



Universidad de Concepción
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Geofísica

CARACTERIZACIÓN DE SUELO MEDIANTE MÉTODO DE REFRACCIÓN DE MICROTREMORES (REMI) EN CURACAUTÍN, REGIÓN DE LA ARAUCANÍA

César Andrés Núñez Mardones

Trabajo para optar al título de Geofísico de la Universidad de Concepción

Profesor guía:
Dr. Arturo Belmonte-Pool Villanueva
Comisión
Dr. Matthew Robert Miller
Dr. Jorge Quezada Flory
Departamento de Geofísica
Universidad de Concepción

Concepción
19 de junio de 2018

*Dedicado a
A mi madre...
A los que creyeron en mí ...*

*"Cuando las tinieblas me gobiernan,
nunca perderé la esperanza"*

Agradecimientos

A mi madre, por darme vida, amor, motivación, energía, consuelo y apoyo incondicional junto con un enorme sentido de la preocupación hacia mí y que espero retribuir humildemente en un futuro con el mismo amor, desprendimiento y nobleza.

A mis familiares por estar presentes y darme, un espacio, confianza, visiones, ideas, ánimo y energía para seguir adelante ante cualquier situación adversa y lograr los objetivos.

Al Dr. Arturo Belmonte del Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas por ser mi guía, por su disposición de tiempo, cordialidad y sinceridad.

A Yanett Díaz del Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas Matemáticas por su cordialidad, sinceridad y gestionar desinteresadamente mi práctica profesional en el lugar que anhele desde el comienzo.

A Juan Carlos Parra, gerente general y a su equipo de GEODATOS (S.A.I.C.) que me dio la oportunidad de realizar mi práctica profesional y me permitió tener una visión de la labor profesional en el área de la prospección geofísica.

A Elizabeth Godoy, estudiante en esta carrera que proporcionó la información pertinente sobre el tema.

A los tantos académicos y compañeros que me hicieron ver que siempre se puede ser mejor tanto académicamente como personalmente.

Resumen

La geotecnia es muy importante para un país sísmico como Chile, la cual cobró mayor importancia después del terremoto del año 2010 que azotó gran parte de la zona centro sur del país, consecuencia de ello la norma de construcción fue modificada y se exigió saber el promedio de la velocidad de los estratos hasta los 30 metros de profundidad también conocido como el parámetro V_{s30} , pues a partir de ello se puede clasificar el suelo dentro de las categorías actualmente existentes.

Para calcular este parámetro el método de refracción sísmica por microtremor (ReMi) ha resultado ser muy eficaz por lo económico, rápido y por entregar la propiedad dinámica tan importante como la V_{s30} . Por estas razones se ha decidido poner en práctica este método de prospección geofísica tan comúnmente utilizado en consultoras en el área de la geofísica de prospección, sin embargo existen algunas limitantes como el software, pues el empleado en ellas es comercial, pero a pesar de esto existen algunas herramientas gratuitas que están a disposición en el campo de la programación y que pueden ayudar a obtener un resultado con menor o igual precisión.

Por lo anterior el año 2015 se realizaron campañas de recolección de datos en 2 regiones, estos son en 3 sectores de la comuna de Curacautín, perteneciente a la Región de la Araucanía y en 2 sectores de Concepción, Región del Bío Bío. Los datos recuperados en Concepción son el resultado de una campaña rápidamente realizada de carácter experimental y que permitieron poner a prueba el software utilizado y validar en términos metodológicos los posteriores datos obtenidos en Curacautín. Esta metodología comprende el análisis espectral de velocidades, la dispersión fase-velocidad de una onda Rayleigh y el modelado de un perfil de velocidad de onda S.

Lo anterior permite realizar una caracterización geofísica que se fundamenta en la obtención de un perfil de velocidad de onda S y la del parámetro V_{s30} junto con el apoyo de información geológica de los sectores mencionados.

Índice general

Agradecimientos	II
Resumen	III
Índice general	III
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	XV
1. Objetivos y zonas de estudio	1
1.1. Objetivo	1
1.1.1. Principal	1
1.1.2. Específicos	1
1.2. Zonas de estudio	1
1.3. Marco geológico	3
1.3.1. Campus Universidad de Concepción	3
1.3.2. Riachuelo, termas y túnel	4
2. Teoría sísmica	1
2.1. Esfuerzo y deformación	1
2.2. Ondas sísmicas	2
2.2.1. Ondas P	2
2.2.2. Ondas S	3
2.2.3. Ondas superficiales	4
2.2.4. Ondas Love	5
2.2.5. Ondas Rayleigh	6
2.2.6. Ruido sísmico o microtremor	6
2.3. Métodos de exploración	7
2.3.1. Métodos activos	7
2.3.2. Sísmica de refracción	7
2.3.3. Métodos pasivos	10
2.3.4. Refracción por microtremor (ReMi)	10
2.4. Análisis espectral de velocidad	11
2.4.1. Dispersión fase-velocidad Rayleigh	12
2.5. Norma Chilena de clasificación sísmica	13

3. Metodología	16
3.1. Instrumentación	16
3.2. Software	18
3.3. Terreno y procesamiento	19
3.3.1. Etapa I: Geopsy (Conversión de formato)	19
3.3.2. Etapa II: MatLab	21
3.3.3. Etapa III: Dinver (Proceso de inversión)	23
3.3.4. Etapa IV: Rutina VS-VS30.bat (Conversión mediante batch)	27
3.3.5. Etapa V: MatLab (Generación de perfiles)	29
4. Resultados	30
4.1. La Cascada	31
4.1.1. Sísmica de refracción	33
4.1.2. Refracción por microtremor (ReMi)	33
4.1.3. Curva de dispersión	34
4.1.4. Parámetros de inversión y estimación de profundidad	34
4.1.5. Modelos de perfil de velocidad	36
4.1.6. Curva V_{s30} promedio	36
4.2. Campus frente a FCFM	37
4.2.1. Sísmica de refracción	38
4.2.2. Refracción por microtremor (ReMi)	38
4.2.3. Curva de dispersión	41
4.2.4. Parámetros de inversión y estimación de profundidad	42
4.2.5. Modelos de perfil de velocidad	44
4.2.6. Curva V_{s30} promedio	45
4.3. Riachuelo	45
4.3.1. Sísmica de refracción	46
4.3.2. Refracción por microtremor (ReMi)	49
4.3.3. Curva de dispersión	54
4.3.4. Parámetros de inversión y estimación de profundidad	55
4.3.4.1. Perfil R1	56
4.3.4.2. Perfil R2	57
4.3.5. Modelos de perfil de velocidad	59
4.3.5.1. Perfil R1	59
4.3.5.2. Perfil R2	61
4.3.6. Curva V_{s30} promedio	63
4.4. Termas de Manzanar	68
4.4.1. Sísmica de refracción	69
4.4.1.1. Perfil M1	70
4.4.1.2. Perfil M2	71
4.4.1.3. Perfil M3	72
4.4.1.4. Perfil M4	73
4.4.1.5. Perfil M5	74
4.4.1.6. Perfil M6	75
4.4.2. Refracción por microtremor (ReMi)	76
4.4.2.1. Perfil M1	76

4.4.2.2.	Perfil M2	78
4.4.2.3.	Perfil M3	80
4.4.2.4.	Perfil M4	82
4.4.2.5.	Perfil M5	84
4.4.2.6.	Perfil M6	86
4.4.2.7.	Apilación de espectros	87
4.4.3.	Curva de dispersión	90
4.4.3.1.	Perfil M1	91
4.4.3.2.	Perfil M2	91
4.4.3.3.	Perfil M3	92
4.4.3.4.	Perfil M4	92
4.4.3.5.	Perfil M5	93
4.4.3.6.	Perfil M6	93
4.4.4.	Parámetros de inversión y estimación de profundidad	94
4.4.4.1.	Perfil M1	94
4.4.4.2.	Perfil M2	96
4.4.4.3.	Perfil M3	97
4.4.4.4.	Perfil M4	99
4.4.4.5.	Perfil M5	100
4.4.4.6.	Perfil M6	102
4.4.5.	Modelos de perfil de velocidad	103
4.4.5.1.	Perfil M1	104
4.4.5.2.	Perfil M2	106
4.4.5.3.	Perfil M3	108
4.4.5.4.	Perfil M4	110
4.4.5.5.	Perfil M5	112
4.4.5.6.	Perfil M6	114
4.4.6.	Curva V_{s30} promedio	116
4.5.	Túnel “El Naranjito”	119
4.5.1.	Sísmica de refracción	121
4.5.2.	Refracción por microtremor (ReMi)	121
4.5.3.	Curva de dispersión	122
4.5.4.	Parámetros de inversión y estimación de profundidad	123
4.5.5.	Modelos de perfil de velocidad	124
4.5.6.	Curva V_{s30} promedio	124
5.	Análisis y discusión	125
5.1.	La Cascada	125
5.2.	Campus frente a FCFM	125
5.3.	Riachuelo	126
5.4.	Termas de Manzanar	126
5.5.	Túnel	127
6.	Conclusiones	128

A. Códigos	130
A.1. Código MatLab REMI.m	130
A.2. Código MatLab VS-VS30.m	132
A.3. Código batch	133
Bibliografía	134

Índice de figuras

1.1.	<i>Ubicación general de las zonas de estudio en el mapa de división política.</i>	2
1.2.	<i>Vista general de las zonas de estudio en la Universidad de Concepción, Región del Bío Bío.</i>	2
1.3.	<i>Vista general de los sectores de estudio de las Termas de Manzanar, El Túnel y Riachuelo en la Región de la Araucanía.</i>	3
1.4.	<i>Mapa geológico de Concepción[14]y las zonas de estudio. El área en el rectángulo pequeño es frente a la facultad mientras que el grande es el sector de La Cascada</i>	4
1.5.	<i>Mapa geológico de Curacautín[4], el rectángulo limita los sectores de Manzanar, el Túnel y Riachuelo.</i>	5
1.6.	<i>Afloramiento rocoso en un costado en la parte superior del túnel, imagen gentileza Arturo Belmonte</i>	5
2.1.	<i>Representación clásica del compartimiento de una onda P.</i>	3
2.2.	<i>Representación clásica del compartimiento de una onda S.</i>	3
2.3.	<i>Torre O'Higgins emplazada en el Concepción Metropolitano luego del terremoto 8,8 Mw. del 27 de febrero del año 2010, imagen personal.</i>	5
2.4.	<i>Representación clásica del comportamiento de una onda Love.</i>	5
2.5.	<i>Representación clásica del comportamiento de una onda Rayleigh.</i>	6
2.6.	<i>Espectro de frecuencia para microtemores. Las ondas Rayleigh ocupan la banda entre los 0.1 a 10 [Hz], es aquí donde la exploración geofísica puede estimar modos y velocidades de propagación.</i>	7
2.7.	<i>Tendido clásico de geófonos en la sismica de refracción y un martillo como fuente, punto de golpe o shot.</i>	8
2.8.	<i>La transformada slant-stack suma las amplitudes encontradas en el camino descrito por una recta de pendiente p e intercepto t, el valor encontrado es llevado a una nueva traza sísmica correspondiente a un punto de coordenadas lentitud p y tiempo t [2]</i>	12
2.9.	<i>Edificio Alto Rio luego del terremoto 8,8 [Mw] del 27 de febrero del año 2010, imagen personal.</i>	14
3.1.	<i>Equipo de registro sísmico Geode.</i>	16
3.2.	<i>Bateria 12 [v].</i>	17
3.3.	<i>Martillo utilizado en terreno (a) y detalle del sensor (b).</i>	17
3.4.	<i>Placa de acero.</i>	17
3.5.	<i>Geófono de frecuencia de resonancia de 14 [Hz] (a) y el conjunto utilizado en terreno (b).</i>	18

3.6. Cable sísmico para geófonos (negro) y para martillo (naranja) (a) y detalle de la conexión entre los cables del geófono al cable sísmico (b).	18
3.7. Importación de datos.	20
3.8. Vista previa de la señal.	20
3.9. Imagen espectral en la cual el color cálido indica una mayor tasa de energía. Nótese también que la línea punteada representa el límite teórico el cual indica que la información de la zona que está bajo este límite ya no es confiable. . . .	22
3.10. "Command Window" en MatLab.	22
3.11. Ejemplo de selección de curva de dispersión.	23
3.12. Vista general de los paneles en Dinver.	24
3.13. Curva de dispersión en Dinver.	24
3.14. Ventana en Dinver para ajuste de valor máximo y mínimo para la curva de dispersión.	25
3.15. Curva de dispersión truncada luego del ajuste.	25
3.16. Vista del panel de parámetros en Dinver.	26
3.17. Panel de Runs o modelos a generar.	26
3.18. Ventana de interacción en Batch.	27
3.19. Ventana de interacción en Batch.	27
3.20. Ventana de interacción en Batch.	28
3.21. Opcion "Editar" en Windows.	28
3.22. Vista del perfil Vs y curvas Vs30 promedio construidos con la selección de la curva con menor desajuste realizado con Batch para los 4 modelos o Runs. . . .	29
4.1. La Cascada, en la Universidad de Concepción, imagen personal	31
4.2. Vista satelital del perfil realizado en el sector La Cascada.	32
4.3. Vista (a) y (b) de los extremos del perfil con el arreglo lineal de geófonos.	32
4.4. Espectro de frecuencia (C1a) en ambiente de silencio y (C1b) con el equipo de apoyo a trote.	33
4.5. Curva de dispersión seleccionada.	34
4.6. Curvas de dispersión obtenida para perfil C1 con 2 [ms], (a) no acotado.	35
4.7. Modelos de velocidad de onda S, obtenidos con los parámetros de inversión simple.	36
4.8. Curvas V_{s30} promedio obtenidos para La Cascada, obtenidos con los parámetros de inversión simple	36
4.9. Vista satelital de la zona estudio frente la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM)	37
4.10. Vista panorámica de la zona de estudio	37
4.11. Vista del tendido lineal de geófonos en el momento de realizar el shot o golpe para la refracción sísmica.	38
4.12. Espectro de frecuencia para F1 con espaciamento de 1 [m] y con un muestreo de 2 [ms], F1a primer registro y F1b el segundo registro realizado.	39
4.13. Apilación de los espectros de frecuencia F1a y F1b obtenidos.	39
4.14. Espectros de frecuencias para F2 con espaciamento de 2 [m] y con un muestreo de 2 [ms], F2a primer registro, F2b segundo registro y F2c tercer registro realizado.	40
4.15. Apilación de los espectros de frecuencia F2a, F2b y F2c obtenidos.	41
4.16. Curva de dispersión seleccionada.	41

4.17. Curvas de dispersión obtenida para perfil F2 con 2 [ms], (a) no acotado y (b) acotado.	43
4.18. Modelos de velocidad de onda S, obtenidos con los parámetros de inversión (a) simple y (b) acotado	44
4.19. Curvas V_{s30} promedio para el perfil F2, obtenidos con los parámetros de inversión inversión (a) simple y (b) acotado	45
4.20. Vista panorámica hacia el sur en Riachuelo, imagen gentileza Arturo Belmonte .	45
4.21. Imagen satelital por Google Earth con el detalle de los perfiles realizados en el sector Riachuelo, Región de la Araucanía.	46
4.22. Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (RRa) y modelos de velocidad obtenidos (RRb).	47
4.23. Perfiles laterales obtenidos mediante la sismica de refracción	47
4.24. Perfiles centrales obtenidos mediante la sismica de refracción	48
4.25. Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 4 [m], R1a el primero, R1b el segundo, R1c el tercero y R1d el cuarto. .	49
4.26. Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 4 [m], R1a el primero, R1f el segundo, R1g el tercero y R1h el cuarto. .	50
4.27. Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 10 [m], R2a el primero, R2b el segundo, R2c el tercero y R2d el cuarto.	51
4.28. Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 10 [m], R2e el primero, R2f el segundo, R2g el tercero y R2h el cuarto. .	52
4.29. Imágenes espectrales resultantes de la apilación de los 4 registros para R1 y con geófonos cada 4 [m], R1A para los registros con muestreo de 2 [ms] y R1B con 4 [ms].	53
4.30. Imágenes espectrales resultantes de la apilación de los 4 registros para R2 y con geófonos cada 10 [m], R2A para los registros con muestreo de 2 [ms] y R2B con 4 [ms].	53
4.31. Selección de la curva de dispersión (a) para la imagen espectral R1Ad de 2 [ms] y (b) para R1Bd de 4 [ms].	54
4.32. Selección de la curva de dispersión (a) para la imagen espectral R2Ad de 2 [ms] y (b) para R2Bd de 4 [ms].	54
4.33. Curvas de dispersión obtenidas para el perfil R1, R1Cu2A para 2 [ms] simple y R1Cu2B para 2 [ms] acotado.	56
4.34. Curvas de dispersión obtenidas para el perfil R1, R1Cu4A para 4 [ms] simple y R1Cu4B para 4 [ms] acotado.	56
4.35. Curvas de dispersión obtenidas para el perfil R2, R2Cu2A para 2 [ms] simple y R2Cu2B para 2 [ms] acotado.	57
4.36. Curvas de dispersión obtenidas para el perfil R2, R2Cu4A para 4 [ms] simple y R2Cu4B para 4 [ms] acotado.	58
4.37. Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R1 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	59
4.38. Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R1 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión acotado.	59
4.39. Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R1 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	60

4.40. Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R1 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión acotado.	60
4.41. Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R2 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	61
4.42. Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R2 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión acotado.	61
4.43. Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R2 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	62
4.44. Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R2 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión acotado.	62
4.45. Curvas V_{s30} promedio para perfiles R1 y R2 con muestreo de 2 [ms] no acotado.	63
4.46. Curvas V_{s30} promedio para perfiles R1 y R2 con muestreo de 4 [ms] no acotado.	64
4.47. Curvas V_{s30} promedio de perfiles R1 Y R2 con muestreo de 2 y 4 [ms] no acotado.	65
4.48. Curvas V_{s30} promedio para perfiles R1 y R2 con muestreo de 2 [ms] acotado.	66
4.49. Curvas V_{s30} promedio para perfiles R1 y R2 con muestreo de 4 [ms] acotado.	67
4.50. Curvas V_{s30} promedio de perfiles R1 Y R2 con muestreo de 2 y 4 [ms] acotado.	68
4.51. Vista satelital con el detalle de los perfiles realizados en el sector de las Termas de Manzanar, Región de la Araucanía.	69
4.52. Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM1A) y modelos de velocidad obtenidos (rM1B).	70
4.53. Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sísmica de refracción	70
4.54. Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM2A) y modelos de velocidad obtenidos (rM2B).	71
4.55. Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sísmica de refracción	71
4.56. Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM3A) y modelos de velocidad obtenidos (rM3B).	72
4.57. Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sísmica de refracción	72
4.58. Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM4A) y modelos de velocidad obtenidos (rM4B).	73
4.59. Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sísmica de refracción	73
4.60. Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM5A) y modelos de velocidad obtenidos (rM5B).	74
4.61. Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sísmica de refracción	74
4.62. Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM6A) y modelos de velocidad obtenidos (rM6B).	75
4.63. Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sísmica de refracción	75
4.64. Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M1a el primero, M1b el segundo, M1c el tercero y M1d el cuarto.	76
4.65. Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M1e el primero, M1f el segundo, M1g el tercero y M1h el cuarto.	77
4.66. Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], M2a el primero, M2b el segundo, M2c el tercero y M2d el cuarto.	78

4.67. Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], M2e el primero, M2f el segundo, M2g el tercero y M2h el cuarto.	79
4.68. Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M3a el primero, M3b el segundo, M3c el tercero y M3d el cuarto.	80
4.69. Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M3e el primero, M3f el segundo, M3g el tercero y M3h el cuarto.	81
4.70. Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], M4a el primero, M4b el segundo, M4c el tercero y M4d el cuarto.	82
4.71. Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], M4e el primero, M4f el segundo, M4g el tercero y M4h el cuarto.	83
4.72. Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 4 [m], M5a el primero, M5b el segundo, M5c el tercero y M5d el cuarto.	84
4.73. Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 4 [m], M5e el primero, M5f el segundo, M5g el tercero y M5h el cuarto.	85
4.74. Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M6a el primero, M6b el segundo, M6c el tercero y M6d el cuarto.	86
4.75. Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenido y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M6e el primero, M6f el segundo, M6g el tercero y M6h el cuarto.	87
4.76. Apilación de los espectros de frecuencia para M1 y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], (M1A) para registros con un muestreo de 2 [ms] y (M1B) con 4 [ms].	88
4.77. Apilación de los espectros de frecuencia para M2 y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], (M2A) para registros con un muestreo de 2 [ms] y (M2B) con 4 [ms].	88
4.78. Apilación de los espectros de frecuencia para M3 y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], (M3A) para registros con un muestreo de 2 [ms] y (M3B) con 4 [ms].	89
4.79. Apilación de los espectros de frecuencia para M4 y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], (M4A) para registros con un muestreo de 2 [ms] y (M4B) con 4 [ms].	89
4.80. Apilación de los espectros de frecuencia para M5 y con espaciamiento entre geófonos de 4 [m], (M5A) para registros con un muestreo de 2 [ms] y (M5B) con 4 [ms].	90
4.81. Apilación de los espectros de frecuencia para M6 y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], (M6A) para registros con un muestreo de 2 [ms] y (M6B) con 4 [ms].	90
4.82. Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M1Ad) de 2 [ms] y (M1Bd) para 4 [ms].	91

4.83. Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M2Ad) de 2 [ms] y (M2Bd) para 4 [ms].	91
4.84. Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M3Ad) de 2 [ms] y (M3Bd) para 4 [ms].	92
4.85. Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M4Ad) de 2 [ms] y (M4Bd) para 4 [ms].	92
4.86. Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M5Ad) de 2 [ms] y (M5Bd) para 4 [ms].	93
4.87. Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M6Ad) de 2 [ms] y (M6Bd) para 4 [ms].	93
4.88. Curvas de dispersión obtenida para perfil M1 con 2 [ms], M1aD no acotado y M1bD acotado.	95
4.89. Curvas de dispersión obtenida para perfil M1 con 4 [ms], M1cD no acotado y M1dD acotado.	95
4.90. Curvas de dispersión obtenida para perfil M2 con 2 [ms], M2aD no acotado y M2bD acotado.	96
4.91. Curvas de dispersión obtenida para perfil M2 con 4 [ms], M2cD no acotado y M2dD acotado.	97
4.92. Curvas de dispersión obtenida para perfil M3 con 2 [ms], M3aD no acotado y M3bD acotado.	98
4.93. Curvas de dispersión obtenida para perfil M3 con 4 [ms], M3cD no acotado y M3dD acotado.	98
4.94. Curvas de dispersión obtenida para perfil M4 con 2 [ms], M4aD no acotado y M4bD acotado.	99
4.95. Curvas de dispersión obtenida para perfil M4 con 4 [ms], M4cD no acotado y M4dD acotado.	100
4.96. Curvas de dispersión obtenida para perfil M5 con 2 [ms], M5aD no acotado y M5bD acotado.	101
4.97. Curvas de dispersión obtenida para perfil M5 con 4 [ms], M5cD no acotado y M5dD acotado.	101
4.98. Curvas de dispersión obtenida para perfil M6 con 2 [ms], M6aD no acotado y M6bD acotado.	102
4.99. Curvas de dispersión obtenida para perfil M6 con 4 [ms], M6cD no acotado y M6dD acotado.	103
4.100 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M1 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	104
4.101 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M1 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	104
4.102 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M1 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	105
4.103 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M1 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	105
4.104 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M2 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	106
4.105 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M2 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	106

4.106 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M2 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	107
4.107 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M2 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	107
4.108 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M3 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	108
4.109 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M3 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	108
4.110 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M3 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	109
4.111 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M3 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	109
4.112 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M4 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	110
4.113 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M4 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	110
4.114 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M4 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	111
4.115 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M4 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	111
4.116 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M5 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	112
4.117 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M5 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	112
4.118 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M5 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	113
4.119 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M5 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	113
4.120 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M6 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	114
4.121 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M6 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	114
4.122 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M6 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.	115
4.123 Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M6 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.	115
4.124 Curvas V_{s30} promedio para todos perfiles de Manzanar con muestreo de 2 [ms] no acotado.	116
4.125 Curvas V_{s30} promedio para todos perfiles de Manzanar con muestreo de 4 [ms] no acotado.	117
4.126 Curvas V_{s30} promedio para todos perfiles de Manzanar con muestreo de 2 [ms] acotado.	118
4.127 Curvas V_{s30} promedio para todos perfiles de Manzanar con muestreo de 4 [ms] acotado.	119
4.128 Boca del túnel en Manzanar, imagen gentileza Arturo Belmonte	120
4.129 Vista satelital con el detalle de los perfiles realizados en la boca sur del túnel. . .	120

4.130	<i>Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (Tra) y modelos de velocidad obtenidos (Trb).</i>	121
4.131	<i>Registros T1a y T1b para el perfil T1 con 2 y 4 [ms] respectivamente.</i>	121
4.132	<i>Registros T2a y T2b para el perfil T2 con 2 y 4 [ms] respectivamente.</i>	122
4.133	<i>Curva de dispersión seleccionada de 2 [ms] para T1 y T2.</i>	122
4.134	<i>Modelos de velocidad para perfiles T1 y T2.</i>	124
4.135	<i>Velocidad promedio para perfiles T1 y T2.</i>	124

Indice de tablas

2.1. Clasificación sísmica del terreno de fundación, parámetros extraídos del decreto 61, artículo 6 de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.	15
4.1. Perfil realizado en Concepción en el sector La Cascada.	33
4.2. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de las capas corresponden a los parámetros por defecto.	34
4.3. Estimaciones de profundidad para el perfil C1.	35
4.4. Desajuste para el perfil C1 de 2 [ms] no acotado.	36
4.5. Perfiles realizados en Concepción frente la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM).	38
4.6. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de las capas corresponden a los parámetros por defecto.	42
4.7. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción de trabajos anteriores.	42
4.8. Estimaciones de profundidad.	43
4.9. Desajuste para el perfil F2 de 2 [ms] no acotado.	44
4.10. Desajuste para el perfil F2 de 2 [ms] acotado.	44
4.11. Perfiles realizados en el sector Riachuelo.	46
4.12. Distribución de los golpes o shot para la sísmica de refracción.	46
4.13. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de las capas corresponden a los parámetros por defecto.	55
4.14. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción, para el perfil R1 y R2.	55
4.15. Estimaciones de profundidad.	57
4.16. Estimaciones de profundidad.	58
4.17. Desajuste para el perfil R1 de 2 [ms] no acotado.	59
4.18. Desajuste para el perfil R1 de 2 [ms] acotado.	59
4.19. Desajuste para el perfil R1 de 4 [ms] no acotado.	60
4.20. Desajuste para el perfil R1 de 4 [ms] acotado.	60
4.21. Desajuste para el perfil R2 de 2 [ms] no acotado.	61
4.22. Desajuste para el perfil R2 de 2 [ms] acotado.	61
4.23. Desajuste para el perfil R2 de 4 [ms] no acotado.	62
4.24. Desajuste para el perfil R2 de 4 [ms] acotado.	62
4.25. Perfiles realizados en el sector Termas de Manzanar.	69

4.26. Parámetros de modelo para perfiles M1,M2,M3,M4,M5,M6 ingresado a Dinver, los valores de las capas corresponden a los parámetros por defecto.	94
4.27. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción . .	94
4.28. Estimaciones de profundidad para M1 y muestros 2 [ms].	95
4.29. Estimaciones de profundidad para M1 y muestreo 4 [ms].	96
4.30. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción. . .	96
4.31. Estimaciones de profundidad para M2 y muestreo 2 [ms].	96
4.32. Estimaciones de profundidad para M2 y muestreo 4 [ms].	97
4.33. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción. . .	97
4.34. Estimaciones de profundidad para M3 y muestreo 2 [ms].	98
4.35. Estimaciones de profundidad para M3 y muestreo 4 [ms].	99
4.36. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción . .	99
4.37. Estimaciones de profundidad para M4 y muestreo 2 [ms].	99
4.38. Estimaciones de profundidad para M4 y muestreo 4 [ms].	100
4.39. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción . .	100
4.40. Estimaciones de profundidad para M5 y muestreo 2 [ms].	101
4.41. Estimaciones de profundidad para M5 y muestreo 4 [ms].	102
4.42. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción . .	102
4.43. Estimaciones de profundidad para M6 y muestreo 2 [ms].	102
4.44. Estimaciones de profundidad para M6 y muestreo 4 [ms].	103
4.45. Desajuste para el perfil M1 de 2 [ms] no acotado.	104
4.46. Desajuste para el perfil M1 de 2 [ms] acotado.	104
4.47. Desajuste para el perfil M1 de 4 [ms] no acotado.	105
4.48. Desajuste para el perfil M1 de 4 [ms] acotado.	105
4.49. Desajuste para el perfil M2 de 2 [ms] no acotado.	106
4.50. Desajuste para el perfil M2 de 2 [ms] acotado.	106
4.51. Desajuste para el perfil M2 de 4 [ms] no acotado.	107
4.52. Desajuste para el perfil M2 de 4 [ms] acotado.	107
4.53. Desajuste para el perfil M3 de 2 [ms] no acotado.	108
4.54. Desajuste para el perfil M3 de 2 [ms] acotado.	108
4.55. Desajuste para el perfil M3 de 4 [ms] no acotado.	109
4.56. Desajuste para el perfil M3 de 4 [ms] acotado.	109
4.57. Desajuste para el perfil M4 de 2 [ms] no acotado.	110
4.58. Desajuste para el perfil M4 de 2 [ms] acotado.	110
4.59. Desajuste para el perfil M4 de 4 [ms] no acotado.	111
4.60. Desajuste para el perfil M4 de 4 [ms] acotado.	111
4.61. Desajuste para el perfil M5 de 2 [ms] no acotado.	112
4.62. Desajuste para el perfil M5 de 2 [ms] acotado.	112
4.63. Desajuste para el perfil M5 de 4 [ms] no acotado.	113
4.64. Desajuste para el perfil M5 de 4 [ms] acotado.	113

4.65. Desajuste para el perfil M6 de 2 [ms] no acotado.	114
4.66. Desajuste para el perfil M6 de 2 [ms] acotado.	114
4.67. Desajuste para el perfil M6 de 4 [ms] no acotado.	115
4.68. Desajuste para el perfil M6 de 4 [ms] acotado.	115
4.69. Perfiles realizados en la boca sur del túnel	120
4.70. Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de las capas corresponden a los parámetros por defecto.	123
4.71. Estimaciones de profundidad para T1	123
4.72. Estimaciones de profundidad para T2	123

Capítulo 1

Objetivos y zonas de estudio

1.1. Objetivo

1.1.1. Principal

El objetivo principal de este trabajo es caracterizar la zonas de estudio mediante el método de refracción por microtremor (ReMi) y con un énfasis en la obtención del valor V_{s30} , junto con el proceso que conlleva el método desde la toma de datos de campo hasta el proceso de análisis e interpretación.

1.1.2. Específicos

- Recopilar información geológica, geofísica y cartográfica de las zonas de estudio.
- Adquirir datos de velocidad de onda S (V_s) de campo para el uso de la metodología.
- Realizar análisis.
- Generar perfiles de distribución y valor de V_{s30} .
- Interpretar y discutir los resultados con el fin de caracterizar el tipo de suelo.

1.2. Zonas de estudio

La sísmica de refracción y refracción por microtremor (ReMi) se realizaron en 2 sectores de Concepción y en el campus de la Universidad de Concepción, el primero frente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM) y el segundo en un sector al interior de la universidad llamado "*La Cascada*". El estudio en Curacautín se realizó en 3 sectores cercanos pertenecientes a la Provincia de Malleco en la Región de la Araucanía, estos son en un sector aledaño al complejo turístico Termas de Manzanar, en una boca del túnel "*El Naranjito*" ex ramal Púa-Lonquimay y en un sector aledaño a la ruta CH-181 denominado para este trabajo como "*Riachuelo*". Todos los trabajos fueron realizados entorno al curso de Introducción a la Prospección Geofísica dictado por el departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción.

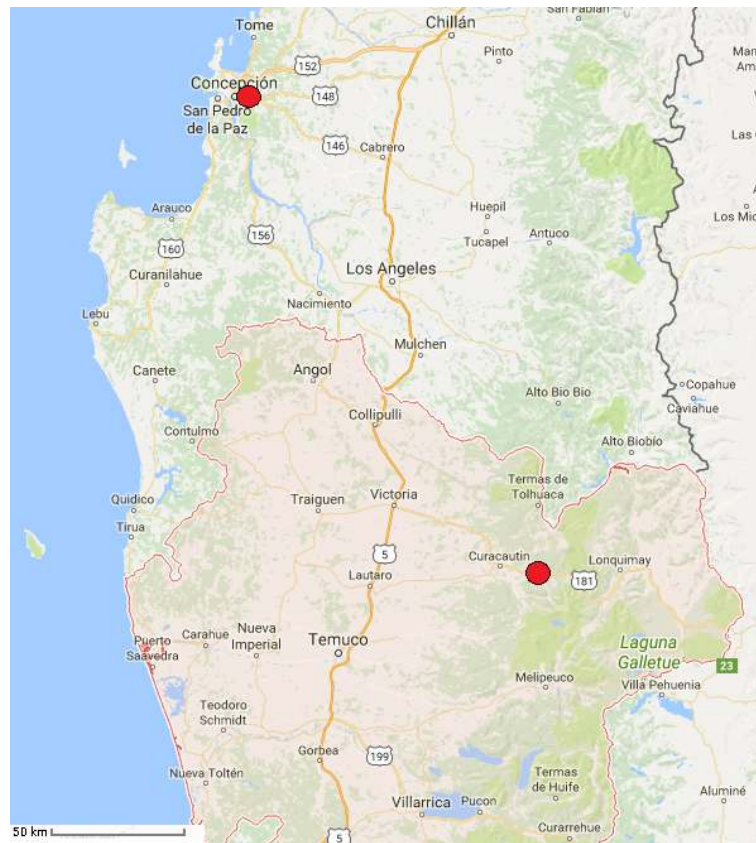


Figura 1.1: Ubicación general de las zonas de estudio en el mapa de división política.



Figura 1.2: Vista general de las zonas de estudio en la Universidad de Concepción, Región del Bío Bío.



Figura 1.3: Vista general de los sectores de estudio de las Termas de Manzanar, El Túnel y Riachuelo en la Región de la Araucanía.

1.3. Marco geológico

Se puede observar que a gran escala ambos trabajos de prospección realizados están ubicados en zonas con características geológicas distintas, Concepción está entre las planicies litorales y a los pies de la Cordillera de la Costa con un paisaje propio de las cuencas fluvio-marinas con lugares de elevación como cerros, ejemplo de ello es el sector de *La Cascada*, mientras que los sectores de Riachuelo y Manzanar están ubicados a los pies de la Cordillera de los Andes donde predomina el paisaje típico cordillerano y las zonas termales, ejemplo de ello es el área de Manzanar. Las características geológicas de cada lugar se presentan a continuación:

1.3.1. Campus Universidad de Concepción

En las zonas de estudio en el campus de la Universidad de Concepción y de acuerdo a la carta geológica para la microzonificación sísmica de la ciudad realizado el año 2010 [14], básicamente predominan 3 tipos de unidades geológicas.

En el sector aledaño a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas existen depósitos no consolidados de tipo coluvial del Pleistoceno-Holoceno (**PLHc**) el cual está constituido de arcillas y limos, con algo de arenas finas originadas de la meteorización de rocas sedimentarias e intrusivas.

Por otro lado es posible encontrar rocas plutónicas de tipo Granitoides de Concepción del Paleozoico Superior (**Pzsgc**) del tipo tonalitas, granodioritas y granitos subordinados, se observan afloramientos meteorizados y feldespatos descompuestos a arcillas y limos.

En el sector de *La cascada* también se encuentran unidades de tipo (Pzsgc), sin embargo es posible encontrar depósitos no consolidados del tipo de arenas con bastante limo del Pleistoceno-Holoceno (**PLHal**), con depósitos eólicos de dunas y depósitos coluviales, formados por arenas finas, sin cementación, con limos subordinados y en donde las áreas próximas a las laderas se incrementa el contenido de limos y arcillas.

Se debe señalar que los suelos del tipo PLHc como suelo de fundación contienen materiales finos de combinaciones areno-limosas y areno arcillosas que presentan plasticidad que varía de alta a baja y de muy alta compresibilidad en los niveles superiores con estabilidad de taludes baja.

Los suelos del tipo Pzsgc como suelo de fundación poseen un suelo residual denominado maicillo, en taludes menores a 10 grados es suelo muy denso y resistente a presiones verticales. En pendientes fuertes es fácilmente arrastrado por el agua corriente y susceptible la generación de cárcavas por erosión hídrica, junto a fenómenos de remoción en masa de tipo flujo de barro y deslizamientos rotacionales.

Los suelos del tipo PLHal como suelo de fundación poseen características desfavorables debido a la excesiva cantidad de poros y puede ser muy variable en sus características tanto horizontales como verticales además de presentar poca estabilidad de taludes y tendencia a ser fácilmente erosionado por el agua y el viento.

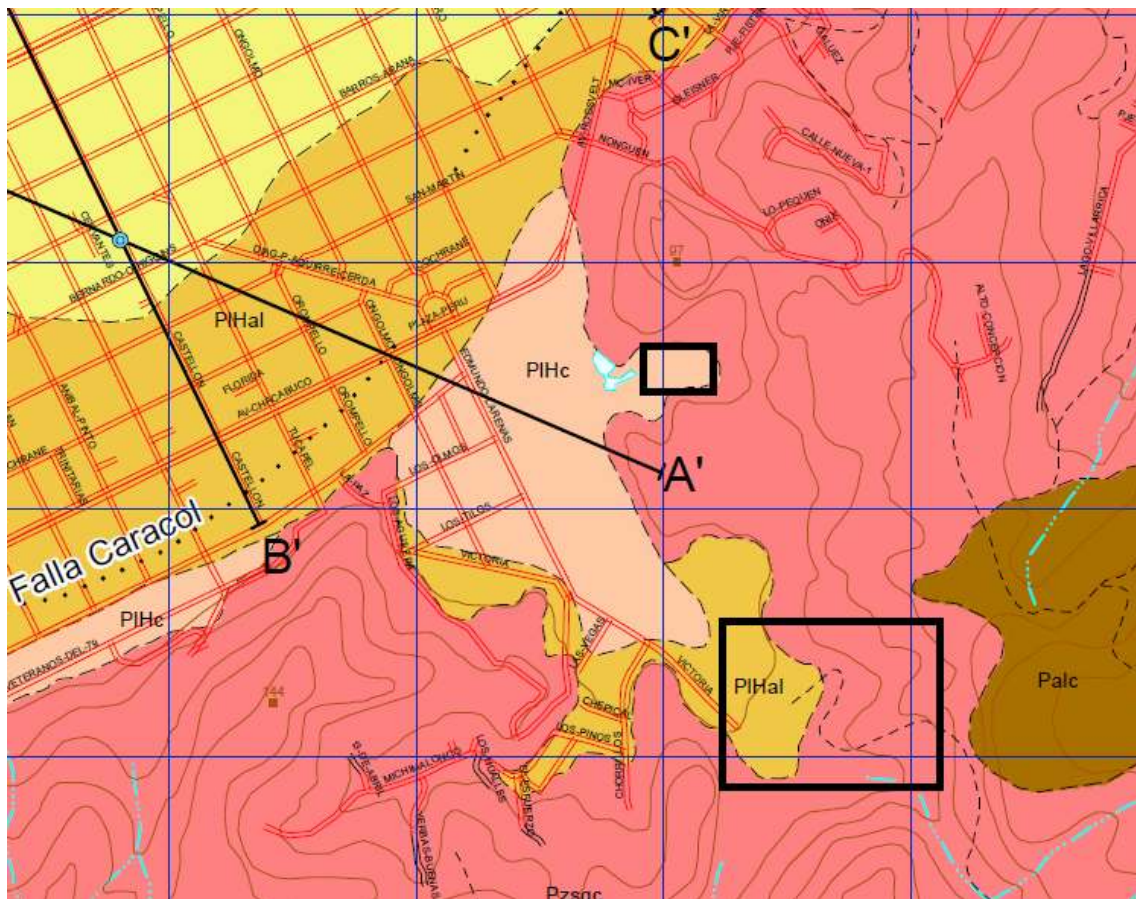


Figura 1.4: Mapa geológico de Concepción[14] y las zonas de estudio. El área en el rectángulo pequeño es frente a la facultad mientras que el grande es el sector de La Cascada

1.3.2. Riachuelo, termas y túnel

Como se mencionó los 3 estudios se realizaron en Riachuelo, en un sector aledaño al complejo turístico Termas de Manzanar y en una boca del túnel ferroviario, también llamado *El Naranjito*. Todos lugares pertenecientes a la Provincia de Malleco en la Región de la Araucanía

y con una distancia de unos kilómetros entre ellos siguiendo la carretera CH-181.

Riachuelo es un lugar ubicado al lado de esta carretera en una zona que intercepta un riachuelo (por ello el nombre), la geología del lugar señala que está compuesto por lavas andesíticas y basálticas, localmente dacíticas, flujos piroclásticos, flujos de deritos y laháricos.

El sector de Manzanar está emplazado bajo una zona volcánica de la Cordillera de los Andes, a orillas del río Cautín y donde existe una exuberante vegetación. Estudios geológicos señalan que predominan lavas de basaltos de olivino, andesitas basálticas y rocas volcánicas.

Para el túnel ferroviario y en la boca sur se determinó que la parte superior de este está compuesto por una formación del grupo Plutónico Melipeuco, compuesto por monzogranitos, granodioritas, dioritas cuarcíferas y tonalitas con lavas basálticas y andesíticas mientras que la parte inferior esta compuesto por sedimentos inconsolidados e indiferenciados con interacciones piroclásticas.

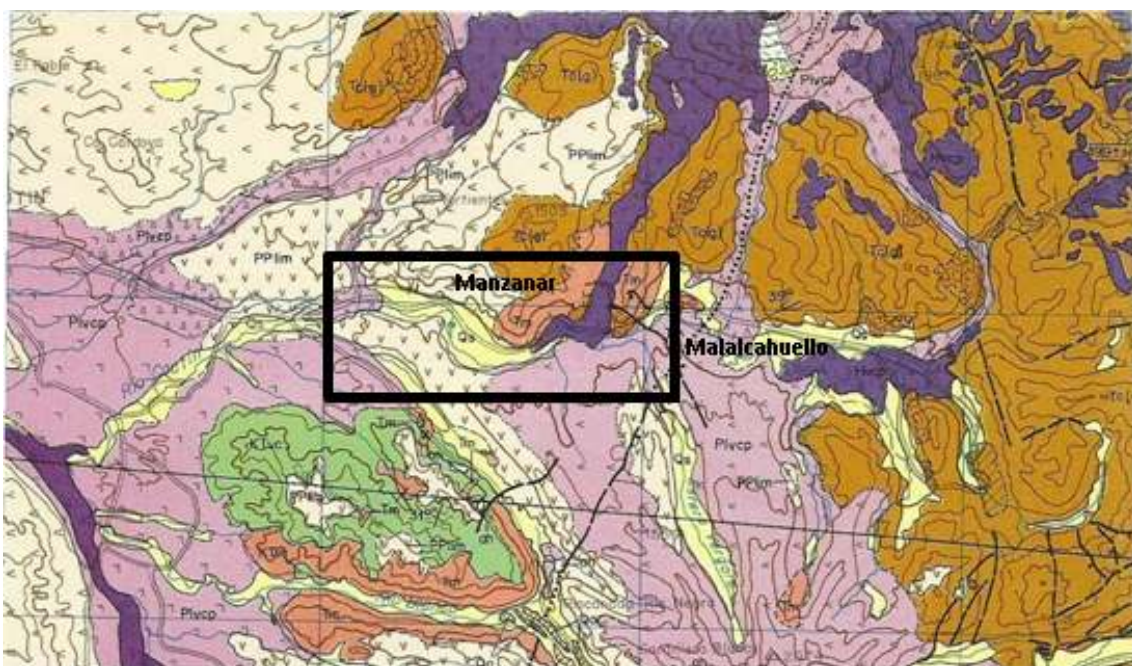


Figura 1.5: Mapa geológico de Curacautín[4], el rectángulo limita los sectores de Manzanar, el Túnel y Riachuelo.



Figura 1.6: *Afloramiento rocoso en un costado en la parte superior del túnel, imagen gentileza Arturo Belmonte*

Capítulo 2

Teoría sísmica

2.1. Esfuerzo y deformación

Para entender las ondas sísmicas debemos entender los conceptos de esfuerzo y deformación. El esfuerzo se define como la fuerza aplicada por unidad de área, estas fuerzas si son aplicadas de forma perpendicular a una superficie y que generan un cambio de volumen son llamadas *esfuerzos de compresión* o *tracción* por otro lado si esta fuerza es aplicada paralela a la superficie son llamados *esfuerzos de torsión*, *cizalle* o *corte* en cuyo caso producen un cambio en la forma de un objeto pero no en su volumen. La deformación y el esfuerzo se pueden relacionar mediante la ley de Hooke generalizada:

$$\sigma_{ij} = \sum_{kl} c_{ijkl} \epsilon_{kl} \quad (2.1)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.2)$$

Donde:

- c y u son el tensor de rigidez y el desplazamiento respectivamente.
- ϵ y σ son los tensores de deformación y esfuerzo respectivamente.

Si se asume que el medio es homogéneo e isotrópico es decir si sus propiedades elásticas son iguales en un punto y si estas propiedades no dependen de la dirección de los esfuerzos la ecuación se simplifica:

$$c_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{ij} \delta_{kl}) \quad (2.3)$$

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \Delta + 2\mu \epsilon_{ij} \quad (2.4)$$

Donde:

- Δ es el cambio de volumen.
- λ y μ los parámetros de Lamé.

Existe un conjunto de parámetros que permiten caracterizar o describir las propiedades físicas del material en un tipo de suelo, las comúnmente usadas son:

- **Primer parámetro de Lamé o constante (λ):** no tiene interpretación física pero junto con el segundo parámetro permiten caracterizar un tipo de material elástico lineal homogéneo e isótropo.
- **Segundo parámetro de Lamé o constante (μ):** también llamado módulo de corte, rigidez, cizalle, o elasticidad transversal.
- **Módulo de Young (E):** también llamado módulo de elasticidad longitudinal el cual es una proporción entre la fuerza y la deformación, lo cual permite determinar el estiramiento o la compresión de un material.
- **Módulo de rigidez (G):** también llamado módulo de elasticidad transversal el cual caracteriza el cambio de forma de un material el cual es sometido a esfuerzos cortantes.
- **Módulo de Bulk (K):** también llamado módulo de incompresibilidad el cual determina la proporción entre la presión aplicada y el cambio del volumen.
- **Coefficiente de Poisson (ν):** es una proporción entre la deformación transversal y longitudinal en un material elástico lineal e isótropo.

2.2. Ondas sísmicas

Una onda sísmica es una deformación que viaja a través de la tierra y es de tipo elástica, pues se propaga por un medio elástico que es el suelo. Existen dos tipos de ondas necesarias a considerar, estas son las ondas de cuerpo que viajan por el interior de la tierra y que poseen una trayectoria curva por refracciones con el cambio de densidad de la corteza y las ondas superficiales que se producen por la interacción de ondas de cuerpo con la superficie.

2.2.1. Ondas P

Es una onda de cuerpo longitudinal que se produce por un movimiento de compresión y tracción en el suelo en la misma dirección de propagación, viajan en materiales sólidos como líquidos. La velocidad de esta onda queda determinada por la ecuación:

$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.5)$$

Donde:

- λ y μ las constantes de Lamé.
- ρ la densidad del material.

Otra forma de esta ecuación es:

$$V_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2.6)$$

Donde:

- K es el módulo de incompresibilidad.
- μ el módulo de rigidez.
- ρ la densidad del material.

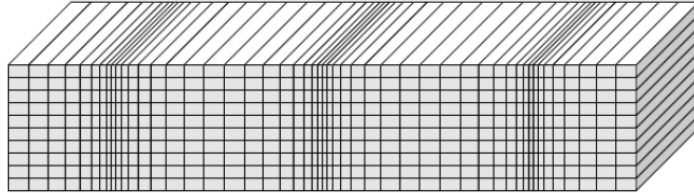


Figura 2.1: Representación clásica del compartimiento de una onda P.

2.2.2. Ondas S

La onda S o de corte es una onda de cuerpo transversal que se propaga solo en medios sólidos y que produce un movimiento perpendicular a la dirección en la cual se propaga. Su velocidad está determinada por la ecuación:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.7)$$

Donde:

- μ elasticidad transversal.
- ρ la densidad del material.

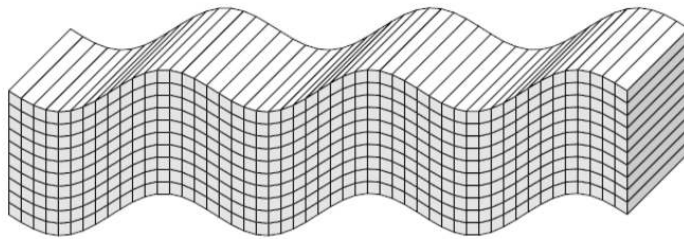


Figura 2.2: Representación clásica del compartimiento de una onda S.

El coeficiente de Poisson relaciona la velocidad de la onda P y S:

$$\nu = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \quad (2.8)$$

Donde:

- ν es el coeficiente de Poisson.

La elasticidad transversal se puede relacionar con el módulo de Young y el coeficiente Poisson:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (2.9)$$

Donde:

- G es el módulo de elasticidad transversal.
- E es el módulo de elasticidad longitudinal.

Por tanto la velocidad de la onda de corte se puede escribir de la forma:

$$V_s = \sqrt{\frac{E_\rho}{2(1 + \nu)}} \quad (2.10)$$

Las ondas S transportan mayor energía y son un indicador de la rigidez del suelo, mientras más rígido un suelo menor es la amplificación que sufre. El valor de la velocidad de la onda S es importante en geotecnia para la caracterización de suelo pues permite determinar el módulo de rigidez al esfuerzo cortante, inferir densidad, estimar esfuerzos así como cementación.

Una superficie libre es una superficie que separa dos semiespacios donde uno de ellos es vacío, el espacio superior en sismología es la atmosfera y el inferior la tierra sólida. Cuando existe una superficie libre es posible detectar ondas superficiales. Estas ondas viajan lentamente y su amplitud decae con la profundidad y su velocidad tiene dependencia con la frecuencia [10].

2.2.3. Ondas superficiales

Como ya es sabido las ondas viajan a través de un terreno, sin embargo existen otras que viajan más lentamente por la superficie que son producto de la interacción de las ondas de cuerpo que viajan en diferentes direcciones con la superficie y son evanescentes, es decir su amplitud es máxima en superficie y nula a grandes profundidades donde la amplitud decae exponencialmente con el incremento de la profundidad, en consecuencia son sensibles a la profundidad. Esto significa que cuando la longitud de onda es pequeña, la velocidad de fase dependerá de las propiedades de la(s) capa(s) superficial(es), mientras que si la longitud de onda es mayor, la velocidad dependerá de los estratos más profundos [11]. Esto implica que para estas ondas, el cambio de la velocidad con la profundidad provocará un comportamiento dispersivo, es decir, las ondas de diferentes frecuencias o diferentes longitudes de onda viajan con diferentes velocidades y esta propiedad se conoce como dispersión, donde el gráfico que muestra la variación de la velocidad de fase con la frecuencia se conoce como curva de dispersión, esta suele tener diferentes modos de vibración en donde la identificación correcta del modo fundamental (o modo 0) es uno de los problemas más recurrentes en la determinación de esta curva, sin embargo los métodos geofísicos basados en el análisis de ondas superficiales recurren a la característica dispersiva para caracterizar los suelos [13], pues la propiedad depende y entrega información de la estratigrafía del sitio y del perfil de velocidades de ondas de corte.

Las ondas superficiales al viajar más lento que la ondas cuerpo, poseen una frecuencia menor que estas y que en muchos casos coincide con la frecuencia natural de algunas edificaciones, lo

que en algunos casos puede producir resonancia mecánica que significa que un cuerpo, capaz de vibrar, que es sometido a una fuerza relativamente pequeña durante un tiempo y con un periodo de vibración que se acerca al periodo característico de dicho cuerpo, provoca que el sistema oscile y genere una amplitud más grande, lo que puede causar un daño devastador en estructuras sin aislación ni disipación sísmica.



Figura 2.3: Torre O'Higgins emplazada en el Concepción Metropolitano luego del terremoto 8,8 Mw. del 27 de febrero del año 2010, imagen personal.

2.2.4. Ondas Love

Es una onda del tipo superficial que se genera en un semiespacio por el acople de ondas SH (onda S con polarización horizontal), debido a las continuas reflexiones por la existencia de capas que varían con la velocidad, además de producir un movimiento horizontal de corte en la superficie.

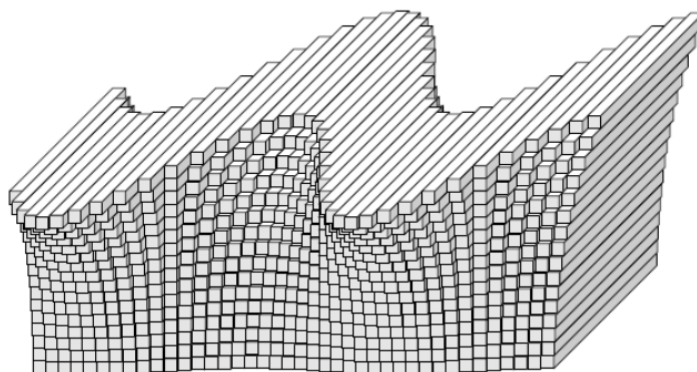


Figura 2.4: Representación clásica del comportamiento de una onda Love.

2.2.5. Ondas Rayleigh

Es una onda superficial producto de la interacción entre ondas P y S_v , es decir la polarización vertical de una onda S, estas producen un movimiento en sentido elíptico retrogrado (sentido horario) en la superficie, se caracteriza por ser de baja velocidad y frecuencia con una gran amplitud la cual va disminuyendo a profundidad. A partir de una profundidad de aproximadamente de un quinto de la longitud de onda el movimiento se vuelve progrado (sentido antihorario). Su velocidad de propagación se expresa:

$$V_r = 0,92V_s \quad (2.11)$$

Estas ondas se relacionan con fuentes de energía sísmica como explosiones, movimiento de vehículos, mareas y a terremotos considerándose como la principal causa de los daños en las estructuras.

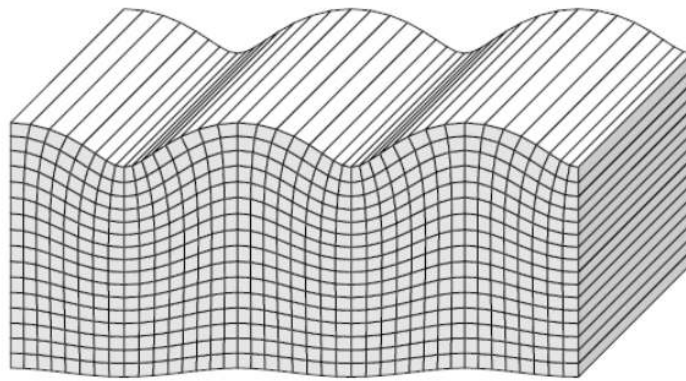


Figura 2.5: Representación clásica del comportamiento de una onda Rayleigh.

2.2.6. Ruido sísmico o microtremor

También llamados microsismos, microtemblores o microtrepidaciones esto consiste en vibraciones de la superficie de la Tierra, es decir son ondas principalmente de cuerpo S y superficiales Rayleigh viajando en distintas direcciones con la misma energía que pueden ser de origen natural o cultural, como el tráfico vehicular o la actividad humana variando por lugar y la frecuencia con un periodo menor a 1 o 2 segundos [7].

Los microtremores ocurren en el intervalo de los 0.01 a 30 [Hz] esto se puede resumir básicamente:

- Bajo frecuencias de 0.3 [Hz] los microtremores son causados por fenómenos naturales como olas oceánicas a grandes distancias, ciclones o corrientes de viento [1].
- Entre 0.3 a 1 [Hz] son causados por oleaje que rompe en las costas.
- Para frecuencias mayores de 1 [Hz] el microtremor es producido por actividad humana.

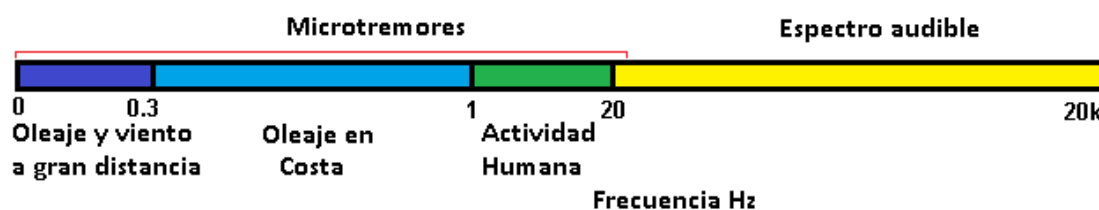


Figura 2.6: Espectro de frecuencia para microtremores. Las ondas Rayleigh ocupan la banda entre los 0.1 a 10 [Hz], es aquí donde la exploración geofísica puede estimar modos y velocidades de propagación.

