

Tabla de Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Motivación | 1 |
| 1.2. Objetivo General | 3 |
| 1.3. Objetivos Específicos | 3 |
| 1.4. Estructura de la Tesis | 4 |
| 2. Marco Geológico y Geotécnico | 5 |
| 2.1. Geometría de la Cuenca | 5 |
| 2.2. Marco Geológico | 6 |
| 2.3. Suelos en la Cuenca de Santiago | 9 |
| 3. Redes de Estaciones | 12 |
| 3.1. Red Temporal de Estaciones Banda Ancha | 12 |
| 3.2. Red de Acelerógrafos | 15 |
| 4. Propagación de Ondas | 19 |
| 4.1. Tipos de Ondas | 19 |
| 4.2. Ondas Rayleigh | 20 |
| 4.2.1. Velocidad de Fase y Grupo | 20 |
| 4.2.2. Dispersión de Ondas Rayleigh | 22 |
| 4.2.3. Sensibilidad a los Parámetros del Medio | 24 |
| 5. Correlación Cruzada de Ruido Sísmico y Tiempos de Viaje | 27 |
| 5.1. Fuentes de Ruido Sísmico | 28 |
| 5.2. Función de Green y Correlación Cruzada | 29 |
| 5.2.1. Función de Green del Medio | 29 |
| 5.2.2. Correlación Cruzada | 31 |
| 5.2.3. Correlación Cruzada y Ondas Superficiales | 32 |
| 5.3. Metodología Espectral | 35 |
| 5.3.1. Curvas de Dispersión y Tiempos de Viaje | 39 |
| 5.3.1.1. Acondicionamiento de Señales | 39 |
| 5.3.1.2. Cálculo Espectro de Correlación | 43 |
| 5.3.1.3. Cálculo de Velocidad de Fase y Tiempos de Viaje | 43 |
| 5.3.2. Rango de Validez | 45 |
| 5.3.3. Estimación de Errores | 48 |
| 5.3.3.1. Método de Bootstrap | 49 |
| 5.4. Resumen de Resultados | 54 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.4.1. | Curvas de Dispersión | 54 |
| 5.4.2. | Cobertura de Información y Tiempos de Viaje | 60 |
| 5.4.3. | Rango de Frecuencias y Red de Estaciones | 62 |
| 6. | Tomografía de Tiempos de Viaje | 65 |
| 6.1. | Formulación del Problema | 66 |
| 6.1.1. | Problema Directo y Problema Inverso | 66 |
| 6.1.2. | Tomografía de Tiempos de Viaje | 67 |
| 6.2. | Mínimos Cuadrados y Condicionamiento | 69 |
| 6.2.1. | Normas de Error y Ajuste | 69 |
| 6.2.2. | Solución Mediante Mínimos Cuadrados | 70 |
| 6.2.3. | Condicionamiento del Problema Inverso | 71 |
| 6.3. | Mínimos Cuadrados Regularizados | 72 |
| 6.4. | Criterios de Regularización | 75 |
| 6.4.1. | Método de la Curva L | 75 |
| 6.4.2. | Método de Validación Cruzada Generalizada | 76 |
| 6.5. | Cobertura y Resolución del Problema | 77 |
| 6.5.1. | Cobertura de Rayos | 77 |
| 6.5.2. | Discretización del Problema | 78 |
| 6.5.3. | Checkerboards y Resolución | 80 |
| 6.6. | Resumen de Resultados | 85 |
| 7. | Modelo de Velocidad de Onda de Corte e Interpolación | 91 |
| 7.1. | Inversión Curvas de Dispersión | 91 |
| 7.2. | Interpolación Geoestadística y Kriging | 92 |
| 7.3. | Resumen de Resultados | 95 |
| 7.3.1. | Inversión y Perfiles de v_s | 95 |
| 7.3.2. | Kriging y Modelo de velocidades 3D | 98 |
| 8. | Análisis de Resultados y Conclusiones | 103 |
| 8.1. | Discusión y Análisis de Resultados | 103 |
| 8.1.1. | Cálculo de Correlaciones y Tiempos de Viaje | 103 |
| 8.1.2. | Tomografía de Tiempos de Viaje | 106 |
| 8.1.3. | Modelo 3D de Velocidad de Onda de Corte | 107 |
| 8.2. | Conclusiones | 109 |
| 8.3. | Recomendaciones | 110 |
| | Bibliografía | 113 |
| | Apéndices | 124 |
| A. | Propagación de Ondas | 125 |
| A.1. | Modos de Ondas Rayleigh | 125 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| 3.1. Ubicación y período de funcionamiento de las estaciones banda ancha del CSN. | 13 |
| 3.2. Polos y ceros para estaciones banda ancha (Nanometrics, 2009). | 14 |
| 3.3. Polos y ceros para estaciones con acelerógrafos (Trnkoczy y Standley, 2009) | 16 |
