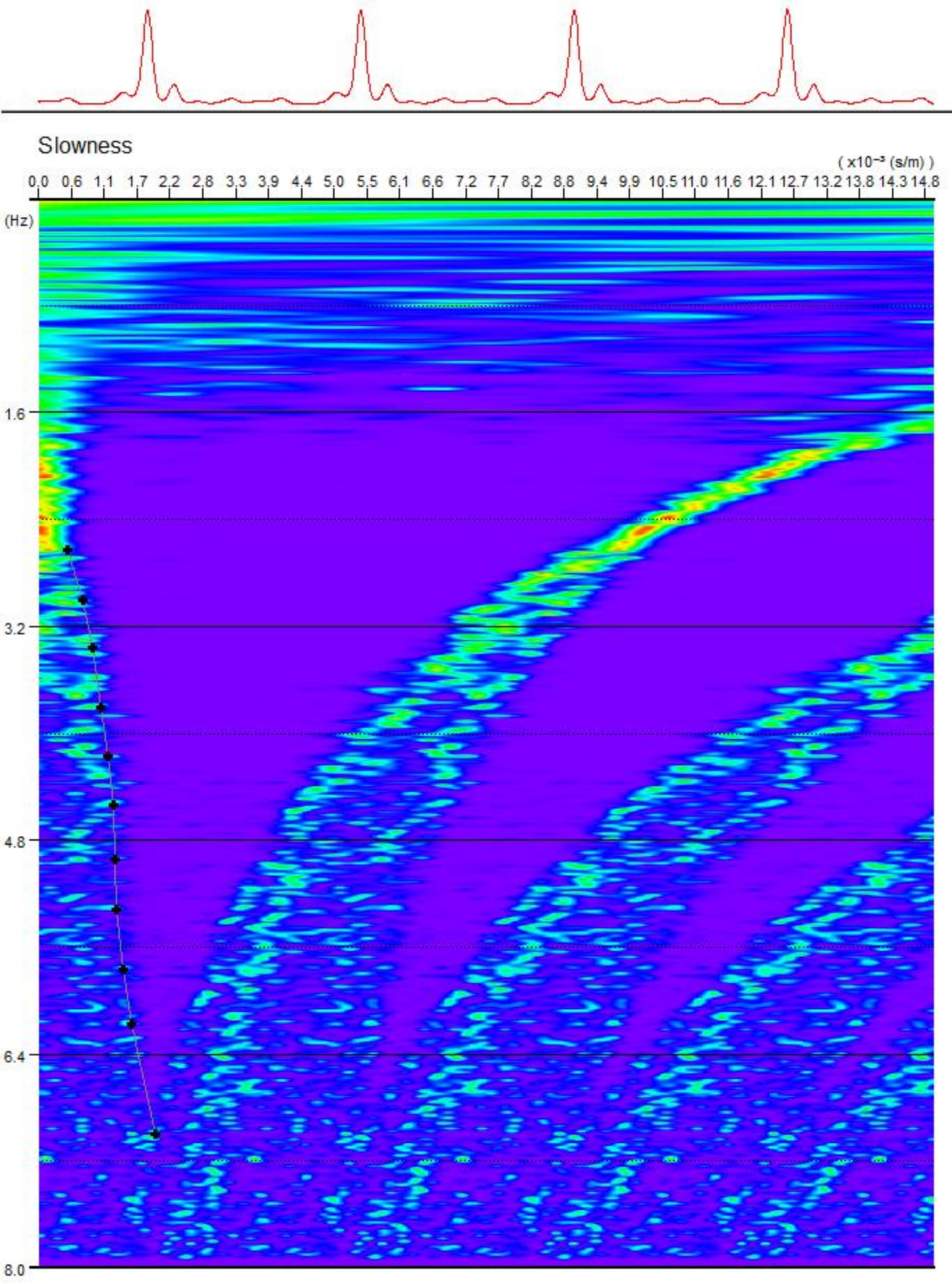

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

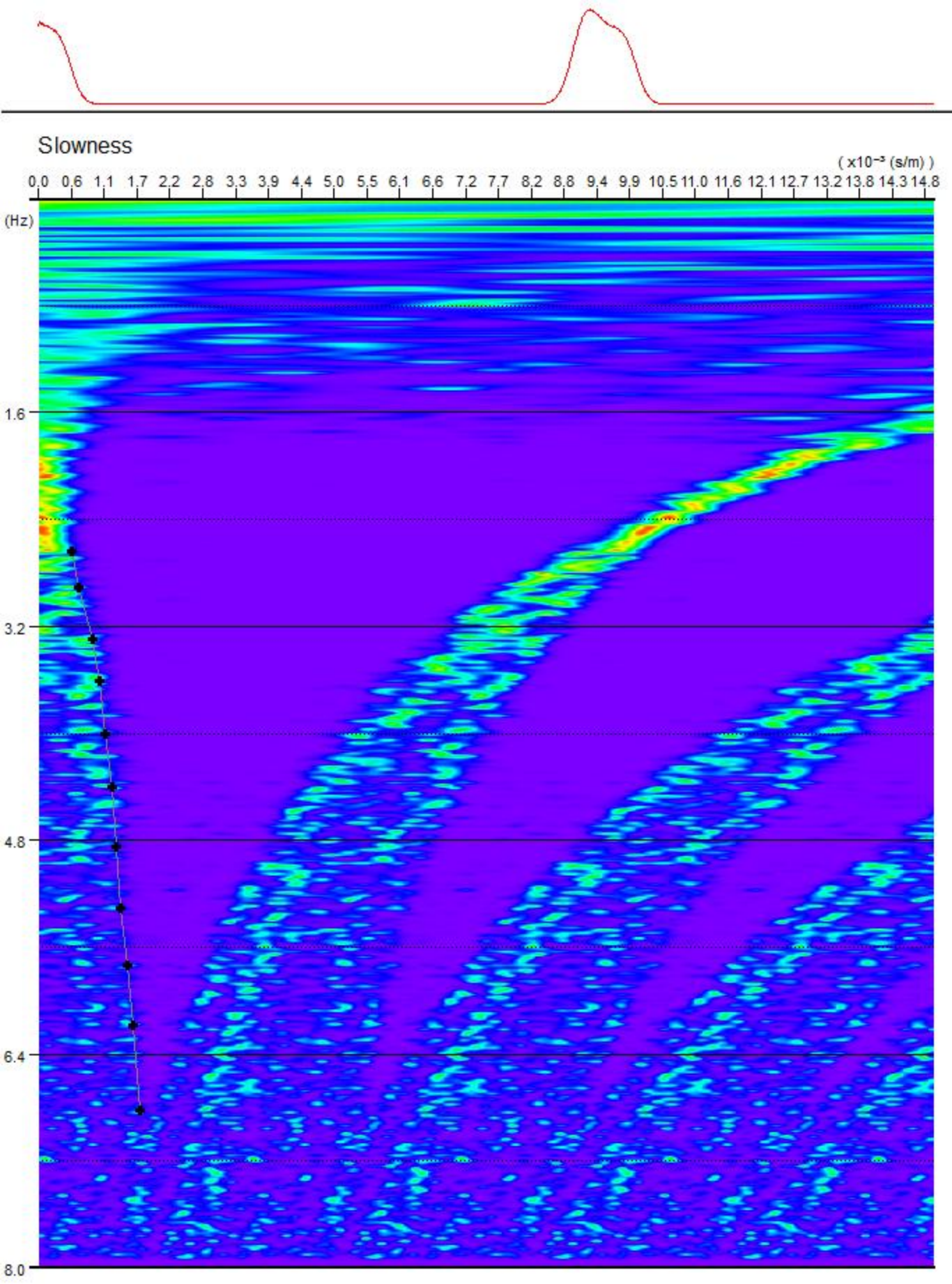

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

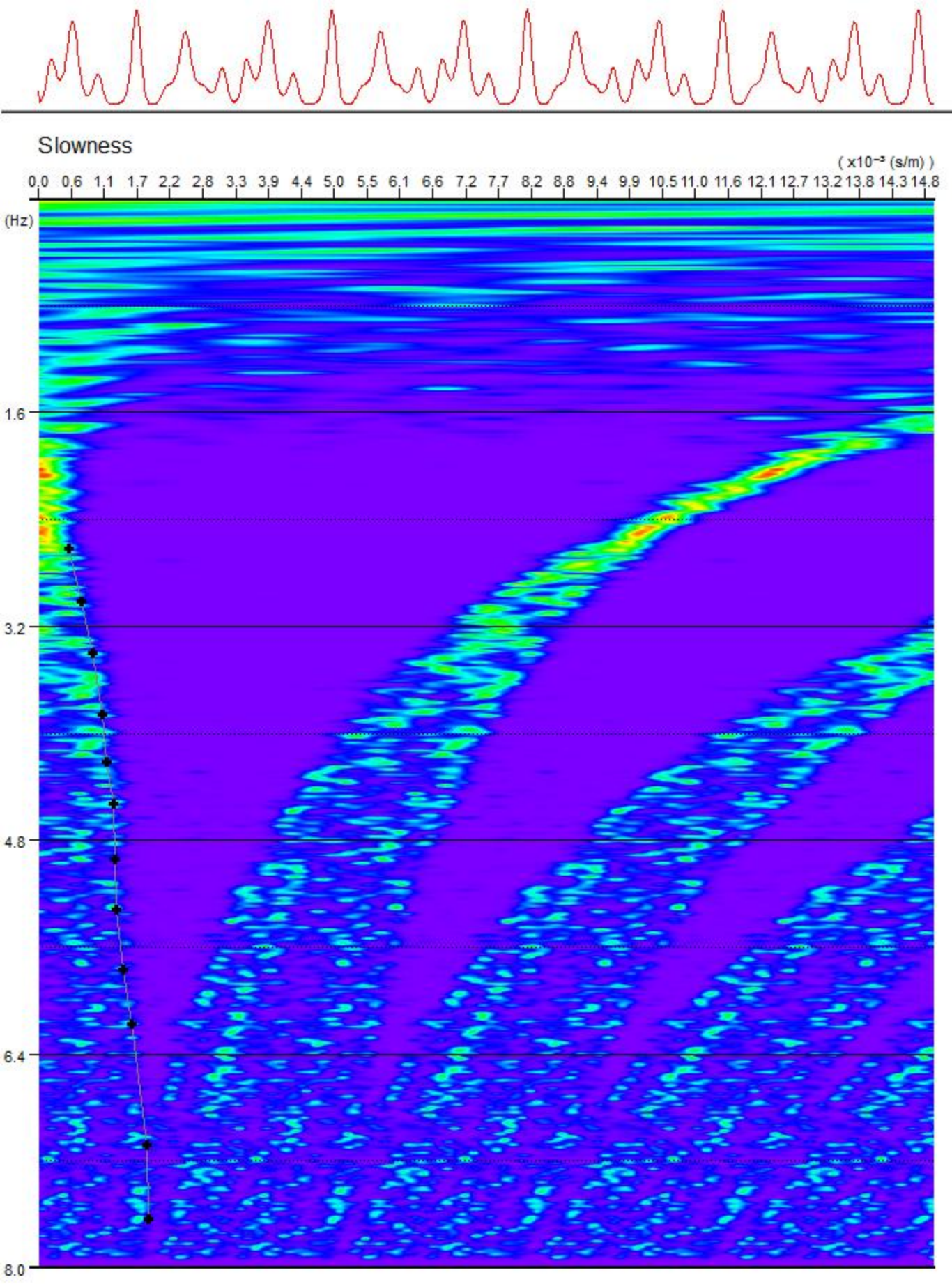

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

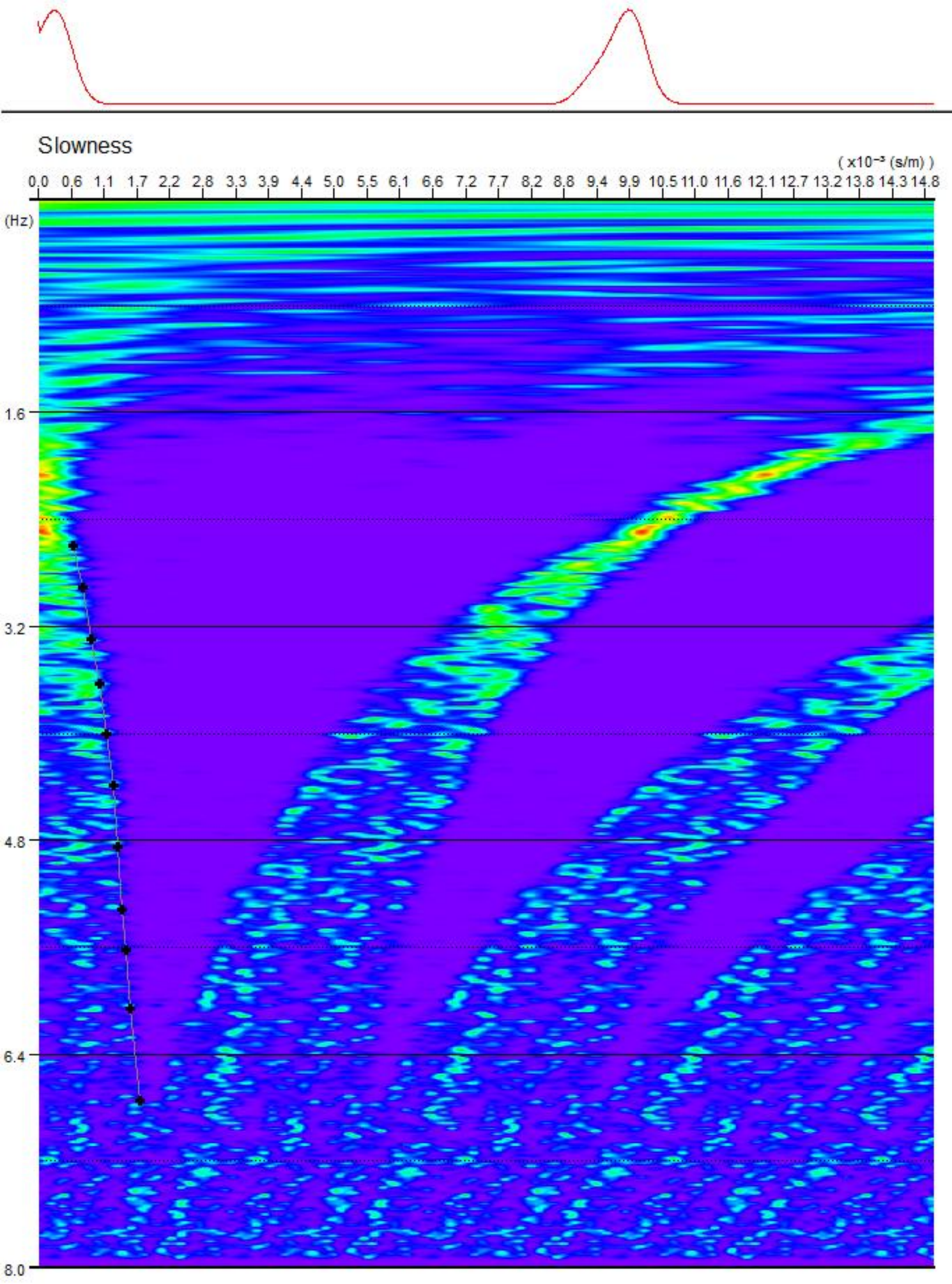

Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0


Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0


Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0


Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0


Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0


Slowness
(x10⁻³ (s/m))
0.0 0.6 1.1 1.7 2.2 2.8 3.3 3.9 4.4 5.0 5.5 6.1 6.6 7.2 7.7 8.2 8.8 9.4 9.9 10.5 11.0 11.6 12.1 12.7 13.2 13.8 14.3 14.8
(Hz)
1.6
3.2
4.8
6.4
8.0

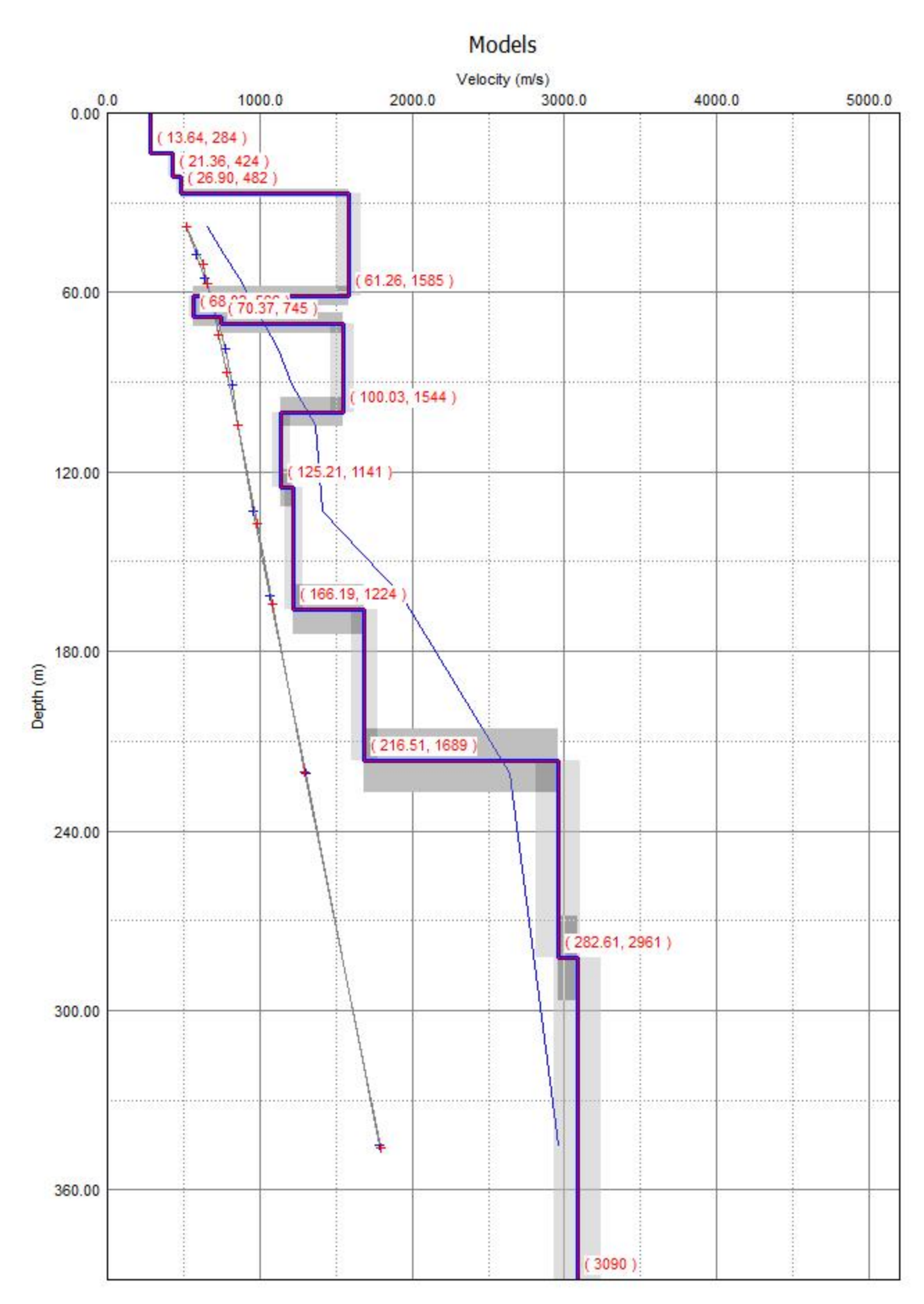
CHILE/CASA MATRIZ
Roman Díaz 773, Providencia
Tel.: (56-2) 840 7200, Fax: (56-2) 235 5512
Cod. Postal: 6640942, Santiago

