



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

ANÁLISIS DE LOS FORZANTES ANTROPOGÉNICOS Y CLIMÁTICOS EN LA REDUCCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO COPIAPÓ UTILIZANDO PRODUCTOS SATELITALES

Abel Gustavo González Estay

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGÍSTER EN GEOFÍSICA

Profesor guía: Dr. Andrés Sepúlveda

Co-guía: Dr. Cristian Mattar

Comisión evaluadora:

Dr. Martin Jacques – Dra. Lucía Scaff – Dr. Rodrigo Fuster



Concepción, Chile 2023

A mis padres, Patricia y Darío, por su apoyo incondicional

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis agradecimientos al programa de Magíster en Geofísica de la Universidad de Concepción por permitirme desarrollar este trabajo de investigación y también a la Dirección de Postgrado de la misma institución, por la Beca de Postgrado.

Sin duda la distancia física y la pandemia hicieron que este proceso no estuviera exento de dificultades. Es por esto que agradezco el apoyo constante de los académicos y funcionarios del programa, especialmente a su directora, Dra. Carolina Parada, y su secretaria, Carla Espinoza. Por otro lado, el desarrollo de mi tesis no pudo ser posible sin el enorme apoyo y enseñanza dada por mi profesor guía, Dr. Andrés Sepúlveda, y co-guía, Dr. Cristian Mattar. Quiero mencionar especialmente al docente Dr. Aldo Montecinos, que a través de sus clases y conversaciones me entregaron conocimientos valiosos sobre Climatología, no solo porque es un tema relevante para este trabajo, sino porque también ha despertado un gran interés por mi parte sobre esta disciplina.

Finalmente quiero agradecer a todas las personas cercanas que de alguna forma contribuyeron a alcanzar mi objetivo de realizar este postgrado. A mi familia y amigos de toda la vida en Antofagasta y también a aquellos que fui conociendo en este camino y quienes hicieron más amable mi estadía en la ciudad de Concepción.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	9
1.1 Contexto general	9
1.2 Área de estudio.....	11
1.2.1 Clima	14
1.2.2 Geomorfología.....	17
1.2.3 Recursos hídricos	19
1.3 Motivación del estudio	23
1.4 Planteamiento del problema	24
1.5 Objetivo General.....	25
1.6 Objetivos Específicos	25
1.7 Hipótesis.....	25
1.8 Marco conceptual	26
1.8.1 Evapotranspiración.....	26
1.8.2 Equivalente de agua en la nieve.....	27
1.8.3 Extracción de agua.....	28
CAPITULO 2: MANUSCRITO CIENTÍFICO.....	30
2.1 Resumen	30
2.2 Abstract.....	31
2.3 Introducción	32
2.4 Área de estudio.....	33
2.5 Materiales	34
2.5.1 Sensor remoto	34
2.5.2 Demanda hídrica	34
2.6 Metodología	35
2.6.1 Estimación de SWE.....	35
2.6.2 Obtención de la cantidad de agua utilizada para la irrigación.....	35
2.6.3 Estimación de ETr	36
2.6.4 Análisis estadístico de las series de tiempo	36
2.7 Resultados.....	37
2.8 Discusión	37
2.9 Conclusión	39
2.10 Figuras.....	41

2.11 Tablas	46
CAPITULO 3: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	48
3.1 Discusión	48
3.1.1 Cambios en la tasa de ETr anual	48
3.1.2 Efectos de la variabilidad climática en la reducción de agua	49
3.1.3 Efectos de las actividades socioeconómicas en la reducción de agua	51
3.2 Conclusión	54
REFERENCIAS	55
ANEXOS	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Imágenes utilizadas para la obtención de área de cultivos. Se seleccionaron escenas libres de nubosidad y obtenidas en verano para capturar la máxima irrigación. La escena utilizada para el año 2013 fue obtenida en mayo debido a que Landsat 8 comenzó a recopilar imágenes en marzo de ese año. No hay escena del año 2012 debido a que Landsat 5 y Landsat 8 no producían imágenes en ese periodo y Landsat 7 presentaba problemas en sus productos.	46
Tabla 2.2. Registro de la demanda hídrica anual del sector minero de la cuenca del río Copiapó. (Fuente: HIDRICA CONSULTORES SPA, 2018).	46
Tabla 2.3. Proporción de la superficie agrícola por tipo de cultivo (DICTUC, 2010) y estimación de agua para riego por cultivo en la cuenca del río Copiapó (U de Chile, 2016). Para este trabajo, el riego de tomate fue considerado como la cantidad de agua utilizada para el riego de hortalizas.	47
Tabla 2.4. Estimación de correlación de Pearson.	47
Tabla 3.1. Datos de temperatura media y precipitación total por temporada entre 2004/05 – 2021/22. Los datos fueron obtenidos desde la estación Desierto de Atacama de la Dirección Meteorológica de Chile (https://climatologia.meteochile.gob.cl/). Es importante mencionar que esta estación comienza a recopilar datos desde febrero de 2005, por lo tanto, los valores correspondientes a la temporada 2004/05 es incompleta.	50

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.1. Ubicación de la cuenca del río Copiapó delimitada por la línea roja. También se muestran las principales localidades de la Región de Atacama, el Embalse Lautaro y los principales ríos de la cuenca.	13
Figura 1.2. (Modificado de Juliá et al., 2008). Tipos de climas de la Región de Atacama según clasificación de Köppen (1948).	16
Figura 1.3. Relieve de la cuenca del Río Copiapó (delimitado por la línea roja). La figura presenta el Río Copiapó y sus principales tributarios: Río Jorquera, Río Pulido y Río Manflas. También se muestran las principales localidades y el Embalse Lautaro.	18
Figura 1.4. (Figura de Rinaudo & Donoso, 2019). Cambios en el almacenamiento de agua subterránea entre la estación La Puerta y Angostura.	23
Figura 2.1. Delimitación de la cuenca del río Copiapó y ubicación de la ciudad de Copiapó.	41
Figura 2.2. Series de datos de ET MOD16A2 de MODIS para el periodo comprendido entre 6 de septiembre de 2001 y 29 de agosto de 2022. Cada columna muestra el valor de ET promedio [mm] para cada imagen de la serie.	41
Figura 2.3. Series de datos de cobertura de nieve MOD10A2 de MODIS para el periodo comprendido entre 1 de enero de 2001 y 31 de diciembre de 2021. Cada columna muestra el valor de superficie cubierta de nieve [ha] para cada imagen de la serie.	42
Figura 2.4. SWE mínimo estimado para el otoño, invierno y total (otoño + invierno) entre 2001-2021. Las estimaciones se realizaron considerando el área promedio de la cobertura de nieve ocurrida durante la estación para las series de otoño e invierno, y el área promedio de la cobertura de nieve durante el otoño e invierno para la serie total. Se utilizaron los valores mínimos de altura y densidad de la nieve obteniendo los valores mínimos de SWE.	42
Figura 2.5. SWE máximo estimado para el otoño, invierno y total (otoño + invierno) entre 2001-2021. Las estimaciones se realizaron considerando el área promedio de la cobertura de nieve ocurrida durante la estación para las series de otoño e invierno, y el área promedio de la cobertura de nieve durante el otoño e invierno para la serie total. Se utilizaron los valores máximos de altura y densidad de la nieve obteniendo los valores máximos de SWE.	43
Figura 2.6. Irrigación total anual en el periodo 2001/02-2021/22. Para la estimación de la irrigación fueron considerados los cambios superficiales de los cultivos capturados desde imágenes de Landsat. La proporción de tipos de cultivos y la cantidad de agua utilizada para cada cultivo fue obtenido desde	

DICTUC (2010) y del Informe “Eficiencia Hídrica en la Región de Atacama” de la Universidad de Chile (2016). Se asume una proporción y cantidad de riego constante durante el periodo de estudio. La serie no contiene datos del año 2012 debido a que no hay imágenes de Landsat-5 y Landsat-8 para ese periodo y Landsat-7 presentaba problemas en sus productos.	44
Figura 2.7. Evapotranspiración real anual para el periodo entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. La estimación anual se inicia en el mes de septiembre hasta agosto del año siguiente. Cada valor corresponde a la suma total de agua evapotranspirada de toda la superficie cubierta de vegetación.	45
Figura 3.1. Serie de tiempo de la tasa de irrigación máxima y mínima estimada (líneas naranja y verde, respectivamente) entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. La línea negra representa la serie de tiempo de ETr. Las rectas de puntos representan la línea de tendencia de cada serie. Se muestra la tendencia (S) para cada serie y correlación de Pearson (r).	51
Figura 3.2. Serie de tiempo de consumo de agua del sector minero (línea naranja) para temporadas 2001/02 y 2021/22. La línea negra representa la serie de tiempo de ETr. Las rectas de puntos representan la línea de tendencia de cada serie. Se muestra la tendencia (S) para cada serie y correlación de Pearson (r).	53
Figura A.1. Evapotranspiración por temporada. Cada pixel contiene el valor de ETr total anual entre el 01 de septiembre y 31 de agosto.....	62
Figura A.2. Cobertura de nieve por temporada (Total).	68
Figura A.3. Cobertura de nieve por temporada (Otoño).....	74
Figura A.4. Cobertura de nieve por temporada (Invierno).....	80
Figura A.5. Cobertura de vegetación por temporada. Los valores de NDVI igual o mayor a 0,2 fue considerado como superficie cubierta de vegetación.....	86

RESUMEN

En los últimos años Chile ha enfrentado una crisis hídrica como consecuencia de una excesiva extracción de agua y por la Megasequía. Debido a los efectos negativos que puede generar el déficit de este recurso en el medio ambiente y en la población, es necesario mejorar nuestro entendimiento sobre la influencia de los distintos factores que causan una reducción de agua. El objetivo de este trabajo es analizar las implicancias de los forzantes climáticos y antropogénicos en la reducción de agua en la Cuenca del Río Copiapó entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. Este estudio propone la utilización de la teledetección como fuente de información para analizar los factores que influyen en el déficit hídrico del área de estudio. En ambientes áridos, la tasa de evapotranspiración real (ETr) se convierte en una variable importante en el balance hídrico. Por lo tanto, este trabajo analiza la cantidad de agua que pierde la cuenca mediante los cambios en la tasa de ETr utilizando imágenes satelitales MOD16a2 de MODIS. Para analizar el forzante antropogénico se consideran los dos principales actividades demandantes de agua en el área de estudio: la agricultura y minería. Debido a que la información respecto a la extracción de agua para la agricultura es escasa, se utilizan imágenes Landsat para estimar los cambios en la superficie de cultivos y convertir estas variaciones en unidades de agua para irrigación. Para evaluar el forzante climático, se consideran los cambios en la cobertura de nieve que eventualmente suministran agua a la cuenca. Para ello, se utilizan imágenes MOD10a2 de MODIS que permiten medir los cambios de la superficie cubierta de nieve. Finalmente, con la serie de datos de ETr y los forzantes climáticos y antropogénicos se analizan estadísticamente sus cambios temporales y la correlación existentes entre estas variables. Los resultados muestran una reducción significativa de agua hasta la temporada 2015/16. Mediante análisis de correlación, se encontró una importante relación entre esta reducción y el consumo, particularmente del sector minero. Esto sugiere que el forzante antrópico influye más que el clima en el déficit hídrico presente en el área de estudio. Un mejor monitoreo de la extracción de agua ayudará a identificar de mejor manera sus efectos en la disponibilidad hídrica.

ABSTRACT

In recent years, Chile has faced a water crisis as a result of excessive extraction and the Megadrought. Due to the negative effects that water deficit can generate on the environment and the population, it is necessary to improve our understanding of the influence of different factors that cause water reduction. The objective of this study is to analyze the implications of climatic and anthropogenic drivers on water reduction in the Copiapó River Basin between 2001/02 - 2021/22 seasons. This study proposes the use of remote sensing as a source of information to analyze the factors that influence the water deficit in the study area. In arid environments, actual evapotranspiration rate (ET_r) becomes an important variable in the water balance. Therefore, this work analyzes the amount of water lost by the basin through changes in the ET_r rate using MOD16a2 from MODIS satellite images. To analyze the anthropogenic driver, the two main water demand sectors in the study area are considered: agriculture and mining. Due to limited information regarding water extraction for agriculture, Landsat images are used to estimate changes in crop surfaces and convert these variations into irrigation water units. To assess the climatic driver, changes in snow cover that eventually supplies water to the basin are considered. MOD10a2 from MODIS images are used to measure changes in the snow-covered surface. Finally, with the ET_r data series and the climatic and anthropogenic drivers, their temporal changes and existing correlations are statistically analyzed. The results show a significant reduction in water until the 2015/16 season. Through correlation analysis, a significant relationship was found between this reduction and consumption, particularly mining sector. This suggests that the anthropogenic driver has a greater influence than climate on the water deficit present in the study area. Better monitoring of water extraction will help identify its effects on water availability more accurate

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto general

El agua es considerada un recurso estratégico para el desarrollo sostenible de un país, siendo un factor importante en su progreso económico, social y medioambiental. El monitoreo de los recursos hídricos es importante para optimizar su uso y gestión, especialmente en zonas donde su presencia escasea. En Chile esto adquiere mayor relevancia debido a que la demanda de agua ha aumentado como consecuencia del crecimiento económico y demográfico. Además, en los últimos años una sequía sin precedente en su magnitud ha reducido la disponibilidad de agua (CR2, 2015).

Desde el 2010, una disminución de las precipitaciones ha estado afectando principalmente a la zona central de Chile, provocando déficit anual de precipitación de manera ininterrumpida hasta la actualidad, lo que ha sido ampliamente estudiado debido a su inusual duración e intensidad (Boisier et al., 2016; CR2, 2015; Garreaud et al., 2020). Esta prolongada sequía ha provocado una reducción de los reservorios de agua, niveles de agua subterránea y escorrentías superficiales, como consecuencia de la disminución de la cobertura de nieve en los Andes que cumple un rol importante como fuente de agua dulce.

La disminución de la cobertura de nieve en los Andes ha sido evidenciada en los últimos años por distintos trabajos. Saavedra et al. (2018) estimó un alza de la línea de nieve del orden de 10-30 m/año y una disminución de la duración de la cobertura de nieve para los Andes al sur de los 30°S, en el periodo comprendido entre 2000-2016, mientras que Malmros et al. (2018) evidenció una tendencia decreciente tanto en la extensión como en la duración de la cobertura de nieve para el mismo periodo. Debido a la importancia de la cobertura de nieve en los Andes como fuente de agua para regiones altamente pobladas y con actividades económicas que dependen de este recurso, la continua reducción de agua podría estar provocando consecuencias negativas para el país. En efecto, se ha evidenciado una reducción de agua en el norte chico y zona central,

especialmente en las regiones áridas y semi-áridas al norte de la región Metropolitana (FCh., 2018).

La marcada tendencia decreciente de la precipitación a menor latitud y una mayor concentración de la población han provocado en las regiones del norte chico y central un déficit hídrico que ha generado conflictos sociales y problemas en la productividad agrícola, una de las principales actividades económicas de la zona. Según el informe de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA, 2017), entre las regiones de Atacama y Metropolitana hay un déficit de agua superficial para irrigación de cultivos lo que ha impulsado la extracción de agua subterránea para cubrir en parte ese déficit. Actualmente, el uso de agua subterránea es una fuente importante de este recurso para la actividad agrícola (Donoso, 2021).

En el informe “Radiografía hídrica de Chile” (FCh, 2018) se recopilieron datos de la oferta y demanda de agua y midieron la Brecha Hídrica de cada cuenca analizada. La Brecha Hídrica es estimada a partir del Índice de escasez hídrico el cual es definido como la relación entre la demanda de agua del conjunto de actividades socioeconómicas y la oferta hídrica disponible en las fuentes abastecedoras (FCh, 2018). Según este estudio, todas las cuencas con una brecha hídrica alta (existencia de una fuerte presión sobre el recurso hídrico) están localizadas en las regiones de Atacama, Coquimbo, Valparaíso y Metropolitana. Este informe revela la vulnerabilidad del sector agrícola debido a la limitada disponibilidad de oferta de agua.

Actualmente, si bien ha habido mayor eficiencia en el uso de agua para el sector agrícola, esto no se ha traducido en una reducción de su consumo debido a que ha habido un aumento de las superficies irrigadas (Donoso, 2021). Con respecto al estado del agua subterránea, en la actualidad muchos acuíferos en Chile están bajo estrés considerable debido a que la extracción, predominantemente para uso agrícola, supera a la recarga natural (Donoso et al., 2020). Por otro lado, si bien en estas regiones la demanda de agua del sector minero es reducida en comparación al sector agrícola, también han mostrado un aumento sostenido en el último tiempo.

Según Cochilco (2022), a nivel nacional la extracción de agua para el sector minero aumentó desde 13,36 m³/s en 2012 a 17,57 m³/s en 2021. A nivel regional,

la demanda de agua del sector minero representa una proporción importante en las regiones del norte, siendo 54% y 57% en Tarapacá y Antofagasta, seguido por Atacama y Coquimbo, representando el 20% y 8% del consumo total, respectivamente (Cochilco, 2022). Es justamente en estas últimas regiones donde se presenta la mayor criticidad para el sector minero, considerando que compiten por el uso de agua con el sector agrícola. Las cuencas que presentan riesgo para el sector minero son: Río Los Choros, Río Salado y Río Copiapó (FCh, 2018). A pesar de la importancia que tiene el consumo de agua en cuencas donde el recurso hídrico escasea por su clima inherente y exacerbado por la sequía, datos sobre la tasa de extracción de agua no son suficientes para monitorear adecuadamente el déficit hídrico.

El catastro de extracción y consumo de agua es llevado a cabo por diferentes entidades públicas y privadas, destacando la Dirección General de Aguas (DGA). Si bien la DGA presentó el Balance Hídrico de Chile en 2017 y que actualmente está preparando una nueva actualización, los datos respecto a la extracción de agua y asignación de derechos de agua superficial y subterránea sigue siendo limitado (Donoso, 2021). Por lo tanto, un mejoramiento en el monitoreo de recursos hídricos es necesario, considerando la evidencia de una sostenida reducción de agua.

Teniendo en vista todos estos antecedentes, este trabajo considera las regiones áridas y semi-áridas del norte de Chile como un área de interés para estudiar los efectos de la disminución de las precipitaciones, el aumento de la evapotranspiración y el consumo hídrico sobre la disponibilidad de agua. La utilización de productos satelitales en la observación de procesos hidrológicos a gran escala temporal y espacial ha sido ventajoso, especialmente cuando los datos en terreno escasean. Por lo tanto, utilizando estos productos se analizará las implicancias de factores climáticos y antropogénicos en el estrés hídrico de la cuenca del río Copiapó, una cuenca árida localizada en la región de Atacama donde la actividad agrícola y minera compiten por la escasa disponibilidad de agua.

1.2 Área de estudio

La cuenca del río Copiapó está localizada en la región de Atacama, norte de Chile, entre los 27° y 29° de latitud sur y entre 69° y 71° de longitud oeste. Está delimitada por la cordillera de los Andes hacia el este, por el océano Pacífico por el oeste y por las cuencas del río Salado y río Huasco por el norte y sur, respectivamente (Figura 1.1). Su superficie es de aproximadamente 18.400 km² e incluye parte de las comunas de Tierra Amarilla, Copiapó y Caldera.

La cuenca se ubica en el desierto de Atacama y tiene un clima árido (Juliá et al., 2008), con un promedio anual de precipitación de 28 mm y temperatura media anual de 15,2° C en su parte central. El principal afluente superficial es el río Copiapó, que tiene una longitud de 162 km y se origina a una elevación de 1.230 msnm donde convergen los ríos Manflas, Jorquera y Pulido. El flujo máximo de la escorrentía superficial alcanza hasta 9,9 m³/s (Suárez et al., 2014), y ocurre en los meses de verano (diciembre-enero-febrero) debido al derretimiento de la nieve en los Andes (Houston, 2006b), mientras que el flujo promedio (2,4 m³/s) es controlado por el embalse Lautaro (Rinaudo & Donoso, 2019), el cual está localizado en la cabecera del río Copiapó. Los principales centros urbanos son la ciudad de Copiapó, sobre 150.000 habitantes, Tierra Amarilla con cerca de 14.000 y los Loros, con un poco más de 1.000 habitantes (INE, 2017).

Las principales actividades económicas de la zona son la agricultura y minería. El área de cultivos se ha expandido considerablemente en las últimas décadas alcanzando cerca de 15.000 ha en 2015 (Rinaudo & Donoso, 2019). La actividad agrícola se concentra principalmente en la depresión central y parte occidental de la cuenca, siguiendo el trayecto del río Copiapó. Con respecto a la minería, las principales faenas mineras se localizan hacia la parte central y oriental de la cuenca, donde predomina la extracción de metales como el cobre y en menor medida, plata y oro (Mcfarlane & Norgate, 2012). La agricultura junto con la minería comprenden sobre el 80% del consumo total de agua en la cuenca del río Copiapó, seguido por la demanda de agua potable (10%). La extracción de agua incluye pozos de agua subterránea y uso de escorrentías superficiales.

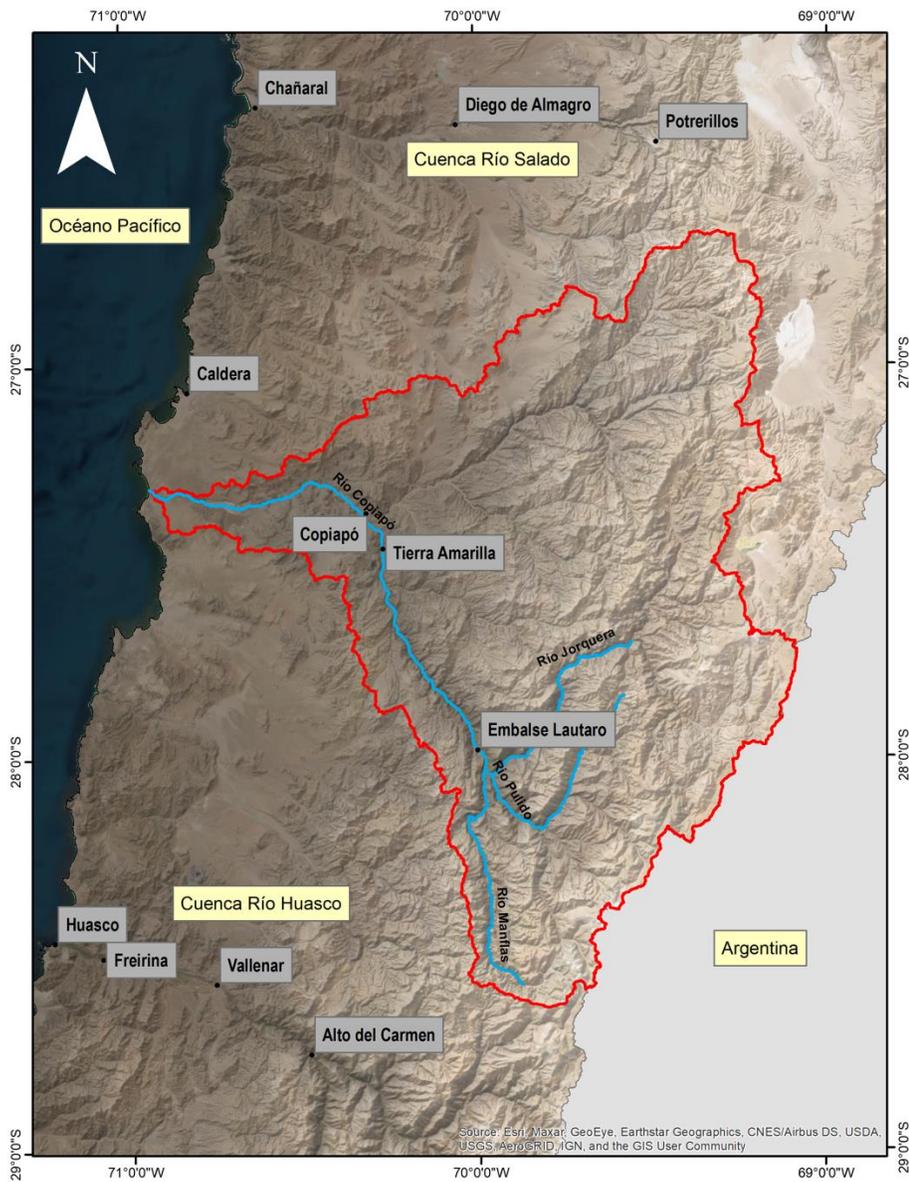


Figura 1.1. Ubicación de la cuenca del río Copiapó delimitada por la línea roja. También se muestran las principales localidades de la Región de Atacama, el Embalse Lautaro y los principales ríos de la cuenca.

1.2.1 Clima

La cuenca del río Copiapó se ubica en la región de Atacama, región caracterizada por un clima árido que separa la zona de hiper-aridez de la región de Antofagasta por el norte con el clima mediterráneo de la región de Coquimbo por el sur (Juliá et al., 2008). En la región de Atacama el Anticiclón Subtropical del Pacífico Sur (ASPS) es uno de los principales rasgos climáticos de la zona. El cinturón de vientos alisios provenientes de la vertiente amazónica de Sudamérica y el cinturón de vientos del oeste que transporta sistemas frontales desde el suroeste, contribuyen a la precipitación estival e invernal, respectivamente (Juliá et al., 2008). Junto con ASPS, la corriente fría de Humboldt y la Cordillera de los Andes son los causantes de las escasas precipitaciones a estas latitudes (Garreaud et al., 2009). Estos factores se combinan para originar una variedad de subtipos climáticos que se distribuyen longitudinalmente a través de la región de Atacama (Juliá et al., 2008) (Figura 1.2). Siguiendo la clasificación de clima propuesto por Köppen (1948), en la cuenca del río Copiapó hay cuatro subtipos, distribuidos de oeste a este:

Desierto costero con nubosidad abundante (BWn): Este clima es el que predomina en la zona costera de la región de Atacama y se caracteriza por la abundante nubosidad matinal que habitualmente penetra hacia el interior del valle de Copiapó. Esta nubosidad corresponde a estratocúmulos de algunos cientos de metros de espesor originados dentro de una capa de aire frío en contacto con la superficie del mar, alcanzando unos 1.000 m de altitud. La nubosidad predomina a lo largo del año en la costa y genera frecuentemente niebla nocturna, presentando un ambiente con una humedad relativa anual de 74% (Julia et al., 2008). Esta característica hace de las neblinas una fuente importante de agua para la vegetación presente en la Cordillera de la Costa (Squeo et al., 2004).