2.3. Métodos de exploración

2.3.1. Métodos activos

Los métodos activos requieren de una fuente de energía artificial que genere las ondas sísmicas, como los explosivos y son útiles para la exploración a profundidades cercanas a los 10 o 20 [m]. Con una fuente sísmica más poderosa es posible la exploración a profundidades mayores. Los más frecuentemente utilizados son:

- SASW (Análisis espectral de Ondas Superficiales)
- MASW (Análisis Multicanal de Ondas Superficiales)

2.3.2. Sísmica de refracción

La sísmica de refracción consiste en generar una onda sísmica de origen artificial en un punto establecido como punto de golpe, disparo o *shot* para luego medir el tiempo que demora esta onda en llegar a los sensores (geófonos) en un arreglo conveniente (comúnmente lineal). Se sabe que la primera onda en llegar es una onda directa, sin embargo mientras más es la distancia con respecto al punto de golpe, la primera llegada corresponderá a una onda que se ha refractado en una capa de mayor profundidad y de mayor velocidad. El arreglo de geófonos es conectado a un equipo de registro como un sismógrafo del cual se extraen los datos necesarios para construir un sismograma para cada sensor del cual se extrae los tiempos de llegada de la primera onda u onda P, con ello se puede saber los tiempos de llegada a cada sensor y su posición con lo cual se podrá encontrar la velocidad con que viajó la onda sísmica en las distintas capas del suelo en estudio, este gráfico se conoce como *dromocronas*.

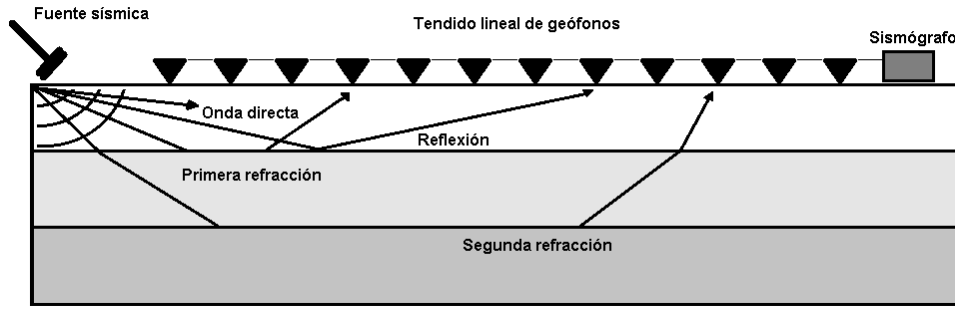


Figura 2.7: Tendido clásico de geófonos en la sismica de refracción y un martillo como fuente, punto de golpe o shot.

Matemáticamente la sismica de refracción en un comienzo se fundamenta con la Ley de Snell, esta ley señala que cuando una onda incidente con velocidad V_1 llega a una interface, esta viajará en el segundo medio con velocidad V_2 y la relación entre estas velocidades estará dada por la ecuación:

$$\frac{\sin(i_1)}{V_1} = \frac{\sin(i_2)}{V_2} \quad (2.12)$$

Como se mencionó, la sismica de refracción consiste en detectar las primeras llegadas de las ondas sísmicas, estas ondas pasan desde una interface a otra cambiando las velocidades y sus ángulos de incidencia, hasta llegar a una interfaz con un ángulo crítico de 90 grados y en donde la onda se devuelve a la superficie. De acuerdo a la Ley de Snell, el ángulo crítico es:

$$\sin(i_c) = \frac{V_1}{V_2} \quad (2.13)$$

La onda directa tiene un tiempo de llegada determinado por:

$$t_d = \frac{X}{V_1} \quad (2.14)$$

En donde:

- X es la distancia de los geófonos.
- V_1 es la velocidad de la onda en la interfaz.

La onda reflejada tiene un tiempo determinado por:

$$t_{reflejada} = \frac{2}{V_1} \sqrt{\left(\frac{X}{2}\right)^2 + h_1^2} \quad (2.15)$$

En donde:

- h_1 es la profundidad de la interfaz.

Por otro lado la onda refractada tiene un tiempo determinado por:

$$t_{refractada} = \frac{X}{V_2} + \tau \quad (2.16)$$

La ecuación anterior representa una recta en donde:

$$\tau = 2h_1 \sqrt{\frac{1}{V_1^2} - \frac{1}{V_2^2}} \quad (2.17)$$

Lo cual, en una gráfica X e Y representa la intersección, con una pendiente dada por $\frac{1}{V_2}$.

El tiempo de retardo corresponde a la diferencia entre el tiempo invertido por una onda a través de un estrato superior y el tiempo que toma en viajar a lo largo de la interfaz refractora. Esto se determina como:

$$\Delta t_d = \frac{1}{2}(t_{d1} + t_{d2} - t_t) \quad (2.18)$$

En donde:

- t_{d1} y t_{d2} son los tiempos de viaje.
- t_t el tiempo total.

La profundidad asociada a los tiempos de retardo es dada por :

$$h_d = \frac{\Delta t_d V_0}{\cos(i_c)} \quad (2.19)$$

El método de refracción sísmica es muy utilizado en las investigaciones de subsuelo y tiene los siguientes alcances principales:

- Permite la caracterización de suelo para obras civiles.
- Permite la caracterización de macizos rocosos.
- Permite la identificación de rellenos artificiales.
- Obtención de módulos dinámicos de elasticidad de suelo mediante velocidad de onda P y S.

Sin embargo como todo método existen limitantes, estas son:

- El método asume que la velocidad de propagación aumenta con la profundidad por tanto no es posible determinar capas intermedias de menor velocidad
- Se necesitan zonas descubiertas para el establecimiento de un tendido.

2.3.3. Métodos pasivos

Los métodos pasivos no requieren de una fuente sísmica y se basan en los microtremores. Estas ondas superficiales permiten evaluar la conformación como la frecuencia fundamental y amplificación del suelo utilizando arreglos instrumentales que pueden registrar la componente vertical o las tres componentes del movimiento. Los más frecuentemente utilizados son:

- Relación espectral H/V
- SPAC (Técnica de autocorrelación espacial)
- F-K (Técnica-frecuencia número de onda)

2.3.4. Refracción por microtremor (ReMi)

El método es propuesto por John Louie [5] y consiste en determinar la distribución de los valores de la velocidad de onda S a través de un terreno mediante un análisis espectral de ruido sísmico o microtremor. La técnica es ampliamente utilizada en geotecnia por tener la ventaja de ser sencilla, rápida y de bajo costo en relación a otras y con lo cual se puede conseguir una comprensión eficaz de las propiedades dinámicas de un terreno. La base teórica es la misma que los métodos SASW y MASW, sin embargo la técnica puede combinar fuentes sísmicas pasivas como activas, pues el método se basa en la detección de microtremores en lugares silenciosos, sin embargo se pueden generar fuentes activas como explosiones o el golpe de un martillo sobre el suelo. La detección y registro se realiza con un arreglo variable de sensores llamados geófonos en donde el largo del tendido entrega una idea de la profundidad a la cual se podría prospectar [8] según la expresión:

$$\frac{L}{2} < D < \frac{L}{3} \quad (2.20)$$

Donde:

- L es el largo del arreglo.
- D la profundidad máxima estimada.

Junto con un equipo de registro común en la refracción sísmica de ondas P superficiales, se puede realizar un registro de un espectro de frecuencias que está entre los 2 a los 26 [Hz] aproximadamente consiguiendo un perfil de profundidad cercano a los 100 [m]. El registro realizado es sometido a una transformada en dos dimensiones de lentitud y frecuencias conocida como transformada $(p - f)$ que logra separar las ondas Rayleigh de otras ondas sísmicas y permite determinar la velocidad de fase de las velocidades aparentes [5]. Se sabe que las señales registradas suelen estar alteradas por la presencia de vibraciones ambientales o ruido por esta razón se puede apilar estas señales en el dominio de la frecuencia lo que permite reducir el ruido presente en la señal y obtener un mejor registro, por otro lado existe una variedad de combinaciones de arreglos de geófonos y variaciones de frecuencia de geófonos entre 2 a 40 [Hz], además de distintas fuentes de ruido que se pueden utilizar para el registro, lo que permite una buena profundidad y caracterización de un suelo.

El proceso metodológicamente en resumen consiste en un análisis espectral de velocidades, la selección o *picado* de la dispersión fase-velocidad de la onda Rayleigh, el posterior modelado de un perfil de velocidad de onda S y la obtención de un parámetro V_{s30} .

2.4. Análisis espectral de velocidad

El análisis espectral se basa en una transformación $(p - \tau)$ o *slant - stack* descrito por Thorson y Claerbout (1985) [12], la cual toma registros de amplitudes de relación distancia-tiempo y las convierte en amplitudes en relación a un parámetro de rayo p (inverso de la velocidad aparente) y un intercepto de tiempo (τ) . Matemáticamente la transformada (p, τ) es una integral de línea a lo largo de un registro sísmico $A(x, t)$ con distancia x y tiempo t :

$$A(p, \tau) = \int_x A(x, t = \tau + px) dx \quad (2.21)$$

Donde $p = \frac{dt}{dx}$ es una pendiente, que es el inverso de la velocidad aparente (V_a) en dirección x , discretizada en intervalos nx en un espaciamento finito dx de la forma $x = jdx$, con j como un entero al igual que el tiempo de la forma $t = idt$ con i como entero, lo que constituye una transformada discreta para valores positivos y negativos de $p = p_o + ldp$ y $\tau = kdt$.

$$A(p, \tau) = \int_x A(x, \tau) dx \quad (2.22)$$

$$A(p, \tau) = \sum_{j=0, nx-1} A(x = jdx, \tau = idt) \quad (2.23)$$

$$A(p_o + ldp, kdt) = \sum_{j=0, nx-1} A(x = jdx, \tau + px) \quad (2.24)$$

Donde p_o define el inverso de la velocidad mínima que va desde $-p_{max}$ a p_{max} con incrementos de lentitud de $2np$ y dp puede variar entre 0.0001 a 0.0005 $[\frac{seg}{m}]$, esto determina la energía que se propaga en ambas direcciones a lo largo de la línea de refracción. Las amplitudes y tiempos $t = t + px$ varían entre los puntos de tiempo muestreados mediante interpolación lineal [5].

Para la traza $p - \tau$ en $A(p, t)$ se calcula la transformada de Fourier compleja $F_A(p, f)$ en la dirección τ según lo descrito por McMechan y Yedlin (1981)[6]:

$$F_A(p, f) = \int_{\tau} A(p, \tau) e^{-i2\pi f\tau} d\tau \quad (2.25)$$

La transformada discreta:

$$F_A(p, f) = \sum_{k=0}^{nt-1} A(p, \tau) e^{-i2\pi f/tau} \quad (2.26)$$

Con $f = mdf$ y $\tau = kdt$

Del cuadrado de la transformada de Fourier compleja se puede determinar el espectro de potencia $S_A(p, f)$ [5]:

$$S_A = (p, f) = F_A^*(p, f) F_A(p, f) \quad (2.27)$$

Donde:

- F_a^* la conjugada compleja.

Con esto se transforma el registro de espacio distancia-tiempo ($x-t$) al de lentitud-frecuencia ($p-f$). El parámetro de rayo p , para estos registros, es el componente horizontal de lentitud (inverso de la velocidad) a lo largo del arreglo. Para analizar más de un registro, a partir de un despliegue de refracción de microtemores, las imágenes ($p-f$) de los registros individuales $S_{An}(p, f)$ son sumados punto por punto en una imagen de potencia:

$$S_{total}(|p|, f) = \sum_n S_{An}(|p|, f) \quad (2.28)$$

Por tanto, el análisis lentitud-frecuencia ha producido un registro de la potencia espectral total en todos los registros de un sitio que se grafica en los ejes ($p-f$), con esto se puede indentificar las tendencias en donde una fase es coherente, con una clara visión de la potencia y con ello determinar la curva de dispersión.

La pendiente distintiva de las ondas dispersivas es una gran ventaja en los análisis ($p-f$). Otras llegadas que aparecen en los registros de microtemores, como las ondas corpóreas y de aire, no pueden poseer tal pendiente, incluso en un registro sísmico en donde la mayoría de la energía tiene una fase distinta a la de las ondas Rayleigh, los análisis ($p-f$) separarán esa energía de las curvas de dispersión, que esta técnica interpreta con el gráfico lentitud-frecuencia [3]. Se puede añadir que la transformada ($p-\tau$) actúa como un filtro pasa-bajo sobre las amplitudes en los datos, sin embargo, este filtro no distorsiona o influye en las frecuencias, la transformada apila cada tiempo de intercepto τ a lo largo de líneas paralelas, por lo que no ocurre ninguna distorsión de la frecuencia.

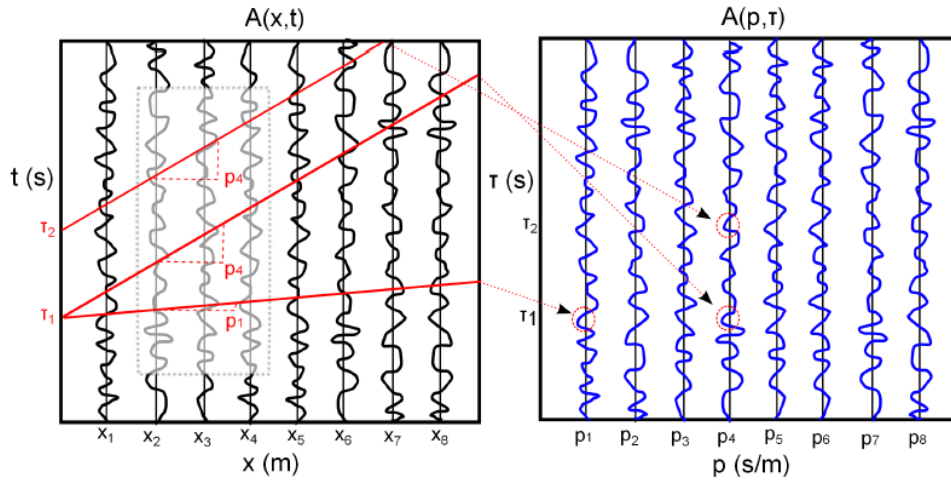


Figura 2.8: La transformada *slant-stack* suma las amplitudes encontradas en el camino descrito por una recta de pendiente p e intercepto t , el valor encontrado es llevado a una nueva traza sísmica correspondiente a un punto de coordenadas lentitud p y tiempo t [2]

2.4.1. Dispersión fase-velocidad Rayleigh

La imagen espectral indica la energía asociada a la onda Rayleigh que describe una envolvente de alta tasa espectral que va desde las bajas frecuencias a las altas. Frecuentemente la curva es clara entre los 2 a 14 [Hz] y en general, con la imagen espectral ($p-f$) es posible determinar directamente la velocidad promedio a los 30 metros de profundidad, para sitios

blandos a los 4 [Hz] y para sitios rígidos a los 8 [Hz] aproximadamente.

La elección de la curva de dispersión no es trivial, ya que el picado no se realiza directamente en el peak del espectro, la selección se hace a lo largo de la envolvente de baja velocidad, bordeando la energía que aparece en la imagen espectral, no se deben seleccionar las zonas donde no hay un pick definido. Para limitar la envolvente lo largo de la frecuencia se debe realizar en una velocidad de fase baja, donde la tasa espectral comienza a separarse de las tasas bajas de ruido incoherente, en donde la tasa aumenta abruptamente o se nivela y en una alta velocidad de tope en el pick de la tasa espectral.

Se debe mencionar y como ya es sabido que el método utiliza el ruido ambiental, el cual llega en todas direcciones y cuya energía llega con un ángulo determinado al arreglo de geófonos, puede sobre estimar las velocidades dejando ver en la imagen espectral una velocidad aparente mayor a la real. La velocidad aparente esta dada por:

$$V_a = \frac{V}{\cos(\alpha)} = \frac{1}{P} \quad (2.29)$$

Donde :

- V_a velocidad aparente.
- α ángulo con el cual arriba la onda.
- V velocidad real.
- P lentitud aparente.

Las ondas que poseen entre el 80 - 100 % de la velocidad real de la onda, llegan con un ángulo de incidencia entre 0 - 25 grados y corresponden al 40,9 % de las ondas que llegan al arreglo de geófonos.

El modelo de una curva de dispersión realizado por una persona experta y con dedicación, puede generar mucha información y más representativa para la construcción de un modelo de velocidad en una zona específica que en los procedimientos automatizados, minimizando el error en los casos de inversiones de velocidades falsas. También se debe agregar que para modelar las curvas de dispersión Rayleigh se debe considerar información de las velocidades de la onda P y densidades, sin embargo los experimentos que se han realizado utilizando la herramienta de modelado interactiva común, muestran que aunque hayan grandes cambios en el módulo de Poisson o en la densidad, las velocidades modeladas no cambiarán considerablemente en el proceso de ajuste en el espectro de velocidad de la onda Rayleigh [5], con lo que se puede concluir, que las curvas de dispersión Rayleigh pueden ser utilizadas como indicadoras y con cierta cantidad de exactitud en el comportamiento de la velocidad de la onda S, pero no en el caso del comportamiento superficial de la velocidad de la onda P.

2.5. Norma Chilena de clasificación sísmica

Antes del año 2010 la norma chilena Nch433 clasificaba el suelo en cuatro categorías (I, II, III, IV). El terremoto del 27 de febrero del año 2010 el cual fue de 8.8 [Mw] y que azoto

fuertemente parte del territorio centro-sur chileno y en especial, en la Región del Bío Bío muchas estructuras de gran envergadura resultaron dañadas y otros terminaron en el colapso, ejemplo de ello fue el edificio Alto Río en donde hubo una cantidad de heridos y de 8 fallecidos [17].



Figura 2.9: Edificio Alto Río luego del terremoto 8,8 [Mw] del 27 de febrero del año 2010, imagen personal.

Como consecuencia de esto, la establecida norma fue modificada bajo el decreto supremo el 5 de noviembre del año 2010 con ello se estableció una clasificación del suelo en 5 categorías. Esta norma fue nuevamente sometida a modificación el 2 de noviembre del 2011, con ello se exigió tener conocimiento de la velocidad promedio de onda S en los primeros 30 [m] de profundidad conocido como el parámetro V_{s30} . Este parámetro es la velocidad promedio del suelo en los primeros 30 [m] el cual se calcula de acuerdo a la ecuación:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{V_{si}}} \quad (2.30)$$

Donde

- V_{si} velocidad de onda S en el estrato i en $[\frac{m}{s}]$.
- z_i espesor de estrato i en [m].
- n número de estratos en los 30 [m] superiores del terreno.

El decreto 61, artículo 6 del reglamento que fija el diseño sísmico de edificios señala que bajo la experiencia empírica y teórica, el mejor comportamiento sísmico se observa en terrenos de afloramiento rocoso y el mayor daño en terrenos de suelos finos blandos. Consecuentemente, la clasificación sísmica del terreno de fundación considera niveles que van desde el de mejor comportamiento (Suelo Tipo A) al de mayor exigencia sísmica (Suelo Tipo E).

Existen suelos que por sus propiedades geotécnicas singulares no permiten ser categorizados sísmicamente sólo por V_{s30} y por tanto requieren estudios especiales. Estos suelos son los siguientes:

- Suelos potencialmente licuables, entendiendo por ellos las arenas, arenas limosas o limos, saturados, con índice de penetración estándar N_1 , menor que 20 golpes/pie (normalizado a la presión efectiva de sobrecarga de 0.10 MPa).
- Suelos susceptibles de densificación por vibración.
- Suelos colapsables.
- Suelos orgánicos.
- Suelos finos saturados y de límite líquido (LL) con $LL > 80$ y de espesor > 20 [m].
- Suelos finos saturados de sensibilidad mayor a 10.

Quedan fuera de la clasificación sísmica aquellos terrenos con topografía irregular, donde pueden existir fenómenos de amplificación local, los cuales no están cubiertos por la clasificación. De acuerdo al comportamiento sísmico esperado se han definido los tipos de suelos, para los cuales se establecen las propiedades geotécnicas de requisito mínimo en cada caso. La definición de los tipos de suelos asociados a la clasificación sísmica de suelos se establece de acuerdo a la siguiente tabla:

Categoría	Suelo	Tipo V_{s30} [m/s]
A	Roca, suelo cementado	≥ 900
B	Roca blanda o fractura, suelo muy denso o muy firme	≥ 500
C	Suelo denso o firme	≥ 350
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180
F	Suelos especiales	*

Cuadro 2.1: Clasificación sísmica del terreno de fundación, parámetros extraídos del decreto 61, artículo 6 de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

Capítulo 3

Metodología

3.1. Instrumentación

Para el estudio realizado en Universidad de Concepción, Riachuelo, Manzanar y el túnel se utilizó:

- **Geode** modelo Stratavisor NZXP perteneciente a la compañía GEOMETRICS, el cual es un equipo compacto que posee una CPU junto con un software para tratar los registros sísmicos.



Figura 3.1: *Equipo de registro sísmico Geode.*

- **Batería** de 12 [v] y 100 [A/h] para el equipo Geode.

Figura 3.2: *Bateria 12 [v].*

- **Martillo** utilizado como fuente sísmica y acondicionado con un sensor para detectar el punto de *shot* en el Geode.

Figura 3.3: *Martillo utilizado en terreno (a) y detalle del sensor (b).*

- **Placa de acero** utilizada para golpear el suelo y producir una onda sísmica más clara.

Figura 3.4: *Placa de acero.*

- **Geófonos** de frecuencia resonante de 14 [Hz] el cual es un transductor de velocidad, es decir una bobina suspendida en un sistema de resortes que se mueve en un campo magnético generado por un imán permanente, el geófono posee una punta para ser enterrado así como un soporte de acero para superficie planas ambas desmontables.

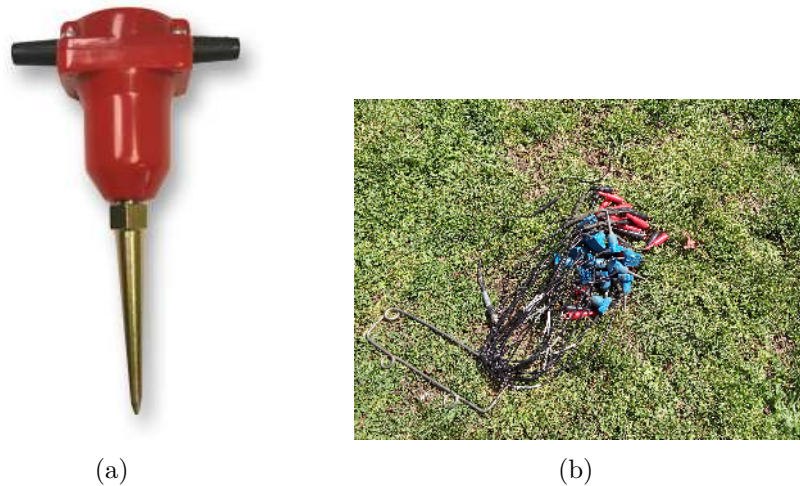


Figura 3.5: Geófono de frecuencia de resonancia de 14 [Hz] (a) y el conjunto utilizado en terreno (b).

- **Cable sísmico** con una longitud de 120 [m] el cual suministra energía a cada geófono y para el sensor del martillo.



Figura 3.6: Cable sísmico para geófonos (negro) y para martillo (naranja) (a) y detalle de la conexión entre los cables del geófono al cable sísmico (b).

3.2. Software

- **Geopsy** el cual se utilizó básicamente en la conversión de archivos con extensión *.dat* extraídos desde el equipo Geode a un formato que pueda utilizarse en MatLab como es el *.txt*
- **Dinver** para la inversión de la curva de dispersión y extraer la información requerida para construir un perfil vertical de velocidad de onda S. Este software de libre distribución implementa el algoritmo de vecindad (Neighbourhood Algorithm) [15] y [16]. Este algoritmo [9] es un método de búsqueda de modelos que se ajusten aceptablemente a mediciones, dentro de un espacio multidimensional de parámetros y en donde se realiza una comparación entre una curva de dispersión calculada y una experimental con un cálculo de un valor de desajuste (misfit)[2].

- **Matlab** para obtener a partir de los datos un espectro de frecuencia, la curva de dispersión y las gráficas para un perfil vertical de velocidad de onda S junto con el V_{s30} promedio.

3.3. Terreno y procesamiento

En la refracción de microtemores no es necesario una fuente sísmica artificial, sin embargo en algunos casos se usa como fuente un mazo de entre 4 a 7 [Kg] que golpea una placa metálica. El registro necesita establecer la posición de la fuente sísmica con respecto al tendido de geófonos. En el registro por microtemores el ruido urbano es el que contiene la energía de las ondas de cuerpo y superficiales siendo estas últimas las que son extraídas en el procesamiento de las señales. Para la detección es necesario como un tipo de sensor llamado comúnmente geófono el cual es una bobina suspendida en resortes sometida a un campo magnético producido por un imán que al moverse por el desplazamiento del suelo produce una corriente eléctrica proporcional a la velocidad con que se movió la bobina. El geófono detecta el movimiento en todas las componentes, sin embargo el más común es la detección de la componente vertical. Las frecuencias para el caso de microtemores son de 2 a 4.5 [Hz]. El número de geófonos necesarios es una elección, comúnmente es de 12 a 24 para exploraciones simples que se conectan entre ellos con un cable y espaciamento que depende de la técnica. Para el registro se debe utilizar un sismógrafo multicanal conectado al cable, es común usar un software asociado al sismógrafo en donde se ingresan los parámetros de adquisición como el tiempo de muestra, longitud de registro y filtros a usar, canales, posición de la fuente entre otros.

Según las especificaciones por Louie [5] para la sísmica de refracción por microtemor se utiliza un arreglo usando 24 geófonos con espaciamento de entre 8 y 10 [m] pero también es posible con 5 [m]. La profundidad de la prospección depende del largo del tendido por otro lado el registro se debe hacer con filtros desactivados y con una duración entre 4 y 60 segundos [s] con muestreo de 2 a 10 milisegundos [ms] y según esto el método puede llegar a los 100 [m] de profundidad bajos las condiciones ideales planteadas y dependiendo de la fuente de energía del ruido.

Para el procesamiento de las señales es común usar los softwares de pago ReMiVspect, SeisOpt ReMi, RemiDipsert y MatLab, sin embargo para este trabajo y como se mencionó anteriormente se utilizó el software de libre distribución Geopsy, el módulo Dinver y los programas REMI.m y VS-VS30.m contruidos para ser utilizados con MatLab.

3.3.1. Etapa I: Geopsy (Conversión de formato)

Los datos entregados por el sismógrafo son en formato SEG-2 con extensión .dat y su lectura y visualización se deben realizar en Geopsy en donde se visualiza la señal y se puede ajustar. Los archivos de ruido sísmico SEG-2 se deben convertir a ASCII con extensión .txt para tener un archivo de texto que tenga las señales de cada geófono en serie de tiempo, para ello se selecciona el conjunto de datos en Geopsy mediante el menú FILE>Import signals>FILE

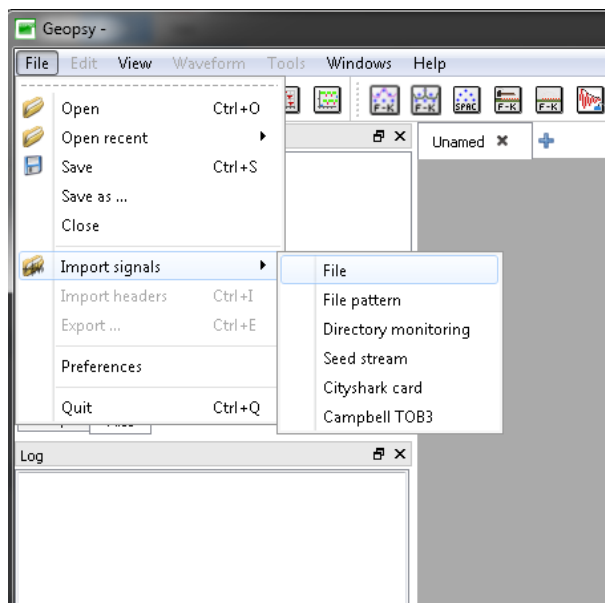


Figura 3.7: Importación de datos.

Con ello se carga el archivo y se puede desplegar una ventana que muestra la señal.

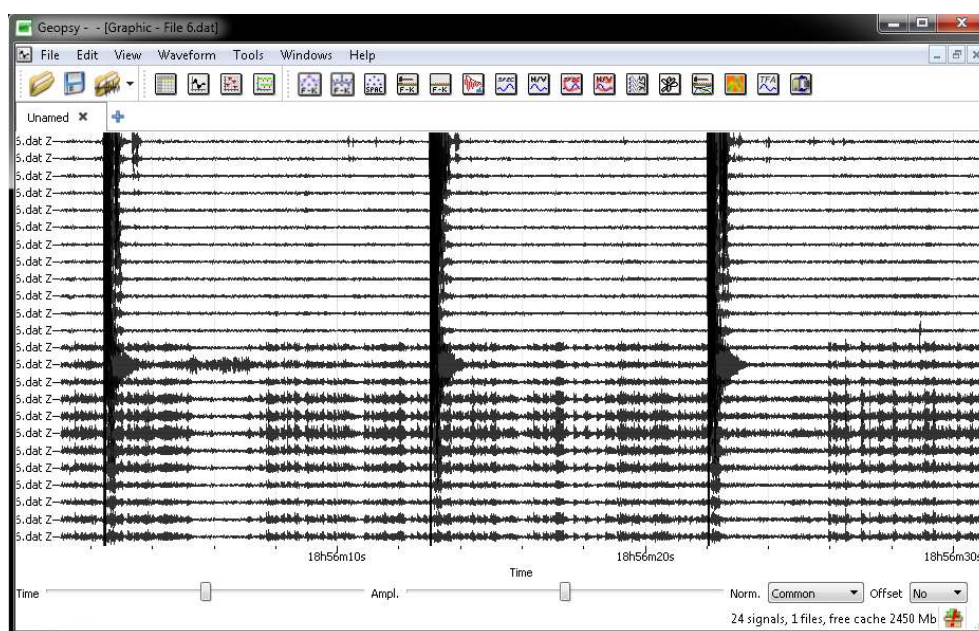


Figura 3.8: Vista previa de la señal.

Luego debemos seleccionar en el menú FILE >Export... la opción Ascii multicolumns (no header) para exportar el archivo .dat cargado y ahora dándole la extensión .txt. Este archivo más la posición de los geófonos y tiempo de muestreo son los parámetros para la rutina REMI.m. Con esto podemos cerrar Geopsy y pasar a la etapa siguiente.

3.3.2. Etapa II: MatLab

Para el procesamiento de imágenes se debe utilizar la rutina REMI.m que transformará los registros sísmicos en imágenes espectrales para ello el programa al cargarlo solicitará:

- Cargar archivo.
- Número de geófonos.
- Distancia entre geófonos en metros.
- Tiempo de muestreo en segundos.

Los datos quedarán almacenados en una matriz A de tamaño (nt) x (nx), donde (nt) es número de muestras y (nx) el número de geófonos. Se debe considerar que el número de elementos del vector X sea igual al número de columnas de la matriz A. Se crean 3 vectores, estos son:

- T: Vector columna de nt elementos que contiene tiempos de muestreo en segundos [s].
- P: Vector fila de np elementos que contiene las lentitudes [s/m].
- F: Vector columna de las frecuencias en [Hz].

Luego se aplica una normalización al registro dividiendo cada elemento de A por el máximo absoluto de la columna correspondiente, y una centralización que es restar a cada elemento de A el valor de la media aritmética de la columna correspondiente.

A continuación se aplica la operación *slant – stack* que consiste en tomar el primer valor del vector lentitudes P y efectuar un cálculo de tiempo $t = PX + T$ para todos los valores de posición y tiempo de intercepto usando una función *repmat* de MatLab para generar matrices que se puedan sumar de tamaño arrojando una matriz t de tamaño (nt) x (nx) donde cada fila contiene los tiempos calculados.

Luego se buscan los tiempos que coinciden con los tiempos de muestreo original, extrayendo el valor de amplitud correspondiente de la matriz A, considerando que si el tiempo es menor o mayor a los límites del vector T se asigna una amplitud nula y si se encuentra entre dos tiempo de muestreo consecutivos se interpolan linealmente, posteriormente se suman las amplitudes encontradas en los tiempos calculados en la dirección de la posiciones resultando una matriz B que contiene todas las amplitudes, donde cada fila corresponde a un tiempo de intercepto y cada columna una lentitud.

A continuación se aplica la transformada de Fourier compleja a la matriz B utilizando la función de MatLab *fft* para luego calcular el espectro de potencias S, para esto se utiliza la función de MatLab *fliplr* que permite sumar espectros de potencias de valor negativo y positivos resultando una matriz SA y para finalizar se calculan las tasas espectrales que construyen una matriz R.

Usando la REMI.m se generará la imagen espectral a partir de la matriz R obtenida anteriormente.

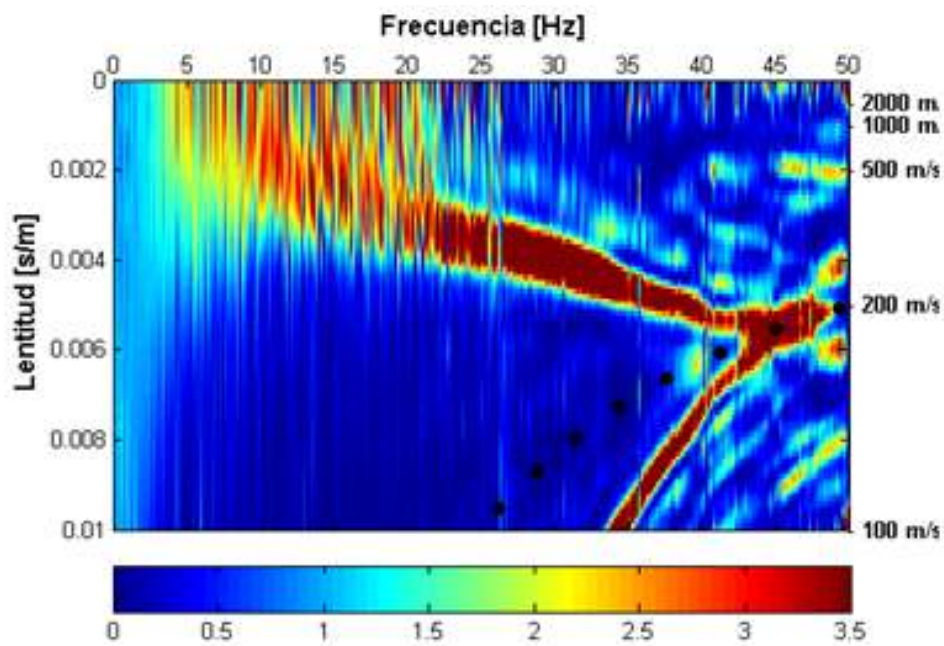


Figura 3.9: Imagen espectral en la cual el color cálido indica una mayor tasa de energía. Nótese también que la línea punteada representa el límite teórico el cual indica que la información de la zona que está bajo este límite ya no es confiable.

El programa en la “Command Window” pregunta si desea guardar la imagen recientemente obtenida o cancelar, en caso afirmativo se le da un nombre y preguntará si se desea continuar para seleccionar la curva de dispersión mediante una selección de puntos o *picado*.

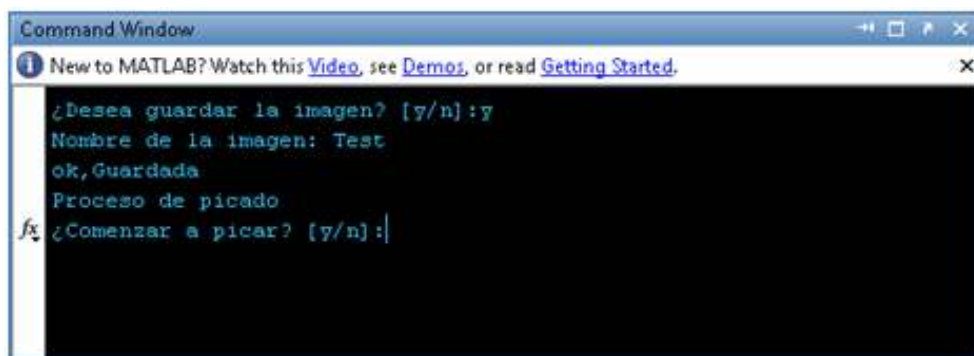


Figura 3.10: “Command Window” en MatLab.

En caso afirmativo se despliega una ventana para cargar la anterior imagen guardada y se procede a extraer una curva de dispersión, para ello se deben construir 3 curvas lo más representativas para sacar una interpolación. Con el botón izquierdo del mouse se van generando los puntos y con el derecho se termina el proceso para una curva, se debe procurar no cometer errores al ir clickeando los puntos, en caso de error se deberá ir al script y ejecutarlo desde la etapa de *picado* lógicamente repitiendo proceso.

El criterio de selección de una curva de dispersión es marcar la zona donde existe un aumento de la tasa espectral y separada del ruido, para esto, en la práctica se observa y se escoge la tendencia de dispersión, la cual busca seleccionar los puntos que se encuentran en la transición azul, verde y rojo que representa el modo fundamental de la onda Rayleigh, la selección se hace bordeando el espectro de energía de la imagen frecuencia- lentitud.

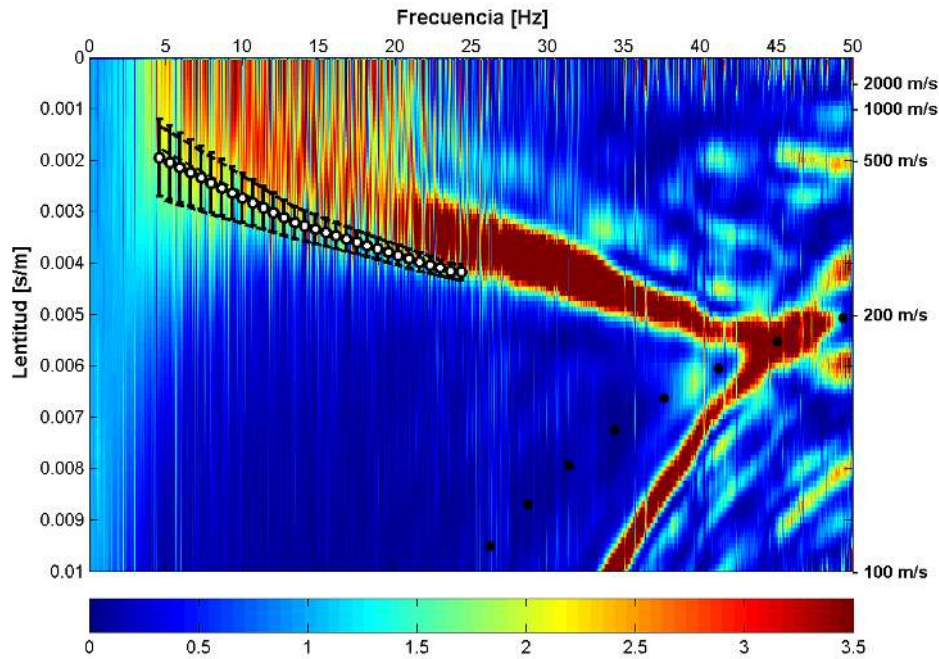


Figura 3.11: *Ejemplo de selección de curva de dispersión.*

La imagen con la curva seleccionada se guarda automáticamente en la carpeta de trabajo junto con un vector con extensión `.disp`. Con esto se cierra esta etapa en MatLab.

3.3.3. Etapa III: Dinver (Proceso de inversión)

Teniendo la curva de dispersión se realiza la inversión utilizando el software Dinver perteneciente a Geopsy aquí se grafica la curva y se ajusta junto a los parámetros necesarios como velocidad de onda S, de onda P y de densidad para generar el modelo de inversión de acuerdo a los condicionamientos necesarios.

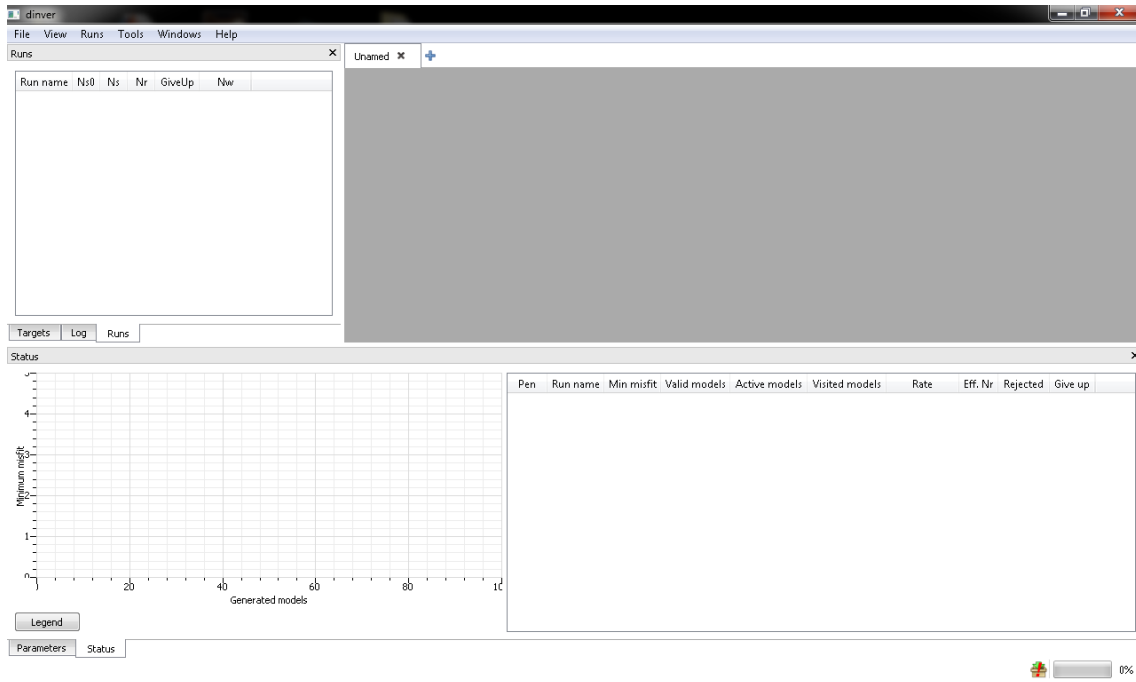


Figura 3.12: Vista general de los paneles en Dinver.

Para esto se ejecuta Dinver y en la sección *Targets* se debe marcar la opción dispersión junto a estos dejar los valores de *Misfitweight* y *Min.Misfit* por defecto 1 y 0 respectivamente. Luego se cliquea la opción *Set* y se desplegará un panel en el cual se marca la opción *Load* que permitirá cargar el archivo con extensión *.disp* generado anteriormente en MatLab el cual nos muestra la curva con la frecuencia y lentitud respectiva.

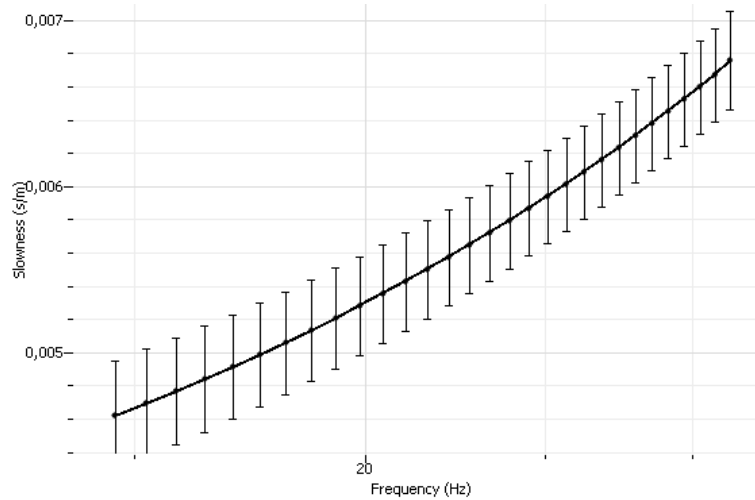


Figura 3.13: Curva de dispersión en Dinver.

Se debe señalar que se pueden obtener valores $\lambda_{max}[m]$ y $\lambda_{min}[m]$ desde la curva de dispersión, los cuales permiten calcular $Z_{\lambda_{max}}[m]$ y $Z_{\lambda_{min}}[m]$. Estos se calculan como:

$$Z_{\lambda_{max}}[m] = \frac{\lambda_{max}}{2} \quad (3.1)$$

$$Z_{\lambda min}[m] = \frac{\lambda_{min}}{2} \quad (3.2)$$

Según Carteu 2013 [2] se pueden realizar restricciones a esta curva, la cual se puede condicionar entre una frecuencia de 2 y 20 [Hz] idealmente, para ello se debe ir a la opción *Edit* y se desplegará una ventana donde ponemos el valor mínimo y máximo de frecuencia.

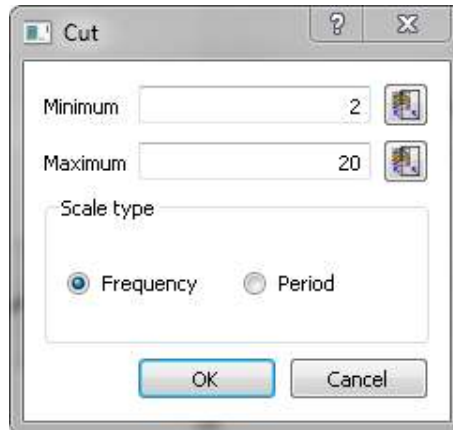


Figura 3.14: Ventana en Dinver para ajuste de valor máximo y mínimo para la curva de dispersión.

Luego es posible realizar un resampleo de la curva, uno óptimo es de 50 de forma logarítmica de manera que el proceso de minimización ajuste las bajas frecuencias de igual manera que las altas, para ello en la opción *Edit* se marca la opción *Resample* y se desplegará una ventana donde se muestra la opción *Samplecount*.

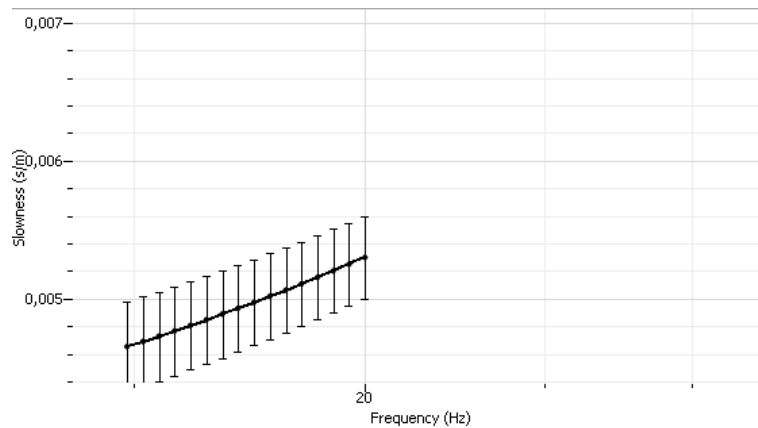


Figura 3.15: Curva de dispersión truncada luego del ajuste.

Teniendo esto podemos generar los modelos de capas los cuales pueden ser por defecto (inversion simple o no acotada) o acotada, para ello en la parte inferior en la opción *Parameters* nos da la opción de añadir parámetros y condiciones para modelos de capa los cuales son velocidad de onda P, velocidad de onda S, radio de Poisson y densidad (para estos dos últimos, en este trabajo se usaron los valores por defecto).

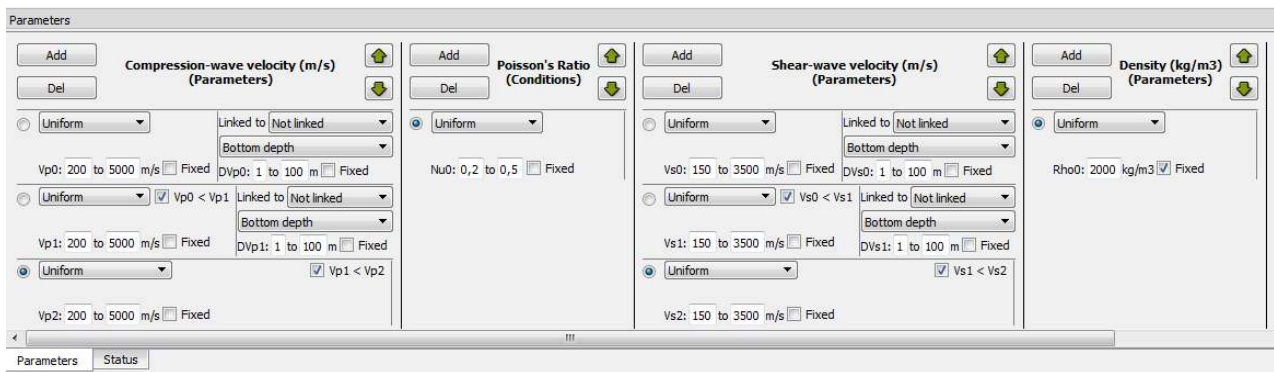


Figura 3.16: Vista del panel de parámetros en Dinver.

Una vez definidos por el usuario los parámetros, se procede a crear los modelos que contendrán todas las curvas constituyentes respectivas con un desajuste entre 0 a 1, esto se hace en la parte superior de Dinver en la pestaña *Runs* > *Add* lo cual se visualizan en la parte inferior marcando la pestaña *Runs*.

Runs						
	Run name	Ns0	Ns	Nr	GiveUp	Nw
1	run_01	50	2500	50	90	2
2	run_02	50	2500	50	90	2
3	run_03	50	2500	50	90	2
4	run_04	50	2500	50	90	2

Targets Log Runs

Figura 3.17: Panel de *Runs* o modelos a generar.

Teniendo la cantidad de modelos definida se procede a la generación de estos, se hace con la opción *RunsStart* lo cual se visualiza marcando en la parte inferior la opción *Status*.

Finalmente guardamos el proyecto con la pestaña *FILE* > *SaveAs...* creamos una carpeta, le damos nombre y guardamos. Si vamos a la carpeta encontraremos una subcarpeta llamada *test reports* que contiene los modelos que creamos los cuales vienen con el nombre *run01*, *run02* *run03* etc, por defecto.

Con esto se da por finalizado la etapa en Dinver.

3.3.4. Etapa IV: Rutina VS-VS30.bat (Conversión mediante batch)

Los archivos run deben ser convertidos en archivos que puedan ser cargados en MatLab, para ello se ha construido un programa batch el cual se puede ejecutar en el sistema operativo Windows. Este programa llamado VS-VS30.bat que básicamente es un archivo de texto sin formato que permite obtener desde Geopsy la información que necesitamos de este. Se ha construido este programa con la condición que nos permita obtener la mejor curva o perfil de cada modelo creado dentro del desajuste propio del software y su V_{s30} [18], sin embargo antes de ejecutar este programa se debe hacer una operación de *copiar pegar*, es decir copiar los archivos run obtenidos anteriormente y pegarlos en la carpeta *bin* de Geopsy. Junto con el archivo VS-VS30.bat. Para mayor comodidad se puede hacer un acceso directo para este programa y poder ejecutarlo desde cualquier lugar.

Realizando esta operación y teniendo los permisos y el control total de la carpeta, se procede a la ejecución de programa el cual nos pregunta si queremos proceder.

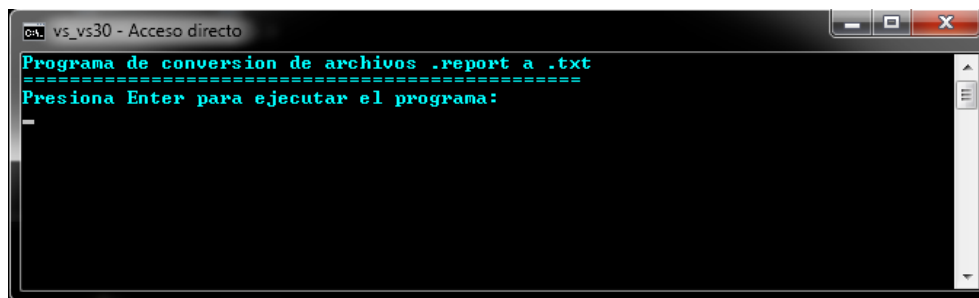


Figura 3.18: Ventana de interacción en Batch.

Damos a la tecla *enter* y nos pedirá que demos un nombre para los datos, lo damos y comenzará a trabajar.

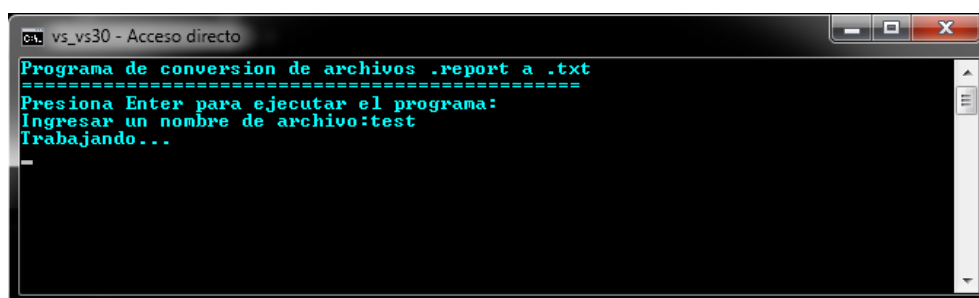


Figura 3.19: Ventana de interacción en Batch.

Una vez terminada la operación nos pedirá dar tecla *enter* nuevamente, damos y el programa se cierra.

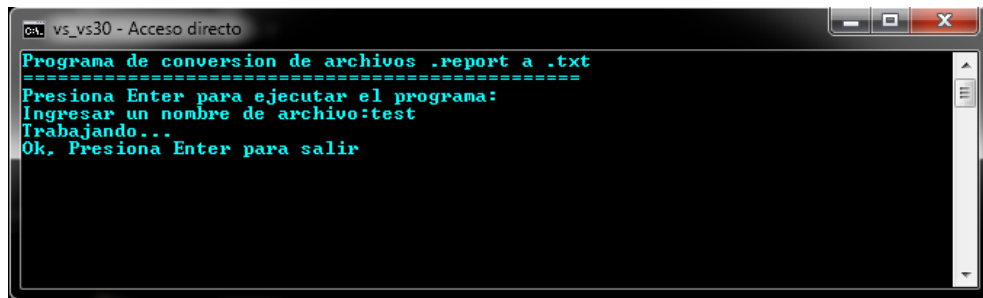


Figura 3.20: Ventana de interacción en Batch.

Se debe señalar que los archivos se crean en una carpeta con nombre creada en *escritorio* para una mejor comodidad personal lo cual se puede editar con la opción del menú de batch *editar*.

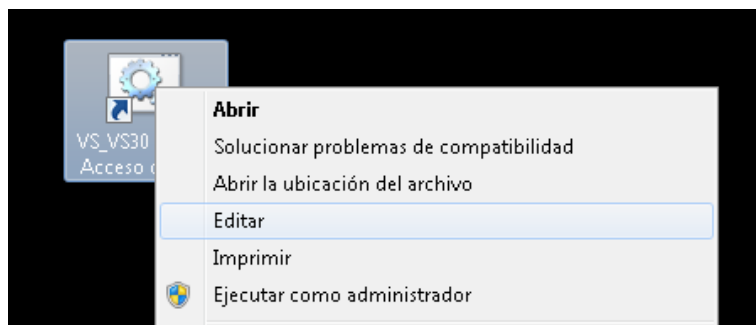


Figura 3.21: Opcion “Editar” en Windows.

Fijando una dirección y un nombre de carpeta en las líneas iniciales del batch:

- set dir=%userprofile%\Desktop\
- set carp=conversion

En este caso la carpeta esta en *Escritorio* y se llama *conversión*.

Lo anterior ha creado dos tipos de archivo de datos para cada modelo estos son:

- vs_test_run_01_vector
- vs_30_test_run_01_vector

Esto quiere decir que si tenemos cuatro archivos run se deben crear 4 archivos vs y vs30 respectivamente. Nótese que *test* es el nombre que nos pidió el programa batch para los archivos.

También se debe señalar que el programa VS-VS30.batch se ha diseñado para una conversión de 4 modelos *run*. Si se quisiera tener más modelos, el archivo batch deberá ser modificado agregando o quitando sentencias para la exportación a las ya definidas.

Con esto se da por terminada la etapa IV.

3.3.5. Etapa V: MatLab (Generación de perfiles)

Con los archivos vectoriales vs y vs30 ya obtenidos, podemos leerlos en MatLab para ello se ejecuta el script en MatLab VS-VS30M.m el cual nos pedirá los archivos vs y luego los vs30, en este caso 8 archivos para 4 modelos (Md), se debe procurar cargarlos en orden para no cometer errores. Con ello se obtiene una figura que nos muestra los modelos creados para velocidad de onda S y profundidad junto con otra que nos muestra el V_{s30} promedio para cada modelo.

