

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ANÁLISIS DE LA COBERTURA NIVAL DE LA CUENCA DEL RÍO AYSÉN A  
PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES Y DATOS IN-SITU**

**TOMÁS PABLO PÉREZ CUEVAS**

**Santiago, Chile**

**2017**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**MEMORIA DE TÍTULO**

**ANÁLISIS DE LA COBERTURA NIVAL DE LA CUENCA DEL RÍO AYSÉN A  
PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES Y DATOS IN-SITU**

**SNOW COVER ANALYSIS OF THE AYSÉN RIVER BASIN FROM  
SATELLITE IMAGES AND IN-SITU DATA**

**TOMÁS PABLO PÉREZ CUEVAS**

**Santiago, Chile**

**2017**

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE PREGRADO**

**ANÁLISIS DE LA COBERTURA NIVAL DE LA CUENCA DEL RÍO AYSÉN A  
PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES Y DATOS IN-SITU**

Memoria para optar al Título Profesional de:  
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

**TOMÁS PABLO PÉREZ CUEVAS**

| <b>Profesor Guía</b>  | <b>Calificaciones</b> |
|---|-----------------------|
| Sr. Cristian Mattar B.<br>Ingeniero en Recursos Naturales Renovables, Dr. | 7,0                   |
| <b>Profesores Evaluadores</b>   |                       |
| Sr. Rodrigo Fuster G.<br>Ingeniero Agrónomo, M.S., Dr.                    | 6,8                   |
| Sr. Oscar Seguel S.<br>Ingeniero Agrónomo, Dr.                            | 6,8                   |

**Santiago, Chile**

**2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

Comienzo agradeciendo a mis queridos padres Bernardita y Patricio y a mi hermana Macarena, por su compañía y apoyo incondicional.

A mis amigos de toda la vida por estar siempre y a los amigos de la universidad, por vivir juntos este proceso y por todos los buenos momentos.

Agradezco al Laboratorio para el Análisis de la Biósfera (LAB) y a sus integrantes por el tiempo compartido en el laboratorio y en los terrenos. Así como a mi profesor guía Cristián Mattar por su apoyo en esta memoria y su interés en brindar herramientas para el mundo profesional.

Finalmente, agradezco el aporte parcial a esta memoria de los proyectos U-Semilla UAysén y UChile-UAysén titulado: "Variabilidad altitudinal de la línea de nieve en la cuenca del Río Aysén como respuesta al cambio climático".

## INDICE

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 1.     | RESUMEN.....   | 1  |
| 2.     | ABSTRACT.....  | 2  |
| 3.     | INTRODUCCIÓN .....   | 3  |
| 3.1    | Objetivos .....  | 5  |
| 3.1.1  | Objetivo General .....   | 5  |
| 3.1.2  | Objetivos Específicos.....   | 5  |
| 4.     | MATERIALES Y MÉTODO .....  | 6  |
| 4.1    | Área de estudio.....   | 6  |
| 4.2    | Materiales.....  | 8  |
| 4.2.1. | Datos de teledetección.....  | 8  |
| 4.2.2  | Datos in-situ .....  | 9  |
| 4.3    | Método .....   | 10 |
| 4.3.1  | Estimación de la cobertura nival mediante sensores remotos.....                  | 10 |
| 4.3.2  | Análisis de la tendencia de la cobertura nival.....                              | 12 |
| 4.3.3  | Análisis de la relación existente entre la cobertura nival y datos in- situ .    | 13 |
| 5.     | RESULTADOS Y ANÁLISIS.....   | 15 |
| 5.1.   | Estimación de la cobertura nival mediante sensores remotos.....                  | 15 |
| 5.1.1. | Post-procesamiento de imágenes satelitales.....                                  | 15 |
| 5.1.2. | Variación de la cobertura nival .....  | 17 |
| 5.1.3. | Distribución de la cobertura nival .....   | 18 |
| 5.2.   | Análisis de la tendencia de la cobertura nival.....                              | 20 |
| 5.2.1. | Anomalía de SCA .....  | 20 |
| 5.2.2. | Magnitud y significancia de la tendencia.....                                    | 24 |
| 5.3.   | Análisis de la relación existente entre la cobertura nival y datos in-situ ..... | 24 |
| 5.3.1. | Anomalía estandarizada .....   | 25 |
| 6.     | DISCUSIÓN .....  | 30 |
| 7.     | CONCLUSIONES .....   | 32 |
| 8.     | BIBLIOGRAFÍA .....   | 33 |
| 9.     | APÉNDICES.....   | 38 |

|  |    |
|--|----|
| Apéndice I: Coberturas de suelo de la cuenca del río Aysén. .... | 38 |
| Apéndice II: FSCA a escala diaria por año hidrológico. ....      | 39 |
| Apéndice III: SCA a escala mensual por año hidrológico. ....     | 42 |

### Índice de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Cuenca del río Aysén. ....  | 6  |
| Figura 2. Curva hipsométrica de la cuenca del río Aysén. ....   | 7  |
| Figura 3. Estaciones meteorológicas y fluviométricas en la cuenca del río Aysén. ....   | 10 |
| Figura 4. Composición de la interpolación temporal. ....  | 11 |
| Figura 5. Ejemplo de post-procesamiento de imagen del día 4 de septiembre de 2016. ....   | 15 |
| Figura 6. Fracción promedio de píxeles cubiertos de nieve y sin información tras interpolación en el periodo 2002-2016. ....                | 16 |
| Figura 7. Variabilidad de la media mensual de SCA por año hidrológico en el periodo 2002-2016. ....   | 17 |
| Figura 8. Variabilidad de la media mensual de FSCA por año hidrológico en el periodo 2002-2016. ....  | 17 |
| Figura 9. Media anual de SCA en el periodo 2002-2016. ....  | 18 |
| Figura 10. Distribución de la media mensual de SCA por clases de altitud, orientación y pendiente en el periodo 2002-2016. ....             | 19 |
| Figura 11. Anomalías medias anuales de SCA. a) Período 2002-2016 y b) Período 2005-2016. ....   | 20 |
| Figura 12. Anomalías medias estacionales de SCA en el periodo 2002-2016. a) Otoño, b) Invierno, c) Primavera y d) Verano. ....              | 22 |
| Figura 13. Anomalías medias estacionales de SCA en el periodo 2005-2016. a) Otoño, b) Invierno, c) Primavera y d) Verano. ....              | 23 |
| Figura 14. Anomalías de la media anual de temperatura del aire (arriba), precipitación (medio) y caudales (bajo) por estación in-situ. .... | 26 |
| Figura 15. Anomalías de la media anual de temperatura del aire (arriba), precipitación (medio) y caudales (bajo) a nivel de cuenca. ....    | 27 |
| Figura 16. Anomalías estandarizadas conjuntas de SCA y datos in-situ a nivel de cuenca. ....  | 28 |
| Figura 17. Mapa de coberturas de suelo del año 2015. ....   | 38 |
| Figura 18. FSCA a escala diaria por año hidrológico. ....   | 39 |

### Índice de cuadros

|   |    |
|---|----|
| Cuadro 1. Estaciones hidrometeorológicas de la cuenca del río Aysén. .... | 9  |
| Cuadro 2. Reclasificación del producto MODIS ....                         | 11 |
| Cuadro 3. Reclasificación de factores topográficos. ....                  | 18 |
| Cuadro 4. Resumen de tendencias de SCA para el periodo 2002-2016. ....    | 24 |
| Cuadro 5. Resumen de tendencias de SCA para el periodo 2005-2016. ....    | 24 |
| Cuadro 6. Subcuencas de la cuenca del río Aysén. ....                     | 24 |
| Cuadro 7. Número de datos disponibles por estación respecto a MODIS. .... | 25 |
| Cuadro 8. Periodos e intensidad de los fenómenos El Niño y La Niña. ....  | 29 |
| Cuadro 9. Clases de coberturas de suelo. ....                             | 38 |
| Cuadro 10. SCA a escala mensual por año hidrológico. ....                 | 42 |

## 1. RESUMEN

El calentamiento global (del sistema climático) ha sido evidenciado a través de varias respuestas, como la contracción de glaciares, el retroceso del hielo marino, el aumento del nivel del mar y de la temperatura del aire, entre otras. La magnitud de estos cambios tiende a ser crítica sobre biomas extremos y prístinos. La Patagonia de Chile es una de las regiones más inhabitadas y prístinas en el mundo, así como un importante reservorio de agua dulce en un entorno de bosques perennes, lagos y fiordos. Al mismo tiempo, esta región presenta escasos y débiles registros de mediciones *in-situ* de variables ambientales, por lo que es necesario emplear información satelital para estimar las tendencias de parámetros biofísicos. El objetivo principal de esta memoria es evaluar la cobertura nival de la cuenca del río Aysén usando imágenes MODIS en el período 2002-2016. El producto MOD10 fue procesado a una resolución espacial de 500 x 500 m<sup>2</sup> a escala diaria y se realizó una interpolación de píxeles sin información mediante la combinación de imágenes de los satélites TERRA y AQUA y la aplicación de un filtro temporal y espacial para obtener una aproximación de la cobertura nival. El análisis de la serie de tiempo consistió en el test no-paramétrico de Mann-Kendall y Sen's slope de la media estacional y anual del área de la cobertura nival (SCA). La red de estaciones meteorológicas y fluviométricas disponibles en el área de estudio fue utilizada para comparar la cobertura nival con las tendencias de la temperatura del aire, precipitación y caudales en la última década. Los resultados indican que la cobertura nival presenta una tendencia decreciente de la media anual de SCA de 25,11 km<sup>2</sup>·año<sup>-1</sup> sin significancia estadística, sin embargo, si se considera los últimos doce años del periodo, la tendencia presenta significancia a una tasa de 69,17 km<sup>2</sup>·año<sup>-1</sup>. La comparación con datos *in-situ* muestra una tendencia al aumento de la temperatura media del aire y la disminución de precipitaciones y caudales, situando al año hidrológico 2016-17 como el año con anomalías estandarizadas conjuntas más negativas en el periodo. Sin embargo, la falta de estaciones *in-situ* de monitoreo de altura de nieve y la presencia de la cobertura nubosa sobre la cuenca pueden impactar las tendencias, generando algunas incertidumbres en los datos. Finalmente, esta memoria contribuye inicialmente a analizar los posibles impactos del calentamiento global evidenciado por la cobertura nival en la Patagonia de Chile.

**Palabras clave:** Cobertura nival, Temperatura del aire, MODIS, Patagonia, Chile.

## 2. ABSTRACT

Global warming (of climatic system) has been evidenced in several responses such as glacier shrinkage, sea ice retreat, sea level rise and air temperature increase, among others. The magnitude of these changes tends to be critical over pristine and extreme biomes. Patagonia-Chile is one of the most pristine and inhabited regions in the world gathered the most important fresh water reservoirs in addition to evergreen forest, lakes and fiords. Furthermore, this region presents a scarce and weak ground stations network which must be combined to satellite information to retrieve trends on biophysical parameters. The main objective of this work is to present the first assessment on snow cover over Aysen basin in Patagonia-Chile by using MODIS data from 2002-2016 period. MOD10 product was processed at  $500 \times 500 \text{ m}^2$  spatial resolution for daily basis with a no data pixels interpolation by a TERRA and AQUA images combination and a temporal and spatial cloud filter was applied to obtain a proxy indicator of snow cover. Time series analysis consisted on no-parametric test such as Mann-Kendall and Sen's slope were used in this work at seasonal and annual mean of snow cover extent (SCA). Ground meteorological network and river discharges data were also included in this work to reveal the trends of air temperature, rainfall and stream flow during the last decade. Results indicate that snow cover shows a decreasing trend in anual mean SCA of  $25,11 \text{ km}^2 \cdot \text{year}^{-1}$  with no statistical significance, however, considering the last twelve years of the period, the trend has a significance with a decreasing slope of  $69,17 \text{ km}^2 \cdot \text{year}^{-1}$ . The comparison with in situ data shows a trend to increase the mean air temperature and the decrease of precipitations and stream flows in the period, placing the hydrological year 2016-17 as the year with more negative standard joint anomalies in the period. However, the lack of *in-situ* snow depth monitoring stations in addition with the persistence of cloud cover over the basin can impact trends, creating some uncertainties in the data. Finally, this work contributes initially to analyze the possible impacts of the global warming evidenced by the snow cover in the Chilean Patagonia.

**Keywords:** Snow cover, Air Temperature, MODIS, Patagonia, Chile.

### 3. INTRODUCCIÓN

La criósfera es el componente del sistema terrestre que presenta una fracción sustancial de agua en estado sólido, incluyendo a la nieve, los ríos y lagos de hielo, el hielo marino, los glaciares, los casquetes de hielo y el suelo congelado (Vaughan et al., 2013). La criósfera almacena el 75% del agua dulce mundial y cubre aproximadamente el 10% de la superficie terrestre en forma de glaciares y casquetes de hielo, que se ubican principalmente en la Antártida y Groenlandia (Kaper y Engler, 2013).

En términos de la masa de hielo y su capacidad calorífica, la criósfera es el segundo componente más grande luego del océano y su relevancia en la variabilidad de clima se basa en sus propiedades físicas, tales como el calor latente asociado a los cambios de fase y el albedo, que tienen un fuerte impacto en el balance de energía superficial (Lemke et al., 2007). Este último, el albedo, fluctúa entre un 20 a un 85% dependiendo de la humedad y la presencia de detritos, sin embargo, está por sobre el 31% del promedio global y se ha demostrado que tiene un impacto significativo en el calentamiento global (Cuffey y Paterson, 2010; Chen et al., 2015).

El calentamiento del sistema climático y el forzamiento radiativo observado desde la década de 1950 han incrementado la temperatura de la atmósfera y el océano, ha reducido la extensión de la capa de nieve y hielo y ha elevado el nivel del mar ( $3,2 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$ ) (IPCC, 2014). La nieve y su albedo ha disminuido en la mayoría de las regiones, de manera especial en las estaciones de primavera y verano, debido a una retroalimentación positiva con la tendencia de la temperatura del aire (Bates et al., 2008). Durante las tres últimas décadas, en el hemisferio norte, el período de duración de la capa de nieve se ha mantenido estable en Norteamérica, mientras que en Eurasia ha disminuido ( $-2,6\pm 5,6 \text{ días}\cdot\text{década}^{-1}$ ) (Peng et al., 2013). Por otro lado, en el hemisferio sur, los escasos registros disponibles no permiten establecer una tendencia (Bates et al., 2008). Casi un sexto de la población mundial vive en cuencas alimentadas por glaciares y el deshielo de estos, por lo que esta variabilidad de la cobertura nival tiene un impacto importante en el abastecimiento de agua para la agricultura, la producción de energía hidroeléctrica y los riesgos relacionados a inundaciones, avalanchas y la elevación del nivel del mar (Key et al., 2015; Stern, 2008).

La nieve es una forma de precipitación sólida formada a partir del proceso de nucleación de gotas frías en la atmósfera en condición de sobresaturación, las cuales generan un estado de coexistencia, transfiriendo calor entre el vapor de agua y los núcleos fríos (Schemenauer et al., 1981). Su extensión es dependiente de los procesos de acumulación y de derretimiento, y su comportamiento está asociado a fenómenos meteorológicos de precipitación, condensación, intercambio radiativo y movimiento de masas de aire, así como a las características del terreno correspondientes a la pendiente, elevación, exposición y cobertura vegetal (Jain et al., 2009).