Clima desértico transicional (BWt): Se localiza en la depresión central de la cuenca hasta una elevación aproximada de 1.200-1.500 msnm (Juliá et al., 2008). Sus principales características son la mayor aridez y amplitud del ciclo diurno de temperaturas y una menor presencia de nubosidad. Esta zona está marcada por una mayor transparencia de la atmósfera, como consecuencia de la menor humedad relativa en el aire. La ciudad de Copiapó se localiza dentro de esta franja y tiene un promedio de temperatura anual de 15,7°C con un promedio

mensual que va desde 11°-17° C en los meses de abril a noviembre hasta alcanzar 18°-20,5°C en los meses de verano.

Clima desierto frío de montaña (Bwk'G): Se ubica sobre los 1.200 - 1.500 msnm y hasta aproximadamente los 4.000 msnm presentando un clima seco y frío. El predominio de los días despejados junto con la mayor transparencia de aire por la menor humedad relativa produce una mayor amplitud de temperaturas entre el día y la noche (Julia et al., 2008). Potrerillos (2.850 msnm) tiene una temperatura media anual de 11,2° C, con medias mensuales que van desde 8°C en junio a 13,7° C en enero y una humedad relativa del aire que promedia 39% anual.

Clima de tundra de alta montaña (EB): Sobre los 4.000 msnm aproximadamente, predomina un clima de tundra de alta montaña, caracterizado por bajas temperaturas y donde se combinan rasgos desérticos con los del clima polar (Köppen, 1948). En las cumbres más altas prevalece la precipitación sólida alcanzando incluso los 250 mm anuales producto de tormentas en los meses de invierno. La presencia de nieve permite el desarrollo de escorrentías superficiales y la recarga de acuíferos durante gran parte del año. Las temperaturas son bajas y la amplitud térmica diurna es alta. Las temperaturas medias mensuales varían desde 3,5° C en enero hasta -6,3° C en julio (Juliá et al., 2008).

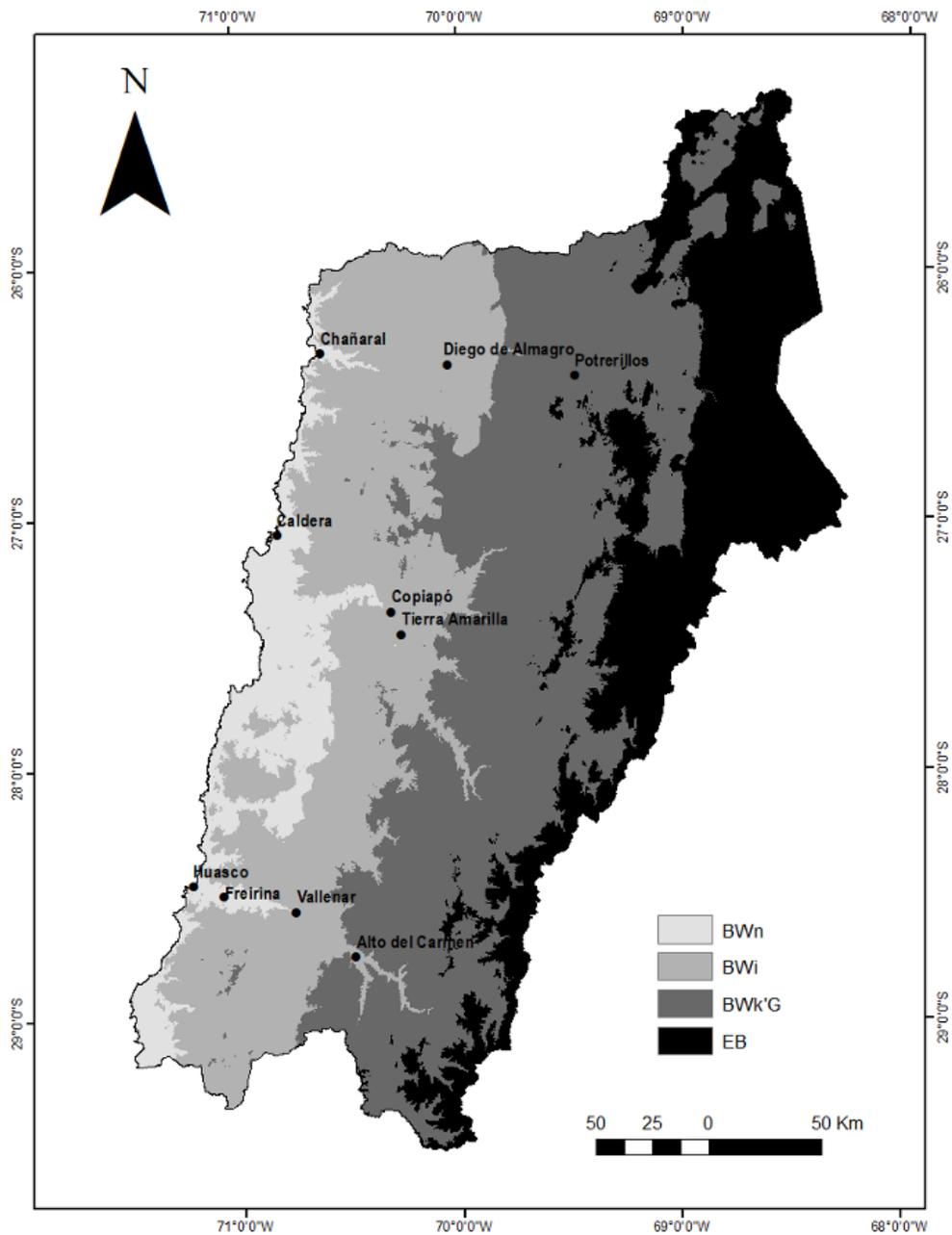


Figura 1.2. (Modificado de Juliá et al., 2008). Tipos de climas de la Región de Atacama según clasificación de Köppen (1948).

1.2.2 Geomorfología

La cuenca presenta tres principales unidades fisiográficas organizadas de este a oeste: Cordillera de los Andes, Valles Transversales y la Cordillera de la Costa (Figura 1.3). En general, estos rasgos muestran un relieve irregular y accidentado con cambios abruptos en la elevación. En el informe “Cuenca del Río Copiapó” (DGA, 2004) se describen estas unidades:

Cordillera de los Andes: En la cuenca del río Copiapó, la Cordillera de los Andes representan las mayores elevaciones del relieve, destacando el cerro Piuquenes (5.591 msnm), cerro Cárdenas (4.280 msnm) y cerro Estancilla (3.556 msnm) localizados en las subcuencas del río Manflas, río Jorquera y río Pulido, respectivamente. Esta unidad abarca la parte oriental de la cuenca.

Valles Transversales: El principal afluente superficial de la cuenca es el río Copiapó, cuyo cauce sigue los valles transversales de la cuenca. Desde su nacimiento en la unión de los ríos Jorquera, Pulido y Manflas, el río Copiapó sigue una orientación norponiente hasta su desembocadura en el océano Pacífico. En sus primeros kilómetros hasta el embalse Lautaro, su cauce presenta un escurrimiento recto delimitado por un valle estrecho y escarpado. Desde Lautaro hasta el sector de Paipote (al este de la ciudad de Copiapó) el río sigue un curso recto recorriendo un valle central con terrazas fluviales de mayor amplitud. Las elevaciones del valle van desde 2.700 a 900 msnm aproximadamente.

Cordillera de la Costa: Comprende el tramo final del río Copiapó hasta su desembocadura en la parte occidental de la cuenca. Las alturas más significativas corresponden a las del cerro Bramador (1.172 msnm), Tía Ramos (1.076 msnm) y Chancoquín (1.020 msnm). Las terrazas fluviales del valle son más extensas en este tramo con amplitudes que van de 5 a 11 km.

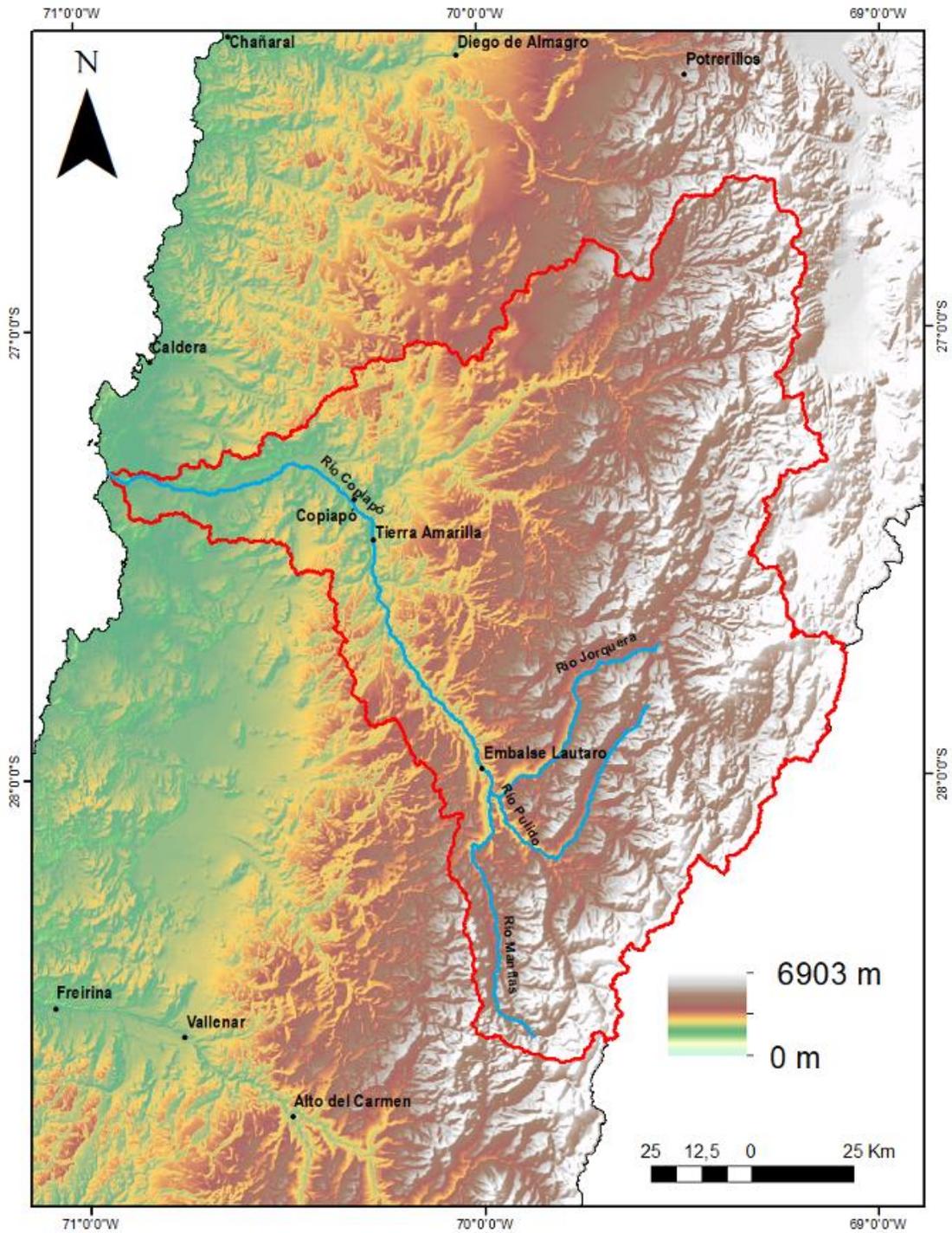


Figura 1.3. Relieve de la cuenca del Río Copiapó (delimitado por la línea roja). La figura presenta el Río Copiapó y sus principales tributarios: Río Jorquera, Río

Pulido y Río Manflas. También se muestran las principales localidades y el Embalse Lautaro.

1.2.3 Recursos hídricos

Durante las últimas décadas la cuenca del río Copiapó ha estado bajo una severa escasez de agua (Rinaudo & Donoso, 2019). Se estima que la extracción de agua para la agricultura y minería, junto con los requerimientos de agua potable, superan el reabastecimiento natural (HIDROMAS CEF, 2013). Este aporte natural proviene principalmente del derretimiento de la nieve, debido a que la tasa de precipitación en forma de lluvia y flujo superficial es baja por efecto del clima árido de la zona. Como consecuencia de lo anterior, han habido evidencias de una disminución de la disponibilidad de agua a través de una reducción de los niveles piezométricos y del caudal del río Copiapó en la parte baja de la cuenca. Esta reducción no solo ha aumentado en los últimos años, sino que continuará en las próximas décadas a medida que la actividad agrícola y minera siga desarrollando nuevos proyectos y la tasa de crecimiento de la población se mantenga (COCHILCO, 2018; INE, 2019). A continuación, se presenta una recapitulación de estudios sobre la demanda y oferta de los recursos hídricos del área de estudio.

1.2.3.1 Oferta hídrica

El recurso hídrico de la cuenca proviene principalmente del derretimiento de nieve en la cordillera de los Andes (Rinaudo & Donoso, 2019), lo que representa un aporte estimado de 3.800 – 4.000 l/s (Donoso et al., 2020; Trefry et al., 2012). La principal oferta de agua superficial es el río Copiapó, cuyo cauce sigue el valle principal de la cuenca hasta su desembocadura. Los tributarios del río Copiapó se ubican en la parte oriental de la cuenca y corresponden a los ríos Manflas, Pulido y Jorquera. Río abajo, cercano a la ciudad de Copiapó, el río confluye con la Quebrada de Paipote, aunque generalmente se mantiene seco en su superficie. El caudal promedio del río Copiapó es de 2,4 m³/s y este flujo es regulado por el embalse Lautaro, localizado en la cabecera del río, el cual tiene una capacidad de regulación intra-anual de 25,4 millones de m³ (Rinaudo & Donoso, 2019). El mayor flujo de agua superficial ocurre en los meses de verano

como consecuencia del derretimiento de la nieve en los Andes (Houston, 2006b). A pesar de que el río Copiapó ha sido históricamente la fuente principal de agua para el consumo, es en los acuíferos donde se almacena gran parte del agua proveniente de la nieve.

Desde mediados de los años 1990s, ha habido un decrecimiento en el contenido de agua subterránea en los acuíferos de la parte baja de la cuenca (Rinaudo & Donoso, 2019). La figura 1.4 muestra la serie de tiempo de las fluctuaciones anuales de volumen de agua en acuíferos, donde el año 1974 es tomado como año de referencia con volumen 0. Es posible observar una constante disminución de la capacidad de los reservorios desde el año 1995 (Suárez et al., 2014), y esta disminución aumenta alcanzando mayor magnitud hacia el año 2007, el último año analizado en la serie. La temporalidad de la disminución coincide con el periodo de mayor aumento de hectáreas utilizadas para la agricultura (Rinaudo & Donoso, 2019). La disminución de los niveles de aguas subterráneas tiene implicancias en la escorrentía superficial debido a que genera que la infiltración aumente (McFarlane & Norgate, 2012). Como consecuencia de ello, la disponibilidad hídrica para la irrigación ha tenido que ser optimizada mediante la construcción de canales de concreto que permiten una menor infiltración y así un transporte eficiente del agua.

Según Hidromás CEF (2013), la disminución de agua en los acuíferos continuó entre los años 2005 y 2012 a una tasa de 55 millones m³/año y según proyecciones modelados por McFarlane & Norgate (2012), de no haber cambios en la gestión de recursos hídricos, este descenso continuaría por las próximas décadas. Sin embargo, algunas alternativas que se han estado gestionando desde la década de 2010s, como la obtención de agua mediante técnicas de desalinización de agua de mar, podría significar una atenuación de esta caída (Suárez et al., 2014).

Considerando que el derretimiento de la cobertura de nieve es la principal fuente de agua en la cuenca, sus cambios espaciales en el tiempo pueden afectar en su disponibilidad. En estas latitudes, la variabilidad de la cobertura de nieve está controlada principalmente por ENSO (Saavedra et al., 2018): los años con la presencia del evento del Niño implican una mayor precipitación y acumulación de nieve. Se han realizado estudios sobre la importancia de las características de la

nieve en el suministro de agua para el área de estudio. Por ejemplo, Jara et al. (2021) midió el impacto de las variaciones climáticas en la acumulación de nieve que suministra agua a la cuenca, encontrando que los procesos de ablación por el viento juegan un rol importante en el balance de masa y que la disponibilidad de agua es susceptible a variaciones de la temperatura del aire. La variabilidad climática afecta también a cuerpos de agua localizados en los Andes. Por ejemplo, Alam & Sepúlveda (2022) estudiaron las implicancias de factores antrópicos y climáticos en los cambios superficiales de la laguna Santa Rosa, ubicada en los Andes de la zona, evidenciando que su variabilidad está fuertemente influenciada por la extracción de agua y por eventos climáticos extremos. Pese a que investigaciones sobre glaciares y nieve en los Andes áridos en el norte de Chile no son lo suficientemente abundantes, hay evidencia de que son susceptibles a la variabilidad climática (Gascoin et al., 2013; Réveillet et al., 2020), afectando directamente en la recarga natural de agua en las cuencas de esta zona.

1.2.3.2 Demanda hídrica

En la cuenca del río Copiapó, la agricultura y minería son los principales consumidores de agua. Hasta el año 2020, la proporción de derechos de agua en la zona era 73% agrícola y 12% minera (Donoso et al., 2020). La extracción de agua se concentra principalmente en la parte central y oeste de la cuenca, a través de pozos e infraestructuras hidráulicas que permiten obtener agua subterránea y superficial. En las últimas décadas, la demanda hídrica ha ido aumentando a medida que la actividad agrícola y minera se expande.

Dentro de la cuenca, las áreas cultivables han crecido desde 7.000 ha en los 1990s a cerca de 15.000 ha en 2015 (Rinaudo & Donoso, 2019). Las superficies de cultivos irrigados comprenden principalmente parrones de uva (79%) y olivos (17%) y en menor cantidad hortalizas (Partarrieu et al., 2009). Mientras los parrones de uva se localizan en la parte central del valle, las plantaciones de olivo se concentran en la parte baja de la cuenca. Gran parte de las superficies de cultivos son irrigados, esto constituye el principal consumidor de agua. El informe “Análisis integrado de gestión en cuenca del río Copiapó” (DICTUC, 2010) estimaba unos 12.493 ha de superficies de cultivos irrigados para el año 2010, calculando cerca de 153 millones de metros cúbicos de consumo de agua al año.

Por otro lado, según el trabajo de HIDROMAS CEF (2013) la superficie de cultivos irrigados en el año 2010 alcanzaba 10.139 ha, consumiendo cerca de 124 millones de metros cúbicos de agua al año. Si bien el desarrollo de la agricultura y su demanda por el agua fue potenciado a partir de la construcción del embalse Lautaro en los años 1930s, en las últimas décadas ha habido una importante contribución a partir de la extracción de agua subterránea, subiendo desde 10 millones de metros cúbicos en los 1960s a más de 140 millones de metros cúbicos a mediados de los 1990s (Rinaudo & Donoso, 2019). El aumento del uso de agua subterránea ha permitido suplir en parte el déficit de agua superficial disponible para la irrigación, tendencia que ocurre también en otras cuencas del norte chico (Donoso, 2021).

La minería es la segunda actividad que más demanda de agua en la zona de estudio. Según Donoso et al. (2020), cerca del 12% de los derechos de agua subterránea pertenecen a las compañías mineras, mientras que a nivel regional este sector representa el 20% del consumo total de agua en el año 2021 (Cochilco, 2022). La extracción de agua para la minería se concentra en la parte central del valle a través de pozos de agua. Si bien en el área de estudio el uso de agua para minería es crítico debido a que compiten con otros consumidores (EE.HH., 2018), ha habido un aumento en la demanda a medida que la actividad sigue desarrollando nuevos proyectos y se espera que esta tendencia se mantenga en los próximos años (Cochilco, 2018). Es importante destacar que en la última década ha habido un aumento del uso de agua de mar por parte de las principales compañías mineras de la cuenca (Rinaudo & Donoso, 2019), generando que las técnicas de desalinización reemplacen la extracción de agua subterránea.

Tomando en cuenta los posibles efectos del consumo de agua y la variabilidad de la cobertura de nieve sobre los recursos hídricos de la cuenca del río Copiapó, es necesario tener una mayor comprensión en cómo estos factores pueden estar influyendo en el déficit hídrico. Actualmente, la información respecto a la extracción y uso de recursos hídricos es limitada (Donoso, 2021). Esto impide estimar la magnitud de la reducción de agua y cómo esta se ha acelerado en los últimos años.

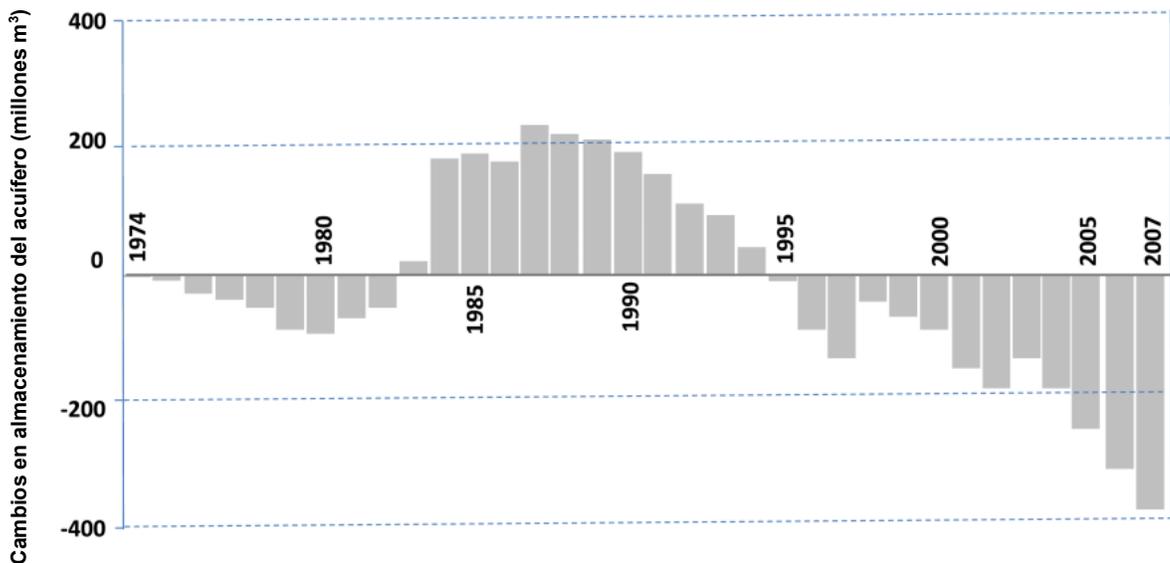


Figura 1.4. (Figura de Rinaudo & Donoso, 2019). Cambios en el almacenamiento de agua subterránea entre la estación La Puerta y Angostura.

1.3 Motivación del estudio

El agua es el recurso natural más esencial para el desarrollo de un país y sus habitantes. Sin embargo, en muchas regiones del mundo, los reservorios de agua subterránea, lagos y ríos están perdiendo su volumen y ponen en riesgo la seguridad hídrica de la humanidad (Fangfang et al., 2023). Esta crisis tiene como causa principal el cambio climático y el consumo insostenible (ODEPA, 2017). Lamentablemente, Chile es uno de los países que ejemplifica los efectos de estos factores en sus recursos hídricos (e.g. CR2, 2015). Una mayor comprensión sobre el estado de los recursos hídricos y su consumo es esencial para enfrentar esta crisis. La necesidad de esta comprensión es la motivación de este trabajo.

La evidencia demuestra que las regiones del norte chico y centro de Chile están siendo afectadas por un déficit hídrico que ha generado conflictos sociales y problemas económicos en las últimas décadas. Esta zona se caracteriza por tener como principales actividades económicas la agricultura y minería, sectores que requieren una gran cantidad de agua para su desarrollo. Además, es una zona donde se concentra una gran cantidad de habitantes que, mientras sigue aumentando, crece la demanda por agua potable. Es por tanto necesario analizar

cómo estos factores han afectado en la disponibilidad de agua en las cuencas de estas regiones.

La cuenca del río Copiapó es un sector donde los factores climáticos y antropogénicos podrían estar acentuando la reducción de agua en los últimos años. La denominada Megasequía (Garreaud et al., 2020) ha estado afectando la zona central del país desde el año 2010 y continúa provocando una presión sobre los recursos hídricos, mientras que la agricultura y minería han mostrado un crecimiento sostenido en las últimas décadas. Sin embargo, los datos disponibles no son suficientes para comprender las implicancias de estos factores en el déficit hídrico que afecta a Copiapó. Entonces, para aportar en el entendimiento de este problema es que este estudio tiene como principal fuente de datos los productos satelitales.

Este trabajo presenta una metodología que utiliza datos de teledetección para evaluar las distintas variables que involucran procesos hidrológicos de una cuenca hidrográfica donde la información en terreno no es lo suficientemente abundante. Finalmente, este trabajo es una contribución al monitoreo y estudios que buscan mejorar la gestión del uso de agua en contextos de escasez.

1.4 Planteamiento del problema

La cuenca del río Copiapó enfrenta desafíos significativos relacionados con la disponibilidad y gestión de recursos hídricos (Suárez et al., 2014). Para un mejor entendimiento de su estado, es esencial abordar los factores que influyen en la disponibilidad de agua. Ellos incluyen el consumo hídrico por parte de los sectores minero y agrícola (Donoso et al., 2020; Rinaudo & Donoso, 2019) y el agua proveniente del derretimiento de la nieve, la principal fuente de este recurso para la cuenca (Rinaudo & Donoso, 2019; Jara et al., 2021). A pesar de la importancia crítica del recurso hídrico, la información disponible de estos factores no es suficiente para evaluar su variabilidad temporal y sus efectos en la reducción de agua para el periodo 2001/02-2021/22.

En particular, es necesario disponer de datos actualizados de: (1) la reducción de agua, (2) la cantidad de agua líquida proveniente del derretimiento de la nieve, y (3) la cantidad de agua consumida por parte de los sectores minero y agrícola.

Es esencial abordar la actualización de estos datos y analizar sus cambios temporales para obtener una visión más precisa y completa de la situación hídrica en la cuenca y, en última instancia, para contribuir en el desarrollo de una gestión más sostenible de los recursos hídricos en la cuenca del río Copiapó.