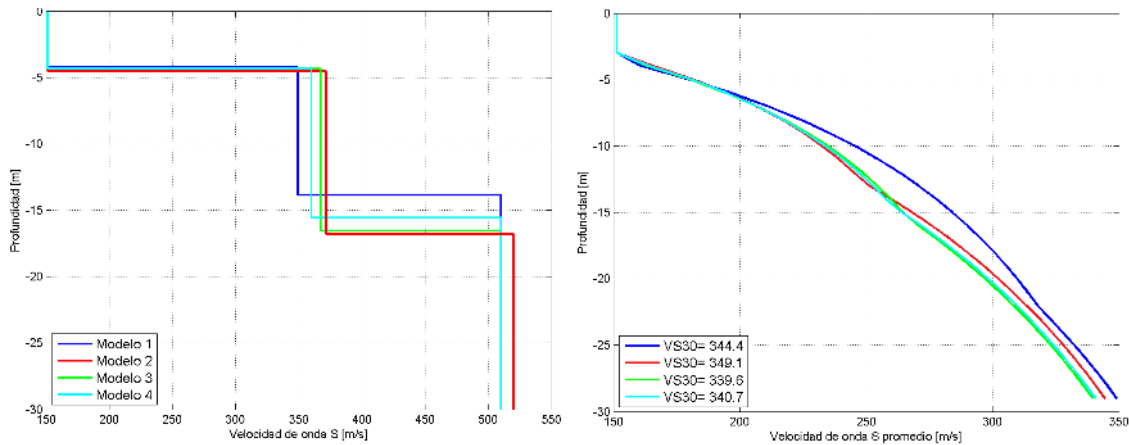


Figura 3.22: Vista del perfil Vs y curvas Vs30 promedio contruidos con la selección de la curva con menor desajuste realizado con Batch para los 4 modelos o Runs.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de sísmica de refracción, refracción por microtremor (ReMi), curva de dispersión e inversión en las dos áreas de estudio y subdivisiones: Primero:

- En el área de Concepción, Región del Bío Bío frente la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, y en el sector comúnmente conocido como *La Cascada* ubicada al interior de la universidad aledaña a los cerros del campus.

Segundo:

- En el terreno realizado en Curacautín, Región de la Araucanía en los sectores de Riachuelo, Termas de Manzanar y el túnel.

Se debe señalar que los perfiles realizados en la Universidad de Concepción fueron con un carácter experimental con el fin de acercarse al equipo en su funcionamiento y registro. Por otro lado se debe agregar que para el estudio en el sector Las Cascada, la lluvia que se dejó caer ese día impidió seguir con los trabajos por tanto sólo se alcanzó a realizar un perfil y sin sísmica de refracción.

4.1. La Cascada

Para el estudio realizado en *La Cascada*, se usaron 24 geófonos con un arreglo lineal de estos y se realizó un perfil el cual se etiquetó como C1, con un espaciamiento de 1 [m], un muestreo de 2 [ms] y dos registros. El primero se realizó en completo silencio, mientras que el segundo se le pidió al equipo colaborador que realizara un trote a lo largo del tendido con el fin de visualizar la nueva señal registrada y constatar el perfecto funcionamiento de todos los geófonos.



Figura 4.1: *La Cascada*, en la Universidad de Concepción, imagen personal



Figura 4.2: Vista satelital del perfil realizado en el sector La Cascada.



(a)



(b)

Figura 4.3: Vista (a) y (b) de los extremos del perfil con el arreglo lineal de geófonos.

La tabla siguiente resume las características del perfil realizado en *La Cascada*:

Perfil	Longitud [m]	Orientación	Espaciamiento [m]
C1	23	Sureste-noroeste	1

Cuadro 4.1: *Perfil realizado en Concepción en el sector La Cascada.*

4.1.1. Sísmica de refracción

Como se mencionó anteriormente no se realizó sísmica de refracción, por tanto se consideraron valores por defecto de velocidad de onda P y con un modelo de 3 capas para este estudio.

4.1.2. Refracción por microtremor (ReMi)

A continuación se presentan los resultados para el espectro de frecuencia para el sector *La Cascada*.

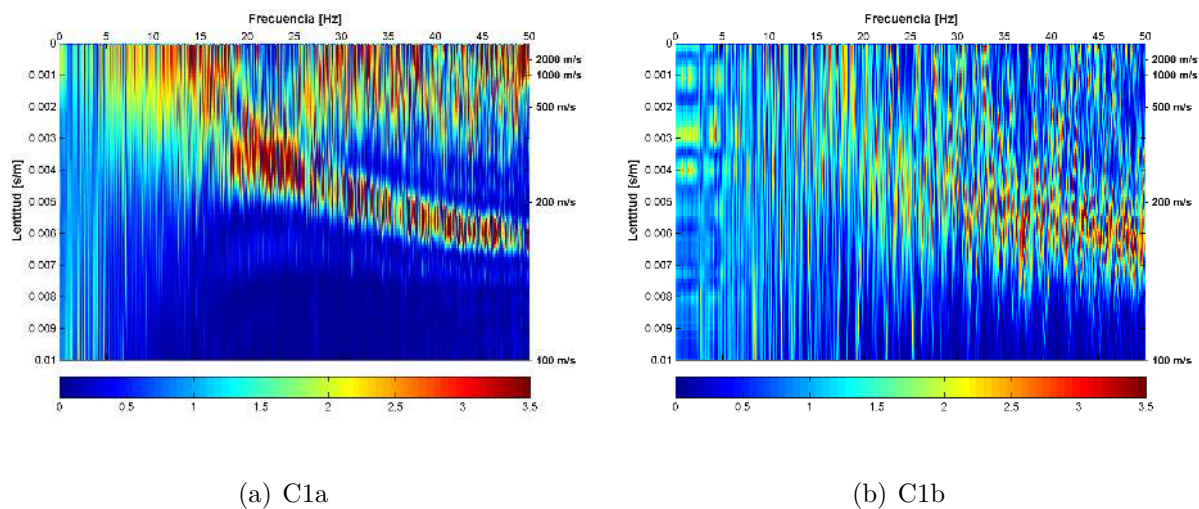


Figura 4.4: *Espectro de frecuencia (C1a) en ambiente de silencio y (C1b) con el equipo de apoyo a trote.*

La figura C1a destaca encontrar una señal bastante clara en un ambiente en que la percepción de sonidos era nula, por otro lado la figura C1b se hace ver claramente la perturbación generada a la señal por el trote del equipo colaborador.

4.1.3. Curva de dispersión

Para la curva de dispersión, se consideró el espectro de frecuencia sin perturbaciones muy forzadas.

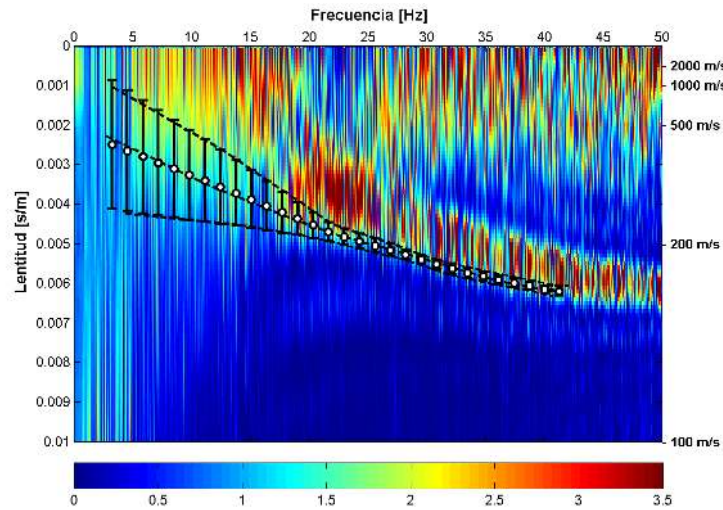


Figura 4.5: *Curva de dispersión seleccionada.*

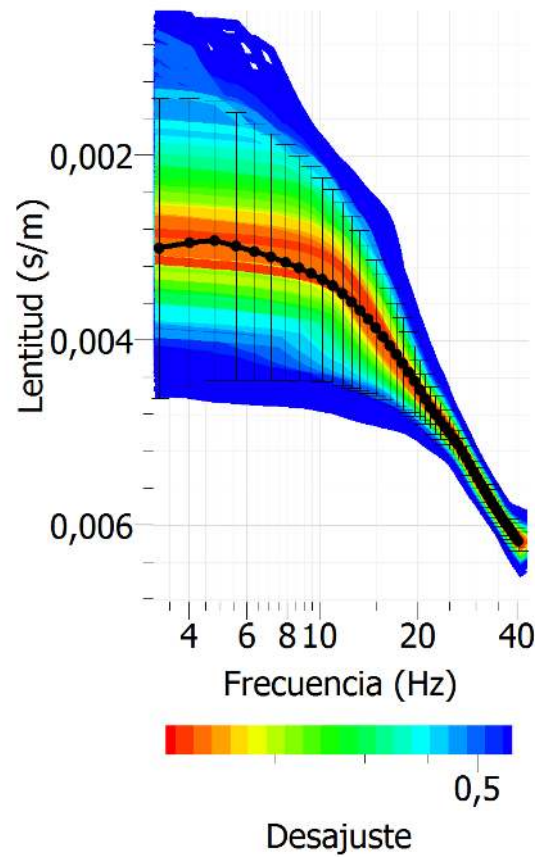
4.1.4. Parámetros de inversión y estimación de profundidad

La tabla siguiente resume los parámetros utilizados para los 4 modelos para el perfil C1:

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

Cuadro 4.2: *Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de las capas corresponden a los parámetros por defecto.*

La curva de dispersión se realizó con el máximo ajuste posible:



(a)

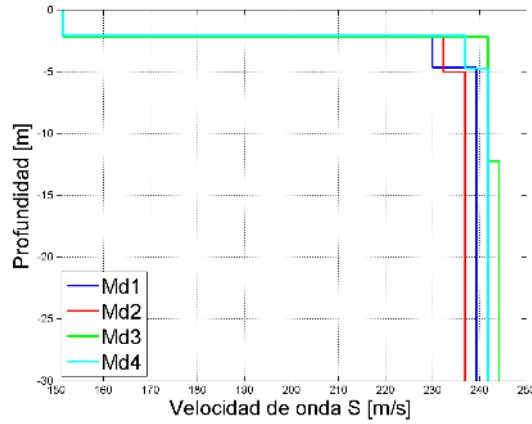
Figura 4.6: Curvas de dispersión obtenida para perfil C1 con 2 [ms], (a) no acotado.

A continuación (y para todos los sectores en estudio) se presenta la tabla con estimaciones de profundidad según el tendido[8] Z [m] y desde la curva de dispersión los valores λ_{max} [m] y λ_{min} [m] para una estimación de profundidad máxima y mínima λ_{max} [m] y $Z_{\lambda_{max}}$ [m] respectivamente. Para *La Cascada* los resultados son los siguientes:

Perfil	Longitud [m]	Z [m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
$C1_{2ms}$	23	7.66 - 11.5	102.38	51,19	4.00	2.00

Cuadro 4.3: Estimaciones de profundidad para el perfil C1.

4.1.5. Modelos de perfil de velocidad



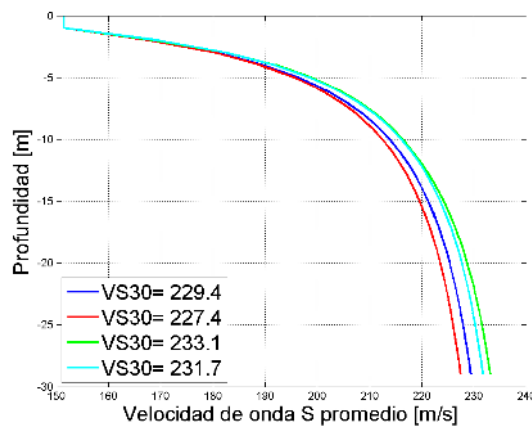
(a) C1M

Figura 4.7: Modelos de velocidad de onda S , obtenidos con los parámetros de inversión simple.

Perfil	Desajuste
$C1_{2ms}$ Run 01	0.12
$C1_{2ms}$ Run 02	0.15
$C1_{2ms}$ Run 03	0.14
$C1_{2ms}$ Run 04	0.14

Cuadro 4.4: Desajuste para el perfil $C1$ de 2 [ms] no acotado.

4.1.6. Curva V_{s30} promedio



(a) C1P

Figura 4.8: Curvas V_{s30} promedio obtenidos para La Cascada, obtenidos con los parámetros de inversión simple

De lo anterior el V_{s30} según este modelo varía entre los 229 a los 234 $\left[\frac{m}{s}\right]$ aproximadamente.

4.2. Campus frente a FCFM

Para el estudio realizado frente a la facultad se usaron 24 geófonos y se realizó un perfil con dos arreglos lineales, el perfil F1 con un espaciamiento de 1 [m] y el F2 con 2 [m]. Se debe señalar que para el perfil F1 se realizaron 2 registros de ruido y para el F2 se realizaron 3.



Figura 4.9: Vista satelital de la zona estudio frente la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM)



Figura 4.10: Vista panorámica de la zona de estudio



Figura 4.11: Vista del tendido lineal de geófonos en el momento de realizar el shot o golpe para la refracción sísmica.

Las características de los perfiles F1 y F2 se resumen en la siguiente tabla:

Perfil	Longitud [m]	Orientación	Espaciamiento [m]
F1	23	Suroeste-noreste	1
F2	46	Suroeste-noreste	2

Cuadro 4.5: Perfiles realizados en Concepción frente la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas (FCFM).

4.2.1. Sísmica de refracción

Para la sísmica de refracción se utilizó un modelo de 3 capas junto con valores de velocidad de onda P y profundidad de trabajos anteriores en el lugar.

4.2.2. Refracción por microtremor (ReMi)

A continuación se presentan las imágenes espectrales para los perfiles F1 y F2 obtenidas.

Para el perfil F1 se obtuvo lo siguiente:

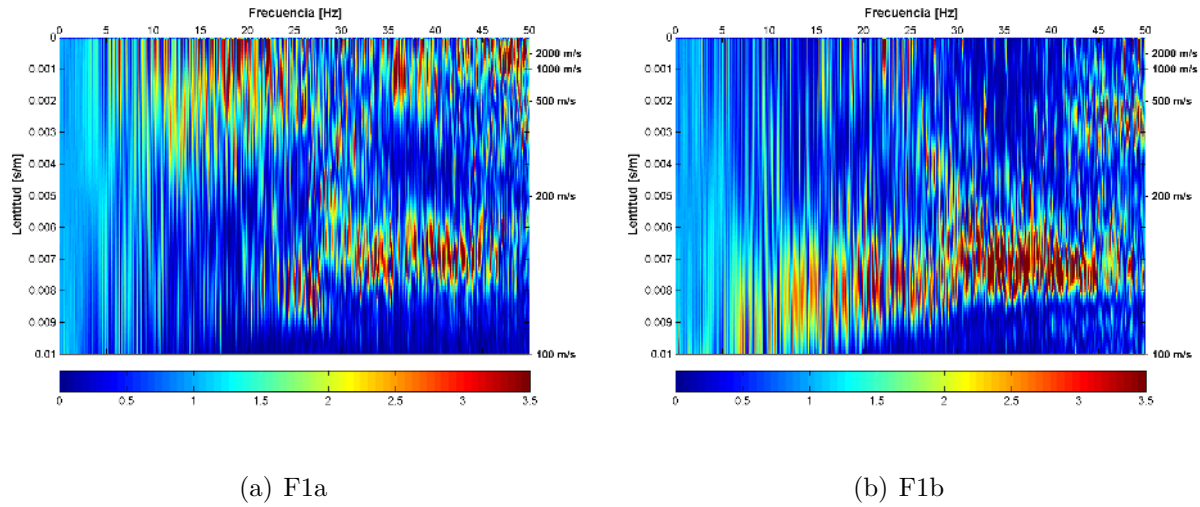


Figura 4.12: Espectro de frecuencia para F1 con espaciamento de 1 [m] y con un muestreo de 2 [ms], F1a primer registro y F1b el segundo registro realizado.

Evidentemente y según estos resultados, existe una diferencia notable en ambos registros espectrales, se aprecia en (a) una envolvente de energía entre los 5 y 25 [Hz], sin embargo en (b) esta se minimiza pero aparece una nueva envolvente entre los 5 a 25 [Hz] pero a mayor lentitud. Esto puede explicarse porque en el lugar existían trabajos de construcción en las cercanías junto con el movimiento de vehículos. Estos factores pueden ejercer influencias considerables en la visualización de los espectros de frecuencia.

A pesar de esto se decidió realizar la apilación de estos registros:

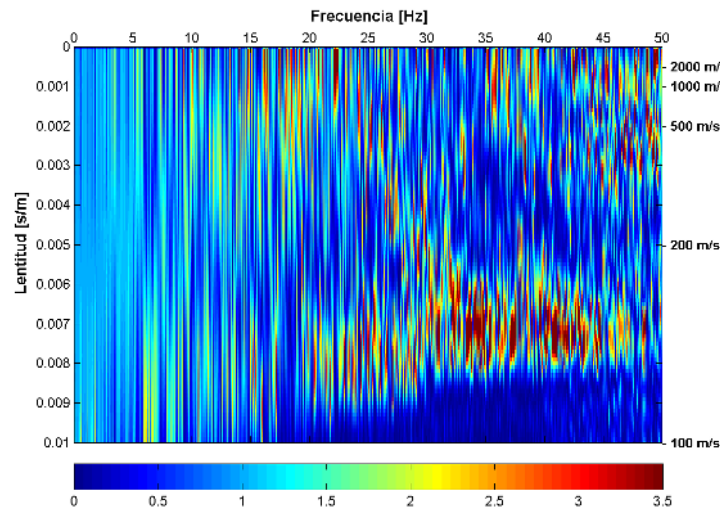


Figura 4.13: Apilación de los espectros de frecuencia F1a y F1b obtenidos.

Para el perfil F2 se obtuvo lo siguiente:

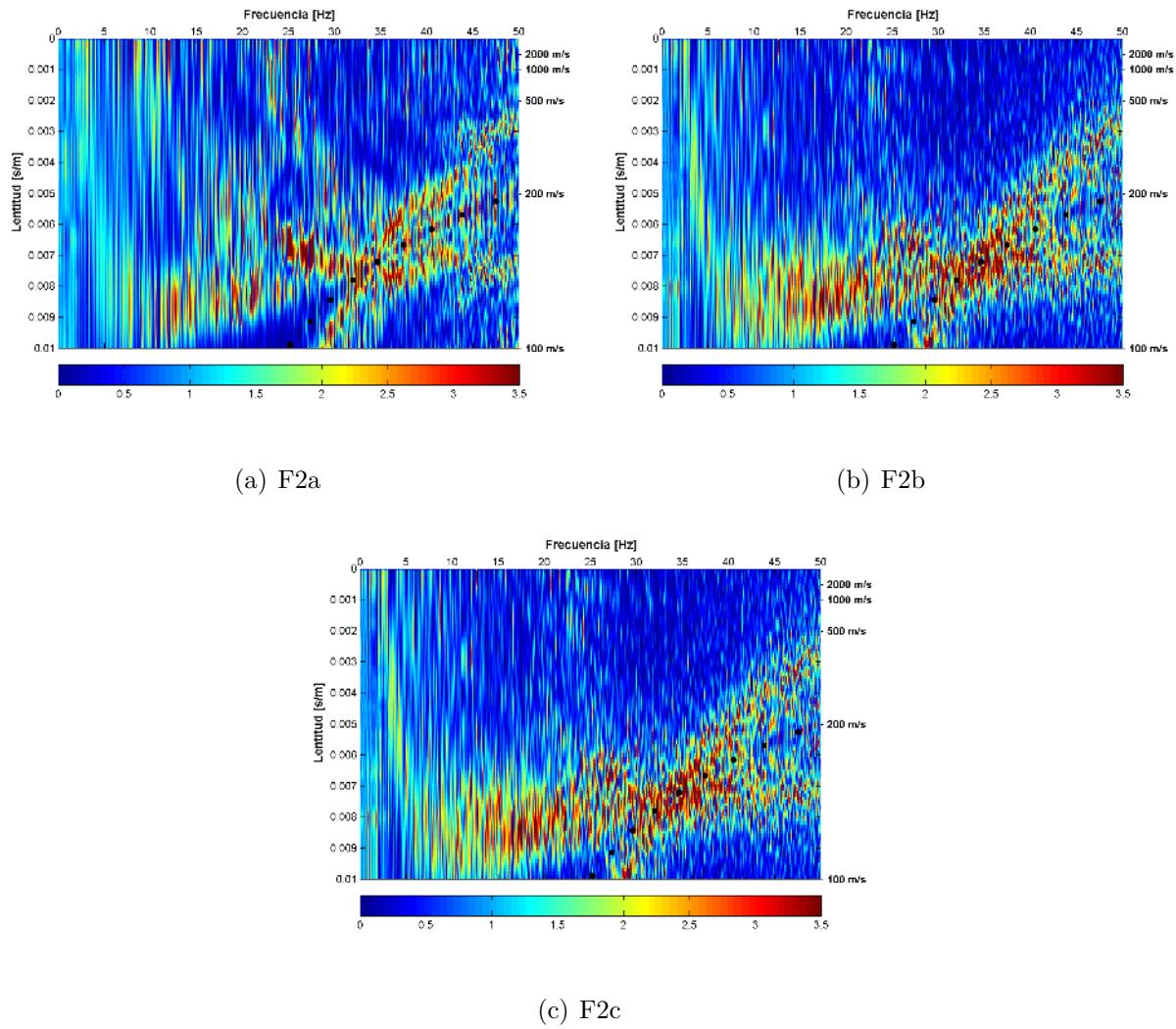


Figura 4.14: Espectros de frecuencias para F2 con espaciamento de 2 [m] y con un muestreo de 2 [ms], F2a primer registro, F2b segundo registro y F2c tercer registro realizado.

Como se puede observar, para el perfil F2 siguen existiendo variaciones en la envolvente espectral según las figuras (a) y (b), sin embargo hay una tendencia estable para la envolvente de mayor lentitud la cual supera el valor de los 0.007 [s/m].

La apilacion de estos registros:

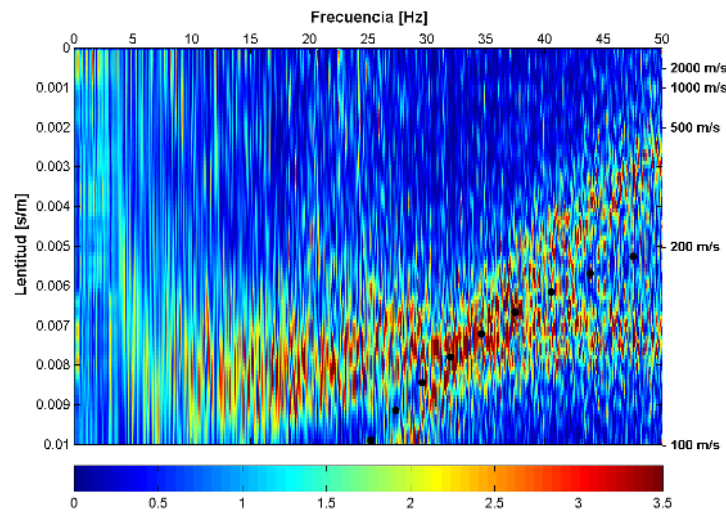


Figura 4.15: Apilación de los espectros de frecuencia $F2a$, $F2b$ y $F2c$ obtenidos.

De lo anterior, la apilación de los espectros $F1a$ y $F1b$ resultó ser una espectro con mucha distorsión y por ende no muy claro. Por ello se decidió considerando lo observado en la apilación de $F2a$, $F2b$ y $F2c$ sólo tomar sólo el registro $F2a$ para seleccionar una curva de dispersión.

4.2.3. Curva de dispersión

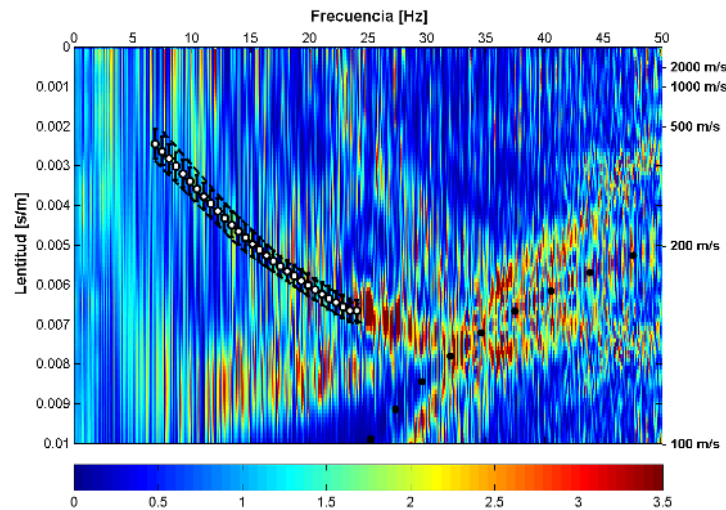


Figura 4.16: Curva de dispersión seleccionada.

La curva de dispersión seleccionada fructúa entre los 5 y 25 [Hz] aproximadamente, se observó que para la selección en lentitudes mayores superiores a 0.007 [s/m] existía un desajuste considerable para la curva.

4.2.4. Parámetros de inversión y estimación de profundidad

Los parámetros utilizados por defecto y acotados se presentan en la siguientes tablas:

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

Cuadro 4.6: *Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de las capas corresponden a los parámetros por defecto.*

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	100 - 400	500 - 900	900 - 5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	100 - 400	500 - 900	900 - 5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	100 - 400	500 - 900	900 - 5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	100 - 400	500 - 900	900 - 5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

Cuadro 4.7: *Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción de trabajos anteriores.*

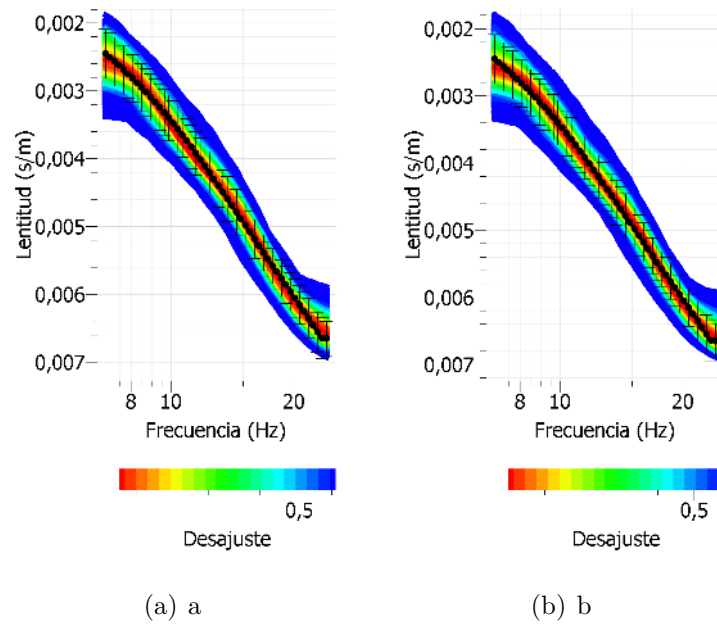


Figura 4.17: Curvas de dispersión obtenida para perfil F2 con 2 [ms], (a) no acotado y (b) acotado.

Las curvas se realizaron con el máximo ajuste posible la cual poseen una pendiente pronunciada y cercano a los 4 [Hz]. Es claro ver que no existen mayores diferencias entre ellas con parámetros no acotados y acotados en el proceso.

Las estimaciones de profundidad de acuerdo a esta curva de dispersión se presentan a continuación:

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
F2	46	15.33 - 23	221.16	110.58	34.46	17.23

Cuadro 4.8: Estimaciones de profundidad.

4.2.5. Modelos de perfil de velocidad

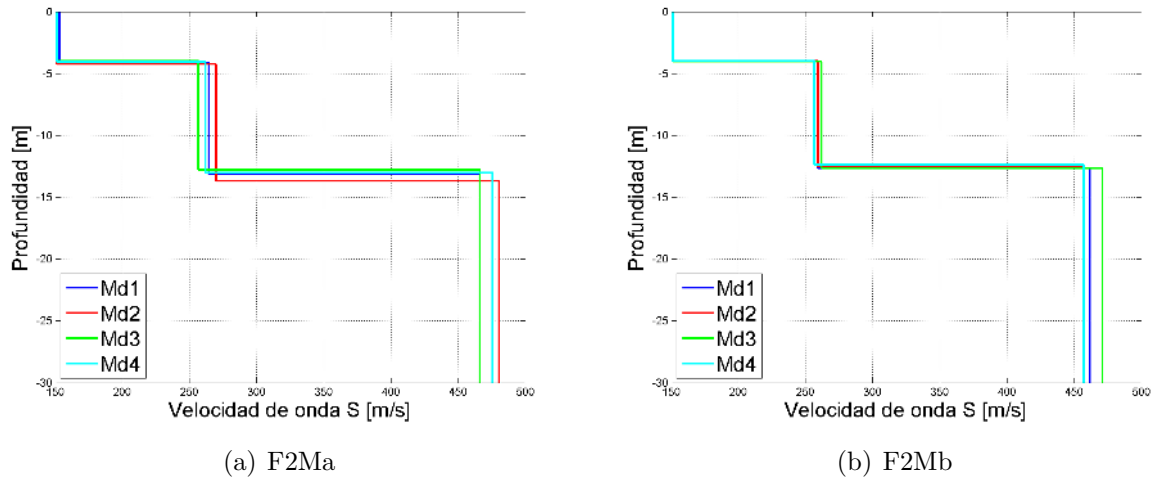


Figura 4.18: Modelos de velocidad de onda S , obtenidos con los parámetros de inversión (a) simple y (b) acotado

Como se puede ver en (a) y (b) ambos modelos indican un comportamiento común en la velocidad de la onda S con el desajuste propio por las curvas que consituyen cada modelo. Este desajuste para cada modelo de curva consituyente se presenta a continuación:

Perfil	Desajuste
F2 _{2ms} Run 01	0.19
F2 _{2ms} Run 02	0.21
F2 _{2ms} Run 03	0.18
F2 _{2ms} Run 04	0.19

Cuadro 4.9: Desajuste para el perfil F2 de 2 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
F2 _{2ms(ac)} Run 01	0.17
F2 _{2ms(ac)} Run 02	0.16
F2 _{2ms(ac)} Run 03	0.17
F2 _{2ms(ac)} Run 04	0.16

Cuadro 4.10: Desajuste para el perfil F2 de 2 [ms] acotado.

4.2.6. Curva V_{s30} promedio

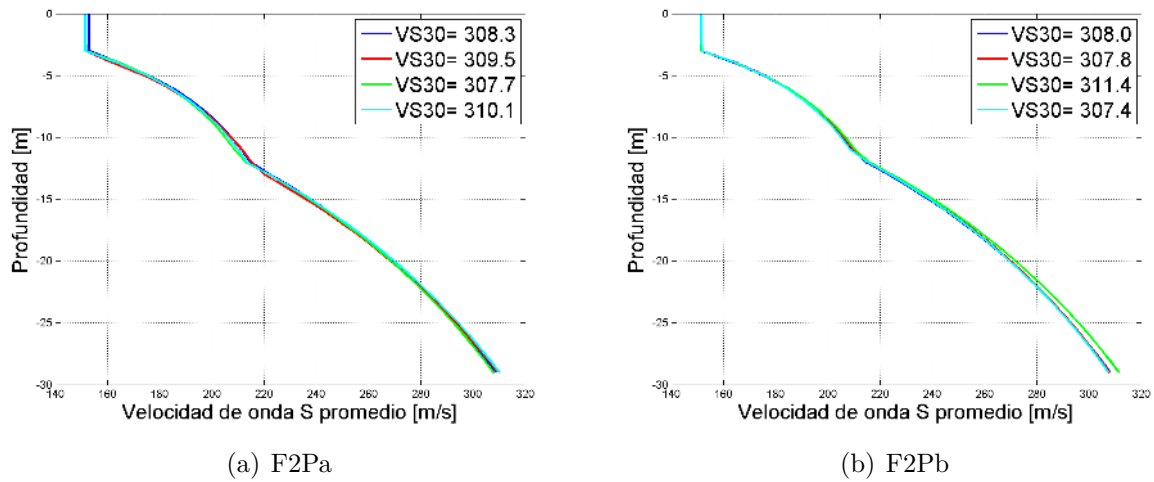


Figura 4.19: Curvas V_{s30} promedio para el perfil F2, obtenidos con los parámetros de inversión inversión (a) simple y (b) acotado

4.3. Riachuelo

Riachuelo es el nombre que se llamó una sección de la ruta 181, este tramo queda en dirección al paso internacional Pino Hachado, antes de llegar al sitio Piedra Santa.



Figura 4.20: Vista panorámica hacia el sur en Riachuelo, imagen gentileza Arturo Belmonte



Figura 4.21: Imagen satelital por Google Earth con el detalle de los perfiles realizados en el sector Riachuelo, Región de la Araucanía.

En este sitio se realizaron dos perfiles, R1 Y R2 en donde se utilizó sísmica de refracción y refracción por microtremor (ReMi). Los perfiles se realizaron como indica la siguiente tabla:

Perfil	Longitud [m]	Orientación	Espaciamiento [m]
R1	92	Suroeste-noroeste	4
R2	230	Sureste-noroeste	10

Cuadro 4.11: Perfiles realizados en el sector Riachuelo.

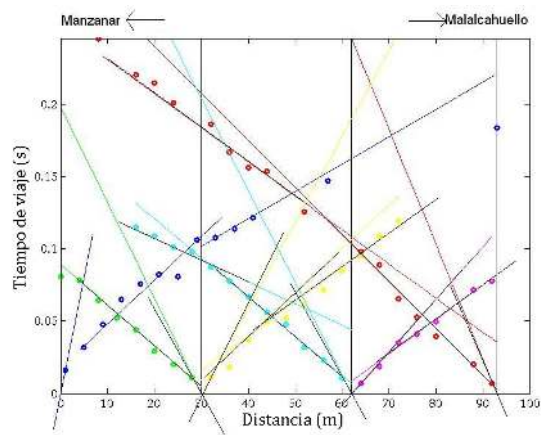
4.3.1. Sísmica de refracción

La distribución de golpes y geófonos se presenta en la siguiente tabla:

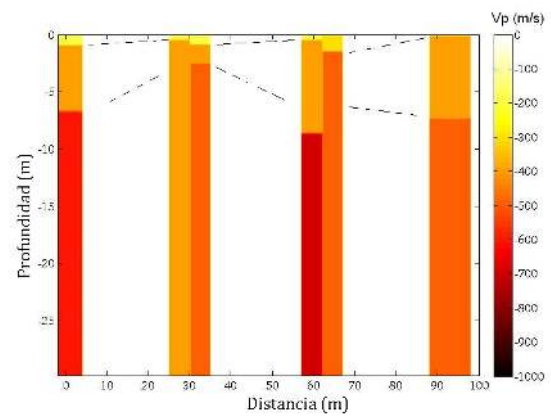
Golpe	Distanca de geófono 1 [m]	Geófono
1	93	24
2	62	16-17
3	30	8-9
4	-1	1

Cuadro 4.12: Distribución de los golpes o shot para la sísmica de refracción.

El análisis de la sísmica de refracción permitió obtener una gráfica de dromocronas y una gráfica distancia-profundidad que permite tener una idea para un modelo de capas.



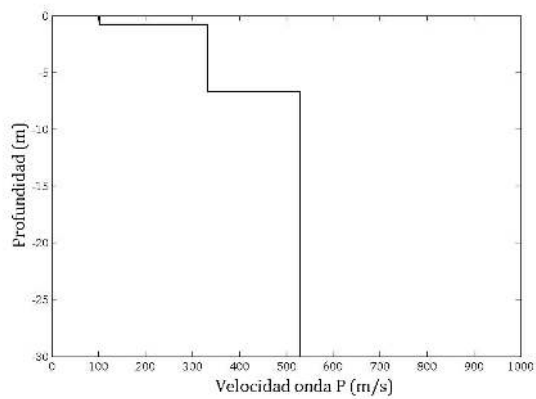
(a) rRA



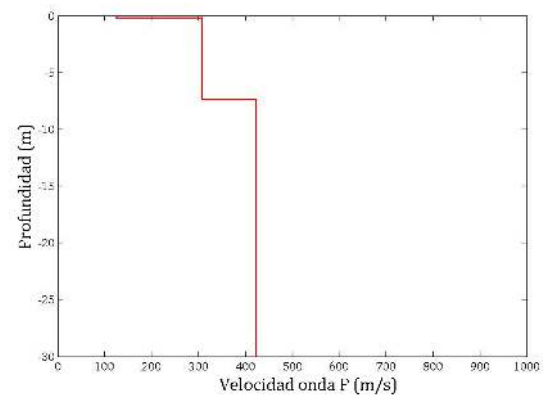
(b) rRB

Figura 4.22: Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rRa) y modelos de velocidad obtenidos (rRb).

También se obtuvo los modelos para un perfil de velocidad de onda P, estos son los siguientes:



(a)



(b)

Figura 4.23: Perfiles laterales obtenidos mediante la sismica de refracción

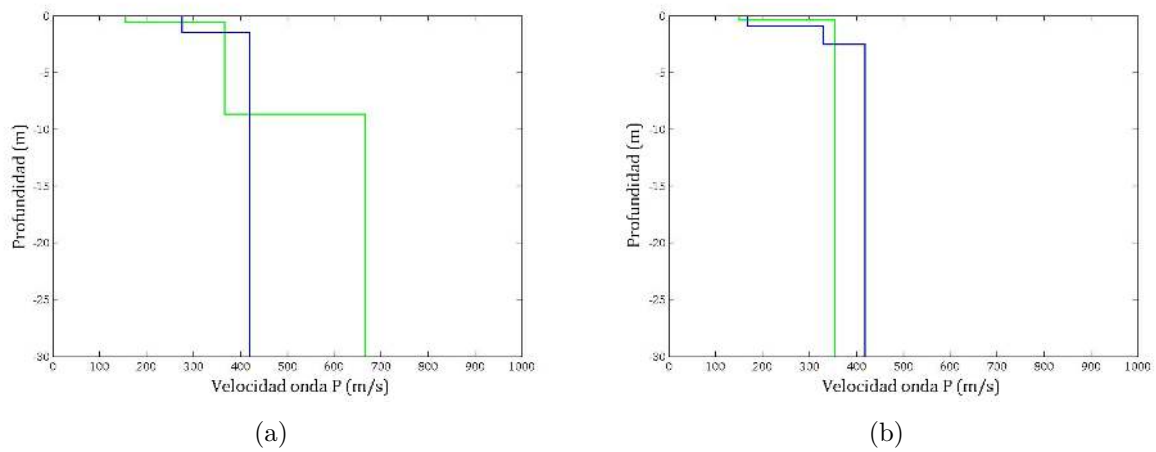


Figura 4.24: *Perfiles centrales obtenidos mediante la sísmica de refracción*

De acuerdo a lo obtenido se consideró realizar modelos de 3 capas.

4.3.2. Refracción por microtremor (ReMi)

Para los perfiles R1 y R2 se realizaron 4 registros, cada uno con un muestreo de 2 y 4 [ms] respectivamente. R1 con un espaciamento entre geófonos de 4 [m] y R2 de 10 [m]. Para el perfil R1 se obtuvo lo siguiente:

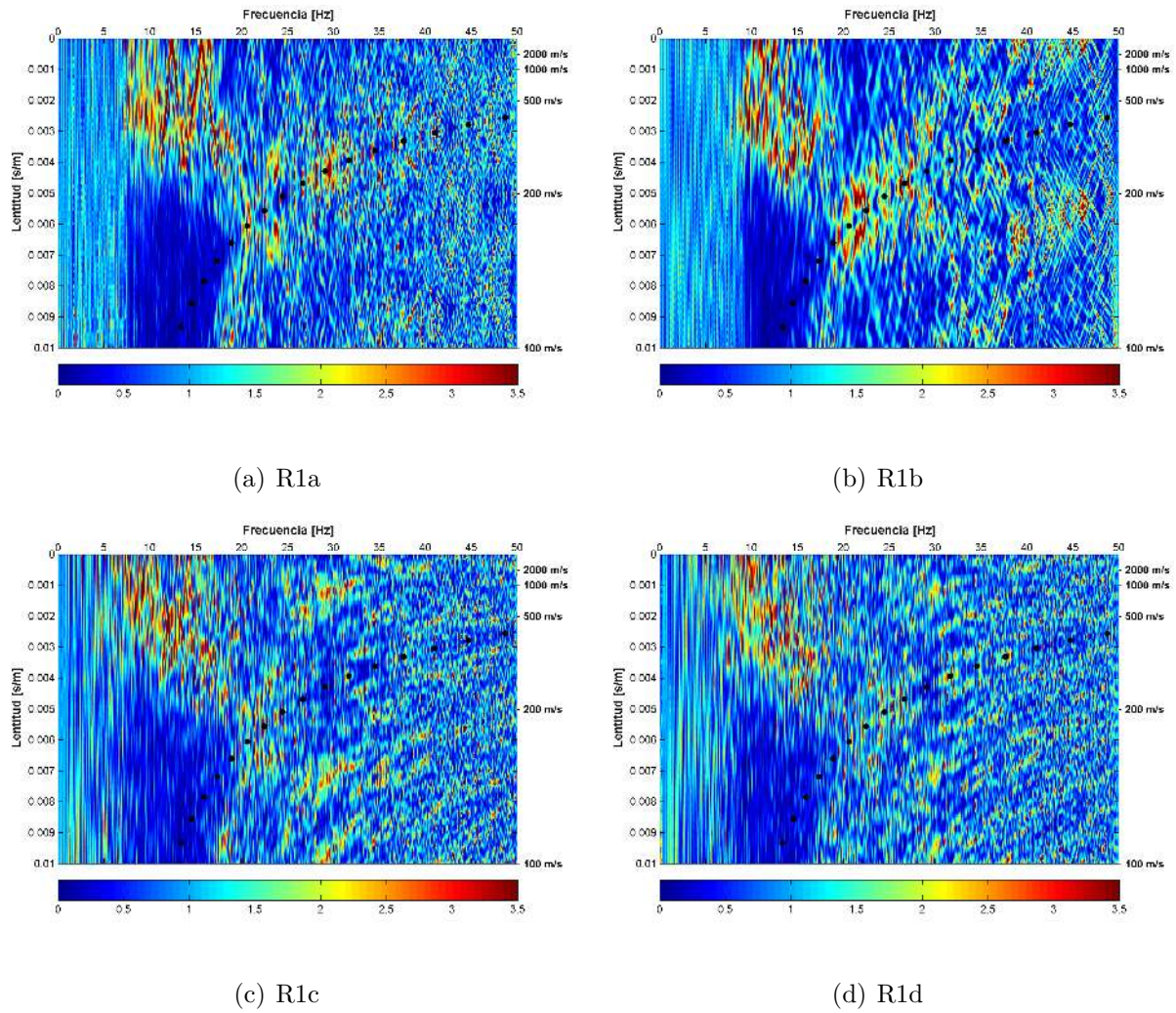


Figura 4.25: Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamento entre geófonos de 4 [m], R1a el primero, R1b el segundo, R1c el tercero y R1d el cuarto.

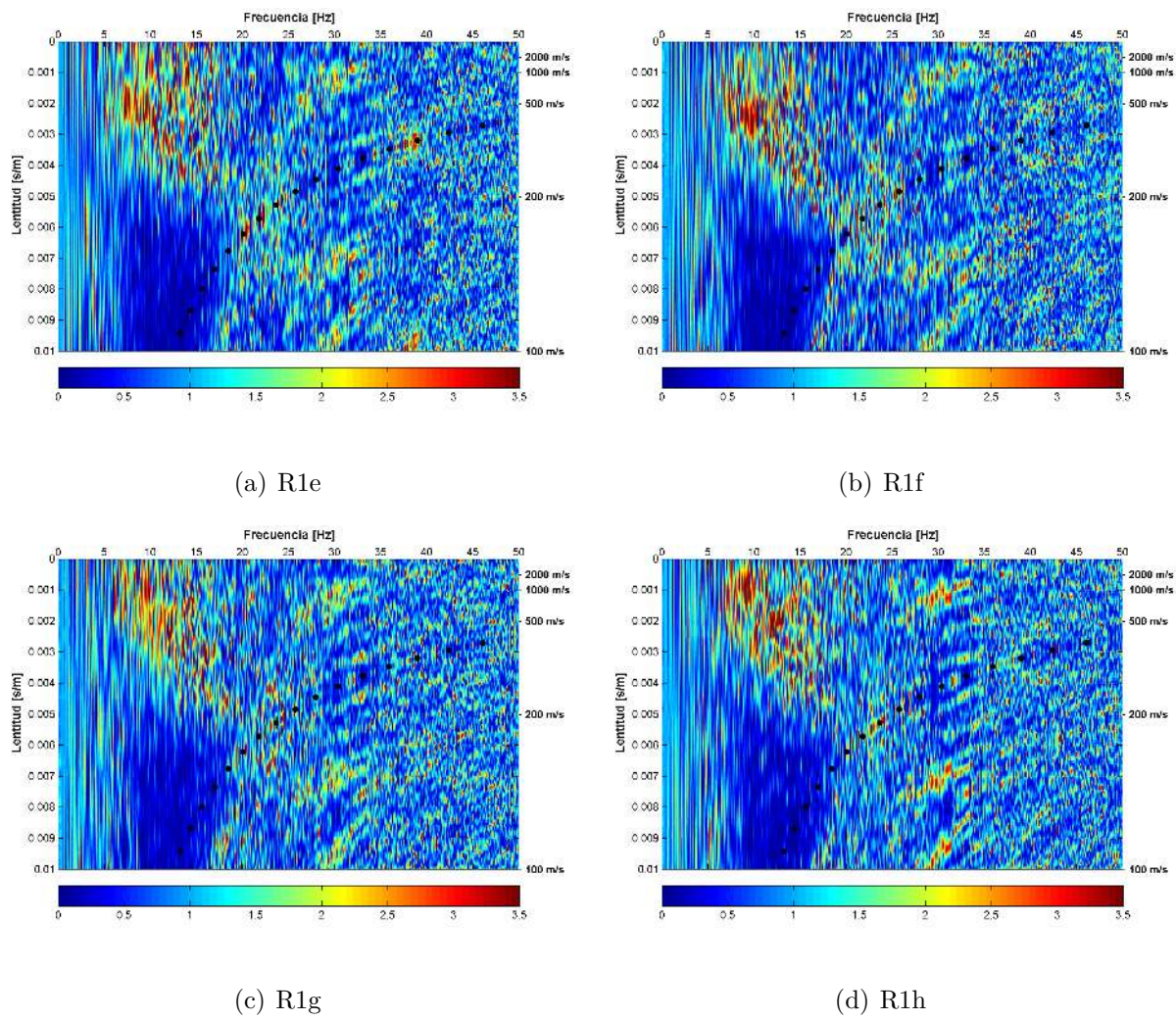


Figura 4.26: Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 4 [m], R1a el primero, R1f el segundo, R1g el tercero y R1h el cuarto.

Para el perfil R2 los registros fueron los siguientes:

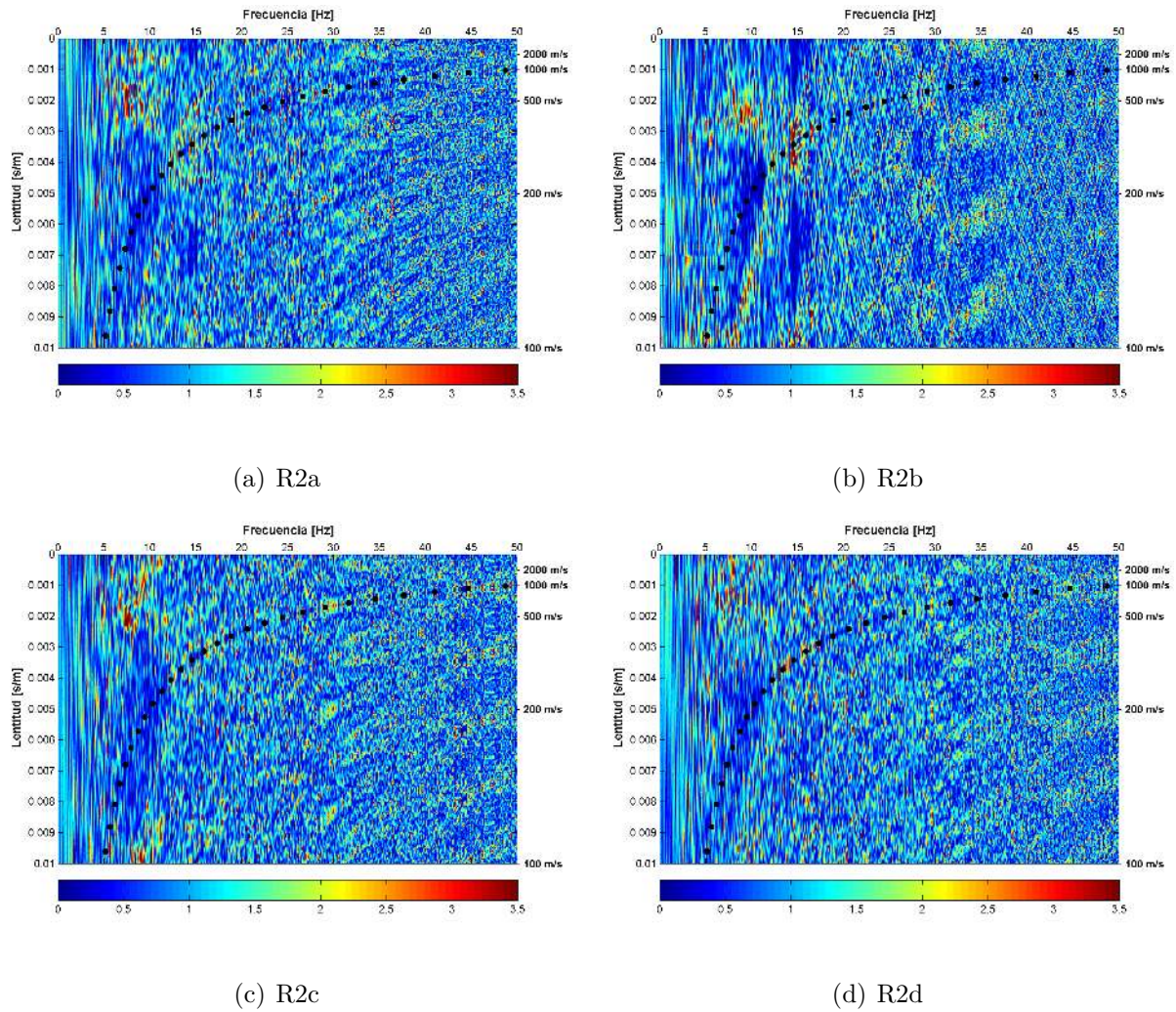
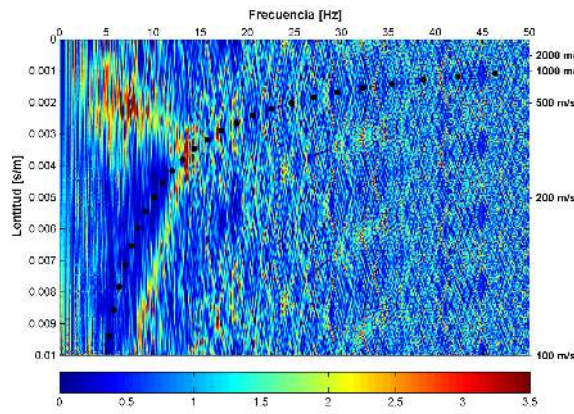
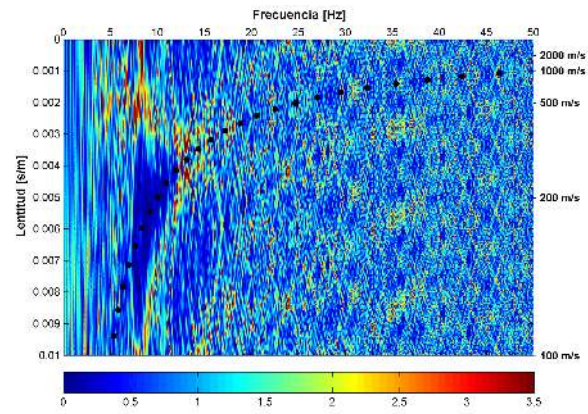


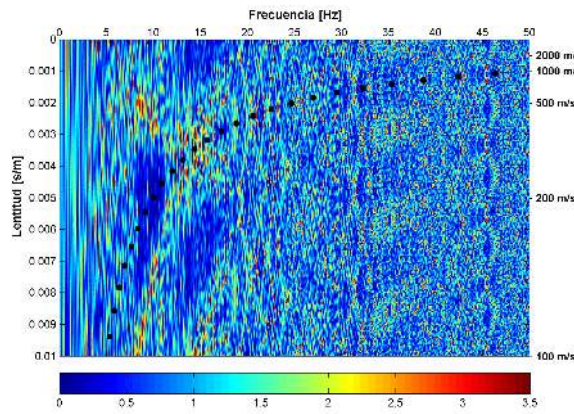
Figura 4.27: Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 10 [m], R2a el primero, R2b el segundo, R2c el tercero y R2d el cuarto.



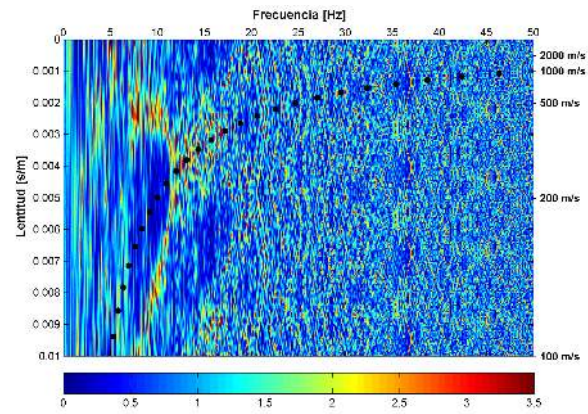
(a) R2e



(b) R2f



(c) R2g



(d) R2h

Figura 4.28: Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 10 [m], R2e el primero, R2f el segundo, R2g el tercero y R2h el cuarto.

Se realizó la apilación de los 4 registros respectivos para cada perfil R1 y R2, los resultados fueron los siguientes:

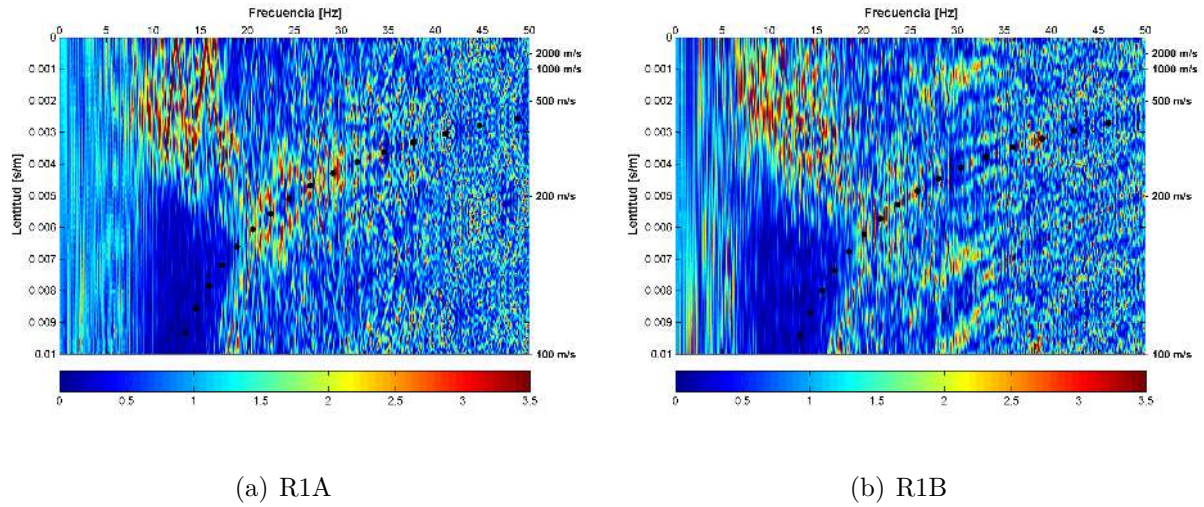


Figura 4.29: Imágenes espectrales resultantes de la apilación de los 4 registros para R1 y con géofonos cada 4 [m], R1A para los registros con muestreo de 2 [ms] y R1B con 4 [ms].