El monitoreo de la nieve y sus propiedades puede ser muy dificultoso, ya que los métodos convencionales de medición poseen limitaciones a grandes alturas, debido a la topografía accidentada y a las condiciones climáticas adversas. En este sentido, las imágenes

satelitales resultan ser una herramienta útil al proveer información de la nieve en zonas montañosas a intervalos regulares de tiempo (Dozier, 1989). Debido a las propiedades físicas de la nieve, esta tiene una alta reflectancia en el espectro visible (0,5 a 0,7  $\mu\text{m}$ ) y una fuerte absorción en el infrarrojo de onda corta (1,0-3,5  $\mu\text{m}$ ), que da origen al Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI, por siglas en inglés) para distinguir la nieve de otras coberturas. Esta reflectividad a la vez depende de factores como el tamaño y forma del grano de nieve, el contenido de agua líquida, la profundidad de la nieve y la presencia de impurezas (Dozier, 1989; Hall et al., 1995).

Dentro de los principales productos de nieve derivados de los sensores remotos se encuentran los mapas de extensión y albedo nival, la profundidad y tamaño del grano de nieve y el equivalente de agua-nieve (SWE, por siglas en inglés) (Dietz et al., 2012; König et al., 2001). A nivel mundial, el hemisferio norte concentra la mayor cantidad de estudios y productos satelitales disponibles, debido a que ha tenido monitoreo continuo de la cobertura nival desde 1960, mientras que en el hemisferio sur solo se ha realizado sobre regiones específicas y en la última década (exceptuando la Antártica) (Robinson et al., 1993).

En Chile se encuentra la mayor parte de la cordillera de los Andes, el cordón montañoso más largo del planeta, con una longitud aproximada de 8000 km y una altura promedio de 4000 m, pudiéndose encontrar nieve en casi toda su extensión durante la estación invernal (Barry, 2008). Dentro de los estudios de cobertura nival en el país, destaca Gascoin et al. (2013) en la zona norte y su estudio del efecto del viento en los patrones de duración de la nieve en Pascua Lama y los Andes mediante el uso de modelos de simulación de ablación. En latitudes medias, Masiokas et al. (2006) analizó la región central de los Andes e identificó una correlación positiva con el fenómeno El Niño, reflejando la importancia de las masas de aire occidentales en la regulación de la caída de nieve sobre las montañas. Por último, en la zona austral, Lopez et al. (2008) han estudiado el manto de nieve sobre el Campo de Hielo Norte, utilizando imágenes satelitales y datos meteorológicos. Sin embargo, la Región de Aysén carece de investigaciones sobre la cantidad de nieve que ha caído durante las últimas décadas y cómo esta variación podría impactar el régimen hídrico de los ríos más importantes de la región, los cuales han sido considerados en diversos proyectos hidroeléctricos (Silva, 2016). Es por esto, que en esta memoria se analizará la extensión de la cobertura nival de la Cuenca del Río Aysén y su variabilidad temporal mediante imágenes satelitales y mediciones *in-situ*.

## **3.1 Objetivos**

### **3.1.1 Objetivo General**

Analizar la variabilidad temporal de la cobertura nival de la cuenca del río Aysén en el período 2002-2016.

### **3.1.2 Objetivos Específicos**

1. Estimar la cobertura nival mediante sensores remotos
2. Analizar la tendencia de la cobertura nival
3. Analizar la relación existente entre la cobertura nival y datos *in-situ*

## 4. MATERIALES Y MÉTODO

### 4.1 Área de estudio

La cuenca del río Aysén (Figura 1) pertenece a la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo y se localiza entre los 45 y 46° de latitud sur. Posee una superficie de 11.540 km<sup>2</sup>, con un 38,3% de su superficie cubierta por bosques nativos, un 22,6% por matorral y praderas y un 13,6% por glaciares y nieve permanente (Delgado et al., 2013).

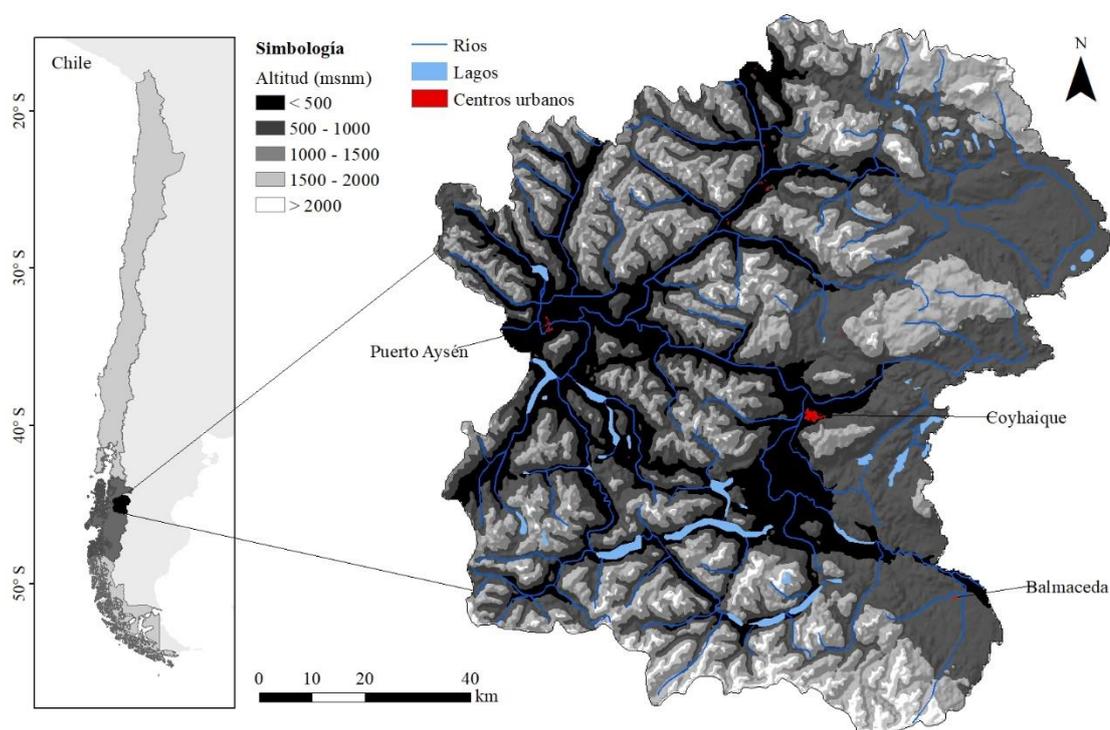


Figura 1. Cuenca del río Aysén.

El clima característico corresponde a clima frío oceánico de bajas temperaturas, con abundantes precipitaciones y fuertes vientos. Sin embargo, las características del relieve provocan una diferenciación de climas en la cuenca, en donde el sector occidental se encuentra influenciado por la presencia de islas y archipiélagos y la vertiente occidental de los Andes patagónicos, con precipitaciones medias anuales entre los 3.000 y 4.000 mm y una temperatura promedio anual que varía entre 8 y 9 °C. El sector centro de la cuenca presenta un clima de estepa fría en la vertiente oriental de los Andes Patagónicos. En el lado oriental los montos pluviométricos disminuyen hasta 621 mm anuales en Balmaceda y en la ciudad de Coyhaique a 1.385 mm anuales (Dirección General de Aguas, 2004).

La elevación de la cuenca va desde el nivel del mar hasta un máximo de 2.227 metros (Figura 2) con una pendiente promedio del 32%. La parte oeste se caracteriza por el entrecruzamiento de la cordillera de Los Andes, en donde se encuentran las mayores alturas y pendientes más abruptas, y como vegetación típica el bosque templado de lenga

(*Nothofagus pumilio*) (Torres-Gómez, et al., 2009). Por otro lado, la parte oriental presenta amplios valles y pendientes suaves, con presencia de la estepa patagónica (Rondanelli-Reyes et al., 2011).

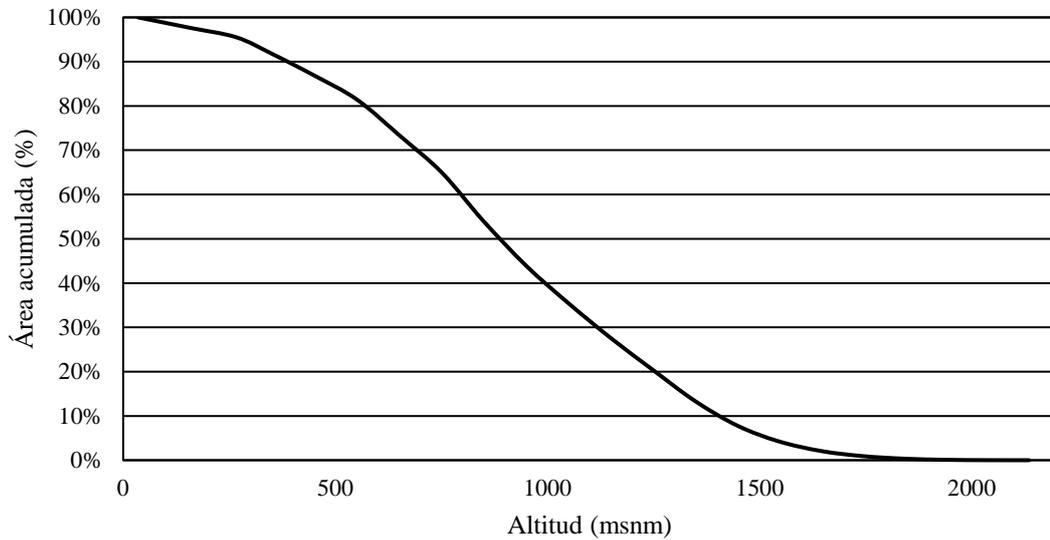


Figura 2. Curva hipsométrica de la cuenca del río Aysén.

El régimen hidrológico predominante de la cuenca es pluvio-nival, distinguiendo tres subregímenes: mixto nivo-pluvial de cauces trasandinos, mixto nivo-pluvial y nivo-pluvial regulado por lagos y glaciares. El primer subrégimen se caracteriza por un caudal que es alimentado principalmente por los deshielos; el segundo por la predominancia de la precipitación debido a factores orográficos; y el tercero, por la regulación de lagos y glaciares. En este último subrégimen se encuentra el río Blanco y otros diez lagos que producen un aumento de los caudales en época de estiaje, además se encuentran una serie de cumbres con hielos eternos (DGA, 2004). Los principales tributarios del río principal son los ríos Mañihuales, Simpson, Blanco, Coyhaique y Los Palos, que le otorgan a la cuenca un caudal promedio entre 250 y 800 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> (Bizama et al., 2011; Campuzano et al., 2008).

## 4.2 Materiales

Para el desarrollo de la investigación se distinguen dos tipos de datos dependiendo de su origen. Por un lado, se utilizaron datos de teledetección obtenidos a través de imágenes satelitales y, por otra parte, se usaron datos *in-situ* provenientes de estaciones meteorológicas y fluviométricas de instituciones públicas. Los datos analizados para ambas fuentes de información correspondieron al período 2002-2016 en forma de año hidrológico, es decir, de abril a marzo del año siguiente.

### 4.2.1. Datos de teledetección

#### ▪ Producto Snow Cover MOD10A1/MYD10A1

Los datos de teledetección que se utilizaron correspondieron a productos de criósfera generados a partir del sensor “Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer” (MODIS) y distribuidos por “National Snow and Ice Data Center” (NSIDC). El sensor MODIS posee 36 bandas espectrales desde el canal visible al térmico infrarrojo. Fue lanzado por primera vez el 18 de diciembre de 1999 sobre el satélite TERRA, y por segunda vez en el satélite AQUA el 4 de mayo de 2002.

El producto utilizado fue “MODIS Snow Cover Daily L3 Global 500 m Grid V6” que muestra el manto nival y el albedo de la nieve identificado por los satélites TERRA y AQUA, a través de los productos de nombre MOD10A1 y MYD10A1 respectivamente. Las imágenes poseen una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 500 m con una proyección sinusoidal. La cobertura nival es identificada mediante el empleo del NDSI y una serie de escenas diseñadas para discriminar la nieve de otras coberturas, así como de la cobertura nubosa que es más problemática por su comportamiento espectral (Hall y Riggs, 2016). La banda utilizada correspondió a *NDSI\_Snow\_Cover*.

El NDSI se calcula utilizando la Ecuación 1.

$$NDSI = \frac{Visible - SWIR}{Visible + SWIR} \quad (1)$$

Donde Visible corresponde al canal verde (0,545-0,565  $\mu\text{m}$ , banda 4) y SWIR al infrarrojo de onda corta (1,628-1,652  $\mu\text{m}$ , banda 6) del sensor MODIS.

#### ▪ Modelo Digital de Elevación

El modelo digital de elevación (DEM) GMTED2010 de una resolución espacial de 15 arco-segundos, se utilizó con el objetivo de obtener las variaciones de la cobertura nival en relación a las características del terreno, tales como altitud, pendiente y orientación.

#### • Mapa de coberturas de suelo

El producto “Global Land Cover Maps v2.0.7” de ESA/CCI del año 2015 y sus mapas anuales de cobertura de suelo se utilizaron para enmascarar los cuerpos de agua y la cobertura arbórea perenne que sobreestiman la identificación de nieve del producto MODIS. Los mapas poseen

una resolución espacial de 300 metros y contienen las principales clases globales y regionales de coberturas de suelo.

#### 4.2.2 Datos in-situ

- **Registros diarios de caudales, temperatura media y precipitación media**

Se utilizaron registros medios diarios de caudales ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ), temperatura del aire ( $^{\circ}C$ ) y precipitación (mm) provenientes de estaciones de la Dirección General de Aguas (DGA) y Dirección Meteorológica de Chile (DMC) para relacionar estos datos con las variaciones de la cobertura nival identificada a partir de la serie de imágenes MODIS.

En el Cuadro 1 se muestra la descripción de las estaciones hidrometeorológicas y en la Figura 3 la disposición espacial de estas en el área de estudio.