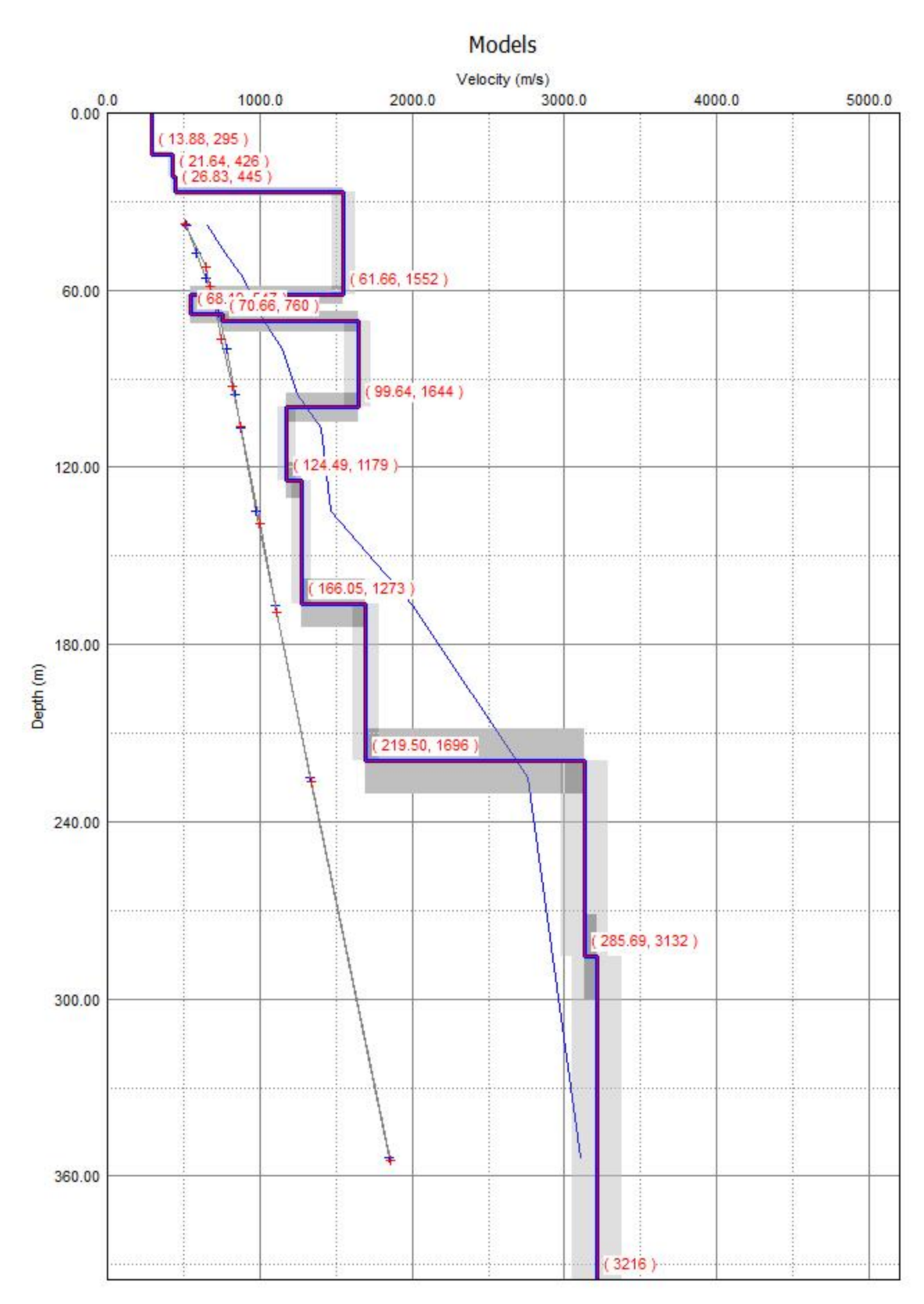
GEODATOS
Geofísica de Avanzada

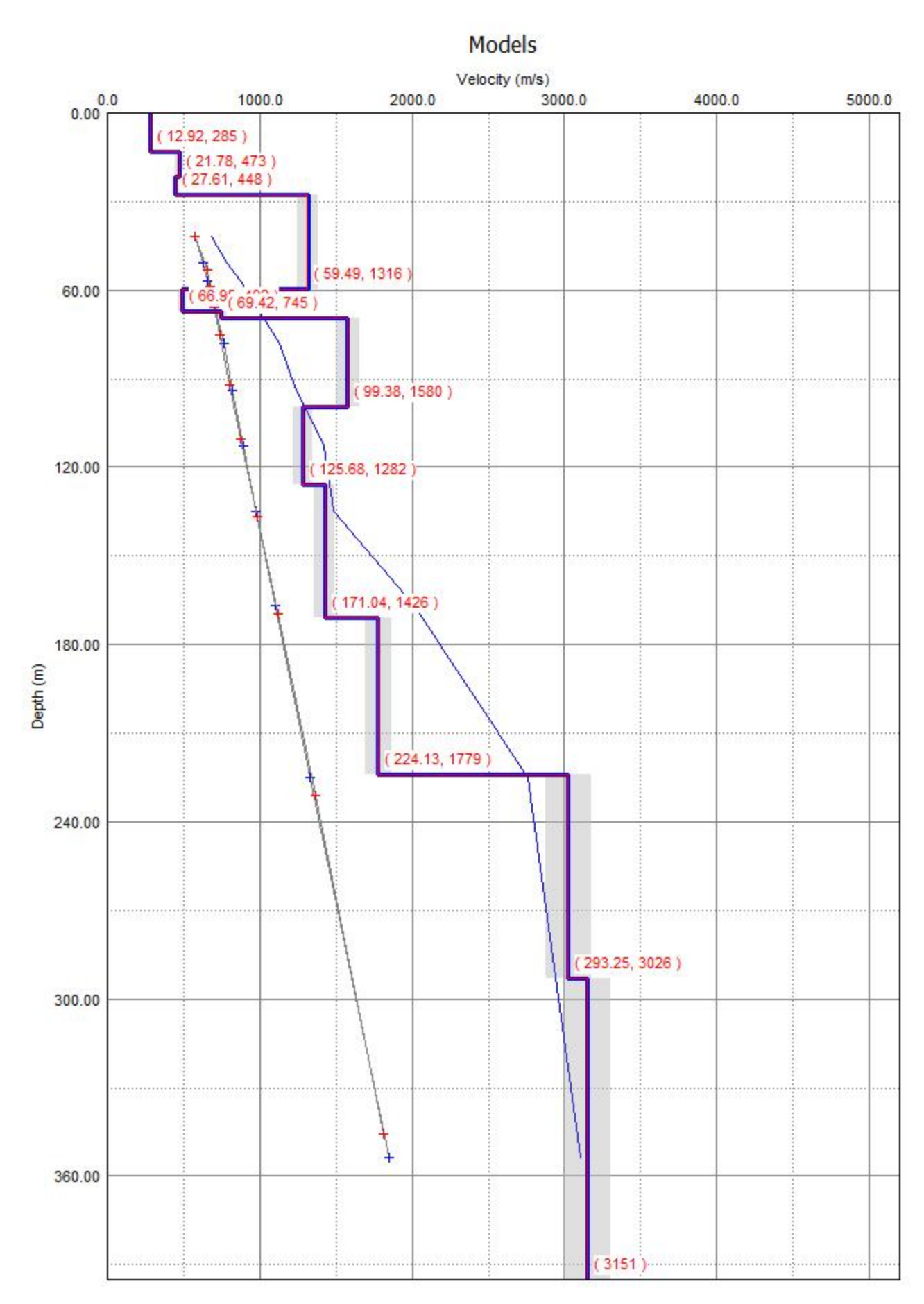
ANEXOS

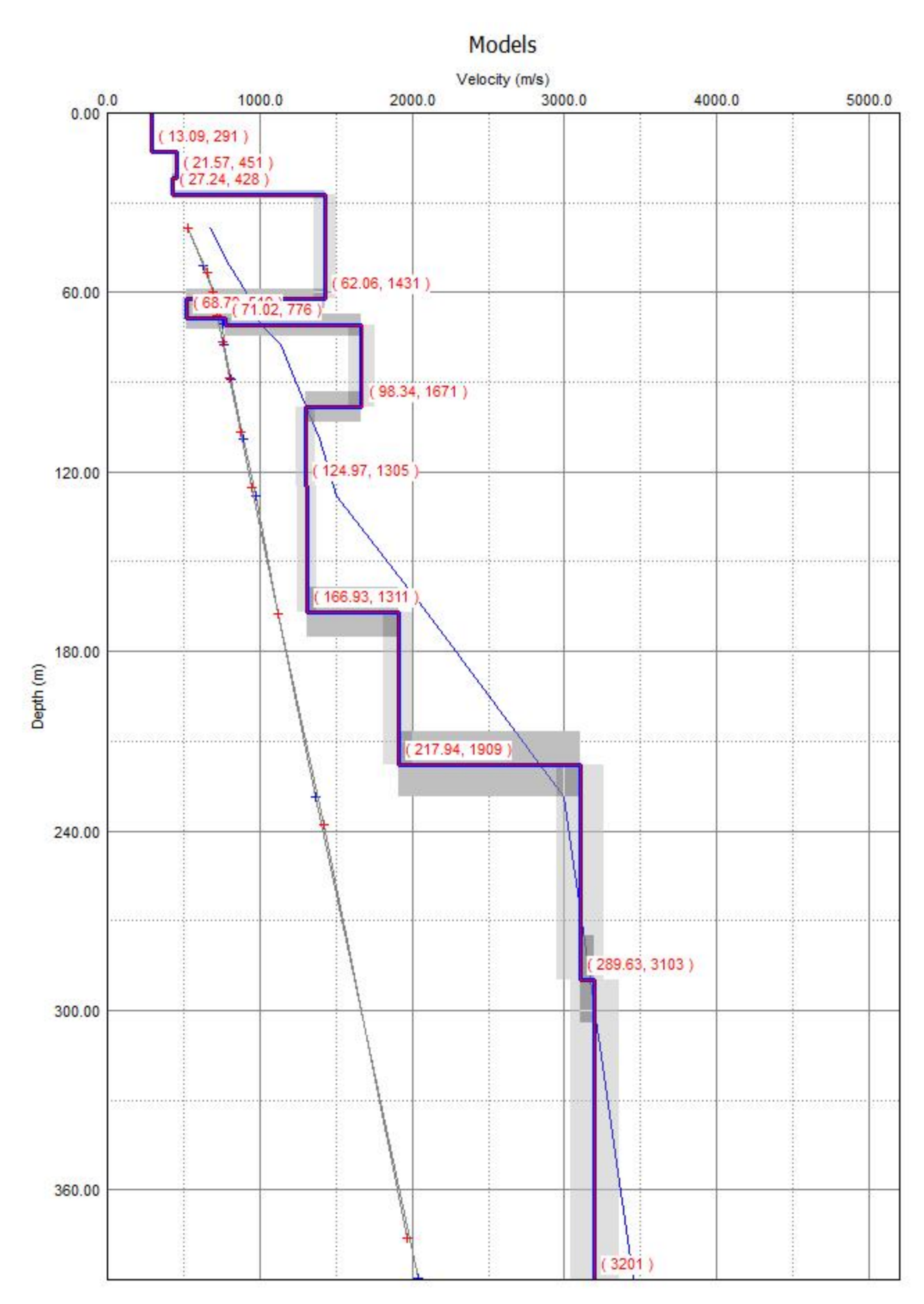
LINEA 2 MASW

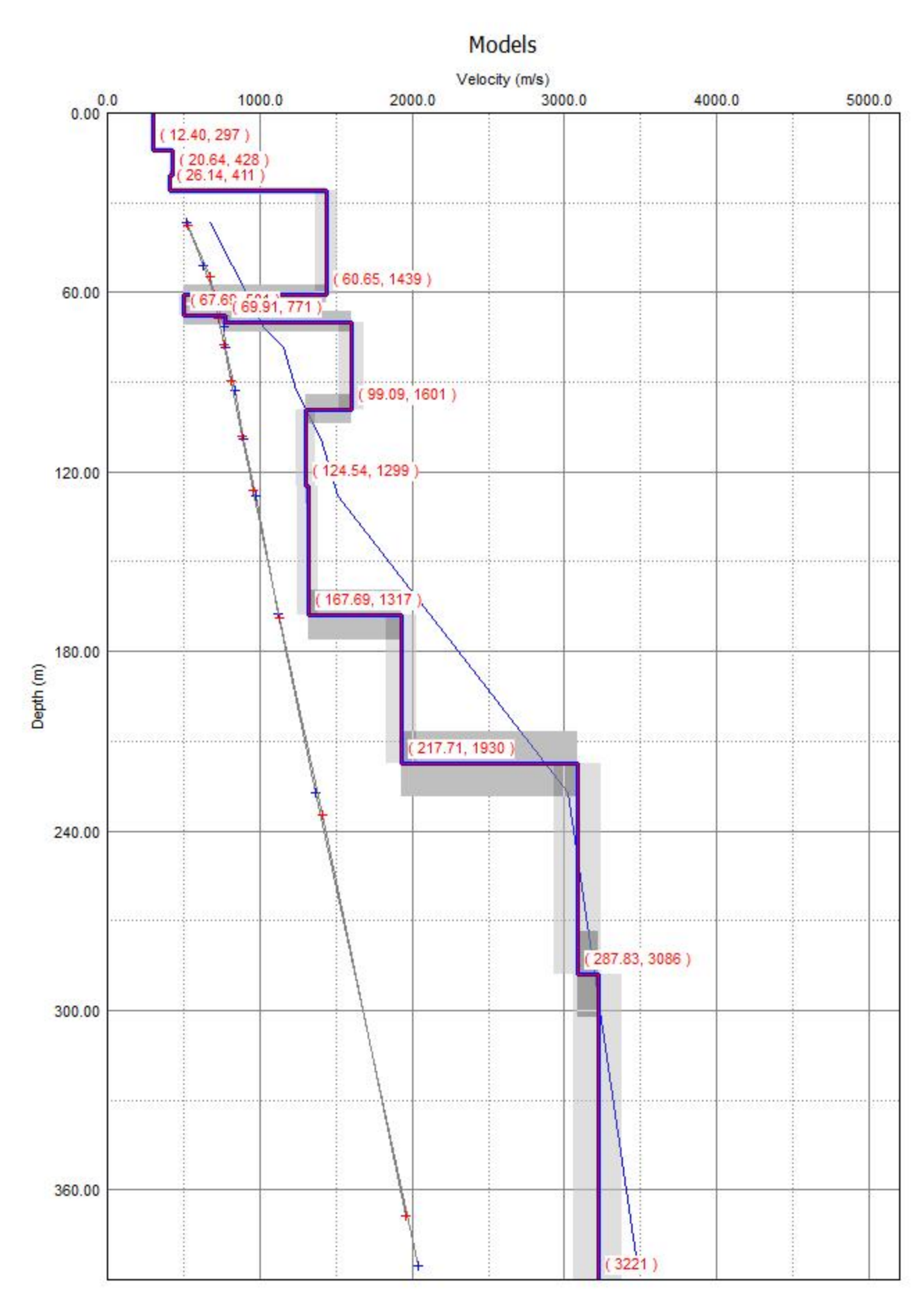
Modelos 1D VS