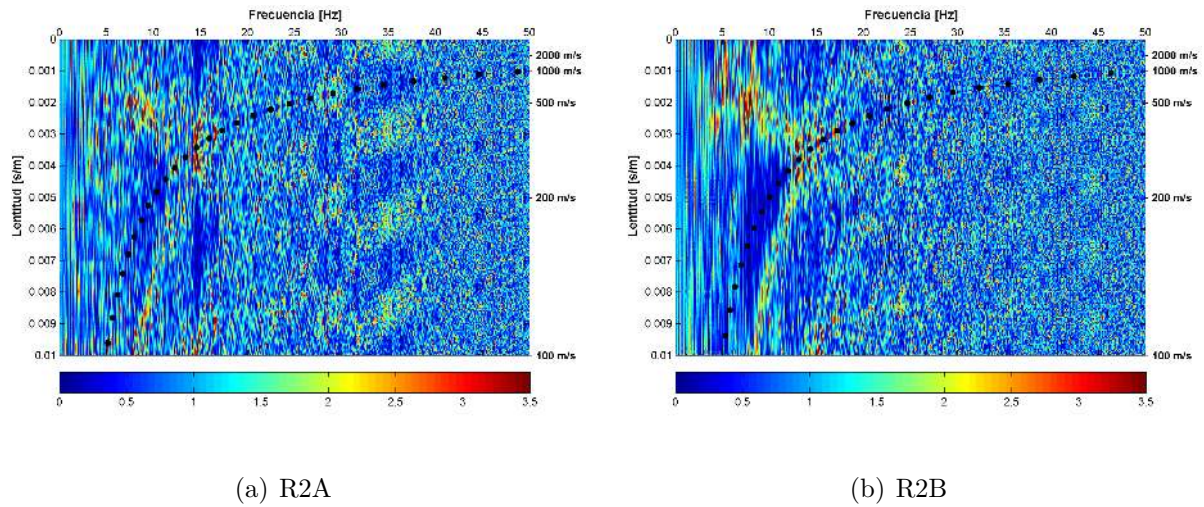


Figura 4.30: Imágenes espectrales resultantes de la apilación de los 4 registros para R2 y con géofonos cada 10 [m], R2A para los registros con muestreo de 2 [ms] y R2B con 4 [ms].

De acuerdo a las imágenes anteriores obtenidas para estos perfiles, es claro notar que existe una mejor visualización espectral para el perfil R1 y con un espaciamiento de géofonos de 4 [m], pues R2, con un espaciamiento de 10 [m] presenta mayor distorsión, lo que puede dificultar en algunos casos a realizar una apilación apropiada para una mejor visualización y con ello poder determinar una curva de dispersión óptima y representativa.

4.3.3. Curva de dispersión

A continuación se presentan las curvas de dispersión seleccionadas:

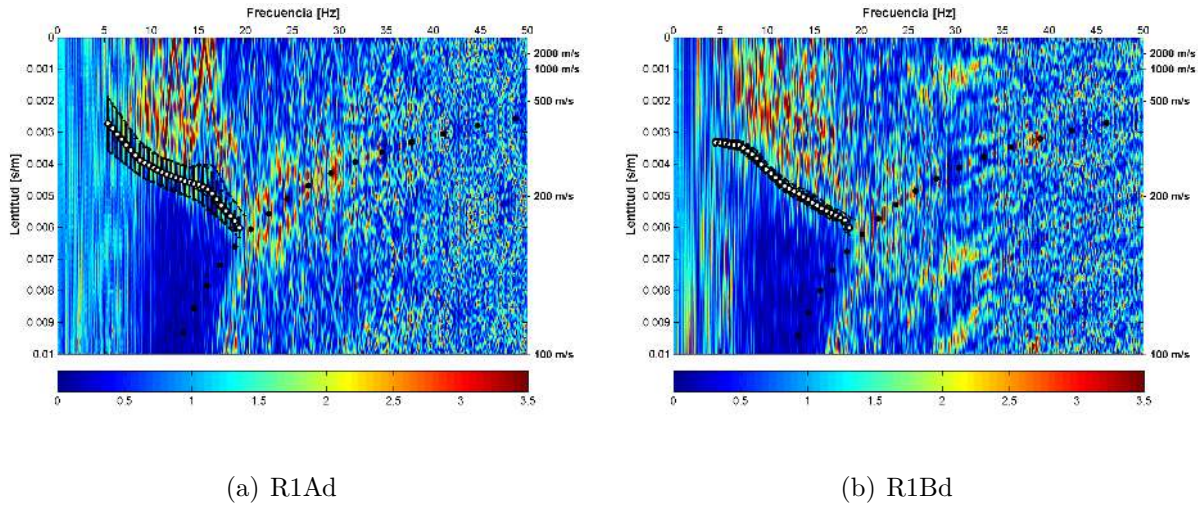


Figura 4.31: Selección de la curva de dispersión (a) para la imagen espectral R1Ad de 2 [ms] y (b) para R1Bd de 4 [ms].

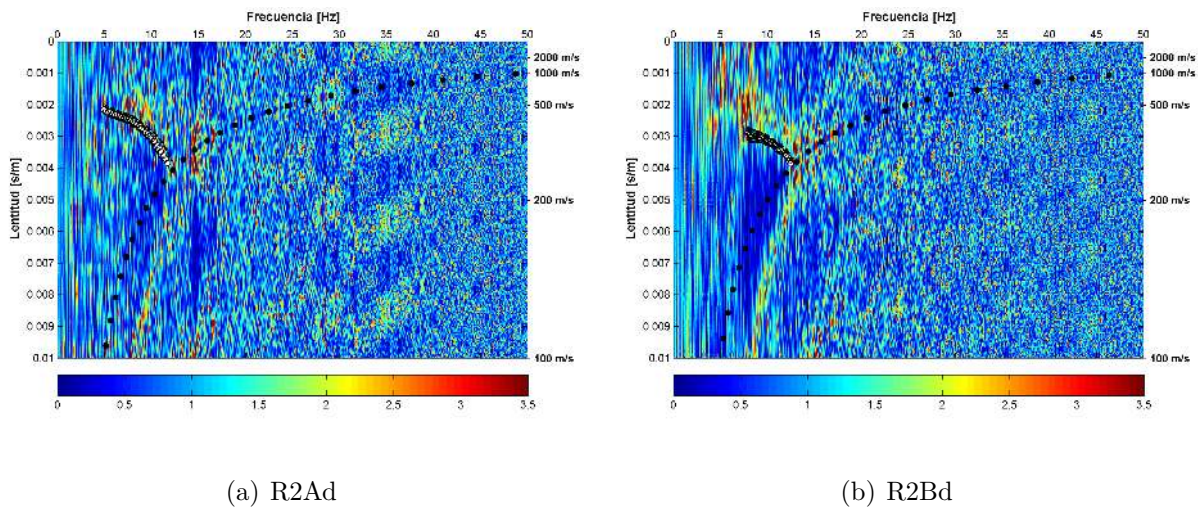


Figura 4.32: Selección de la curva de dispersión (a) para la imagen espectral R2Ad de 2 [ms] y (b) para R2Bd de 4 [ms].

Nótese la dificultad de encontrar una curva de dispersión para las figuras R2Ad y R2Bd debido a la distorsión, las cuales poseen un espaciamiento de geófonos de 10 [m]. R2Ad de 2 [ms] posee más distorsión en relación a R2Ad de 4 [ms] y a las imágenes obtenidas del perfil R1 con espaciamiento de 4 [m].

4.3.4. Parámetros de inversión y estimación de profundidad

Los parámetros para cada modelo de inversión simple y acotado por sísmica de refracción se presentan a continuación:

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

Cuadro 4.13: Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de las capas corresponden a los parámetros por defecto.

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	100-300	300-400	400-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	100-250	350-400	400-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	100-350	350-400	400-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	100-250	300-400	400-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

Cuadro 4.14: Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción, para el perfil R1 y R2.

4.3.4.1. Perfil R1

Las curvas obtenidas se realizaron con el mayor ajuste posible:

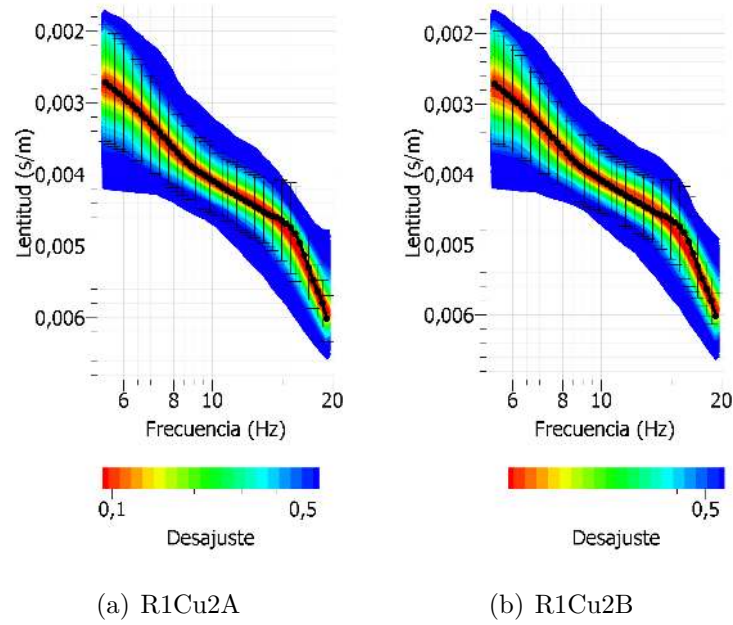


Figura 4.33: Curvas de dispersión obtenidas para el perfil R1, R1Cu2A para 2 [ms] simple y R1Cu2B para 2 [ms] acotado.

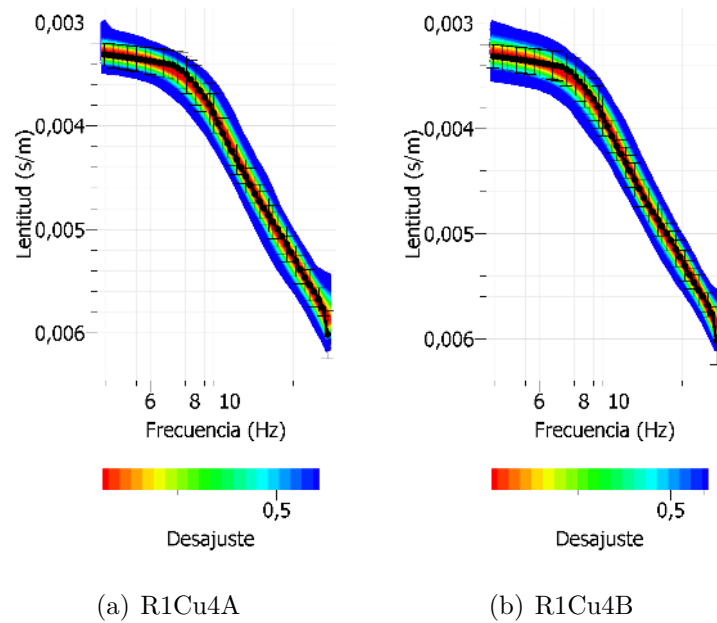


Figura 4.34: Curvas de dispersión obtenidas para el perfil R1, R1Cu4A para 4 [ms] simple y R1Cu4B para 4 [ms] acotado.

Los valores para esta curvas de dispersión para una estimación de profundidad se presentan en la siguiente tabla:

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
R1 _{2ms}	92	30.66 - 46	68.17	34.08	8.58	4.29
R1 _{4ms}	92	30.66 - 46	67.47	33.73	8.86	4.43

Cuadro 4.15: *Estimaciones de profundidad.*

4.3.4.2. Perfil R2

Para el perfil R2 se obtuvieron las siguientes curvas con ajuste:

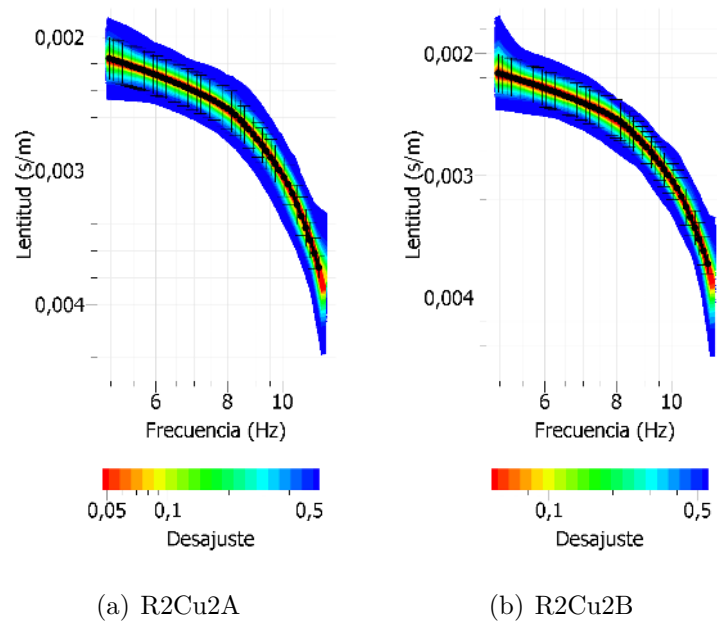


Figura 4.35: *Curvas de dispersión obtenidas para el perfil R2, R2Cu2A para 2 [ms] simple y R2Cu2B para 2 [ms] acotado.*

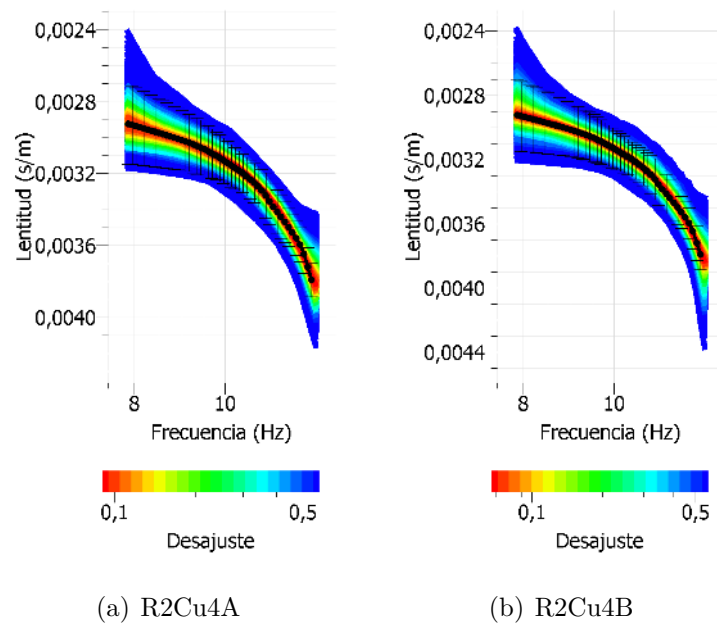


Figura 4.36: Curvas de dispersión obtenidas para el perfil R2, R2Cu4A para 4 [ms] simple y R2Cu4B para 4 [ms] acotado.

Se observa que para modelos con inversión simple y acotados con sismica de refracción, la curva de dispersión presenta un ajuste similar. Por otro lado los valores para esta curvas de dispersión para una estimación de profundidad se presentan en la siguiente tabla:

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
R2 _{2ms}	230	76.66 -115	93.05	46.52	23.22	11.61
R2 _{4ms}	230	76.66 -115	43.35	21.67	21.31	10.65

Cuadro 4.16: Estimaciones de profundidad.

4.3.5. Modelos de perfil de velocidad

4.3.5.1. Perfil R1

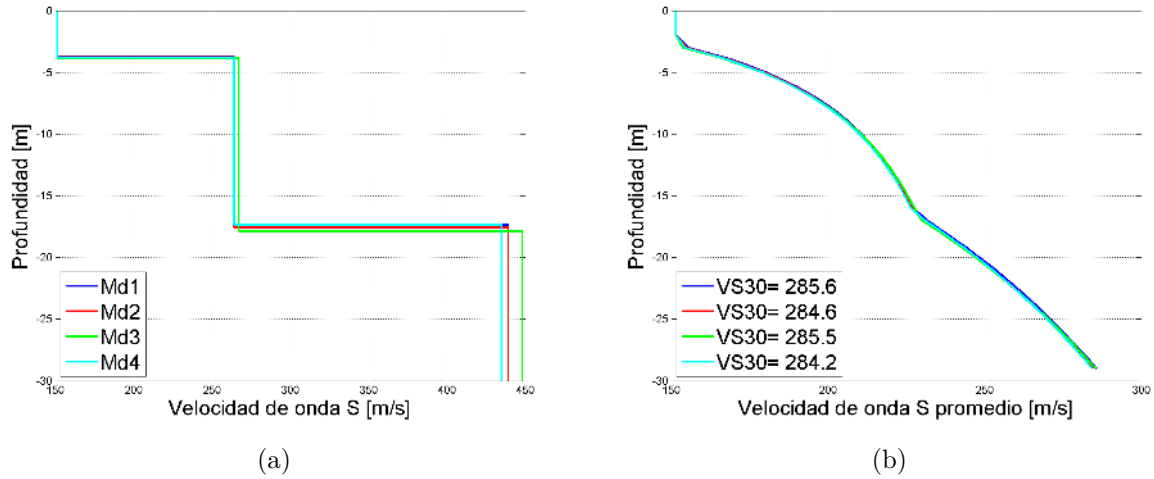


Figura 4.37: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R1 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

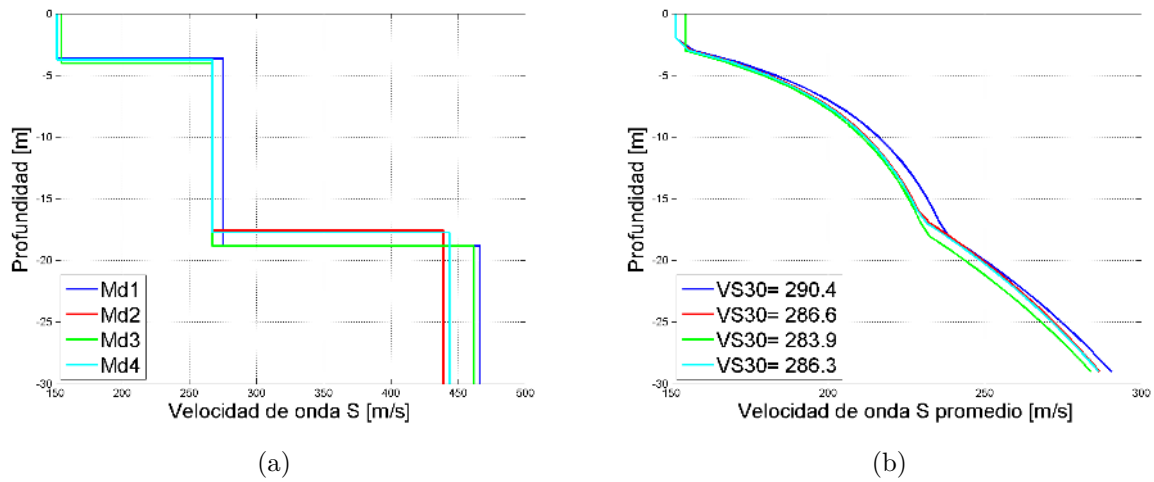


Figura 4.38: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R1 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión acotado.

Perfil	Desajuste
R1 _{2ms} Run 01	0.09
R1 _{2ms} Run 02	0.10
R1 _{2ms} Run 03	0.11
R1 _{2ms} Run 04	0.10

Cuadro 4.17: Desajuste para el perfil R1 de 2 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
R1 _{2ms(ac)} Run 01	0.11
R1 _{2ms(ac)} Run 02	0.09
R1 _{2ms(ac)} Run 03	0.16
R1 _{2ms(ac)} Run 04	0.09

Cuadro 4.18: Desajuste para el perfil R1 de 2 [ms] acotado.

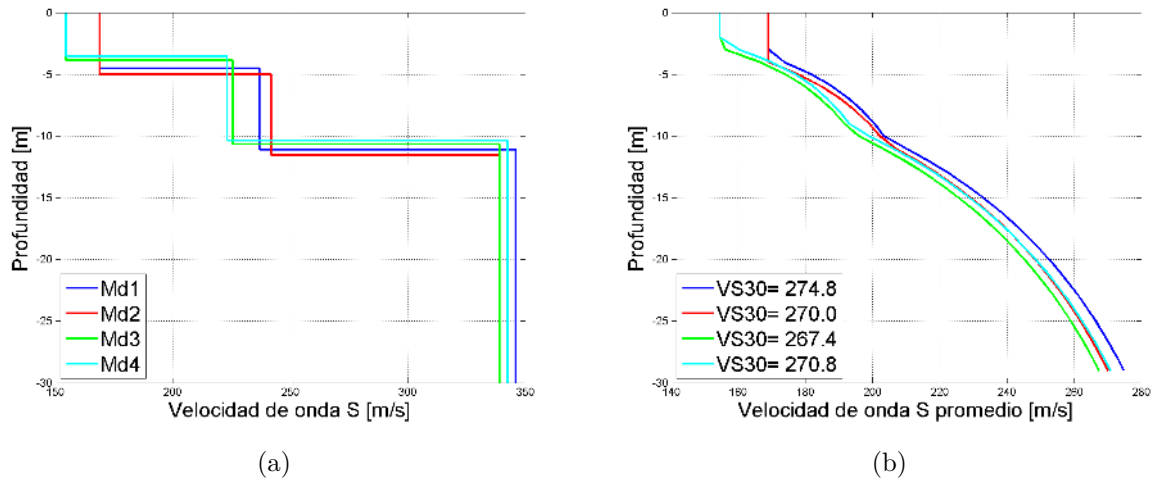


Figura 4.39: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R1 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

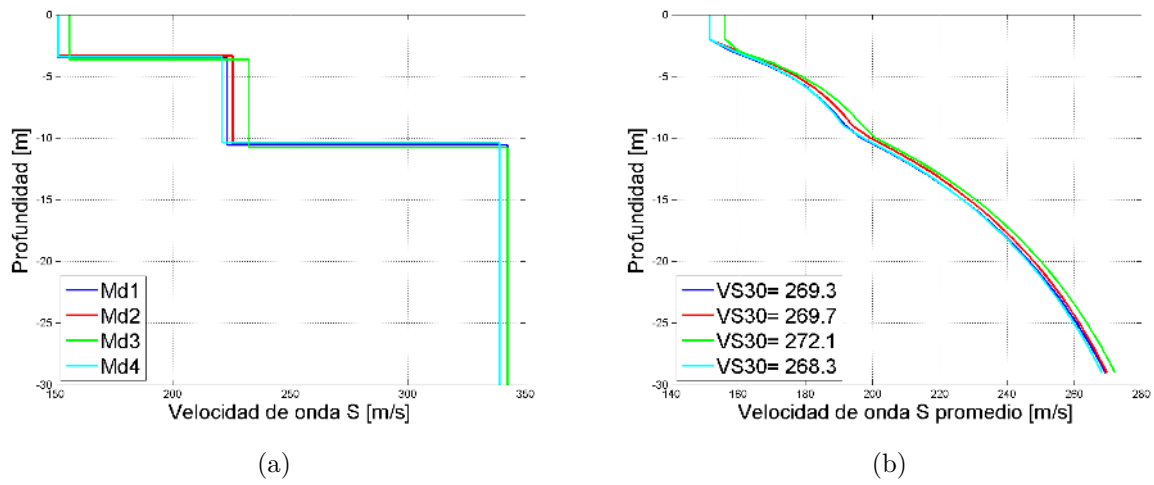


Figura 4.40: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R1 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión acotado.

Perfil	Desajuste
R1 _{4ms} Run 01	0.26
R1 _{4ms} Run 02	0.29
R1 _{4ms} Run 03	0.22
R1 _{4ms} Run 04	0.20

Cuadro 4.19: Desajuste para el perfil R1 de 4 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
R1 _{4ms(ac)} Run 01	0.20
R1 _{4ms(ac)} Run 02	0.20
R1 _{4ms(ac)} Run 03	0.21
R1 _{4ms(ac)} Run 04	0.19

Cuadro 4.20: Desajuste para el perfil R1 de 4 [ms] acotado.

4.3.5.2. Perfil R2

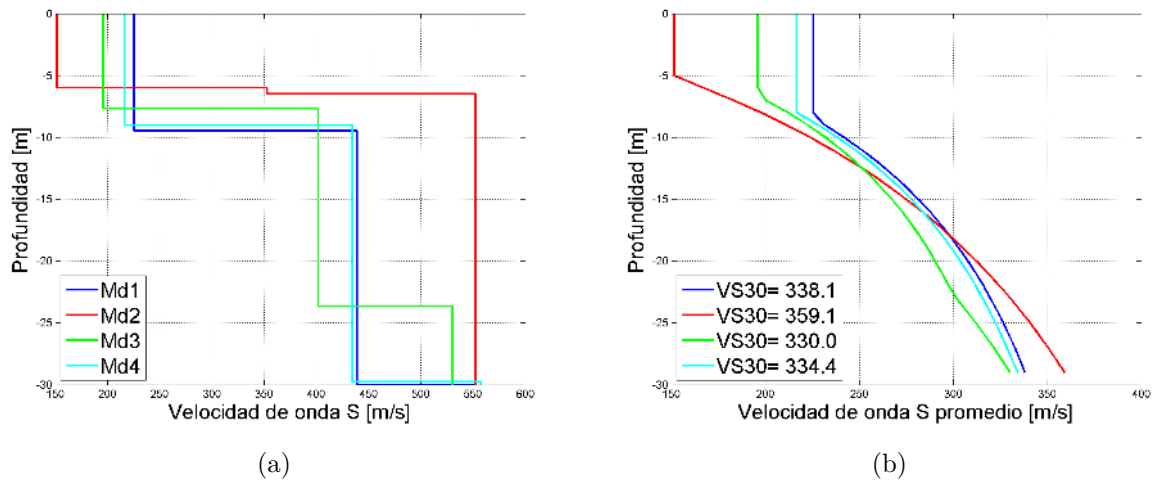


Figura 4.41: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R2 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

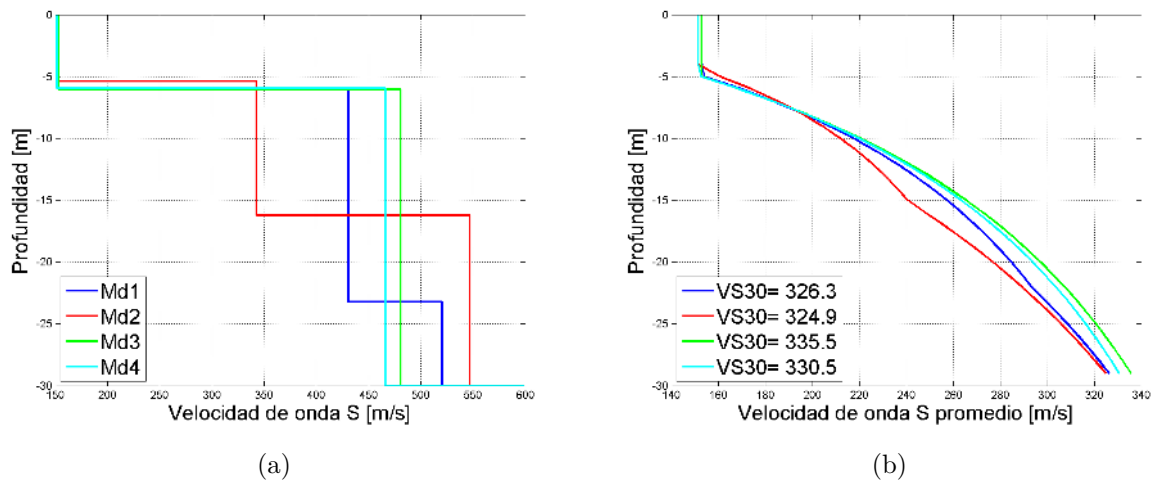


Figura 4.42: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R2 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión acotado.

Perfil	Desajuste
R2 _{2ms} Run 01	0.09
R2 _{2ms} Run 02	0.11
R2 _{2ms} Run 03	0.07
R2 _{2ms} Run 04	0.08

Cuadro 4.21: Desajuste para el perfil R2 de 2 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
R2 _{2ms(ac)} Run 01	0.11
R2 _{2ms(ac)} Run 02	0.11
R2 _{2ms(ac)} Run 03	0.07
R2 _{2ms(ac)} Run 04	0.09

Cuadro 4.22: Desajuste para el perfil R2 de 2 [ms] acotado.

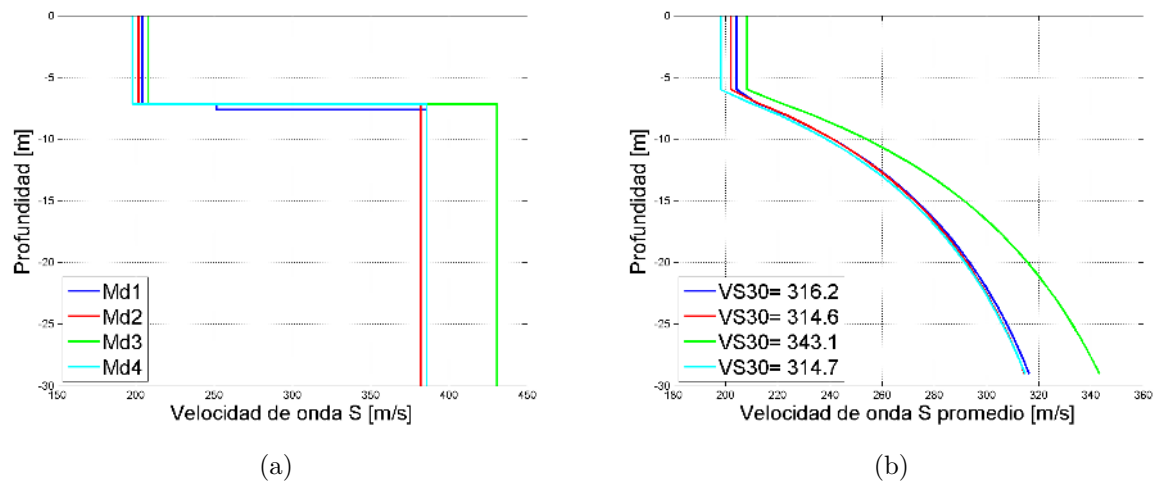


Figura 4.43: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R2 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

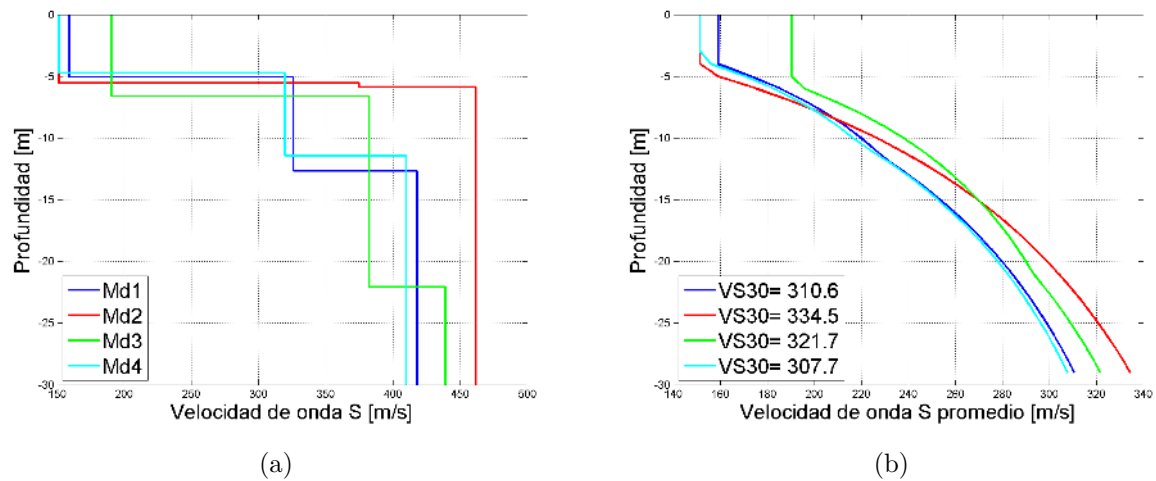


Figura 4.44: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil R2 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión acotado.

Perfil	Desajuste
R2 _{4ms} Run 01	0.12
R2 _{4ms} Run 02	0.09
R2 _{4ms} Run 03	0.09
R2 _{4ms} Run 04	0.10

Cuadro 4.23: Desajuste para el perfil R2 de 4 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
R2 _{4ms(ac)} Run 01	0.08
R2 _{4ms(ac)} Run 02	0.14
R2 _{4ms(ac)} Run 03	0.08
R2 _{4ms(ac)} Run 04	0.07

Cuadro 4.24: Desajuste para el perfil R2 de 4 [ms] acotado.

4.3.6. Curva V_{s30} promedio

A continuación se presentan las curvas V_{s30} promedio para los perfiles R1 y R2 no acotadas, es decir con parámetros por defecto desde el software.

Para los perfiles R1 y R2 con 2 [ms] y espaciamento 4 y 10 [m] respectivamente:

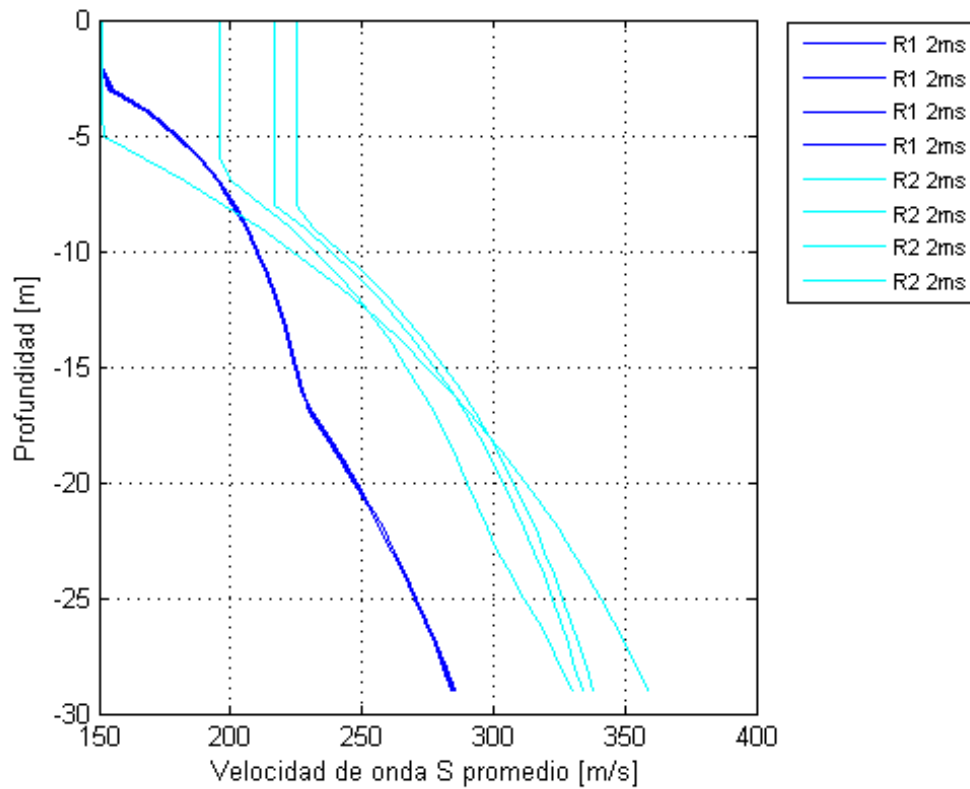


Figura 4.45: *Curvas V_{s30} promedio para perfiles R1 y R2 con muestreo de 2 [ms] no acotado.*

Se observa que en el perfil R1 de 2 [ms] y con espaciamento de 4 [m] entre geófonos, los 4 modelos generados que se realizaron para mayor contundencia se ajustan muy bien entre ellos no así para el perfil R2 y de espaciamento de 10 [m] que tienden hacer dispersivos.

Para los perfiles R1 y R2 con 4 [ms] y espaciamiento 4 y 10 [m] respectivamente se obtuvo lo siguiente:

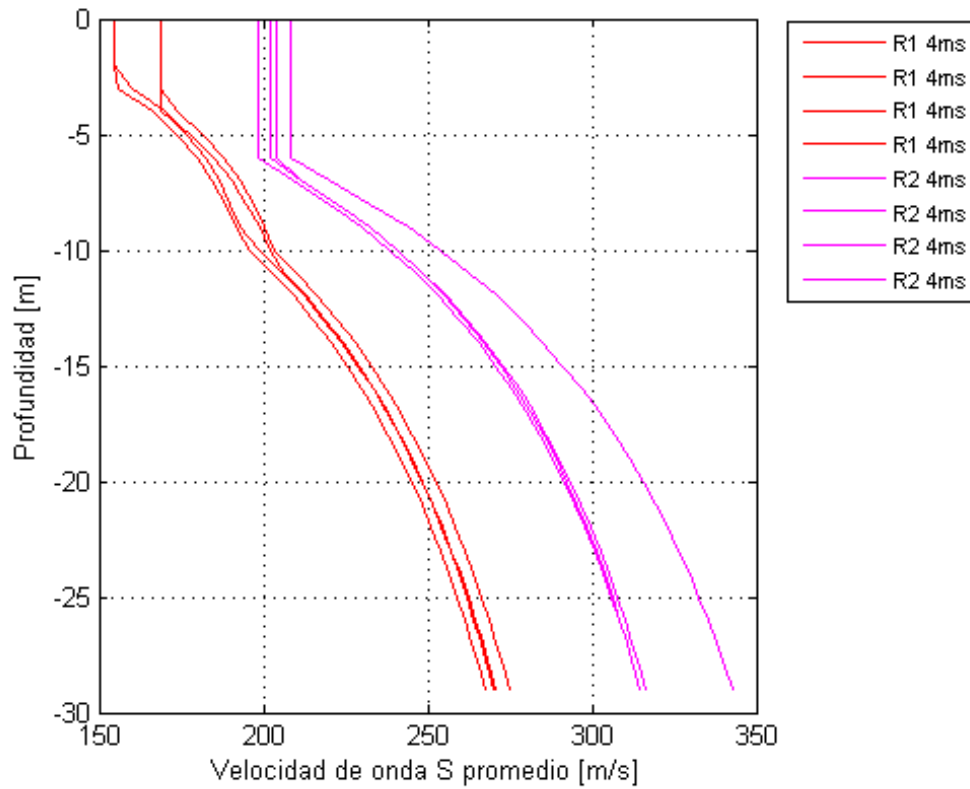


Figura 4.46: *Curvas V_{s30} promedio para perfiles R1 y R2 con muestreo de 4 [ms] no acotado.*

En el perfil R1 de 4 [ms] los modelos mantienen su tendencia y R2 de 4 [ms] con espaciamiento 10 [m] muestra un mayor ajuste, sin embargo sigue con tendencia dispersiva.

Finalmente todas las curvas V_{s30} promedio obtenidas de los perfiles R1 y R2 no acotadas:

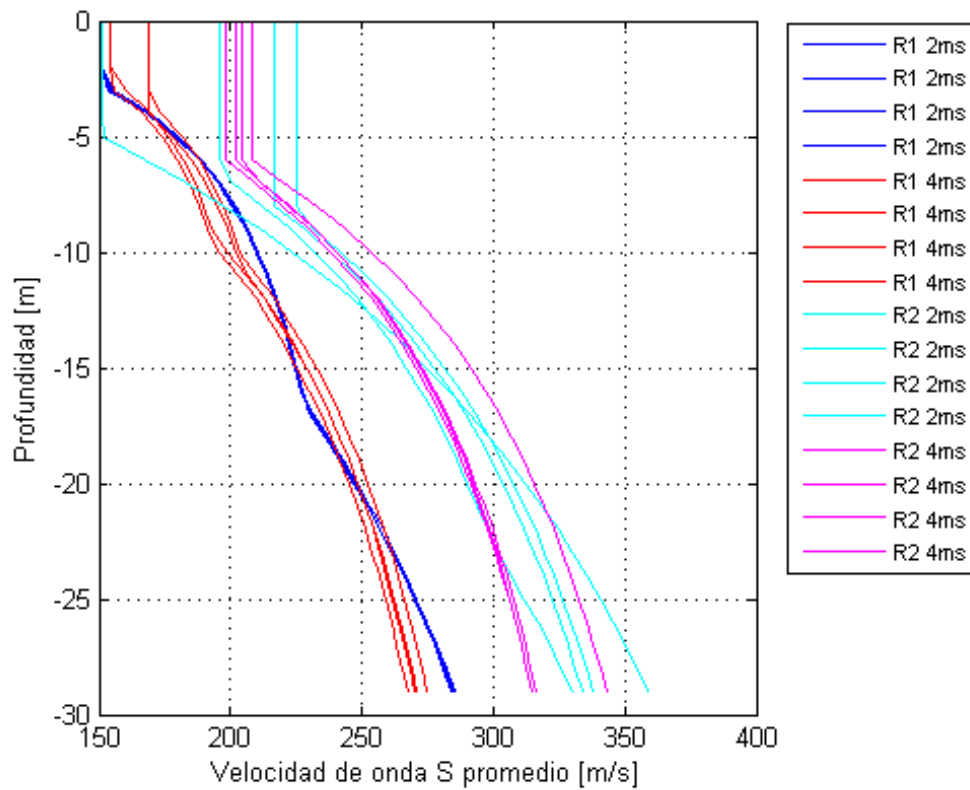


Figura 4.47: Curvas V_{s30} promedio de perfiles R1 Y R2 con muestreo de 2 y 4 [ms] no acotado.

De acuerdo al conjunto de curvas generadas no acotadas en esta gráfica, se observa que el perfil R1, muestra menos dispersión e indicando valores V_{s30} entre 260 a 290 $\left[\frac{m}{s}\right]$ aproximadamente. Por otro lado el perfil R2 con espaciamiento de 10 [m] muestra dispersión entre sus curvas las cuales señalan valores V_{s30} entre 320 a 360 $\left[\frac{m}{s}\right]$ aproximadamente.

A continuación se presentan las curvas V_{s30} promedio para los perfiles R1 y R2 acotados por sísmica de refracción con 2 [ms] y espaciamiento 4 y 10 [m] respectivamente:

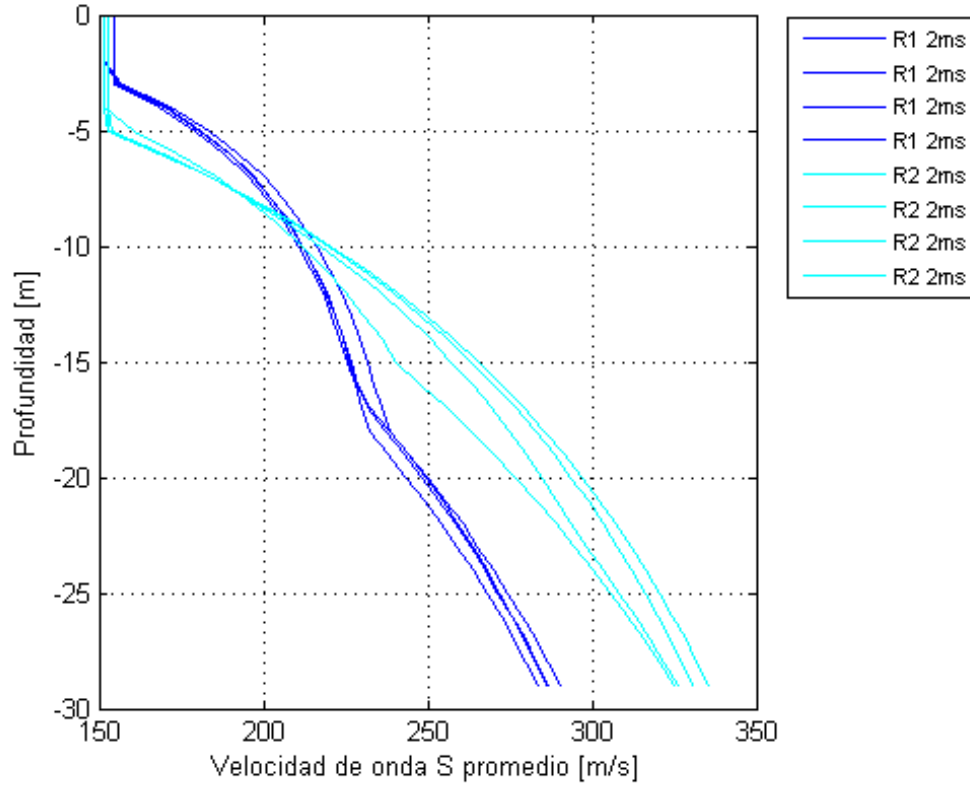


Figura 4.48: Curvas V_{s30} promedio para perfiles R1 y R2 con muestreo de 2 [ms] acotado.

Se observa que el perfil R1 mantiene una tendencia y un ajuste entre sus curvas, por otro lado R2 posee dispersión entre sus modelos, sin embargo ambos conjuntos de curvas se acercan a un V_{s30} cercano a los valores anteriormente mostrados.

Para los perfiles R1 y R2 con 4 [ms] y espaciamiento 4 y 10 [m] respectivamente se obtuvo lo siguiente:

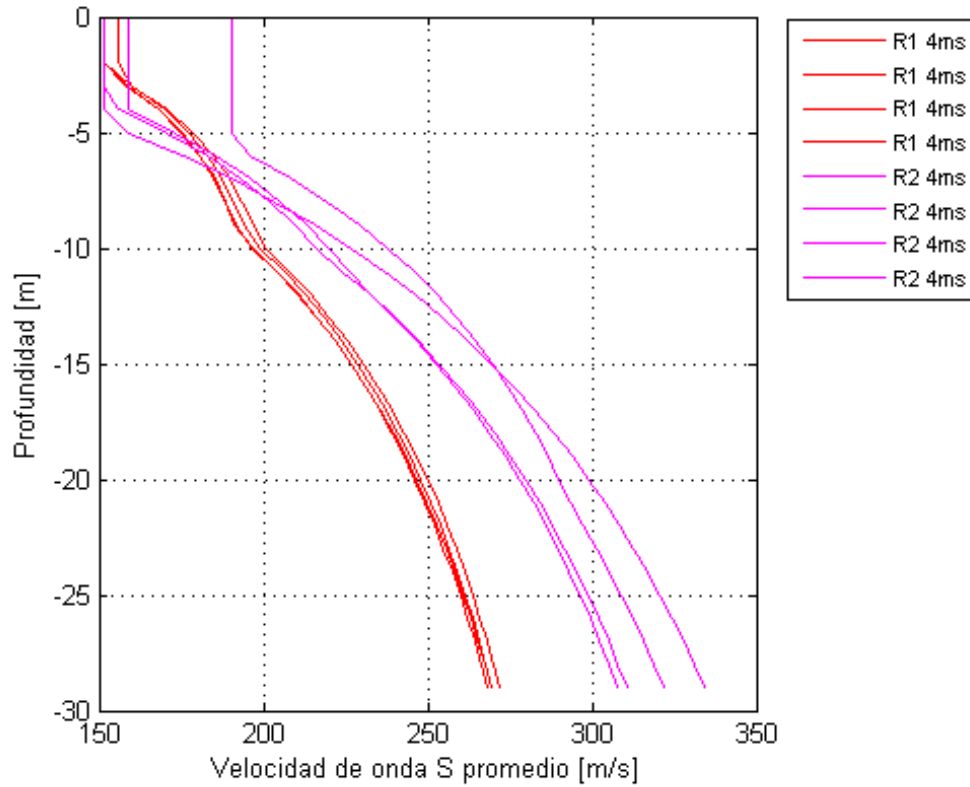


Figura 4.49: Curvas V_{s30} promedio para perfiles R1 y R2 con muestreo de 4 [ms] acotado.

Para esta figura se observó que R1 mantiene su tendencia, sin embargo con un V_{s30} algo inferior no así R2 que en este caso posee mayor dispersión en sus modelos.

Finalmente todas las curvas V_{s30} promedio obtenidas de los perfiles R1 y R2 acotadas:

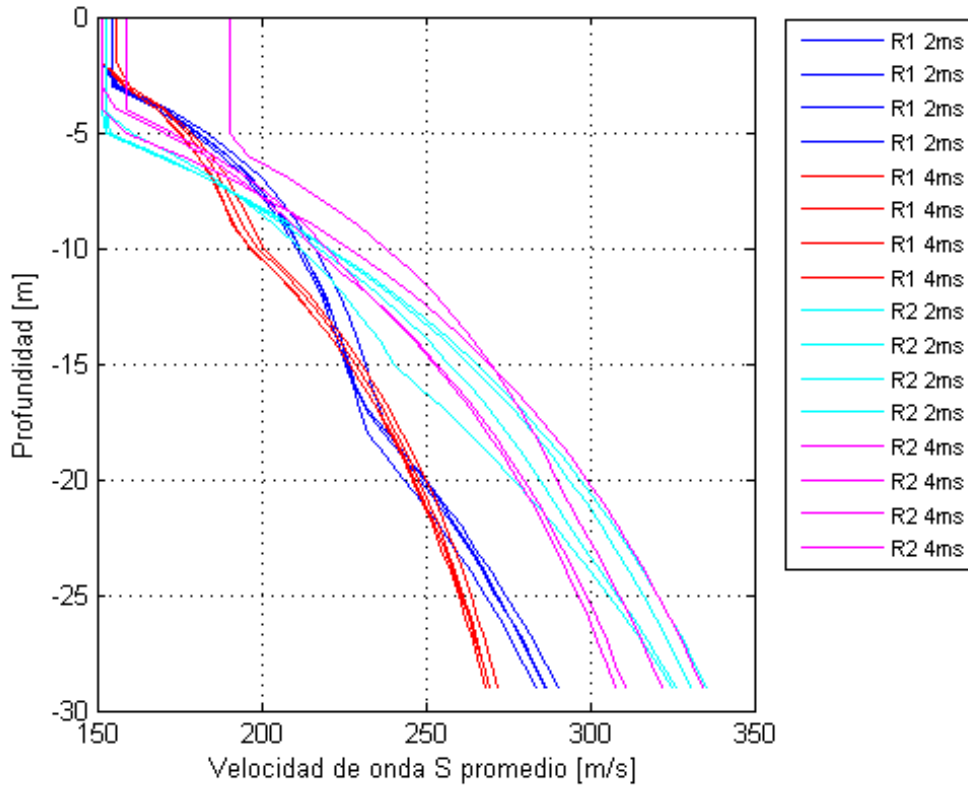


Figura 4.50: Curvas V_{s30} promedio de perfiles R1 Y R2 con muestreo de 2 y 4 [ms] acotado.

De acuerdo a esta figura para R1 el V_{s30} está entre los 270 y los 290 $[\frac{m}{s}]$ aproximadamente mientras que R2 indica un V_{s30} entre los 320 y los 340 $[\frac{m}{s}]$ aproximadamente. A grandes rasgos las curvas R1 y R2 mantienen su tendencia además se observa que que el perfil R1 con espaciamento entre geófonos de 4 [m] resultó tener una mayor ajuste y menos dispersión entre las 4 curvas modelo e indicando un valor de parametro V_{s30} siempre inferior a R2.

Se puede concluir a partir de los perfiles R1 y R2 acotados y no acotados que el parámetro V_{s30} fructúa entre los 260 y los 350 $[\frac{m}{s}]$ y bajo estas observaciones esto permitiría suponer que de acuerdo a la norma sísmica este suelo tendría una clasificación D.

4.4. Termas de Manzanar

Para el estudio aledaño a las Termas de Manzanar de refracción sísmica y los registros mediante ReMi se usaron 24 geófonos, además el área se dividió en 2 sub-zonas, la primera en la ladera del Rio Curacautín con los perfiles de nombre M1, M2 y M6 y la segunda en el sector posterior al complejo etiquetados como M3, M4 y M5.



Figura 4.51: Vista satelital con el detalle de los perfiles realizados en el sector de las Termas de Manzanar, Región de la Araucanía.

Los perfiles tienen la siguientes longitudes, orientaciones y espaciamiento entre geófonos:

Perfil	Longitud [m]	Orientación	Espaciamiento [m]
M1	23	Suroeste-noreste	2
M2	34.5	Este-oeste	1.5
M3	46	Suroeste-noreste	2
M4	34.5	Este-oeste	1.5
M5	92	Suroeste-noreste	4
M6	46	Noroeste-suroeste	2

Cuadro 4.25: Perfiles realizados en el sector Termas de Manzanar.

4.4.1. Sísmica de refracción

Para este sector en cada perfil se realizó sísmica de refracción, estas se presentan a continuación:

4.4.1.1. Perfil M1

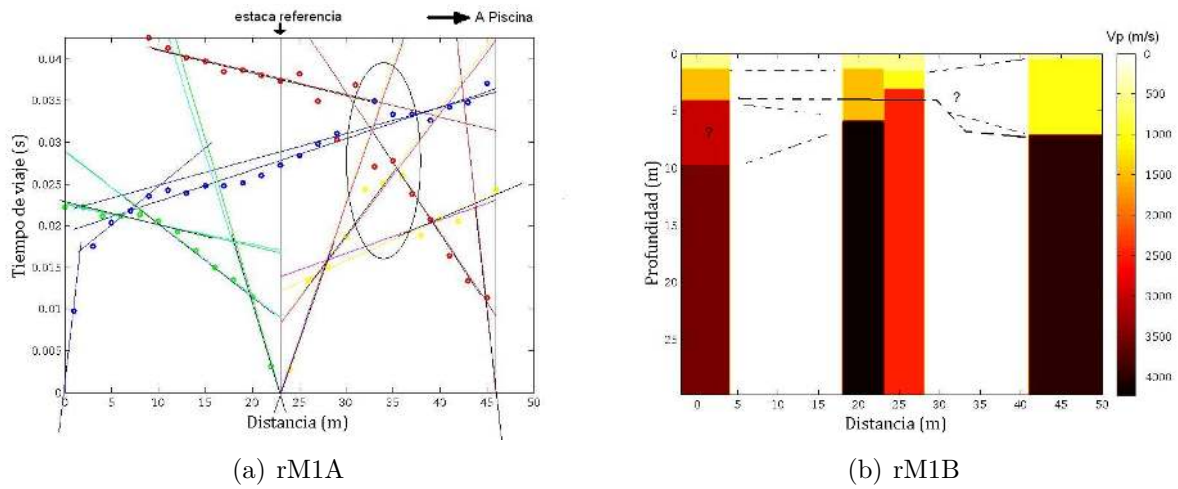


Figura 4.52: Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM1A) y modelos de velocidad obtenidos (rM1B).

