

Tabla de contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivos	3
1.1.1. General	3
1.1.2. Específicos	3
1.2. Organización del documento	3
2. Revisión bibliográfica	4
2.1. Hidrología de nieve	4
2.1.1. Conceptos nivales	5
2.1.2. Balance de energía	7
2.1.3. Balance de masa	11
2.1.4. Sublimación de Nieve	13
2.2. Percepción remota y reanálisis climático	14
2.2.1. Reanálisis climático	15
2.2.2. Imágenes satelitales MODIS	16
2.3. Modelación hidrológica	17
2.3.1. Unidades de respuesta hidrológica	17
2.3.2. Modelo: Cold Regions Hydrological Model	18
2.3.3. Módulos de CRHM	18
2.3.4. Antecedentes del modelo CRHM	19
2.4. Cambio climático	22
3. Área de estudio	23
3.1. Hidrología e instrumentación	24
3.1.1. Estaciones meteorológicas y fluviométricas	26
3.1.2. Estación La Ollita	27
3.2. Clima	29
3.3. Características del terreno	31
3.3.1. Usos de suelo y cobertura vegetal	32
3.4. Geología e hidrogeología	34
4. Metodología	35
4.1. Disponibilidad de datos meteorológicos	35
4.2. Unidades de respuesta hidrológica	36
4.3. Distribución de las variables meteorológicas	38
4.3.1. Temperatura del aire	38

4.3.2.	Humedad relativa	40
4.3.3.	Precipitación	40
4.3.4.	Velocidad del viento	42
4.3.5.	Radiación	43
4.4.	Construcción del modelo en CRHM	44
4.4.1.	Balance hídrico	45
4.5.	Modelo de nieves puntual La Ollita	46
4.6.	Análisis de sensibilidad de las forzantes	47
5.	Análisis de resultados	48
5.1.	Modelo La Ollita	48
5.1.1.	Datos de entrada	48
5.1.2.	Balance de masa de nieve	51
5.1.3.	Análisis de sensibilidad de las forzantes	54
5.2.	Modelo semidistribuido de nieve	57
5.2.1.	Balance másico de nieve	57
5.2.2.	Equivalente en agua de nieve	61
5.2.3.	Análisis de sensibilidad de las forzantes	63
5.2.4.	Análisis de frecuencia de los procesos de pérdidas nivales	66
5.2.5.	Distribución espacial de la sublimación anual	69
5.3.	Balance hídrico	73
5.3.1.	Validación de los caudales	75
6.	Conclusiones y comentarios	80
6.1.	Modelo nival La Ollita	80
6.2.	Modelo de la cuenca alta del río Copiapó	81
	Bibliografía	83
	Anexos	89
	A. Serie de tiempo de los caudales y cobertura nival	89
	B. Datos de entrada del modelo semi-distribuido	90
	C. Forzantes meteorológicos promedio	92
	D. Procesos de nivales por temporada	94
	E. Balance de energía	99
	F. Balance de masa hídrico anual	104
	G. Corrección por elevación Era-Interim	106

Índice de ilustraciones

2.1.	Esquema de los principales forzantes en la hidrología de nieves.	5
2.2.	Mecanismos de transporte de nieve producto del viento.	6
2.3.	Velocidad umbral de transporte de nieves.	7
2.4.	Esquema conceptual del balance energético y másico de SNOBAL	8
2.5.	Esquema del balance de masa del modelo PBSM.	12
2.6.	Probabilidad de ocurrencia del transporte de nieve por viento	12
2.7.	Niveles verticales de Era-Interim	16
3.1.	Ubicación del área de estudio	23
3.2.	Subcuencas de la zona alta del río Copiapó	24
3.3.	Curvas de variación estacional del caudal medio mensual	25
3.4.	Mapa de las estaciones meteorológicas	27
3.5.	Imágenes de sitio de medición La Ollita	28
3.6.	Precipitación y temperatura media mensual de estaciones de la cuenca	30
3.7.	Clasificación de climas Köppen de la región de Atacama	31
3.8.	Curvas hipsométricas de la cuenca alta del río Copiapó	32
3.9.	Imágenes de vegetación en la cuenca	33
3.10.	Principales usos de suelo de la cuenca alta	33
3.11.	Acuíferos de la cuenca del río Copiapó	34
4.1.	Esquema de la disponibilidad de datos por estación	36
4.2.	Mapa de las unidades de respuesta hidrológica del modelo.	37
4.3.	Perfil del río Copiapó y niveles de presión Era-Interim	39
4.4.	Esquema del factor de precipitación	41
4.5.	Análisis de duración y magnitud de tormentas	41
4.6.	Mapa de radiación de onda corta incidente de la cuenca alta	44
4.7.	Esquema del balance de masa total	46
4.8.	Registro de variables meteorológicas	46
5.1.	Serie de temperatura, estación la Ollita y Era-Interim	49
5.2.	Serie de humedad relativa, estación la Ollita vs Era-Interim	49
5.3.	Comparación del viento, estación la Ollita vs Era-Interim	50
5.4.	Precipitación acumulada medida en La Ollita	50
5.5.	Precipitación medida en La Ollita	50
5.6.	Serie de tiempo de equivalente en agua de nieve CRHM y medido en La Ollita	51
5.7.	Comparación SWE modelado CRHM con el medido, La Ollita	51
5.8.	Serie del balance de nieve en La Ollita	53