Cuadro 1. Estaciones hidrometeorológicas de la cuenca del río Aysén.

| Tipo Estación | Nombre estación                        | Variable medida              | Latitud     | Longitud    | Altitud (m) |
|---------------|--|------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Meteorológica | Balmaceda Ad. (DMC)                    | Precipitación<br>T° del aire | 45° 91' 28" | 71° 69' 42" | 517         |
|               | Coyhaique CONAF                        | Precipitación<br>T° del aire | 45° 33' 04" | 72° 03' 32" | 340         |
|               | El Balseo                              | Precipitación                | 45° 24' 13" | 72° 29' 16" | 25          |
|               | Estancia Baño Nuevo                    | Precipitación                | 45° 16' 01" | 71° 31' 45" | 700         |
|               | Puerto Aysén Ad. (DMC)                 | Precipitación                | 45° 23' 58" | 72° 40' 38" | 11          |
|               | Villa Mañihuales                       | Precipitación                | 45° 10' 24" | 72° 08' 52" | 150         |
|               | Teniente Vidal (DMC)                   | Precipitación                | 45° 35' 38" | 72° 06' 31" | 310         |
| Fluviométrica | Río Aysén en Puerto Aysén              | Caudal                       | 45° 24' 21" | 72° 37' 23" | 32          |
|               | Río Blanco antes junta Río Aysén       | Caudal                       | 45° 24' 00" | 72° 35' 60" | 21          |
|               | Río Blanco en desagüe Lago Caro        | Caudal                       | 45° 78' 33" | 72° 61' 67" | 270         |
|               | Río Mañihuales antes junta Río Simpson | Caudal                       | 45° 23' 00" | 72° 27' 60" | 20          |
|               | Río Simpson junta bajo Coyhaique       | Caudal                       | 45° 33' 06" | 72° 04' 05" | 210         |

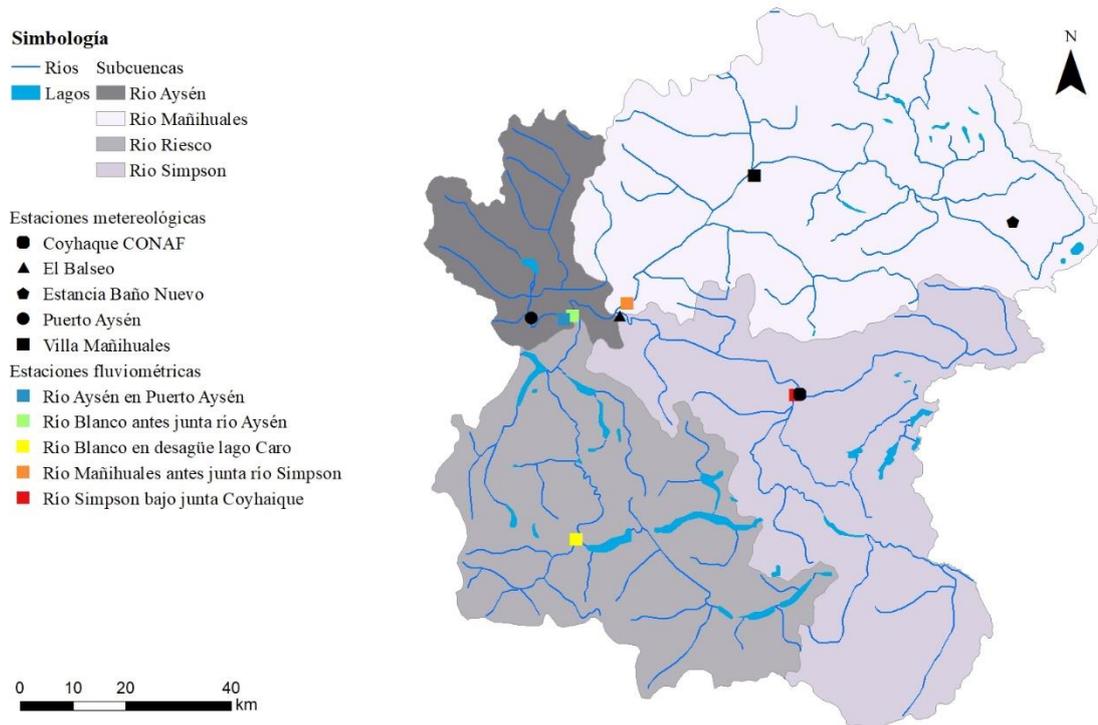


Figura 3. Estaciones meteorológicas y fluviométricas en la cuenca del río Aysén.

## 4.3 Método

### 4.3.1 Estimación de la cobertura nival mediante sensores remotos

Para estimar la cobertura nival se debió realizar el procesamiento y post-procesamiento de las imágenes satelitales del producto MODIS para ambos satélites.

**Procesamiento de imágenes satelitales.** El procesamiento de las imágenes satelitales correspondió a la selección de imágenes para las cuadrículas h12v13 y h13v13 de la región de operación de MODIS, las cuales corresponden al área de estudio. Con estas imágenes se realizaron mosaicos que debieron ser reproyectados al sistema Universal Transversal de Mercator (UTM) Datum WGS-84 Huso 19 Sur. Por último, los valores originales del producto MODIS fueron reclasificados en tres clases: nieve, sin nieve (tierra, cuerpos de agua continentales y océano) y nubes, en donde esta última corresponde a píxeles sin información, incluyendo, las clases con valores faltantes y errores generados por el sensor (Cuadro 2).

Cuadro 2. Reclasificación del producto MODIS

| Producto original |                            | Producto reclasificado |             |
|-------------------|----------------------------|------------------------|-------------|
| Valor             | Descripción                | Valor                  | Descripción |
| 1-100             | NDSI Cobertura nival       | 3                      | Nieve       |
| 200               | Datos faltantes            | 1                      | Nubes       |
| 201               | Sin decisión               | 1                      | Nubes       |
| 211               | Noche                      | 1                      | Nubes       |
| 225               | Tierra                     | 2                      | Sin nieve   |
| 237               | Cuerpo de agua continental | 2                      | Sin nieve   |
| 239               | Océano                     | 2                      | Sin nieve   |
| 250               | Nube                       | 1                      | Nubes       |
| 254               | Detector saturado          | 1                      | Nubes       |
| 255               | Lleno                      | 1                      | Nubes       |

**Post-procesamiento de imágenes satelitales.** El mapeo de cobertura nival se realizó con un umbral de NDSI  $> 0,4$  para discriminar la nieve de otras coberturas (Hall et al., 1995), y una máscara de cuerpos de agua y de bosque perenne para mejorar la identificación de nieve (Apéndice I, Cuadro 9, Clases 50, 90 y 210). Así mismo, con el fin de reducir la presencia de píxeles sin información sobre la cuenca se utilizó un algoritmo de tres pasos, basado en las metodologías propuestas por Parajka y Blöschl (2008) y Gafurov y Bárdossy (2009).

a) Combinación multiplataforma: El primer paso se basa en la combinación de imágenes de los satélites Terra y Aqua, ya que la cobertura de nubes está en continuo movimiento y ambos satélites pasan sobre el área de estudio con una diferencia en promedio de 3 horas. La regla de composición corresponde a un principio de prioridad de clases, en donde la clase nieve está por sobre la de sin nieve, y esta última por sobre la de nubes. Si sólo está presente MOD10A1 (no está disponible MYD10A1 para ese día), no hay combinación y MOD10A1 pasa directamente al siguiente paso, y viceversa.

b) Filtro temporal: El segundo paso reemplaza los píxeles cubiertos de nubes por las observaciones sin nubes más recientes dentro de una ventana temporal de 6 días (3 días previos y 3 días posteriores) (Figura 4). La reasignación de nubes a nieve (sin nieve) ocurre si los píxeles de los días próximos presentan nieve (sin nieve) hasta alcanzar una propagación de  $\pm 3$  días. La cobertura nival debiese mantenerse constante si se presenta una alta nubosidad, ya que, si bien el derretimiento de nieve puede ocurrir en días nublados, las nubes bloquean la radiación directa de onda corta, lo que reduce la energía solar disponible para el proceso de derretimiento (Da Ronco y De Michele, 2014).

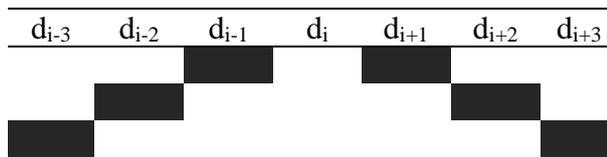


Figura 4. Composición de la interpolación temporal.

c) Filtro espacial: El tercer paso sustituye a los píxeles clasificados como nubes por las otras clases existentes de acuerdo a un filtro de mayoría en un entorno de ocho píxeles vecinos.

**Variación de la cobertura nival.** Los pixeles con nieve fueron multiplicados por un factor de conversión de 0,25 para obtener el área en km<sup>2</sup>. La cobertura nival diaria resultante se presentó como superficie cubierta con nieve (SCA, por siglas en inglés) y como superficie fraccional de la cobertura nival (FSCA, por siglas en inglés), en donde esta última se calcula de acuerdo a la Ecuación 2.

$$FSCA = \frac{SCA}{S_t} * 100 \quad (2)$$

Donde FSCA corresponde a la superficie fraccional de cobertura nival, SCA corresponde a la superficie de cobertura nival y S<sub>t</sub> corresponde a la superficie total del área de estudio.

Por último, los datos de SCA fueron agregados a escala mensual, estacional y anual para realizar análisis posteriores.

**Distribución de la cobertura nival.** A partir del DEM se calculó la distribución de SCA en función de la altitud, orientación y pendiente del terreno del área de estudio. En el caso de la altitud, se establecieron rangos de 750 m de amplitud.

#### 4.3.2 Análisis de la tendencia de la cobertura nival

**Anomalía de SCA.** El cálculo de anomalías se realizó mediante el método de Muster et al. (2015). La fórmula se presenta en la Ecuación 3.

$$xa_i = (x_i - \bar{x}) \quad (3)$$

Donde  $xa_i$  es la anomalía de SCA,  $x_i$  corresponde al valor estacional/anual de SCA, y  $\bar{x}$  al valor de la media del periodo estacional/anual de los años de la serie de tiempo.

**Magnitud de la tendencia.** El análisis de tendencias se realizó a partir de la estimación de anomalías realizadas anteriormente, en donde se calculó la pendiente entre todos los pares ordenados de una dispersión de puntos mediante el estimador Sen's slope (Ecuación 4). En las series temporales se considerará al tiempo en eje de las abscisas y a SCA en el eje de las ordenadas. Luego se determinó la mediana del conjunto de datos creados ( $m_q$ ) y el resultado correspondió a la tendencia no paramétrica de la serie de tiempo analizada (Sen, 1968; Gilbert, 1987).

$$m_q = \frac{y_j - y_i}{x_j - x_i}; i < j \quad (4)$$

Donde  $m_q$  es la serie de pendientes entre todas las combinaciones de pares ordenados y que son números naturales desde 1 hasta k (Ecuación 5).

$$k = \frac{(n)(n-1)}{2} \quad (5)$$

Donde n es el número total de pares ordenados.

**Estimación de la significancia de la tendencia.** Para estimar si existe una tendencia significativa en las series de tiempo, se utilizó el test no paramétrico propuesto por

Kendall (1975), que consiste en comparar los incrementos con los decrecimientos entre pares consecutivos registrados en fechas consecutivas.

En la Ecuación 6 se presenta el estadístico que representa el signo de la tendencia de la serie analizada. Un valor de  $t$  positivo indica una tendencia creciente y viceversa.

$$t = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{signo}(x_j - x_i) \quad (6)$$

Donde  $\text{signo}(x)$  extrae el signo de la expresión ingresada (Ecuación 7)

$$\text{signo}(x) = \begin{cases} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Cuando el estadístico  $t$  se calcula con más de diez datos, presenta una distribución normal, por lo que es posible someterlo a una prueba de hipótesis (Kendall, 1975), por lo que se debe calcular el estadístico  $z$ , que está en función de  $t$  y de su varianza (Ecuación 8).

$$\text{var}(t) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{q=1}^g tq(tq-1)(2tq+5) \right] \quad (8)$$

Para calcular el estadístico  $z$  se utilizó la Ecuación 9.

$$z = \begin{cases} \frac{t-1}{\sqrt{\text{var}(t)}} & t > 0 \\ 0 & t = 0 \\ \frac{t+1}{\sqrt{\text{var}(t)}} & t < 0 \end{cases} \quad (9)$$

El nivel de significancia del test es de 0,05, y debido que es del tipo bilateral, el rango de rechazo del estadístico  $t$  será de  $[Z_{0,025}; Z_{1-0,025}]$ .

### 4.3.3 Análisis de la relación existente entre la cobertura nival y datos in-situ

En primer lugar, se obtuvo la base de datos de estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA y DMC, con las cuales se analizó la disponibilidad de datos respecto a la cantidad de imágenes satelitales MODIS con el fin de seleccionar las estaciones con la mayor cantidad de datos. Lo anterior, se realizó con un criterio de disponibilidad de datos mayor o igual al 85%. Posteriormente, los datos hidrometeorológicos fueron agregados de forma anual y se promediaron las mediciones de las estaciones para obtener un valor representativo a nivel de cuenca hidrológica. En el caso de precipitación y de temperatura media del aire se utilizó el acumulado anual y la media anual, respectivamente, de acuerdo con la Ecuación 10. En el caso de los caudales se utilizó la media anual y la Ecuación 11.

$$\bar{P}(\bar{T}) = \frac{\sum_{i=1}^n Pi(Ti)}{n} \quad (10)$$

Donde  $\bar{P}$  corresponde a la precipitación media acumulada y  $(\bar{T})$  a la temperatura del aire media anual a nivel de cuenca,  $Pi(Ti)$  a una estación meteorológica puntual  $i$  de medición de precipitación o de temperatura del aire y  $n$  al número de estaciones existentes en la cuenca.

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Qi}{As}}{n} * At \quad (11)$$

Donde  $\bar{Q}$  corresponde al caudal medio anual a nivel de cuenca,  $Qi$  a una estación fluviométrica  $i$  de cada subcuenca,  $As$  al área de cada subcuenca,  $n$  al número de estaciones existentes en la cuenca y  $At$  al área total de la cuenca.

**Anomalía estandarizada.** La comparación entre variables ambientales se realizó mediante el cálculo de anomalías estandarizadas a través de la metodología de Méndez et al. (2010) y la Ecuación 12, con la finalidad de comparar los datos de SCA en el período en forma conjunta con los datos *in-situ*.

$$xa_{ij} = \frac{(x_{ij} - \bar{x})}{\sigma} \quad (12)$$

Donde  $xa_{ij}$  corresponde a la anomalía estandarizada,  $x_{ij}$  corresponde al valor anual de SCA/variable hidrometeorológica,  $\bar{x}$  al valor de la media anual de la serie de tiempo y  $\sigma$  a la desviación estándar anual de la serie de tiempo.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 5.1. Estimación de la cobertura nival mediante sensores remotos

#### 5.1.1. Post-procesamiento de imágenes satelitales

El análisis se realizó con un total de 5.477 imágenes en el período, con casi la totalidad de días por año, solo faltando los días 14 y 15 de abril del año 2002. Además, se cuenta con la presencia de cuatro años bisiestos (2004, 2008, 2012 y 2016), por lo que se presentan años con 365 y 366 imágenes respectivamente. En la Figura 5 se ejemplifica la utilización del algoritmo de interpolación de píxeles sin información para el día 4 de septiembre del año 2016, en donde el porcentaje de píxeles sin información de la clase nubes se reduce de un 31,82% a un 7,02% luego de los diferentes pasos realizados. Por el contrario, la cobertura nival estimada aumenta de un 6,96% a un 12,74% luego del post-procesamiento de las imágenes satelitales.