| 3.4. Ubicación y período de funcionamiento de los acelerógrafos de la ONEMI. | 17 |
| 5.1. Resumen de aplicaciones del método de Bootstrap para el cálculo de correlaciones cruzadas y tomografías de ruido sísmico. M corresponde al número de remuestreos realizados. | 50 |
| 5.2. Resumen pares de estaciones calculados y descartados por calidad. | 54 |
| 5.3. Ajuste exponencial entre las frecuencias límite y distancia inter-estación. | 63 |
| 6.1. Resumen de los indicadores de estabilidad y ajuste para la inversión definitiva con datos reales. | 86 |

Índice de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 1.1. | Efecto de sitio y propagación de ondas (Mod. Boore, 2004). | 1 |
| 2.1. | Morfología de la Cuenca de Santiago. (a) Modelo altimétrico proveniente desde la STRM1 (NASA). (b) Profundidad al basamento (Mod. Araneda et al., 2000). Los afloramientos rocosos se indican en color gris. | 6 |
| 2.2. | Cinturón Sub Andino. Transecto a los 33° 28'S (Mod. Armijo et al., 2010). De este a oeste: el Back Thrust Margin (antitético a la subducción), la Cordillera Frontal (FC) y el Margen Subductivo compuesto por la Cordillera Principal (PC), la Depresión Central (CD), la Cordillera de la Costa (CC) y el Margen Continental (CM). La Cuenca Andina se denota por AB y la falla de San Ramón como SR. | 7 |
| 2.3. | Morfología y formaciones geológicas que componen la Cuenca Andina (33° 25'S) (Armijo et al., 2010). | 7 |
| 2.4. | Transecto Maipo-Tunuyán (33° 40' S) (Mod. Giambiagi et al., 2014). (a) Sección transversal de la orogenia andina. (b) Detalle de la Cordillera Central y Depresión Intermedia. | 8 |
| 2.5. | Mapa con la geología superficial de la Cuenca de Santiago (Mod. Leyton et al., 2011). El contorno ennegrecido representa los límites del radio urbano. | 11 |
| 3.1. | Diagrama de Bode de sensores banda ancha Nanometrics Trillium. | 15 |
| 3.2. | Diagrama de Bode de acelerógrafos Kinometrics Basalt. | 16 |
| 3.3. | Ubicación de estaciones utilizadas. Los acelerógrafos se representan en rojo y las estaciones banda ancha en azul. | 18 |
| 4.1. | Geometría y propagación de las ondas superficiales (Stein y Wysession, 2009). | 19 |
| 4.2. | Velocidad de fase y grupo en la suma de dos armónicos (Stein y Wysession, 2009). | 22 |
| 4.3. | Relación entre c y v_s . Caso semi-espacio homogéneo (Mod. Foti et al., 2014). | 22 |
| 4.4. | Curvas de dispersión y profundidad de prospección. (a) semi-espacio homogéneo. (b) medio estratificado. (Mod. Strobbia, 2003) | 23 |
| 4.5. | Sensibilidad a parámetros del medio (Urban et al., 1993). (a) Velocidades de onda de corte (v_s), compresional (v_p) y densidad (ρ). (b) Kernels de sensibilidad para $f=1$ [Hz]. | 25 |
| 4.6. | Curvas de dispersión y zona observable (Mod. Calkins et al., 2011). (a) Curva de dispersión. (b) Kernels de v_s y límites de profundidad. | 26 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.1. | Ruido sísmico en estación PEL de la red GEOSCOPE. (a) PSD diario para un año de medición (2013). (b) PSD para un día de registro. | 29 |
| 5.2. | Función de Green y medio de propagación (Wapenaar et al., 2010). (a) Impulso originado en una fuente puntual. (b) Respuesta observada por un sensor ubicado en x_a . (c) Respuesta observada por un sensor ubicado en x_b . (d) Respuesta del sensor x_b dada una fuente virtual en x_a | 30 |
| 5.3. | Correlación cruzada discreta (Mod. Santamarina y Fratta, 2005). La señal g_i se desfasa desde derecha a izquierda. | 31 |