5.9. Serie acumulada del balance de nieve en La Ollita	53
5.11. Sensibilidad del balance másico de nieve, La Ollita	57
5.12. Serie anual de los procesos nivales acumulados	59
5.13. Serie anual de los porcentajes de procesos nivales acumulados	60
5.14. Serie del equivalente en agua de nieve de la cuenca alta	61
5.15. Serie de cobertura nival de la tres subcuencas	62
5.16. Sensibilidad del balance másico de nieve, Cuenca alta río Copiapó	64
5.17. Sensibilidad del SWE a la T°y Pp en la cuenca alta del río Copiapó	65
5.18. Sensibilidad del SWE al viento en la cuenca alta del río Copiapó	66
5.19. Probabilidad de excedencia de los componentes nivales en Jorquera	68
5.20. Probabilidad de excedencia de los componentes nivales en Manflas	68
5.21. Probabilidad de excedencia de los componentes nivales en Pulido	69
5.22. Mapa de distribución espacial de la sublimación	70
5.23. Mapa de distribución espacial de la evaporación nival	71
5.24. Mapa de distribución espacial del derretimiento	72
5.25. Balance de masa total en cuenca Jorquera	74
5.26. Balance de masa total en cuenca Manflas	74
5.27. Balance de masa total en cuenca Pulido	75
5.28. Volumen acumulado del caudal	76
5.29. Serie de los caudales medios diarios modelados y medidos	77
5.30. Comparación de caudales medidos versus observados	79
A.1. Serie de tiempo de los caudales y la cobertura nival	89
B.1. Serie de tiempo de los forzantes climáticos	91
E.1. Componentes del balance energético medio mensual	99
E.2. Componentes del balance energético acumulado semestral	99
E.3. Serie del balance de energía en Jorquera	100
E.4. Serie del balance de energía en Manflas	101
E.5. Serie del balance de energía en Pulido	102
G.1. Ilustración de gradientes Era-Interim basado en niveles de presión	107

Índice de tablas

2.1. Variables de estado de SNOBAL	10
2.2. Referencias de sublimación dinámica estimada	14
2.3. Proyecciones de temperatura del aire y precipitación del norte de Chile	22
3.1. Estaciones meteorológicas y fluviométricas de la cuenca	26
3.2. Instrumentos de medición instalados en la estación La Ollita.	28
4.1. bandas de elevación para temperatura	39
4.2. Intervalo de duración de tormentas	42
4.3. Puntos representativos Era-Interim de la velocidad del viento.	43
4.4. Escenarios del análisis de sensibilidad	47
5.1. Estadígrafos de las pérdidas por sublimación y evaporación diarias	52
5.2. Probabilidades de excedencia de los procesos nivales por subcuenca	67
5.3. Índices de eficiencias de los modelos de caudal	78
C.1. Promedio espacial semestral de los forzantes en Jorquera	92
C.2. Promedio espacial semestral de los forzantes en Manflas	93
C.3. Promedio espacial semestral de los forzantes en Pulido	93
D.1. Promedio de los componentes del balance másico de nieves en Jorquera	94
D.2. Promedio de los componentes del balance másico de nieves en Manflas	95
D.3. Promedio de los componentes del balance másico de nieves en Pulido	95
E.1. Componentes del balance energético acumulado semestral	103
F.1. Balance de masa anual cuenca Jorquera	104
F.2. Balance de masa anual cuenca Manflas	105
F.3. Balance de masa anual cuenca Pulido	105