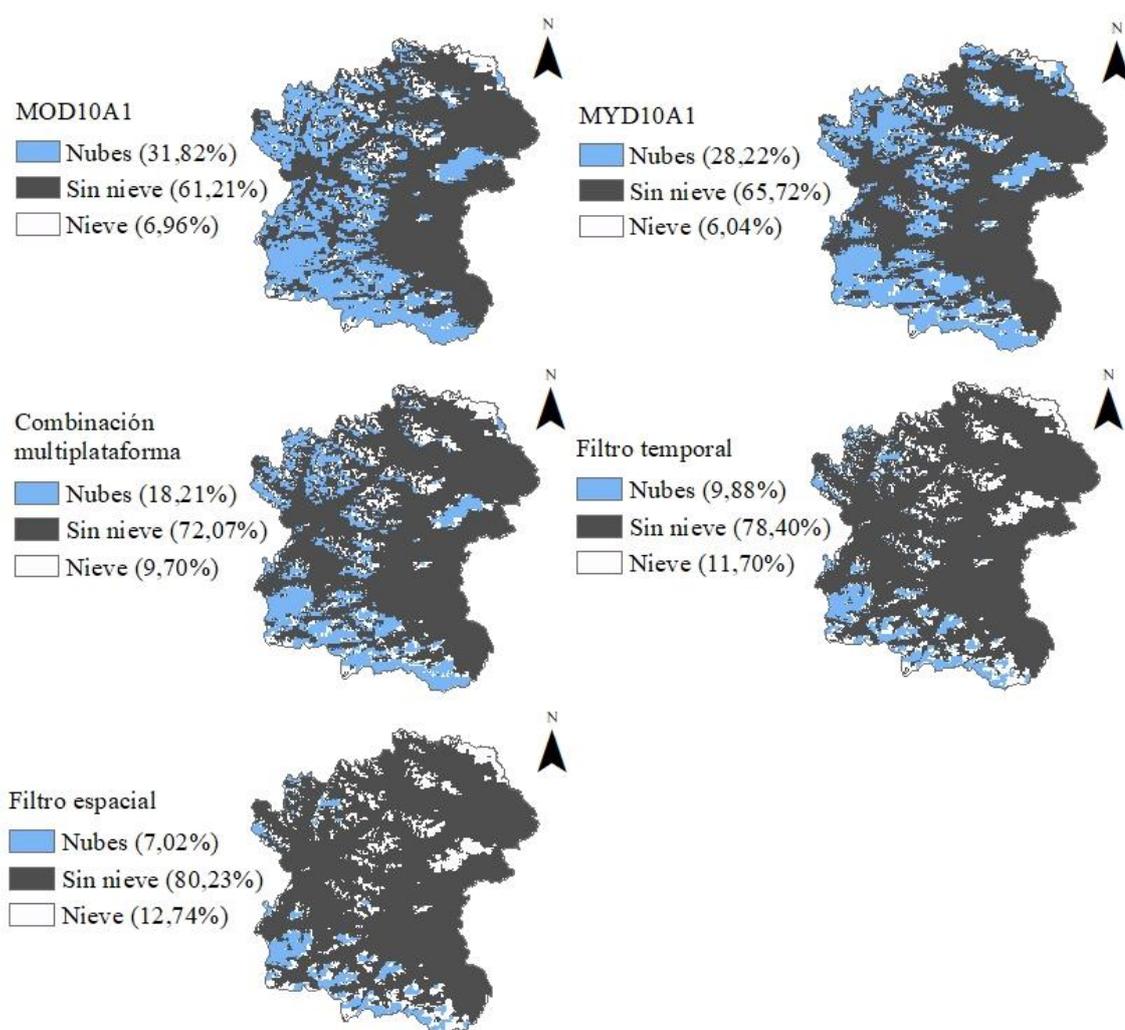


Figura 5. Ejemplo de post-procesamiento de imagen del día 4 de septiembre de 2016.

El post-procesamiento de las imágenes satelitales es necesario debido a que un análisis con imágenes directamente del satélite TERRA sin post-procesamiento presenta en promedio un 74,80% de píxeles sin información, mientras que el satélite AQUA un 74,38%. La combinación de ambos satélites disminuye alrededor de un 10% de píxeles sin información, llegando a un porcentaje promedio de 65,16%. El filtro temporal de  $\pm 3$  días reporta la reducción más significativa, con un 43,55% de reducción de píxeles sin información, siendo el paso metodológico más efectivo, pudiendo llegar a un promedio del 21,12% de nubes. El filtro espacial solo presenta una reducción del 1,90%, al reemplazar solo los píxeles con las clases nieve y sin nieve que poseen mayor frecuencia en una vecindad de ocho píxeles.

A nivel de periodo, la interpolación de datos sin información por presencia de nubes o errores del sensor permite aumentar la media de píxeles con nieve de un 1,43% que presenta el satélite TERRA a un 6,86% reportado por el filtro espacial. En la Figura 6 se presenta la efectividad de cada paso de la interpolación a nivel mensual para el periodo de estudio en forma fraccional respecto a la superficie de la cuenca.

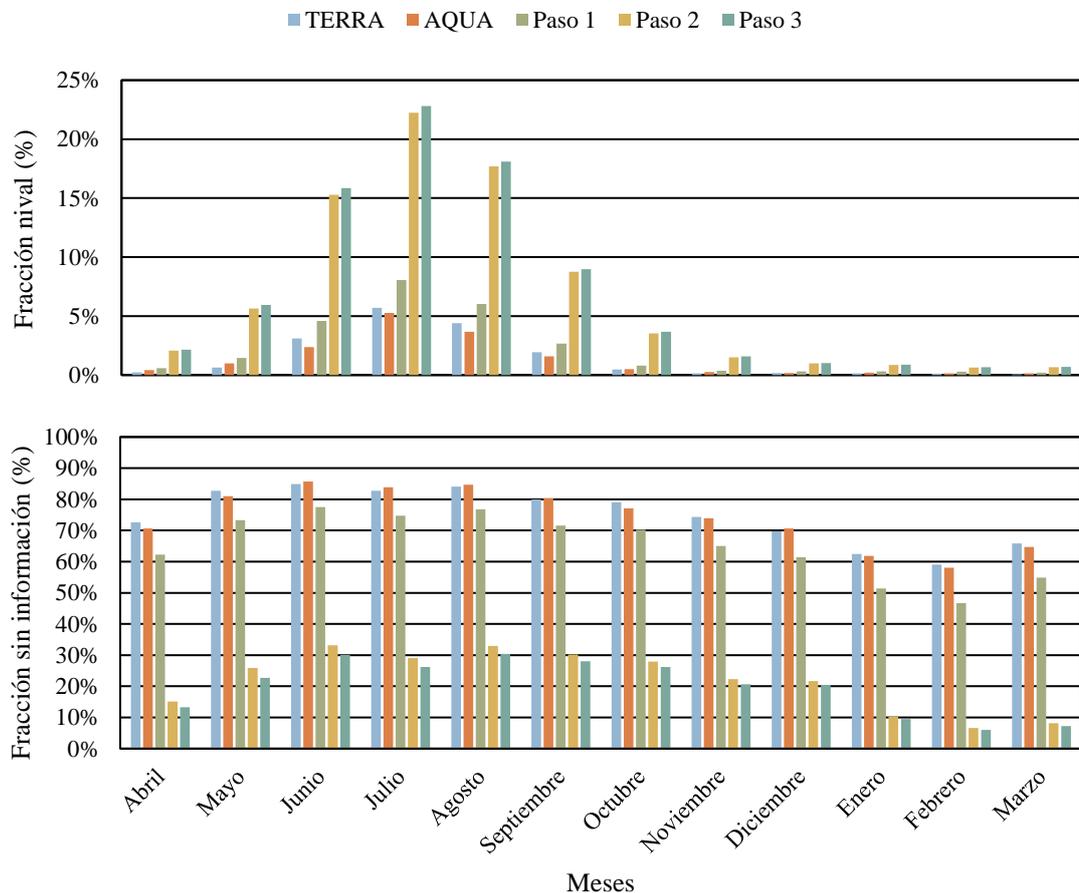


Figura 6. Fracción promedio de píxeles cubiertos de nieve y sin información tras interpolación en el periodo 2002-2016.

La interpolación de datos tras el filtro espacial muestra que la fracción promedio de píxeles sin información en los meses de junio, julio y agosto fluctúa entre un 25 a 30%, mientras que en los meses estivales se encuentra bajo el 10%. Los meses invernales

presentan la mayor fracción de píxeles sin información, que a la vez coincide con los meses que presentan los mayores porcentajes de fracción nival a lo largo del año hidrológico. Por el contrario, los meses estivales de enero, febrero y marzo muestran los menores porcentajes de fracción nival y sin información respecto a los otros meses.

### 5.1.2. Variación de la cobertura nival

La variabilidad mensual de la cobertura nival en la cuenca del río Aysén por año hidrológico se muestra en las figuras 7 y 8 como SCA y FSCA, respectivamente (apéndices II y III). De forma estacional, el período de acumulación de nieve se presenta principalmente en las estaciones de otoño e invierno y el derretimiento en primavera y verano. La acumulación de nieve inicia en el mes de abril, para llegar al máximo de extensión de la capa de nieve en el mes de julio.

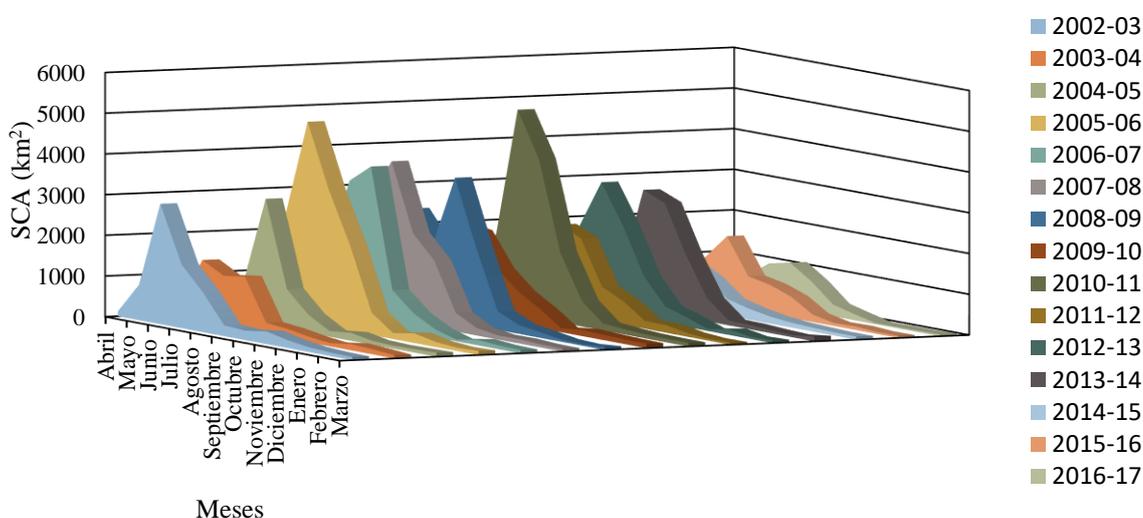


Figura 7. Variabilidad de la media mensual de SCA por año hidrológico en el periodo 2002-2016.

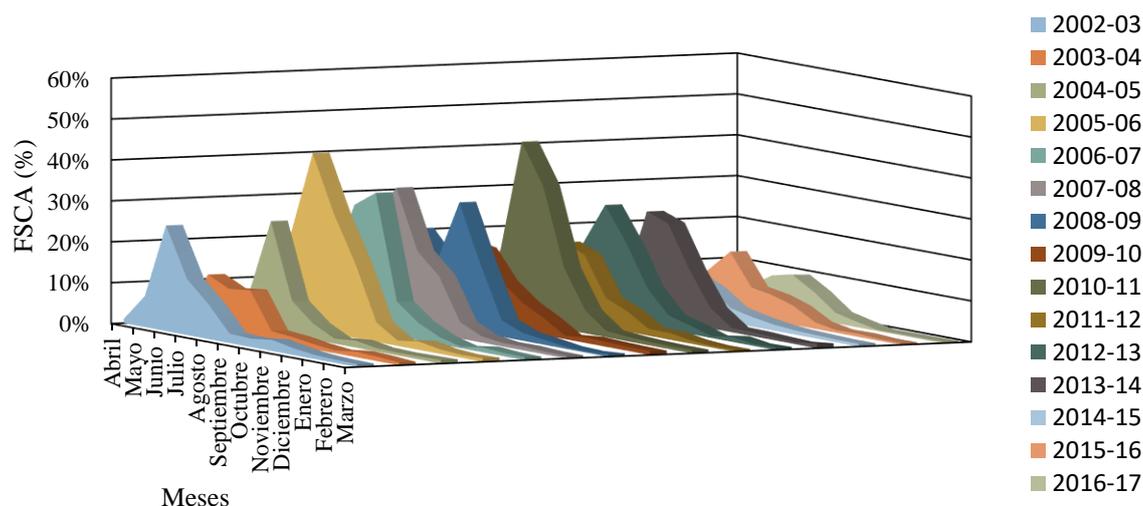


Figura 8. Variabilidad de la media mensual de FSCA por año hidrológico en el periodo 2002-2016.

En cuanto a las figuras anteriores, es posible identificar que los años hidrológicos que presentan mayor acumulación mensual de SCA corresponden a los períodos 2005-06 y 2010-11, en donde los máximos de las curvas de FSCA en el mes de julio pueden alcanzar valores cercanos al 50% del área de la cuenca del río Aysén. Sin embargo, a partir del período 2005-06 se evidencia una disminución de la cobertura nival en los años posteriores hasta el año hidrológico 2016-17, que es, además, el período que presenta la menor acumulación mensual de SCA y FSCA de la serie de tiempo, con una extensión nival en donde el máximo no supera el 10% de la cuenca.

La media anual de SCA para el periodo 2002-2016 se presenta en la Figura 9.

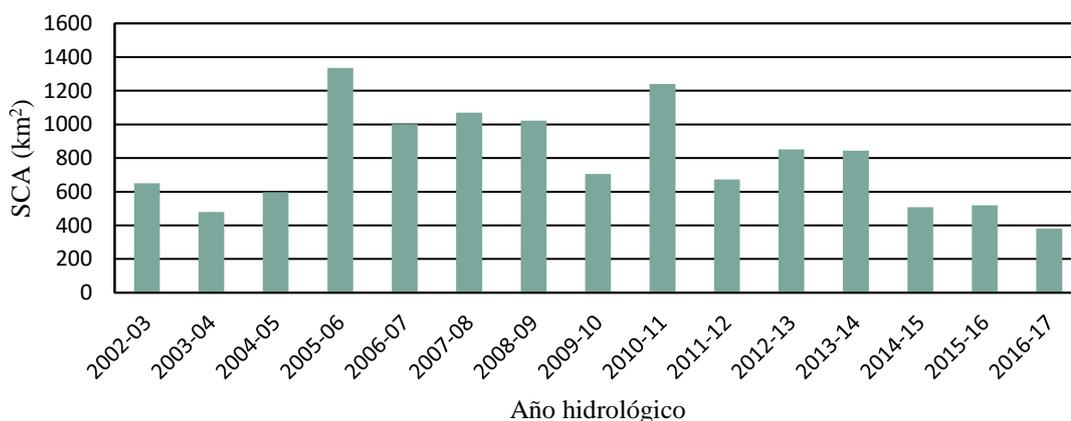


Figura 9. Media anual de SCA en el periodo 2002-2016.

A partir de la figura anterior, es posible identificar que al comparar los años hidrológicos 2005-06 y 2016-17 se muestra un importante decrecimiento en los valores de las medias anuales, correspondientes a 1.335,35 y 380,89 km<sup>2</sup>, respectivamente, lo que equivale a una reducción aproximada de 3,5 veces la media anual del año 2005-06.

### 5.1.3. Distribución de la cobertura nival

La distribución de la cobertura nival se estimó en función de la altitud, orientación y pendiente del terreno de acuerdo al Cuadro 3.