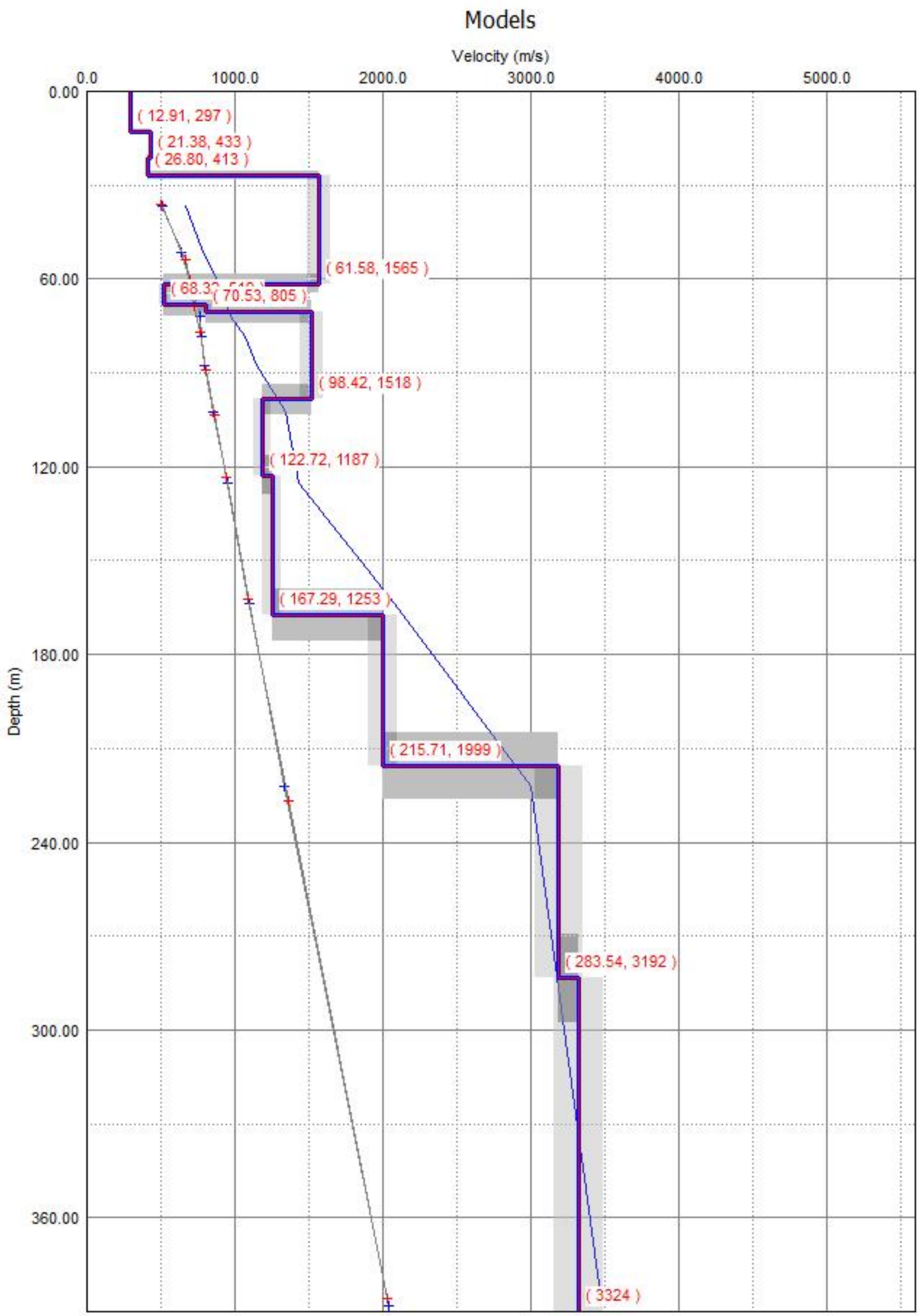

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(13.64, 284)
(21.36, 424)
(26.90, 482)
(61.26, 1585)
(70.37, 745)
(100.03, 1544)
(125.21, 1141)
(166.19, 1224)
(216.51, 1689)
(282.61, 2961)
(3090)