1.5 Objetivo General

Analizar la relación entre las variables climáticas y antropogénicas en el déficit hídrico de la cuenca del río Copiapó para el periodo comprendido entre las temporadas 2001/02 y 2021/22 mediante la estimación de los cambios de la cobertura de nieve y extracción de agua como variables climáticas y antropogénicas, respectivamente.

1.6 Objetivos Específicos

- Estimar el equivalente de agua en la nieve (SWE) en la cobertura de nieve en los Andes a partir de su acumulación durante tres periodos distintos: el total de la temporada (marzo- agosto), en otoño (marzo- mayo) y en invierno (junio-agosto).
- Estimar la evapotranspiración real anual (ETr) de cada temporada iniciando en el mes de septiembre hasta agosto del siguiente año.
- Obtener una estimación de la cantidad de agua requerida para la irrigación a partir de los cambios espaciales de las superficies de cultivos por temporada.
- Generar una serie de tiempo de la demanda anual de agua para uso de la minería a partir de datos obtenidos por trabajos anteriores.
- Analizar la correlación lineal entre los factores climáticos (cobertura de nieve) y factores antropogénicos (irrigación y minería) con los cambios de ETr para evaluar sus posibles implicancias en la reducción de agua.

1.7 Hipótesis

Para este trabajo, se hipotetiza que la reducción de agua que afecta a la cuenca del río Copiapó se relaciona temporalmente al aumento del consumo de agua por parte de los sectores minero y agrícola.

1.8 Marco conceptual

La disponibilidad de agua depende de la oferta y la demanda que ocurre dentro del sistema y en un intervalo de tiempo determinado. En la cuenca del río Copiapó, la oferta hídrica proviene principalmente del derretimiento de la nieve en los Andes, mientras que la demanda de agua es generada a partir de factores antrópicos y naturales. Los primeros abarcan todo el conjunto de actividades socioeconómicas presentes en la cuenca, mientras que los segundos incluyen las salidas naturales de agua, tal como la salida hacia el mar y la evapotranspiración. Este último elemento cumple un rol clave en el balance hídrico del área de estudio debido a que sus condiciones climáticas generan una alta demanda de agua desde la atmósfera.

En consecuencia, para un correcto análisis de los recursos hídricos, es necesario tomar en cuenta estos elementos considerados fundamentales en la variabilidad de la disponibilidad de agua. Se consideró el *Equivalente de agua en la nieve*, la *Evapotranspiración* y la *Extracción de agua* como componentes utilizados en este trabajo para evaluar la evolución de los recursos hídricos en la cuenca del río Copiapó. A continuación, se entregará una breve definición de estos conceptos y los tipos de datos que serán utilizados para este estudio.

1.8.1 Evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) corresponde al flujo de agua y energía entre la superficie del suelo y la atmósfera a través de la evaporación desde el suelo y a la transpiración de la vegetación. Los flujos evapotranspirativos dependen de la interacción entre factores climáticos (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar, entre otros), las características de la vegetación, propiedades del suelo y su contenido de humedad (Sánchez & Carvacho, 2011). Considerando a ET como la pérdida de agua de la superficie hacia la atmósfera, estos flujos son un elemento esencial en el balance hídrico. A pesar de su importancia en el ciclo hidrológico, es una variable difícil de medir

a escala regional. Por lo tanto, se ha recurrido a productos satelitales que permiten analizarlos en una mayor escala espacial y temporal.

Para estudiar ET se han definido modelos conceptuales que buscan analizar los elementos forzantes de este fenómeno de manera independiente. Tal es el caso de la evapotranspiración potencial (ETP) y la evapotranspiración de referencia (ETo). ETP se define como la tasa máxima posible de evapotranspiración en condiciones óptimas de suelo y vegetación y sin restricción de agua, mientras que ETo es utilizado para estimar la demanda atmosférica de agua, independientemente de las condiciones del suelo (Sánchez & Carvacho, 2011). Para estimar el valor de estos tipos de ET existen diversos métodos aplicados en distintos trabajos que están basados en consideraciones teóricas aerodinámicas, balance de energía y formulaciones empíricas, semi-empíricas y combinaciones de ellas (Castro & Gironás, 2021). Tanto ETP como ETo son definiciones conceptuales para casos idealizados. Normalmente, la tasa de evapotranspiración real (ETr) está por debajo de estos valores, debido a que las condiciones de la cobertura vegetal, tipo y estado del suelo y disponibilidad hídrica muchas veces son lejanas de las ideales.

ETr es el valor de evapotranspiración al momento de hacer la medición y, debido a que depende de las condiciones de la cobertura vegetal, estado del suelo y de la disponibilidad hídrica, generalmente tiene un valor menor a ETP y ETo. Es por esto que, para este trabajo, ETr será estimado con el objetivo de ver los cambios relativos de la disponibilidad hídrica en la superficie del área de estudio. La obtención de ETr será a partir de productos MOD16a2 del satélite MODIS.

1.8.2 Equivalente de agua en la nieve

La cobertura de nieve en los Andes es la fuente principal de agua dulce en el área de estudio. Sus cambios pueden afectar en los recursos hídricos, causando efectos sociales y económicos en una zona donde su disponibilidad escasea. Un análisis de su variabilidad nos permite evaluar y estimar la oferta hídrica para la cuenca. Por lo tanto, monitorear el agua equivalente en la nieve (SWE, por sus siglas en inglés) es primordial en el estudio de los cambios en la disponibilidad de agua.

SWE representa la cantidad equivalente de agua líquida cuando una cobertura de nieve se derrite completamente, por lo tanto, depende del volumen y densidad de la cobertura de nieve. SWE puede ser medido en terreno de manera directa estimando, por ejemplo, el peso de la masa de una columna vertical de la cobertura de nieve dentro de una unidad de área. Sin embargo, debido a la heterogeneidad de la cobertura de nieve y a la escasez de instrumentos en terreno hace difícil estimar SWE con precisión y baja incertidumbre. Es por esto que los productos satelitales han sido una herramienta fundamental para estudiar la nieve a una escala regional. Efectivamente, muchos trabajos han utilizado la teledetección para su investigación, incluyendo datos provenientes de MODIS, SPOT, Landsat y Sentinel. Dada la gran resolución espacial y temporal, estos datos permiten estudiar variabilidades de la cobertura de nieve que no siempre está disponible en terreno, permitiendo generar series de tiempo de grandes superficies cubiertas de nieve (e.g. Malmros et al., 2018; Pérez et al., 2018; Saavedra et al., 2018) o glaciares (e.g. Pereira & Veettil, 2019; Winsvold et al., 2016). Para este trabajo, datos satelitales de MOD10a2 de MODIS serán utilizados para analizar los cambios de la oferta de agua para la cuenca del río Copiapó durante el periodo de estudio mediante la estimación de SWE.

1.8.3 Extracción de agua

Si bien se han hecho estudios sobre el consumo de agua en la cuenca del río Copiapó los datos no son abundantes. Como fue mencionado anteriormente, la demanda hídrica del sector agrícola y minero son las más importantes dentro del área de estudio. Datos de extracción de agua para la actividad minera fue incluida en nuestro análisis debido a que es la segunda mayor demanda de agua después de la agricultura (Donoso et al., 2020). Para ello, se recolectaron las estimaciones del consumo de agua del sector minero dentro de la cuenca del río Copiapó del informe de HÍDRICA CONSULTORES SPA en 2018 (HÍDRICA, 2018), generando una serie de datos de extracción de agua anual para el periodo 2001-2017.

Por otro lado, el sector agrícola es por lejos el mayor consumidor de agua en el área de estudio. Los cambios en las superficies de cultivos han aumentado generando una mayor demanda de agua para la irrigación. Por lo tanto, este trabajo incluye estimaciones del área de cultivos para cada temporada del

periodo de estudio. Para ello, productos satelitales del Índice de Vegetación Diferencial Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) del satélite Landsat serán aplicados para reconocer superficies cubiertas de vegetación.

El NDVI es un índice utilizado para estimar la presencia y calidad de la vegetación (Pettorelli et al., 2005) mediante la razón normalizada entre las longitudes de ondas del rojo e infrarrojo cercano (Tucker, 1979). Los valores de NDVI varían entre -1 y 1. Los valores negativos corresponden a zonas sin vegetación como agua, rocas o nieve; mientras que los valores de 0 a 0,1 corresponden a suelo desnudo. La vegetación generalmente entrega valores entre 0,2 y 1 (Toribio, 2019), aunque estos valores son relativos y dependen de otros factores como el tipo de vegetación o clima. Para este trabajo, se consideró este rango de valores para clasificar la superficie de cultivos. Luego, con el área total de superficie de cultivo, se hace una estimación de la cantidad de agua requerida para su irrigación a partir de los datos de la proporción del suelo por tipo de cultivo y riego por tipo de cultivo.

CAPITULO 2: MANUSCRITO CIENTÍFICO

Análisis de los forzantes climáticos y antropogénicos en la reducción de agua en la cuenca del río Copiapó, Chile (28 °S) utilizando productos satelitales

Analysis of climatic and anthropogenic forcing in the reduction of water in the Copiapó river basin, Chile (28 °S) using satellite products

Abel González ^{*1}; Cristian Mattar²; Héctor H. Sepúlveda^{3,4}

* abgonzalez@udec.cl

¹ Programa de Magíster en Geofísica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

² Fundación Biósfera, Santiago, Chile

³ Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción, Concepción, Chile

⁴ Fundación CEQUA, Punta Arenas, Chile

2.1 Resumen

La escasez hídrica que ha afectado a Chile en la última década se explica principalmente por dos factores: la reducción de la cobertura de nieve en los Andes y el aumento de la demanda hídrica. Debido a los efectos negativos que puede generar el déficit de agua en el medio ambiente y en la población, es necesario mejorar nuestro entendimiento sobre la influencia de estos factores en la reducción hídrica, especialmente en regiones áridas como el norte de Chile. El objetivo principal de este trabajo es evaluar las implicancias de las variables climática y antropogénica en el déficit hídrico de la cuenca del río Copiapó. Para este análisis se utilizaron los productos satelitales de MODIS (MOD10a2 y MOD16a2) e imágenes Landsat. Información de la extracción de agua obtenida por la DGA también fue incluida para este estudio. Cambios en el Equivalente de Agua en la Nieve (SWE) en los Andes fueron analizados como variables climáticas, mientras que cambios en la irrigación y extracción de agua fueron

utilizados como variables antropogénicas. La cantidad de agua que pierde la cuenca mediante la evapotranspiración real (ETr) fue estimada para cuantificar los cambios en la reducción de agua. Los resultados muestran una reducción significativa de agua hasta la temporada 2015/16. Mediante análisis de correlación, se encontró una importante relación entre esta reducción y el consumo (particularmente minería), sugiriendo que el forzante antropogénico influye más que el clima en el déficit hídrico. Un mejor monitoreo de la extracción de agua ayudará a identificar de mejor manera sus efectos en la disponibilidad hídrica.

Palabras clave: sensor remoto, evapotranspiración, SWE, irrigación, recursos hídricos

2.2 Abstract

Water depletion affecting Chile in the last decade is mainly explained by two factors: the decrease in Andean snow cover and the increase in water demand. Due to the negative effects that water deficit can generate on the environment and the population, it is necessary to improve our understanding of the influence of these factors on water depletion, especially in arid regions like northern Chile. The main objective of this work is to evaluate the implications of climate and anthropogenic variables on the water depletion in Copiapó River basin. In order to perform this study, MODIS (MOD10a2 and MOD16a2) satellite products and Landsat images were used. Water extraction data obtained by the DGA were also included in this study. Changes in snow-water equivalent (SWE) in the Andes were analyzed as a climatic variable, while changes in crop irrigation and water extraction were used as anthropogenic variables. The amount of water lost by the basin real evapotranspiration (ETr) was estimated to quantify changes in water depletion. The variability of ETr showed a significant decrease in water until the 2015/16 season. By correlation analysis, an important relationship was found between water decrease and consumption (particularly mining), suggesting that anthropogenic forcing influences water depletion more than climate. Better monitoring of water extraction will be useful to better identify its effects on water availability.

Keywords: remote sensing, evapotranspiration, SWE, irrigation, water resources

2.3 Introducción

Durante la última década una severa sequía ha estado afectando de manera ininterrumpida a Chile (CR2, 2015; Garreaud et al., 2020). Este fenómeno está asociado a un aumento de las temperaturas (Burger et al., 2018) y a una disminución de las precipitaciones (Boisier et al., 2016), generando un retroceso de la cobertura de nieve en los Andes (Malmros et al., 2018; Saavedra et al., 2018; Ruiz Pereira & Veettil, 2019) impactando directamente en la disponibilidad de agua dulce. Al mismo tiempo, el crecimiento económico y demográfico ha provocado una mayor demanda de agua en zonas donde hay escasez de este recurso, estresando los acuíferos y las escorrentías superficiales (Donoso, 2021; Valdés-Pineda et al., 2014).

El caso de la cuenca del río Copiapó (CRC) es un ejemplo de cómo las variables climáticas y antropogénicas han estado provocando un importante déficit hídrico (Donoso, 2021; HIDROMAS CEF, 2013; Oyarzún & Oyarzún, 2011; Suárez et al., 2014). En efecto, en las últimas décadas la demanda hídrica ha ido aumentando a medida que la actividad agrícola y minera se expande. Mientras las áreas cultivables han crecido hasta alcanzar cerca de 15.000 ha en 2015 (Rinaudo & Donoso, 2019), una mayor inversión en proyectos mineros (COCHILCO, 2018) han provocado no solo un aumento en el requerimiento de agua para esta actividad, sino que también ha generado un aumento en la tasa de crecimiento de la población por una mayor oferta de empleo (INE, 2017), contribuyendo a una mayor demanda por agua potable. Por otro lado, la disponibilidad de agua depende del derretimiento de la cobertura de nieve en los Andes (Donoso et al., 2020). En estas latitudes, la acumulación de nieve es susceptible a variables climáticas como la temperatura del aire, el viento (Gascoin et al., 2013; Jara et al., 2021; Réveillet et al., 2020) e índices climáticos como ENSO (Saavedra et al., 2018). Debido a la aridez, cambios menores en el clima pueden afectar de manera importante en el almacenamiento de agua de la cuenca.

Considerando los posibles efectos del consumo excesivo de agua y la variabilidad de la cobertura de nieve sobre los recursos hídricos de la CRC, es necesario

tener una mayor comprensión en cómo estos factores pueden estar influyendo en el déficit hídrico. Actualmente, la información respecto a la extracción y uso de recursos hídricos es limitada (Donoso, 2021). Por lo tanto, es necesario evaluar otros parámetros hidrológicos que permitan analizar los cambios en la disponibilidad de agua. La evapotranspiración real (ET_r) es una variable importante en el ciclo hidrológico (Castro & Gironás, 2021), especialmente en ambientes áridos donde muchas veces alcanza valores que superan a la tasa de precipitación (Johnson et al., 2010; Meza, 2013). Se han estudiado procesos hidrológicos mediante la estimación de ET_r aplicando sensor remoto (Anderson et al., 2012; Hernández-López et al., 2016; Johnson et al., 2010; Montecino et al., 2016) permitiendo solucionar el problema de falta de información en terreno.

En este contexto, el objetivo principal de este trabajo es evaluar las implicancias de las variables climáticas y antropogénicas en el déficit hídrico de la CRC para el periodo comprendido entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. Para ello, utilizaremos datos de nieve MOD10a2 y de evapotranspiración MOD16a2 para estimar la oferta de agua proveniente de la cobertura de nieve y la pérdida a través de procesos evapotranspirativos, respectivamente. Además, utilizando imágenes Landsat estimaremos los cambios espaciales de superficies de cultivos y calcularemos la demanda de agua para irrigación. Los resultados de este trabajo nos permiten evaluar cuál es el principal forzante en la reducción de agua que afecta en la CRC.

2.4 Área de estudio

La cuenca del río Copiapó está localizada en la región de Atacama, norte de Chile, entre las latitudes 27°S y 29°S y está delimitada por la cordillera de los Andes hacia el este y por el océano Pacífico al oeste (Figura 2.1). La cuenca se caracteriza por tener un clima árido, dentro del desierto de Atacama (Juliá et al., 2008), con un promedio anual de precipitación de 28 mm y temperatura media anual de 15,2° C en la parte central. El principal afluente superficial es el río Copiapó, alcanzando una longitud de 162 km y se origina a una elevación de 1.230 msnm donde convergen los ríos Manflas, Jorquera y Pulido. Su caudal promedio es de 2,4 m³/s, alcanzando valores máximos en los meses de verano debido al derretimiento de la nieve (Houston, 2006b).

2.5 Materiales

Los datos utilizados para este trabajo fueron recolectados de diferentes fuentes, incluyendo estudios sobre los recursos hídricos en informes hechos por instituciones gubernamentales y otras publicaciones científicas. Además, se utilizaron distintos productos satelitales que contienen series de datos con resolución espacial y temporal aplicables para la escala del área de estudio.

2.5.1 *Sensor remoto*

Las imágenes satelitales utilizadas para este trabajo incluyen la colección de imágenes Landsat 5, 7 y 8 y los productos MOD16a2 y MOD10a2 de MODIS. Estos datos fueron obtenidos desde Google Earth Engine (GEE), una plataforma que permite procesar y analizar productos satelitales sin descargarlos (Gorelick et al., 2017), a excepción de MOD10a2, el cual fue descargado desde la página web de la NASA (<https://www.earthdata.nasa.gov/>) y procesado en ArcGIS 10.5, un programa de Sistema de Información Geográfica (SIG) utilizado para la creación de mapas y otros análisis geoespaciales (Pucha-Cofrep et al., 2017).

La colección de imágenes de Landsat fue procesada para estimar los cambios de la superficie cubierta de cultivos durante el periodo de estudio. Seleccionamos imágenes libres de nubosidad y obtenidas en los meses de verano austral (DEF) (Tabla 2.1). Se recopilamos 965 imágenes de MOD16a2 entre el 6 de septiembre de 2001 y el 29 de agosto de 2022 para generar una serie de tiempo de evapotranspiración real (ET_r) (Figura 2.2). Para el análisis de la cobertura de nieve se utilizaron 948 imágenes de MOD10a2 obtenidas entre el 6 de marzo de 2001 y 29 de agosto de 2021 para generar una serie de tiempo del área de la cobertura de nieve que incluye los meses de otoño e invierno del periodo 2001/02-2021/22 (Figura 2.3). Desde MOD10a2 se utilizó la banda "Maximum_Snow_Extent" que entrega la extensión máxima de la cobertura de nieve dentro de los 8 días que abarca cada imagen (Riggs & Hall, 2015).

2.5.2 *Demanda hídrica*

Datos de extracción de agua para la actividad minera fueron incluidas en nuestro análisis debido a que es la segunda mayor demanda de agua por sector después de la agricultura (Donoso et al., 2020). Para ello, se recolectaron las estimaciones

del consumo de agua por parte de la minería dentro de la cuenca del río Copiapó desde un estudio solicitado por la DGA (HÍDRICA CONSULTORES SPA, 2018), generando una serie de datos de extracción de agua anual para el periodo 2001-2017 (Tabla 2.2).

2.6 Metodología

El estudio de las implicancias de las variables climáticas y antropogénicas en la reducción de agua fue realizado a través de un análisis de correlación entre la evapotranspiración real (ET_r) y estas variables. En primer lugar, se estimó el Equivalente de Agua en la Nieve (SWE) para otoño e invierno y total (otoño + invierno) como variable climática. Luego, se calculó un estimativo de agua utilizada para la irrigación que, junto a los datos de extracción de agua del sector minero, fueron considerados como factores antropogénicos.

2.6.1 Estimación de SWE

SWE es la cantidad de agua líquida contenida en la nieve, por lo tanto, su estimación depende del volumen y densidad de la cobertura de nieve. Los pixeles de MOD10a2 categorizados como nieve fueron convertidos a unidades de área y multiplicados por la profundidad mínima y máxima estimada en el trabajo de Jara et al. (2021) (0,1 y 2,1 m). Con respecto a la densidad, se consideraron los valores mínimo y máximo de densidad de la nieve, los cuales son 350 y 800 kg/m³ para la nieve fresca y húmeda, respectivamente. De esta manera se obtuvieron dos escenarios posibles de SWE considerando los valores extremos de la profundidad y la densidad. Según Jara et al. (2021), cerca del 70% de la nieve acumulada se pierde por efectos de la sublimación superficial y por el viento. Por lo tanto, consideramos solo el 30% de SWE como agua disponible para la recarga de la cuenca.

2.6.2 Obtención de la cantidad de agua utilizada para la irrigación

La estimación de la cantidad de agua utilizada para la irrigación se obtuvo a partir de los cambios en la superficie de cultivos desde las temporadas 2001/02 a 2021/22. Estos cambios fueron estimados desde imágenes de NDVI de la colección de Landsat procesadas en GEE (Tabla 2.1). Una vez seleccionada las imágenes, estas se sometieron a un filtro para contar los pixeles que representan

superficie de cultivos. Para diferenciar estas superficies con aquellas libres de vegetación, se determinó un umbral de NDVI igual a 0,2 con aquellos píxeles con valores igual o mayor a este umbral categorizados como cultivos. Una vez obtenida las áreas de cultivos para cada temporada, estas fueron divididas por tres tipos de cultivos predominantes en el área de estudio: uva de mesa, olivo y hortalizas. La proporción de superficie por tipo de cultivo fue obtenida a partir de un estudio de la DGA en 2010 (DICTUC, 2010) (Tabla 2.3). Luego, a cada cultivo fue asignado un intervalo de riego siguiendo los datos del informe de la Universidad de Chile en 2016 (U. De Chile, 2016) cuyas estimaciones tienen valores mínimos y máximos de riego (Tabla 2.3).

2.6.3 Estimación de ETr

Los valores de ETr de MOD16a2 son obtenidos y procesados desde GEE. Los flujos de agua superficial (que pueden tener influencia en la tasa de evapotranspiración) proveniente del derretimiento de la nieve acumulada durante los meses de otoño e invierno tienen su máximo caudal en los meses posteriores a su acumulación (Houston, 2006b). Por lo tanto, con el objetivo de evaluar la relación con SWE, la estimación de ETr para cada temporada fue considerando los datos obtenidos dentro de un año comenzando desde el 01 de septiembre hasta el 31 de agosto posterior a los meses de otoño e invierno, cuando ocurrió la acumulación de nieve que originó estos flujos. Luego, mediante funciones de GEE la colección de imágenes MOD16a2 de la temporada fue reducida a una sola imagen, obteniendo la suma de ETr para cada píxel. Finalmente, los píxeles que contiene esta imagen fueron sumados para obtener el total absoluto de ETr de toda la superficie. La suma total de ETr corresponde a la cantidad de agua líquida total perdida por los procesos evapotranspirativos en cada temporada entre 2001/02 y 2021/22.

2.6.4 Análisis estadístico de las series de tiempo

Con los datos obtenidos de ETr, SWE, la cantidad de agua para la irrigación y minería, se crearon series de datos de valores estimativos de agua en unidades de toneladas para cada temporada entre 2001/02 y 2021/22. Para cada serie se estimaron su tasa de cambio aplicando el estimador de tendencia lineal de Theil-Sen (Sen, 1968) y se evaluó la significancia estadística de estas tendencias

utilizando el análisis no paramétrico de Mann-Kendall (Hamed & Rao, 1998). Posteriormente, se analizó la relación lineal entre ETr y las otras variables, calculando el coeficiente de correlación de Pearson.

2.7 Resultados

Las figuras 2.4 y 2.5 muestran los valores extremos (mínimo y máximo) estimados de SWE para el otoño, invierno y total (otoño + invierno) del periodo 2001/02-2021/22 en unidades de millones de toneladas (Mton). La variabilidad de SWE total muestra una tendencia decreciente no significativa ($p > 0,05$). Por estaciones, las series muestran distintas tendencias. Mientras en otoño se observa una tendencia decreciente, en invierno se muestra una tendencia levemente creciente. Ambas series no muestran significancia estadística ($p > 0,05$). Con respecto a la irrigación, la variabilidad de la cantidad de agua utilizada para los cultivos muestra una tendencia decreciente estadísticamente significativa ($p < 0,05$) en el periodo 2012/13 y 2021/22 (Figura 2.6). La figura 2.7 muestra la cantidad de agua evapotranspirada por temporada entre 2001/02 y 2021/22. La estimación de ETr total muestra una tendencia decreciente estadísticamente significativa ($p < 0,05$), con una tasa de disminución de 0,7 Mton de agua por año. No obstante, desde la temporada 2016/17 se muestra una tendencia levemente creciente (0,5 Mton por año) sin significancia estadística ($p > 0,05$).

La Tabla 2.4 muestra los resultados de la evaluación de correlación de Pearson entre ETr y las variables climáticas (SWE otoño, invierno y total) y antropogénicas (uso de agua para irrigación y sector minero). La correlación más alta se dio entre ETr y la cantidad de agua extraída para uso del sector minero, con un valor de -0,71. Igualmente la correlación entre ETr y la irrigación es negativa, aunque de menor magnitud (-0,38). Por otro lado, la correlación entre ETr y SWE (otoño, invierno y total) fue baja, con valores de 0,01, -0,08 y -0,06, respectivamente.

2.8 Discusión

Las tasas de cambio de SWE no muestran tendencias decrecientes significativas durante el periodo 2001/02 – 2021/22, mostrando incluso un leve aumento durante el invierno. Si bien la sequía ha estado afectando en la zona central del

país, generando una disminución en la extensión y duración de la cobertura de nieve (Malmros et al., 2018; Saavedra et al., 2018), nuestros resultados indican que sus efectos no alcanzan zonas tan al norte como en la CRC, al menos no de manera significativa como para provocar una reducción de la oferta de agua líquida.

El análisis de correlación muestra una relación lineal negativa y débil entre ETr y la irrigación (-0,38). El sector agrícola es el principal demandante de agua en la CRC. Según Donoso et al. (2020), los derechos de agua subterránea para la agricultura representan el 73% del total del consumo. Hasta el 2015, la superficie de cultivos había crecido hasta alcanzar cerca de 15.000 ha (Rinaudo & Donoso, 2019), mientras que entre el 2001 y 2007 el uso de agua para irrigación no tuvo grandes cambios (HÍDRICA CONSULTORES SPA, 2018). Lamentablemente, no hay información respecto al uso de agua y superficie de cultivos para los siguientes años. Nuestros resultados muestran que a partir de la temporada 2012/13 hay una tendencia decreciente significativa en la tasa de irrigación (Figura 2.6). Considerando que la irrigación y su eficiencia son un factor determinante en la tasa de ETr, es probable que estos cambios de tendencia pueden explicar la correlación negativa entre ambas variables.