Cuadro 3. Reclasificación de factores topográficos

| Factores topográficos |                       |               |
|-----------------------|-----------------------|---------------|
| Altitud (msnm)        | Orientación (°)       | Pendiente (°) |
| 0 - 750               | Norte (292,5 - 67,5)  | 0 - 20        |
| 750 - 1500            | Sur (112,5 - 247,5)   | 20 - 40       |
| 1500 - 2250           | Este (67,5 - 112,5)   | 40 - 60       |
|                       | Oeste (247,5 - 292,5) |               |

En la Figura 10 se presenta la distribución de la media mensual de SCA en el periodo 2002-2016, en función de los factores topográficos mencionados anteriormente.

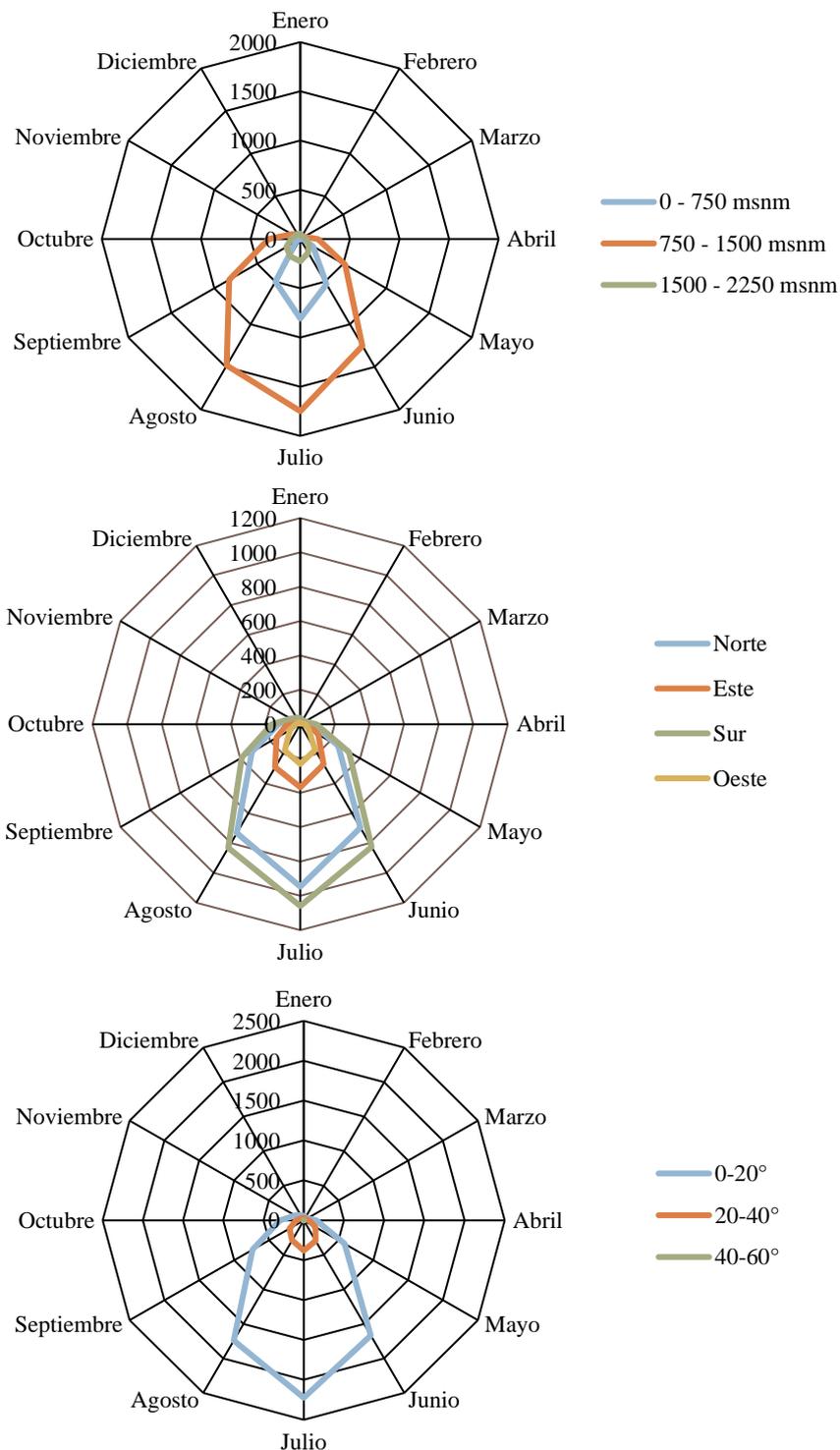


Figura 10. Distribución de la media mensual de SCA por clases de altitud, orientación y pendiente en el periodo 2002-2016.

En la figura anterior se aprecia la estacionalidad de la nieve durante el año en los factores topográficos, en donde la mayor SCA se concentra en los meses de invierno. En el caso de la altitud, la SCA se encuentra en mayor parte en el rango medio de elevación de la cuenca, correspondiente a 750 a 1.500 msnm, debido a que en este rango se concentra el área acumulada de la cuenca, por lo que alturas sobre los 1.500 msnm son menos

frecuentes (Figura 2). En cuanto a la orientación del terreno, predomina la exposición sur, debido a la menor incidencia de la radiación solar sobre las pendientes de las laderas (Pellicciotti et al., 2014), mientras que las exposiciones oeste y este presentan las menores acumulaciones mensuales. Por último, en cuanto a la pendiente, la SCA se concentra en el rango de 0 a 20° y en menor medida entre 20 y 40°, siendo casi inexistente la distribución de la nieve sobre los 40°, ya que a mayor grado de pendiente se produce un mayor desplazamiento de la nieve cuesta abajo (Varhola et al., 2010).

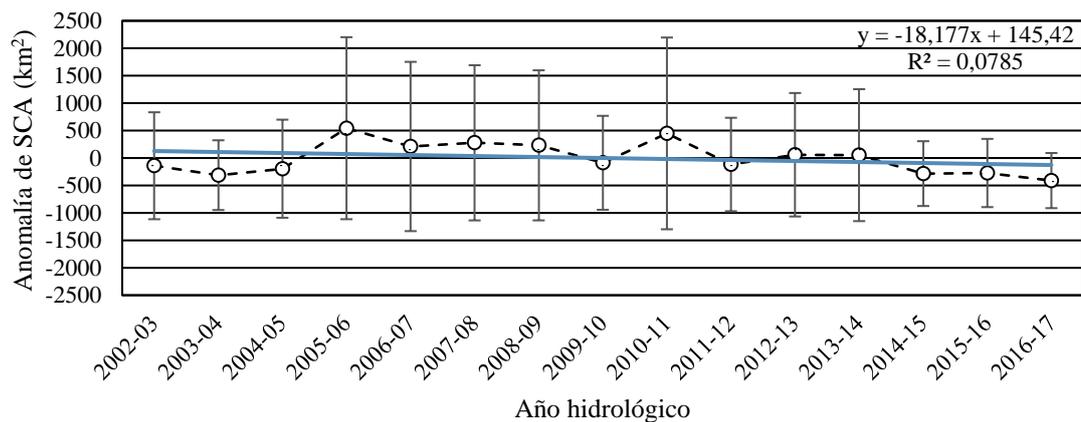
## 5.2. Análisis de la tendencia de la cobertura nival

### 5.2.1. Anomalía de SCA

#### Anomalía media anual

El resultado de las anomalías temporales de SCA se presentan en la Figura 11, la cual muestra las medias anuales de SCA por año hidrológico, la línea de la tendencia y la desviación estándar de los datos para los períodos 2002-2016 y 2005-2016.

a)



b)

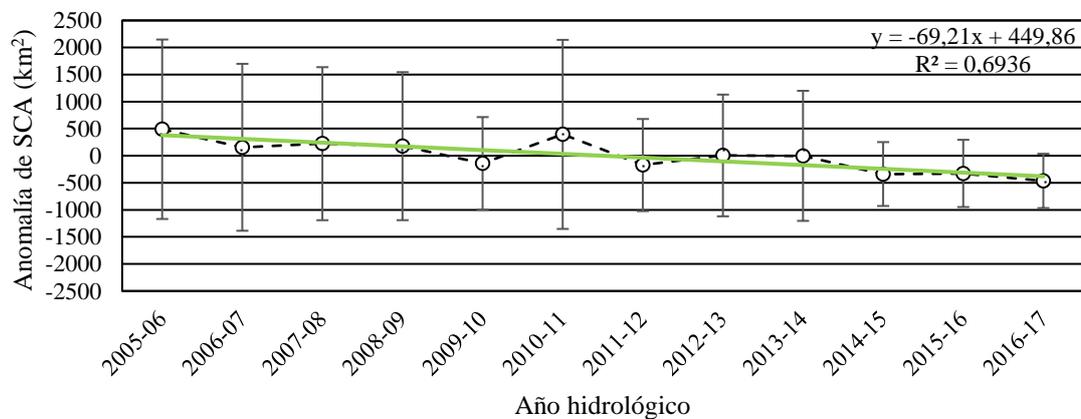


Figura 11. Anomalías medias anuales de SCA. a) Período 2002-2016 y b) Período 2005-2016.

En el análisis de anomalías medias anuales se incluyó el periodo 2005-2016 para evaluar el periodo sin considerar los años hidrológicos 2002-03, 2004-05 y 2005-05, debido a que estos últimos años suavizan la tendencia del periodo completo. Por otra parte, los últimos doce años del periodo de estudio coinciden con la época que presenta los años más cálidos.

A partir de la Figura 11 es posible identificar una alta variabilidad inter-anual de la media de SCA en el período 2002-2016. La media anual histórica de SCA es de 791,96 km<sup>2</sup> y las mayores dispersiones de los datos se producen en los años hidrológicos 2005-06 y 2010-2011, los cuales al mismo tiempo presentan las anomalías positivas más importantes, con 543,49 y 448,54 km<sup>2</sup>, respectivamente. Los últimos tres años de la serie de tiempo muestran menor dispersión de los datos y anomalías negativas, en donde el año 2016-17 presenta la anomalía negativa de la media anual de SCA más relevante, con una magnitud de 411,07 km<sup>2</sup> bajo la media del período. Al comparar los gráficos a) y b) de la Figura 10, se puede apreciar un cambio de la pendiente de la tendencia lineal de una tasa de 18,17 a 69,21 km<sup>2</sup> al año, así como un mayor ajuste de los datos al aumentar el valor del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) a 0,69.

### **Anomalía media estacional**

En las figuras 12 y 13 se presenta el análisis estacional de la cobertura nival en los periodos 2002-2016 y 2005-2016 respectivamente. En el primer periodo, es posible apreciar que en la estación de invierno los últimos tres de la serie de tiempo presentan anomalías negativas consecutivas de aproximadamente 1.000 km<sup>2</sup> bajo la media de la estación, que muestran una disminución significativa en la acumulación de nieve. En el caso de la estación de verano, se presenta una tendencia similar a finales del periodo, en donde las anomalías negativas de la media de SCA aumentan en forma creciente. Por otro parte, en la Figura 12 se muestra el cambio de la pendiente de la tendencia lineal de las anomalías medias por estación y es posible observar que se producen cambios importantes, principalmente en las estaciones de otoño e invierno, en donde la pendiente aumenta a tasas decrecientes de 70,57 y 194,04 km<sup>2</sup>·año<sup>-1</sup>, respectivamente. Por último, en ambas situaciones la tendencia de la media de SCA en verano se mantiene constante.

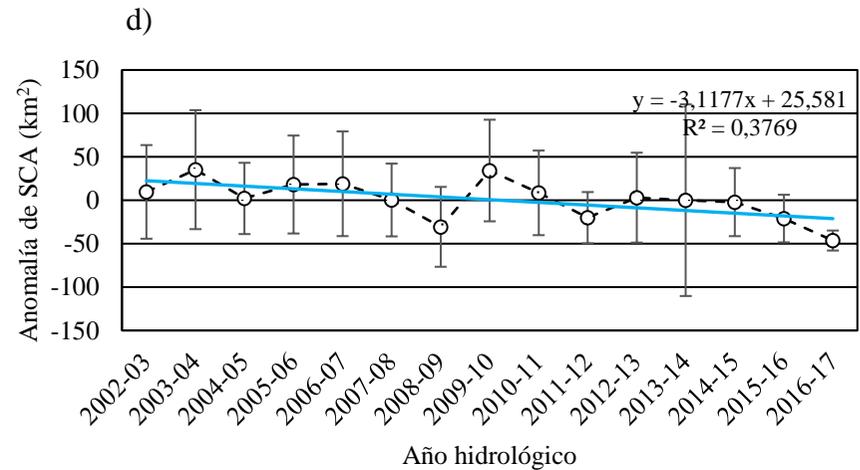
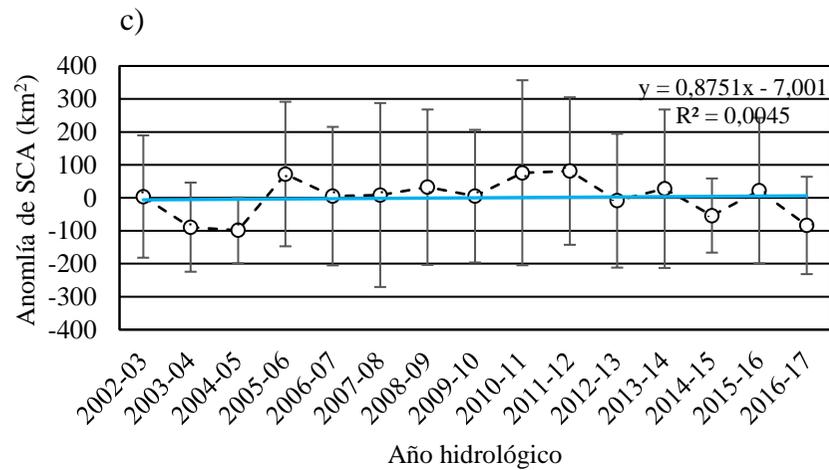
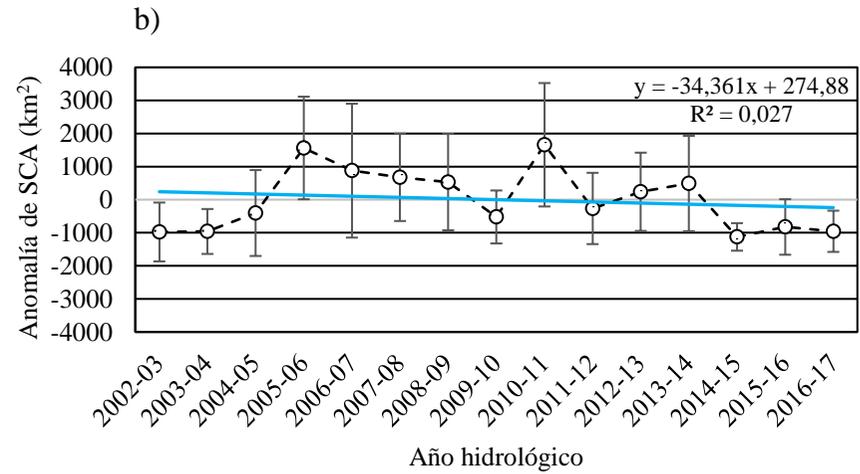
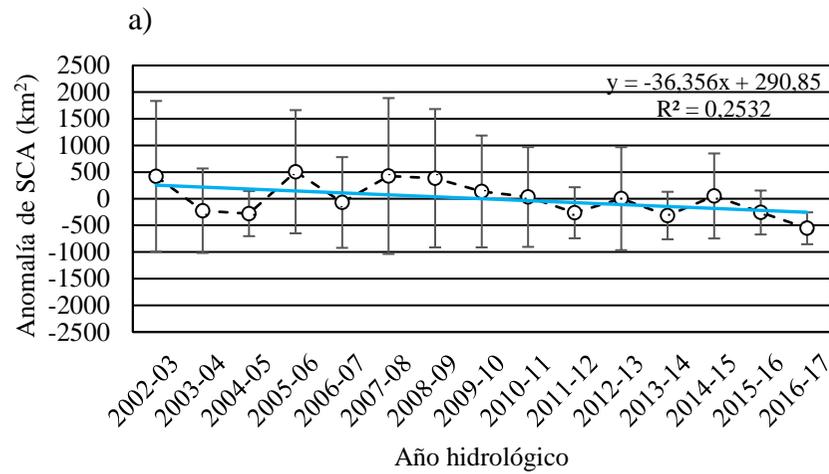


Figura 12. Anomalías medias estacionales de SCA en el periodo 2002-2016. a) Otoño, b) Invierno, c) Primavera y d) Verano.