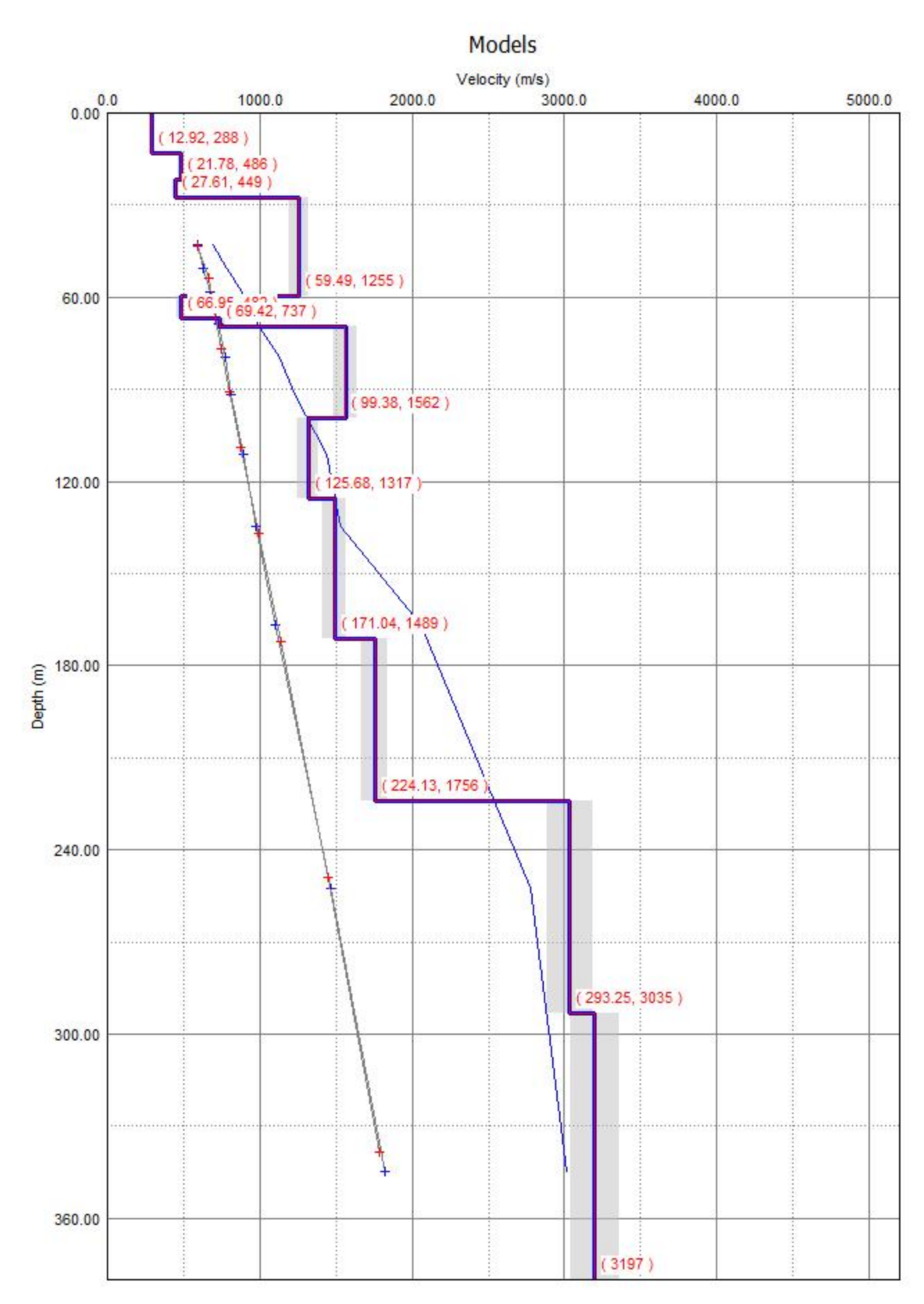

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(13.88, 295)
(21.64, 426)
(26.83, 445)
(61.66, 1552)
(70.66, 760)
(99.64, 1644)
(124.49, 1179)
(166.05, 1273)
(219.50, 1696)
(285.69, 3132)
(3216)

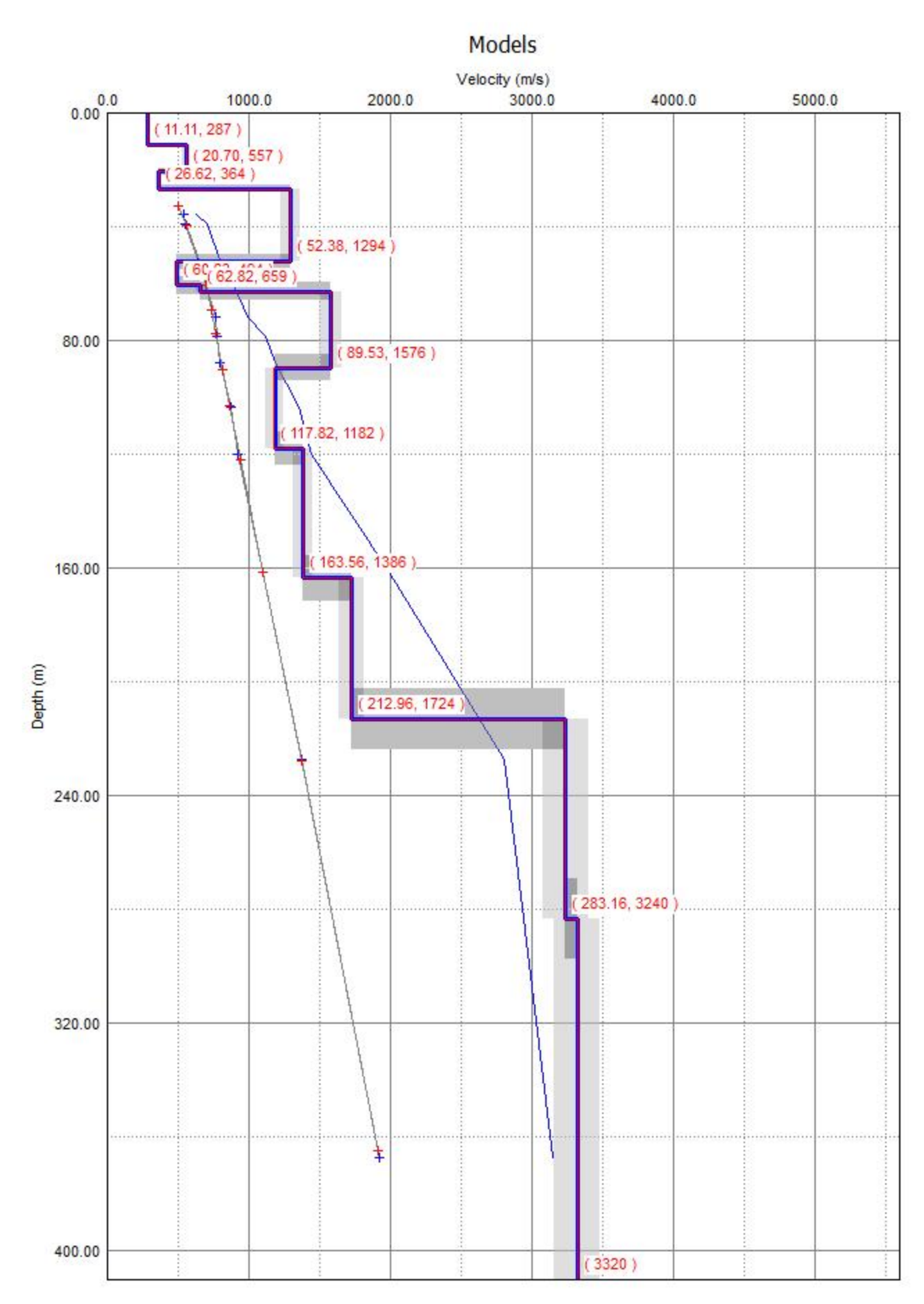

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(12.92, 285)
(21.78, 473)
(27.61, 448)
(59.49, 1316)
(69.42, 745)
(99.38, 1580)
(125.68, 1282)
(171.04, 1426)
(224.13, 1779)
(293.25, 3026)
(3151)

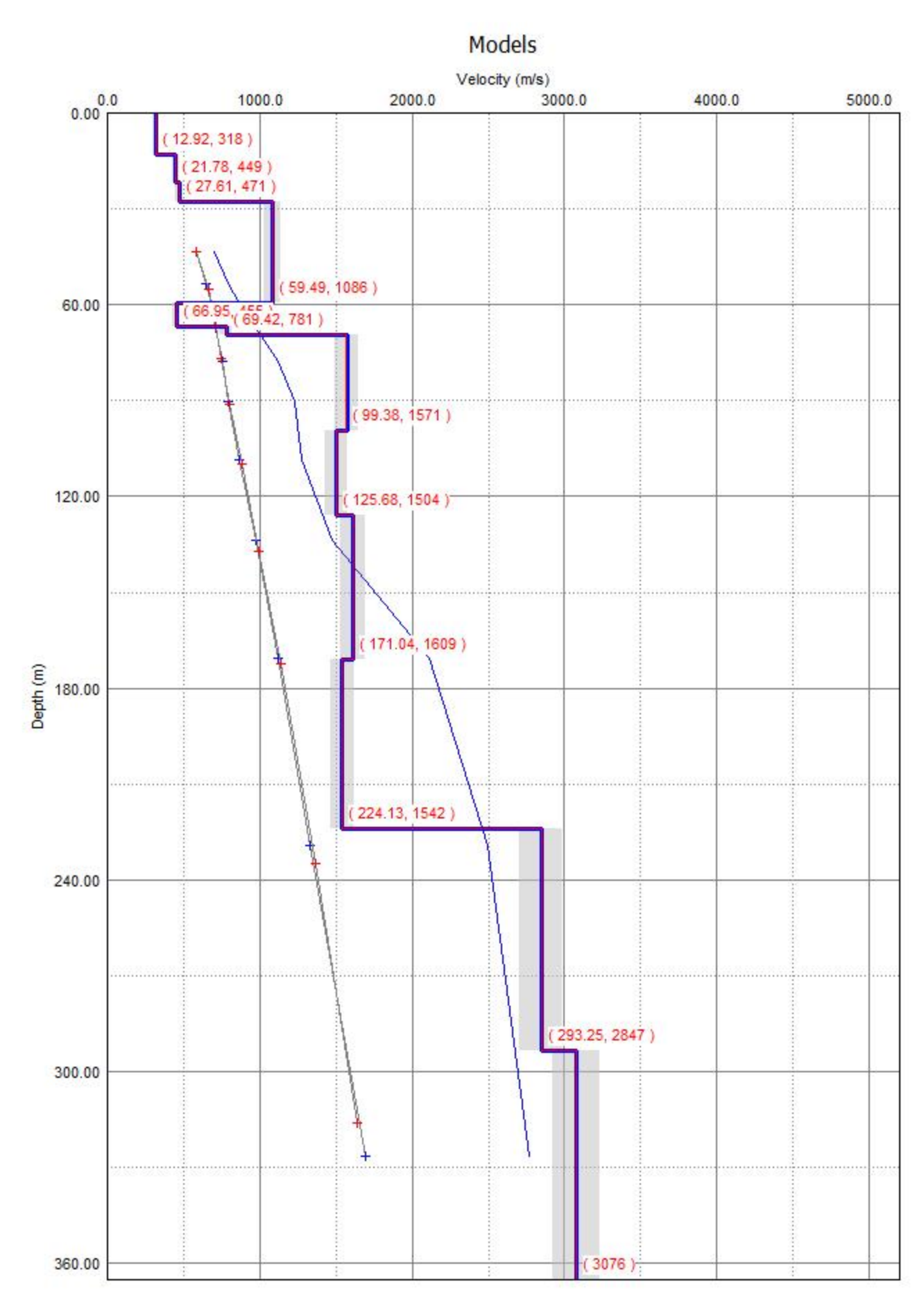

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(13.09, 291)
(21.57, 451)
(27.24, 428)
(62.06, 1431)
(71.02, 776)
(98.34, 1671)
(124.97, 1305)
(166.93, 1311)
(217.94, 1909)
(289.63, 3103)
(3201)