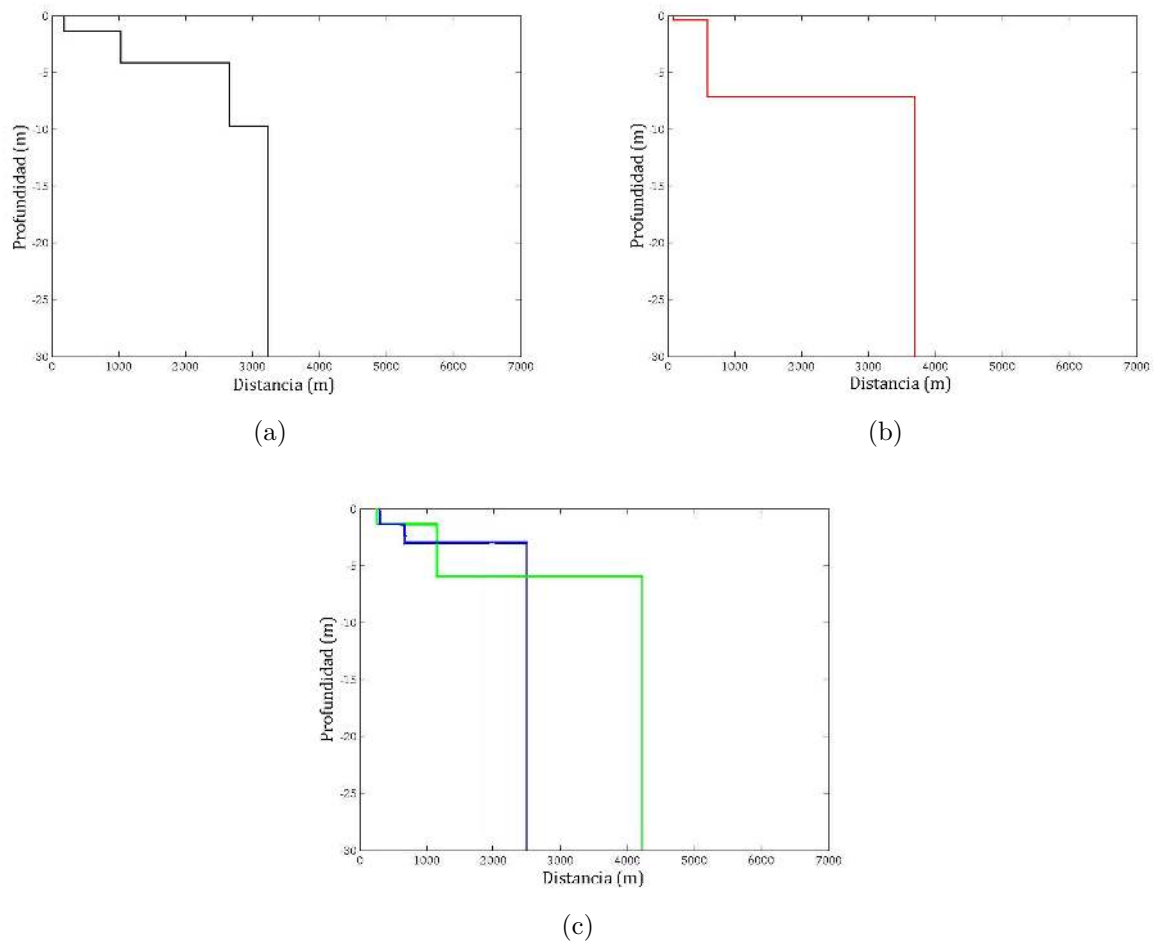
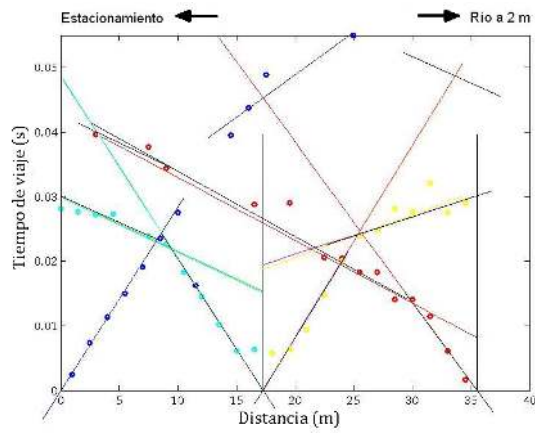
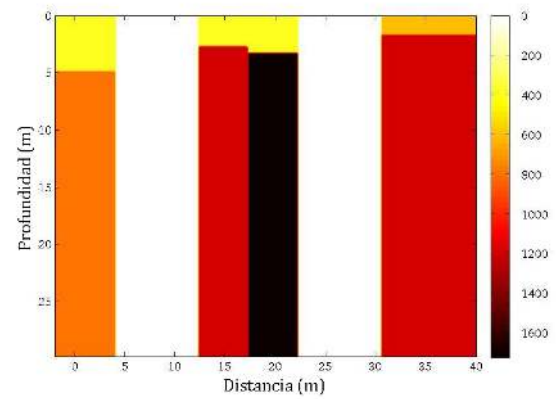


Figura 4.53: Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sísmica de refracción

4.4.1.2. Perfil M2

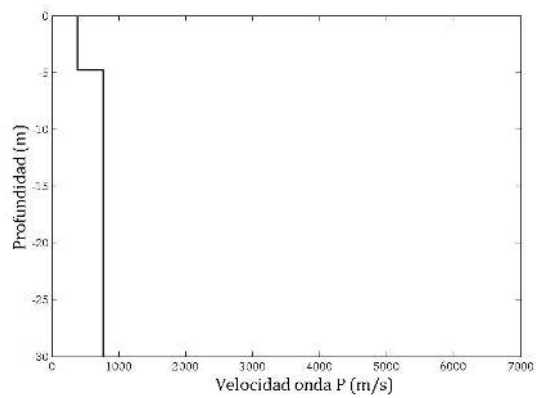


(a) rM2A

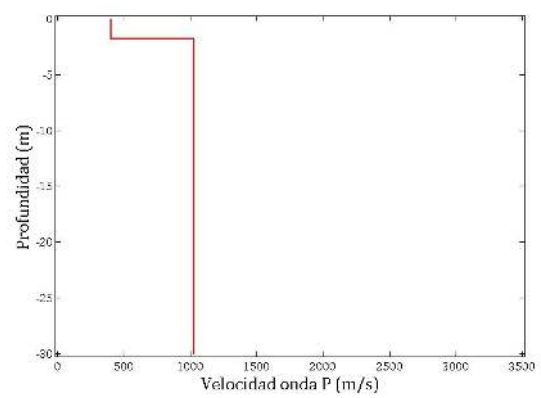


(b) rM2B

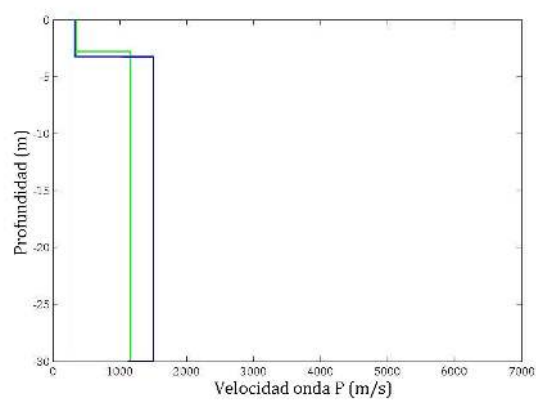
Figura 4.54: Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM2A) y modelos de velocidad obtenidos (rM2B).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.55: Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sismica de refracción

4.4.1.3. Perfil M3

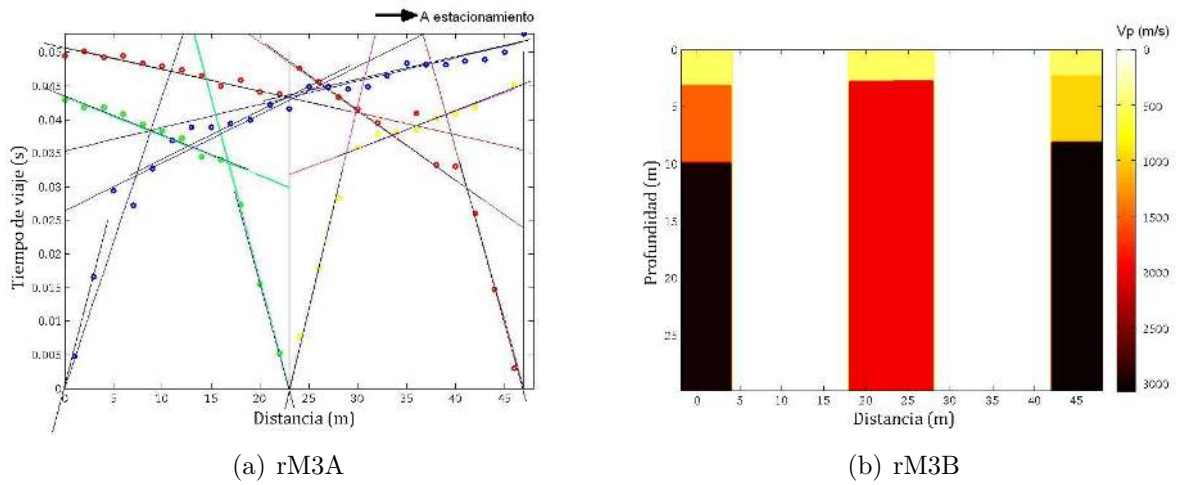


Figura 4.56: Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM3A) y modelos de velocidad obtenidos (rM3B).

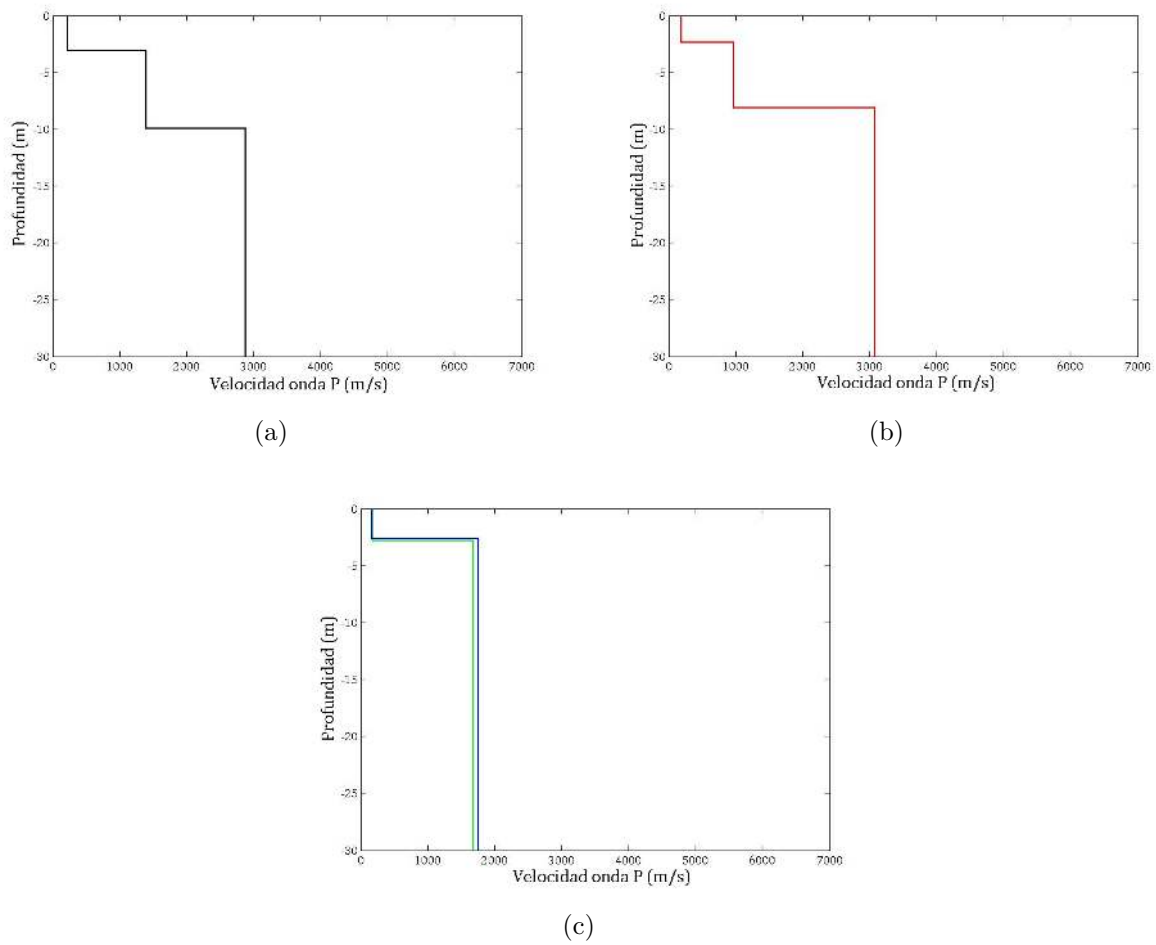
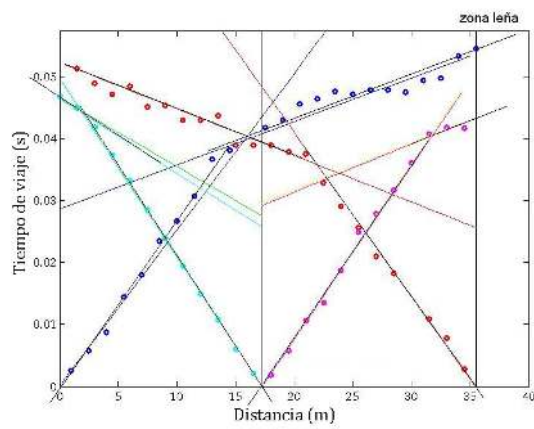
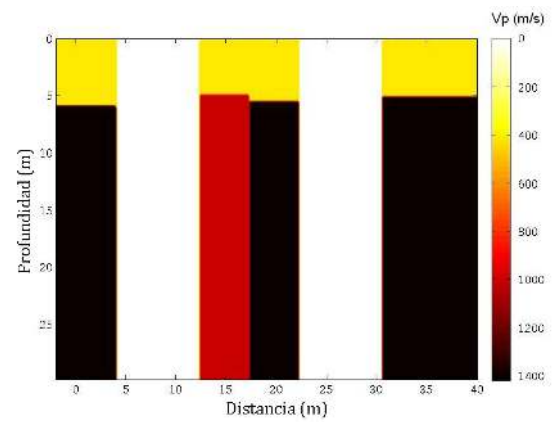


Figura 4.57: Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sísmica de refracción

4.4.1.4. Perfil M4

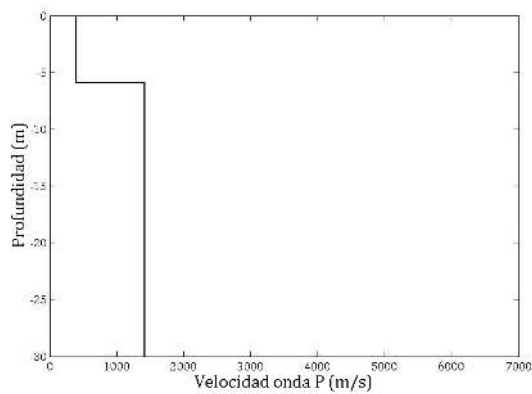


(a) rM4A

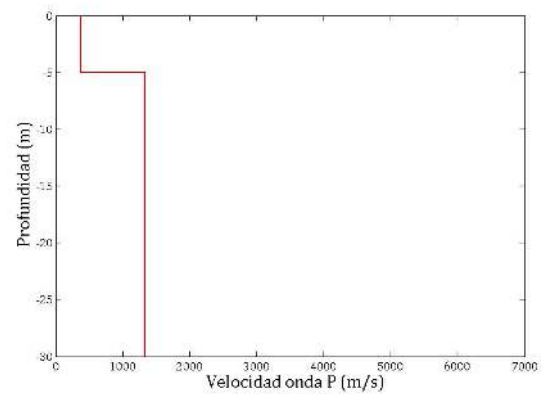


(b) rM4A

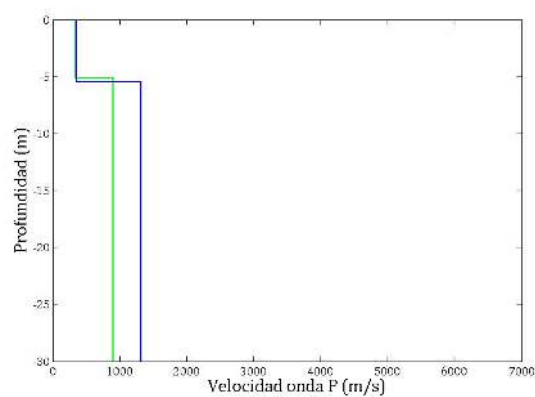
Figura 4.58: Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM4A) y modelos de velocidad obtenidos (rM4B).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.59: Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sísmica de refracción

4.4.1.5. Perfil M5

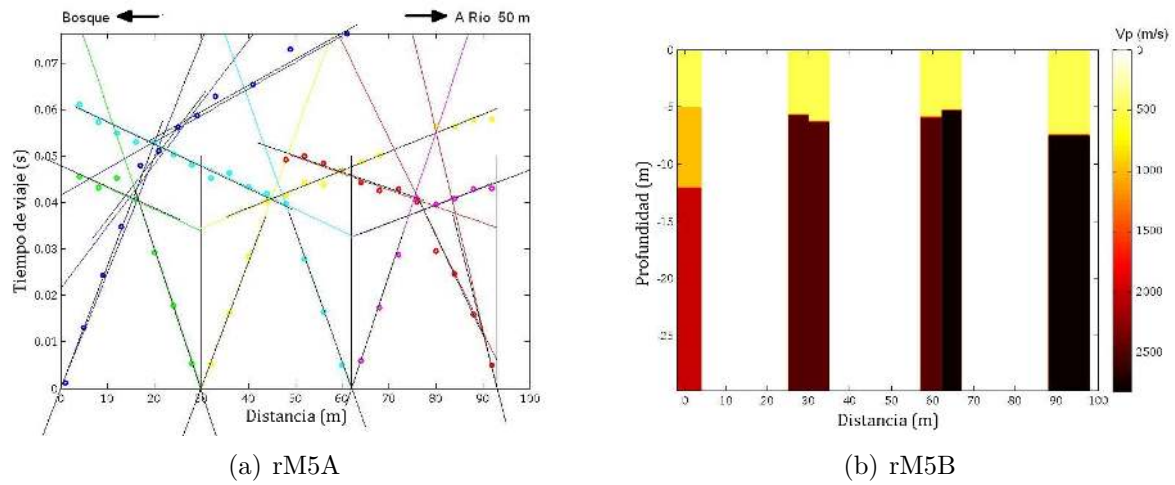


Figura 4.60: Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM5A) y modelos de velocidad obtenidos (rM5B).

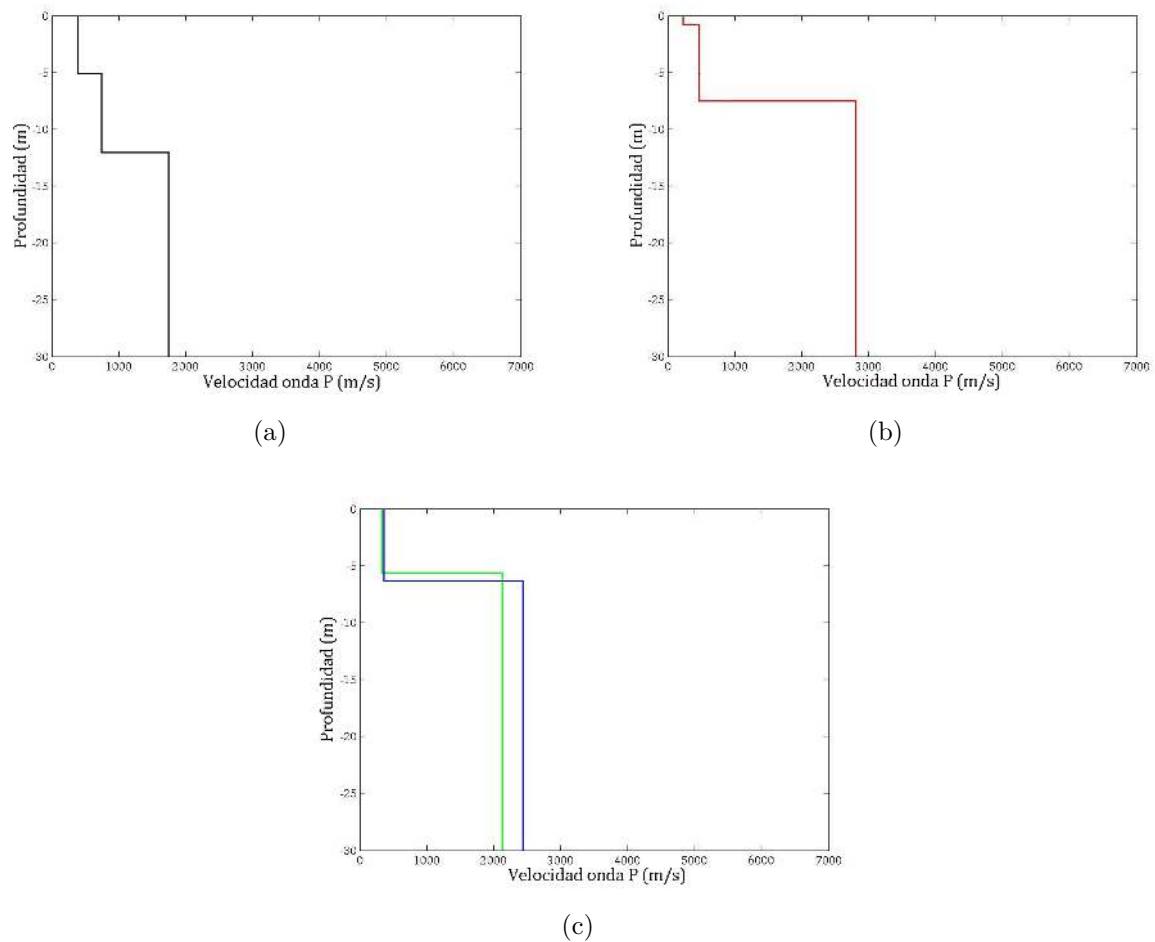
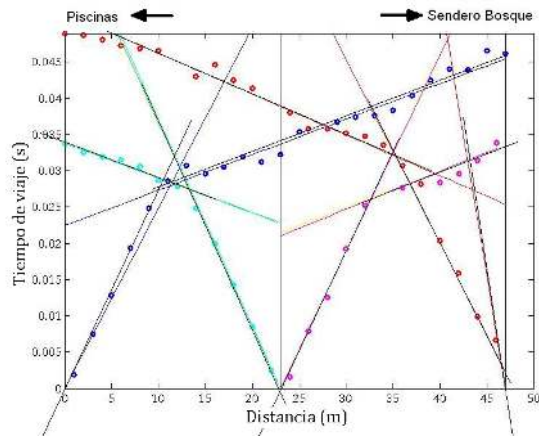
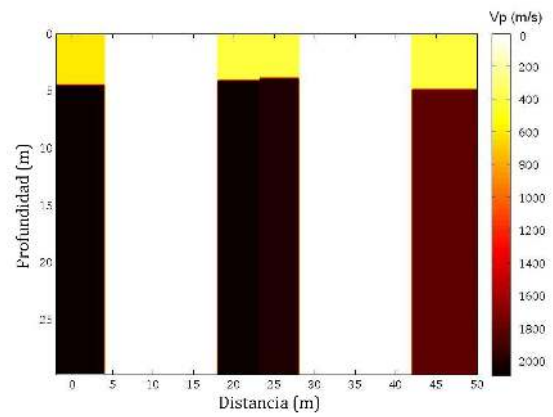


Figura 4.61: Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sismica de refracción

4.4.1.6. Perfil M6

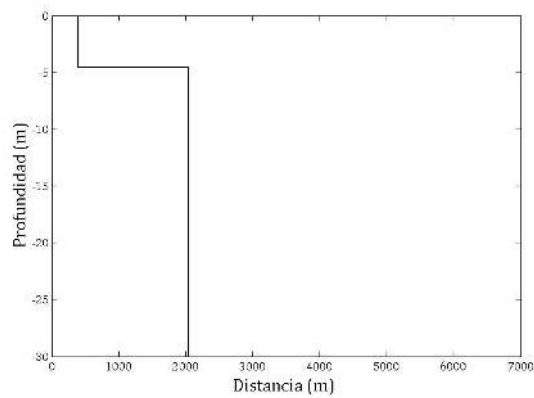


(a) rM6A

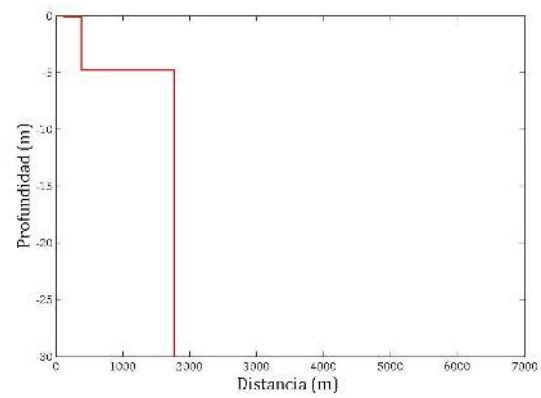


(b) rM6B

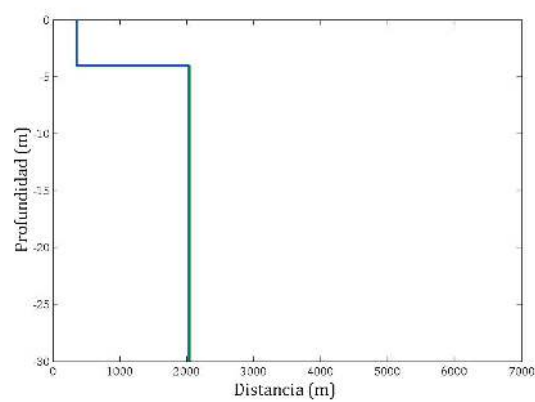
Figura 4.62: Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (rM6A) y modelos de velocidad obtenidos (rM6B).



(a)



(b)



(c)

Figura 4.63: Perfiles laterales (a),(b) y centrales (c) obtenidos mediante la sismica de refracción

De acuerdo a todo lo anterior, se decidió establecer un modelo de 3 capas para este sector.

4.4.2. Refracción por microtremor (ReMi)

A continuación se presentan los registros espectrales obtenidos para cada perfil:

4.4.2.1. Perfil M1

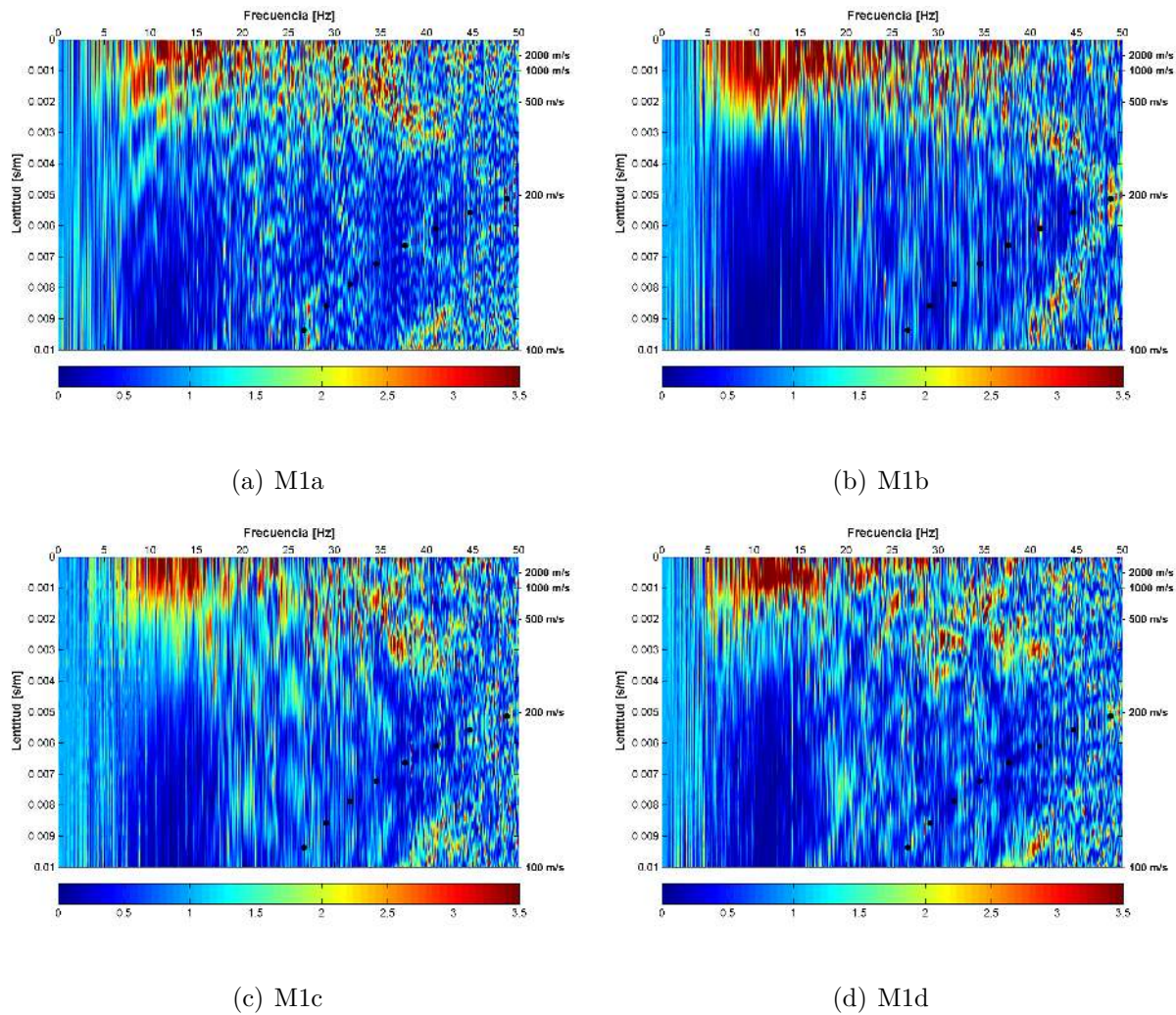


Figura 4.64: Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M1a el primero, M1b el segundo, M1c el tercero y M1d el cuarto.

Como se aprecia en las imágenes espectrales de muestreo 2 [ms] existe una notable tasa espectral, la mayor cantidad de energía en los espectros se da entre las frecuencias 7 a 20 [Hz] aproximadamente, con un debilitamiento y fragmentación de esta en frecuencias superiores.

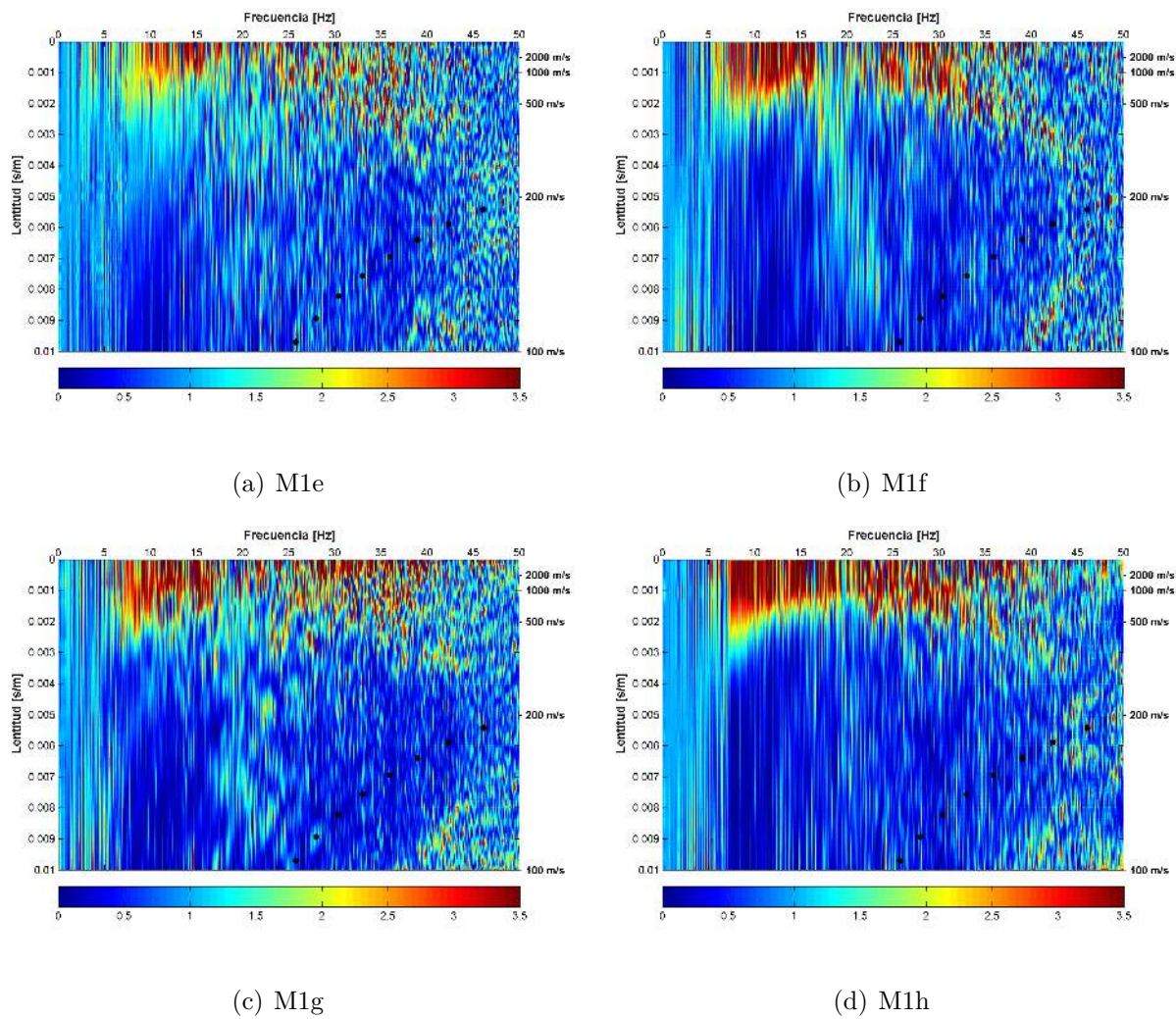
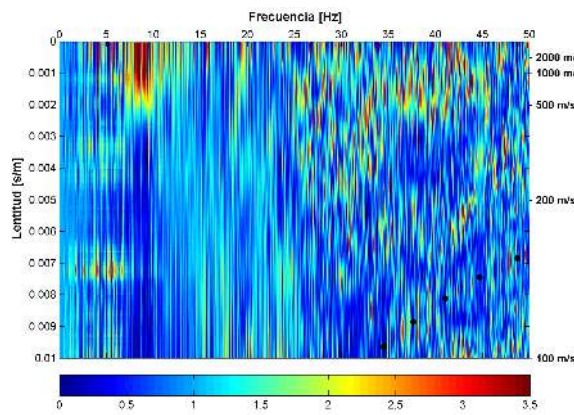


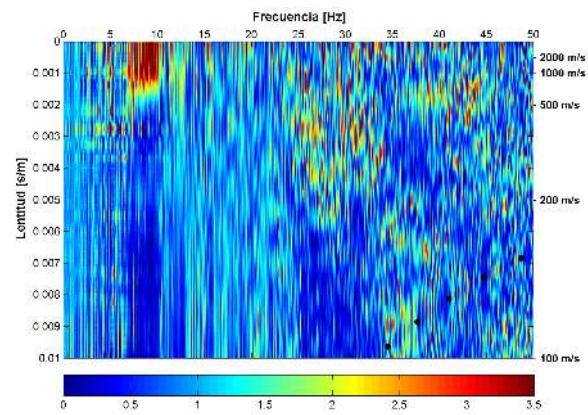
Figura 4.65: Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M1e el primero, M1f el segundo, M1g el tercero y M1h el cuarto.

Al igual que lo anterior para los registros de 4 [ms] el comportamiento de la tasa más energética se mantiene, básicamente en la misma frecuencia con un único debilitamiento de la energía notable, lo que se observa en la imagen M1e.

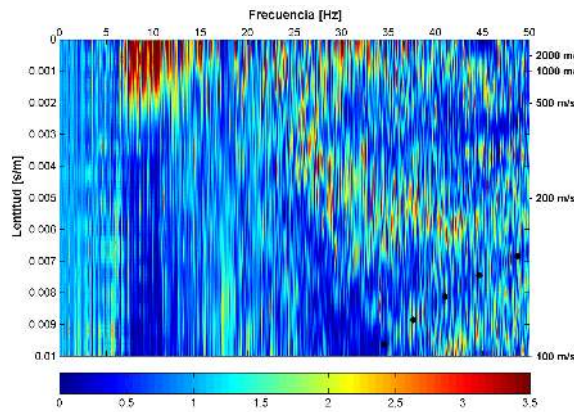
4.4.2.2. Perfil M2



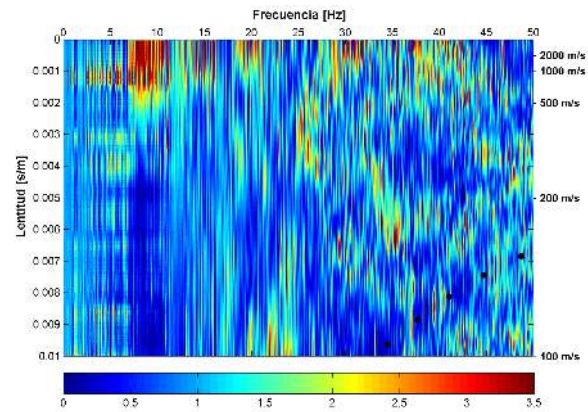
(a) M2a



(b) M2b



(c) M2c



(d) M2d

Figura 4.66: Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], M2a el primero, M2b el segundo, M2c el tercero y M2d el cuarto.

Como se puede observar en las 4 imágenes espectrales de muestreo 2 [ms] presentan ruido que causan variaciones en la tasa de energía general, sin embargo es posible visualizar la mayor energía de los espectros en las frecuencias de 7 a 10 [Hz] aproximadamente.

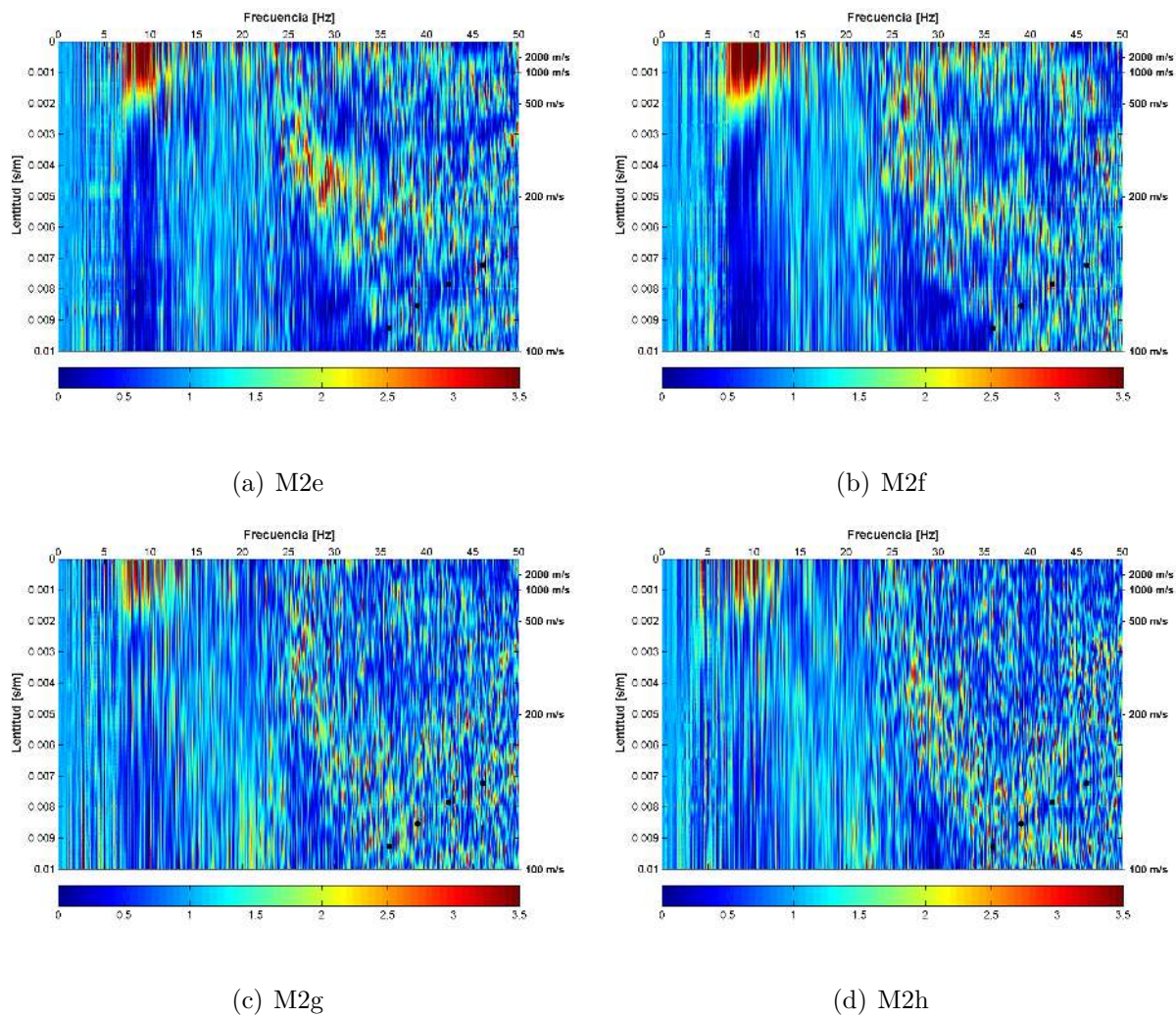


Figura 4.67: Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], M2e el primero, M2f el segundo, M2g el tercero y M2h el cuarto.

De acuerdo a las imágenes de muestreo 4 [ms] se presenta básicamente el mismo comportamiento en la tasa de energía principal entre los 7 a 10 [Hz] pero con un notable debilitamiento de éste, lo que se aprecia en las figuras M2g y M2h.

4.4.2.3. Perfil M3

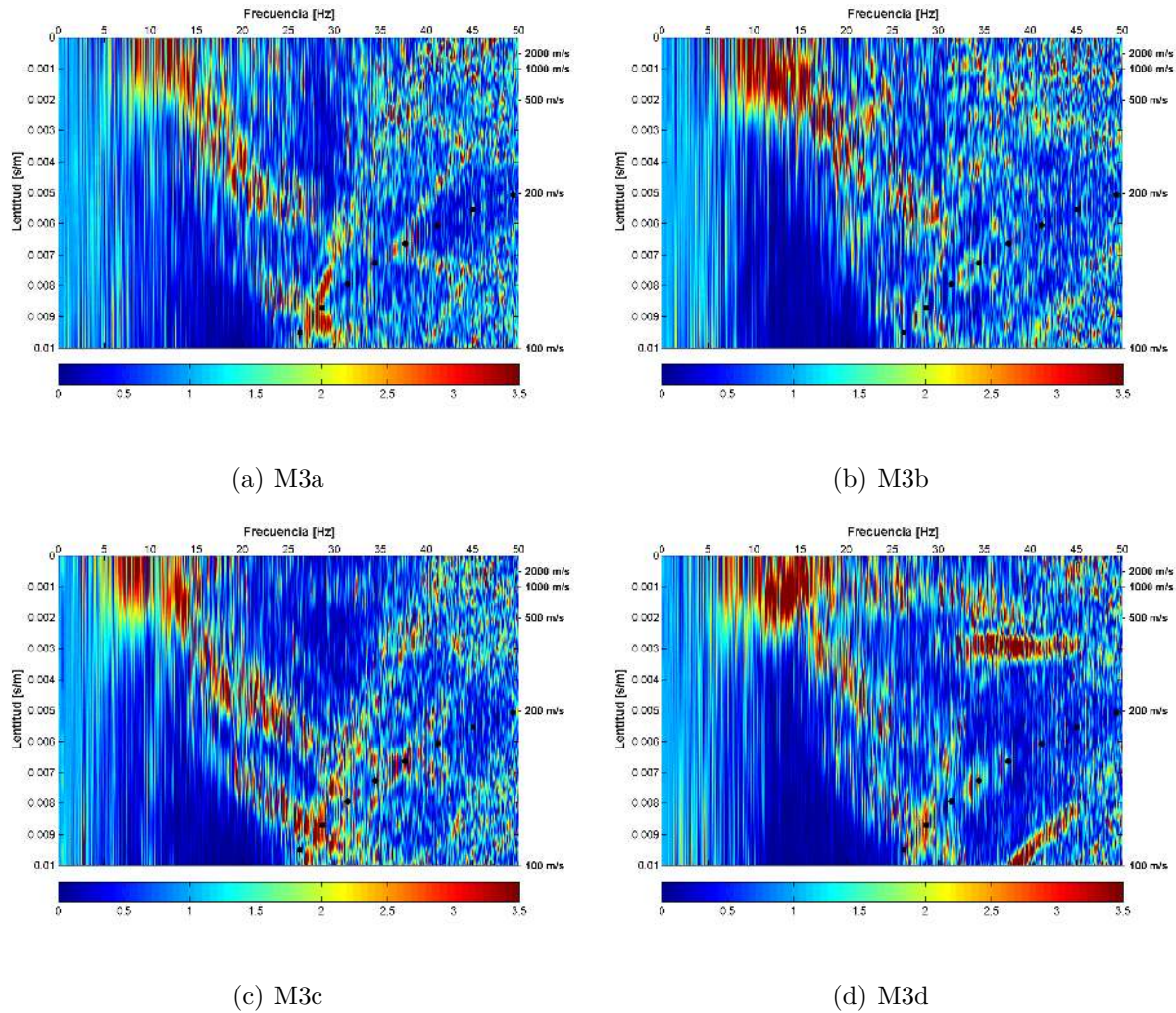


Figura 4.68: Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M3a el primero, M3b el segundo, M3c el tercero y M3d el cuarto.

Las imágenes espectrales de 2 [ms] muestran que la tasa mayor de energía se mantiene en las mismas frecuencias anteriormente visualizadas, sin embargo se aprecian cambios notables en los registros. Se observa una clara tendencia energética por sobre los 15 [Hz] aproximadamente y con una lentitud en aumento, además es posible notar de acuerdo a las figuras M3a y M3c una bifurcación energética en lentitudes cercanas a los 0.007 [s/m] como también a los 0.002 [s/m] de acuerdo a la imagen M3d y cuya tasa energética del modo de menor lentitud coincide hasta ahora con lo anteriormente visto.

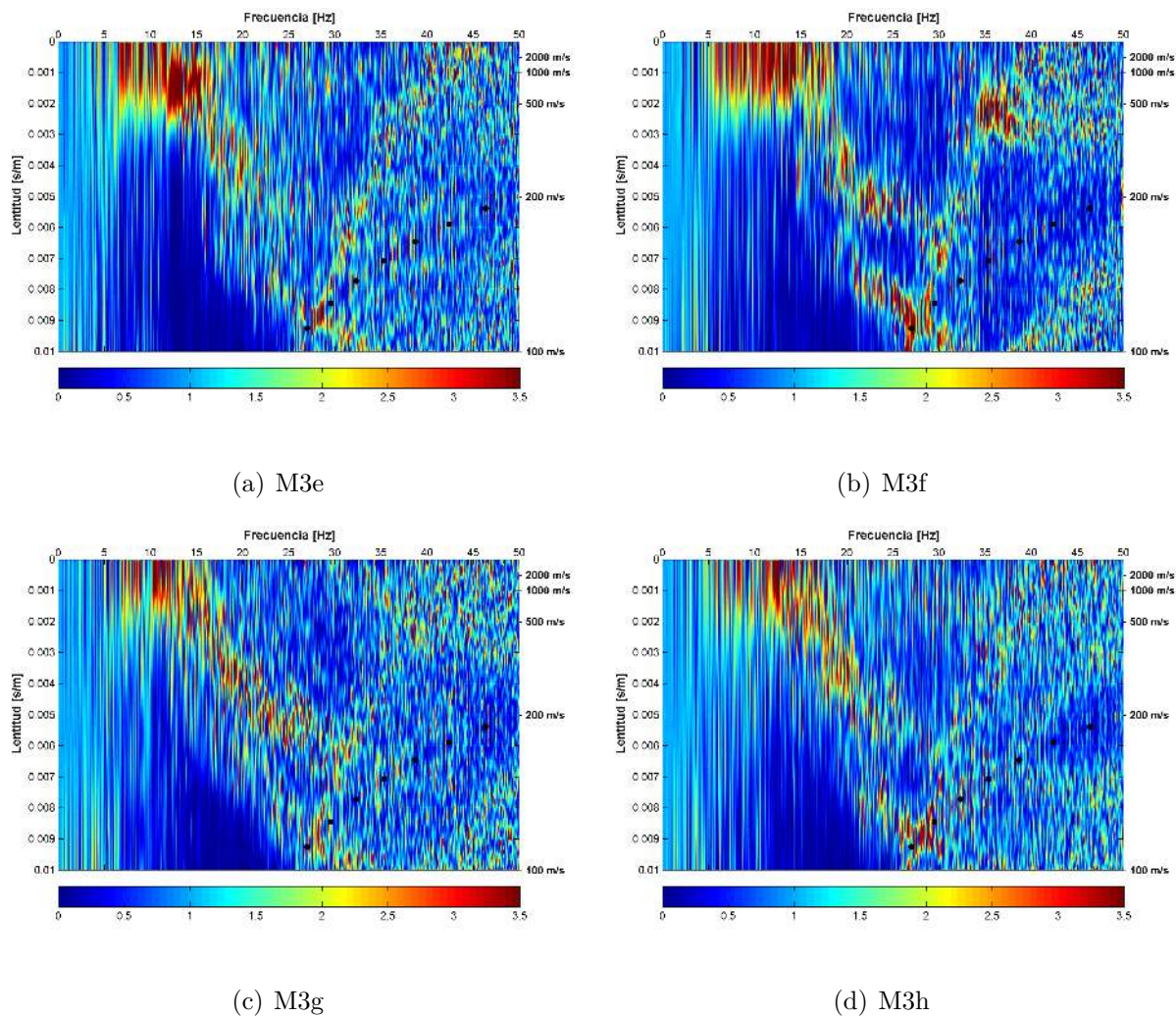


Figura 4.69: Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M3e el primero, M3f el segundo, M3g el tercero y M3h el cuarto.

Al igual que los anteriormente visto las tendencias energéticas para los registros de 4 [ms] se mantienen con estos nuevos modos y se puede observar que en los registros obtenidos es más clara, en donde la tendencia en un comienzo vista de baja lentitud es casi inexistente.

4.4.2.4. Perfil M4

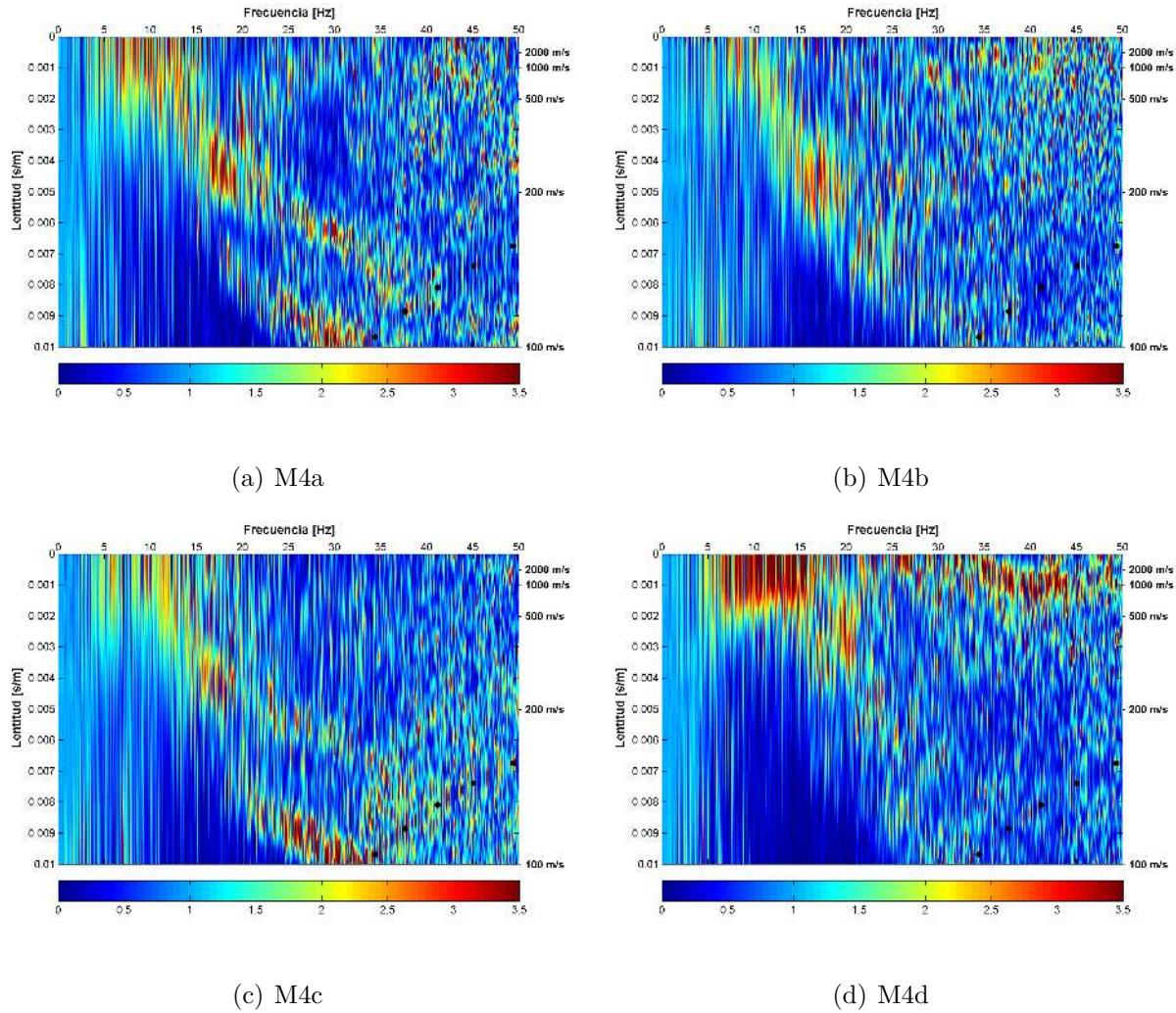


Figura 4.70: Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], M4a el primero, M4b el segundo, M4c el tercero y M4d el cuarto.

Para estos registros de 2 [ms] se mantiene las tendencias anteriormente vistas, sin embargo se comienzan a visualizar un debilitamiento energético de los modos de acuerdo a las figuras M4a, M4b y M4c y con una nueva visualización del espectro de energía de baja lentitud observado desde el comienzo entre los 7 a 20 [Hz].

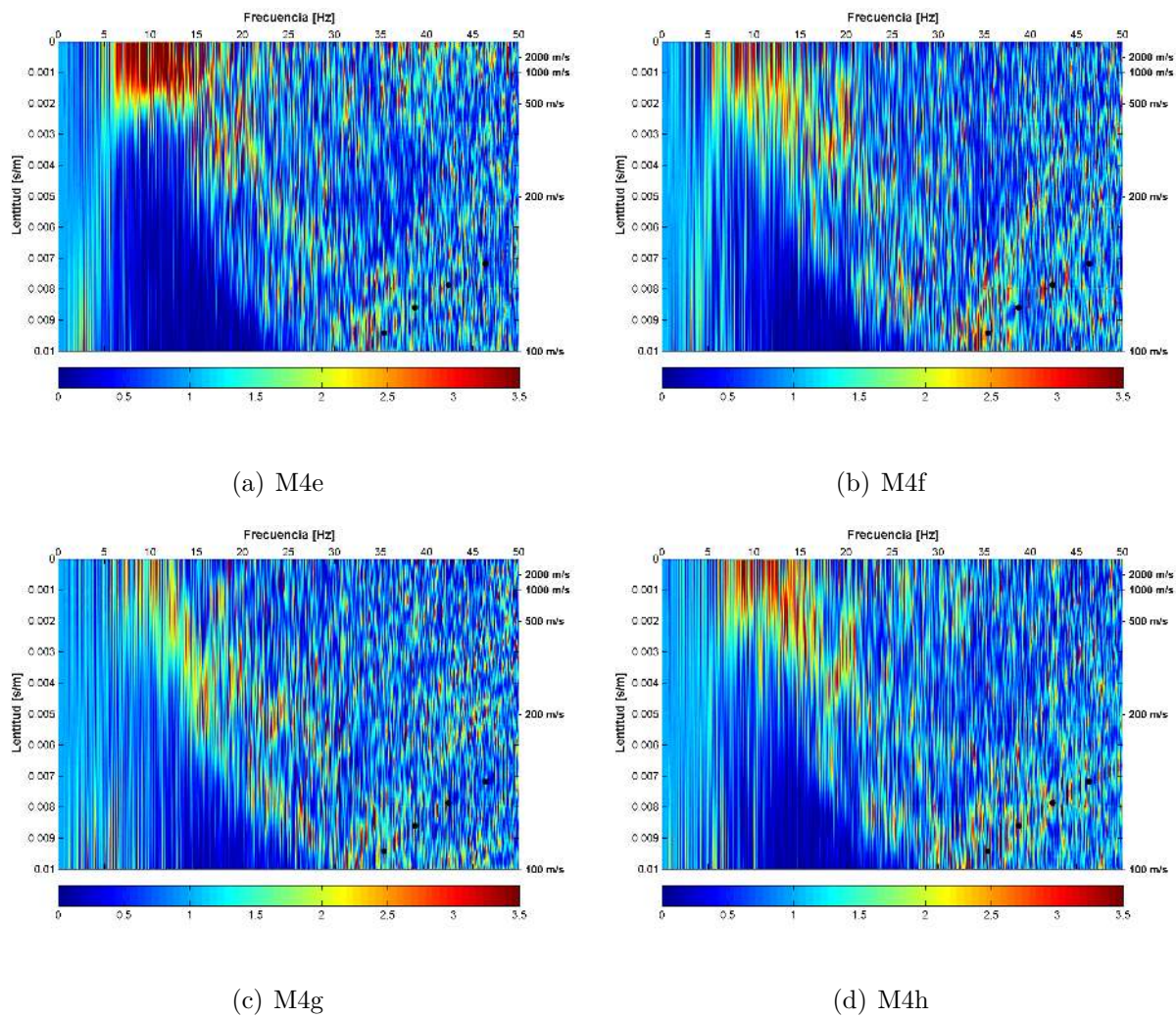


Figura 4.71: Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], M4e el primero, M4f el segundo, M4g el tercero y M4h el cuarto.

Para estos registros de 4 [ms] se mantienen las tendencias de debilitamiento energético en los modos observados, sin embargo la tasa de mayor energía se mantiene en las lentitudes inferiores y en las frecuencia de 7 a 15 [Hz] aproximadamente.

