

Tabla de contenido

Agradecimientos.....	ii
1. Introducción.....	1
1.1 Formulación del estudio propuesto.....	1
1.2 Ubicación y zona de estudio.....	2
1.3 Objetivos.....	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
1.4 Hipótesis de Trabajo.....	8
1.5 Metodología de Trabajo.....	9
1.5.1 Método glaciológico.....	9
1.5.2 Método geodésico.....	12
1.5.3 Marco conceptual para el reanálisis del balance de masa.....	13
2. Descripción del área de estudio.....	22
2.1 Clima.....	22
2.1.1 Precipitaciones y temperaturas.....	23
2.2 Relieve.....	24
2.3 Marco geológico.....	25
2.3.1 Antecedentes tectónicos y morfoestructurales.....	25
2.3.2 Principales unidades geológicas.....	26
3. Resultados.....	32
3.1 Método glaciológico.....	32
3.1.1 Observaciones glaciológicas.....	32
3.1.2 Homogeneización.....	32
3.1.3 Determinación de la incertidumbre.....	41
3.2 Método geodésico.....	42
3.2.1 Observaciones geodésicas.....	42
3.2.2 Homogeneización.....	44
3.2.3 Determinación de la incertidumbre.....	47
3.3 Validación.....	50
4. Discusión.....	52
4.1 Resultados de la homogeneización de la serie glaciológica.....	52
4.2 Calibración de la serie glaciológica.....	54
4.3 Representatividad de la acumulación del pozo estratigráfico.....	54
4.4 Mediciones de densidad.....	57

4.5 Metodología de estimación del balance de masa glaciológico.....	58
4.6 Factor de conversión del método geodésico.....	60
5. Conclusiones.....	61
6. Bibliografía	63
Anexos	67
Anexo A: Ablación balizas (1982-2016).....	67
Anexo B: Acumulación y densidad pozos estratigráficos (1982-2016).....	96
Anexo C: Homogeneización ablación Modelo Grado-Día	123

Índice de Tablas

Tabla 1. Días de acumulación a extrapolar para cada temporada.....	36
Tabla 2. Días de ablación a extrapolar para cada temporada.	37
Tabla 3. Errores sistemáticos y aleatorios del método glaciológico (2009-2015).....	41
Tabla 4. Error sistemático por diferencia de fechas de mediciones geodésicas.....	45
Tabla 5. Resumen errores sistemáticos y aleatorios del método geodésico.	48
Tabla 6. Resultados estadísticos de la comparación de métodos glaciológico y geodésico (2009-2015).	51

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del glaciar Echaurren Norte.	2
Figura 2. Zonas y subzonas glaciológicas definidas en la Estrategia Nacional de Glaciares (DGA, 2011).	3
Figura 3. Cabecera del glaciar Echaurren Norte. Abril, 2010. (DGA, Glaciares de Chile, 2014).	4
Figura 4. Distribución de balizas (48) 1995 y área 1955 del glaciar Echaurren Norte.	5
Figura 5. Distribución de balizas (18) y área 2009 del glaciar Echaurren Norte.	6
Figura 6. Variación temporal del área glaciar (azul) y cantidad de balizas instaladas por año (rojo).	6
Figura 7. (A) Distribución de balizas (13) y área 2015. (B) Distribución de balizas (11) 2016 y área 2015 del glaciar Echaurren Norte.	7
Figura 8. Variación de área del glaciar Echaurren Norte 1995-2015.	7
Figura 9. Terminología del balance de masa en un año de balance, típico de glaciares de latitudes medias. (Rivera et al., 2016)	9
Figura 10. Cálculos de profundidad (A) y densidad (B) en pozo estratigráfico glaciar Echaurren Norte. (Fuente UGN-DGA)	10
Figura 11. Instalación y medición de balizas en glaciar Echaurren Norte: (A) instalando/profundizando baliza; (B) midiendo baliza instalada/profundizada; (C) control de baliza para profundización. (Fuente: UGN-DGA)	11
Figura 12. Esquema general para el reanálisis de las series del balance de masa glaciar en 6 pasos (modificado de M. Zemp et al., 2013).	13
Figura 13. La curva representa la función de probabilidad de densidad para una distribución normal estándar.	18
Figura 14. Zonas climáticas para la región Metropolitana.	22
Figura 15. Climograma para la estación meteorológica Embalse El Yeso (2475 m.s.n.m). Elaborado con registro 1979-2015 de estadística hidrológica en línea (DGA, 2016).	23
Figura 16. Registro intermitente de temperaturas medias mensuales en glaciar Echaurren Norte estación Vaisala (3840 m.s.n.m.).	24