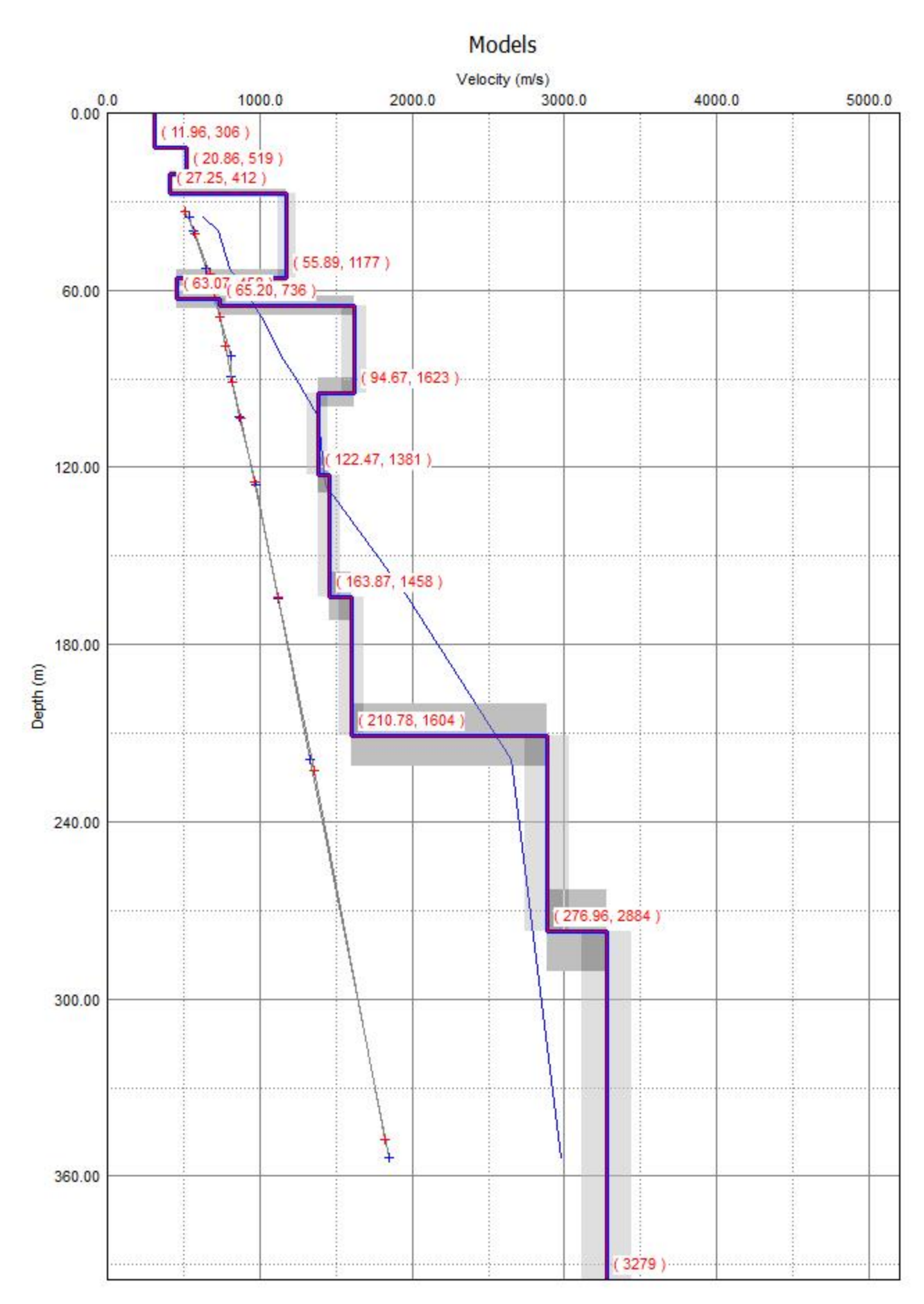

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(12.40, 297)
(20.64, 428)
(26.14, 411)
(60.65, 1439)
(69.91, 771)
(99.09, 1601)
(124.54, 1299)
(167.69, 1317)
(217.71, 1930)
(287.83, 3086)
(3221)

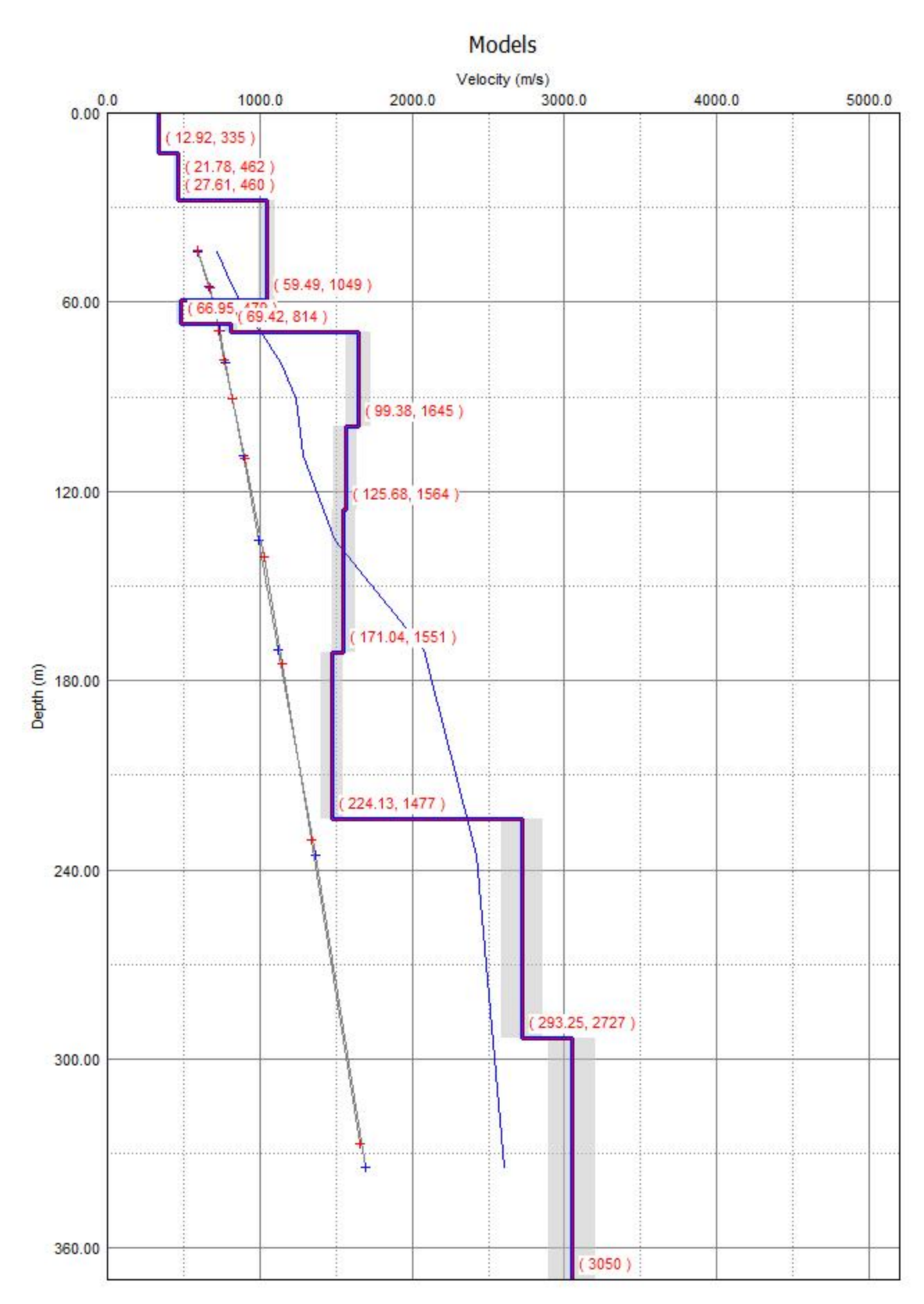

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(12.91, 297)
(21.38, 433)
(26.80, 413)
(61.58, 1565)
(70.53, 805)
(98.42, 1518)
(122.72, 1187)
(167.29, 1253)
(215.71, 1999)
(283.54, 3192)
(3324)