4.4.2.5. Perfil M5

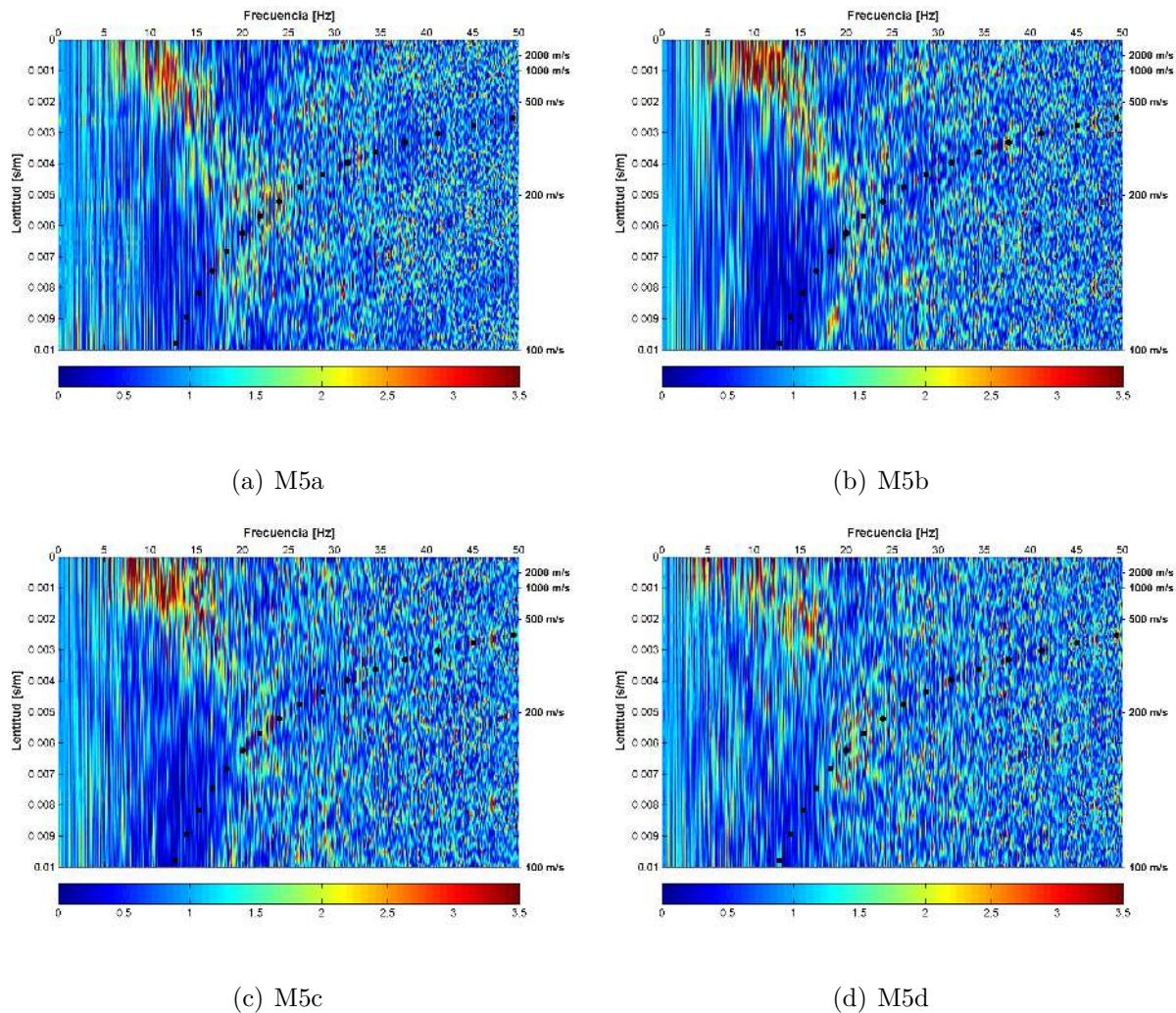


Figura 4.72: Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 4 [m], M5a el primero, M5b el segundo, M5c el tercero y M5d el cuarto.

Para los registros de 2 [ms] se puede observar que con el aumento del espaciamiento entre los geófonos se permite visualizar con menos detalle el patrón antes visto de la tasa de energía y como se observa en la figura M5d con una mayor cantidad de distorsión en los registros, sin embargo aún es posible ver claramente el modo más energético de alta lentitud antes encontrado.

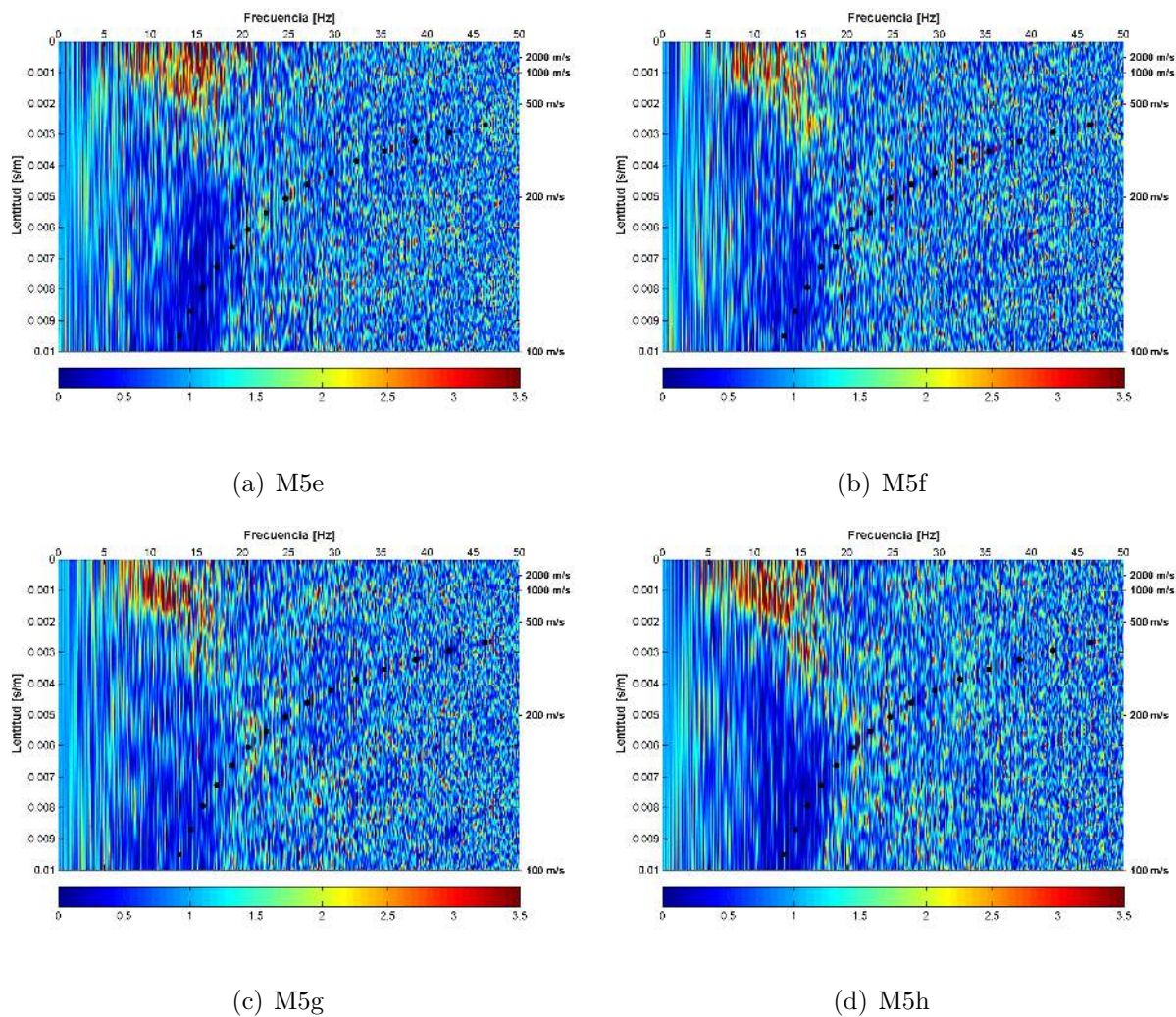


Figura 4.73: Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenidos y con espaciamento entre geófonos de 4 [m], M5e el primero, M5f el segundo, M5g el tercero y M5h el cuarto.

Para los registros de 4 [ms] el espaciamento de 4 [m] mantiene las perspectiva visual de los registros y en la tendencia del modo de mayor lentitud, con variaciones sutiles en la cantidad de energía en relación a los registros anteriormente vistos.

4.4.2.6. Perfil M6

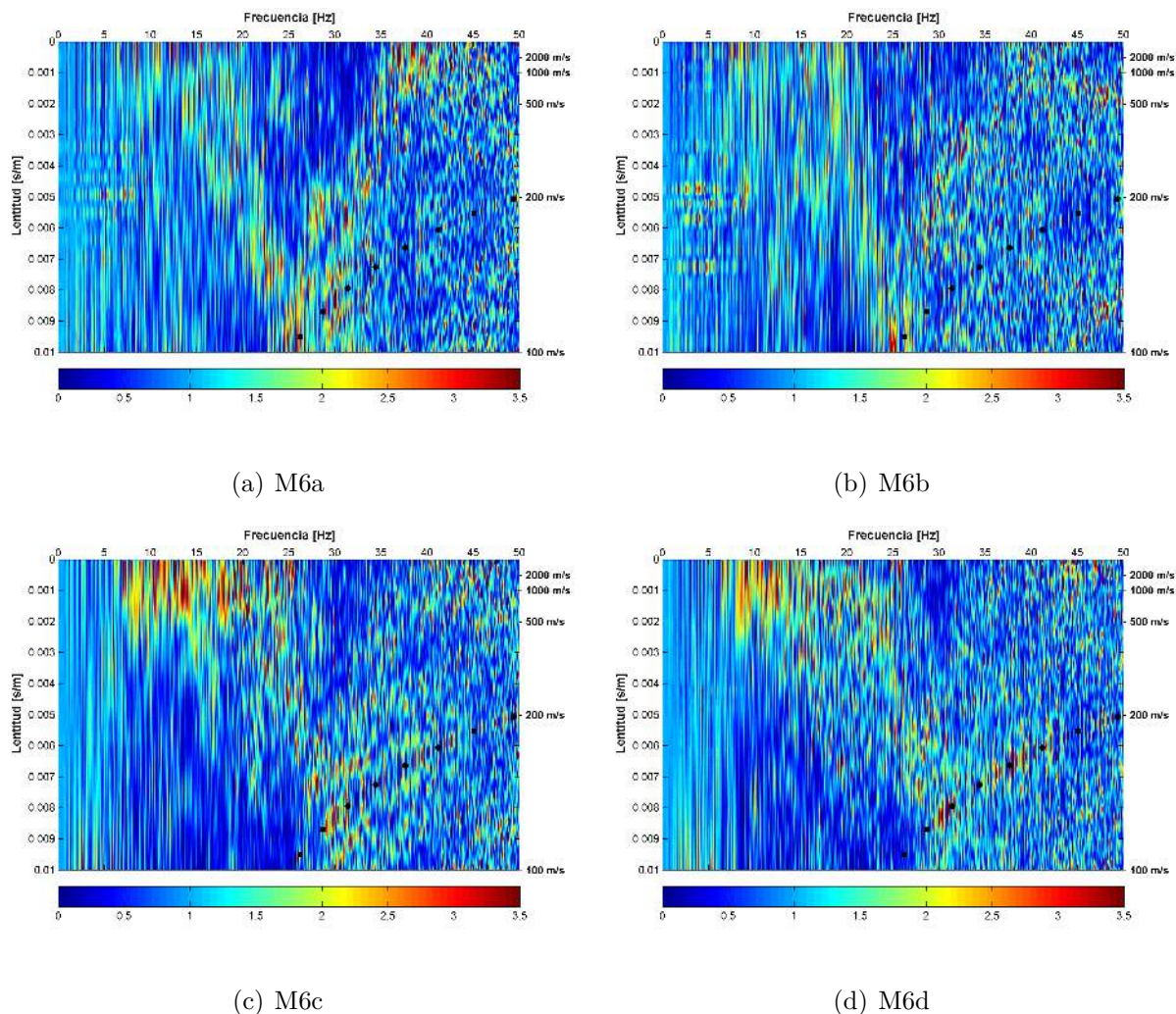


Figura 4.74: Los 4 registros con muestreo de 2 [ms] obtenidos y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M6a el primero, M6b el segundo, M6c el tercero y M6d el cuarto.

Los registros de 2 [ms] para el perfil M6 comienzan a hacer poco claros en cuanto a energía y tendencia, se aprecia un debilitamiento pero con un patrón energético que se mantiene entre los 7 a 20 [Hz] aproximadamente y en donde la tendencia en los modos energéticos de mayor lentitud son distorsionados o casi inexistentes.

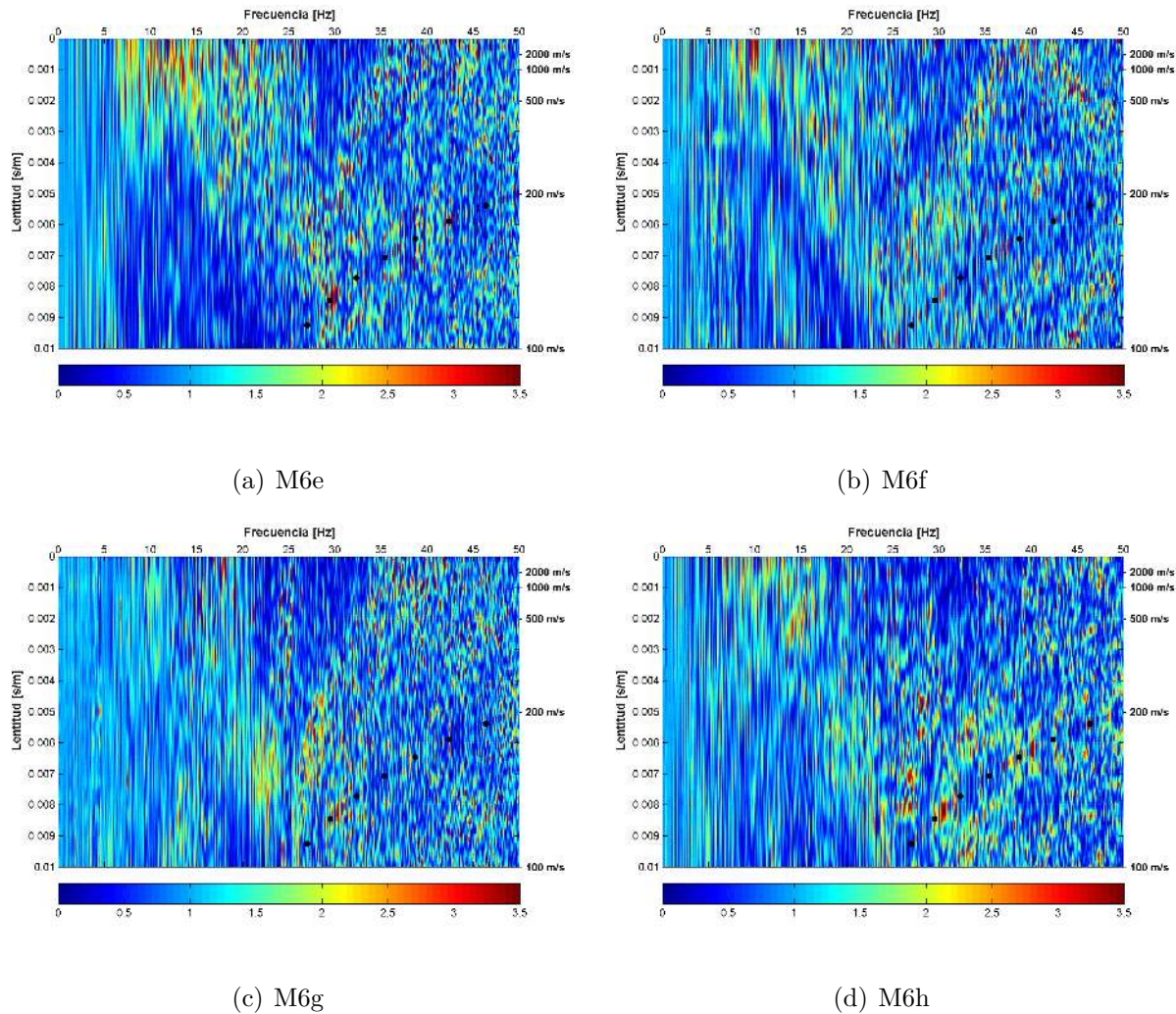


Figura 4.75: Los 4 registros con muestreo de 4 [ms] obtenido y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], M6e el primero, M6f el segundo, M6g el tercero y M6h el cuarto.

Al igual que las imágenes anteriores, los registros de 4 [ms] para el perfil M6 resultaron ser las más distorsionadas en cuanto a visualización energética, claramente hay un debilitamiento de ésta y con una tendencia que sólo es posible visualizar en la figura M6e y M6f que mantiene un patrón similar a lo antes observado y con menos detalle, sin embargo dentro de este debilitamiento energético aún es posible visualizar que la mayor cantidad de energía se encuentra entre los 7 a 20 [Hz] aproximadamente.

4.4.2.7. Apilación de espectros

Se ha realizado la apilación de los 4 registros anteriormente obtenidos para cada perfil, los resultados fueron los siguientes:

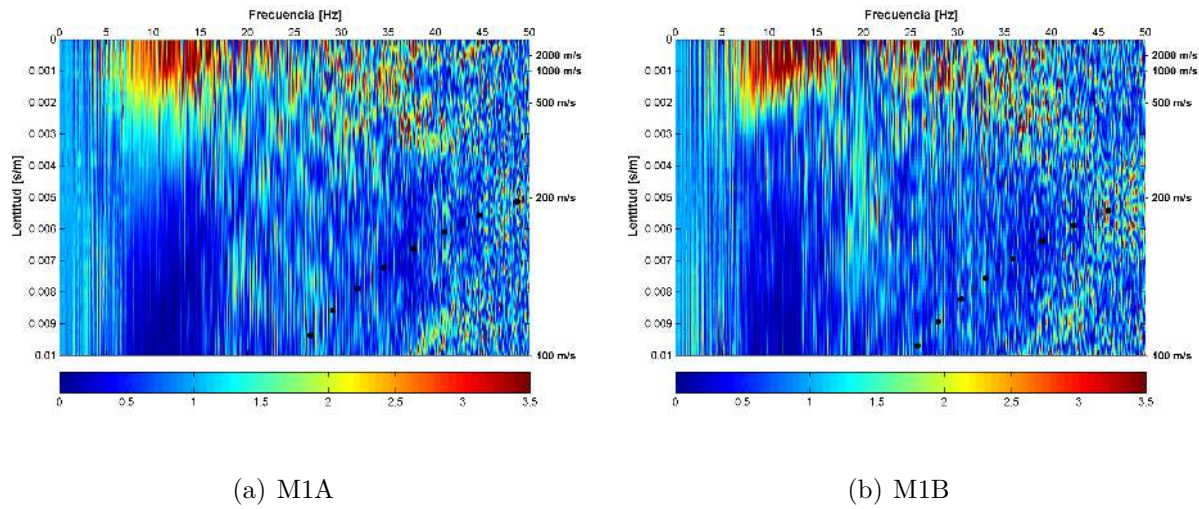


Figura 4.76: Apilación de los espectros de frecuencia para M1 y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], (M1A) para registros con un muestreo de 2 [ms] y (M1B) con 4 [ms].

Para el perfil M1 en las apilaciones espectrales resultantes M1A y M1B se observa mayor intensidad en el rango de frecuencias de 5 a 20 [Hz] aproximadamente, en frecuencias superiores comienza la distorsión.

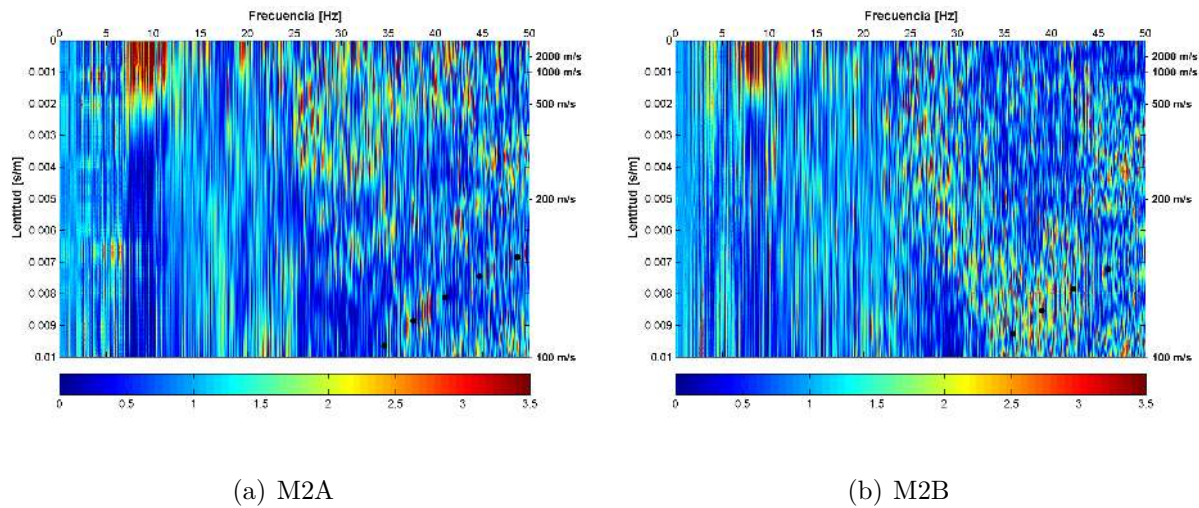


Figura 4.77: Apilación de los espectros de frecuencia para M2 y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], (M2A) para registros con un muestreo de 2 [ms] y (M2B) con 4 [ms].

Para el perfil M2 se observa mayor intensidad en un rango de frecuencias más corto entre los 6 y 12 [Hz] aproximadamente presentando mucha distorsión lo que se puede notar de mejor manera en la imagen M2B.

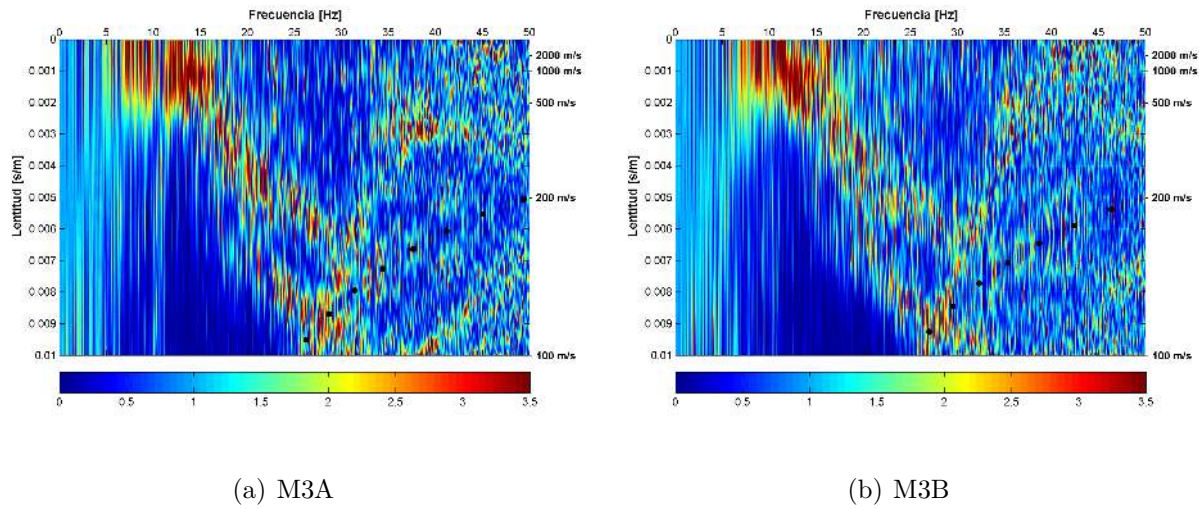


Figura 4.78: Apilación de los espectros de frecuencia para $M3$ y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], ($M3A$) para registros con un muestreo de 2 [ms] y ($M3B$) con 4 [ms].

Para el perfil $M3$ se observa mayor intensidad en un rango de frecuencias 6 a 15 [Hz] aproximadamente, notándose claramente que para ambas imágenes existe una divergencia en la intensidad cercano a los 20 [Hz].

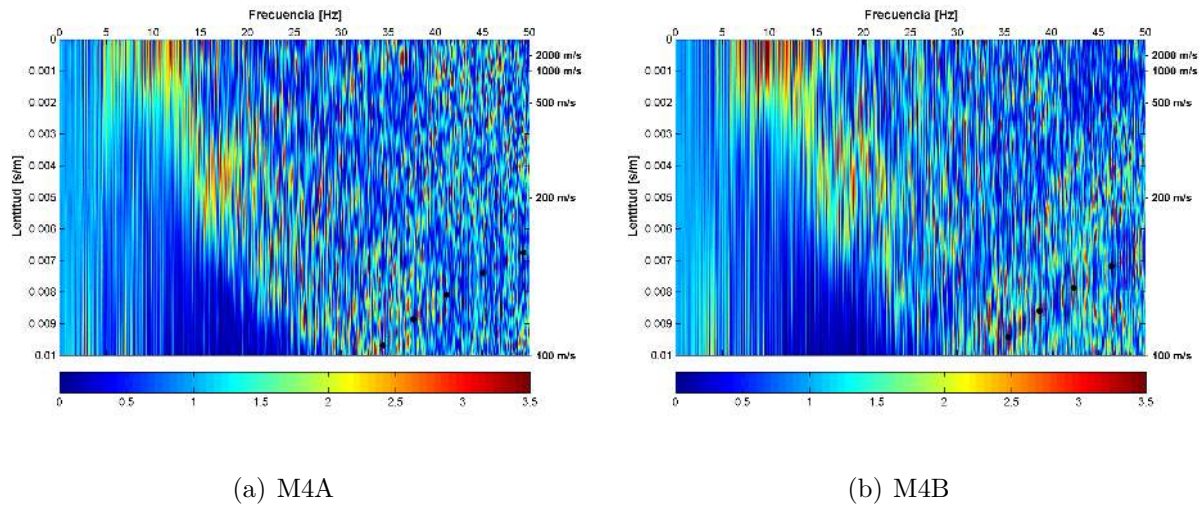


Figura 4.79: Apilación de los espectros de frecuencia para $M4$ y con espaciamiento entre geófonos de 1.5 [m], ($M4A$) para registros con un muestreo de 2 [ms] y ($M4B$) con 4 [ms].

Para el perfil $M4$ se observa una intensidad en el espectro débil, sin embargo de ambas figuras se puede señalar que la mayor intensidad esta entre los 6 y 15 [Hz].

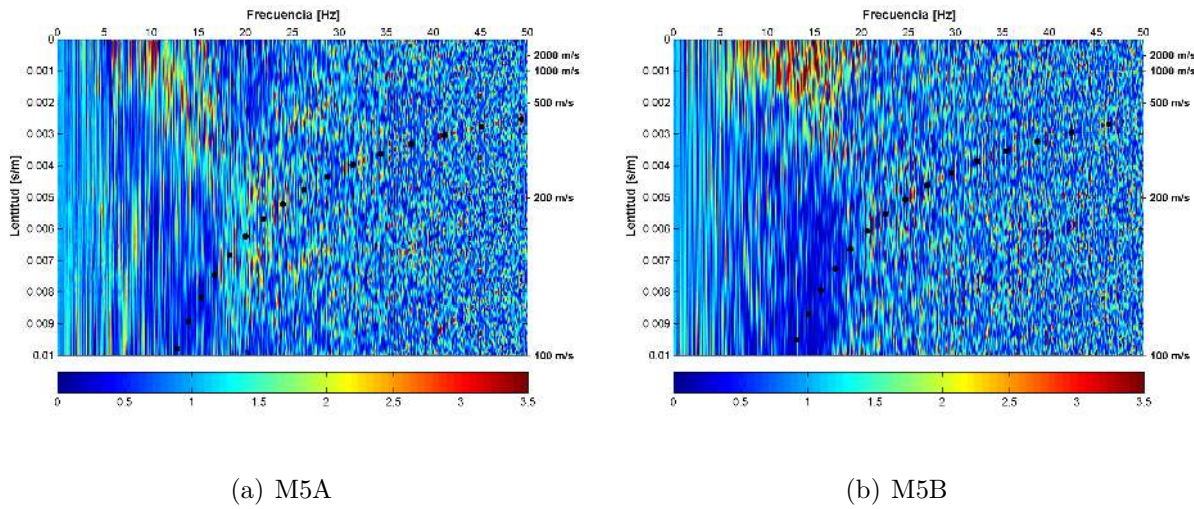


Figura 4.80: Apilación de los espectros de frecuencia para M5 y con espaciamiento entre geófonos de 4 [m], (M5A) para registros con un muestreo de 2 [ms] y (M5B) con 4 [ms].

Para el perfil M5 se observa de la misma manera menos intensidad en el espectro pero de ambas imágenes se puede señalar que la intensidad dominante se encuentra entre los 5 a 20 [Hz].

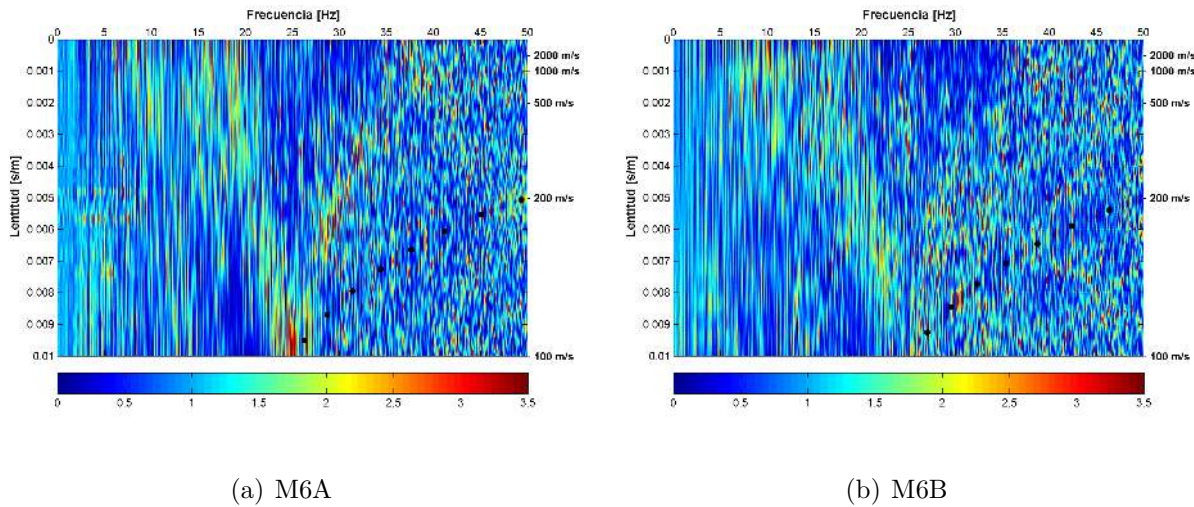


Figura 4.81: Apilación de los espectros de frecuencia para M6 y con espaciamiento entre geófonos de 2 [m], (M6A) para registros con un muestreo de 2 [ms] y (M6B) con 4 [ms].

El perfil M6 muestra mucho menos intensidad y distorsión, es difícil determinar visualmente un rango de frecuencias real para la intensidad, sin embargo este podría ser posiblemente entre los 5 y 20 [Hz].

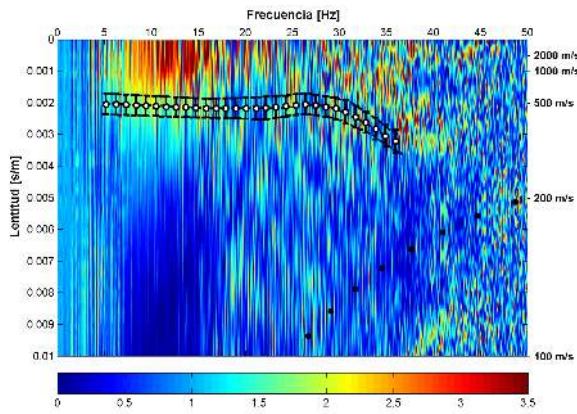
4.4.3. Curva de dispersión

De los trabajos realizados en el campus de la Universidad de Concepción anteriormente presentados se pudo verificar claramente que existen apilaciones espectrales que pueden ayudar a determinar con claridad una curva de dispersión, sin embargo otras apilaciones dificultan la

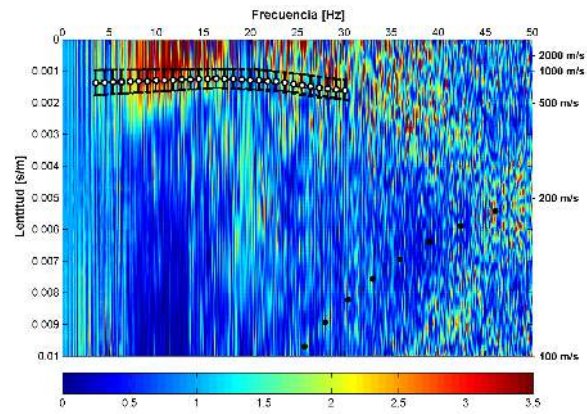
elección además se pudo observar que la diferencia en el muestreo de 2 y 4 [ms] no generó gran cambio en la imagen espectral de cada perfil.

Para los perfiles de Manzanar se determinaron las siguientes curvas de dispersión:

4.4.3.1. Perfil M1



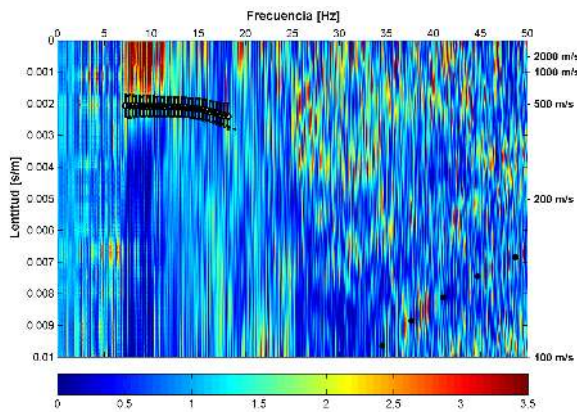
(a) M1Ad



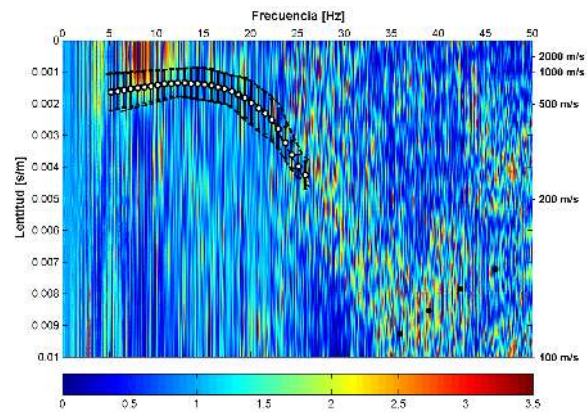
(b) M1Bd

Figura 4.82: Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M1Ad) de 2 [ms] y (M1Bd) para 4 [ms].

4.4.3.2. Perfil M2



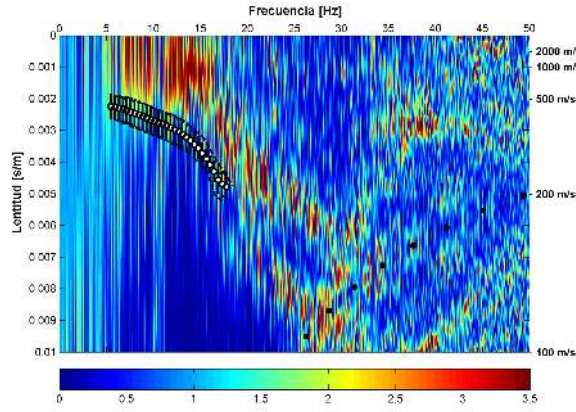
(a) M2Ad



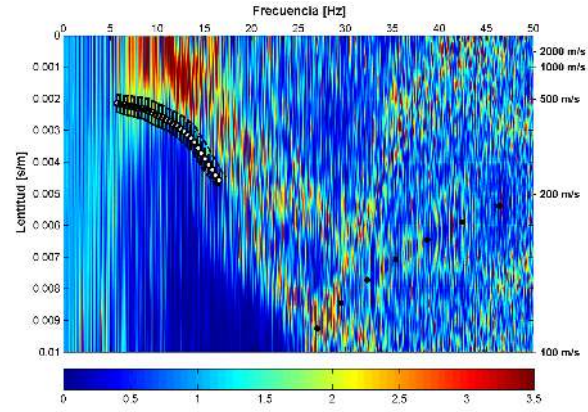
(b) M2Bd

Figura 4.83: Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M2Ad) de 2 [ms] y (M2Bd) para 4 [ms].

4.4.3.3. Perfil M3



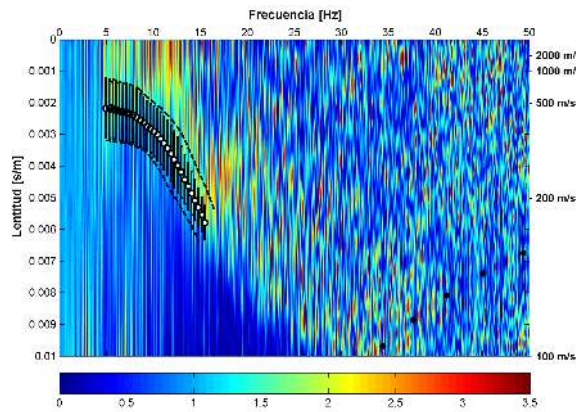
(a) M3Ad



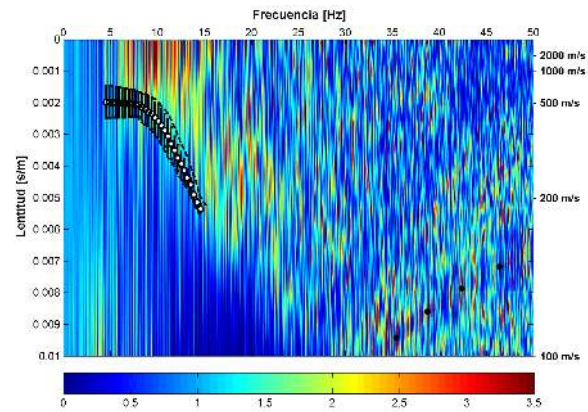
(b) M3Bd

Figura 4.84: *Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M3Ad) de 2 [ms] y (M3Bd) para 4 [ms].*

4.4.3.4. Perfil M4



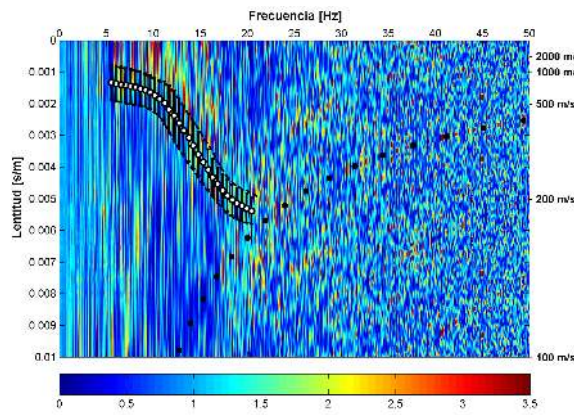
(a) M4Ad



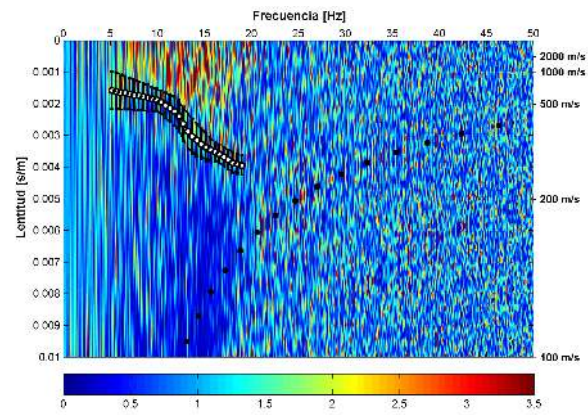
(b) M4Bd

Figura 4.85: *Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M4Ad) de 2 [ms] y (M4Bd) para 4 [ms].*

4.4.3.5. Perfil M5



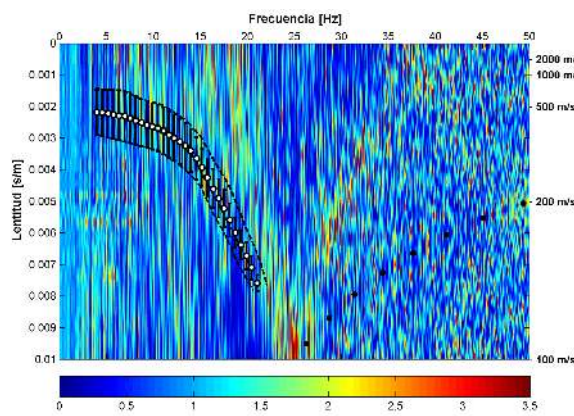
(a) M5Ad



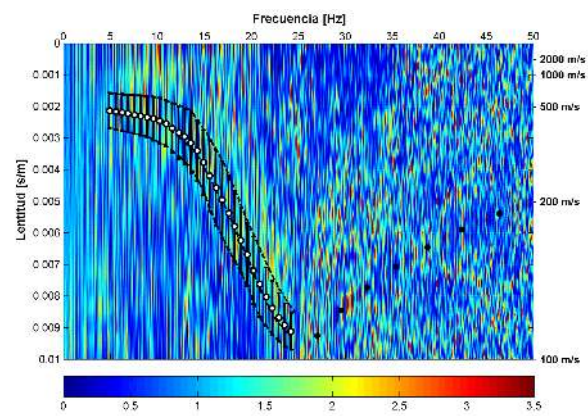
(b) M5Bd

Figura 4.86: Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M5Ad) de 2 [ms] y (M5Bd) para 4 [ms].

4.4.3.6. Perfil M6



(a) M6Ad



(b) M6Bd

Figura 4.87: Curvas de dispersión seleccionada para los registros, (M6Ad) de 2 [ms] y (M6Bd) para 4 [ms].

4.4.4. Parámetros de inversión y estimación de profundidad

Para para todos los perfiles realizados en Manzanar se hizo un modelo de curvas no acotado donde se utilizó los parametros por defecto de Dinver para un modelo de 3 capas, estos se presentan a continuación:.

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

Cuadro 4.26: Parámetros de modelo para perfiles $M1, M2, M3, M4, M5, M6$ ingresado a Dinver, los valores de las capas corresponden a los parámetros por defecto.

Para todos los perfiles se realizó un modelo de curvas acotado por la sísmica de refracción y con los parámetros obtenidos de velocidad obtenidos para cada perfil, al igual que Riachuelo todas las curvas se realizaron con el mayor ajuste posible, también se adjutan las tablas de parámetros para la estimación de profundidad, estos se presentan a continuación:

4.4.4.1. Perfil M1

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	500-1300	1500-3000	3000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	500-1300	1500-3000	3000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	500-1300	1500-3000	3000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	500-1300	1500-3000	3000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

Cuadro 4.27: Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción

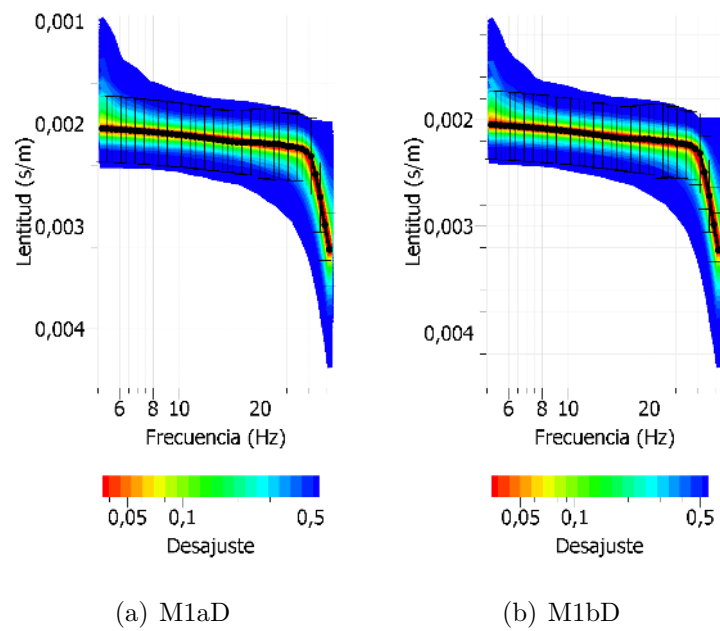


Figura 4.88: Curvas de dispersión obtenida para perfil M1 con 2 [ms], M1aD no acotado y M1bD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M1 _{2ms}	23	7.66 - 11.5	93.88	46.94	8.61	4.30

Cuadro 4.28: Estimaciones de profundidad para M1 y muestros 2 [ms].

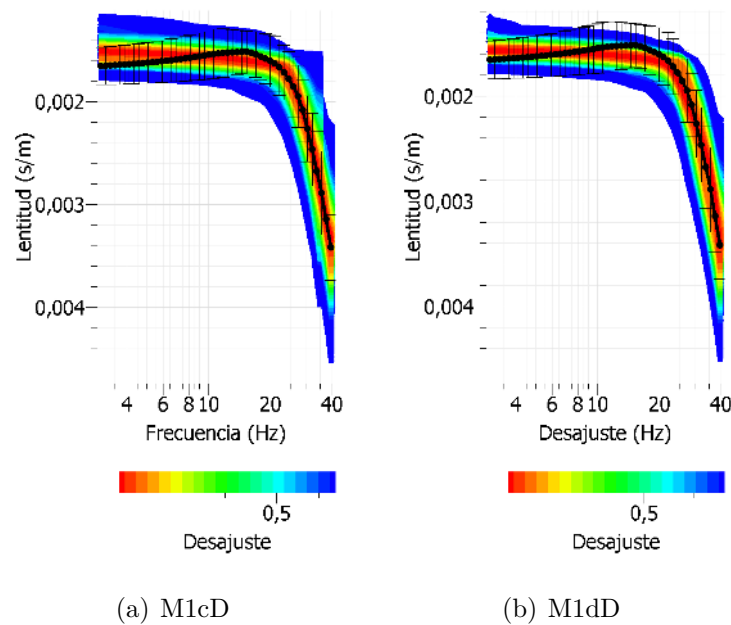


Figura 4.89: Curvas de dispersión obtenida para perfil M1 con 4 [ms], M1cD no acotado y M1dD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M1 _{4ms}	23	7.66 - 11.5	201.53	100.76	7.41	3.70

Cuadro 4.29: Estimaciones de profundidad para M1 y muestreo 4 [ms].

4.4.4.2. Perfil M2

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	150-600	600-1200	1200-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	150-600	600-1200	1200-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	150-600	600-1200	1200-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	150-600	600-1200	1200-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

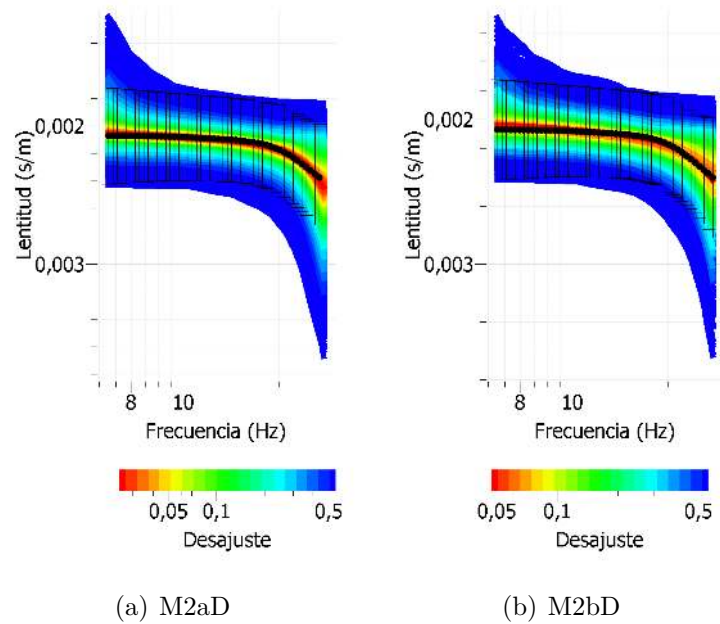
Cuadro 4.30: Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sismica de refracción.

Figura 4.90: Curvas de dispersión obtenida para perfil M2 con 2 [ms], M2aD no acotado y M2bD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M2 _{2ms}	34.50	11.5 - 17.25	66.31	33.15	23.64	11.82

Cuadro 4.31: Estimaciones de profundidad para M2 y muestreo 2 [ms].

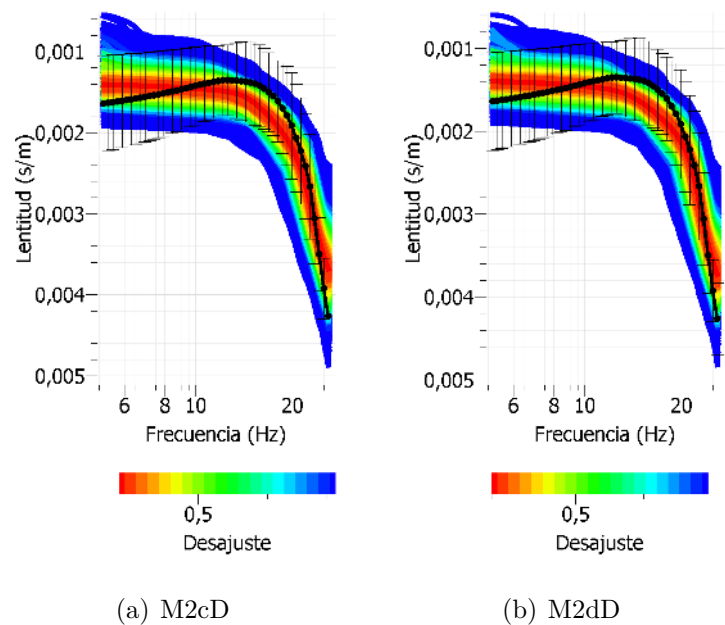


Figura 4.91: Curvas de dispersión obtenida para perfil M2 con 4 [ms], M2cD no acotado y M2dD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M2 _{4ms}	34.50	11.50 - 17.25	117.95	58.97	9.06	4.53

Cuadro 4.32: Estimaciones de profundidad para M2 y muestreo 4 [ms].

4.4.4.3. Perfil M3

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	250-1000	1000-2000	2000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	250-1000	1000-2000	2000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	250-1000	1000-2000	2000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	250-1000	1000-2000	2000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

Cuadro 4.33: Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción.

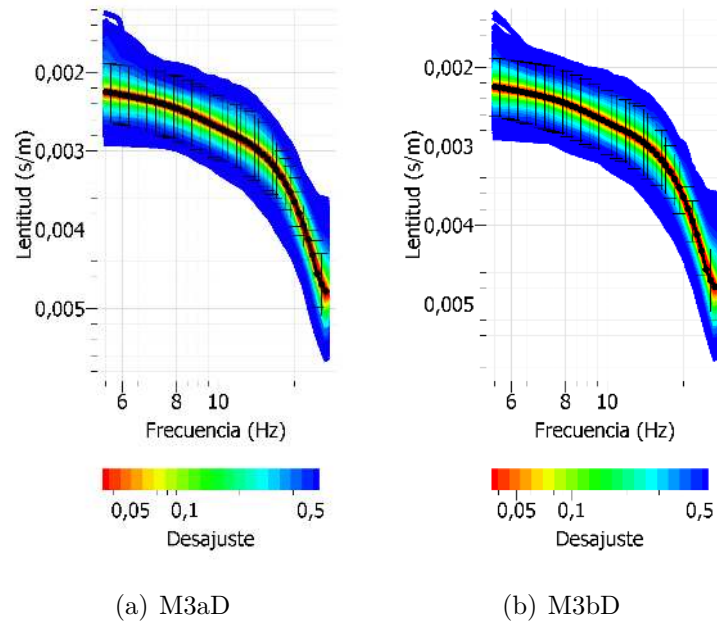


Figura 4.92: Curvas de dispersión obtenida para perfil M3 con 2 [ms], M3aD no acotado y M3bD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M3 _{2ms}	46	15.33 - 23	80.66	40.33	11.76	5.88

Cuadro 4.34: Estimaciones de profundidad para M3 y muestreo 2 [ms].

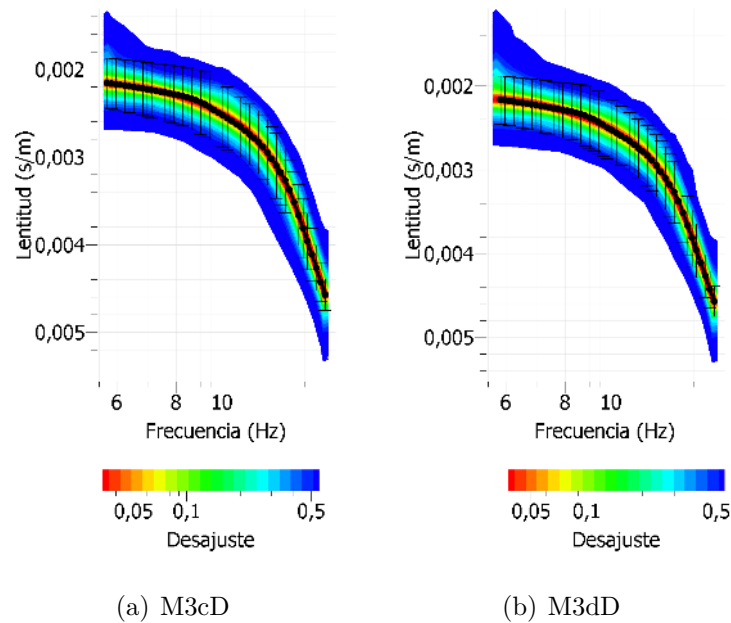


Figura 4.93: Curvas de dispersión obtenida para perfil M3 con 4 [ms], M3cD no acotado y M3dD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M3 _{4ms}	46	15.33 - 23	81.13	40.66	13.20	6.6

Cuadro 4.35: Estimaciones de profundidad para M3 y muestreo 4 [ms].

4.4.4.4. Perfil M4

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	100-400	400-1000	1000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	100-400	400-1000	1000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	100-400	400-1000	1000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	100-400	400-1000	1000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

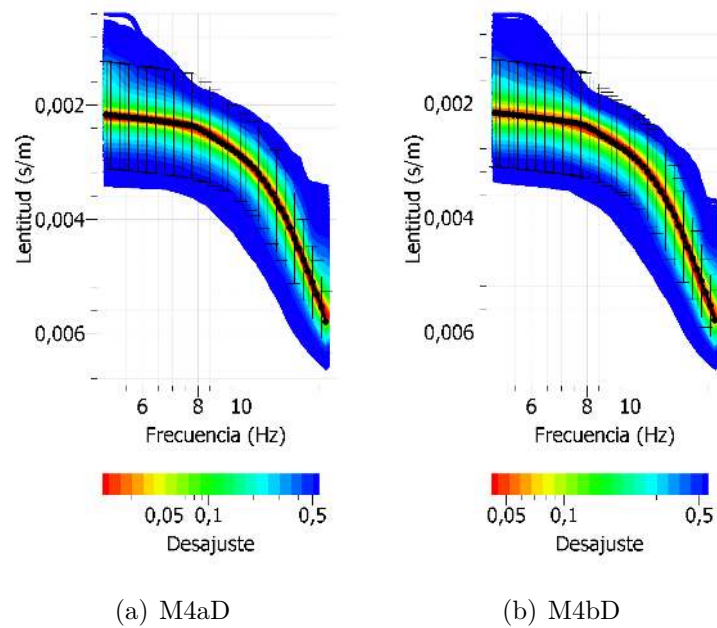
Cuadro 4.36: Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción

Figura 4.94: Curvas de dispersión obtenida para perfil M4 con 2 [ms], M4aD no acotado y M4bD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M4 _{2ms}	34.50	11.50 - 17.25	92.50	46.25	11.88	5.94

Cuadro 4.37: Estimaciones de profundidad para M4 y muestreo 2 [ms].

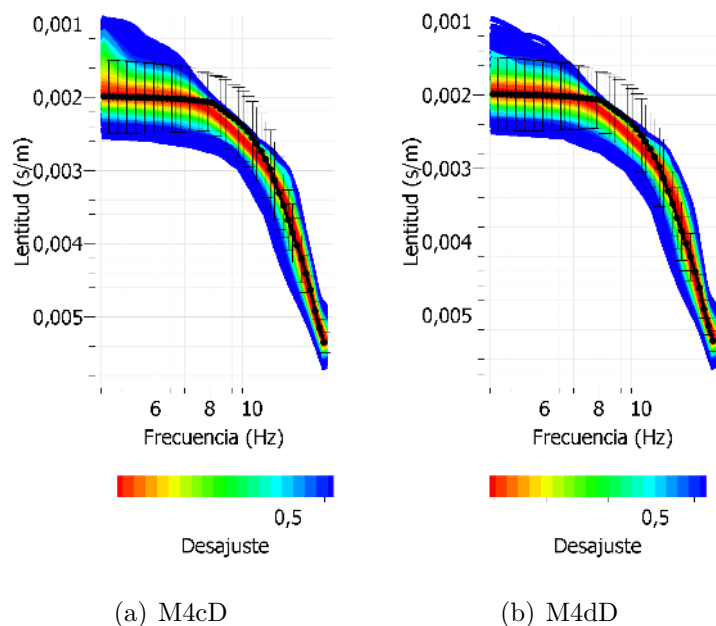


Figura 4.95: Curvas de dispersión obtenida para perfil M_4 con 4 [ms], M_{4cD} no acotado y M_{4dD} acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M_{4ms}	34.50	11.50 - 17.25	109.69	54.84	12.79	6.39

Cuadro 4.38: Estimaciones de profundidad para M_4 y muestreo 4 [ms].