Por otro lado, la relación entre ETr y los cambios en la extracción de agua para uso de la minería muestra una correlación negativa fuerte (-0,71). Es importante mencionar que los datos de extracción para minería obtenidos desde el informe de HÍDRICA CONSULTORES SPA (2018) tiene registros hasta el año 2017, por lo tanto, la estimación de la correlación de Pearson no es para todo el periodo de estudio. La minería es el segundo mayor consumidor de agua en la cuenca del río Copiapó, alcanzando el 12% de los derechos de agua subterránea (Donoso et al., 2020) por lo que su extracción excesiva puede afectar a los reservorios. Estudios anteriores han demostrado una constante disminución de agua subterránea y un descenso en los niveles freáticos como consecuencia de una extracción que excede la recarga natural (HIDROMAS CEF, 2013; Rinaudo & Donoso, 2019). Si bien los resultados de ETr en este trabajo indicarían una reducción de agua en la superficie, esto puede estar influenciado por el descenso de los niveles freáticos ocasionado por la extracción excesiva de agua.

Desde el 2013, las principales compañías mineras comenzaron a reemplazar pozos de agua subterránea por agua desalinizada. Primero fue la Mina Candelaria en el año 2013 y luego CAP, la segunda mayor compañía minera, adoptando la misma medida en 2014 (Rinaudo & Donoso, 2019). Esto también es observado en los datos de extracción de agua subterránea del informe de HÍDRICA CONSULTORES SPA (2018) (Tabla 2.2), mostrando una disminución a partir del año 2013. Según sus datos de extracción, a partir de ese año hay una estabilización en la cantidad de agua extraída y esto podría estar generando efectos en el agua subterránea. Si bien encontramos una fuerte correlación entre ETr y la extracción de agua del sector minero, no es suficiente para encontrar alguna causalidad. Una actualización respecto al estado de los niveles de agua subterránea podría entregar más información al respecto.

2.9 Conclusión

Este trabajo ha analizado las implicancias de los factores climáticos y antropogénicos en la reducción de agua en la cuenca del río Copiapó entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. Utilizando productos satelitales, estimamos cambios de SWE, ETr e irrigación permitiendo identificar patrones en sus tendencias durante el periodo analizado. Los datos de SWE son considerados para evaluar el comportamiento de las variables climáticas, mientras que los datos de estimativos de irrigación y de extracción de agua para uso en minería son examinados como variables antropogénicas. La estimación de ETr permite estimar la tasa de cambio de agua dentro del área de estudio. La serie de tiempo de ETr muestra que la reducción de agua fue significativa hasta la temporada 2015/16. A través de un análisis de correlación de Pearson se encontró una fuerte correlación negativa entre ETr y la extracción de agua para uso en minería (-0,71) y en menor medida con los cambios en el uso de agua para la irrigación (-0,38). No se identificó correlación importante con SWE estacional o total. El cese de la reducción de agua evidenciada con los datos de ETr (posterior a la temporada 2015/16) coincide con el inicio del reemplazo de pozos de agua subterránea por el uso de agua desalinizada en las compañías mineras y con una disminución en las áreas de superficie de cultivos irrigadas. Esto demuestra una posible influencia de los forzantes antropogénicos en la reducción de agua. Sin embargo, la escasez de datos de extracción de agua para minería y agricultura hace difícil encontrar una relación directa con la reducción de agua evidenciada en la

superficie. Un mayor monitoreo en la extracción de agua podría ayudar a identificar los efectos que estas acciones generan en la disponibilidad de agua.

2.10 Figuras

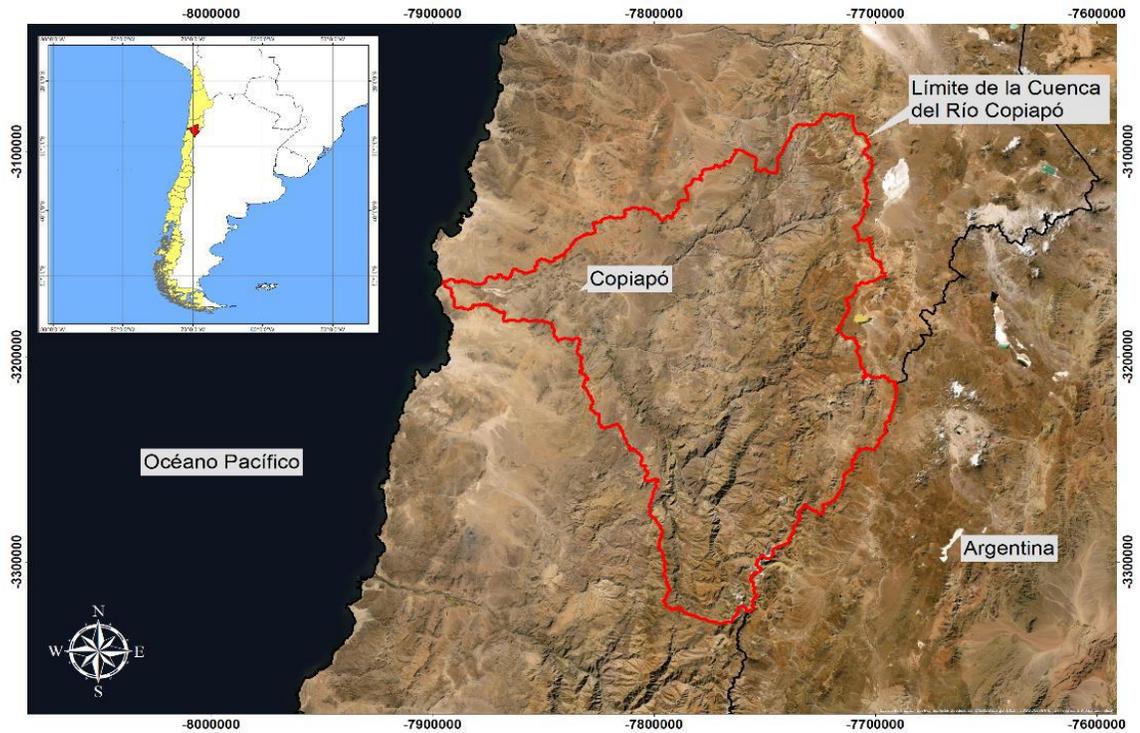


Figura 2.1. Delimitación de la cuenca del río Copiapó y ubicación de la ciudad de Copiapó.

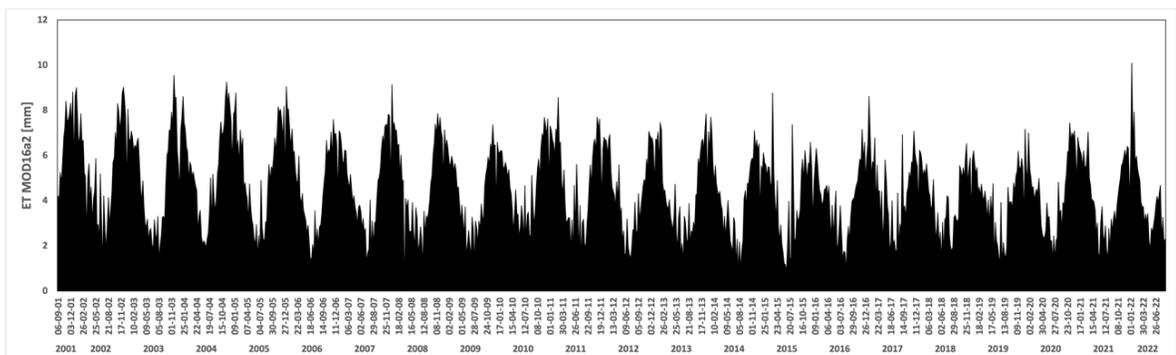


Figura 2.2. Series de datos de ET MOD16A2 de MODIS para el periodo comprendido entre 6 de septiembre de 2001 y 29 de agosto de 2022. Cada columna muestra el valor de ET promedio [mm] para cada imagen de la serie.

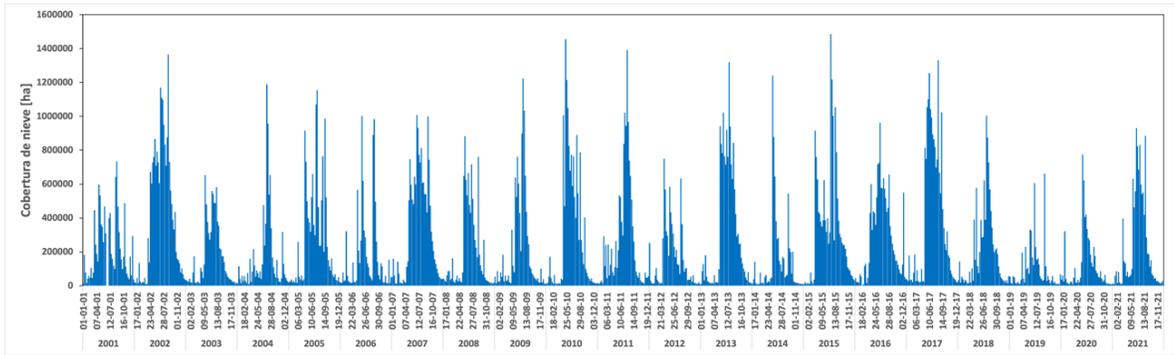


Figura 2.3. Series de datos de cobertura de nieve MOD10A2 de MODIS para el periodo comprendido entre 1 de enero de 2001 y 31 de diciembre de 2021. Cada columna muestra el valor de superficie cubierta de nieve [ha] para cada imagen de la serie.

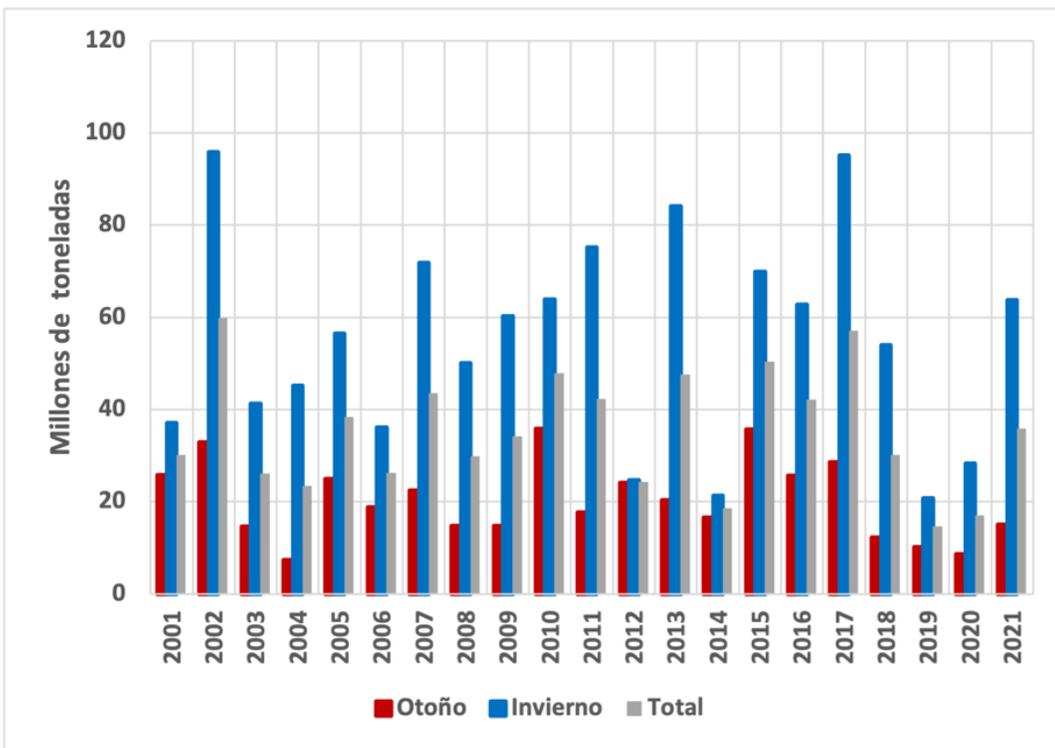


Figura 2.4. SWE mínimo estimado para el otoño, invierno y total (otoño + invierno) entre 2001-2021. Las estimaciones se realizaron considerando el área promedio de la cobertura de nieve ocurrida durante la estación para las series de otoño e invierno, y el área promedio de la cobertura de nieve durante el otoño e invierno

para la serie total. Se utilizaron los valores mínimos de altura y densidad de la nieve obteniendo los valores mínimos de SWE.

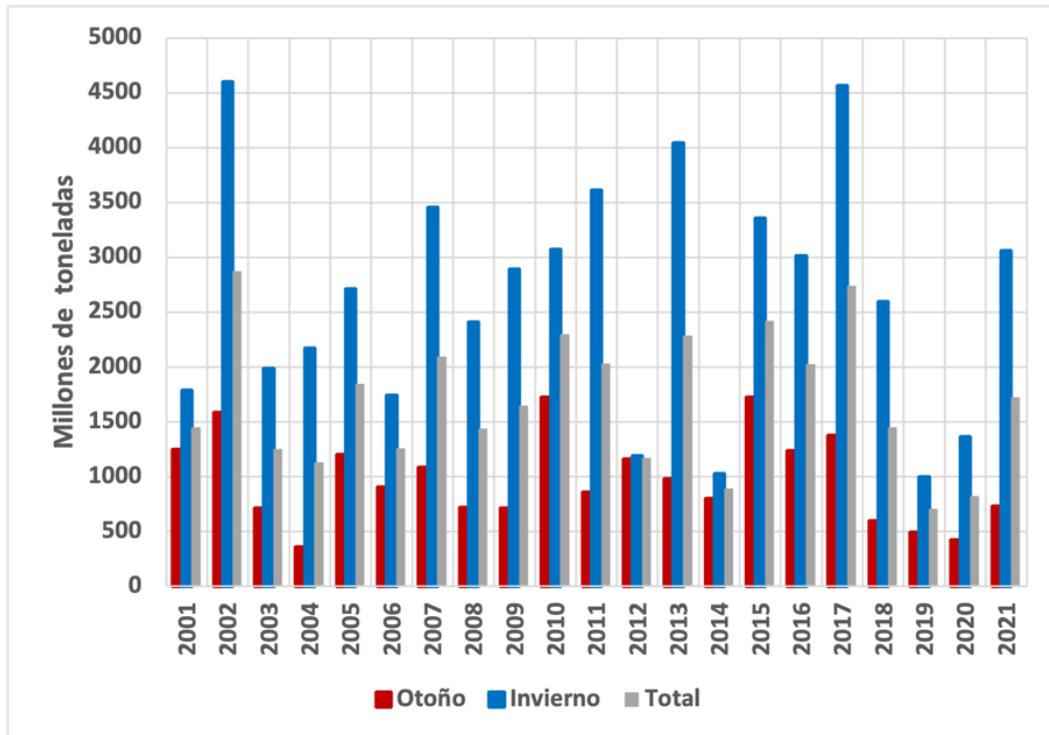


Figura 2.5. SWE máximo estimado para el otoño, invierno y total (otoño + invierno) entre 2001-2021. Las estimaciones se realizaron considerando el área promedio de la cobertura de nieve ocurrida durante la estación para las series de otoño e invierno, y el área promedio de la cobertura de nieve durante el otoño e invierno para la serie total. Se utilizaron los valores máximos de altura y densidad de la nieve obteniendo los valores máximos de SWE.

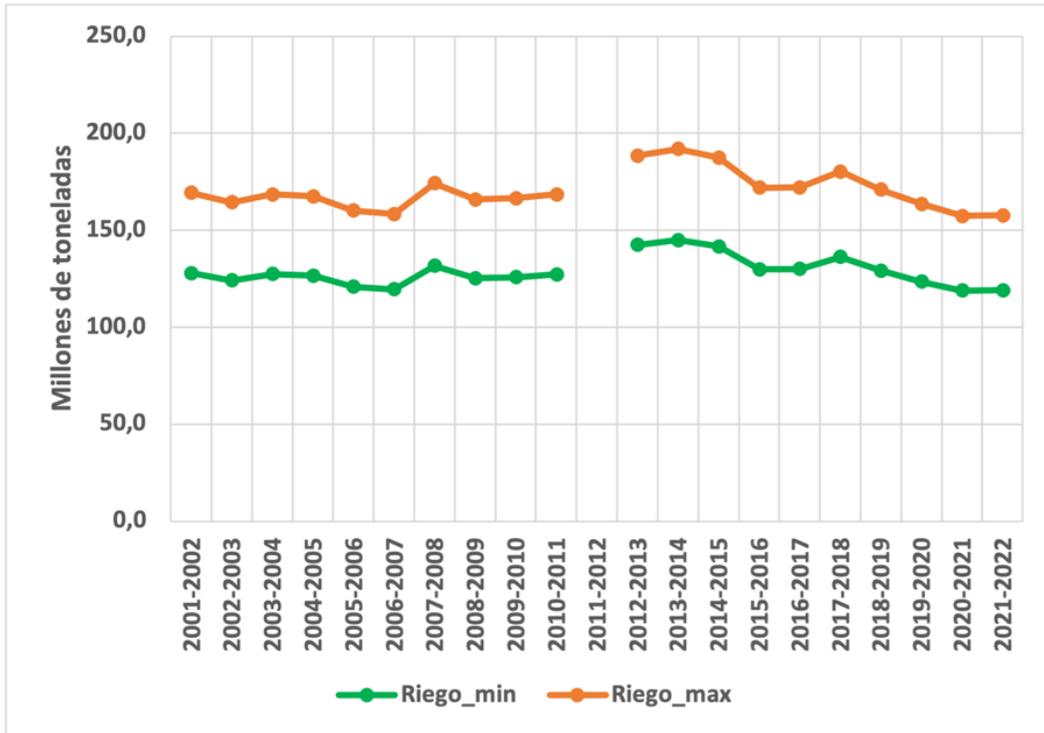


Figura 2.6. Irrigación total anual en el periodo 2001/02-2021/22. Para la estimación de la irrigación fueron considerados los cambios superficiales de los cultivos capturados desde imágenes de Landsat. La proporción de tipos de cultivos y la cantidad de agua utilizada para cada cultivo fue obtenido desde DICTUC (2010) y del Informe “Eficiencia Hídrica en la Región de Atacama” de la Universidad de Chile (2016). Se asume una proporción y cantidad de riego constante durante el periodo de estudio. La serie no contiene datos del año 2012 debido a que no hay imágenes de Landsat-5 y Landsat-8 para ese periodo y Landsat-7 presentaba problemas en sus productos.

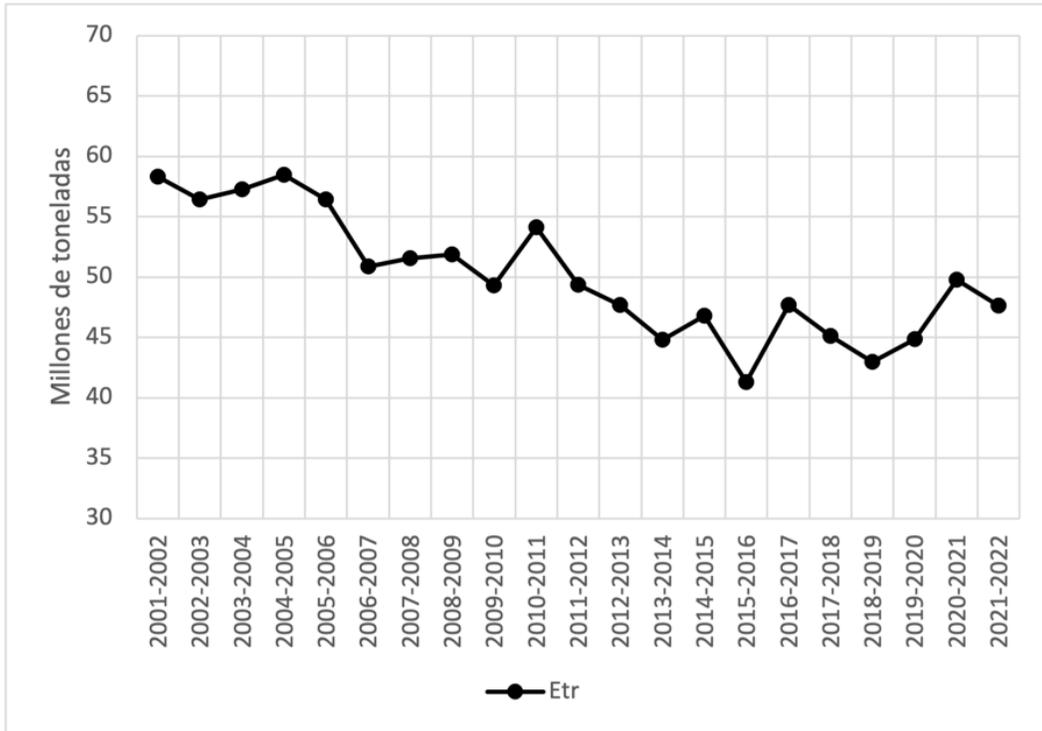


Figura 2.7. Evapotranspiración real anual para el periodo entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. La estimación anual se inicia en el mes de septiembre hasta agosto del año siguiente. Cada valor corresponde a la suma total de agua evapotranspirada de toda la superficie cubierta de vegetación.

2.11 Tablas

Tabla 2.1. Imágenes utilizadas para la obtención de área de cultivos. Se seleccionaron escenas libres de nubosidad y obtenidas en verano para capturar la máxima irrigación. La escena utilizada para el año 2013 fue obtenida en mayo debido a que Landsat 8 comenzó a recopilar imágenes en marzo de ese año. No hay escena del año 2012 debido a que Landsat 5 y Landsat 8 no producían imágenes en ese periodo y Landsat 7 presentaba problemas en sus productos.

Satélite	Código de la colección de imágenes	Fecha
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	25-01-02
Landsat 7	LANDSAT/LE07/C01/T1_8DAY_NDVI	10-02-03
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	18-02-04
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	18-02-05
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	25-01-06
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	11-12-06
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	25-01-08
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	18-02-09
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	02-02-10
Landsat 5	LANDSAT/LT05/C01/T1_8DAY_NDVI	01-01-11
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	05-05-13
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	10-02-14
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	18-02-15
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	18-02-16
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	17-01-17
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	10-02-18
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	09-01-19
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	17-01-20
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	02-02-21
Landsat 8	LANDSAT/LC08/C01/T1_8DAY_NDVI	19-12-21

Tabla 2.2. Registro de la demanda hídrica anual del sector minero de la cuenca del río Copiapó. (Fuente: HIDRICA CONSULTORES SPA, 2018).

Año	Agua extraída [Mton]
2002	9,1
2003	8,7
2004	10,6

2005	12,6
2006	11,7
2007	16,6
2008	17,9
2009	18,6
2010	19,3
2011	19,7
2012	21,2
2013	18,4
2014	17,5
2015	17,0
2016	18,2
2017	17,2

Tabla 2.3. Proporción de la superficie agrícola por tipo de cultivo (DICTUC, 2010) y estimación de agua para riego por cultivo en la cuenca del río Copiapó (U de Chile, 2016). Para este trabajo, el riego de tomate fue considerado como la cantidad de agua utilizada para el riego de hortalizas. Unidades de riego [m³/ha/año] x 1000]

Tipo de cultivo	Porcentaje de superficie	Riego
Uva de mesa	70,6%	11 -15
Olivo	10,1%	7 - 9
Tomate	9,7%	9

Tabla 2.4. Estimación de correlación de Pearson.

Correlación	
ETr vs SWE Otoño	0,01
ETr vs SWE Invierno	-0,08
ETr vs SWE Total	-0,06
ETr vs Irrigación	-0,38
ETr vs Minería	-0,71

CAPITULO 3: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

A continuación, se presenta una discusión extendida con datos adicionales que fueron incluidos en este trabajo.

3.1 Discusión

Los cambios en la tasa de evapotranspiración en la CRC pueden ser por efectos de factores climáticos o antropogénicos. Por lo tanto, el forzante climático fue analizado a través de los cambios en la oferta de agua proveniente del derretimiento de la nieve (SWE), la temperatura y la tasa de precipitación. Mientras que el forzante antropogénico fue analizado mediante la estimación de la demanda de agua generada por los dos principales consumidores: agricultura y minería.

3.1.1 Cambios en la tasa de ETr anual

La tasa de disminución de agua total evapotranspirada fue de 1,1 Mton bajando desde un máximo de 58,5 Mton en la temporada 2004/05 hasta un mínimo de 41,3 Mton en 2015/16. Posteriormente, hay un cambio de tendencia en la variabilidad de ETr interrumpiendo su disminución y mostrando valores que suben y bajan desde 47,7 a 47,6 Mton al año entre las temporadas 2016/17 y 2021/22 (Figura 2.7).

En ambientes áridos, la tasa de ETr se convierte en una variable importante en el balance hídrico (Castro & Gironás, 2021). En efecto, en la CRC los valores de ETr supera desproporcionadamente la tasa de precipitación media (28 mm). Esto implicaría que el agua proviene también de otras fuentes naturales, como la evaporación de capas subsuperficiales. Trabajos como Johnson et al. (2010) demuestran que, en ambientes áridos, la tasa de evaporación de agua en capas subsuperficiales está fuertemente controlada por la profundidad del nivel freático. Si bien factores como los cambios en el uso de suelo para cultivos o en la eficiencia en la irrigación pueden cumplir un rol importante en la tasa de ETr, el descenso del nivel freático y del almacenamiento de agua subterránea evidenciado en el área de estudio (e.g. HIDROMAS CEF, 2013; Rinaudo &

Donoso, 2019), podría también ser responsable de la disminución de ETr observada en los resultados de este trabajo.