| 5.4. | Efecto de la anisotropía en las fuentes de ruido (Mod. Campillo et al., 2011). (a) Distribución homogénea de fuentes. (b) Fuentes ubicadas sólo en zona de interferencia constructiva. (c) Distribución heterogénea de fuentes. | 34 |
| 5.5. | Curva de dispersión de velocidad de grupo entre las estaciones DG19-DG24. Los puntos rojos representan la velocidad para un desfase positivo U^+ (lado derecho de la correlación) y los puntos azules para un desfase negativo U^- (lado izquierdo de la correlación). | 35 |
| 5.6. | Condición de campo lejano. (a) Cumple condición de campo lejano ($\lambda \leq \Delta_{ij}/3$). (b) Longitud de onda máxima ($\lambda_{max} = \Delta_{ij}/3$). (c) No cumple condición de campo lejano ($\lambda \geq \Delta_{ij}/3$). | 36 |
| 5.7. | Función de Bessel del primer tipo de orden cero J_0 . En línea punteada se indican los valores de z en que J_0 cruza el origen. | 37 |
| 5.8. | Parte real e imaginaria del espectro de correlación. (a) Par DG03-DG20. (b) Par DG19-DG24. | 38 |
| 5.9. | Histograma de días comunes de registro. Pares de sensores banda ancha (BB), banda ancha y acelerógrafo (BB-ACC) y par de acelerógrafos (ACC). | 40 |
| 5.10. | Verificación de remoción de respuesta instrumental. (a) Espectro DG01(BB)-MT03(ACC) sin remover respuesta. (b) Espectro DG01(BB)-MT03(ACC) con respuesta removida. En ambos casos, se compara con el espectro de correlación DG01(BB)-MT03(BB). | 41 |
| 5.11. | Verificación de remoción de respuesta instrumental. (a) Espectro DG03(BB)-MT03(ACC) sin remover respuesta. (b) Espectro DG03(BB)-MT03(ACC) con respuesta removida. En ambos casos, se compara con el espectro de correlación DG03(BB)-MT03(BB). | 42 |
| 5.12. | Espectro real de correlación final para el par DG24-DG29. En escala de grises de muestra el espectro de correlación diario sobre 45 días de registro común. | 44 |
| 5.13. | Curvas de dispersión par DG24-DG29. Las estaciones se encuentran separadas a una distancia de $\Delta_{ij} = 10, 31$ [km]. | 44 |
| 5.14. | Criterio de selección automático de banda de frecuencia de la correlación cruzada para el par DG03-DG20. (a) Espectro de correlación normalizado one-bit. (b) Espectro de correlación normalizado y apilado. (c) Curva de dispersión y rango de frecuencias factible (zona gris). Las estaciones se encuentran separadas a $\Delta_{ij} = 15, 18$ [km]. | 47 |
| 5.15. | Histograma de distancias inter-estación para todas las estaciones en la Cuenca (761 pares de estaciones en total). Intervalos cada 2,5[km]. | 48 |
| 5.16. | Método de Bootstrap para estimación de la distribución de un estadístico $s(X)$. Los puntos encerrados por un círculo rojo representan aquellos elementos que han sido repetidos en el proceso de remuestreo. | 51 |

| | |
|--|----|
| 5.17. Bootstrapping para el par DG03-DG20.(a) Espectros de correlación y (b) Velocidad de fase para cada remuestreo. (c) Curva de dispersión promedio y desviación estándar. | 53 |
| 5.18. Distribución de velocidad para el par DG03-DG20. (a) $f=0,15$ [Hz]. (b) $f=0,8$ [Hz]. | 53 |
| 5.19. Pares de estaciones sin correlación. (a) Par DG33-MT05 separados a $\Delta_{ij} = 23, 14$ [km]. (b) Par MT03-R10M separados a $\Delta_{ij} = 10, 16$ [km]. | 55 |
| 5.20. Número total de correlaciones calculadas existosamente en función de la orientación de cada par de estaciones. (a) Convención del ángulo de orientación. Distribución para (b) todos los pares, (c) $0,5$ [Hz], (d) 1 [Hz], (e) 2 [Hz] y (f) 3 [Hz]. | 56 |
