

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Motivación.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organización del informe.....	2
2	ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	2
2.1	Modelación hidrológica.....	2
2.2	Modelo hidrológico VIC	4
2.2.1	Generalidades.....	5
2.2.2	Parámetros de entrada no vegetacionales	5
2.2.3	Balance de masa.....	5
2.2.4	Definición de parámetros vegetacionales	11
2.2.5	Utilización de imágenes satelitales Landsat 8 y el modelo de elevación ALOS PALSAR	15
2.2.6	Forzantes meteorológicas	17
3	ANTECEDENTES ZONA DE ESTUDIO.....	18
3.1	Descripción de la zona de estudio	18
3.1.1	Generalidades.....	18
3.1.2	Climatología.....	20
3.1.3	Uso de suelo.....	20
3.2	Información disponible sobre agricultura.....	22
4	METODOLOGÍA.....	26
4.1	Mejora del uso de suelo CB	26
4.2	Determinación parámetros vegetacionales.....	29
4.2.1	Parámetros vegetaciones a partir de imágenes satelitales.....	29
4.2.2	Parámetros vegetaciones a partir de información bibliografía	31
4.3	Variables output empleados en el análisis.....	32
4.4	Análisis de los parámetros vegetacionales.....	33
4.4.1	Primer análisis de sensibilidad general	33
4.4.2	Primer análisis de sensibilidad para <i>LAI</i> y <i>Rmin</i>	34
4.5	Respuesta hidrológica de los cultivos en la zona de estudio.....	34
	Etapa I - Cálculo de la respuesta hidrológica de los cultivos.	35
	Etapa II: Zona óptima de los cultivos.	35

Etapa III: Definición de grupos de cultivos según respuesta hidrológica.....	35
4.6 Escenarios futuros planteados	36
4.6.1 Definición de los criterios para definir los escenarios futuros.....	36
4.6.2 Descripción escenarios futuros.	37
4.6.3 Análisis de resultados de los escenarios planteados.	38
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
5.1 Parámetros vegetacionales del modelo.....	40
5.1.1 Parámetros vegetacionales que varían mensualmente.	40
5.1.2 Parámetros vegetacionales fijos del modelo	42
5.1.3 Análisis de los parámetros vegetacionales del modelo.....	48
5.2 Análisis para determinar fracciones óptimas.....	50
5.2.1 Comparación respuesta hidrológicas de los cultivos para las forzantes históricas ...	50
5.2.2 Comparación respuesta hidrológicas futura de los cultivos según GCM.	52
5.2.3 Definición de grupos de cultivos.	52
5.3 Variación de la demanda según zona geográfica	56
5.3.1 Cambio zonas óptimas por cultivos	57
5.4 Análisis evapotranspiración natural y evapotranspiración potencial	58
5.5 Resultados escenarios futuros	60
5.5.1 Criterio para definición de los escenarios	60
5.5.2 Resultados de los escenarios a nivel anual	66
5.5.3 Resultados escenarios: cambio a nivel estacional.....	70
5.5.4 Análisis de la demanda evapotranspirativa y escorrentía de los escenarios planteados.	73
5.5.5 Balance entre disponibilidad y demanda hídrica total.	76
6 CONCLUSIONES	82
Bibliografía.....	86
Anexos.....	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Parámetros vegetacionales del modelo VIC.....	11
Tabla 2.2: Bandas imágenes satelitales Landsat 8. Fuente: USGS (2020).	16
Tabla 3.1: Porcentaje del cada tipo de uso de suelo, para cuenca del río Rapel. Fuente: (Zhao et al., 2016)	21
Tabla 3.2: Cultivos ordenados según porcentajes cultivos del Censo Agropecuario y Forestal 2007 (NIVEL II).....	23
Tabla 4.1: Porcentaje de cultivo estimado para las 40 clases, para cada subcuenca de la zona de estudio. Fuente: Censo Agropecuario y Forestal 2007 (IDE).....	28
Tabla 4.2: Fuente de imágenes Landsat 8 utilizadas para los grupos de cultivos.....	30
Tabla 5.1: Rmin (Resistencia mínima del follaje): valores y fuentes.	42
Tabla 5.2: Valores de la altura máxima de los cultivos y sus fuentes.....	43
Tabla 5.3: Supuestos fracción de tronco libre de ramas/hojas (parámetro Trunk_ratio).....	44
Tabla 5.4: Root Depth y Root fraction (Profundidad y fracción de raíces por capa): valores y fuentes.	46