Figura 17. Segmentación morfoestructural del orógeno Andino entre los 32° y 35° S. Modificado de (Fock, 2005).	25
Figura 18. Principales unidades geológicas que afloran en torno al área de estudio. Modificado de Fock (2005).	26
Figura 19. Mapa geológico esquemático de la zona de estudio. Adaptado de Fock (2005).	27
Figura 20. Depósitos lacustres asociados al sistema afluente de la laguna Lo Encañado. En la ladera del valle se aprecia la estratificación de la Formación Farellones. Fotografía tomada hacia el suroeste.	30
Figura 21. Depósitos morrénicos de composición granítica (izquierda) cumplen función de represa para la laguna Negra. A la derecha se puede apreciar el cerro Echaurren y glaciar homónimo sur. Fotografía tomada hacia el noroeste.	31
Figura 22. Factores de extrapolación utilizados en el balance de masa histórico del glaciar Echaurren Norte.	33
Figura 23. Mapa estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio.	34
Figura 24. Series de temperatura promedio mensual y extrapolación.	35
Figura 25. Correlación entre temperatura media mensual estación Echaurren Norte y extrapolación de temperatura media mensual estación Yeso mediante gradiente calculado.	35
Figura 26. Acumulación homogeneizada mediante factores antiguos y factor grado-día.	38
Figura 27. Ablación homogeneizada mediante factores antiguos y factor grado-día.	38
Figura 28. Series acumuladas y balance (reportes y reanálisis).	39
Figura 29. Datos y extrapolación de acumulación (A) y ablación (B) mediante distintos métodos y días a extrapolar.	40
Figura 30. Comparación de perfiles altitudinales generados mediante DEMs (SRTM 2000, ASTER 2008, LiDAR 2009) (Modificado de DGA, 2012).	42
Figura 31. Imágenes resultantes de los levantamientos topográficos utilizadas en este estudio. (A) Hillshade DEM 2009; (B) Ortofoto 2009; (C) Hillshade DEM 2015; (D) Ortofoto 2015.	43
Figura 32. Variación de volumen glaciar en el periodo 2009-2015.	46
Figura 33. Área de control de elevación entre DEMs.	47

Figura 34. Histograma ráster área de control no glaciar.....	48
Figura 35. Resultado series de balances de masa glaciológico y geodésico para el periodo 1982-2015.	49
Figura 36. Comparación de los balances de masa glaciológico y geodésico para el periodo 2009-2015.	50
Figura 37. Discrepancia reducida ($\delta=1.71$). La curva representa la función de probabilidad de densidad para una distribución normal estándar. Área negra y gris indican niveles de confianza de 95% y 90% respectivamente.	51
Figura 38. Diferencia (área roja) de las series de ablación homogeneizada mediante factores antiguos y factor grado-día.	53
Figura 39. Diferencia (área azul) de las series de acumulación homogeneizada mediante factores antiguos y factor grado-día.	52
Figura 40. Series acumuladas y desvío entre los balances reportados y el reanálisis.	53
Figura 41. Interpolación IDW de la acumulación medida en balizas.	55
Figura 42. Comparación de la acumulación medida en pozo stratigráfico y balizas....	56
Figura 43. Densidad medida para cada temporada en función de la fecha en la que se registra (línea de tendencia).....	57
Figura 44. Distribución del balance de masa con la elevación (2013-14).....	59
Figura 45. Distribución del balance de masa con la elevación (2014-15).....	59