| 5.21. Cálculo de correlación cruzada, familia de curvas de dispersión y rango de frecuencias entre pares de estaciones banda ancha. (a) Par DG19-DG24 separados a $\Delta_{ij} = 2, 95$ [km]. (b) Par DG09-MT03 separados a $\Delta_{ij} = 29, 42$ [km]. | 57 |
| 5.22. Cálculo de correlación cruzada, familia de curvas de dispersión y rango de frecuencias entre pares de acelerógrafos. (a) Par R14M-R18M separados a $\Delta_{ij} = 22, 51$ [km]. (b) Par R14M-R16M separados a $\Delta_{ij} = 10, 45$ [km]. | 58 |
| 5.23. Cálculo de correlación cruzada, familia de curvas de dispersión y rango de frecuencias entre estaciones banda ancha y acelerógrafos. (a) Par DG08-R02M separados a $\Delta_{ij} = 1, 00$ [km]. (b) Par DG11-R18M separados a $\Delta_{ij} = 15, 12$ [km]. | 59 |
| 5.24. Resumen de las curvas de dispersión calculadas según el tipo de instrumento correlacionado. | 60 |
| 5.25. Histograma de pares con información en función de la frecuencia con el detalle del tipo de instrumento correlacionado. | 61 |
| 5.26. Desviación estándar media de los tiempos de viaje en función de la frecuencia, expresados como el porcentaje con respecto a su valor medio. | 61 |
| 5.27. Frecuencias límite en función de la distancia inter-estación. (a) Frecuencias mínimas f_{min} . (b) Frecuencias máximas f_{max} | 63 |
| 5.28. Frecuencias mínimas y máximas observables en función de la distancia inter-estación. | 64 |
| 6.1. Tomografía de ruido sísmico y modelo de velocidades del medio. | 65 |
| 6.2. Problema directo y problema inverso (Mod. Santamarina y Fratta, 2005). . . | 66 |
| 6.3. Propagación de ondas. (a) Rayos y frente de ondas. (b) Trayectoria entre dos estaciones. | 67 |
| 6.4. Discretización del campo de lentitudes. (a) Grilla de N elementos. (b) Tiempo de viaje predicho. | 68 |
| 6.5. Error y Normas. (a) Error de ajuste e_k para una observación (x_k, y_k) . (b) Efecto del tipo de norma en la minimización del error. | 70 |
| 6.6. Determinación del ε^2 óptimo. (a) Método de la curva L. (b) Método de validación cruzada generalizada. | 75 |
| 6.7. Cobertura especial de rayos en la Cuenca para una frecuencia de: (a) $0,3$ [Hz],(b) $0,4$ [Hz], (c) $0,7$ [Hz] y (d) $1,0$ [Hz]. | 77 |
| 6.8. Cobertura especial de rayos en la Cuenca para una frecuencia de: (a) $1,5$ [Hz], (b) $3,0$ [Hz]. | 78 |
| 6.9. Efectos de la discretización en el problema inverso para un mismo nivel de regularización. (a) Malla gruesa (κ menor). (b) Malla fina (κ mayor). | 79 |

| | |
|--|-----|
| 6.10. Modelo sintético y recuperación. (a) Modelo sintético de tablero (8x8[km]). (b) Modelo estimado a 0,4[Hz]. (c) Error en el modelo estimado con respecto al modelo original. (d) Histograma de errores de ajuste de las observaciones. | 81 |
| 6.11. Elección del nivel de regularización óptimo (0,4[Hz]). (a) Método de validación cruzada generalizada. (b) Método de curva L. Los niveles de regularización escogidos se muestran con un punto amarillo. | 82 |
| 6.12. Efectos de la regularización en la recuperación del modelo inicial (0,4[Hz]). (a) Modelo sub-amortiguado $\varepsilon = 10^{-2}$. (b) Modelo sobreamortiguado $\varepsilon = 10^2$ | 83 |
| 6.13. Efectos del nivel de regularización en: (a) Número de condición κ . (b) Norma de ajuste de las observaciones $\ e\ $. (c) Error del modelo estimado con respecto al original E_m | 83 |