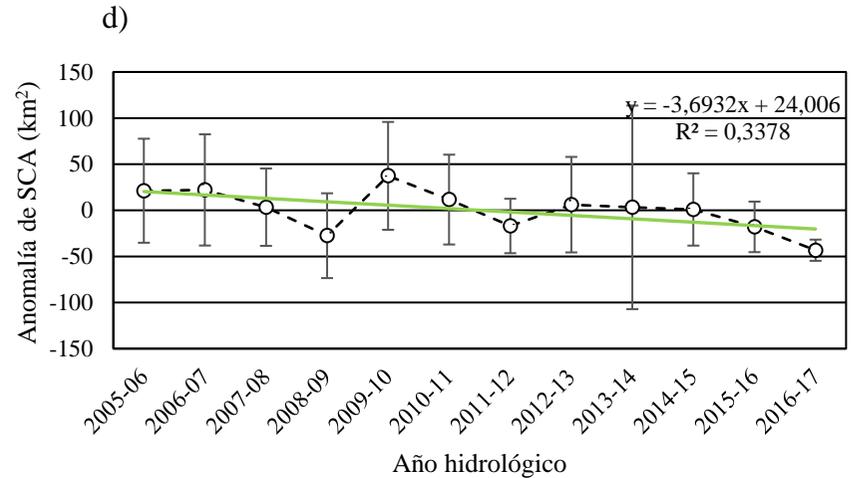
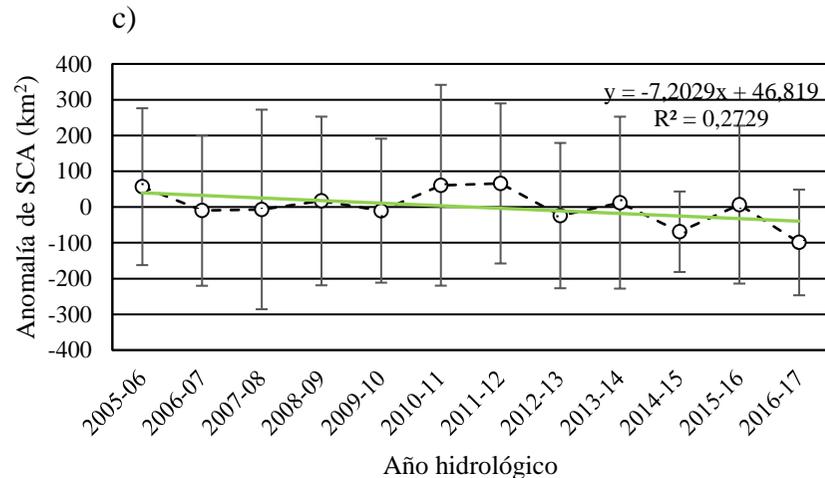
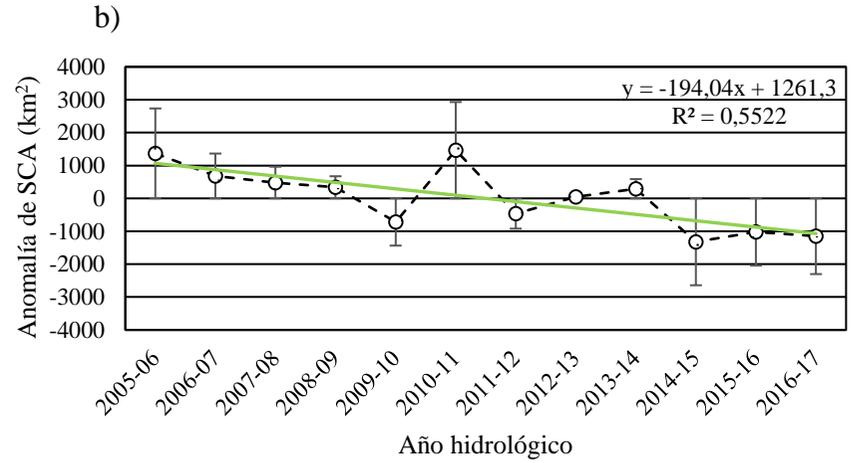
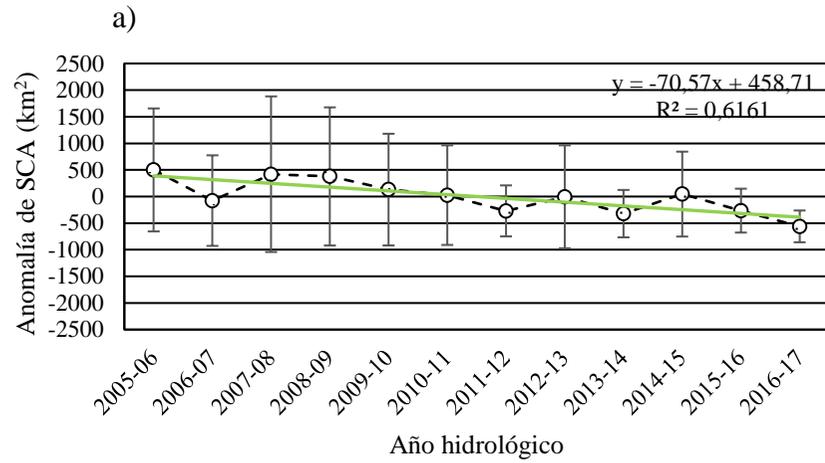


Figura 13. Anomalías medias estacionales de SCA en el periodo 2005-2016. a) Otoño, b) Invierno, c) Primavera y d) Verano.

### 5.2.2. Magnitud y significancia de la tendencia

El análisis de tendencia de las anomalías medias anuales y estacionales de SCA mediante el test no-paramétrico Mann-Kendall y Sen's slope se muestran en los cuadros 4 y 5.

Cuadro 4. Resumen de tendencias de SCA para el periodo 2002-2016.

| Análisis de tendencia |                        |                        |  |
|-----------------------|------------------------|------------------------|--|
| Escala temporal       | Ecuación lineal        | Mann-Kendall, $\tau$   | Sen's slope, S                               |
| Otoño (AMJ)           | $y = -36,35x + 290,85$ | -0,37 (p-valor > 0,05) | -44,99 (km <sup>2</sup> ·año <sup>-1</sup> ) |
| Invierno (JAS)        | $y = -34,36x + 274,88$ | -0,12 (p-valor > 0,05) | -45,99 (km <sup>2</sup> ·año <sup>-1</sup> ) |
| Primavera (OND)       | $y = +0,87x - 7,00$    | +0,06 (p-valor > 0,05) | +0,79 (km <sup>2</sup> ·año <sup>-1</sup> )  |
| Verano (EFM)          | $y = -3,11x + 25,58$   | -0,52 (p-valor < 0,05) | -2,74 (km <sup>2</sup> ·año <sup>-1</sup> )  |
| Anual                 | $y = -18,17x + 145,42$ | -0,21 (p-valor > 0,05) | -25,11 (km <sup>2</sup> ·año <sup>-1</sup> ) |

En el periodo 2002-2016 se observan una tendencia decreciente de la media anual de SCA de -25,11 km<sup>2</sup>·año<sup>-1</sup>, no obstante, no presenta significancia estadística (p-valor > 0,05). Otoño e invierno presentan también una tendencia decreciente de la media estacional de SCA de -45 km<sup>2</sup>·año<sup>-1</sup> aproximadamente. En verano, se presenta una tendencia con significancia estadística (p-valor < 0,05) de -2,74 km<sup>2</sup>·año<sup>-1</sup>.

Cuadro 5. Resumen de tendencias de SCA para el periodo 2005-2016.

| Análisis de tendencia |                         |                        |   |
|-----------------------|-------------------------|------------------------|---|
| Escala temporal       | Ecuación lineal         | Mann-Kendall, $\tau$   | Sen's slope, S                                |
| Otoño (AMJ)           | $y = -70,57x + 465,55$  | -0,60 (p-valor < 0,05) | -82,33 (km <sup>2</sup> ·año <sup>-1</sup> )  |
| Invierno (JAS)        | $y = -194,04x + 1261,3$ | -0,60 (p-valor < 0,05) | -189,22 (km <sup>2</sup> ·año <sup>-1</sup> ) |
| Primavera (OND)       | $y = -7,20x + 46,81$    | -0,30 (p-valor > 0,05) | -6,47 (km <sup>2</sup> ·año <sup>-1</sup> )   |
| Verano (EFM)          | $y = -3,69x + 24,00$    | -0,51 (p-valor < 0,05) | -2,77 (km <sup>2</sup> ·año <sup>-1</sup> )   |
| Anual                 | $y = -69,21x + 449,86$  | -0,66 (p-valor < 0,05) | -67,17 (km <sup>2</sup> ·año <sup>-1</sup> )  |

Respecto al análisis de los últimos doce años, es posible observar también una tendencia decreciente de la media anual de SCA de -67,17 km<sup>2</sup>·año<sup>-1</sup>, presenta significancia estadística con un p-valor < 0,05, por lo que en este último periodo se puede apreciar una tendencia más acusada de disminución de la cobertura nival en un contexto de calentamiento global. De forma estacional, otoño, invierno y verano presentan significancia estadística a tasas de -82,33, -189,22 y -2,77 km<sup>2</sup>·año<sup>-1</sup>, respectivamente.

### 5.3. Análisis de la relación existente entre la cobertura nival y datos in-situ

El Cuadro 6 presenta el área de cada subcuenca de la cuenca del río Aysén y su área relativa respecto al área de la cuenca.

Cuadro 6. Subcuencas de la cuenca del río Aysén.

| Subcuenca      | Área de subcuenca (km <sup>2</sup> ) | Área de subcuenca respecto al área de la cuenca (%) |
|----------------|--------------------------------------|---|
| Río Mañihuales | 4231,57                              | 36,92   |
| Río Simpson    | 3358,51                              | 29,30   |
| Río Aysén      | 963,77                               | 8,41  |
| Río Riesco     | 2901,81                              | 25,32   |

La mayor parte de estaciones meteorológicas y fluviométricas se sitúan en la parte norte de la cuenca, principalmente en la subcuenca del río Aysén, la cual presenta la menor superficie, con 963,77 km<sup>2</sup>. Por el contrario, la subcuenca con menor cobertura de estaciones es la de río Riesco, que es la tercera subcuenca más grande, con 2.901,81 km<sup>2</sup>.

En el Cuadro 7 se presenta la disponibilidad de datos *in-situ* con respecto a las imágenes diarias de MODIS, con el fin de utilizar las estaciones con la mayor cantidad de registros para realizar análisis posteriores. Si bien existe una falta de datos en las mediciones de las estaciones hidrometeorológicas, todas presentan un 75% o más datos respecto al total de imágenes satelitales existentes en este estudio. Así mismo, existen dos estaciones meteorológicas de la DMC con la totalidad de datos, las cuales corresponden a Balmaceda Ad. y Teniente Vidal en Coyhaique.

Cuadro 7. Número de datos disponibles por estación respecto a MODIS.

| Tipo de Estación | Nombre de estación                     | N° datos diarios en el periodo | N° datos respecto a MODIS (%) |
|------------------|--|--------------------------------|-------------------------------|
| Meteorológica    | El Balseo                              | 5200                           | 94,94                         |
|                  | Puerto Aysén Ad. (DMC)                 | 4136                           | 75,52                         |
|                  | Estancia Baño Nuevo                    | 5323                           | 97,19                         |
|                  | Villa Mañihuales                       | 4754                           | 86,80                         |
|                  | Coyhaique CONAF                        | 5240                           | 95,67                         |
|                  | Balmaceda Ad. (DMC)                    | 5477                           | 100,00                        |
|                  | Teniente Vidal (DMC)                   | 5477                           | 100,00                        |
| Fluviométrica    | Río Aysén en Puerto Aysén              | 5146                           | 93,96                         |
|                  | Río Blanco antes junta Río Aysén       | 4910                           | 89,65                         |
|                  | Río Blanco en desagüe Lago Caro        | 3988                           | 72,81                         |
|                  | Río Mañihuales antes junta Río Simpson | 4717                           | 86,12                         |
|                  | Río Simpson junta bajo Coyhaique       | 4829                           | 88,17                         |

El régimen predominante de la cuenca del río Aysén corresponde a pluvio-nival, por lo que la red de estaciones *in-situ* también presentan este comportamiento, sin embargo, puede variar en la magnitud de los eventos climáticos debido a la influencia oceánica y la orografía. Cabe destacar, que los caudales se presentan en régimen natural debido a la falta de infraestructura hidráulica en la cuenca (DGA, 2004).

### 5.3.1. Anomalía estandarizada

En la Figura 14 se presentan las anomalías sin estandarizar de las variables *in-situ* por tipo de estación para un análisis previo de la magnitud y de la tendencia temporal en el periodo 2002-2016.