4.4.4.5. Perfil M5

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	250-900	900-2000	2000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	250-900	900-2000	2000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	250-900	900-2000	2000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	250-900	900-2000	2000-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

Cuadro 4.39: Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción

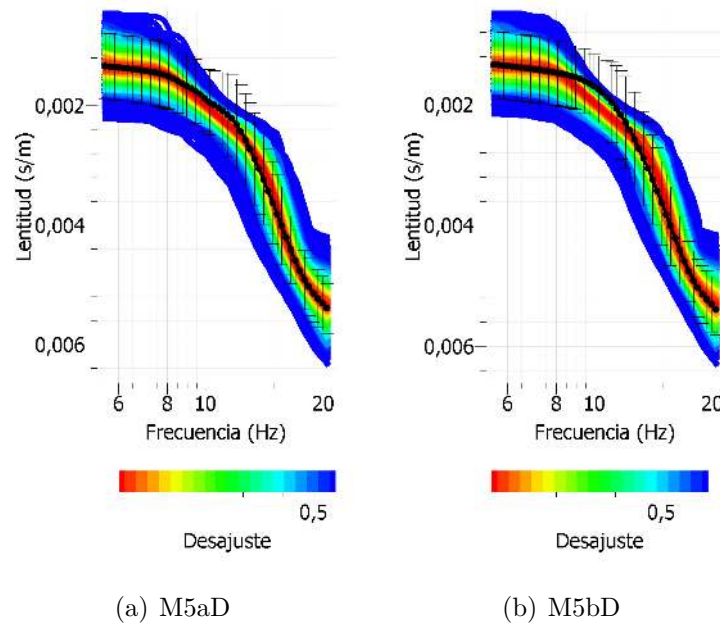


Figura 4.96: Curvas de dispersión obtenida para perfil M5 con 2 [ms], M5aD no acotado y M5bD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M5 _{2ms}	92	30.66 - 46	134.77	67.38	9.06	4.53

Cuadro 4.40: Estimaciones de profundidad para M5 y muestreo 2 [ms].

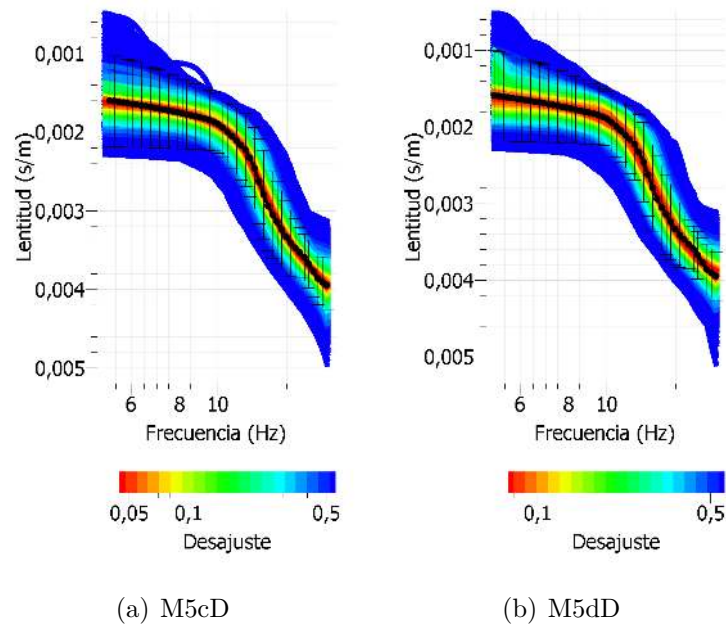


Figura 4.97: Curvas de dispersión obtenida para perfil M5 con 4 [ms], M5cD no acotado y M5dD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M5 _{4ms}	92	30.66 - 46	121.71	60.85	13.33	6.66

Cuadro 4.41: Estimaciones de profundidad para M5 y muestreo 4 [ms].

4.4.4.6. Perfil M6

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Run 01	V_p	150-600	600-1400	1400-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 02	V_p	150-600	600-1400	1400-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 03	V_p	150-600	600-1400	1400-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$
Run 04	V_p	150-600	600-1400	1400-5000
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$

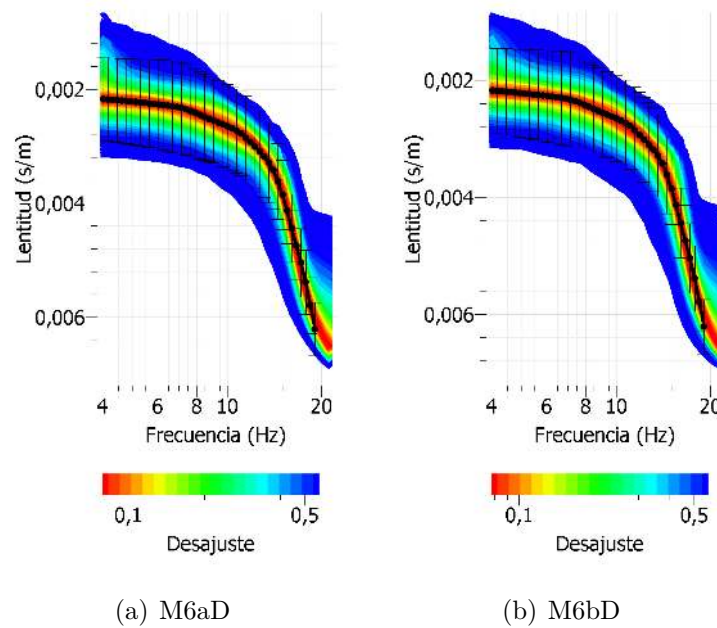
Cuadro 4.42: Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de la variable velocidad de onda P (V_p) fueron acotados por los resultados de la sísmica de refracción

Figura 4.98: Curvas de dispersión obtenida para perfil M6 con 2 [ms], M6aD no acotado y M6bD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M6 _{2ms}	46	15.33 - 23	114.14	57.07	8.45	4.22

Cuadro 4.43: Estimaciones de profundidad para M6 y muestreo 2 [ms].

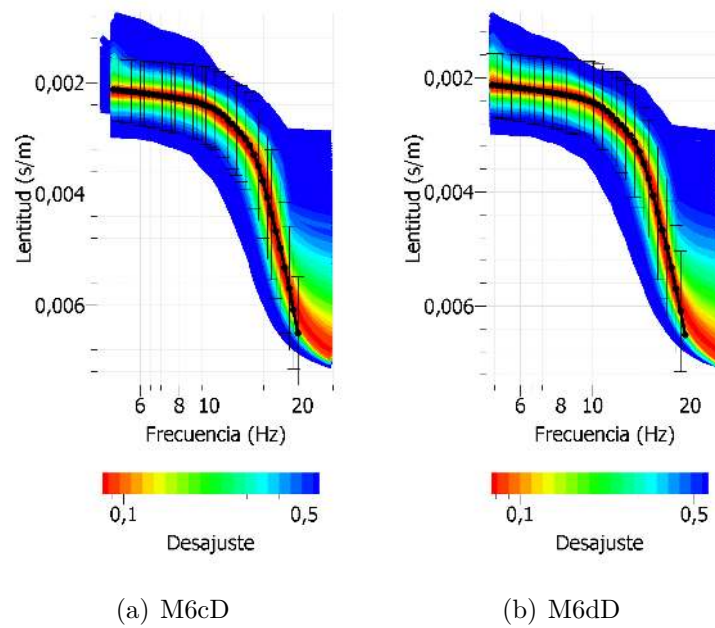


Figura 4.99: Curvas de dispersión obtenida para perfil M6 con 4 [ms], M6cD no acotado y M6dD acotado.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
M6 _{4ms}	46	15.33 - 23	95.10	47.55	7.95	3.97

Cuadro 4.44: Estimaciones de profundidad para M6 y muestreo 4 [ms].

4.4.5. Modelos de perfil de velocidad

A continuación se presentan los modelos de velocidad de ondas S y V_{S30} promedio para cada perfil con muestreo de 2 y 4 [ms] no acotado y acotado respectivamente, se adjuntan las tablas de desajuste para cada modelo de curva.

4.4.5.1. Perfil M1

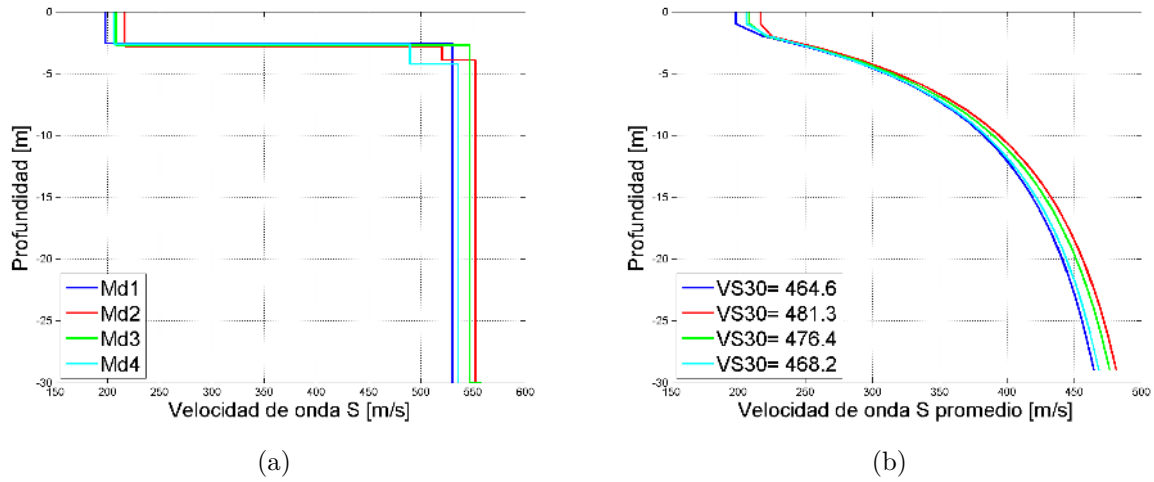


Figura 4.100: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M1 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

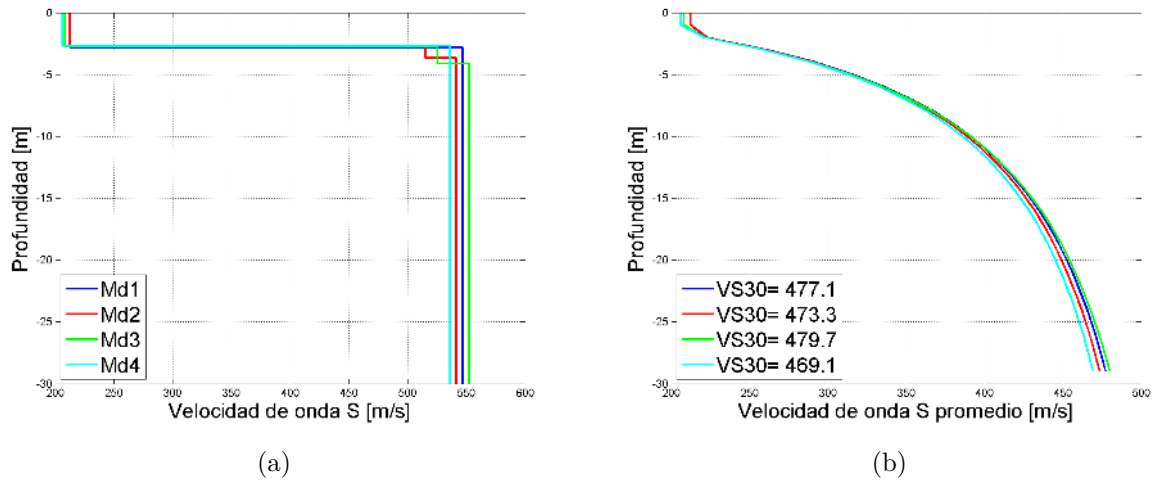


Figura 4.101: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M1 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M1 _{2ms} Run 01	0.05
M1 _{2ms} Run 02	0.03
M1 _{2ms} Run 03	0.04
M1 _{2ms} Run 04	0.05

Cuadro 4.45: Desajuste para el perfil M1 de 2 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M1 _{2ms(ac)} Run 01	0.03
M1 _{2ms(ac)} Run 02	0.05
M1 _{2ms(ac)} Run 03	0.03
M1 _{2ms(ac)} Run 04	0.04

Cuadro 4.46: Desajuste para el perfil M1 de 2 [ms] acotado.

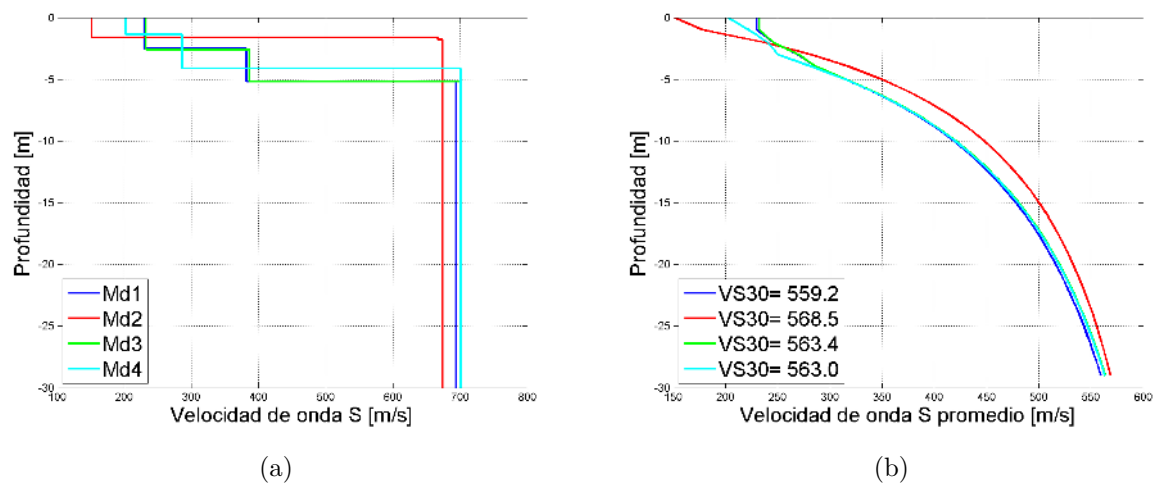


Figura 4.102: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M1 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

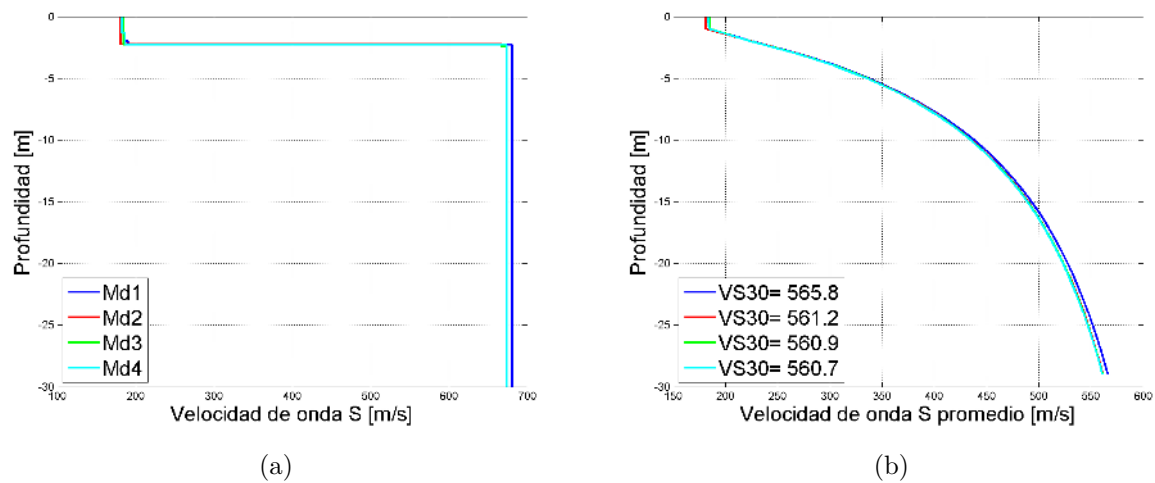


Figura 4.103: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M1 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M1 _{4ms} Run 01	0.27
M1 _{4ms} Run 02	0.27
M1 _{4ms} Run 03	0.26
M1 _{4ms} Run 04	0.25

Cuadro 4.47: Desajuste para el perfil M1 de 4 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M1 _{4ms(ac)} Run 01	0.32
M1 _{4ms(ac)} Run 02	0.31
M1 _{4ms(ac)} Run 03	0.31
M1 _{4ms(ac)} Run 04	0.31

Cuadro 4.48: Desajuste para el perfil M1 de 4 [ms] acotado.

4.4.5.2. Perfil M2

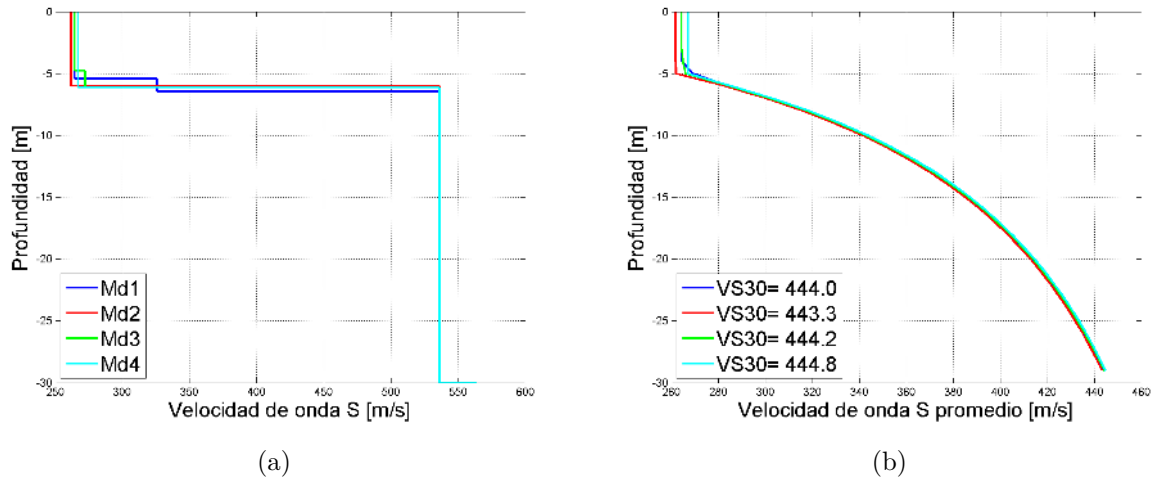


Figura 4.104: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M2 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

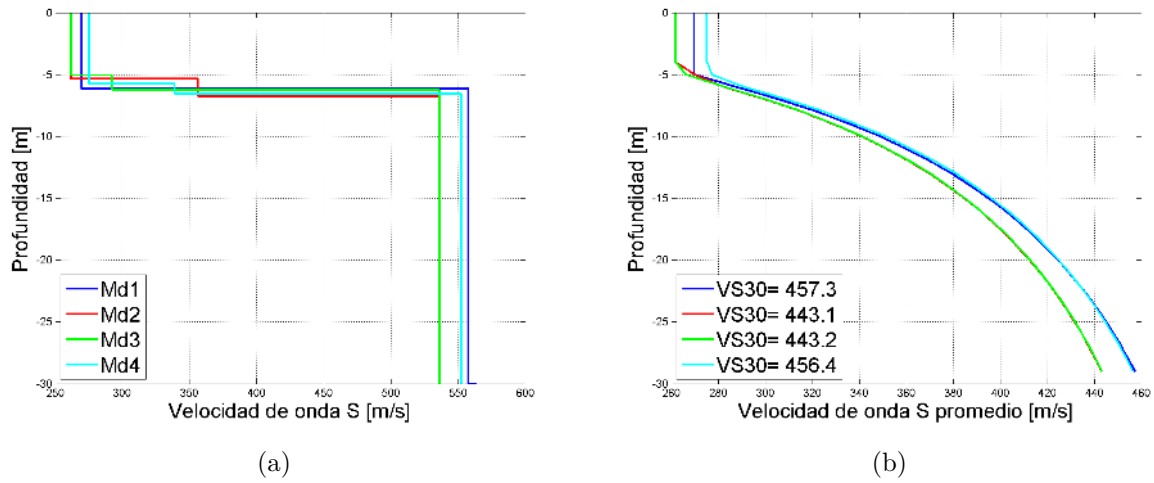


Figura 4.105: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M2 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M2 _{2ms} Run 01	0.02
M2 _{2ms} Run 02	0.02
M2 _{2ms} Run 03	0.02
M2 _{2ms} Run 04	0.02

Cuadro 4.49: Desajuste para el perfil M2 de 2 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M2 _{2ms(ac)} Run 01	0.03
M2 _{2ms(ac)} Run 02	0.02
M2 _{2ms(ac)} Run 03	0.02
M2 _{2ms(ac)} Run 04	0.03

Cuadro 4.50: Desajuste para el perfil M2 de 2 [ms] acotado.

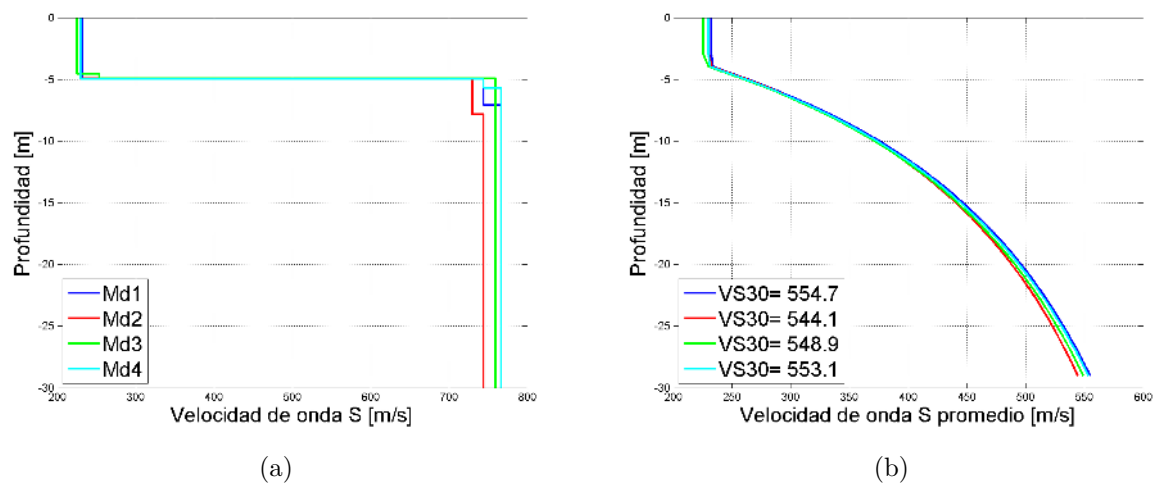


Figura 4.106: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M2 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

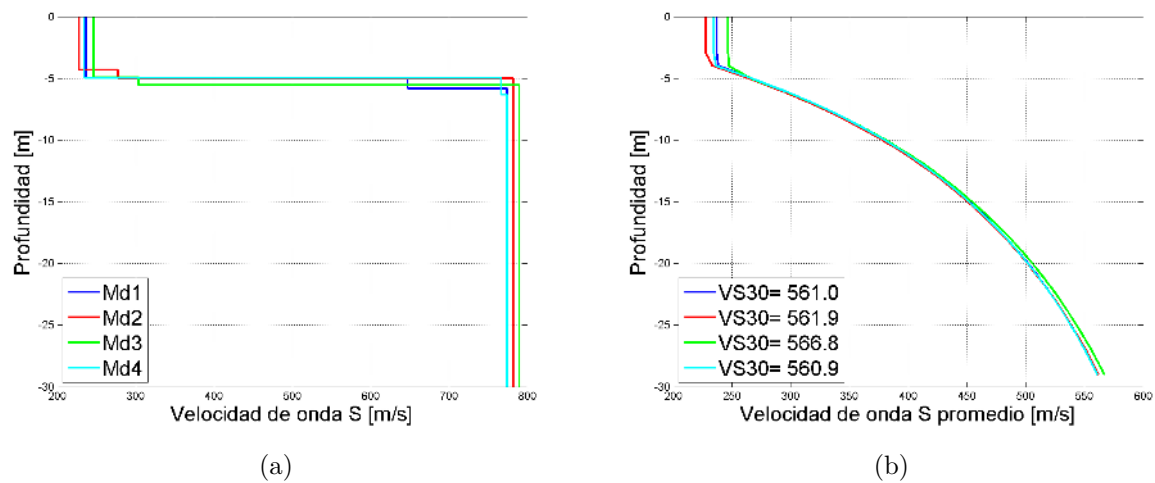


Figura 4.107: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M2 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M2 _{4ms} Run 01	0.42
M2 _{4ms} Run 02	0.42
M2 _{4ms} Run 03	0.41
M2 _{4ms} Run 04	0.41

Cuadro 4.51: Desajuste para el perfil M2 de 4 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M2 _{4ms(ac)} Run 01	0.40
M2 _{4ms(ac)} Run 02	0.40
M2 _{4ms(ac)} Run 03	0.40
M2 _{4ms(ac)} Run 04	0.40

Cuadro 4.52: Desajuste para el perfil M2 de 4 [ms] acotado.

4.4.5.3. Perfil M3

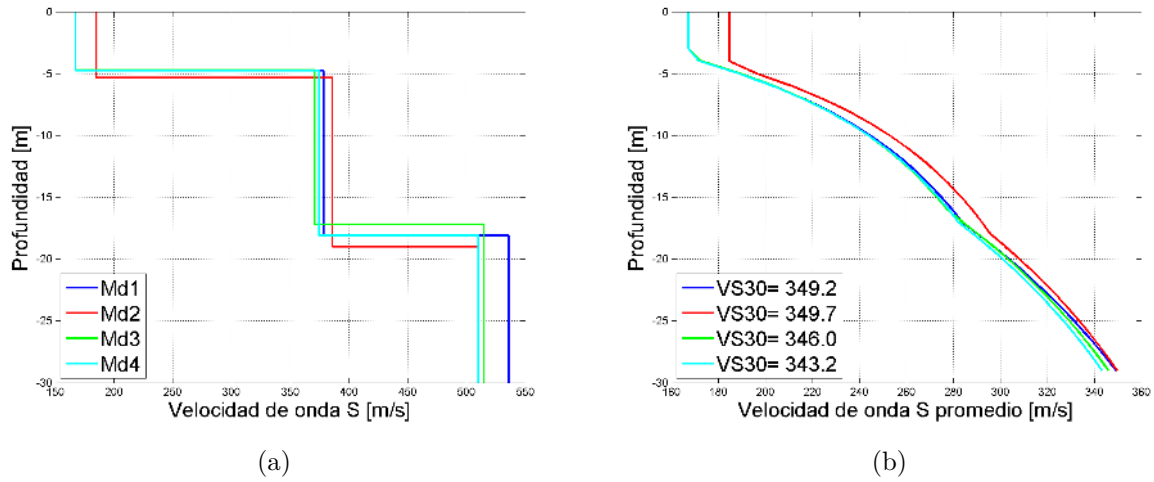


Figura 4.108: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M3 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

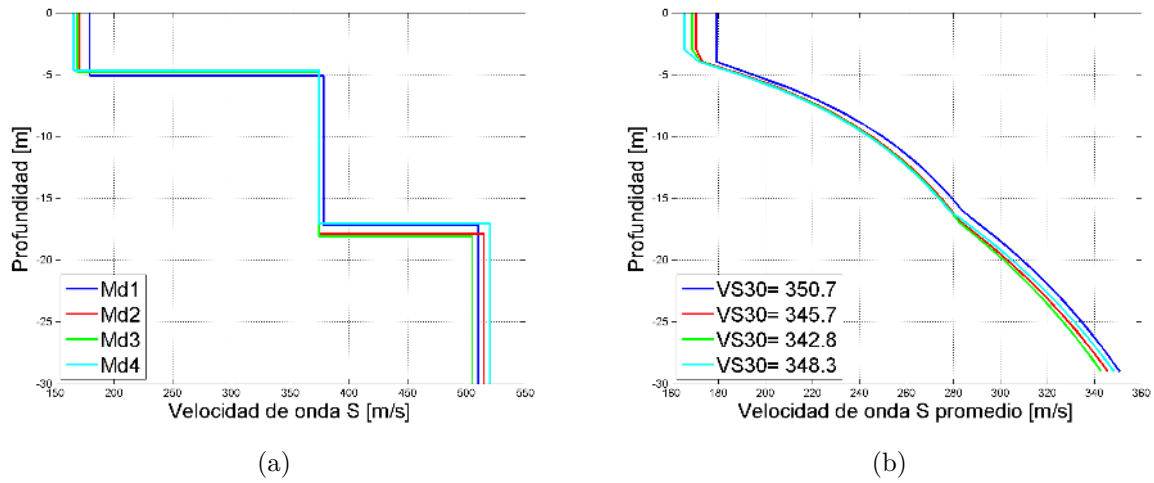


Figura 4.109: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M3 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M3 _{2ms} Run 01	0.04
M3 _{2ms} Run 02	0.05
M3 _{2ms} Run 03	0.03
M3 _{2ms} Run 04	0.03

Cuadro 4.53: Desajuste para el perfil M3 de 2 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M3 _{2ms(ac)} Run 01	0.05
M3 _{2ms(ac)} Run 02	0.03
M3 _{2ms(ac)} Run 03	0.04
M3 _{2ms(ac)} Run 04	0.04

Cuadro 4.54: Desajuste para el perfil M3 de 2 [ms] acotado.

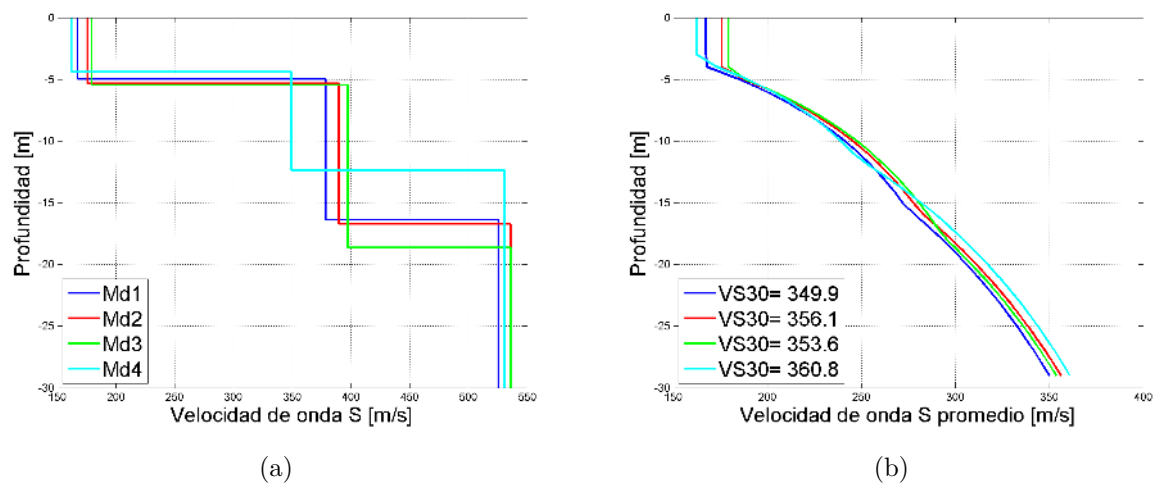


Figura 4.110: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M3 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

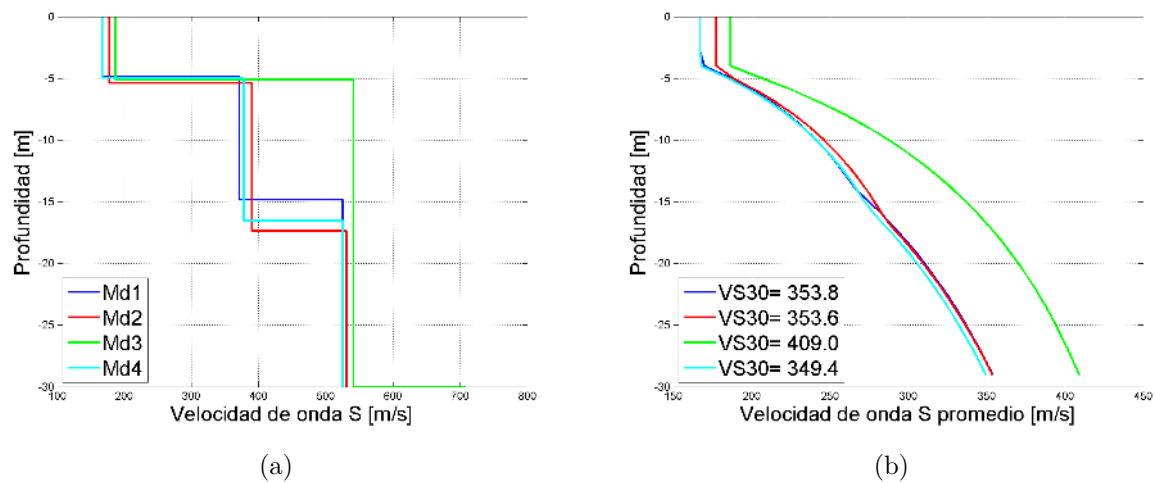


Figura 4.111: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M3 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M3 _{4ms} Run 01	0.03
M3 _{4ms} Run 02	0.05
M3 _{4ms} Run 03	0.04
M3 _{4ms} Run 04	0.06

Cuadro 4.55: Desajuste para el perfil M3 de 4 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M3 _{4ms(ac)} Run 01	0.06
M3 _{4ms(ac)} Run 02	0.04
M3 _{4ms(ac)} Run 03	0.05
M3 _{4ms(ac)} Run 04	0.04

Cuadro 4.56: Desajuste para el perfil M3 de 4 [ms] acotado.

4.4.5.4. Perfil M4

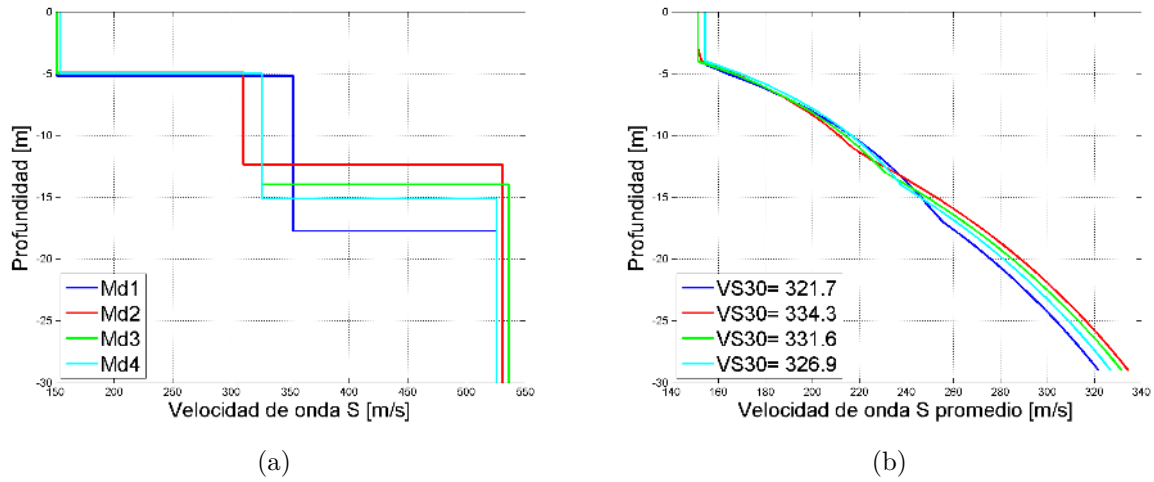


Figura 4.112: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M4 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

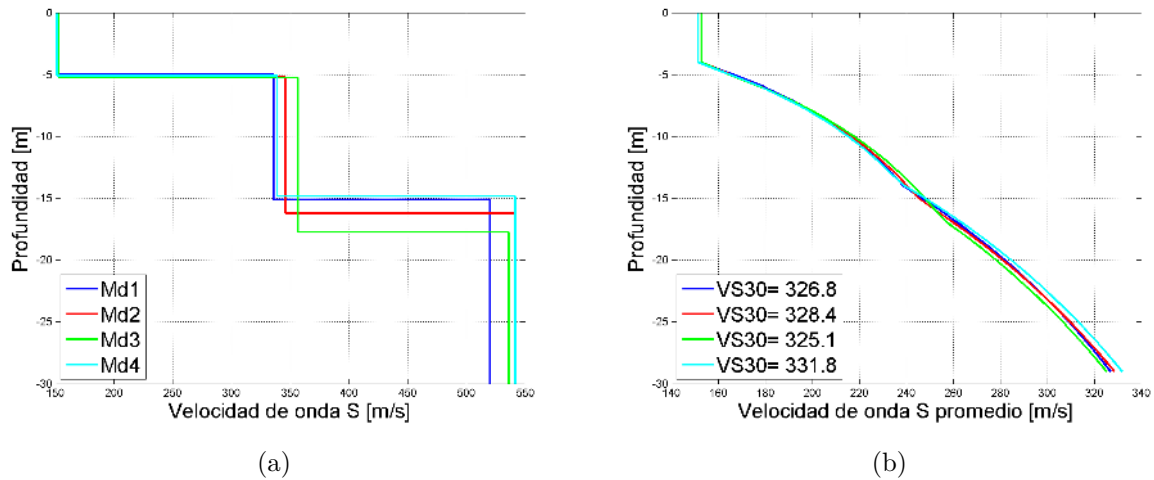


Figura 4.113: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M4 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M4 _{2ms} Run 01	0.02
M4 _{2ms} Run 02	0.01
M4 _{2ms} Run 03	0.02
M4 _{2ms} Run 04	0.02

Cuadro 4.57: Desajuste para el perfil M4 de 2 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M4 _{2ms(ac)} Run 01	0.04
M4 _{2ms(ac)} Run 02	0.05
M4 _{2ms(ac)} Run 03	0.06
M4 _{2ms(ac)} Run 04	0.04

Cuadro 4.58: Desajuste para el perfil M4 de 2 [ms] acotado.

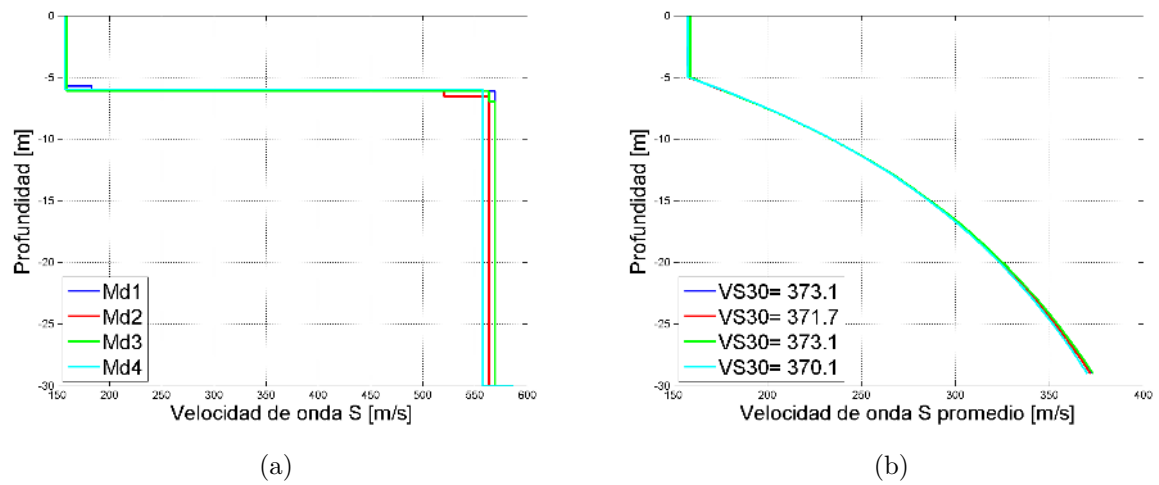


Figura 4.114: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M4 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

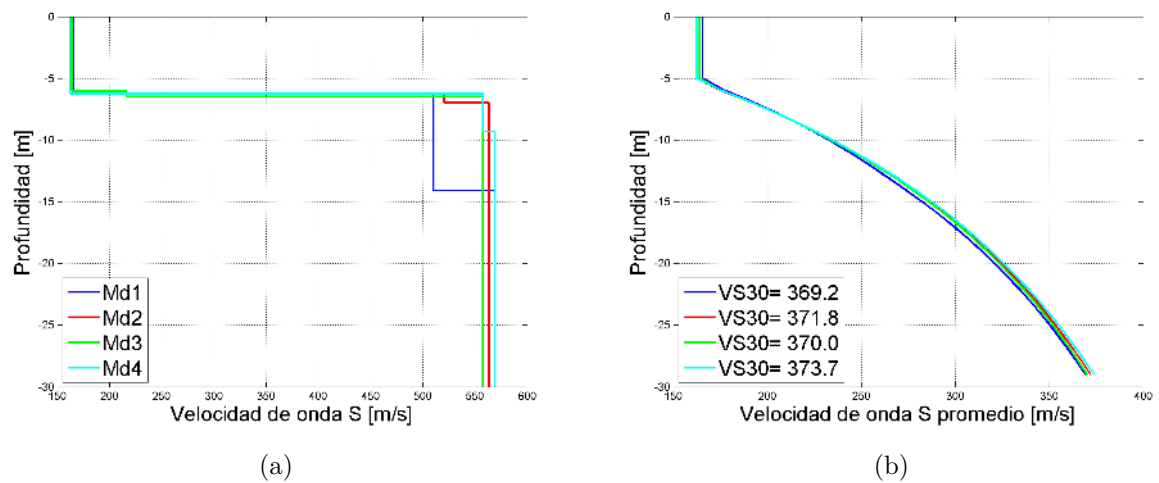


Figura 4.115: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M4 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M4 _{4ms} Run 01	0.22
M4 _{4ms} Run 02	0.22
M4 _{4ms} Run 03	0.22
M4 _{4ms} Run 04	0.22

Cuadro 4.59: Desajuste para el perfil M4 de 4 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M4 _{4ms(ac)} Run 01	0.24
M4 _{4ms(ac)} Run 02	0.23
M4 _{4ms(ac)} Run 03	0.25
M4 _{4ms(ac)} Run 04	0.24

Cuadro 4.60: Desajuste para el perfil M4 de 4 [ms] acotado.

4.4.5.5. Perfil M5

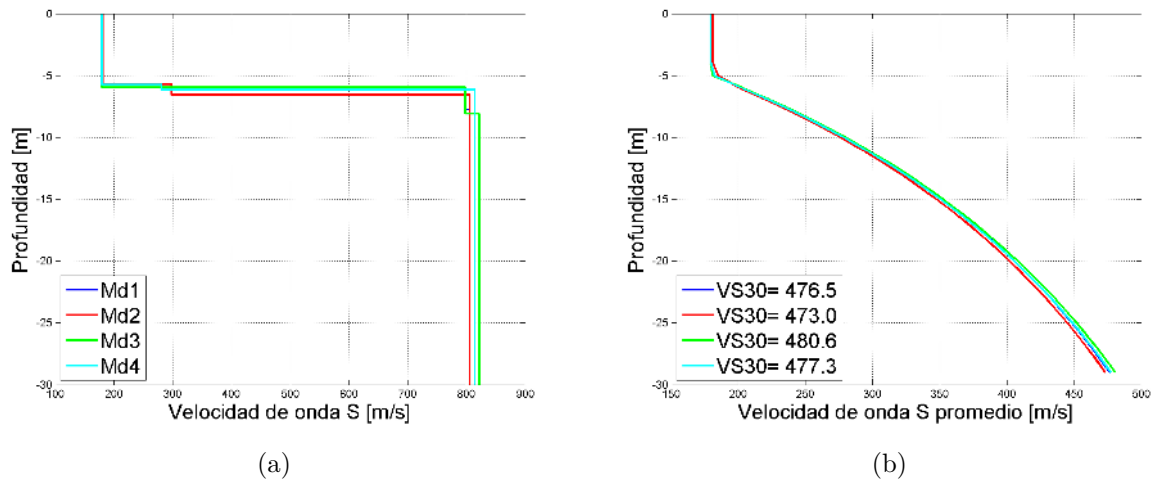


Figura 4.116: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M5 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

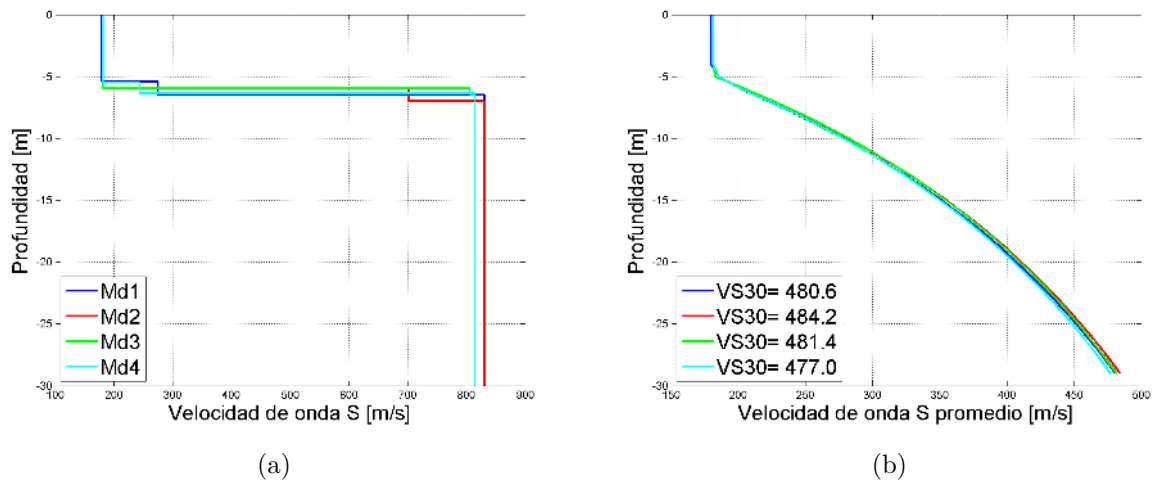


Figura 4.117: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M5 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M5 _{2ms} Run 01	0.13
M5 _{2ms} Run 02	0.12
M5 _{2ms} Run 03	0.13
M5 _{2ms} Run 04	0.12

Cuadro 4.61: Desajuste para el perfil M5 de 2 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M5 _{2ms(ac)} Run 01	0.22
M5 _{2ms(ac)} Run 02	0.22
M5 _{2ms(ac)} Run 03	0.22
M5 _{2ms(ac)} Run 04	0.22

Cuadro 4.62: Desajuste para el perfil M5 de 2 [ms] acotado.

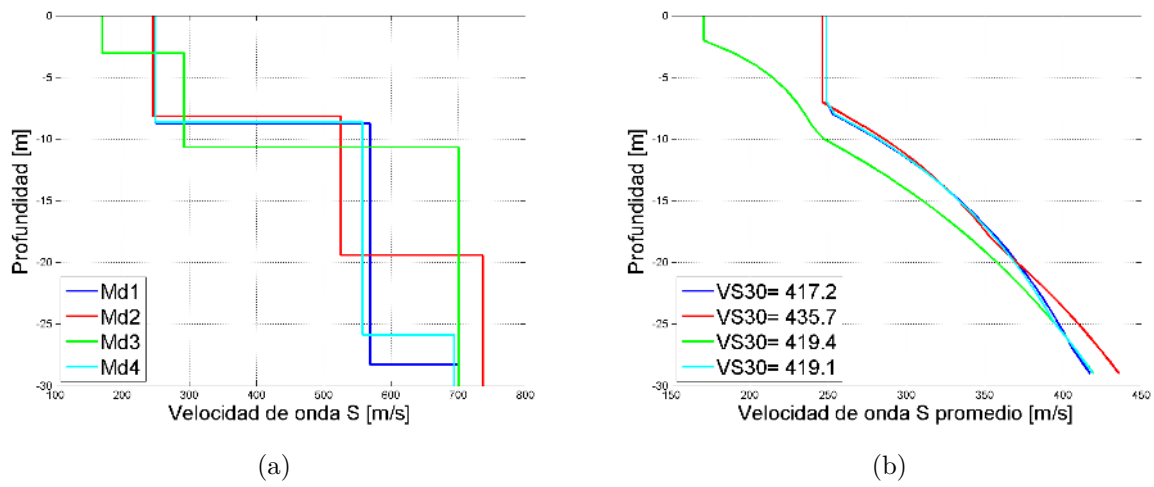


Figura 4.118: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M5 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

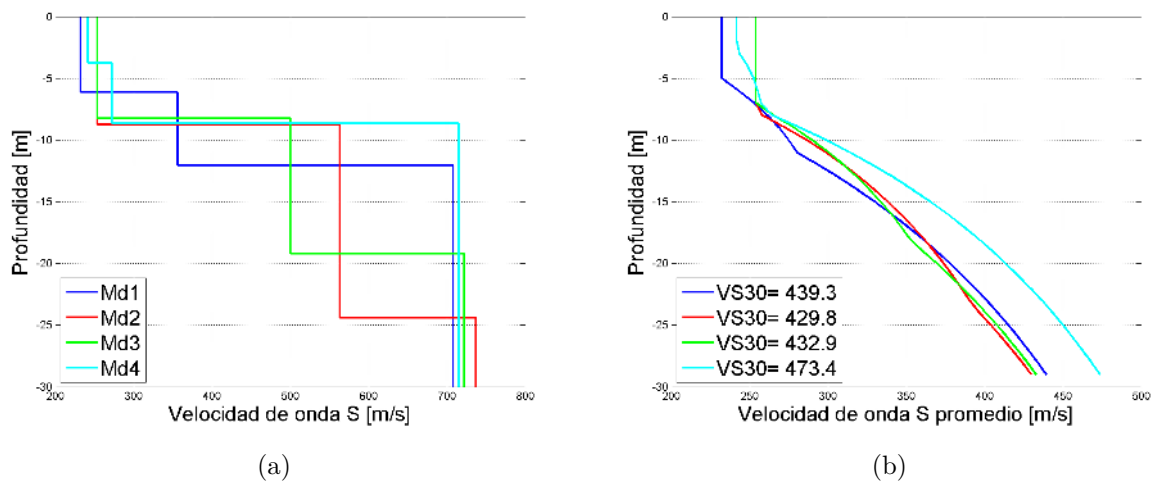


Figura 4.119: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M5 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M5 _{4ms} Run 01	0.07
M5 _{4ms} Run 02	0.07
M5 _{4ms} Run 03	0.04
M5 _{4ms} Run 04	0.07

Cuadro 4.63: Desajuste para el perfil M5 de 4 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M5 _{4ms(ac)} Run 01	0.08
M5 _{4ms(ac)} Run 02	0.08
M5 _{4ms(ac)} Run 03	0.10
M5 _{4ms(ac)} Run 04	0.08

Cuadro 4.64: Desajuste para el perfil M5 de 4 [ms] acotado.

4.4.5.6. Perfil M6

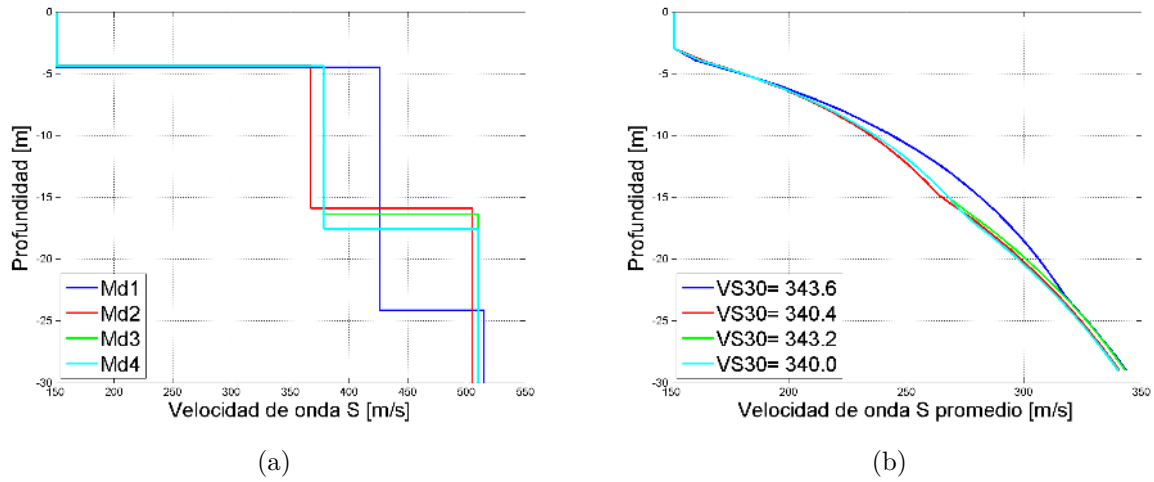


Figura 4.120: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M6 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

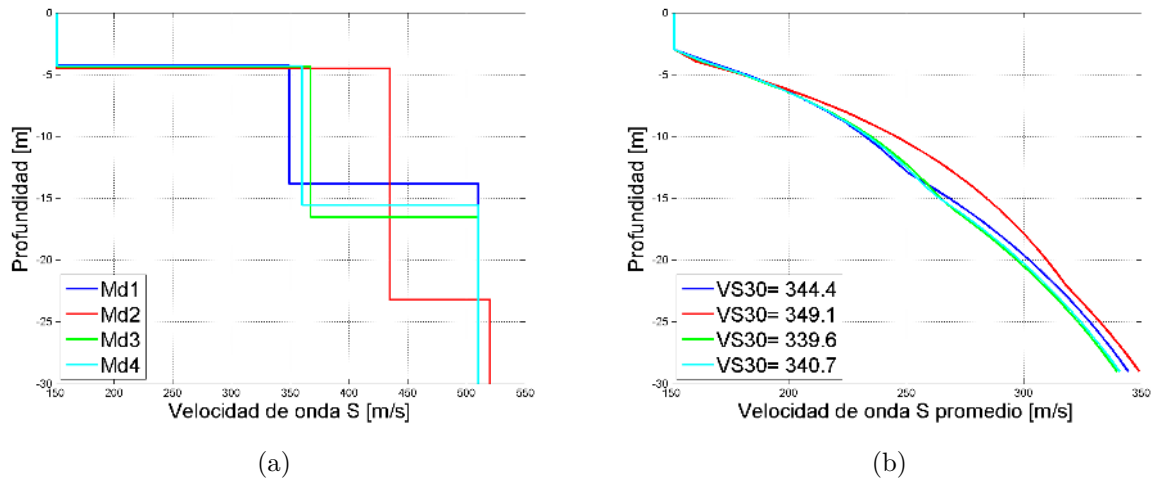


Figura 4.121: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M6 de 2 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M6 _{2ms} Run 01	0.09
M6 _{2ms} Run 02	0.08
M6 _{2ms} Run 03	0.08
M6 _{2ms} Run 04	0.08

Cuadro 4.65: Desajuste para el perfil M6 de 2 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M6 _{2ms(ac)} Run 01	0.08
M6 _{2ms(ac)} Run 02	0.10
M6 _{2ms(ac)} Run 03	0.08
M6 _{2ms(ac)} Run 04	0.08

Cuadro 4.66: Desajuste para el perfil M6 de 2 [ms] acotado.

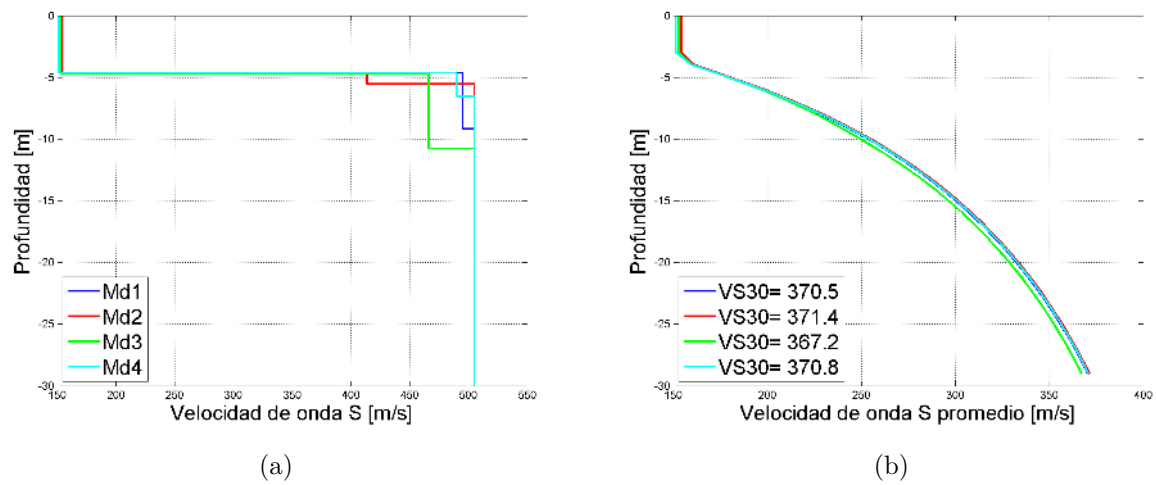


Figura 4.122: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M6 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros de inversión simple.