3.1.2 Efectos de la variabilidad climática en la reducción de agua

SWE depende fundamentalmente de los cambios en la cobertura de nieve. En los Andes áridos, estos cambios están influenciados directamente por variables climáticas como la temperatura del aire o la velocidad del viento (Gascoin et al., 2013; Jara et al., 2021). En otras palabras, un aumento de la temperatura del aire implica un reemplazo de la precipitación sólida por precipitación líquida, reduciendo la acumulación de nieve. Mientras que la velocidad del viento tiene un efecto importante en los Andes de la CRC, actuando como causante de la pérdida de nieve a través de la sublimación (Jara et al., 2021). Nuestros resultados no muestran tendencias decrecientes significativas de SWE estacional y total durante el periodo de estudio, mostrando incluso un leve aumento durante el invierno. Si bien la Megasequía ha estado afectando más al sur del área de estudio, generando una disminución en la extensión y duración de la cobertura de nieve (Malmros et al., 2018; Saavedra et al., 2018), nuestros resultados indican que sus efectos no alcanzan zonas tan al norte como la CRC, al menos de manera significativa como para provocar una reducción de la oferta de agua.

Mientras la acumulación de nieve ocurre principalmente en los meses de otoño e invierno, su derretimiento tiene lugar en los meses de primavera y verano, causando que el caudal máximo del río Copiapó suceda en los meses de verano (Houston, 2006b). Por consiguiente, para encontrar alguna relación lineal entre las variaciones de SWE con ETr, estimamos la correlación lineal entre ellas considerando la acumulación de nieve de otoño e invierno con los datos de ETr obtenidos desde la primavera del mismo año. Así, mientras la tasa de ETr muestra un significativo descenso al menos hasta la temporada 2015/16, esta tendencia no se explica por la variabilidad de la oferta de agua estacional o total (correlación lineal cercano a 0) (Tabla 2,4).

La tasa de ETr depende también de variables meteorológicas que regulan la demanda de agua de la atmósfera (Sánchez & Carvacho, 2011). Por lo tanto, se incluye un análisis de las tendencias de precipitación y temperatura medidas en la estación meteorológica de Meteochile localizada dentro del área de estudio.

Para el análisis estadístico, se obtuvo la temperatura media y precipitación anual por temporada (Tabla 3.1). Según lo observado, ni la temperatura media ni la tasa de precipitación muestran tendencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$). Además, estas variables no muestran una correlación importante con la tasa de ETr (0,24 y 0,16 con la temperatura y precipitación, respectivamente). Es importante mencionar que la estación meteorológica utilizada para este análisis comienza a medir estas variables desde febrero de 2005. En consecuencia, estos resultados no permiten analizar la serie completa del periodo de estudio.

Tabla 3.1. Datos de temperatura media y precipitación total por temporada entre 2004/05 – 2021/22. Los datos fueron obtenidos desde la estación Desierto de Atacama de la Dirección Meteorológica de Chile (<https://climatologia.meteochile.gob.cl/>). Es importante mencionar que esta estación comienza a recopilar datos desde febrero de 2005, por lo tanto, los valores correspondientes a la temporada 2004/05 es incompleta.

Temporada	Temperatura [°C]	Precipitación [mm]
2004/05	16,5	22,2
2005/06	17,0	0,2
2006/07	15,5	1,2
2007/08	15,5	2,5
2008/09	16,0	8,4
2009/10	15,4	30,9
2010/11	15,5	30,5
2011/12	16,1	1,3
2012/13	15,9	8,4
2013/14	15,7	9,3
2014/15	16,2	38,2
2015/16	16,7	2,0
2016/17	16,7	37,2
2017/18	14,9	2,0
2018/19	15,4	0,0
2019/20	15,5	1,0
2020/21	14,7	11,0
2021/22	15,1	36,8

3.1.3 Efectos de las actividades socioeconómicas en la reducción de agua

3.1.3.1 Agricultura

La información respecto a la extracción de agua para irrigación durante el periodo de estudio es escasa. Un informe realizado por HÍDRICA CONSULTORES SPA (2018) actualizó la demanda hídrica para irrigación solo hasta el año 2007 impidiendo un análisis completo de los efectos que pueden estar generando en el déficit hídrico. Para solucionar este problema, calculamos un estimativo de la cantidad de agua utilizada para la irrigación a través de los cambios en el área de cobertura de cultivos obtenidos con los datos satelitales de NDVI de Landsat. A pesar de las limitaciones de esta estimación, los resultados nos permiten analizar tendencias que pueden ser relevantes para comprender sus efectos en ETr.

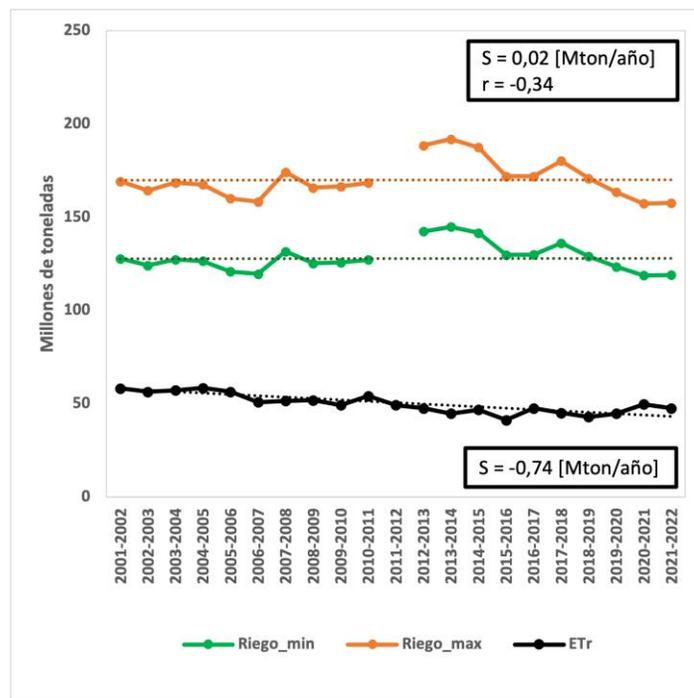


Figura 3.1. Serie de tiempo de la tasa de irrigación máxima y mínima estimada (líneas naranja y verde, respectivamente) entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. La línea negra representa la serie de tiempo de ETr. Las rectas de puntos representan la línea de tendencia de cada serie. Se muestra la tendencia (S) para cada serie y correlación de Pearson (r).

El análisis de correlación muestra una relación lineal negativa y débil entre ETr y la irrigación (-0,34) (Figura 3.1). El sector agrícola es el principal demandante de agua en la CRC. Según Donoso et al. (2020), los derechos de agua subterránea para la agricultura representan el 73% del total del consumo. Sin embargo, la información respecto al uso de agua no es abundante y no está actualizada. Hasta el 2015, la superficie de cultivos había crecido hasta alcanzar cerca de 15.000 ha (Rinaudo & Donoso, 2019), mientras que entre el 2001 y 2007 el uso de agua para irrigación no tuvo grandes cambios (HÍDRICA CONSULTORES SPA, 2018). Lamentablemente, no hay mucha información respecto al uso de agua y superficie de cultivos para los siguientes años. Nuestros resultados muestran que a partir del año 2013 hay una tendencia decreciente significativa en la tasa de irrigación (Figura 2.6). Considerando que la irrigación y su eficiencia son un factor determinante en la tasa de ETr, es probable que estos cambios de tendencia pueden explicar la correlación negativa entre ambas variables.

3.1.3.2 Minería

La relación entre ETr y los cambios en la extracción de agua para uso de la minería muestra una correlación negativa fuerte (-0,71) (Figura 3.2). Es importante mencionar que los datos de extracción para minería obtenidos desde el informe de HÍDRICA CONSULTORES SPA (2018) tiene registros hasta el año 2017, por lo tanto, la estimación de la correlación de Pearson no es para todo el periodo de estudio. La minería es el segundo mayor consumidor de agua en la cuenca del río Copiapó, alcanzando el 12% de los derechos de agua subterránea (Donoso et al., 2020), por lo que su extracción excesiva puede afectar a los reservorios. Estudios anteriores han demostrado una constante disminución de agua subterránea y un descenso en los niveles freáticos como consecuencia de una extracción que excede la recarga natural (HIDROMAS CEF, 2013; Rinaudo & Donoso, 2019). Si bien los resultados de ETr en este trabajo indicarían una reducción de agua en la superficie, esto puede estar influenciado por el descenso de los niveles freáticos ocasionado por la extracción excesiva de agua.

Desde el 2013, las principales compañías mineras comenzaron a reemplazar pozos de agua subterránea por agua desalinizada. Primero fue la Mina Candelaria en el año 2013 y luego por CAP, la segunda mayor compañía minera, adoptando la misma medida en 2014 (Rinaudo & Donoso, 2019). Esto también

es observado en los datos de extracción de agua subterránea del informe de HÍDRICA CONSULTORES SPA (2018) (Tabla 2.2), mostrando una disminución a partir del año 2013. Según sus datos de extracción, a partir de ese año hay una estabilización en la cantidad de agua extraída y esto podría estar generando efectos en el agua subterránea. Si bien encontramos una fuerte correlación entre ETr y la extracción de agua del sector minero, no es suficiente para encontrar alguna causalidad. Una actualización respecto al estado de los niveles de agua subterránea podría entregar más información al respecto.

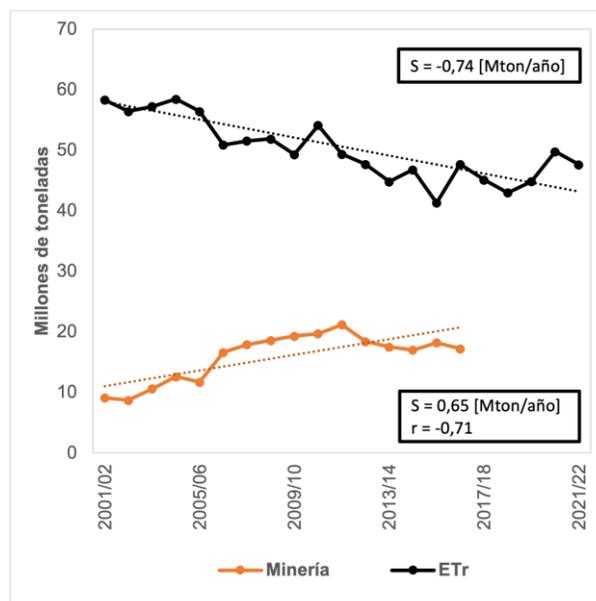


Figura 3.2. Serie de tiempo de consumo de agua del sector minero (línea naranja) para temporadas 2001/02 y 2021/22. La línea negra representa la serie de tiempo de ETr. Las rectas de puntos representan la línea de tendencia de cada serie. Se muestra la tendencia (S) para cada serie y correlación de Pearson (r).

3.2 Conclusión

Este trabajo ha analizado las implicancias de los factores climáticos y antropogénicos en la reducción de agua en la cuenca del río Copiapó entre las temporadas 2001/02 y 2021/22. Utilizando productos satelitales, estimamos cambios de SWE, ETr e irrigación permitiendo identificar patrones en sus tendencias durante el periodo analizado. Los datos de SWE son considerados para evaluar el comportamiento de las variables climáticas, mientras que los datos estimativos de irrigación y de extracción de agua para uso en minería son examinados como variables antropogénicas. La estimación de ETr permite cuantificar la tasa de cambio en la reducción de agua dentro del área de estudio. La serie de tiempo de ETr muestra que la reducción de agua fue significativa hasta la temporada 2015/16. A través de un análisis de correlación de Pearson se encontró una fuerte correlación negativa entre ETr y la extracción de agua para uso en minería (-0,71) y menor medida con los cambios en el uso de agua para la irrigación (-0,34). Mientras que no se identificó alguna correlación con SWE estacional o total. Adicionalmente, un análisis de correlación con las variables de temperatura y precipitación de la estación meteorológica localizada dentro del área de estudio muestra que estos factores no explican la variabilidad de ETr. El cese de la reducción de agua evidenciada con los datos de ETr (posterior a la temporada 2015/16) coincide con el inicio del reemplazo de pozos de agua subterránea por el uso de agua desalinizada en las compañías mineras y con una disminución en las áreas de superficie de cultivos irrigadas. Esto demuestra una posible influencia de los forzantes antropogénicos en la reducción de agua. Sin embargo, la escasez de datos de extracción de agua para minería y agricultura hace difícil encontrar una relación directa con la reducción de agua evidenciada en la superficie a través de la tasa de ETr. Un mayor monitoreo en la extracción de agua podría ayudar a identificar los efectos que estas acciones generan en la disponibilidad de este recurso.

REFERENCIAS

- Alam, M. A., & Sepúlveda, R. (2022). Environmental degradation through mining for energy resources: The case of the shrinking Laguna Santa Rosa wetland in the Atacama Region of Chile. *Energy Geoscience*, 3(2), 182–190. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2021.11.006>
- Anderson, M. C., Allen, R. G., Morse, A., & Kustas, W. P. (2012). Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 122, 50–65. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>
- Bennison, G., von Igel, W., Haque, N., Román, E. y Claro, E. 2016. Eficiencia hídrica en la Región de Atacama: Evaluación de brechas identificadas a la luz de la experiencia internacional. Santiago, CSIRO Chile. https://research.csiro.au/gestion-copiapo/wp-content/uploads/sites/216/2018/01/039-Informe-Final-22-04-2016_COMPLETO_2.0.pdf
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Burger, F., Brock, B., & Montecinos, A. (2018). Seasonal and elevational contrasts in temperature trends in Central Chile between 1979 and 2015. *Global and Planetary Change*, 162, 136–147. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.005>
- Castro, L., & Gironás, J. (2021). Precipitation, Temperature and Evaporation. In B. Fernández & J. Gironás (Eds.), *Water Resources of Chile* (Vol. 8, pp. 31–60).
- COCHILCO. (2018). *Inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2014 - 2023*.
- COCHILCO. (2022). *Consumo de agua en la minería del cobre*. <https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Consumo%20de%20agua%20en%20la%20minería%20del%20cobre%202021.pdf>
- CR2. (2015). *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*.

DGA. (2004). *Cuenca del Río Copiapó*.

División de Ingeniería Hidráulica y Ambiental - DICTUC. (2010). *Análisis integrado de gestión en cuenca del Río Copiapó*.

Donoso, G. (2021). Management of Water Resources in Agriculture in Chile and its Challenges. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 48(3), 171–185. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v48i3.2328>

Donoso, G., Lictévout, E., & Rinaudo, J.-D. (2020). Groundwater Management Lessons from Chile. In *Sustainable Groundwater Management: A Comparative Analysis of French and Australian Policies and Implications to Other Countries* (pp. 481–511).

Escenarios Hídricos 2030. (FCh). (2018). *Radiografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile*. <https://escenarioshidricos.cl/wp-content/uploads/2020/06/radiografia-del-agua-1.pdf>

Fangfang, Yao., Livneh, B., Rajagopalan, B., Wang, J., Crétaux, J.-F., Wada, Y., Berge-Nguyen, M. (2023). Satellites reveal widespread decline in global lake water. *Science*. 380,743-749(2023). <https://doi.org/10.1126/science.abo2812>

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2020). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 40(1), 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>

Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3–4), 180–195. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>

Gascoin, S., Lhermitte, S., Kinnard, C., Bortels, K., & Liston, G. E. (2013). Wind effects on snow cover in Pascua-Lama, Dry Andes of Chile. *Advances in Water Resources*, 55, 25–39. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.11.013>

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. In *Journal of Hydrology* (Vol. 204). [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)

- Hernández-López, M. F., Braud, I., Gironás, J., Suárez, F., & Muñoz, J. F. (2016). Modelling evaporation processes in soils from the Huasco salt flat basin, Chile. *Hydrological Processes*, 30(25), 4704–4719. <https://doi.org/10.1002/hyp.10987>
- HÍDRICA CONSULTORES SPA. (2018). *Herramientas de Gestión y Actualización de Los Modelos Numéricos del Acuífero de Copiapó*.
- HIDROMAS CEF. (2013). *HIDROMAS CEF LIMITADA AV. NUEVA PROVIDENCIA 1881, OFICINA 1615, PROVIDENCIA ANEXO ACTUALIZACION DE LA DEMANDA HIDRICA DE COPIAPO TABLA DE CONTENIDOS*. <https://www.repositoriodirplan.cl/handle/20.500.12140/25814>
- Houston, J. (2006). Variability of precipitation in the Atacama Desert: Its causes and hydrological impact. *International Journal of Climatology*, 26(15), 2181–2198. <https://doi.org/10.1002/joc.1359>
- INE. (2017). *Resultados CENSO 2017 por país, regiones y comunas*. <http://resultados.censo2017.cl/>
- INE. (2019). Estimaciones y proyecciones de la población de Chile 2002-2035. Totales regionales, población urbana y rural. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/demografia-y-vitales/proyecciones-de-poblacion>
- Jara, F., Lagos-Zúñiga, M., Fuster, R., Mattar, C., & McPhee, J. (2021). Snow processes and climate sensitivity in an Arid Mountain Region, Northern Chile. *Atmosphere*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/atmos12040520>
- Johnson, E., Yáñez, J., Ortiz, C., & Muñoz, J. (2010). Evaporation from shallow groundwater in closed basins in the Chilean Altiplano. *Hydrological Sciences Journal*, 55(4), 624–635. <https://doi.org/10.1080/02626661003780458>
- Juliá, C., Montecinos, S., & Maldonado, A. (2008). Características Climáticas de la Región de Atacama. In F. A. Squeo, G. Arancio, & J. R. Gutierrez (Eds.), *Libro Rojo de la Flora Nativa y de los Sitios Prioritarios para su Conservación: Región de Atacama* (Vol. 3, pp. 25–42).
- Köppen, W. (1948). *Climatología: Como un estudio de los climas de la tierra* (1^o Edición en Esp.).
- Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., Tagesson, T., & Fensholt, R. (2018). Snow cover and snow albedo changes in the central Andes of Chile and Argentina from daily MODIS observations (2000–2016). *Remote Sensing of Environment*, 209, 240–252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.072>

- Mcfarlane, D., & Norgate, T. (2012). *Summary report on Copiapó water yields and demands*. <https://publications.csiro.au/rpr/download>
- Meza, F. J. (2013). Recent trends and ENSO influence on droughts in Northern Chile: An application of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Weather and Climate Extremes*, 1, 51–58. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2013.07.002>
- Montecino, H. C., Staub, G., Ferreira, V. G., & Parra, L. B. (2016). Monitoring groundwater storage in northern Chile based on satellite observations and data simulation. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 22(1), 1–15. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000100001>
- ODEPA. (2017). *Agricultura chilena: Reflexiones y desafíos al 2030*. ODEPA. https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/ReflexDesaf_2030-1.pdf
- Oyarzún, J., & Oyarzún, R. (2011). Sustainable development threats, inter-sector conflicts and environmental policy requirements in the arid, mining rich, Northern Chile territory. *Sustainable Development*, 19(4), 263–274. <https://doi.org/10.1002/sd.441>
- Partarrieu, U., Parra, A., Peña, C., Ferrada, F. K., Sepúlveda, A. V, Valenzuela, D. P., & Vergara, S. (2009). *Plan de Gestión para la Cuenca del Copiapó [Management plan for the Copiapó Basin] (Report ADM 5374)*.
- Pérez, T., Mattar, C., & Fuster, R. (2018). Decrease in snow cover over the Aysén river catchment in Patagonia, Chile. *Water (Switzerland)*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/w10050619>
- Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J. M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. In *Trends in Ecology and Evolution* (Vol. 20, Issue 9, pp. 503–510). <https://doi.org/10.1016/j.tree.2005.05.011>
- Pucha-Cofrep, F., Fries, A., Cánovas-García, F., Oñate-Valdivieso, F., González-Jaramillo, V., & Pucha-Cofrep, D. (2017). *Fundamentos de SIG (Ediljoja Cia. Ltda, Ed.; 1st ed.)*.
- Réveillet, M., MacDonell, S., Gascoin, S., Kinnard, C., Lhermitte, S., & Schaffer, N. (2020). Impact of forcing on sublimation simulations for a high mountain catchment in the semiarid Andes. *Cryosphere*, 14(1), 147–163. <https://doi.org/10.5194/tc-14-147-2020>

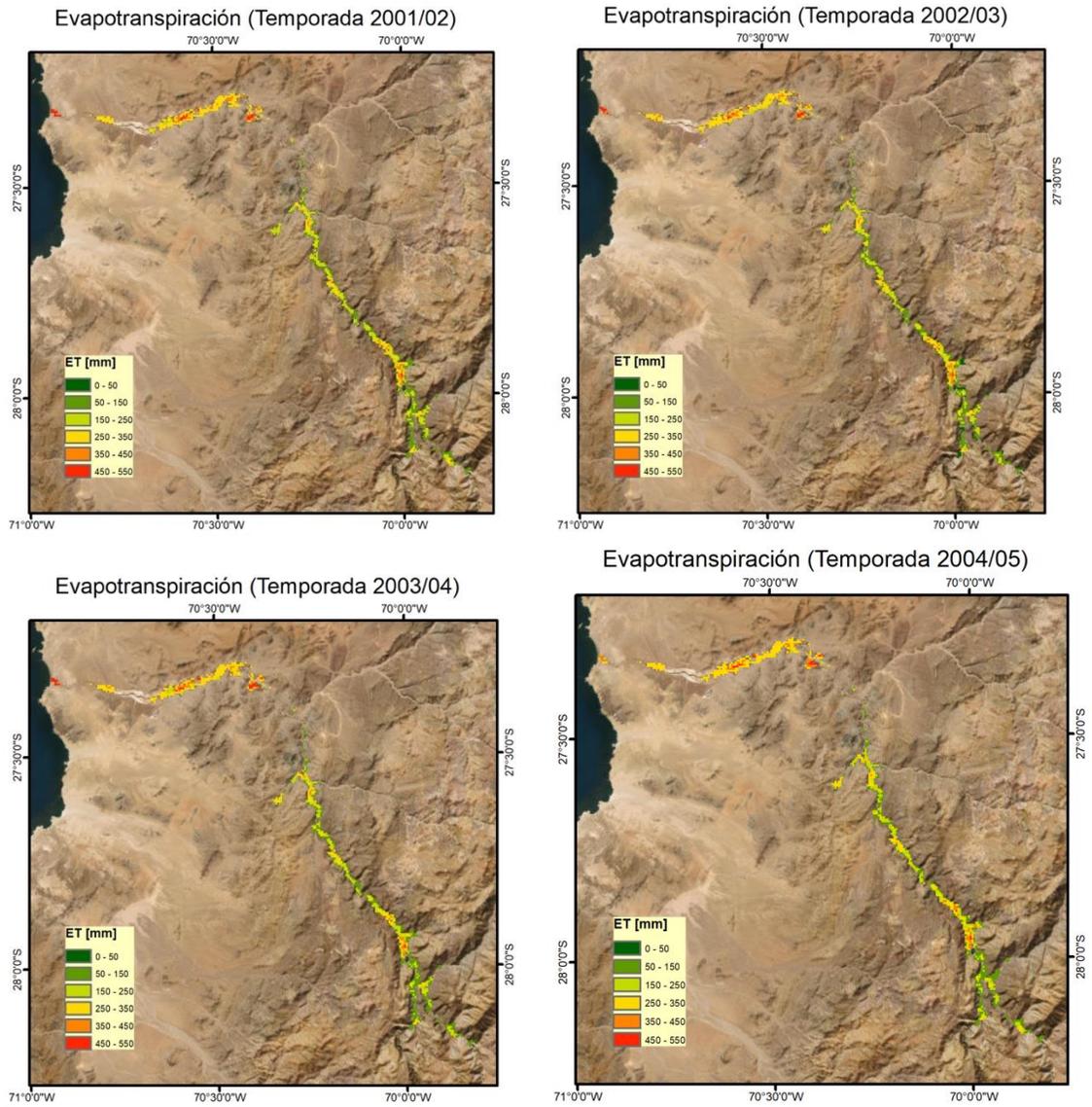
- Riggs, G. A., & Hall, D. K. (2015). *MODIS Snow Products Collection 6 User Guide*.
- Rinaudo, J. D., & Donoso, G. (2019). State, market or community failure? Untangling the determinants of groundwater depletion in Copiapó (Chile). *International Journal of Water Resources Development*, 35(2), 283–304. <https://doi.org/10.1080/07900627.2017.1417116>
- Ruiz Pereira, S. F., & Veetil, B. K. (2019). Glacier decline in the Central Andes (33°S): Context and magnitude from satellite and historical data. *Journal of South American Earth Sciences*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2019.102249>
- Saavedra, F. A., Kampf, S. K., Fassnacht, S. R., & Sibold, J. S. (2018). Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000-2016. *Cryosphere*, 12(3), 1027–1046. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1027-2018>
- Sánchez, M., & Carvacho, L. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 50, 171–186.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- Squeo, F. A., Gutiérrez, J. R., & Hernández, I. R. (2004). *Historia Natural del Parque Nacional Bosque Fray Jorge Ediciones Universidad de La Serena*. www.ceaza.cl
- Suárez, F., Muñoz, J. F., Fernández, B., Dorsaz, J. M., Hunter, C. K., Karavitis, C. A., & Gironás, J. (2014). Integrated water resource management and energy requirements for water supply in the Copiapó River basin, Chile. *Water (Switzerland)*, 6(9), 2590–2613. <https://doi.org/10.3390/w6092590>
- Toribio, G. (2019, October 25). *NDVI, ¿qué es y para qué sirve?*
- Trefry, M. G., Mcfarlane, D. J., Moffat, K., & Littleboy, A. (2012). *Copiapó River Basin Water Management: Terms of Reference for Future Governance and Research Activities Technology minerals and supply constraints View project Surface water-groundwater interaction View project*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13778.66242>
- Tucker, C. J. (1979). Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. In *REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT* (Vol. 8).