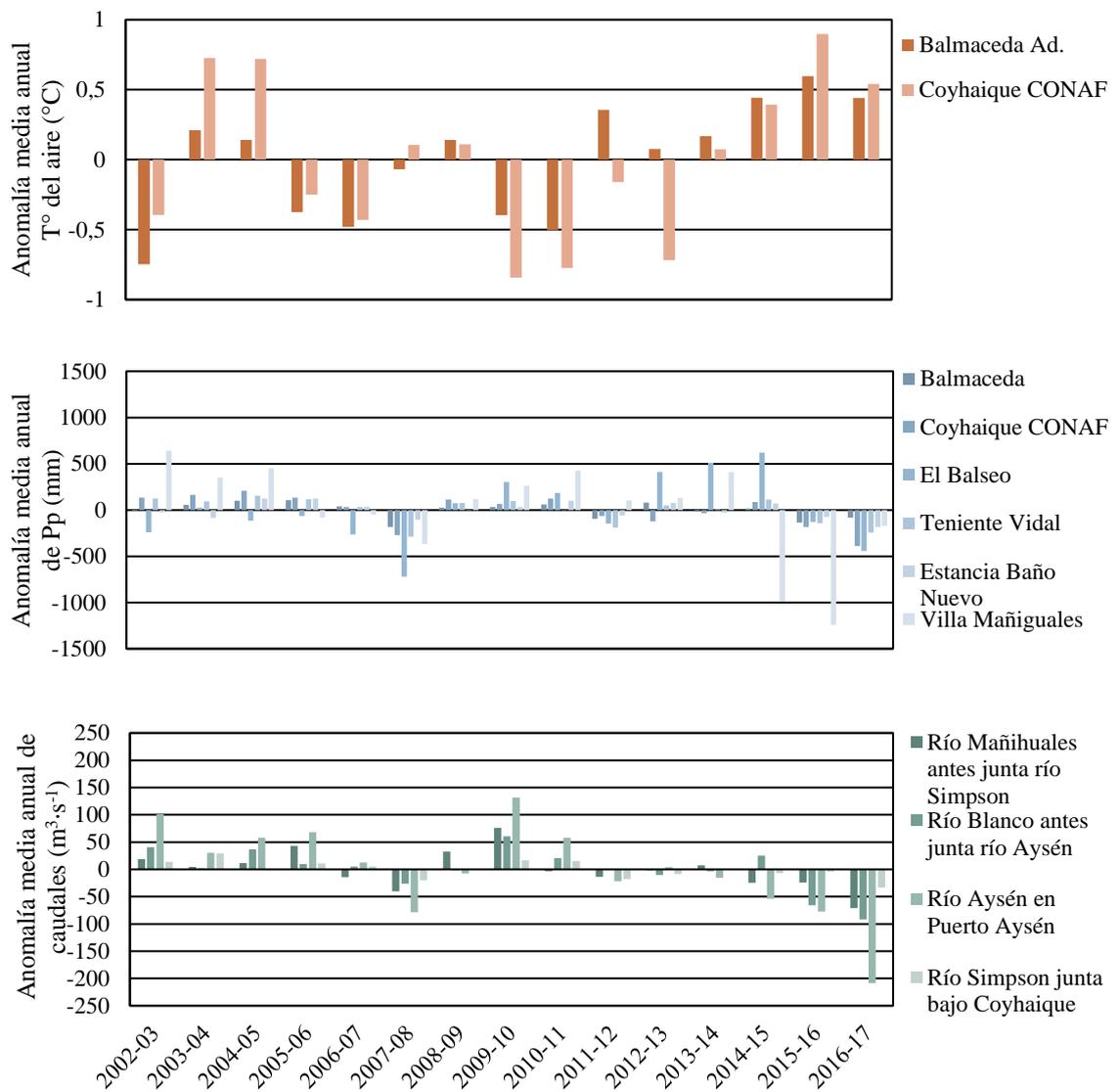


Figura 14. Anomalías de la media anual de temperatura del aire (arriba), precipitación (medio) y caudales (bajo) por estación *in-situ*.

En la figura anterior, las anomalías de la media anual de la temperatura del aire fueron estimadas solo con dos estaciones meteorológicas, debido a la falta de medición continua de esta variable en la zona de estudio, las cuales correspondieron a Balmaceda Ad. y Coyhaique CONAF (Corporación Nacional Forestal) y presentan similar comportamiento, a excepción de los años hidrológicos 2007-08, 2011-12 y 2012-13. Así mismo, a partir del año 2013-14 se muestra una tendencia al aumento de la temperatura media del aire. En el año hidrológico 2012-13 se muestra una anomalía negativa de 0,72 °C en la estación Coyhaique CONAF, mientras que en la estación Balmaceda Ad. se presenta una anomalía positiva de 0,08 °C sobre la media del periodo 2002-16. Con respecto a las anomalías de la precipitación acumulada al año, la estación El Balseo presenta la mayor media, con 1.738 mm acumulados al año, debido a la influencia marina en la vertiente oeste de la cuenca del río Aysén, mientras que la estación Estancia Baño Nuevo, que se emplaza en la pampa patagónica, muestra una media de 467,54 mm en el periodo 2002-16. Por otra parte, se muestra un patrón de anomalías negativas de la

precipitación acumulada, medida por todas las estaciones meteorológicas en los años hidrológicos 2007-08, 2015-16 y 2016-17. Además, se aprecian dos anomalías negativas significativas en los años hidrológicos 2014-15 y 2015-16 medidas por la estación Villa Mañihuales. Sin embargo, esto se debe a la falta de aproximadamente 700 datos, lo que impacta el cálculo de la media anual en las anomalías. Finalmente, respecto a los caudales, la estación río Aysén en Puerto Aysén presenta la mayor media de escorrentía superficial, con  $530,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  en el periodo 2002-16, ya que es la confluencia de varios ríos tributarios menores. Por último, los tres últimos años presentan una tendencia creciente de anomalías negativas para todas las estaciones, siendo máximo este comportamiento en el año hidrológico 2016-17.

En la Figura 15 se muestran las anomalías medias anuales de las variables *in-situ* sin estandarizar a nivel de cuenca con su respectiva línea de tendencia y ecuación lineal asociada.

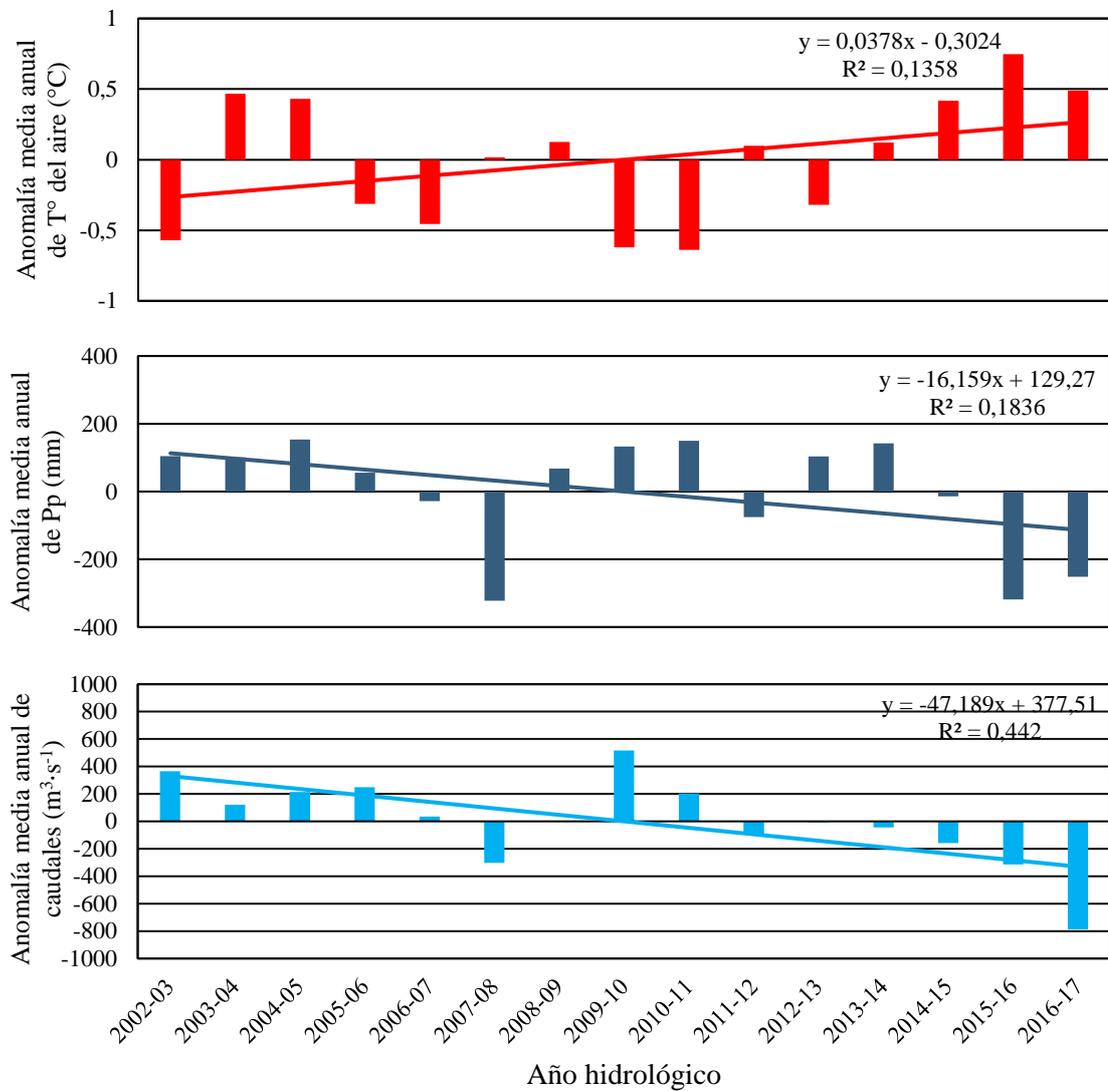


Figura 15. Anomalías de la media anual de temperatura del aire (arriba), precipitación (medio) y caudales (bajo) a nivel de cuenca.

En la figura anterior, se muestra la tendencia creciente de la temperatura media del aire de 0,03 °C por año y una anomalía negativa importante de -0,57 °C en el año hidrológico 2002-03. Los principales eventos de descenso de las temperaturas medias ocurren en los años hidrológicos 2005-06, 2006-07, 2009-10, 2010-11 y 2012-13. Sin embargo, a partir de este último periodo no se producen descensos de la temperatura media del aire, sino que, todo lo contrario, en donde el año hidrológico 2015-16 presenta la anomalía positiva más importante, con un aumento de 0,75 °C respecto al periodo 2002-2016. En el caso de las anomalías de las precipitaciones acumuladas anuales, los valores bajo la media del periodo 2002-2016 más importantes se producen en los periodos 2007-08, 2015-16 y 2016-17, con anomalías negativas de 322,12, 318,11 y 252,54 mm. Por el contrario, en el año hidrológico 2004-05 se produce la anomalía positiva mayor, con 153,69 mm. Por último, respecto a las anomalías de los caudales medios anuales, la anomalía negativa de mayor importancia se produce el año hidrológico 2016-17 con un valor de 786,81 (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) bajo la media del periodo 2002-16, mientras que las anomalías positivas máximas se produjeron en los periodos 2002-03 y 2009-10.

Las anomalías estandarizadas (sin magnitud asociada) anuales de SCA y datos *in-situ* para la cuenca del río Aysén de temperatura media del aire (°C), precipitación total (mm) y caudales medios (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) se presentan en la Figura 16.

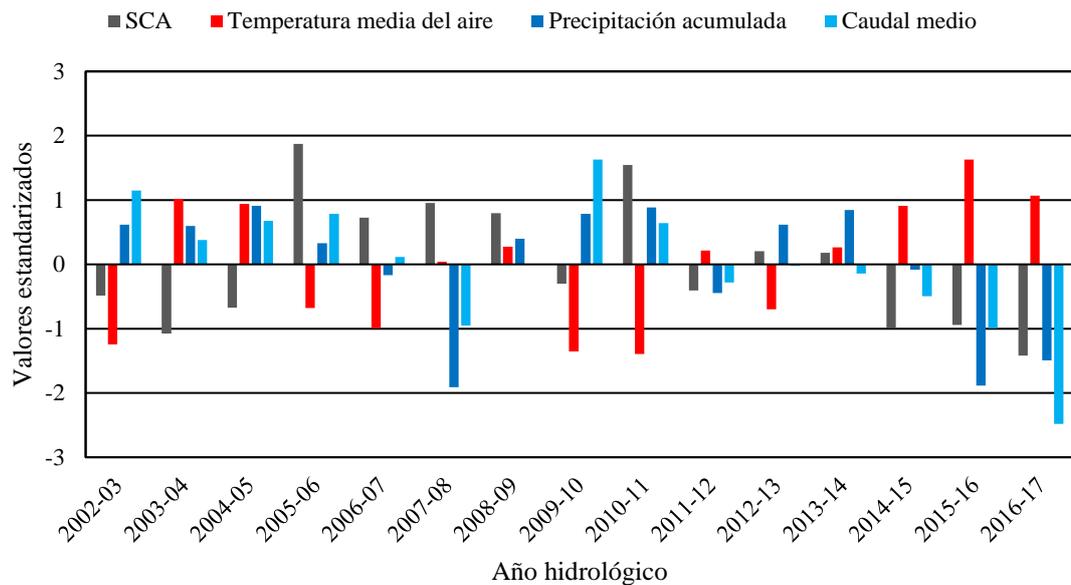


Figura 16. Anomalías estandarizadas conjuntas de SCA y datos *in-situ* a nivel de cuenca.

En las anomalías estandarizadas conjuntas de la Figura 16, se puede apreciar que un descenso de la temperatura se asocia a una anomalía estandarizada de la media anual de SCA positiva, a excepción de los años hidrológicos 2002-03 y 2009-10, en donde si bien se producen anomalías negativas importantes de la temperatura media del aire, la media de SCA se encuentra por debajo de la media del periodo 2002-2016. Por el contrario, frente a eventos de anomalías positivas de la temperatura del aire, SCA presenta siempre valores por debajo de la media del periodo, como se muestra claramente en los años 2014-15, 2015-16 y 2016-17. En el caso de caudales se produjo un comportamiento similar al de la temperatura del aire, presentando en los últimos tres años hidrológicos de la serie

de tiempo anomalías negativas y crecientes. En cuanto a las anomalías estandarizadas de la precipitación total anual, en el año hidrológico 2007-08 se presenta el año con el descenso más significativo, seguido por el período 2016-17, estando ambos periodos acompañados por anomalías negativas en los caudales medios. Por último, en términos globales, en la figura también se muestra al año 2016-17 con el comportamiento conjunto más anómalo, con un descenso importante de SCA, caudal y precipitación, así como un aumento de la temperatura media del aire.

Finalmente, en el Cuadro 8 se muestran los periodos de ocurrencia de los fenómenos de El Niño y de La Niña en el periodo 2002-2016 y sus intensidades asociadas.

**Cuadro 8. Periodos e intensidad de los fenómenos El Niño y La Niña.**

| El Niño |          |        |            | La Niña |          |         |
|---------|----------|--------|------------|---------|----------|---------|
| Débil   | Moderado | Fuerte | Muy fuerte | Débil   | Moderado | Fuerte  |
| 2004-05 | 2002-03  | -      | 2015-16    | 2005-06 | 2011-12  | 2007-08 |
| 2006-07 | 2009-10  | -      | -          | 2008-09 | -        | 2010-11 |
| 2014-15 | -        | -      | -          | 2016-17 | -        | -       |

Fuente: Tippet et al, 2017.

Un análisis derivado de la Figura 16 y el Cuadro 8 permite concluir que los años que presentan las anomalías estandarizadas de la media de SCA más importantes son coincidentes con los periodos de ocurrencia del fenómeno de la Niña, en donde el año hidrológico 2005-06 presenta una intensidad débil y el año 2010-11 una intensidad fuerte. Por otra parte, los periodos con anomalías positivas de precipitaciones anuales son los años 2002-03, 2004-05 y 2014-15, los cuales coinciden con los periodos de ocurrencia de El Niño, con intensidad que fluctúa de débil a moderada.

## 6. DISCUSIÓN

En este trabajo de memoria, los resultados de estimación de la cobertura nival para la cuenca del río Aysén no fueron validados con observaciones *in-situ* correspondientes a altura de nieve. Esto se debe a la falta de estaciones de este tipo y la poca representatividad espacial. Sin embargo, la utilización del producto diario de nieve de MODIS reporta una precisión del 93% en la identificación de nieve en condiciones de cielo despejado y sus observaciones están relacionadas a las mediciones *in-situ* o captadas por otros satélites (Hall y Riggs, 2007).