Tabla 5.5: Distribución de cultivos aplicado en los escenarios planteados.	61
Tabla 5.6: Características de los escenarios futuros y el CBC, para la subcuenca de Cachapoal (C) y Tinguiririca (T).....	65
Tabla 5.7: Porcentaje de cambio anual en la escorrentía (E), precipitación (P), evapotranspiración (ET) y demanda evapotranspiraría (DE), en cada escenario futuro para la subcuenca de Cachapoal.	67
Tabla 5.8: Porcentaje de cambio anual en la escorrentía (E), precipitación (P), evapotranspiración (ET) y demanda evapotranspiraría (DE), para cada escenario futuro de la subcuenca de Tinguiririca.	69
Tabla 5.9: Estimación consumo anual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Cachapoal, en Mm3 al año.....	77
Tabla 5.10: Estimación consumo anual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Tinguiririca, en Mm3 al año.....	77
Tabla 5.11: Estimación consumo mensual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Tinguiririca, en Mm3 al mes.....	78
Tabla 5.12: Estimación consumo mensual a partir de derechos consuntivos para la subcuenca de Tinguiririca, en Mm3 al mes.....	79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Clasificación de los modelos hidrológicos según resolución especial y complejidad de los procesos. Los números representan modelos hidrológicos: 1-Hidrograma unitario, 2-HBV, 3- SUPERFLEX, 4-FLEX-TOPO, 5-MHM, 6-MHM-TOPO, 7-SWAT, 8-NWS, 9- GR4J, 10- HYPE, 11-VIC, 12- TOPMODEL, 13- CRHM, 14- TACD, 15- WASIM-ETH, 16- DHSVM, 17- MIKE-SHE, 18- PARFLOW, 19- CATFLO, 20- HYDRUS-3D, 21- CATHY y 22- HydroGeoSphere. Fuente: Hrachowitz & Clark (2017).....	4
Figura 2.2: Representación del Modelo VIC. Fuente: https://vic.readthedocs.io/en/master/Overview/ModelOverview/	6
Figura 2.3: Representación del cálculo de la evaporación desde suelos desnudos. Fuente: Liang et al. (1994).	10
Figura 2.4: Diagrama esquemático del transporte de nanoparticulas en la estructura de la planta de una sandía. Fuente: Wang et al., (2013).....	12
Figura 2.5: Gráfico evolución de la resistencia estomática mínima en el Aloe vera durante un periodo de 24 hrs. (7/11/2003). Las técnicas de cultivo y modos de riego son: T1 (acolchado plástico sin	

déficit hídrico), T2 (acolchado plástico con déficit hídrico), T3 (sombra sin déficit hídrico), T4 (sombra con déficit hídrico), T5 (sin cobertura plástica ni déficit hídrico) y T6 (sin cobertura plástica con déficit hídrico). Fuente: (Gil-Marín et al., 2006).	13
Figura 2.6: Relación rugosidad (Ro) y desplazamiento (d) de árboles. Fuente: Stull, R. B. (1999).	14
Figura 2.7: Representación de los parámetros Root_depth y Root_fraction en cada capa.	15
Figura 2.8: Ejemplo Imagen satelital Landsat 8- índice NDVI para la zona de la cuenca del río Rapel (Fecha: 2/02/2018).	16
Figura 2.9: (a) Emisiones de CO2 acumuladas para el periodo 2012-2100. Fuente: IPCC (2013) página 25, Cuadro RRP.3. (b) Cambio de temperatura de los escenarios climáticos. Fuente: IPCC (2013) página 19, figura RRP.7	17
Figura 3.1: Identificación zona de estudio. Se exponen los ríos y las cotas de terreno. Fuente DEM: ASF DAAC (2019); © JAXA/METI 2011.....	18
Figura 3.2: División comunal de la zona de estudio. Fuente: División político-administrativa (IDE-Chile, Infraestructura de datos geoespaciales de Chile, del Ministerio de Obras Nacionales).....	19
Figura 3.3: Precipitación y temperatura media mensual (1979-2016) para ambas subcuencas. Fuente: Datos CR2MET adquiridos desde CAMELS-CL (Álvarez Garreton et al., 2018).....	20
Figura 3.4: Uso de suelo de la Cuenca del Rapel. Fuente: (Zhao et al., 2016).....	21
Figura 3.5: Porcentaje de la clasificación (Nivel I) del Censo Agropecuario y Forestal 2007, para la cuenca de Rapel.....	22
Figura 3.6: Identificación de los catastros en el área de cultivo de Zhao et al. (2016). Fuente catastro frutícola: Odepa, creado por CIREN. Fuente Catastro hortícola: Sistema de Monitoreo hortícola (stmhor) creado por CIREN.	25