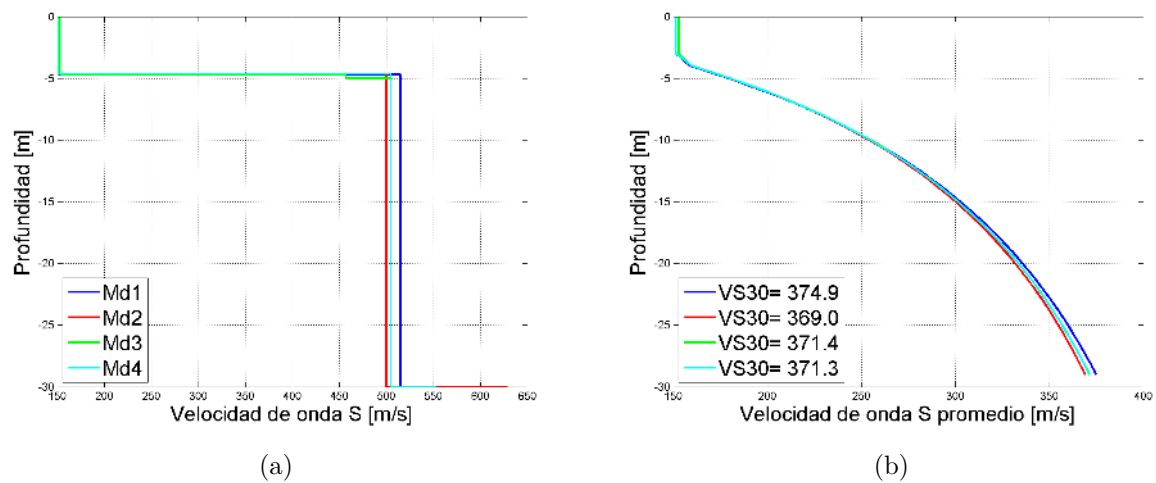


Figura 4.123: Modelos de perfil de velocidad de onda S y V_{S30} promedio para el perfil M6 de 4 [ms], obtenidos con los parámetros acotados.

Perfil	Desajuste
M6 _{4ms} Run 01	0.08
M6 _{4ms} Run 02	0.09
M6 _{4ms} Run 03	0.08
M6 _{4ms} Run 04	0.08

Cuadro 4.67: Desajuste para el perfil M6 de 4 [ms] no acotado.

Perfil	Desajuste
M6 _{4ms(ac)} Run 01	0.09
M6 _{4ms(ac)} Run 02	0.08
M6 _{4ms(ac)} Run 03	0.08
M6 _{4ms(ac)} Run 04	0.08

Cuadro 4.68: Desajuste para el perfil M6 de 4 [ms] acotado.

4.4.6. Curva V_{s30} promedio

A continuación se presentan todas las curvas V_{s30} promedio obtenidas, para un muestreo de 2 y 4 [ms] con inversión simple y acotado por sísmica de refracción.

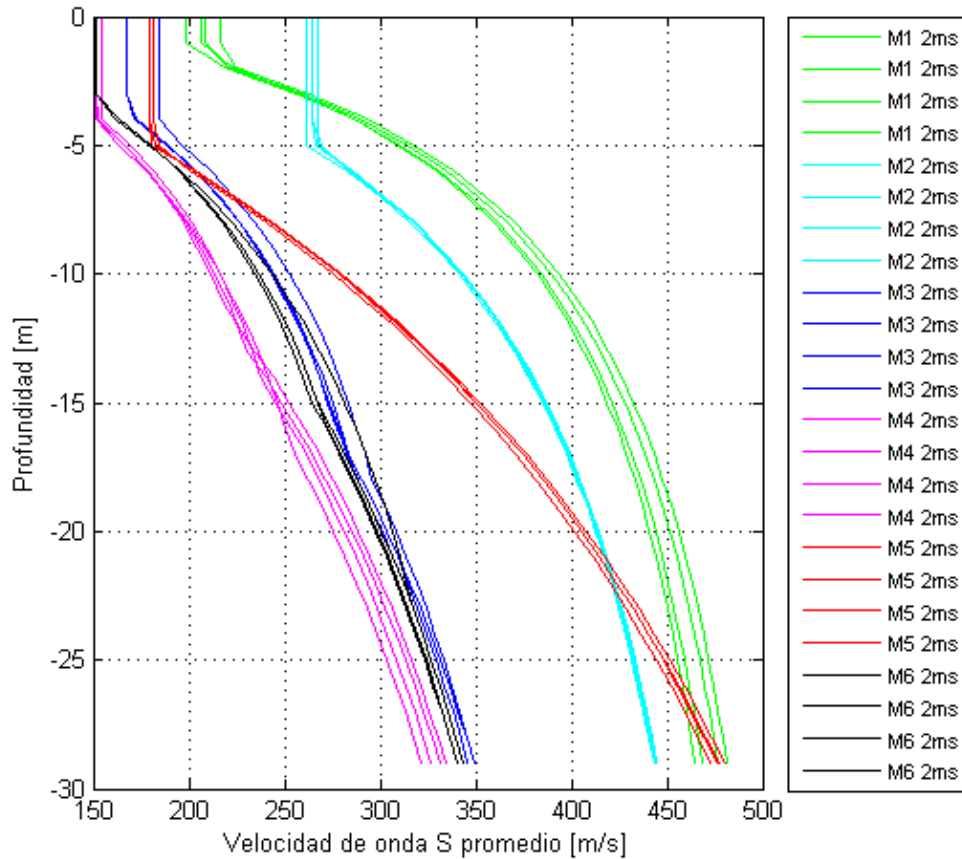


Figura 4.124: Curvas V_{s30} promedio para todos perfiles de Manzanar con muestreo de 2 [ms] no acotado.

En la figura se observa que las curvas no acotadas de los perfiles M3, M4 y M6 con espaciamiento de geófonos de 2, 1.5 y 2 [m] respectivamente poseen un mayor ajuste en sus curvas y se acercan a un valor V_{s30} entre los 320 y 350 [$\frac{m}{s}$] aproximadamente, por otro lado los perfiles M1, M2 y M5 con espaciamiento de geófonos de 2, 1.5 y 4 [m] respectivamente en este caso poseen un buen ajuste entre sus curvas, sin embargo muestran valores V_{s30} algo más alto que fructúan entre los 450 y los 480 [$\frac{m}{s}$] aproximadamente.

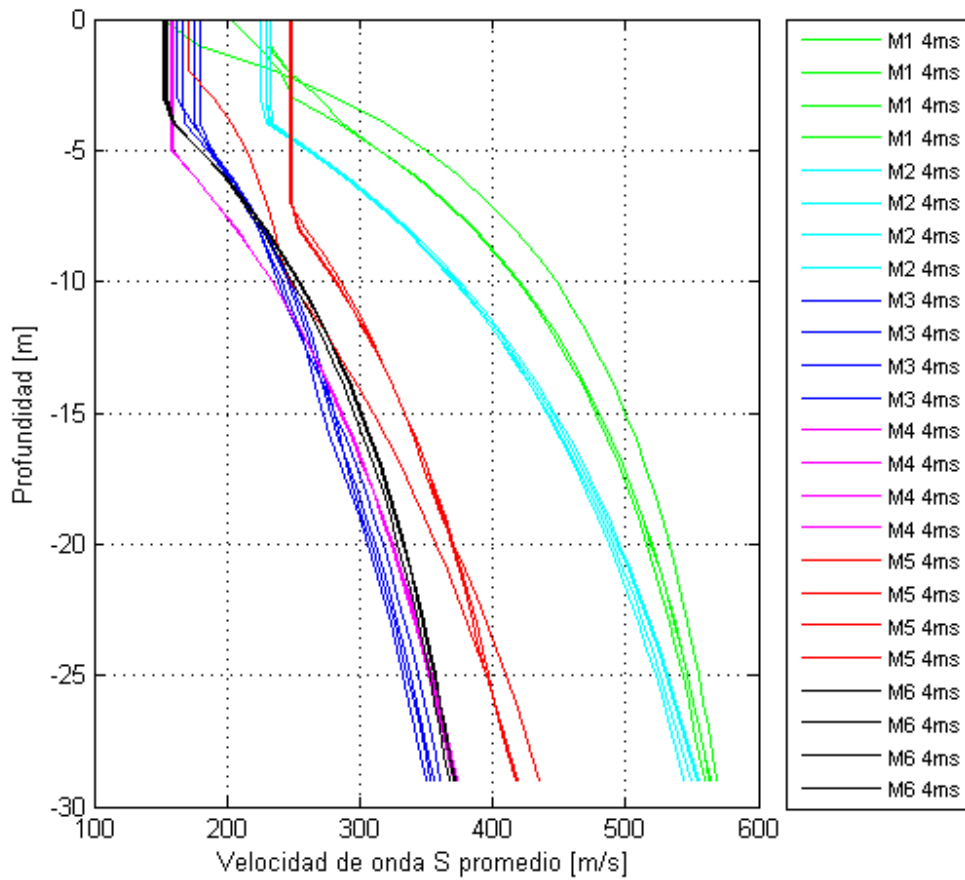


Figura 4.125: Curvas V_{s30} promedio para todos perfiles de Manzanar con muestreo de 4 [ms] no acotado.

En la figura se observa que las curvas no acotadas de los perfiles M3, M4 y M6 siguen manteniendo un ajuste en sus curvas y siguen acercándose a un valor V_{s30} entre los 320 y 350 $[\frac{m}{s}]$ aproximadamente, por otro lado los perfiles M1, M2 y M5 mantienen un buen ajuste entre sus curvas, sin embargo muestran valores V_{s30} más elevados fructúan entre los 550 y los 580 $[\frac{m}{s}]$ aproximadamente, salvo M4 que experimenta una pequeña disminución en su valor en relación a lo anteriormente expuesto.

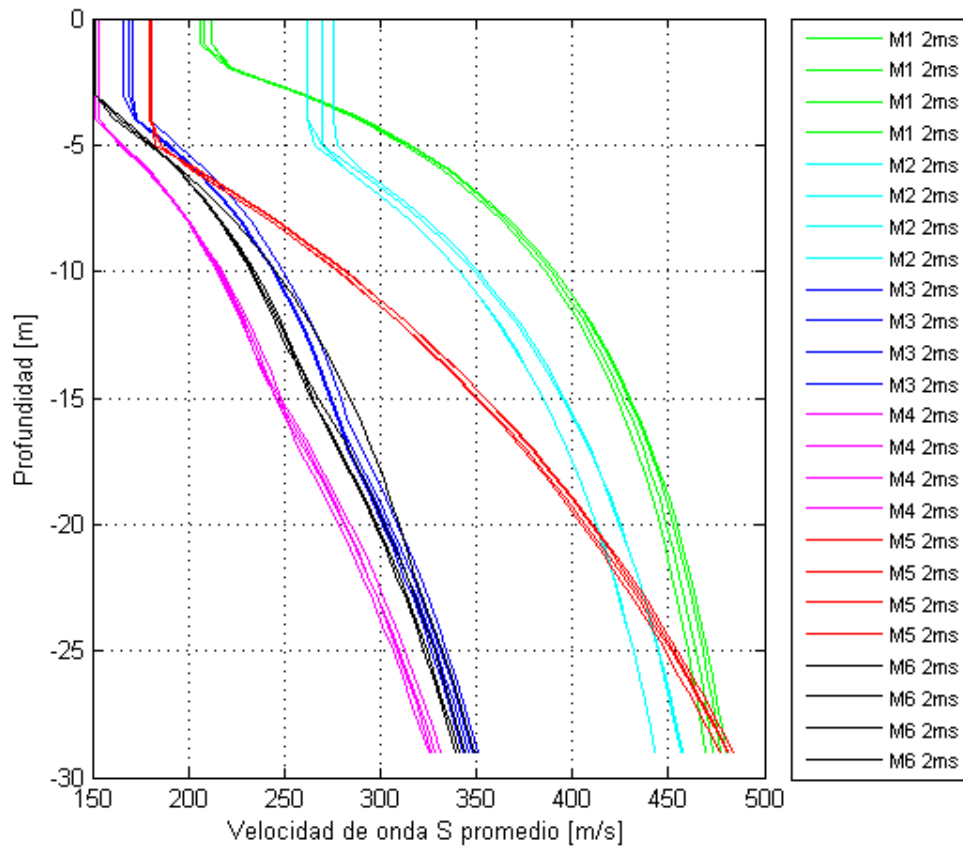


Figura 4.126: Curvas V_{s30} promedio para todos perfiles de Manzanar con muestreo de 2 [ms] acotado.

En la figura se observa que las curvas acotadas de los perfiles M3, M4 y M6 mantienen un ajuste en sus curvas y se acercan a un valor V_{s30} entre los 320 y 350 $\left[\frac{m}{s}\right]$ aproximadamente, por otro lado los perfiles M1, M2 y M5 mantienen un buen ajuste entre sus curvas con valores V_{s30} entre los 450 y los 480 $\left[\frac{m}{s}\right]$ aproximadamente.

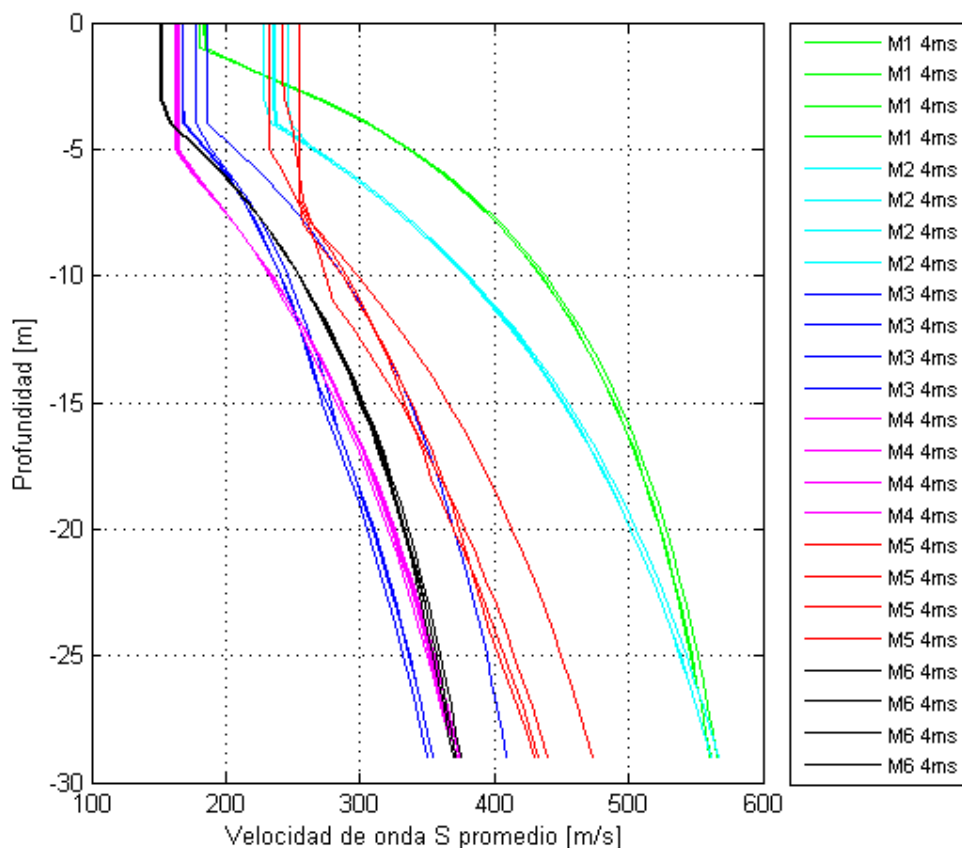


Figura 4.127: Curvas V_{s30} promedio para todos perfiles de Manzanar con muestreo de 4 [ms] acotado.

Finalmente las curvas acotadas de los perfiles M4 y M6 se ajustan muy bien, mientras que las del perfil M3 y M5 se dispersan, sin embargo el conjunto señala un valor V_{s30} entre los 350 y 450 $[\frac{m}{s}]$ aproximadamente. Por otro lado M1 y M2 mantienen su tendencia e indican un valor entre los 550 y los 580 $[\frac{m}{s}]$ aproximadamente.

De todas las gráficas expuestas y del conjunto de curvas presentado se puede indicar que para Manzanar el valor V_{s30} fructúa entre 320 a 580 $[\frac{m}{s}]$ aproximadamente. Esto puede categorizar a grandes rasgos este tipo de suelo como D, sin embargo individualizando las zonas donde se realizaron los perfiles M3, M4, M5 y M6 el suelo se puede categorizar como D, por otro lado las zona de los perfiles M1 y M2, de acuerdo a los valores obtenidos en este sector se puede categorizar del tipo B.

4.5. Túnel “El Naranjito”

Los perfiles se realizaron en la boca sur del túnel:



Figura 4.128: Boca del túnel en Manzanar, imagen gentileza Arturo Belmonte

En este sitio se realizaron dos perfiles, T1 y T2 en donde se utilizó sísmica de refracción y refracción por microtremor (ReMi). Los perfiles se realizaron como indica la siguiente tabla:

Perfil	Longitud [m]	Orientación	Espaciamiento [m]
T1	92	Suroeste-noreste	4
T2	230	Suroeste-noreste	10

Cuadro 4.69: Perfiles realizados en la boca sur del túnel



Figura 4.129: Vista satelital con el detalle de los perfiles realizados en la boca sur del túnel.

4.5.1. Sísmica de refracción

La sísmica de refracción permitió obtener las siguientes dromocronas y perfiles de velocidad de onda P:

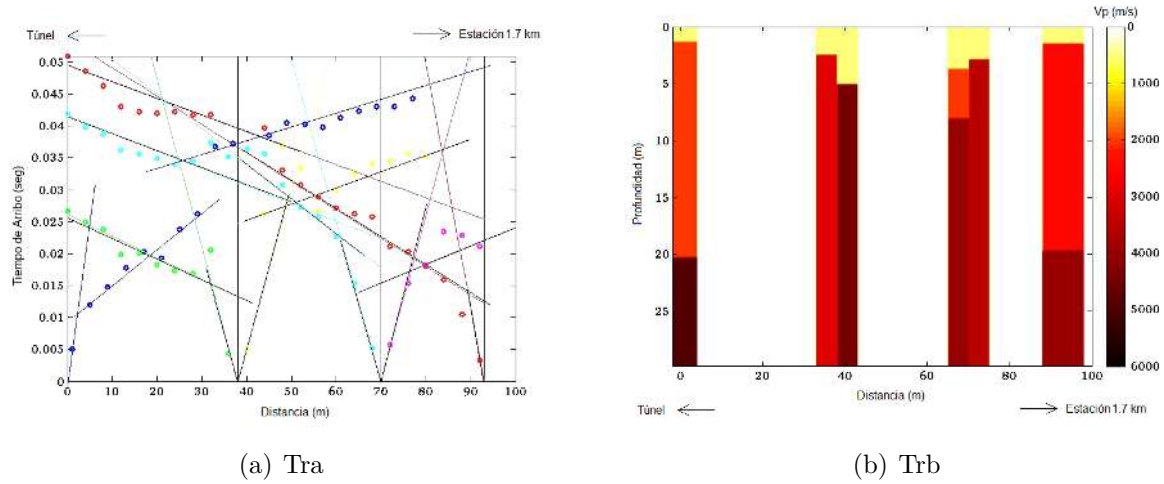


Figura 4.130: Dromocronas, la cuales muestran los tiempos de arribo de la onda P para cada geófono (Tra) y modelos de velocidad obtenidos (Trb).

4.5.2. Refracción por microtremor (ReMi)

La refracción por microtremor se realizó con un muestreo de 2 y 4 [ms] para cada perfil T1 y T2 respectivamente. Los resultados fueron los siguientes:

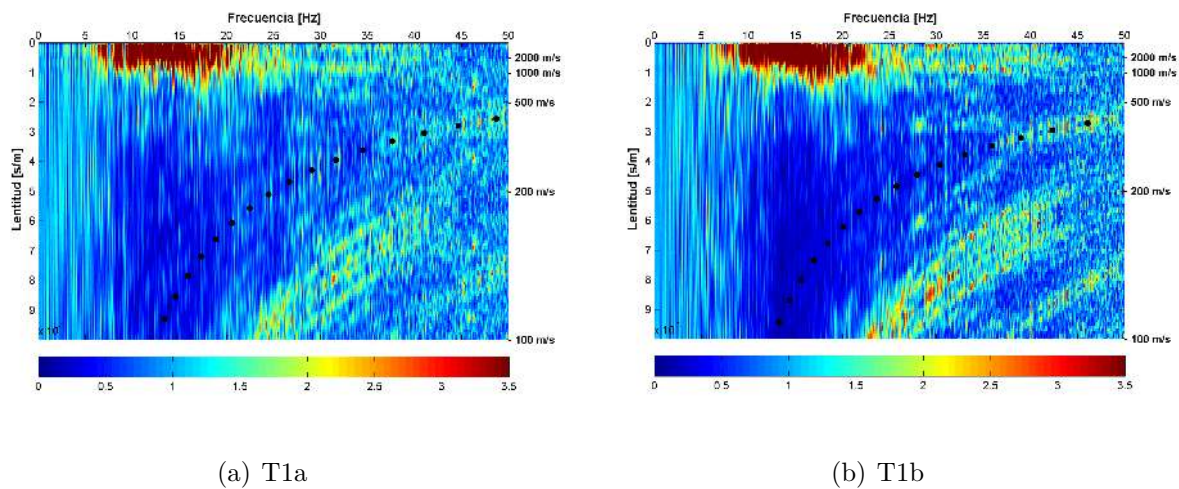
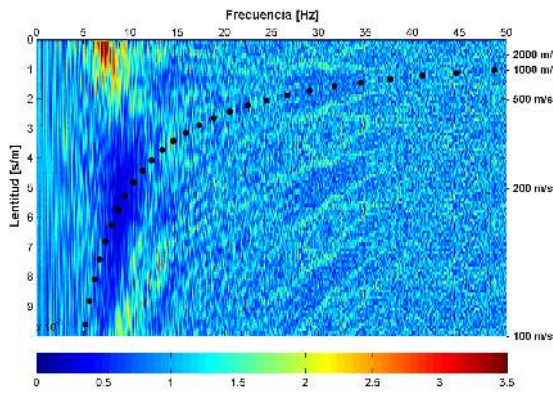
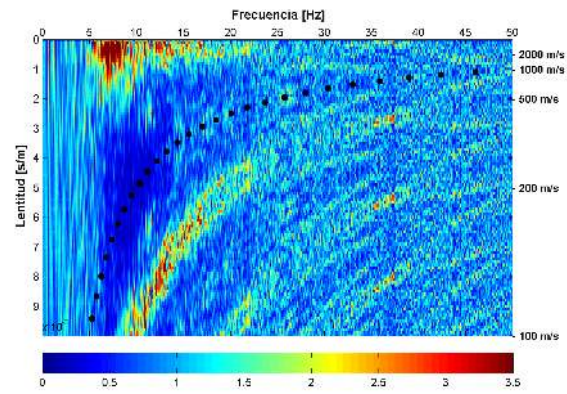


Figura 4.131: Registros T1a y T1b para el perfil T1 con 2 y 4 [ms] respectivamente.



(a) T2a

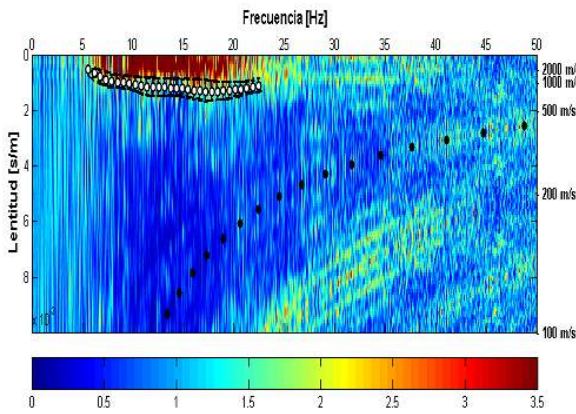


(b) T2b

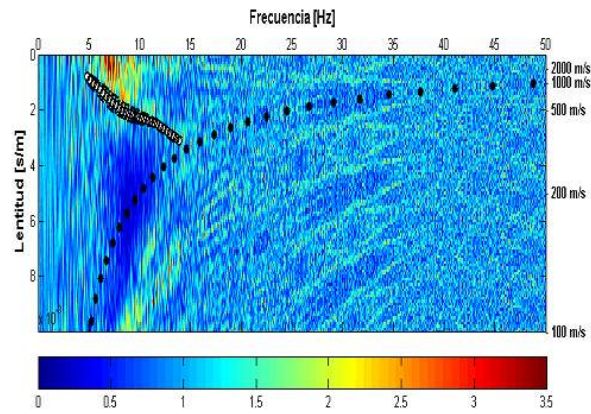
Figura 4.132: Registros T2a y T2b para el perfil T2 con 2 y 4 [ms] respectivamente.

4.5.3. Curva de dispersión

Las curvas de dispersión seleccionadas para estos perfiles fueron para un muestreo de 2 [ms]:



(a) T1ad



(b) T2ad

Figura 4.133: Curva de dispersión seleccionada de 2 [ms] para T1 y T2 .

4.5.4. Parámetros de inversión y estimación de profundidad

Se decidió realizar una gráfica con 6 curvas modelo constituyentes para 5 capas. Los parámetros usados para un modelo de inversión simple se presentan a continuación:

Modelo	Variable	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Capa 5
Run 01	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$	$<V_{p3}$	$<V_{p4}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$	$<V_{s3}$	$<V_{s4}$
Run 02	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$	$<V_{p3}$	$<V_{p4}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$	$<V_{s3}$	$<V_{s4}$
Run 03	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$	$<V_{p3}$	$<V_{p4}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$	$<V_{s3}$	$<V_{s4}$
Run 04	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$	$<V_{p3}$	$<V_{p4}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$	$<V_{s3}$	$<V_{s4}$
Run 05	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$	$<V_{p3}$	$<V_{p4}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$	$<V_{s3}$	$<V_{s4}$
Run 06	V_p	200-5000	$<V_{p1}$	$<V_{p2}$	$<V_{p3}$	$<V_{p4}$
	V_s	150-3500	$<V_{s1}$	$<V_{s2}$	$<V_{s3}$	$<V_{s4}$

Cuadro 4.70: Parámetros del modelo ingresado a Dinver, los valores de las capas corresponden a los parámetros por defecto.

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
T1	230	76.60 - 115	294.20	147.10	21.80	9.70

Cuadro 4.71: Estimaciones de profundidad para T1

Perfil	Longitud [m]	Z[m]	λ_{max} [m]	$Z_{\lambda_{max}}$ [m]	λ_{min} [m]	$Z_{\lambda_{min}}$ [m]
T1	92	30.60 - 41	303.40	151.70	39	19.50

Cuadro 4.72: Estimaciones de profundidad para T2

4.5.5. Modelos de perfil de velocidad

Los modelos resultantes de velocidad de onda S fueron los siguientes:

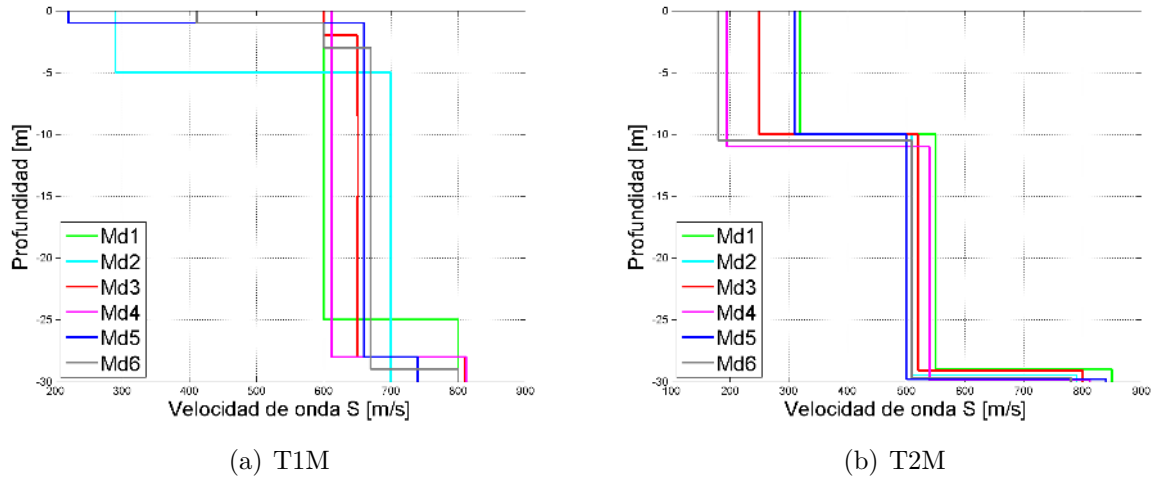


Figura 4.134: Modelos de velocidad para perfiles T1 y T2.

4.5.6. Curva V_{s30} promedio

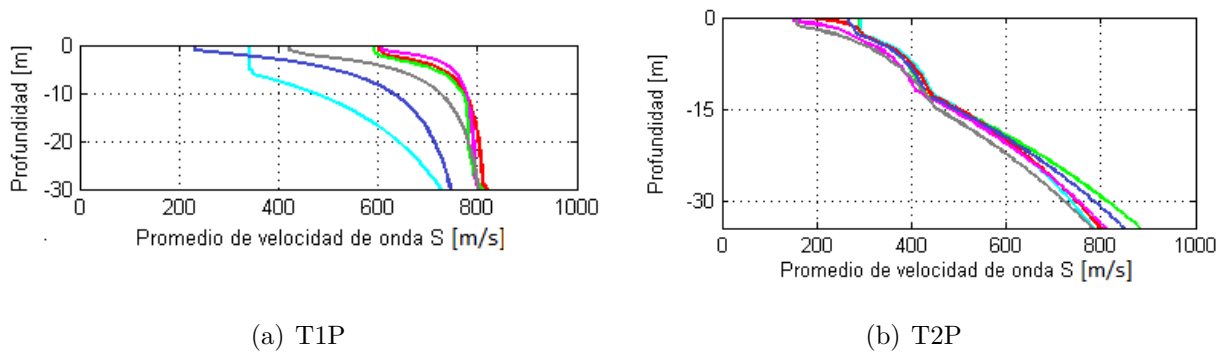


Figura 4.135: Velocidad promedio para perfiles T1 y T2.

Capítulo 5

Análisis y discusión

5.1. La Cascada

El resultado V_{s30} obtenido, cuyo valor cercano a los 230 $[\frac{m}{s}]$ aproximadamente permite una clasificación de suelo tipo D, lo cual no es lo esperado según una perspectiva visual. Por lo visto en el lugar, al ser ubicado sobre un cerro, es decir una superficie rocosa, se habría esperado que las velocidades hubieran sido más altas, sin embargo el valor obtenido se ajusta según la descripción geológica del lugar por la existencia de unidades geológicas Pzsgc y sobre todo de PLHal, lo cual indica en terminos generales depositos sin cementación lo que podría apoyar este resultado, pero para tener mayor certeza es necesario realizar la sísmica de refracción correspondiente junto con la toma de varios registros espectrales en el lugar. De acuerdo a esto último el registro espectral obtenido fue bastante claro para identificar una curva de dispersión, más de lo esperado en un ambiente donde no existieran ruidos culturales perceptibles por el equipo, más que el propio ruido controlado por el equipo en la tarea. Se podría sospechar alguna influencia del salto de agua, sin embargo la distancia de esto último a los geófonos es considerable en relación al ruido forzado percibido claramente en el registro de prueba que se realizó directamente sobre cada geófono, por tanto es necesario realizar un nuevo perfil en el lugar más cerca a *La Cascada*, y observar su comportamiento en un registro espectral junto con compararlo con un arreglo de geófonos en forma diagonal C1 y C2. Con esto se podría tener mayor certeza para obtener la curva de dispersión y con la sísmica de refracción los parámetros de velocidad de onda P junto con la estimación de un modelo de capas más certero.

5.2. Campus frente a FCFM

Para los resultados V_{s30} obtenidos, se contó con la información de la sísmica de refracción de otros trabajos y se puede decir que los valores establecidos permitieron que las velocidades de onda S se ajusten bastante en relación a los trabajos realizados anteriormente [2], la velocidad V_{s30} obtenida es en torno a los 300 $[\frac{m}{s}]$ aproximadamente y que permite una clasificación de suelo tipo D (con una labor más minuciosa en la toma de los registros y determinación de la curva de dispersión posiblemente del tipo C). En el modelo de capas naturalmente hay diferencias por las condiciones propias impuestas. A pesar de estas concordancias, se debe señalar que la curva de dispersión obtenida en cuanto a frecuencias energéticas tiene un comportamiento acorde a otras curvas obtenidas en otros trabajos [2], pero no en lentitudes. Lo obtenido en el registro

espectral permitió visualizar que la envolvente energética principal y base para la obtención de la curva de dispersión fructúa en lentitudes mayores a las vistas por sobre los 0.007 s/m. Esto técnicamente sobre el software y rompiendo en parte los parámetros teóricos, no permitió seleccionar esta curva de dispersión de mayor lentitud, pues el desajuste en las tentativas de curvas siempre era sobre 1 y cercano a 2 bajo los parámetros de desajuste de Dinver, esto no permite obtener un modelo de dispersión ni menos los modelos de capas ni V_{s30} , sin embargo gracias a los otros registros en algunos casos con bastante ruido permitieron determinar otra envolvente de energía, en lentitudes inferiores y que demostró una tendencia en los registros, la cual permitió establecer un valor V_{s30} y un modelo, sin embargo existiría mayor certeza de los registros si se repetiera el registro en el perfil en un horario donde el ruido cultural no sea tan invasivo, pues se debe recordar que los registros se realizaron cercanos a una faena de construcción con mucha actividad.

5.3. Riachuelo

El trabajo en Riachuelo involucró sísmica de refracción y la toma de registros con muestreo de 2 y 4 [ms], además de realizar modelos acotados y no actoados, esto tuvo gran ayuda para la determinación de las curvas de dispersión y la generación de los modelos para los perfiles realizados. De acuerdo a lo comentado en las imágenes obtenidas se puede concluir que para los perfiles R1 y R2 el parámetro V_{s30} fructúa entre los 260 y los 350 [$\frac{m}{s}$] aproximadamente, esto permite una clasificación de suelo del tipo D. Se puede suponer que la construcción de la carretera 181 habría generado alteraciones muy superficiales sobre el terreno, pero se habría esperado que por ser una zona cordillerana y bajo la geología del lugar existiera una velocidad superior a mayor profundidad.

5.4. Termas de Manzanar

Al igual que en Riachuelo, el sector de las termas involucró sísmica de refracción y la toma de registros con muestreo de 2 y 4 [ms], además de realizar modelos acotados y no acotados. Como se mencionó en la figura respectiva, el valor V_{s30} fructúa entre 320 a 580 [$\frac{m}{s}$] aproximadamente, esto permite la categoría de suelo tipo D, sin embargo individualizando las zonas donde se realizaron los perfiles M3, M4, M5, M6, es este suelo el que se puede categorizar como D y se habría esperado que tuviera valores V_{s30} superiores, por otro lado las zona de los perfiles M1 y M2, de acuerdo a los valores obtenidos en este sector se puede categorizar el suelo de tipo B. Estos ultimos perfiles y su tendencia a mostrar valores V_{s30} superiores se realizaron aledaños al río colindante, estos valores pueden dar el indicio de un basamento rocoso impermeable que de soporte a este río. Un estudio geológico mas exhaustivo permitiría determinar que roca es la predominante en este sector y a lo largo del cauce para apoyar este resultado.

5.5. Túnel

Los resultados obtenidos en el túnel "El Naranjito" son los esperados, los valores del parámetro V_{s30} para todas las curvas modelo constituyentes fructúan entre los 800 y 900 $[\frac{m}{s}]$ aproximadamente, lo que permite clasificar este suelo como uno de tipo B y con mayor precisión en una categoría A. Como se mencionó, es esperable encontrar mayores velocidades en una zona rocosa en donde se emplazó este túnel.

Capítulo 6

Conclusiones

Se ha logrado caracterizar, analizar e interpretar la zonas de estudio junto con la obtención del valor V_{s30} . La información geológica recopilada de los lugares permitió validar algunos resultados no esperados, sin embargo en el proceso de adquisición de datos es necesario señalar que para tener una mayor certeza de los resultados es de vital importancia recopilar la mayor información posible de los lugares a explorar junto a una eficaz y contundente labor de registro. También es recomendable realizar los ensayos o estudios en horarios de tráfico menor como muy temprano o en la noche con el objetivo de evitar fuentes de campo cercano y de ruido constante. Esto último influye directamente para un óptimo uso de la metodología, como se pudo comprobar la obtención de varios registros espectrales ayudan directamente en la mejor visualización de la envolvente de energía dominante o modo principal y posterior selección curva de dispersión, esta última es la base fundamental para la construcción de un modelo de velocidad de onda S y una determinación más certera del parámetro V_{s30} de un sector.

La metodología y análisis determinaron que el muestreo de 2 y 4 [ms] no generaron cambios notables en la visualización de los registros espectrales, además que se observó que un espaciamiento de 2 [m] entre geófonos permitió una visualización en muchos casos clara de la envolvente de energía principal, de acuerdo a esto se pudo observar que el ruido muy intenso puede generar alteraciones significativas en las imágenes espectrales causando un nivel de incertidumbre en la selección para una curva de dispersión. Otro punto importante con la metodología es que mientras más registros de un lugar mayor es el tiempo que se debe entregar al proceso el cual puede ser relativamente extenso, el hecho de intentar obtener una curva de dispersión generará un aspecto muy personal o subjetivo en la labor y un tiempo que se puede extender para determinar una curva óptima bajo los parámetros de Dinver de desajuste, pues este no es capaz de generar una curva dispersión ni los modelos respectivos cuando el desajuste es mayor a 1 técnicamente.

Otro aspecto importante subjetivo en Dinver, es que la construcción de modelos depende netamente de la dedicación por parte del investigador. Es posible generar varios modelos de capas y modelos de curvas constituyentes para un modelo de perfil. En este trabajo se decidió establecer por la cantidad de perfiles y por la sísmica de refracción modelos estándar de 3 capas con 4 curvas modelo constituyentes (excepto para el túnel), en donde se seleccionaron las mejores, con el menor desajuste. Dinver genera muchos modelos de curva para cada curva constituyente, esto en cierta forma también generará una subjetividad en la determinación de

las velocidades por capa. Con lo obtenido se observó que para el parámetro V_{s30} las curvas constituyentes no variaron significativamente, demostrando una tendencia para modelo de capas establecido, sin embargo es interesante realizar una comparación con un modelo de 2 o 4 capas y comprobar si esta tendencia en el parámetro V_{s30} se mantiene constante y cercana a lo obtenido o difiere.

Cabe señalar que bajo la metodología expuesta para la interpretación de un resultado en un sector, existen ambigüedades y subjetividades tanto en la selección de la curva de dispersión como en los modelos, pues la teoría señala que el *picado* o selección de la curva debe realizarse en la transición azul, verde y rojo en la envolvente de mayor velocidad, sin embargo se encontró que para el perfil realizado frente a la FCFM, esta envolvente en Dinver no era capaz de generar un modelo, pero la selección de un nuevo modo de esta envolvente permitió obtener un resultado V_{s30} que fue acorde a trabajos obtenidos anteriormente en el lugar.

En términos personales para un estudio oficial de una zona, el método como complemento de estudio y apoyado con la sísmica de refracción para un sector aporta información que ayuda a la caracterización de un lugar, sin embargo es necesario la utilización de otros métodos de prospección para complementar o contrastar la información obtenida para el perfil por capas de velocidad de onda S y la del parámetro V_{s30} .

En cuanto a la metodología usada en este trabajo, recomendaría acceder al software profesional utilizado en consultoras para realizar un contraste con los resultados obtenidos y determinar cuales son los parámetros técnicos que pueden influenciar en el uso de cada software para la determinación de un modelo idealizado y determinar las concordancias o contrastes que pueden existir entre ambos para los datos obtenidos de un lugar, lo cual permitiría minimizar la subjetividad e incertidumbre propia de cada software.

Apéndice A

Códigos

A.1. Código MatLab REMI.m

```
"Adaptado para MatLab de Carteau 2013"
-clc;clear all
-datestr(now);
-display('Seleccionar archivo *.txt');
-[file,path] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-A=load(file);
-ng=input('Ingresar Numero de geofonos: ');
-es=input('Ingresar Distancia [m]: ');
-ngm=ng-1;
-X=es*[0:1:ngm];
-dt=input('ingresar tiempo de muestreo(0.002 - 0.007 [s],recomendado): ');
-[nt,nx]=size(A);
-nx=length(X);
-A=A(:,1:nx);
-vmin=100; %m/s
-T=dt*[1:nt]';
-dx=X(2)-X(1);
-dp=0.0001;
-P=[-1/vmin:dp:1/vmin];
-np=length(P);
-df=1/(nt*dt);
-F=df*[0:nt/2-1]';
-nf=length(F);
-% Pre-procesamiento
-for i=1:nx;
-maxA=max(abs(A(:,i)));
-A(:,i)=A(:,i)/maxA; %normalización
-meanA=mean(A(:,i));
-A(:,i)=A(:,i)-meanA; %centralización
-end
-% Tranformada Slant-stack
-B=zeros(nt,np);
-for l=1:np;
- p=P(l);
- b=zeros(nt,1);
- t=repmat(X*p,nt,1)+repmat(T,1,nx);
- for i=1:nx;
```

```

- b=[b interp1(T,A(:,i),t(:,i))];
- end
- b(isnan(b))=0;
- B(:,l)=sum(b')
-end
- % Transformada de Fourier y tasa espectral
- FOU=fft(B,nt);
- FOUi=conj(FOU);
- S=FOUi(1:nf,:).*FOU(1:nf,:);
- PA=P((np+1)/2:np);
- npa=length(PA);
- SA=fliplr(S(:,1:(np-1)/2))+S(:,(np+3)/2:np);
- SA=[S(:,(np+1)/2) SA];
- fmax=max(find(F<=50));
- pmax=max(find(PA<=0.01));
- SAi=SA(1:fmax,:);
- for m=1:fmax;
- R(m,:)=SA(m,:)*npa/(sum(SA(m,:)));
- end
- clc
- % Gráfico R(p,f)
- hn=[2; 5; 10; 25; 50; 100];
- fn=logspace(log10(F(2)),log10(F(nf)),100);
- pn=1./(hn*fn);
- sn= repmat(3.5,length(fn),1);
- vlabel=[1/100 1/200 1/500 1/1000 1/2000];
- RpfZ=figure;
- imagesc(F(1:fmax),PA(1:pmax),R(1:fmax,1:pmax)');
- caxis([0 3.5]);
- axis ij
- xlabel('Frecuencia [Hz]','interpreter','tex','fontsize',12);
- ylabel('Lentitud [s/m]','interpreter','tex','fontsize',12);
- colorbar('location','southoutside');
- hold on
- plot3(fn,1./((2*dx).*fn),sn,'k','MarkerSize',20);
- text(F(fmax),vlabel(1),'-100 m/s','interpreter','tex','fontsize',10);
- text(F(fmax),vlabel(2),'-200 m/s','interpreter','tex','fontsize',10);
- text(F(fmax),vlabel(3),'-500 m/s','interpreter','tex','fontsize',10);
- text(F(fmax),vlabel(4),'-1000 m/s','interpreter','tex','fontsize',10);
- text(F(fmax),vlabel(5),'-2000 m/s','interpreter','tex','fontsize',10);
- axis([F(1) F(fmax) PA(1) PA(pmax)]);
- set(gca,'XAxisLocation','top');
- hold off
- colormap(jet);
- pre=input('? ¿Desea guardar la imagen? [y/n]:','s');
- if strcmp(pre,'y');
- name=input('Nombre de la imagen: ','s');
- saveas(RpfZ,[ path name 'dat'],'png');
- saveas(RpfZ,[ path name 'dat'],'fig');
- disp('ok,Guardada')
- else
- strcmp(pre,'n');
- end
- %
- display('Proceso de picado');

```

```

-pre=input('¿Comenzar a picar? [y/n]:','s');
-if strcmp(pre,'y');
-display('Seleccionar archivo *.fig');[file2,path2] = uigetfile('*.fig','Seleccionar archivo *.fig');
-open(file2);
-h = gcf;[F,P,R] = getimage(h);[CX1,CY1,C] = improfile(30);
-hold on
-plot(CX1,CY1,'-k','linewidth',2);[CX2,CY2,C] = improfile(30);
-hold on
-plot(CX2,CY2,'-k','linewidth',2);[CX3,CY3,C] = improfile(30);
-hold on
-plot(CX3,CY3,'-k','linewidth',2)
-CX=[CX1';CX2';CX3'];
-CY=[CY1';CY2';CY3'];
-e=std(CY);
-F=mean(CX);
-P=mean(CY);
-hold on
-errorbar(F,P,'e','ok','linewidth',2,'markerfacecolor','w')
-disp=[F' P' e'];
-save([path name '.disp'],'disp','-ascii');
-saveas(h,[path2 name 'pick'],'png');
-close(h);
-display('Ok,Datos e Imagen picada guardada');
-else
-end

```

A.2. Código MatLab VS-VS30.m

```

-clc;clear all
-display('Seleccionar archivo vs vector 1 *.txt');[file1,path1] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar archivo vs vector 2 *.txt');[file2,path2] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar archivo vs vector 3 *.txt');[file3,path3] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar archivo vs vector 4 *.txt');[file4,path4] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar vs a 30 m vector 1 *.txt');[file5,path5] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar vs a 30 m vector 2 *.txt');[file6,path6] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar vs a 30 m vector 3 *.txt');[file7,path7] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar vs a 30 m vector 4 *.txt');[file8,path8] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar archivo VS30 valor 1 *.txt');[file9,path9] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar archivo VS30 valor 2 *.txt');[file10,path10] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar archivo VS30 valor 3 *.txt');[file11,path11] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-display('Seleccionar archivo VS30 valor 4 *.txt');[file12,path12] = uigetfile('*.txt','Seleccionar archivo *.txt');
-A=[path1 file1];a=load(A);
-B=[path2 file2];b=load(B);
-C=[path3 file3];c=load(C);
-D=[path4 file4];d=load(D);
-E=[path5 file5];
-F=[path6 file6];
-G=[path7 file7];
-H=[path8 file8];
% Promedios de velocidad vs hasta los 30m (Dato extra de interes)
-e=load(E);e1=-[0:length(e)-1]';VS30e=mean(e(:,1));
-f=load(F);f1=-[0:length(f)-1]';VS30f=mean(f(:,1));
-g=load(G);g1=-[0:length(g)-1]';VS30g=mean(g(:,1));
-h=load(H);h1=-[0:length(h)-1]';VS30h=mean(h(:,1));

```

```

% VS30 por Dinver
-I=[path9 file9];VS30i=load(I);
-J=[path10 file10];VS30j=load(J);
-K=[path11 file11];VS30k=load(K);
-L=[path12 file12];VS30l=load(L);
% subplot(1,2,1);
-fig1=figure(1);
-plot(a(:,1),-a(:,2),'-b','LineWidth',2);hold on
-plot(b(:,1),-b(:,2),'-r','LineWidth',2);hold on
-plot(c(:,1),-c(:,2),'-g','LineWidth',2);hold on
-plot(d(:,1),-d(:,2),'-c','LineWidth',2);hold on
-xlabel('Velocidad de onda S [m/s]');ylabel('Profundidad [m]');
% l1=legend('Modelo 1','Modelo 2','Modelo 3','Modelo 4','Location','NorthEastOutside');
-l1=legend('Modelo 1','Modelo 2','Modelo 3','Modelo 4','Location','Southwest');
-set(l1,'FontSize',12);grid;
-saveas(fig1,'C42_2ms_1m_H100.png');
% subplot(1,2,2)
-fig2=figure(2);
-plot(e(:,1),e1(:,1),'-b','LineWidth',2);hold on,
-plot(f(:,1),f1(:,1),'-r','LineWidth',2);hold on,
-plot(g(:,1),g1(:,1),'-g','LineWidth',2);hold on,
-plot(h(:,1),h1(:,1),'-c','LineWidth',2);hold on,
-xlabel('Velocidad de onda S promedio [m/s]');ylabel('Profundidad [m]');
- % l2=legend(['VS30= ',num2str(sprintf('%.1f',VS30i))],[ 'VS30= ',num2str(sprintf('%.1f',VS30j))],[ 'VS30= ',num2str(sprintf('%.1f',VS30k))],[ 'VS30= ',num2str(sprintf('%.1f',VS30l))],'Location','NorthEastOutside');
-l2=legend(['VS30= ',num2str(sprintf('%.1f',VS30i))],[ 'VS30= ',num2str(sprintf('%.1f',VS30j))],[ 'VS30= ',num2str(sprintf('%.1f',VS30k))],[ 'VS30= ',num2str(sprintf('%.1f',VS30l))],'Location','Southwest');
-set(l2,'FontSize',12);grid;
-saveas(fig2,'C42_2ms_1m_H30.png');

```

A.3. Código batch

```

-@echo off
-echo Programa de conversion de archivos .report a .txt
-echo =====
-color 0B
-echo Presiona Enter para ejecutar el programa:
-pause >null
-set/p nombre=Ingresar un nombre de archivo:
-echo Trabajando...
-set /A prof = 30
-set /A esp = 1
-set dir= %userprofile% %Desktop
-set carp=m
-set DI= %dir: % %carp: %
-rem omite lineal
-rem Perfiles hasta los 30 m
-FOR /L %%i IN (0,%esp%,%prof%) DO gpdcreport run_01.report -best 1 | gpprofile -average-at %%i >>
%DI% %vs_a_30m_ %nombre%_run_01.txt
-FOR /L %%i IN (0,%esp%,%prof%) DO gpdcreport run_02.report -best 1 | gpprofile -average-at %%i >>
%DI% %vs_a_30m_ %nombre%_run_02.txt
-FOR /L %%i IN (0,%esp%,%prof%) DO gpdcreport run_03.report -best 1 | gpprofile -average-at %%i >>
%DI% %vs_a_30m_ %nombre%_run_03.txt
-FOR /L %%i IN (0,%esp%,%prof%) DO gpdcreport run_04.report -best 1 | gpprofile -average-at %%i >>

```

```

%DI% %vs_a_30m_ %nombre%_run_04.txt
-for /f "skip=4 delims=" %%A in ( %DI% vs_a_30m_ %nombre%_run_01.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#") >> %DI% vs_a_30m_ %nombre%_run_01_vector.txt
-for /f "skip=4 delims=" %%A in ( %DI% vs_a_30m_ %nombre%_run_02.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#") >> %DI% vs_a_30m_ %nombre%_run_02_vector.txt
-for /f "skip=4 delims=" %%A in ( %DI% vs_a_30m_ %nombre%_run_03.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#") >> %DI% vs_a_30m_ %nombre%_run_03_vector.txt
-for /f "skip=4 delims=" %%A in ( %DI% vs_a_30m_ %nombre%_run_04.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#") >> %DI% vs_a_30m_ %nombre%_run_04_vector.txt
-rem Perfiles hasta los 100 m
-gpdcreport run_01.report -best 1| gpprofile -vs > %DI% vs_ %nombre%_run_01.txt
-gpdcreport run_02.report -best 1| gpprofile -vs > %DI% vs_ %nombre%_run_02.txt
-gpdcreport run_03.report -best 1| gpprofile -vs > %DI% vs_ %nombre%_run_03.txt
-gpdcreport run_04.report -best 1| gpprofile -vs > %DI% vs_ %nombre%_run_04.txt
-for /f "tokens=" %%A in ( %DI% vs_ %nombre%_run_01.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#")
>> %DI% vs_ %nombre%_run_01_vector.txt
-for /f "tokens=" %%A in ( %DI% vs_ %nombre%_run_02.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#")
>> %DI% vs_ %nombre%_run_02_vector.txt
-for /f "tokens=" %%A in ( %DI% vs_ %nombre%_run_03.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#")
>> %DI% vs_ %nombre%_run_03_vector.txt
-for /f "tokens=" %%A in ( %DI% vs_ %nombre%_run_04.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#")
>> %DI% vs_ %nombre%_run_04_vector.txt
-rem VS30
-gpdcreport run_01.report -best 1 | gpprofile -average-at 30 %%i >> %DI% VS30_ %nombre%_run_01.txt
-gpdcreport run_02.report -best 1 | gpprofile -average-at 30 %%i >> %DI% VS30_ %nombre%_run_02.txt
-gpdcreport run_03.report -best 1 | gpprofile -average-at 30 %%i >> %DI% VS30_ %nombre%_run_03.txt
-gpdcreport run_04.report -best 1 | gpprofile -average-at 30 %%i >> %DI% VS30_ %nombre%_run_04.txt
-for /f "tokens=" %%A in ( %DI% VS30_ %nombre%_run_01.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#")
>> %DI% VS30_ %nombre%_run_01_valor.txt
-for /f "tokens=" %%A in ( %DI% VS30_ %nombre%_run_02.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#")
>> %DI% VS30_ %nombre%_run_02_valor.txt
-for /f "tokens=" %%A in ( %DI% VS30_ %nombre%_run_03.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#")
>> %DI% VS30_ %nombre%_run_03_valor.txt
-for /f "tokens=" %%A in ( %DI% VS30_ %nombre%_run_04.txt) do (ECHO %%A | findstr /I /V "#")
>> %DI% VS30_ %nombre%_run_04_valor.txt
-echo Ok, Presiona Enter para salir
-pause >null

```

""

Bibliografía

- [1] ASTEN M. AND HENSTRIDGE J., (1984) *Array estimator and the use of microseisms for reconnaissance of sedimentary basins. Geophysics.*
- [2] CARTEAU C., (2013), *Caracterización de suelo en villa las araucarias mediante refracción de microtemores. Master's thesis, Universidad de Concepción.*
- [3] CUADRA P., 2007, *Aplicación de técnicas de vibraciones ambientales: Análisis de Microtemores y Vibraciones Naturales, para la caracterización de sitio. Trabajo especial de Grado: Inédito. Universidad Simón Bolívar.*
- [4] EMPARAN C., SUAREZ M., AND NOZ J. M., (1992), *Hoja curacautín No.71: Servicio de Geología y Minería.*
- [5] LOUIE J., (2001A), “Faster, better: shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays”. *Bulletin of the Seismological Society of America. Volumen 91. N°2. p347-364.*
- [6] MCMECHAN G. A. AND YEDLIN M. J., (1981), *Analysis of dispersive waves by wave-field transformation. Geophysics 46, 869-874.*
- [7] MORENO L., ALFARO A., (2000), *De los Microsismos a los Microtemblores - Investigaciones en el Instituto Geofísico: VIII Congreso Colombiano de Geotecnia 2000 - Sociedad Colombiana de Geotecnia.*
- [8] PULLAMMANAPPALLIL S., HONJAS W. AND LOUIE J., (2003), *Determination of 1-D Shear Wave Velocities Using the Refraction Microtremor Method. Seismological Laboratory, University of Nevada, United States.*
- [9] SAMBRIDGE M., (1999), *Geophysical inversion with a neighbourhood algorithm, I. Searching a parameter space. Geophys. J. Int. 138*
- [10] SHEARER P.M., (2009), *Introduction to seismology. Cambridge University Press, second edition.*
- [11] STROBBIA C., (2003), *Surface Wave Methods: Acquisition, processing and inversion. Ph.D. thesis, Politecnico di Torino, Torino, Italy.*
- [12] THORSON J. R. AND CLAERBOUT J. F., (1985), *Velocity-stack and slant-stack stochastic inversion: Geophysics, v. 50, p..*

- [13] TOKIMATSU K., (1997), *Geotechnical site characterization using surface waves. En Ishihara (Ed.), Proc. 1st Intl. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering.*
- [14] VIVALLOS J., RAMÍREZ P., FONSECA A., (2010), *Microzonificación sísmica de la ciudad de Concepción, Región del BioBío: Carta Geológica de Chile, serie geología ambiental No.12*
- [15] WATHELET M., (2005) , *Array recordings of ambient vibrations: surface-wave inversion. PhD thesis, Université de Liège, Belgium.*
- [16] WATHELET M., (2008), *An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling Geophys. Res. Lett., 35, L09301*
- [17] WWW.COOPERATIVA.CL, <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/sismos/catastrofe-en-chile/familiares-de-fallecidos-en-edificio-alto-rio-celebraron-misa-a-100-dias-del-terremoto/2010-06-05/134929.html>
- [18] WWW.GEOPSY.ORG, <http://www.geopsy.org/wiki/index.php/Gpprofile>