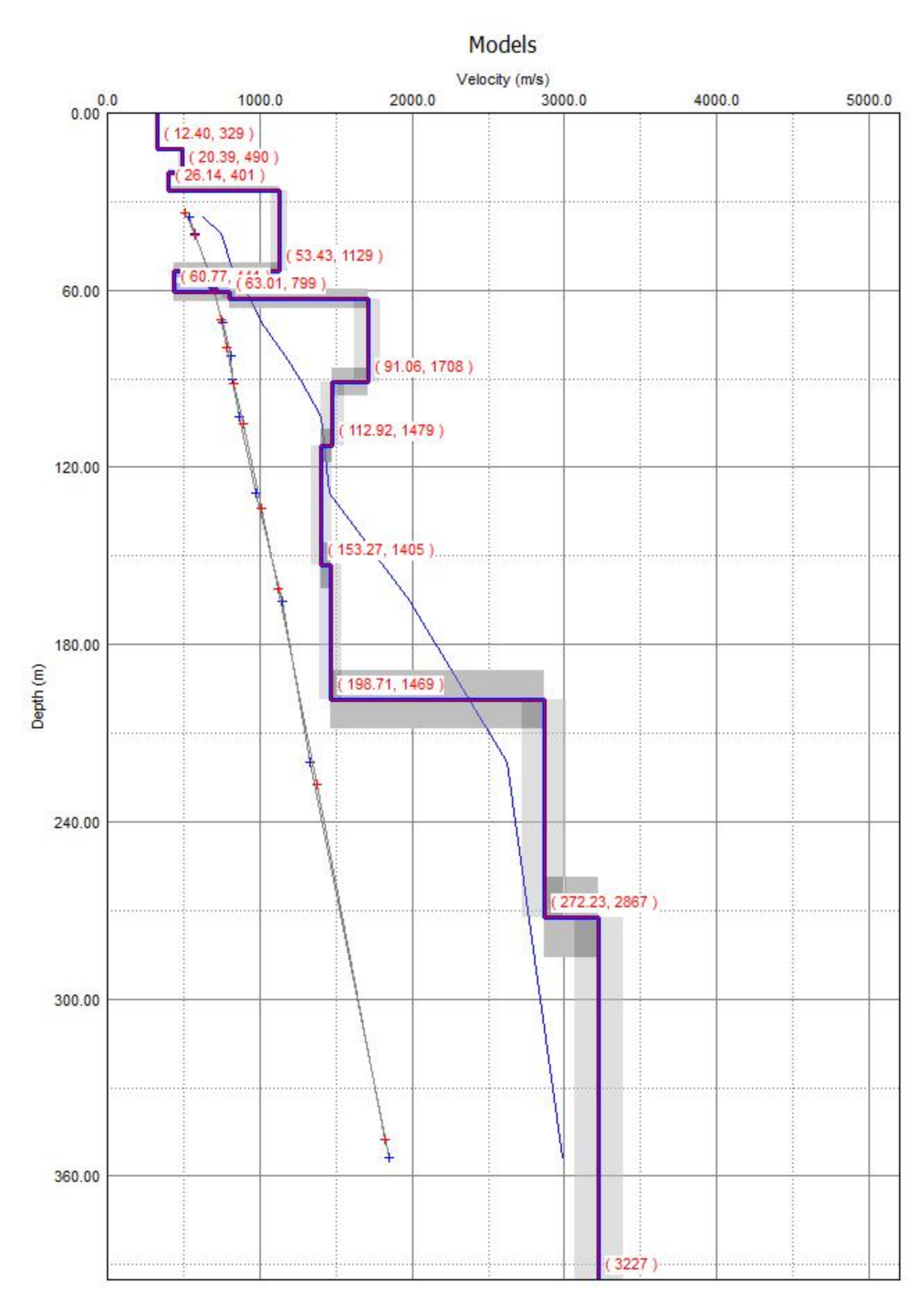

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(12.92, 288)
(21.78, 486)
(27.61, 449)
(59.49, 1255)
(69.42, 737)
(99.38, 1562)
(125.68, 1317)
(171.04, 1489)
(224.13, 1756)
(293.25, 3035)
(3197)

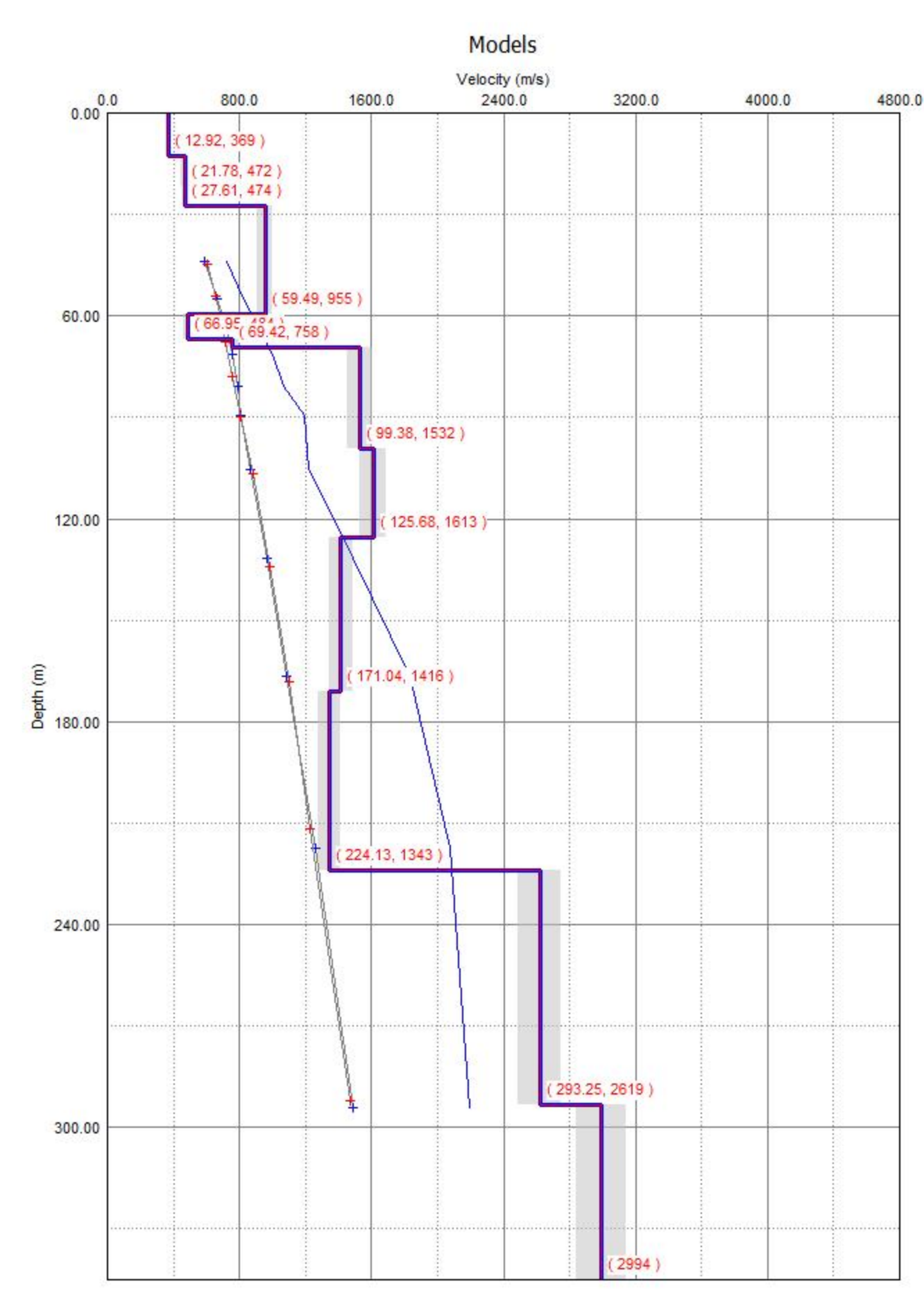

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(11.11, 287)
(20.70, 557)
(26.62, 364)
(52.38, 1294)
(62.82, 659)
(89.53, 1576)
(117.82, 1182)
(163.56, 1386)
(212.96, 1724)
(283.16, 3240)
(3320)

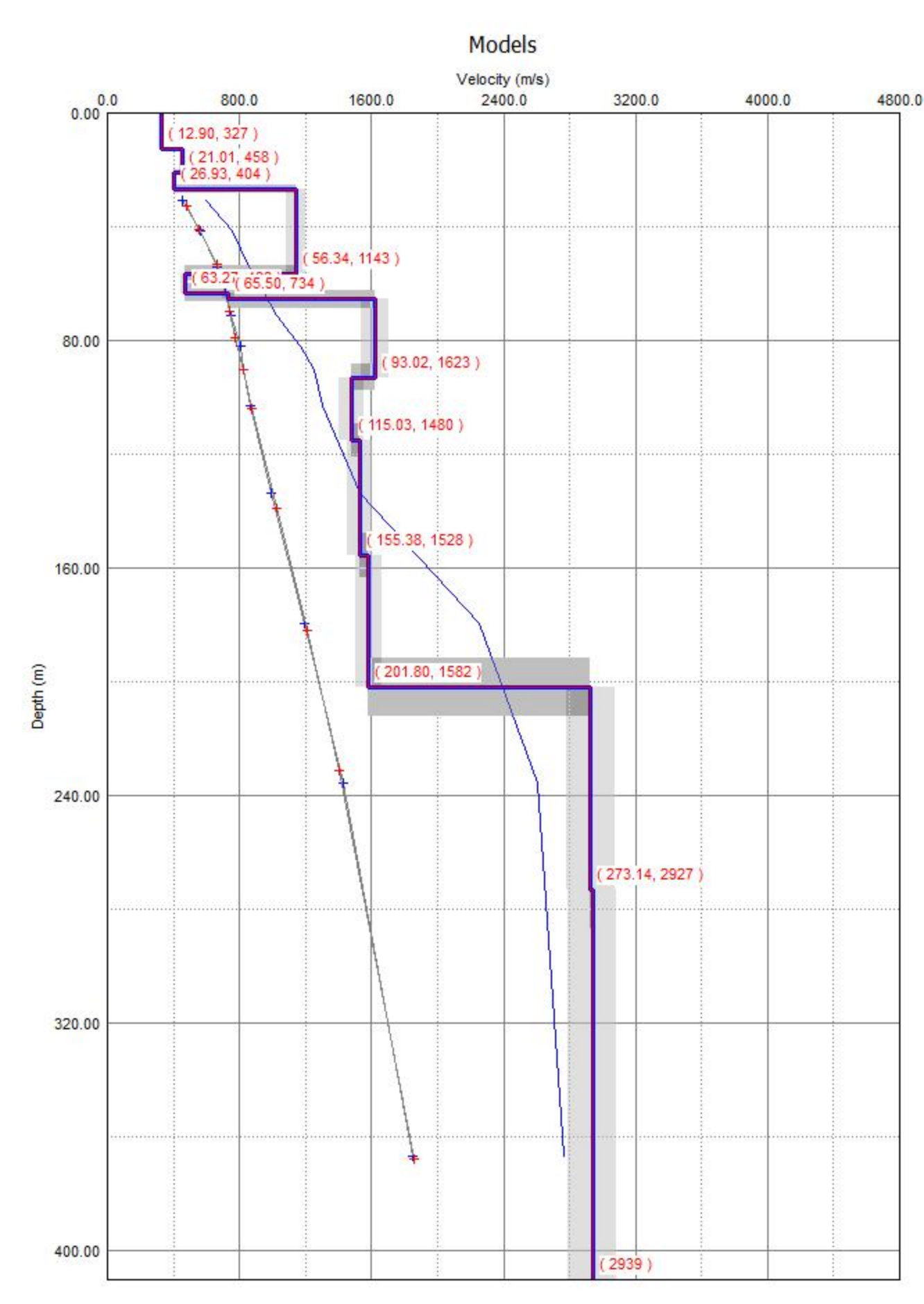

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
Depth (m)
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
(12.92, 318)
(21.78, 449)
(27.61, 471)
(59.49, 1086)
(66.95, 455)
(69.42, 781)
(99.38, 1571)
(125.68, 1504)
(171.04, 1609)
(224.13, 1542)
(293.25, 2847)
(3076)