Figura 4.1: Diagrama de mejora del caso base (CB) al caso base catastrado (CBC).	27
Figura 4.2: En (A) Se presenta el cálculo del NDVI de la imagen Landsat 8 con fecha 18/05/2018. En (B) se presenta el catastro de vid de mesa del catastro frutícola 2018.....	31
Figura 4.3: Diagrama sobre metodología de análisis de respuesta hidrológica.	34
Figura 4.4: Diagrama definición escenarios futuros.	38
Figura 5.1 Parámetros estimados según imágenes satelitales Landsat 8 – Hortalizas y Anuales.....	40
Figura 5.2 Parámetros estimados según imágenes satelitales Landsat 8 - Frutales y viñedos.....	41
Figura 5.3: 4: Índice de sensibilidad DELSA (Rakovec et al., 2013) aplicado en los parámetros vegetaciones del modelo VIC.	48
Figura 5.4: Sensibilidad en la demanda evapotranspirativa de los parámetros LAI y Rmin.....	49
Figura 5.5: Variación anual de las variables P, E, ET y DE – Balance a nivel de celda correspondiente al promedio entre celdas factibles a cultivar.	50
Figura 5.6: Cociente entre demanda evapotranspirativa y escorrentía. Valores anuales para el set de 40 cultivos.	51
Figura 5.7: Demanda evapotranspirativa /Precipitación. Valores acumulados anuales para el set de 40 cultivos.	51
Figura 5.8: (A) Cambio en la demanda evapotranspirativa para la situación futura con respecto a la histórica. (B) Cambio en la escorrentía para la situación futura con respecto a la histórica.....	52
Figura 5.9: Demanda evapotranspirativa en (A) y escorrentía anual en (B) de los 40 cultivos estudiados.	53
Figura 5.10: En (A) el índice de aridez (P/PET) y en (B) la fracción de la demanda evapotranpirativa sobre la escorrentía (DE/E), para los 40 cultivos estudiados.	54
Figura 5.11: Demanda evapotranspirativa anual por celda en periodo histórico (paleta de color amarillo-verde) y el cambio en el periodo futuro con respecto al valor histórico, para los cuatros GCMs (en rojo los aumentos y en azul las reducciones).	56

Figura 5.12: Ubicación óptima para el periodo histórico como para los cuatro GCMs del periodo futuro. En verde se indican las celdas óptimas, en rojo las celdas que dejan de ser óptimas en el futuro y en azul, las que se vuelven óptimas en el futuro.	57
Figura 5.13: Análisis de la relación ET y PET en el modelo VIC.	58
Figura 5.14: Ubicación óptima hortalizas y anuales - Periodo futuro (2015-2059), zona común de los cuatro GCMs.	62
Figura 5.15: Ubicación óptima frutales y viñedos- Periodo futuro (2015-2059), zona común de los cuatro GCMs.	63
Figura 5.16: Mapa que muestra la pendiente del terreno de la zona de estudio. La pendiente es calculada en grados. Fuente: ASF DAAC 2014; Incluye material de © JAXA/METI 2007.	64
Figura 5.17: Para cada subcuenca se presenta en (A) la climatología , en (B) el cambio en el periodo (2015-2039) con respecto al periodo histórico y en (C) el cambio en el periodo (2040-2059) con respecto al promedio del periodo histórico. La sombra representa los valores de cada año del periodo respectivo.	71
Figura 5.18: Volumen de escorrentía (en Mm ³), en cada periodo. Y en el interior de las barras se presenta el porcentaje de cambio la escorrentía futura respecto al periodo histórico (1985-2015).	73
Figura 5.19: Demanda evapotranspirativa futura acumulada mensual para cada escenario. Donde en línea continua se representa el valor promedio en el periodo (2015-2039) y como punto se presenta el valor promedio en el periodo (2040-2059).	74
Figura 5.20: Demanda evapotranspirativa de cada escenario futuro de la subcuenca Cachapoal.	75
Figura 5.21: Demanda evapotranspirativa de cada escenario futuro de la subcuenca Tinguiririca.	76
Figura 5.22: Balance entre escorrentía disponible y demanda hídrica total superficial para la cuenca del Cachapoal.	80
Figura 5.23: Balance entre escorrentía disponible y demanda hídrica total superficial para la cuenca del Tinguiririca.	81