- Valdés-Pineda, R., Pizarro, R., García-Chevesich, P., Valdés, J. B., Olivares, C., Vera, M., Balocchi, F., Pérez, F., Vallejos, C., Fuentes, R., Abarza, A., & Helwig, B. (2014). Water governance in Chile: Availability, management and climate change. *Journal of Hydrology*, 519(PC), 2538–2567. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.016>
- Winsvold, S. H., Kääb, A., & Nuth, C. (2016). Regional Glacier Mapping Using Optical Satellite Data Time Series. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(8), 3698–3711. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2527063>

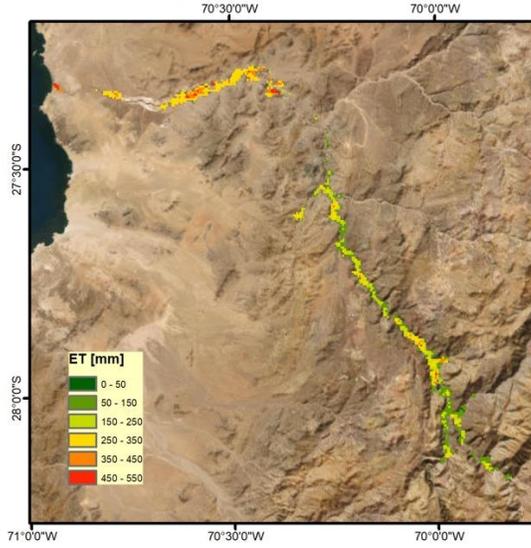
ANEXOS

A continuación, se presenta material complementario de este trabajo de investigación. Esto incluye productos satelitales de MOD10a2 y MOD16a2 de MODIS e imágenes NDVI de Landsat 5, 7 y 8.

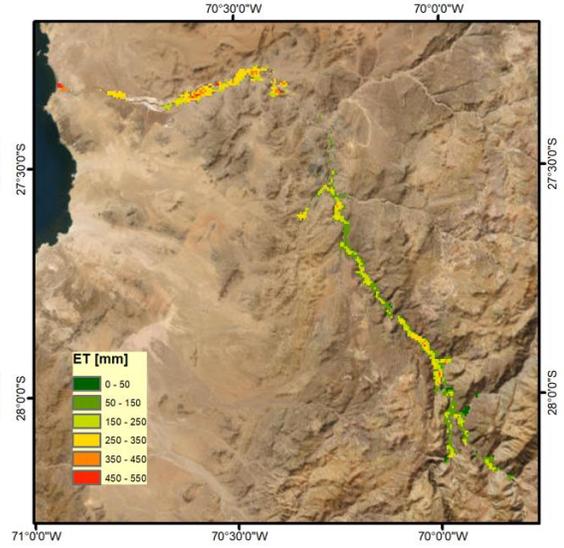
Figura A.1. Evapotranspiración por temporada. Cada pixel contiene el valor de ET_r total anual entre el 01 de septiembre y 31 de agosto.



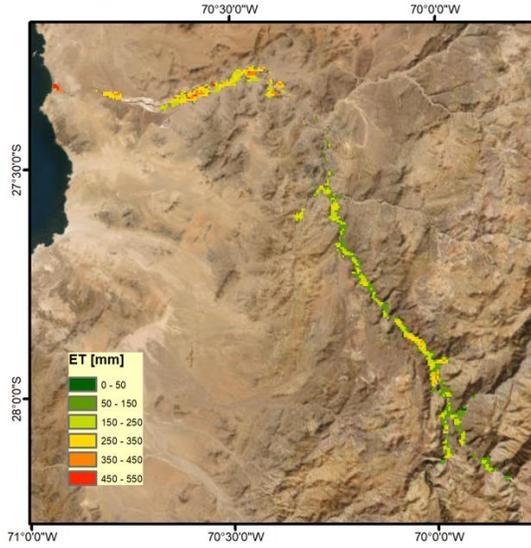
Evapotranspiración (Temporada 2005/06)



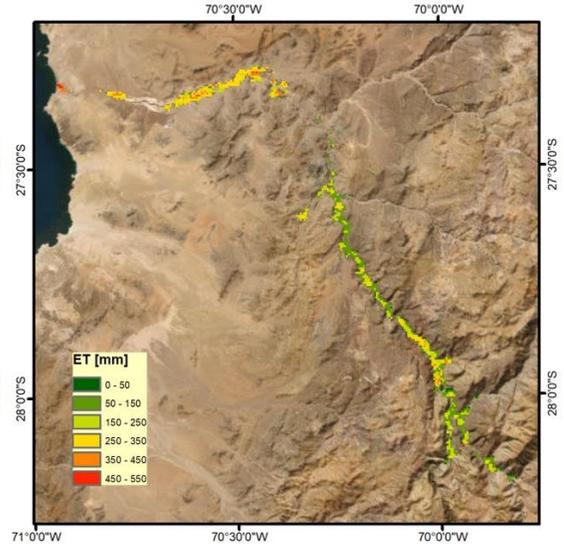
Evapotranspiración (Temporada 2006/07)



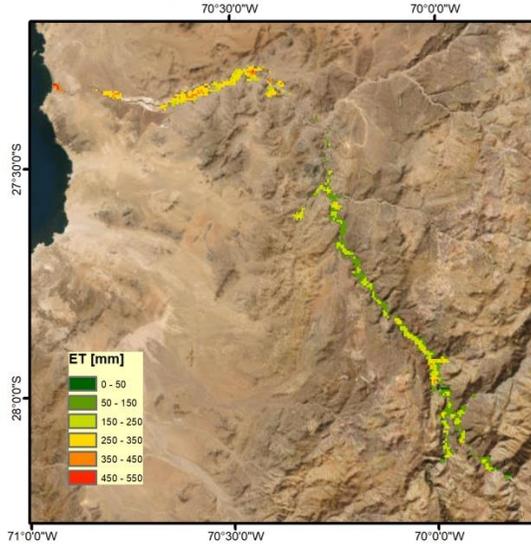
Evapotranspiración (Temporada 2007/08)



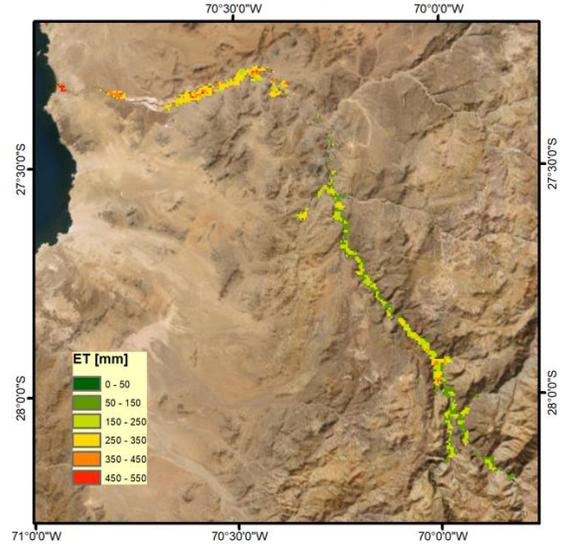
Evapotranspiración (Temporada 2008/09)



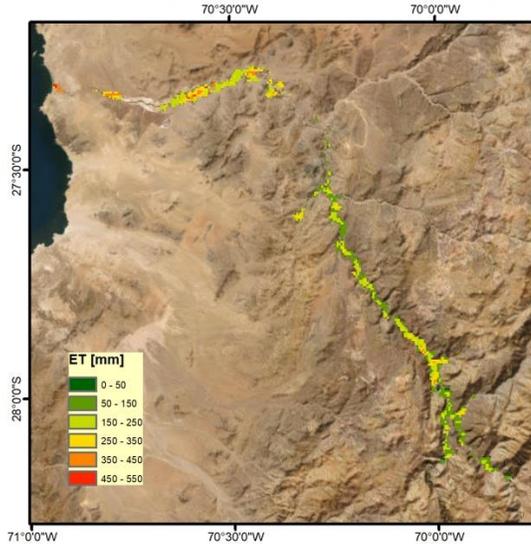
Evapotranspiración (Temporada 2009/10)



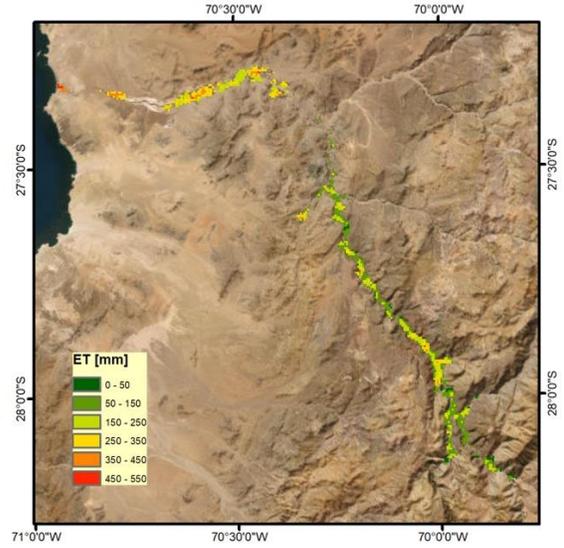
Evapotranspiración (Temporada 2010/11)



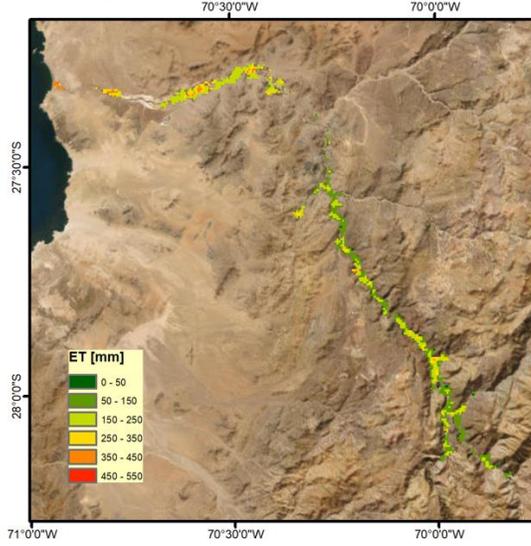
Evapotranspiración (Temporada 2011/12)



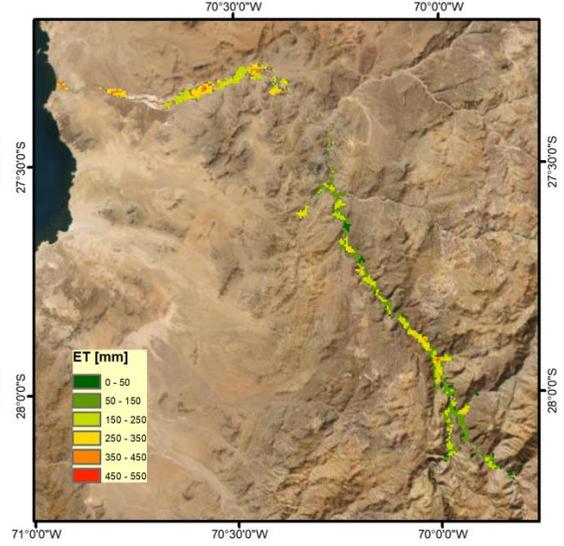
Evapotranspiración (Temporada 2012/13)



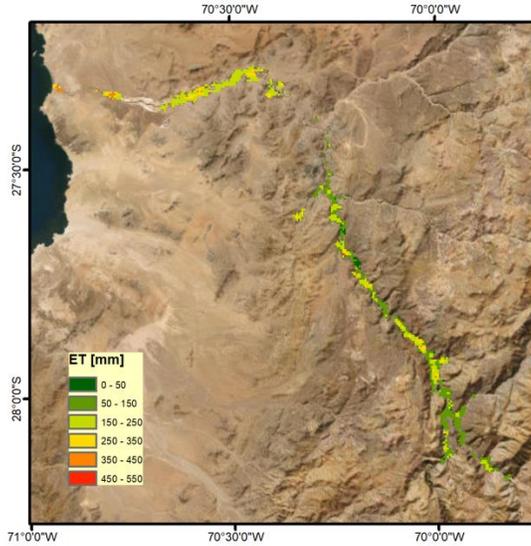
Evapotranspiración (Temporada 2013/14)



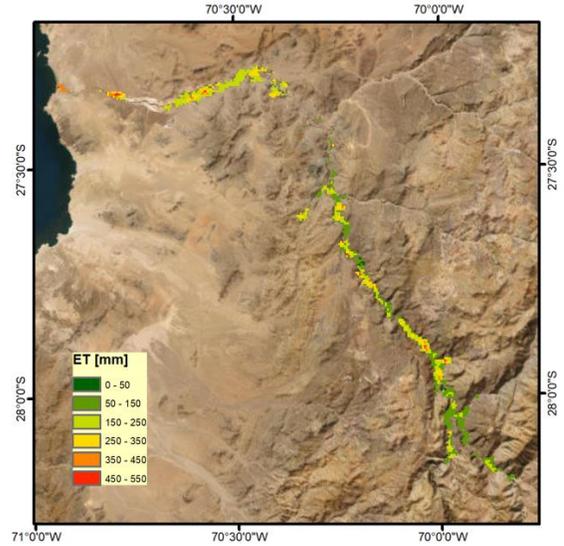
Evapotranspiración (Temporada 2014/15)



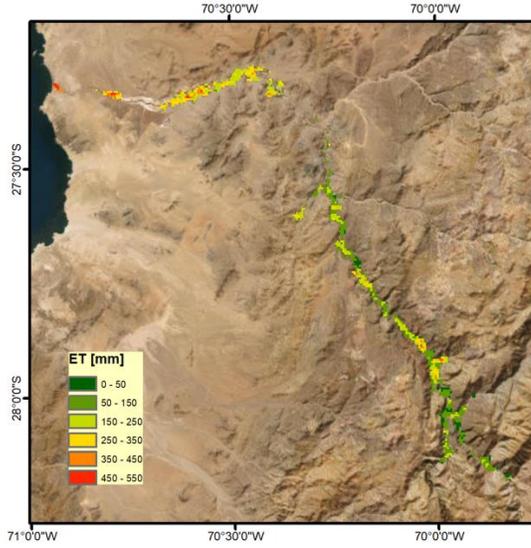
Evapotranspiración (Temporada 2015/16)



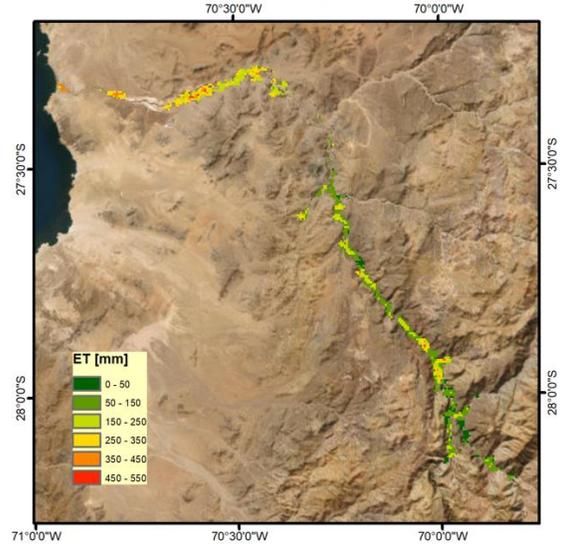
Evapotranspiración (Temporada 2016/17)



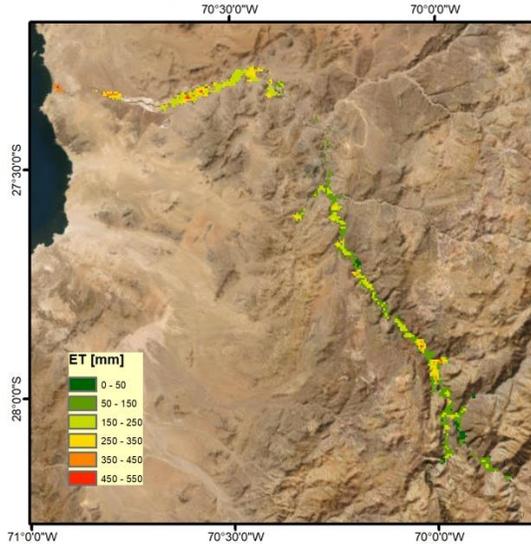
Evapotranspiración (Temporada 2017/18)



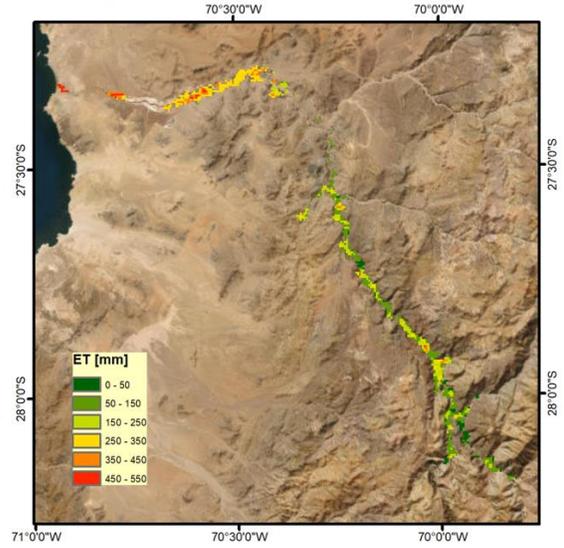
Evapotranspiración (Temporada 2018/19)



Evapotranspiración (Temporada 2019/20)



Evapotranspiración (Temporada 2020/21)



Evapotranspiración (Temporada 2021/22)

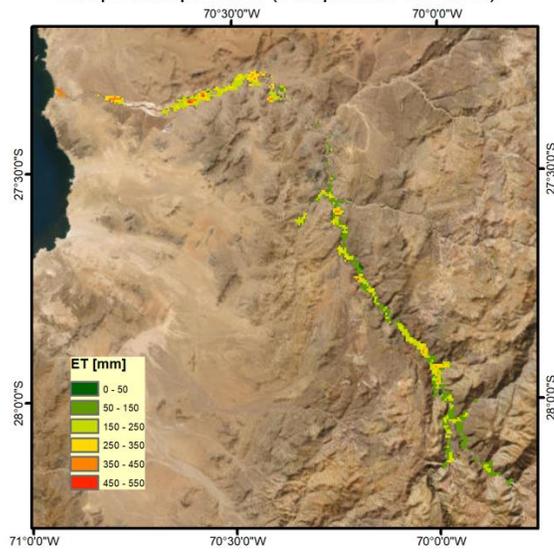
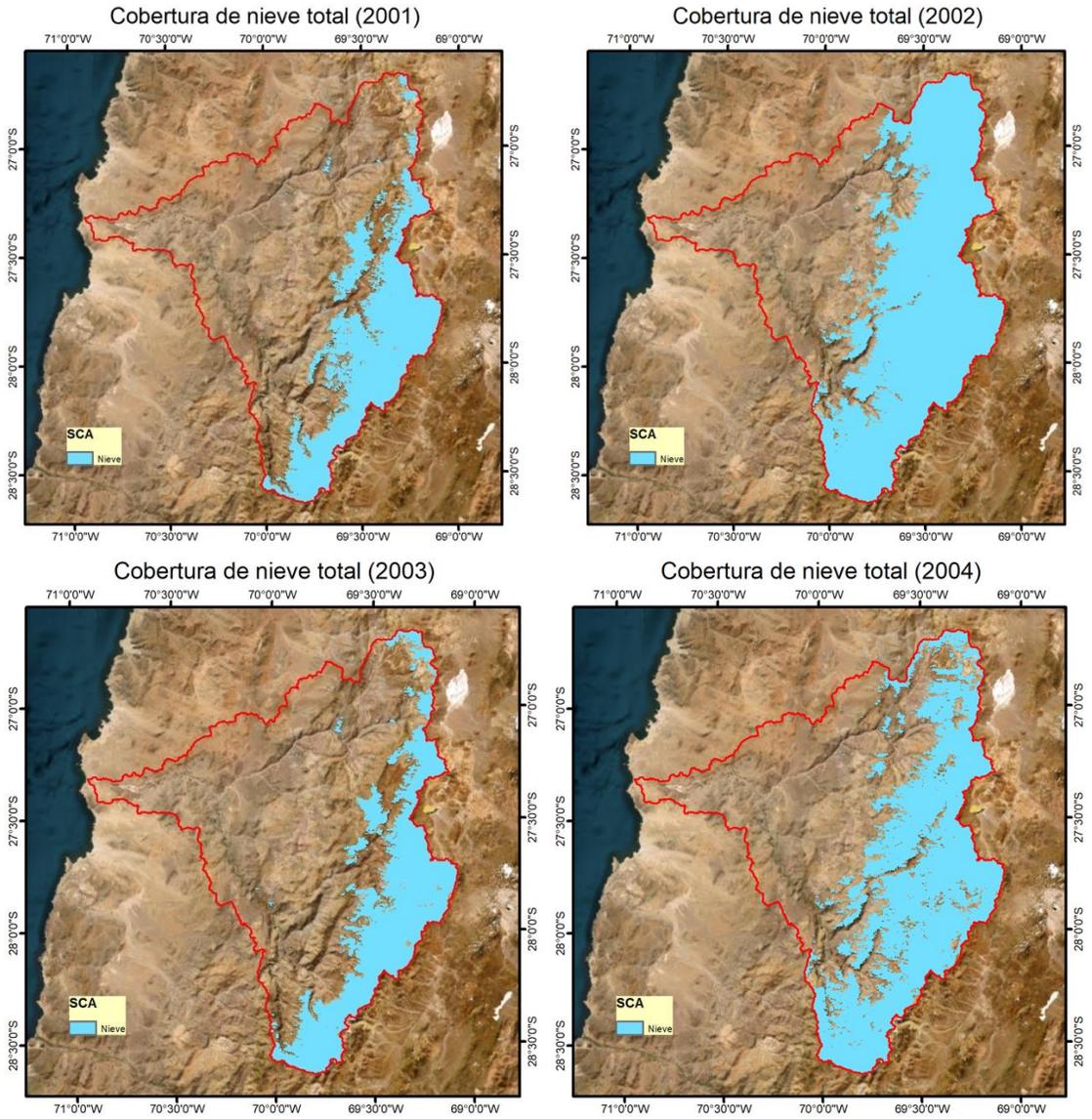
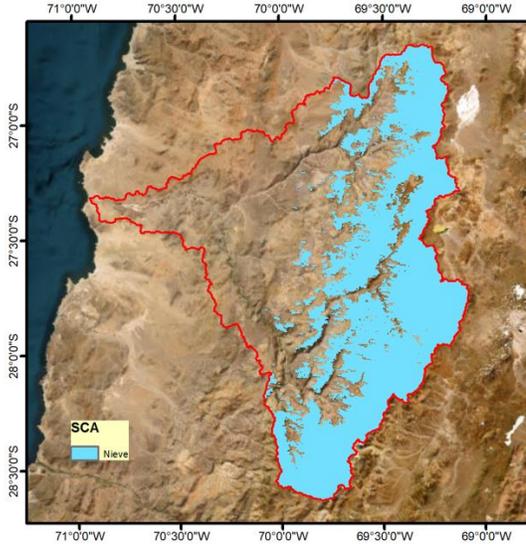


Figura A.2. Cobertura de nieve por temporada (Total).



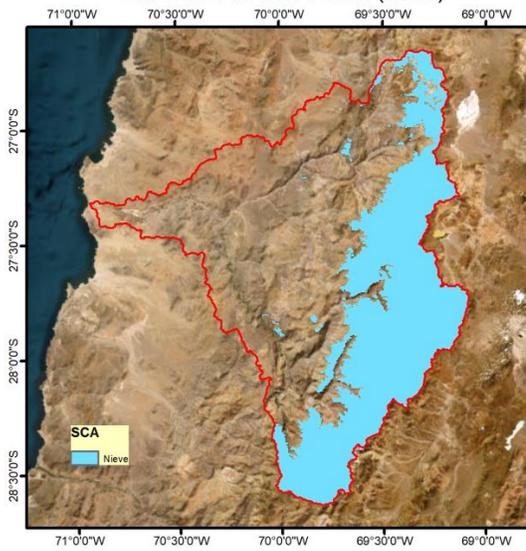
Cobertura de nieve total (2005)



Cobertura de nieve total (2006)



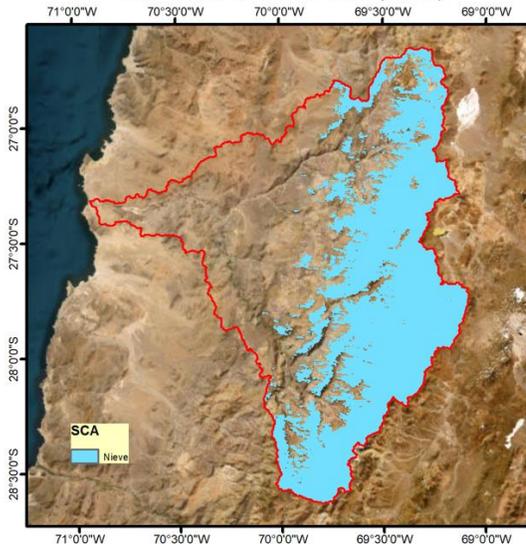
Cobertura de nieve total (2007)



Cobertura de nieve total (2008)



Cobertura de nieve total (2009)



Cobertura de nieve total (2010)



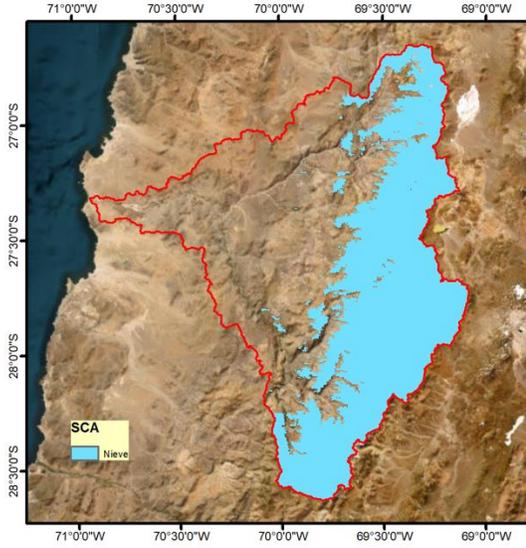
Cobertura de nieve total (2011)



Cobertura de nieve total (2012)



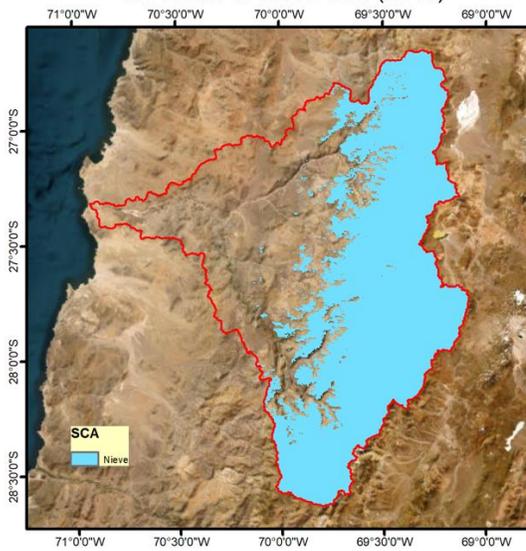
Cobertura de nieve total (2013)