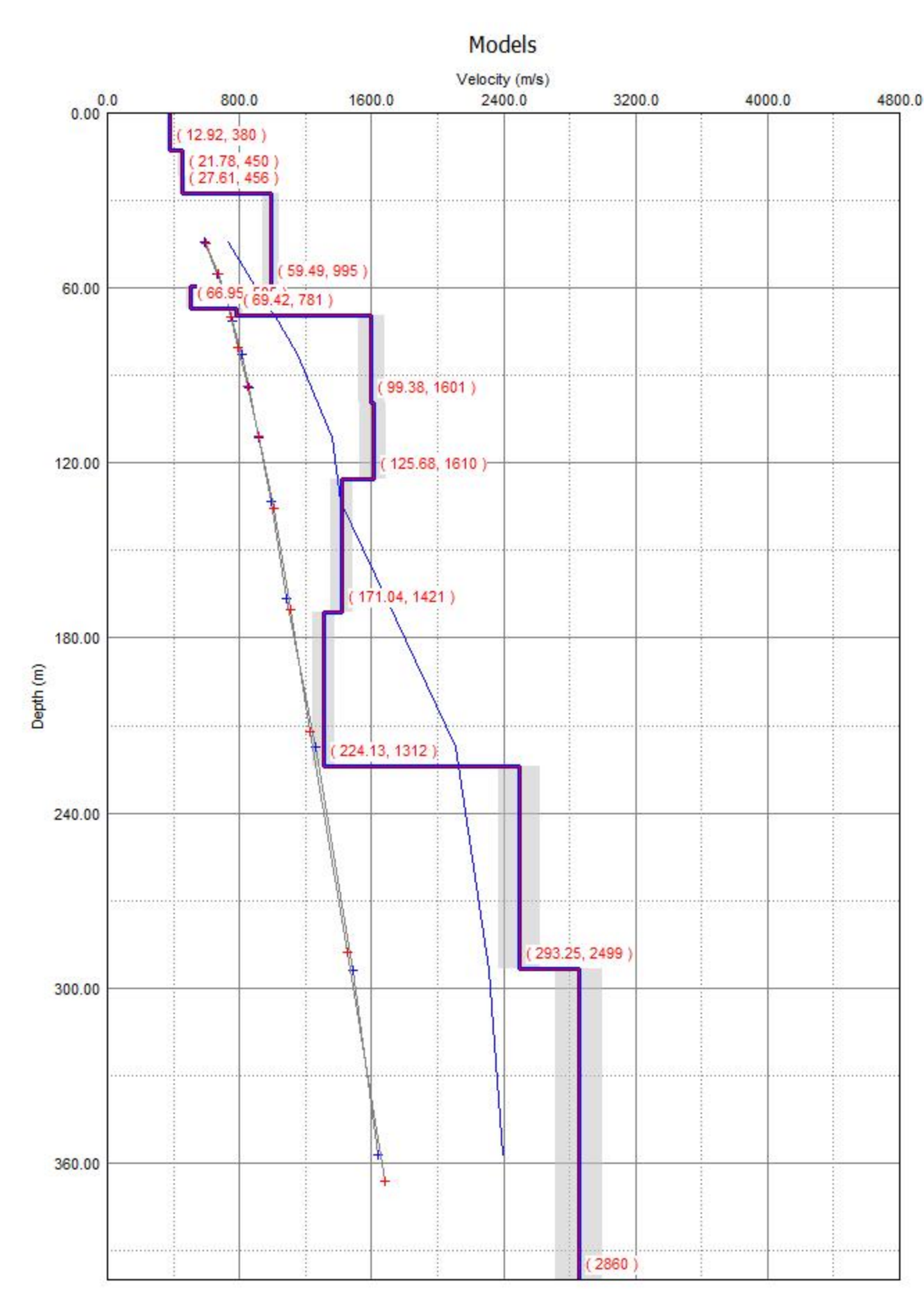

Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(11.96, 306)
(20.86, 519)
(27.25, 412)
(55.89, 1177)
(65.20, 736)
(94.67, 1623)
(122.47, 1381)
(163.87, 1458)
(210.78, 1604)
(276.96, 2884)
(3279)


Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(12.92, 335)
(21.78, 462)
(27.61, 460)
(59.49, 1049)
(66.95, 470)
(69.42, 814)
(99.38, 1645)
(125.68, 1564)
(171.04, 1551)
(224.13, 1477)
(293.25, 2727)
(3050)


Models
Velocity (m/s)
0.0
1000.0
2000.0
3000.0
4000.0
5000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(12.40, 329)
(20.39, 490)
(26.14, 401)
(53.43, 1129)
(60.77,
(63.01, 799)
(91.06, 1708)
(112.92, 1479)
(153.27, 1405)
(198.71, 1469)
(272.23, 2867)
(3227)


Models
Velocity (m/s)
0.0
800.0
1600.0
2400.0
3200.0
4000.0
4800.0
Depth (m)
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
(12.92, 369)
(21.78, 472)
(27.61, 474)
(59.49, 955)
(69.42, 758)
(99.38, 1532)
(125.68, 1613)
(171.04, 1416)
(224.13, 1343)
(293.25, 2619)
(2994)


Models
Velocity (m/s)
0.0
800.0
1600.0
2400.0
3200.0
4000.0
4800.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(12.90, 327)
(21.01, 458)
(26.93, 404)
(56.34, 1143)
(65.50, 734)
(93.02, 1623)
(115.03, 1480)
(155.38, 1528)
(201.80, 1582)
(273.14, 2927)
(2939)


Models
Velocity (m/s)
0.0
800.0
1600.0
2400.0
3200.0
4000.0
4800.0
Depth (m)
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
(12.92, 380)
(21.78, 450)
(27.61, 456)
(59.49, 995)
(69.42, 781)
(99.38, 1601)
(125.68, 1610)
(171.04, 1421)
(224.13, 1312)
(293.25, 2499)
(2860)

Models
Velocity (m/s)
0.0
800.0
1600.0
2400.0
3200.0
4000.0
4800.0
0.00
80.00
160.00
240.00
320.00
400.00
Depth (m)
(13.37, 374)
(21.90, 442)
(27.28, 380)
(53.56, 1124)
(63.19, 743)
(90.04, 1632)
(112.60, 1671)
(151.83, 1598)
(195.94, 1677)
(261.87, 2997)
(3017)

Models
Velocity (m/s)
0.0
800.0
1600.0
2400.0
3200.0
4000.0
0.00
60.00
120.00
180.00
240.00
300.00
360.00
Depth (m)
(12.92, 393)
(21.78, 462)
(27.61, 467)
(59.49, 979)
(66.95,
(69.42, 793)
(99.38, 1609)
(125.68, 1748)
(171.04, 1551)
(224.13, 1311)
(293.25, 2366)
(2709)

COORDENAS SISMICA MASW - TIERRA AMARILLA AGOSTO 2022

Linea 1 (NS)			
x_wgs84	**y_wgs84**	**Z_srtm**	**STN**
374303.4	6962005.81	480.2	0
374297.1	6961965.08	475.7	40
374293.9	6961922.62	474.8	80
374287.8	6961883.55	474	120
374279.7	6961845.91	474.8	160
374273.8	6961806.96	476.5	200
374268.5	6961768.47	477.5	240
374261	6961730.83	477.6	280
374253.2	6961692.41	478.4	320
374244.8	6961653.22	478.8	360
374239.9	6961613.28	478.8	400
374231.2	6961573.86	478.7	440
374221.1	6961533.09	479	480
374217.4	6961495.94	479.3	520
374211.9	6961456.44	479.7	560
374206.9	6961416.84	480.1	600
374200.1	6961378.43	480.3	640
374192.4	6961338.36	480.1	680
374186.4	6961298.07	479.4	720
374177.9	6961257.77	478.9	760
374177.7	6961218.44	480	800
374181.4	6961179.37	481.2	840
374180	6961138.91	484.9	880
374184.4	6961099.07	488.4	920

Linea 2 (EW)			
x_wgs84	**y_wgs84**	**Z_srtm**	**STN**
374598.5	6961317.25	480.6	0
374560.1	6961310.32	481.4	40
374522.7	6961316.92	481.9	80
374488	6961334.85	482.6	120
374450.3	6961345.98	484.1	160
374409.9	6961348.45	483	200
374370.4	6961345.72	480.4	240
374330.3	6961344.64	479.5	280
374291.4	6961344.8	480.3	320
374251.8	6961345.28	480.9	360
374212.7	6961346.65	480.4	400
374174.3	6961353.24	480.1	440
374134	6961352.61	483.3	480
374095.3	6961342.13	485.9	520
374055.3	6961337.83	488.8	560
374014.7	6961336.65	492	600
373978.8	6961318.32	496.9	640
373938.4	6961321.9	503.6	680
373898.6	6961324.15	510	720
373859	6961317.21	517.6	760
373819.3	6961312.03	524.8	800
373780.2	6961320.83	527.3	840
373741	6961330.28	529.4	880
373701	6961321.78	538.5	920