| 6.14. Recuperación modelo inicial para anomalías de distinto tamaño. (a) 0,4[Hz](6x6[km]), (b) 0,7[Hz](6x6[km]), (c) 0,4[Hz](4x4[km]), (d) 0,7[Hz](4x4[km]). | 84 |
| 6.15. Niveles de regularización óptimos para cada frecuencia utilizando los métodos de validación cruzada generalizada (VCG) y curva L sobre datos reales. | 85 |
| 6.16. Mapas de velocidad de fase y error de ajuste. (a) Modelo estimado a 0,4[Hz]. (b) Error de ajuste a 0,4[Hz]. (c) Modelo estimado a 0,7[Hz]. (d) Error de ajuste a 0,7[Hz]. | 87 |
| 6.17. Mapas de velocidad de fase para una frecuencia de: (a) 0,2[Hz], (b) 0,3[Hz], (c) 0,5[Hz] y (d) 0,6[Hz]. | 88 |
| 6.18. Mapas de velocidad de fase para una frecuencia de: (a) 0,8[Hz], (b) 0,9[Hz], (c) 1,0[Hz] y (d) 1,1[Hz]. | 89 |
| 6.19. Recuperación de las curvas de dispersión para cada cuadrícula. (a) Cuadrícula y ubicación de curvas. Mapa de referencia a 0,7[Hz] (b) Curvas de dispersión recuperadas. | 90 |
| 7.1. Interpolación de una variable en el espacio y su vecindad. | 93 |
| 7.2. Variograma teórico y experimental. Los puntos rojos representan el variograma experimental de los datos (Mod. Sherman, 2011). | 94 |
| 7.3. Resultados de la inversión de las curvas de dispersión representativas. (a) Curvas zona oeste (amarilla), centro (rosa) y sur (verde) (Figura 6.19a) (b) Perfiles de v_s mejor ajustados para cada zona. | 96 |
| 7.4. Resumen del proceso de inversión de todas las curvas de dispersión. (a) Total de perfiles invertidos y perfil medio. (d) Kernels de sensibilidad de v_s medios para la inversión. | 96 |
| 7.5. Detalle proceso de inversión de las curvas de dispersión. Mejores perfiles de v_s para (a) zona oeste, (c) zona centro y (e) zona sur. Mejoras curvas de dispersión ajustadas para (b) zona oeste, (d) zona centro y (f) zona sur. | 97 |
| 7.6. Resultados método de kriging ordinario ($z=1$ [km]). (a) Variograma experimen- tal y ajuste variograma teórico ($\alpha = 0^\circ$ y $\alpha = 45^\circ$). (b) Error de ajuste de las observaciones. (c) Distribución de v_s . (d) Desviación estándar del ajuste. | 99 |
| 7.7. Perfiles longitudinales de v_s para una profundidad de (a) 1,3[km], (b) 2,5[km], (c) 3,5[km] y (d) 5,0[km]. Las zonas de extrapolación están achuradas en gris. | 100 |
| 7.8. Perfiles transversales de v_s coordenada N. (a) Ubicación de los perfiles. (b) Per- fil centro N=6298500[m]. (c) Perfil sur N=6284500[m]. El límite de resolución superior (700[m]) se muestra en línea segmentada. | 101 |

| | | |
|------|--|-----|
| 7.9. | Perfiles transversales de v_s coordenada E. (a) Ubicación de los perfiles. (b) Perfil oeste E=320000[m]. (c) Perfil este E=306000[m]. El límite de resolución superior (700[m]) se muestra en línea segmentada. | 102 |
| 8.1. | Identificación de cruces por el origen y su efecto en la velocidad de fase. . . . | 105 |
| 8.2. | Perfiles longitudinales de v_s y geometría del basamento de la Cuenca a una profundidad de (a) 700[m] y (b) 1000[m]. Las curvas de nivel fueron derivadas desde el modelo gravimétrico de Araneda et al. (2000). | 108 |
| A.1. | Medio estratificado caracterizado por los parámetros $\rho(z)$, $v_p(z)$ y $v_s(z)$ | 125 |
| A.2. | Diferentes modos de propagación de ondas Rayleigh (Mod. Foti, 2000). (a) Perfil normalmente dispersivo. (b) Curvas de dispersión para distintos modos. . . . | 127 |
| A.3. | Curvas de dispersión aparente y teórica (Mod. Foti, 2000). (a) Perfil normalmente dispersivo. (b) Perfil inversamente dispersivo. | 128 |