Cobertura de nieve total (2014)



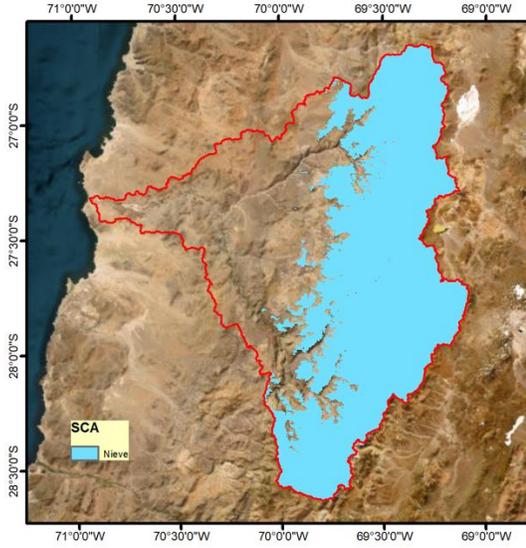
Cobertura de nieve total (2015)



Cobertura de nieve total (2016)



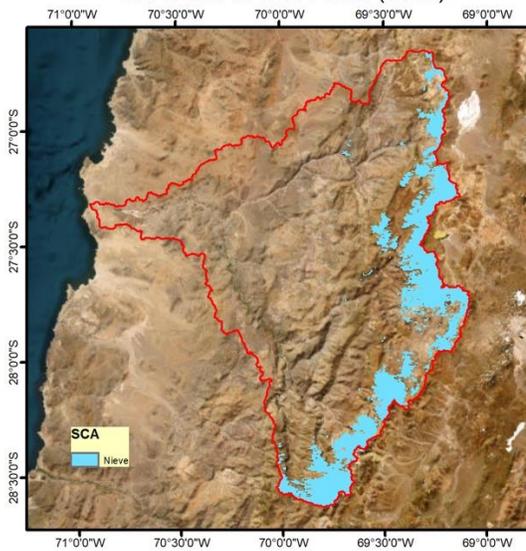
Cobertura de nieve total (2017)



Cobertura de nieve total (2018)



Cobertura de nieve total (2019)



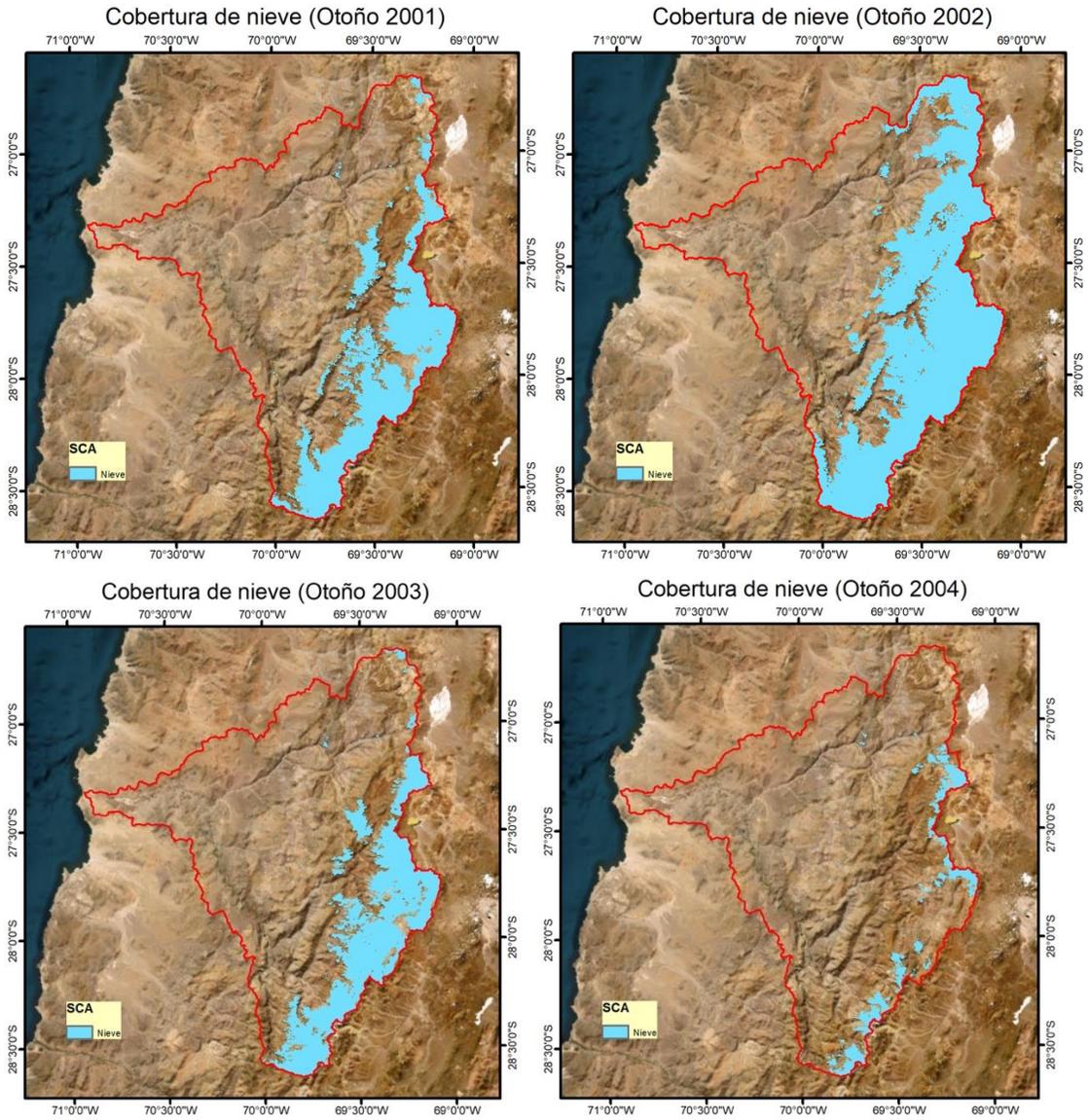
Cobertura de nieve total (2020)



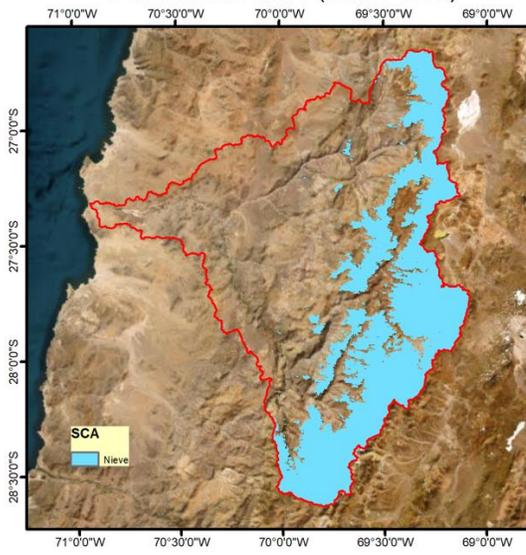
Cobertura de nieve total (2021)



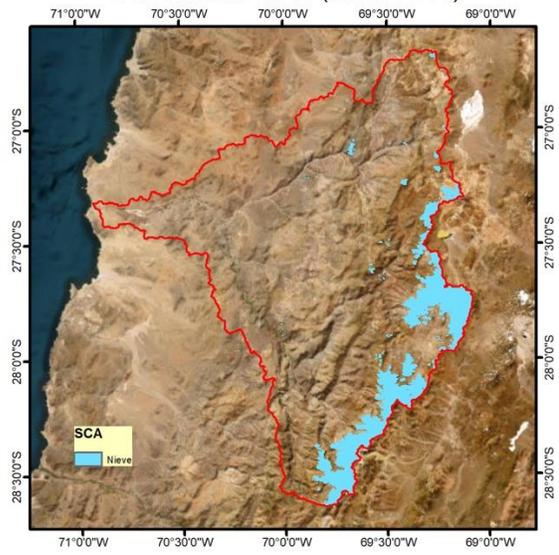
Figura A.3. Cobertura de nieve por temporada (Otoño).



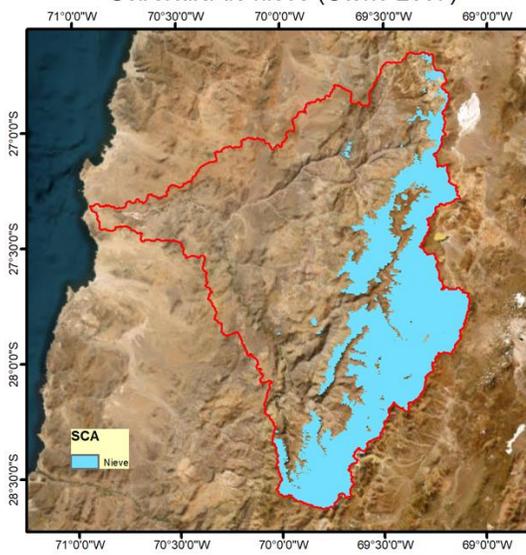
Cobertura de nieve (Otoño 2005)



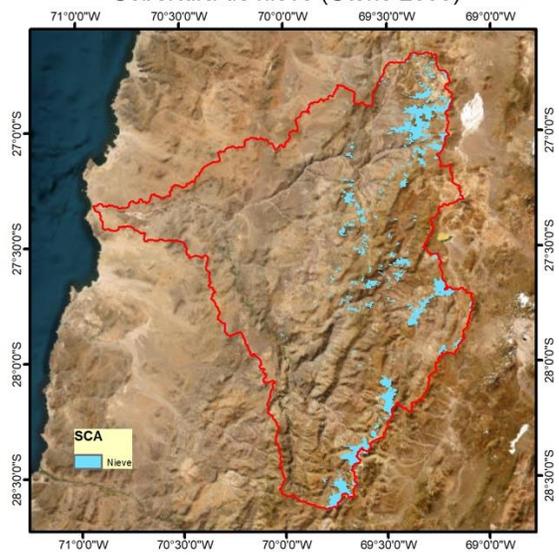
Cobertura de nieve (Otoño 2006)



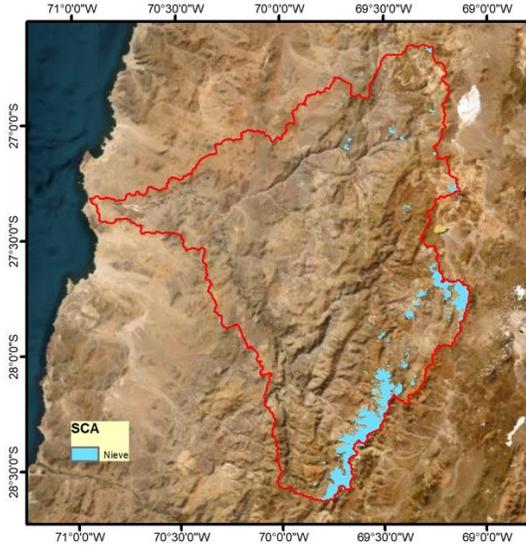
Cobertura de nieve (Otoño 2007)



Cobertura de nieve (Otoño 2008)



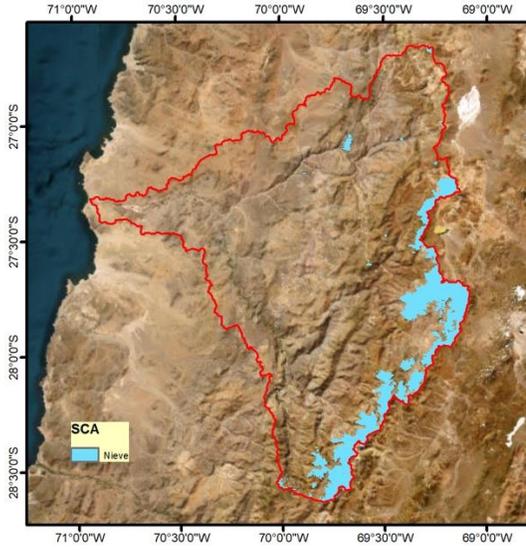
Cobertura de nieve (Otoño 2009)



Cobertura de nieve (Otoño 2010)



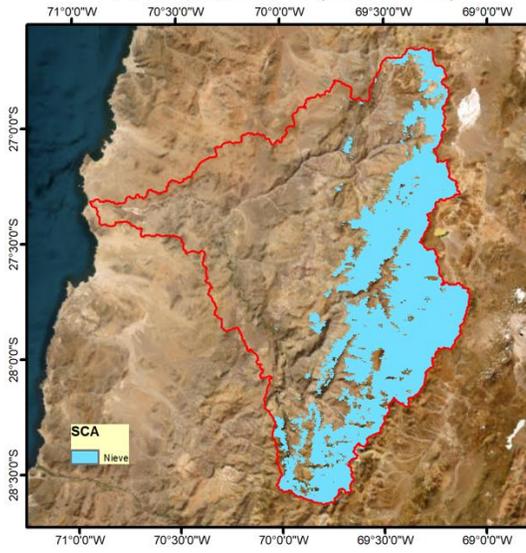
Cobertura de nieve (Otoño 2011)



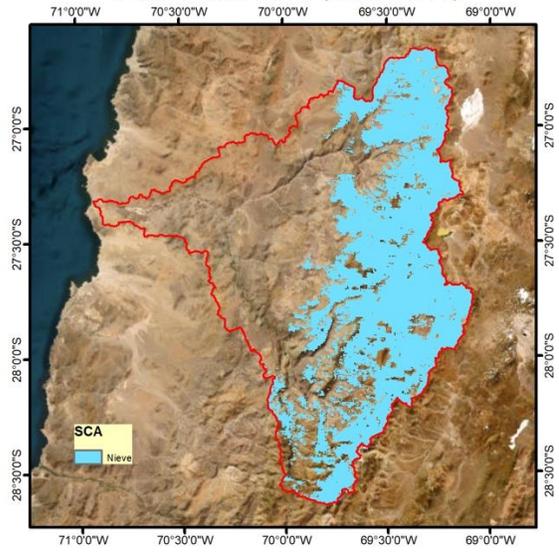
Cobertura de nieve (Otoño 2012)



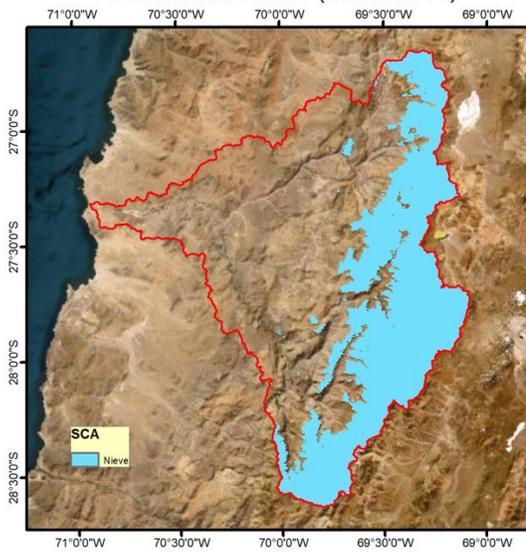
Cobertura de nieve (Otoño 2013)



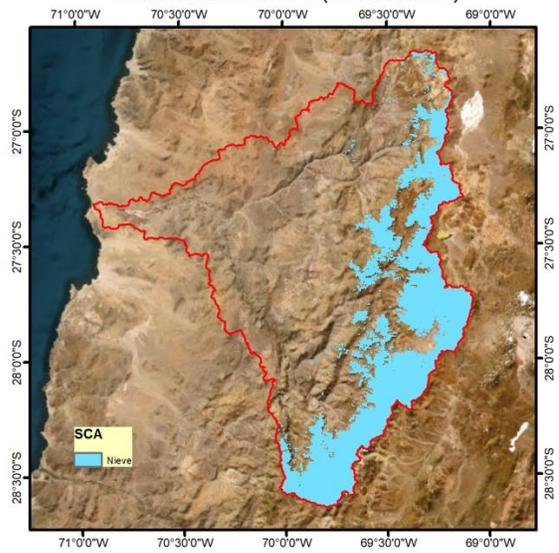
Cobertura de nieve (Otoño 2014)



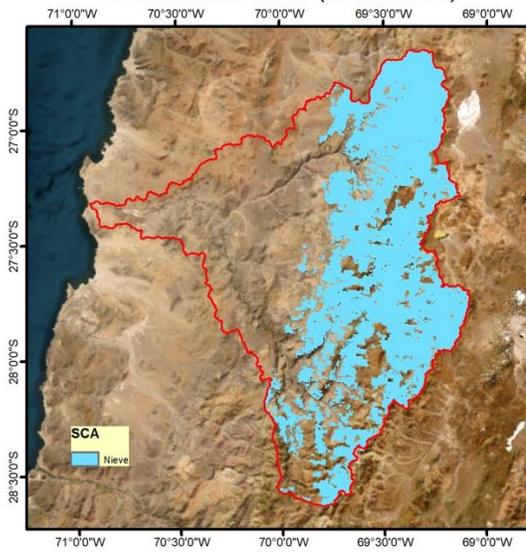
Cobertura de nieve (Otoño 2015)



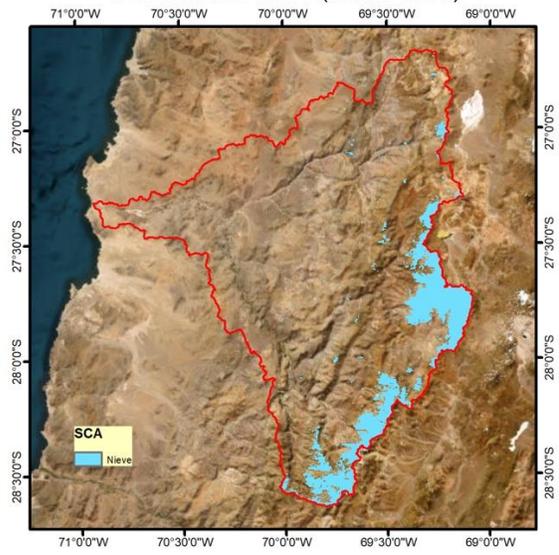
Cobertura de nieve (Otoño 2016)



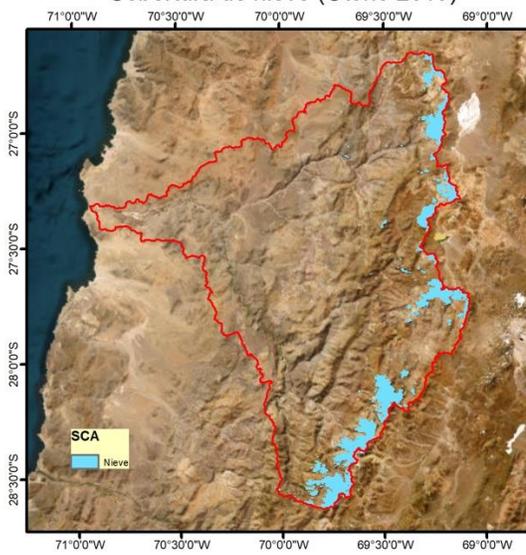
Cobertura de nieve (Otoño 2017)



Cobertura de nieve (Otoño 2018)



Cobertura de nieve (Otoño 2019)



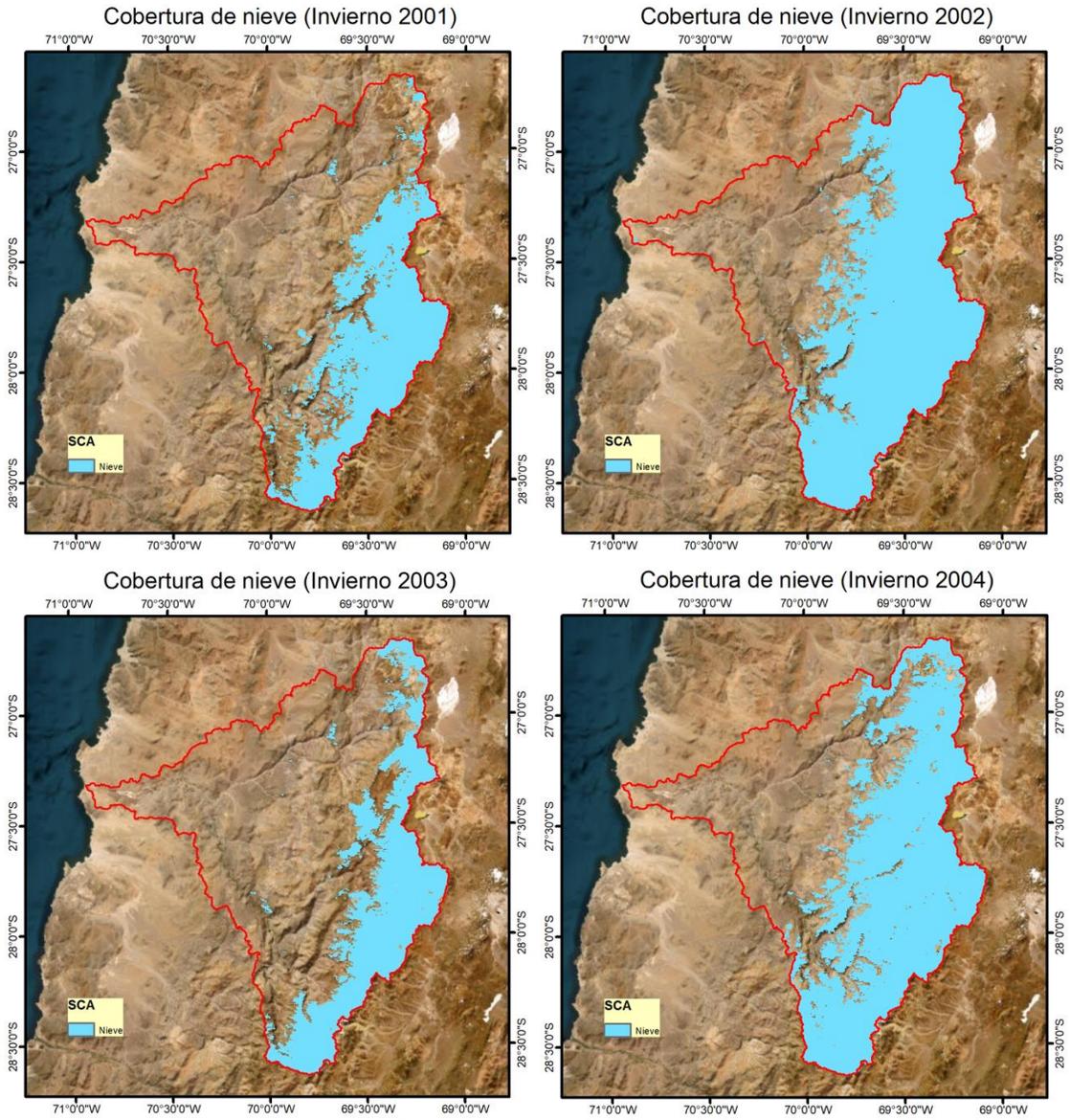
Cobertura de nieve (Otoño 2020)



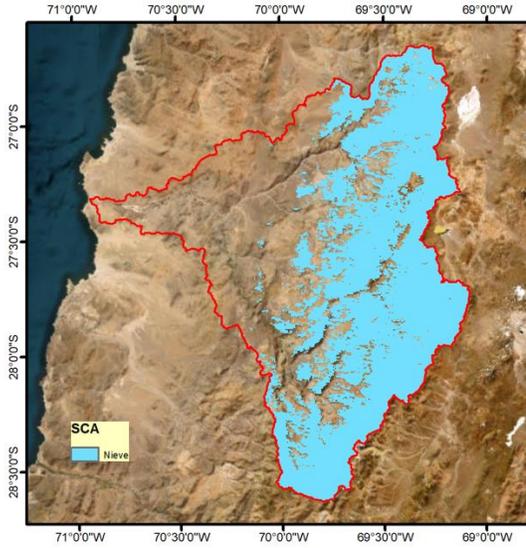
Cobertura de nieve (Otoño 2021)



Figura A.4. Cobertura de nieve por temporada (Invierno).



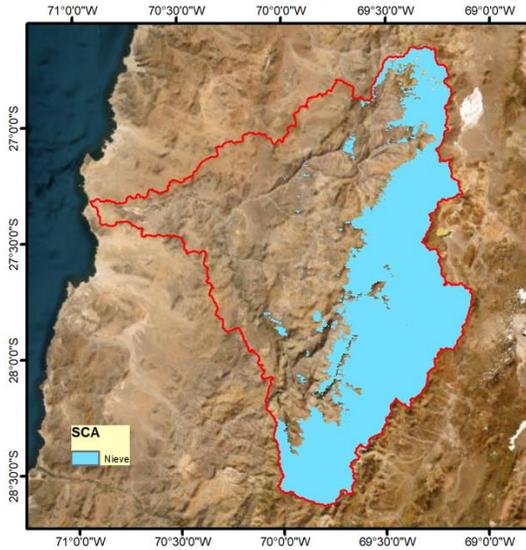
Cobertura de nieve (Invierno 2005)



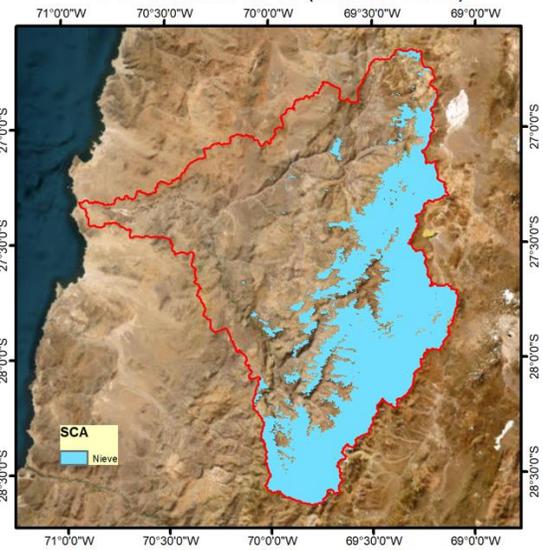
Cobertura de nieve (Invierno 2006)



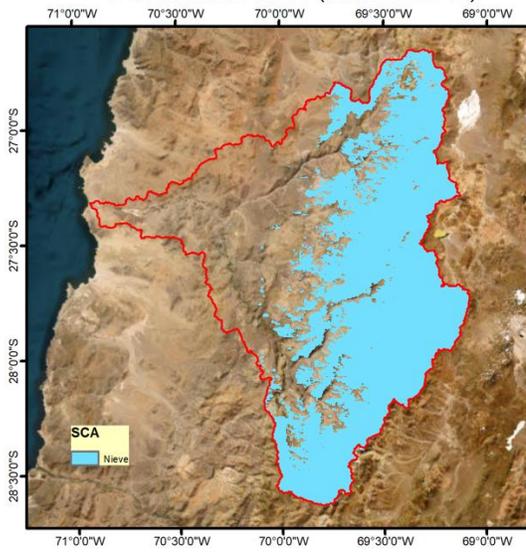
Cobertura de nieve (Invierno 2007)



Cobertura de nieve (Invierno 2008)



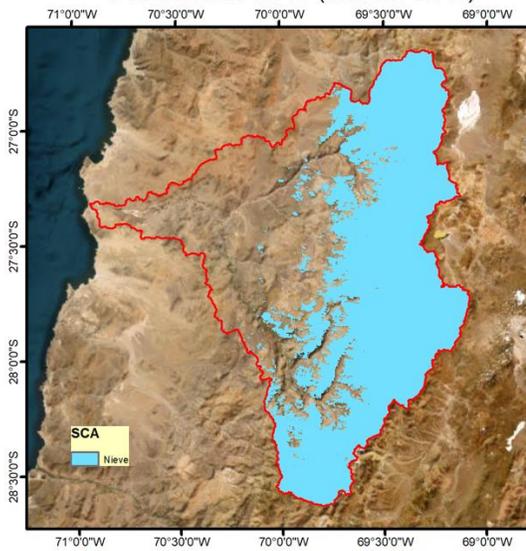
Cobertura de nieve (Invierno 2009)



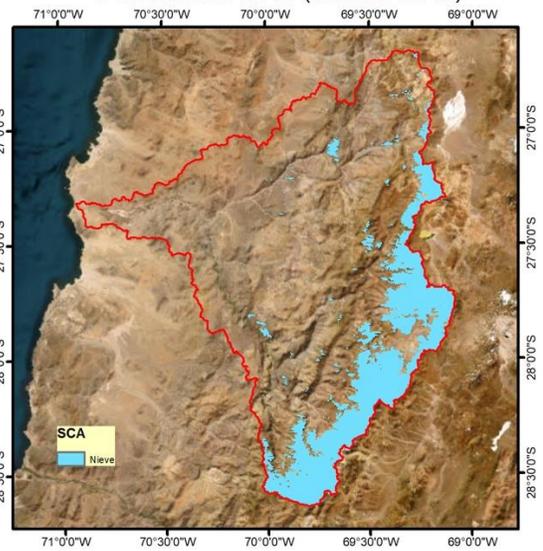
Cobertura de nieve (Invierno 2010)



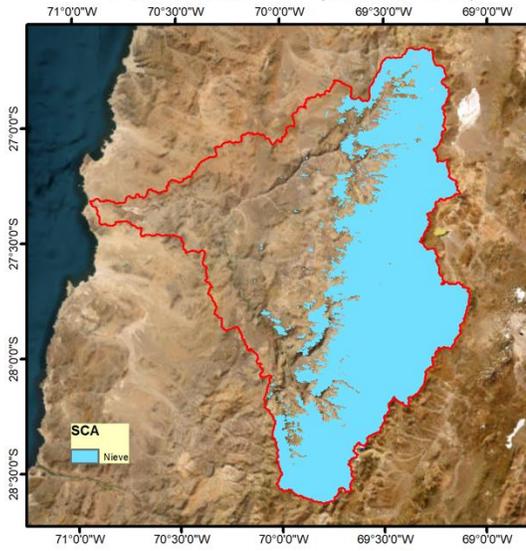
Cobertura de nieve (Invierno 2011)



Cobertura de nieve (Invierno 2012)



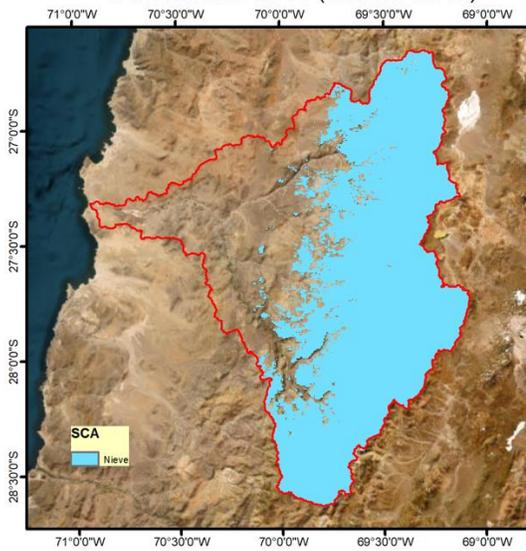
Cobertura de nieve (Invierno 2013)



Cobertura de nieve (Invierno 2014)



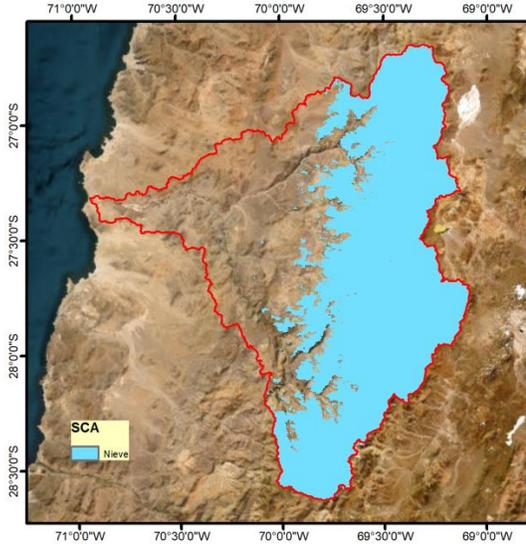
Cobertura de nieve (Invierno 2015)



Cobertura de nieve (Invierno 2016)



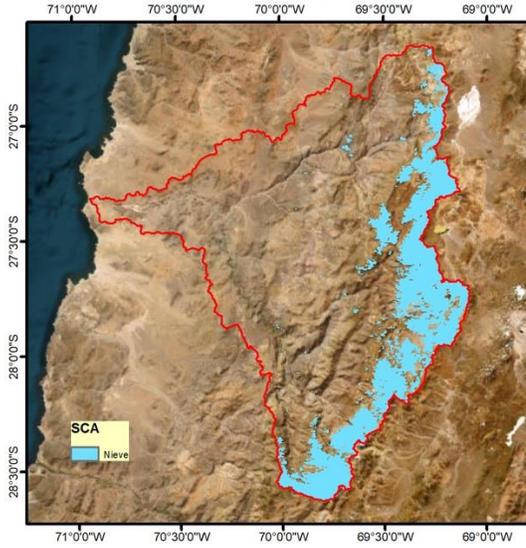
Cobertura de nieve (Invierno 2017)



Cobertura de nieve (Invierno 2018)



Cobertura de nieve (Invierno 2019)



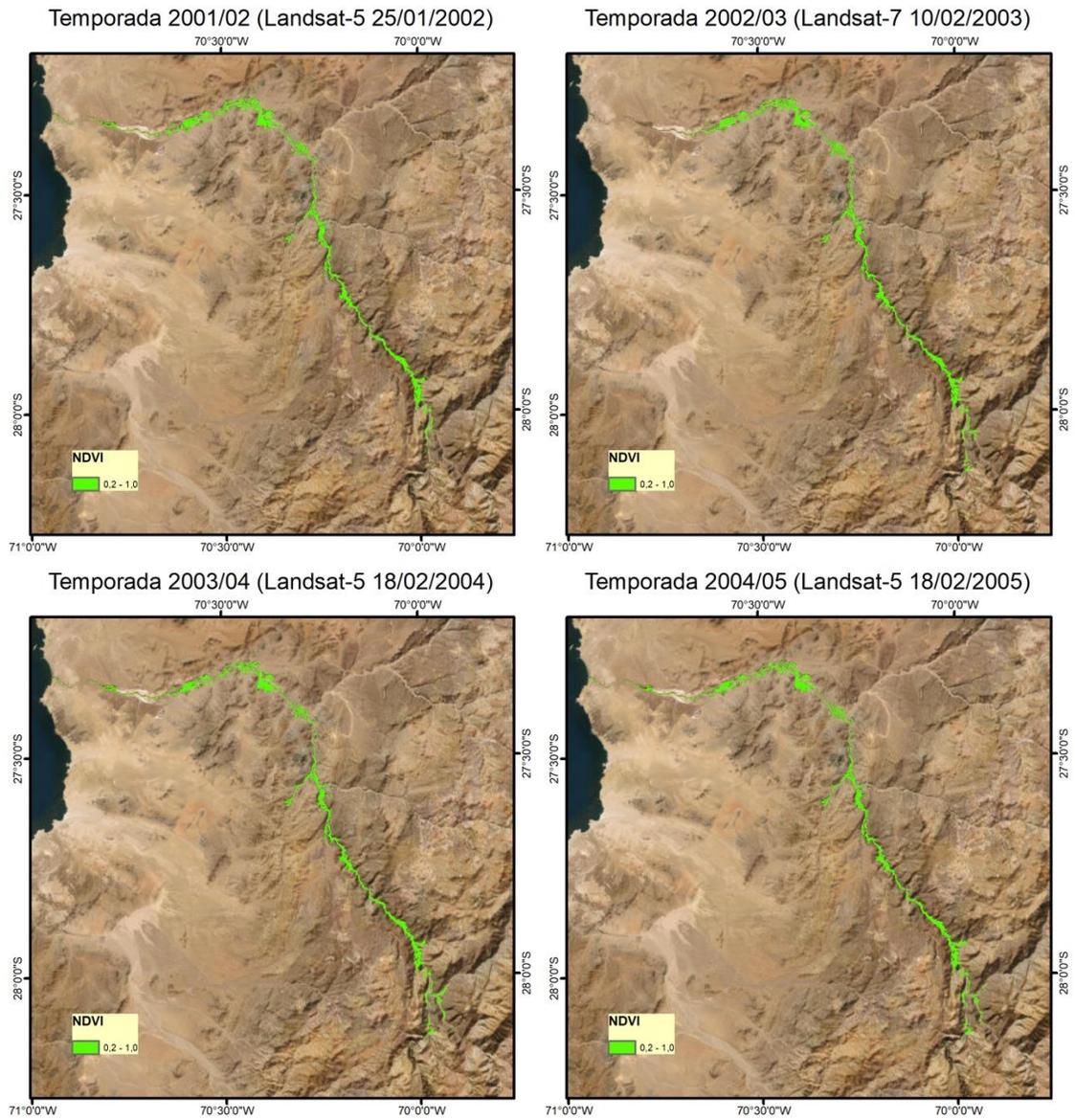
Cobertura de nieve (Invierno 2020)



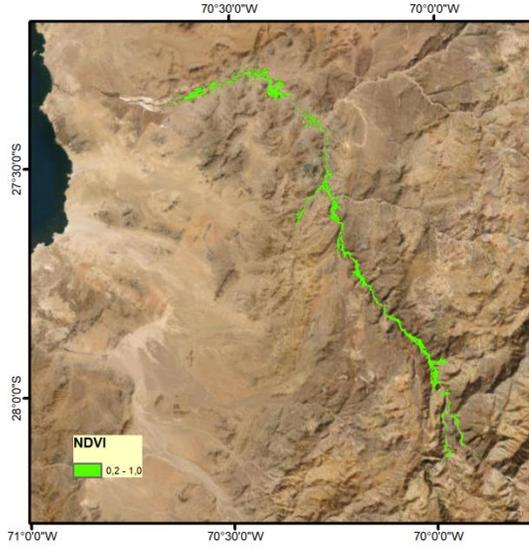
Cobertura de nieve (Invierno 2021)



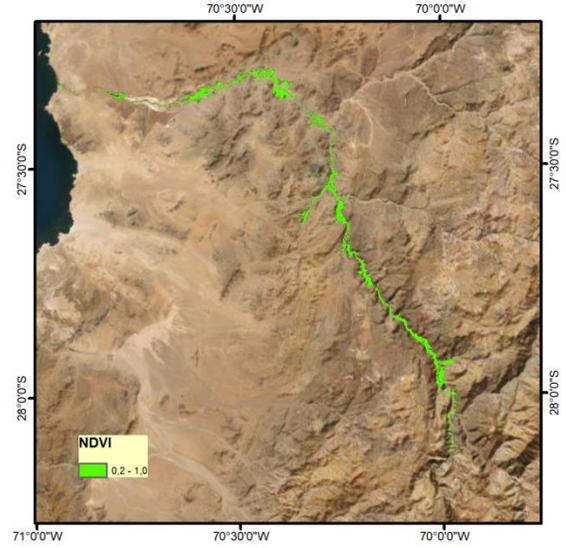
Figura A.5. Cobertura de vegetación por temporada. Los valores de NDVI igual o mayor a 0,2 fue considerado como superficie cubierta de vegetación.



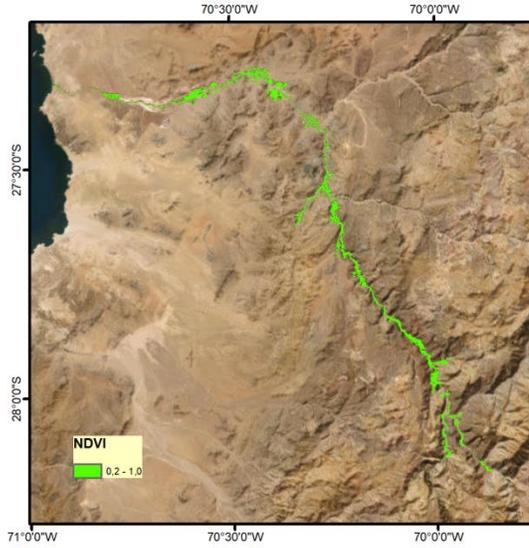
Temporada 2005/06 (Landsat-5 25/01/2006)



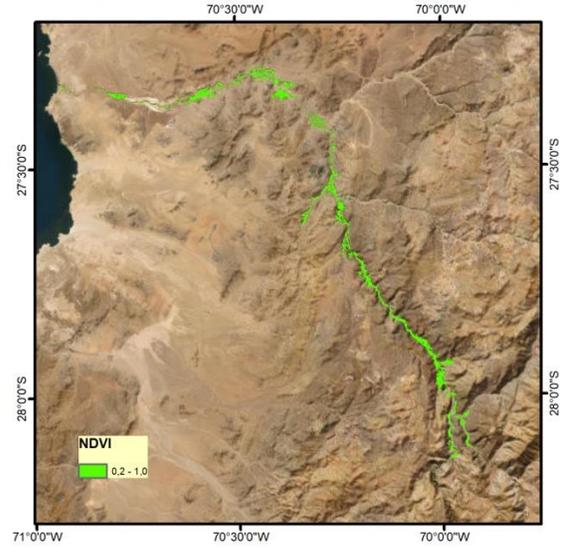
Temporada 2006/07 (Landsat-5 11/12/2006)



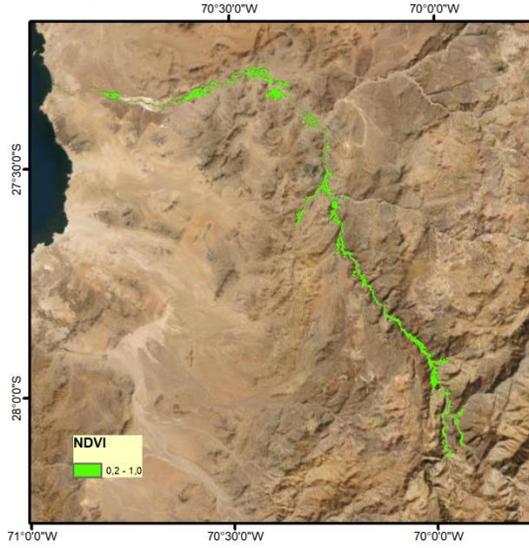
Temporada 2007/08 (Landsat-5 25/01/2008)



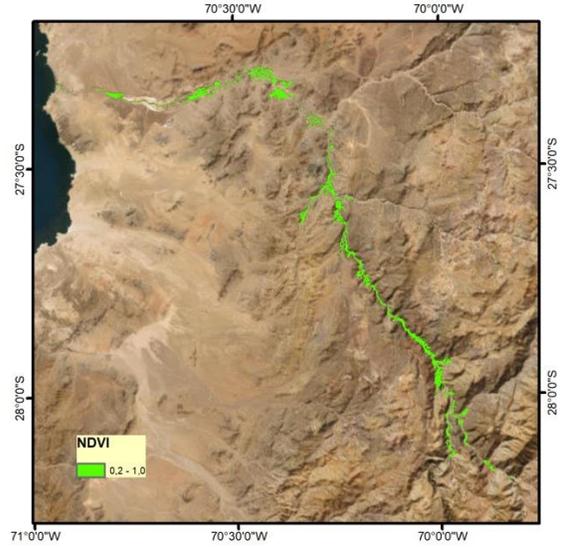
Temporada 2008/09 (Landsat-5 18/02/2009)



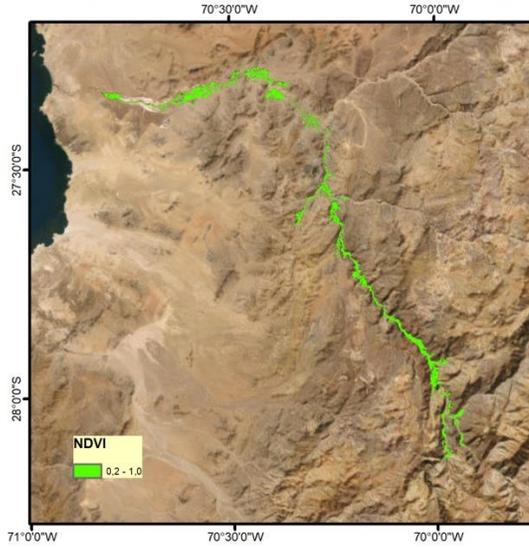
Temporada 2009/10 (Landsat-5 02/02/2010)



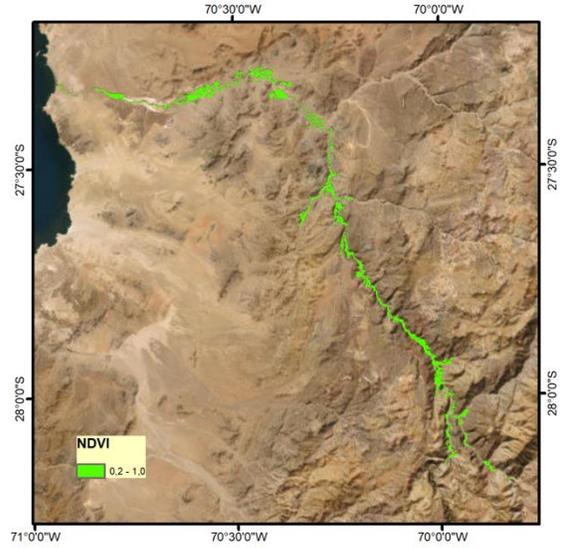
Temporada 2010/11 (Landsat-5 01/01/2011)



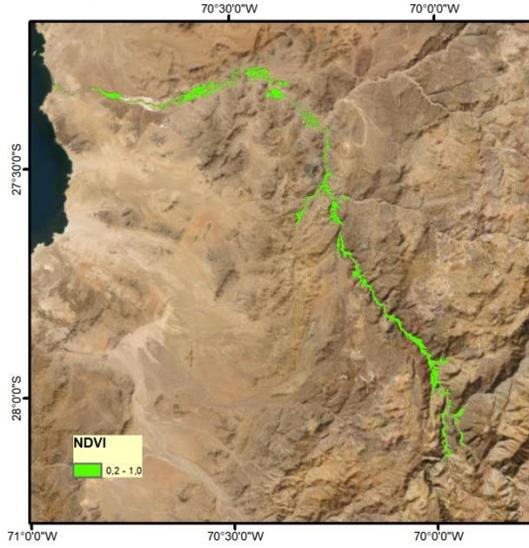
Temporada 2012/13 (Landsat-8 05/05/2013)



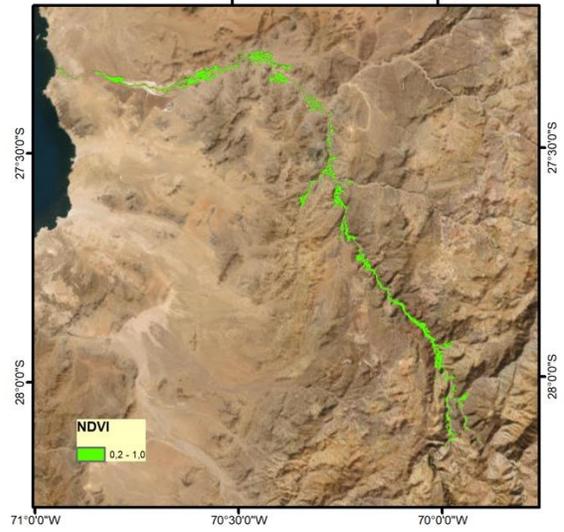
Temporada 2013/14 (Landsat-8 10/02/2014)



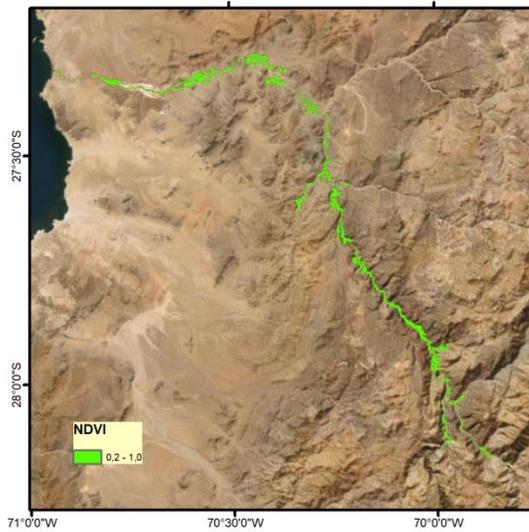
Temporada 2014/15 (Landsat-8 18/02/2015)



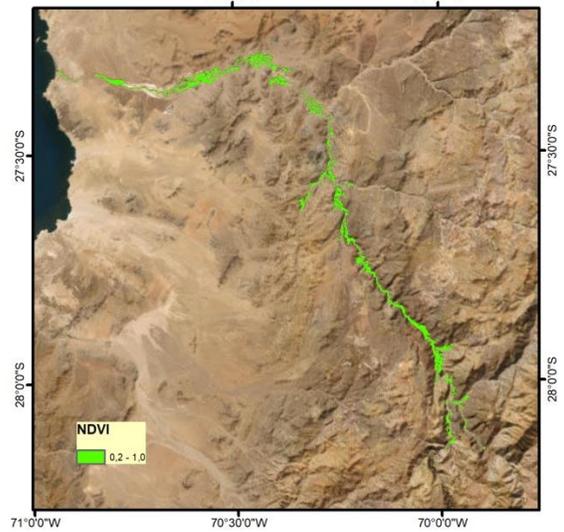
Temporada 2015/16 (Landsat-8 18/02/2016)



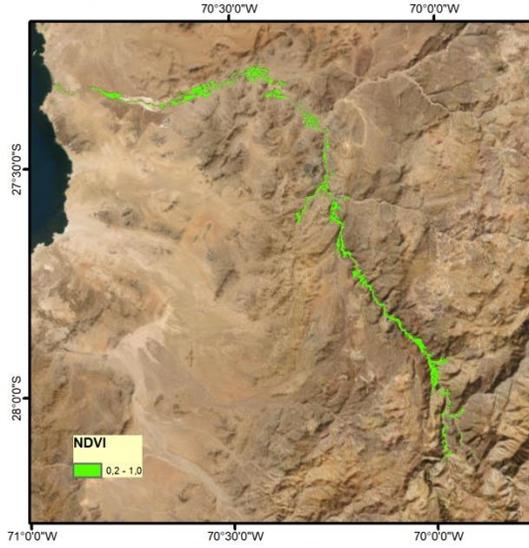
Temporada 2016/17 (Landsat-8 17/01/2017)



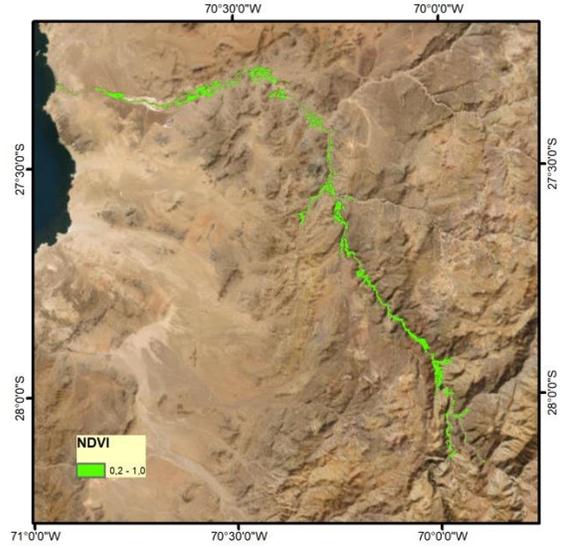
Temporada 2017/18 (Landsat-8 10/02/2018)



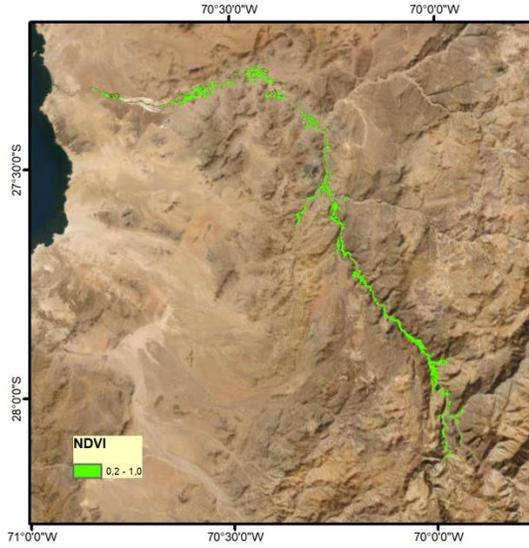
Temporada 2018/19 (Landsat-8 09/01/2019)



Temporada 2019/20 (Landsat-8 17/01/2020)



Temporada 2020/21 (Landsat-8 02/02/2021)



Temporada 2021/22 (Landsat-8 19/12/2021)