El mapeo de la cobertura nival mediante el sensor MODIS en el espectro visible presenta como limitación la pérdida de información por la presencia de nubes y la densidad del dosel arbóreo (Parajka et al., 2012). En cuanto a la presencia de cobertura nubosa, esta se logró reducir hasta un 20% en promedio, quedando una superficie remanente de nubes que puede obstruir píxeles de nieve y sin nieve. Por otra parte, respecto al dosel arbóreo, no se consideró la cobertura arbórea perenne, ya que la nieve interceptada por las copas de los árboles es retornada a la atmósfera por la sublimación (Essery et al., 2003). Además, se ha evidenciado una sobrestimación en la identificación de la nieve por sensores ópticos que varía entre un 5 y 37% según la densidad del dosel (Hall et al., 2001; Raleigh et al., 2013).

Muchos estudios sobre la variabilidad de la cobertura nival se han centrado en la importancia de la retroalimentación entre la temperatura del aire y la cobertura de nieve (Qu y Hall, 2005; Déry y Brown, 2007). El calentamiento global da como respuesta una menor cantidad de precipitaciones en forma de nieve en invierno y un derretimiento anticipado de la nieve en primavera (Barnett et al., 2005), explicando la disminución de la cubierta de nieve a escala global cuando se considera en grandes regiones como Eurasia y Norteamérica (Brown y Robinson, 2011). El derretimiento de la nieve está influenciado por el balance radiativo, los flujos de calor latente y sensible y las variaciones de la temperatura del aire (Dyer y Mote, 2007). En este sentido, la duración de la nieve sobre diferentes coberturas de suelo es un aspecto a discutir, así como el empleo de una ventana temporal de seis días. Diversos estudios sobre la duración de la nieve en Norteamérica, Rusia y Finlandia concluyen que esta dura hasta una semana más en sitios abiertos que en áreas boscosas (Burles y Boon, 2011; Dickerson-Lange et al., 2015; Gelfan et al., 2004; Koivusalo y Kokkonen, 2002).

Esta memoria coincide con los estudios globales, evidenciando que la cuenca del río Aysén en el periodo 2002-2016 presenta una tendencia decreciente de la media anual de SCA sin significancia estadística. Sin embargo, si se consideran los últimos doce años, la tendencia tiene significancia estadística. Al comparar los resultados con estudios sobre la cordillera de los Andes en Chile, se puede encontrar similitudes en los resultados con el estudio de Stehr y Aguayo (2016), en donde se coincide en la falta de significancia en las tendencias en las cuencas del sector centro-sur en el periodo 2002-2013. Por otra parte, Saavedra et al. (2016), que incluyó también parte de la cordillera de los Andes en la pendiente oriental, evidenció un área de 70.515 km<sup>2</sup> entre latitudes 29 y 36° con pérdidas significativas en la duración de la nieve. Sin embargo, este estudio es preliminar sobre

esta temática en la latitud a la cual se encuentra la cuenca del río Aysén, por lo que no se cuenta con investigaciones similares tanto de extensión ni de duración de la cobertura nival. Así mismo, una evaluación de la cobertura nival en un período de quince años de información satelital podría ser complementado con otras bases de datos, como Landsat, aunque estos datos están afectados por nubes y presentan un menor número de imágenes disponibles. Por lo anterior, la validación de las tendencias encontradas en esta memoria es un aspecto relevante a considerar utilizando información *in-situ*.

El aumento de la temperatura del aire y la disminución de precipitaciones se ha estudiado en la Patagonia, encontrando una relación positiva con los fenómenos del Modo Anular del Sur (SAM) y ENSO en fase de La Niña (Lara et al., 2015; Veblen et al., 2011), lo que podría explicar la menor acumulación de cobertura nival en la cuenca. En este sentido, la combinación de una acumulación nival reducida y el derretimiento temprano de la nieve, produce un impacto significativo en la capacidad de almacenamiento natural de agua dulce en una hoya hidrográfica (Stewart, 2009). No obstante, esta memoria no tiene por objetivo entregar información concluyente sobre el análisis ENSO y la cobertura nival, lo que amerita un estudio posterior que relacione el impacto de un fenómeno a escala global y la cobertura de nieve en el área de estudio.

## 7. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una primera aproximación de la evaluación de la variabilidad de cobertura nival en la cuenca del río Aysén en la Patagonia chilena. El empleo de imágenes satelitales MODIS permitió monitorear la región con una resolución diaria, abarcando casi la totalidad del periodo de estudio y utilizando un producto ampliamente validado en distintas latitudes del mundo. La interpolación de datos sin información logró reducir la cobertura nubosa y errores del sensor hasta un 20% para poder realizar análisis posteriores con un menor impacto de la cobertura nubosa.

La cobertura nival presentó máximos positivos de anomalía de la media anual de SCA en los años hidrológicos 2005-06 y 2010-11, con una amplia variabilidad inter-anual. Así mismo, se estimó una tendencia decreciente de la media de SCA de  $25,11 \text{ km}^2 \cdot \text{año}^{-1}$ , sin significancia estadística. Sin embargo, al considerar los últimos doce años del periodo, la tendencia mostró significancia estadística, con una tasa decreciente de  $69,17 \text{ km}^2 \cdot \text{año}^{-1}$ , lo que permitió identificar una tendencia más acusada en este último periodo en un contexto de calentamiento global. De forma estacional, este último periodo también presentó significancia estadística en las estaciones de otoño, invierno y primavera, en donde la estación de invierno presentó una tendencia decreciente de  $189,22 \text{ km}^2 \cdot \text{año}^{-1}$ .

Los principales resultados indicaron una tendencia creciente de la temperatura media del aire y la disminución de la precipitación acumulada y de los caudales medios en el sistema hidrológico de la cuenca del río Aysén. Sin embargo, la tendencia de la temperatura media del aire presentó una baja representación espacial en la cuenca, al solo utilizar dos estaciones meteorológicas, debido a que es la única información disponible de esta variable ambiental. La comparación conjunta con datos *in-situ* denota hacia finales del período las anomalías negativas más relevantes y sitúa al año hidrológico 2016-17 como el año que presenta las peores anomalías estandarizadas conjuntas de la serie de tiempo.

Finalmente, este estudio se presenta como una investigación preliminar de la cobertura nival en la cuenca del río Aysén en un escenario de calentamiento global, proporcionando una aproximación de la tendencia de la nieve y su interacción con el balance hidrológico de la cuenca.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Barry, R. G. 2008. Mountain Weather and Climate. Third edition, Chapter 5: Regional cases studies. University of Colorado, Boulder, USA, 421-426.
- Barnett, T. P.; Adam, J. C. & D. P. Lettenmaier. 2005. Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303-309.
- Bates, B.; Kundzewicz, Z. W.; Wu, S. & J. Palutikof. 2008. Climate change and Water: technical Paper VI. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva. 210-225.
- Bizama, G.; Torrejón, F.; Aguayo, M.; Muñoz, M. D.; Echeverría, C. & R. Urrutia. 2011. Pérdida y fragmentación del bosque nativo en la cuenca del río Aysén (Patagonia-Chile) durante el siglo XX. *Revista de Geografía Norte Grande*, (49), 125-138.
- Brown, R. D. & D.A. Robinson. 2011. Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty. *The Cryosphere*, 5(1), 219-229.
- Burles, K., & S. Boon. 2011. Snowmelt energy balance in a burned forest plot, Crowsnest Pass, Alberta, Canada, *Hydrol. Processes*, 25(19), 3012-3029.
- Campuzano, F.J.; Leitão, P.C.; Gonçalves, M.I.; Marin, V. & H. Tironi. 2008. Hydrodynamical vertical 2D model for the Aysén Fjord. In: Neves, R.; Baretta, J.W.; Mateus, M. (Eds.), *Perspectives on Integrated Coastal Zone Management in South America*. IST Press, Lisboa. 555-566.
- Chen, X.; Liang, S.; Cao, Y.; He, T. & D. Wang. 2015. Observed contrast changes in snow cover phenology in northern middle and high latitudes from 2001–2014. *Scientific Reports*, 5:16820, 9p.
- Cuffey, K. & W. Paterson. 2010. The physics of glaciers. Fourth edition, Chapter 13: Ice Sheets and the Earth System, 575-610.
- Da Ronco, P., & C. De Michele. 2014. Cloud obstruction and snow cover in Alpine areas from MODIS products. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(11), 4579-4600.
- Delgado, L. E.; Sepúlveda, M. B. & V. H. Marín. 2013. Provision of ecosystem services by the Aysén watershed, Chilean Patagonia, to rural households. *Ecosystem Services*, 5, 102-109.
- DGA (Dirección General de Aguas). 2004. Cuenca del Río Aysén: Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Realizado por CADE-IDEPE. 131p.

- Déry, S. J. & R. D. Brown. 2007. Recent Northern Hemisphere snow cover extent trends and implications for the snow-albedo feedback. *Geophysical Research Letters*, 34(22).
- Dickerson-Lange, S. E.; Lutz, J. A.; Martin, K. A.; Raleigh, M. S.; Gersonde, R. & J. D. Lundquist. 2015. Evaluating observational methods to quantify snow duration under diverse forest canopies. *Water Resources Research*, 51(2), 1203-1224.
- Dietz, A. J.; Kuenzer, C.; Gessner, U. & S. Dech 2012. Remote sensing of snow—a review of available methods. *International Journal of Remote Sensing*, 33(13), 4094-4134.
- Dozier J. 1989. Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. *Remote Sensing of Environment* 28, 9-22.
- Dyer, J. L. & T. L. Mote. 2007. Trends in snow ablation over North America. *International Journal of Climatology*, 27(6), 739-748.
- Essery, R. L.; Pomeroy, J. W.; Parvianen, J. & P. Storck. 2003. Sublimation of snow from coniferous forests in a climate model. *J. Climate* 16, 1855–1864.
- Gafurov, A. & Bárdossy, A. 2009. Cloud removal methodology from MODIS snow cover product. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(7), 1361-1373.
- Gascoïn, S.; Lhermitte, S.; Kinnard, C.; Bortels, K. & G. E. Liston. 2013. Wind effects on snow cover in Pascua-Lama, Dry Andes of Chile. *Advances in Water Resources*, 55, 25-39.
- Gelfan, A. N.; Pomeroy, J. W. & L. S. Kuchment. 2004. Modeling forest cover influences on snow accumulation, sublimation, and melt. *Journal of Hydrometeorology*, 5(5), 785-803.
- Gilbert, R. O. 1987. Sen's Nonparametric Estimator of Slope. *Statistical Methods for Environmental Pollution Monitoring*. John Wiley and Sons, 217–219.
- Hall, D. K., Riggs, G. A. & V. V. Salomonson. 1995. Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 127-140.
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., Barton, J.S., Casey, K., Chien, J.Y.L. & A. B. Tait. 2001. Algorithm theoretical basis document (ATBD) for the MODIS snow and sea ice-mapping algorithms. NASA GSFC, 45.
- Hall, D. K. & G. A. Riggs. 2007. Accuracy assessment of the MODIS snow products. *Hydrol. Process.* 21, 1534-1547.
- Hall, D. K. & G. A. Riggs. 2016. MODIS Normalized-Difference Snow Index /Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 6. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jain, S. K., Goswami, A. & A. K. Saraf. 2009. Role of elevation and aspect in snow distribution in Western Himalaya. *Water Resources Management*, 23(1), 71-83.

Kaper H. & H. Engler. 2013. *Mathematics and climate.* Society for Industrial and Applied Mathematics. 295p.

Kendall, M. G. 1975. *Rank Correlation Methods.* Oxford, England: Griffin.

Key, J., Goodison, B., Schöner, W., Godøy, Ø., Ondráš, M. & Á. Snorrason. 2015. A Global Cryosphere Watch. *Arctic*, 68(5), 48-58.

Koivusalo, H. & T. Kokkonen. 2002. Snow processes in a forest clearing and in a coniferous forest, *J. Hydrol.*, 262(1-4), 145-164.

König, M., Winther, J. G. & E. Isaksson. 2001. Measuring snow and glacier ice properties from satellite. *Reviews of Geophysics*, 39(1), 1-27.

Lara, A., Bahamondez, A., González-Reyes, A., Muñoz, A. A., Cuq, E. & C. Ruiz-Gómez. 2015. Reconstructing streamflow variation of the Baker River from tree-rings in Northern Patagonia since 1765. *Journal of Hydrology*, 529, 511-523.

Lemke, P., Ren, J., Alley, R. B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G. et al. 2007. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis.* et al., Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Lopez, P., Sirguy, P., Arnaud, Y., Pouyaud, B. & P. Chevallier. 2008. Snow cover monitoring in the Northern Patagonia Icefield using MODIS satellite images (2000–2006). *Global and Planetary Change*, 61(3), 103-116.

Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Le Quesne, C. & J. C. Aravena. 2006. Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *Journal of Climate*, 19(24), 6334-6352.

Méndez González, J., Ramírez Leyva, A., Cornejo Oviedo, E., Zárate Lupercio, A. & T. Cavazos Pérez. 2010. Teleconexiones de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) a la precipitación y temperatura en México. *Investigaciones Geográficas*, (73), 57-70.

- Muster, S., Langer, M., Abnizova, A., Young, K. L. & J. Boike. 2015. Spatio-temporal sensitivity of MODIS land surface temperature anomalies indicates high potential for large-scale land cover change detection in Arctic permafrost landscapes. *Remote Sensing of Environment*, 168, 1-12.
- Parajka, J. & G. Blöschl. 2008. Spatio-temporal combination of MODIS images-potential for snow cover mapping. *Water Resources Research*, 44(3).
- Parajka, J., Holko, L., Kostka, Z. & G. Blöschl. 2012. MODIS snow cover mapping accuracy in a small mountain catchment—comparison between open and forest sites. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(7), 2365-2377.
- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Zhou, L. & T. Wang. 2013. Change in snow phenology and its potential feedback to temperature in the Northern Hemisphere over the last three decades. *Environmental Research Letters*, 8(1).
- Pellicciotti, F., Ragetti, S., Carenzo, M. & J. McPhee. 2014. Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for future work. *Science of the Total Environment*, 493, 1197-1210.
- Qu, X. & A. Hall. 2005. Surface contribution to planetary albedo variability in cryosphere regions. *Journal of Climate*, 18(24), 5239-5252.
- Raleigh, M. S., K. Rittger, C. E. Moore, B. Henn, J. A. Lutz & J. D. Lundquist. 2013. Ground-based testing of MODIS fractional snow cover in subalpine meadows and forests of the Sierra Nevada, *Remote Sensing of Environment*, 128, 44-57.
- Robinson, D. A., Dewey, K. F. & R. R. Heim Jr. 1993. Global snow cover monitoring: An update. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 74(9), 1689-1696.
- Rondanelli-Reyes, M. J., Troncoso-Castro, J. M., & C. A. León. 2011. Historia vegetal reciente en Patagonia occidental. Análisis palinológico de Laguna Cea (45° 40'S, 72° 14'W), Coyhaique, Chile. *Polibotánica*, (32), 163-178.
- Saavedra, F., Kampf, S. K., Fassnacht, S. R. & J. Sibold. 2016. Changes in Andes Mountains Snow Cover from MODIS Data 2000-2014. 24p.
- Schemenauer, R. S., Berry, M. O. & J. B. Maxwell. 1981. Snowfall formation. In: Gray DM and Male DH (ed) *Handbook of snow*, Pergamon Press, 129p.
- Sen, P. K. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, *Journal of the American Statistical Association*, 63: 1379-1389.
- Stehr, A., & M. Aguayo. 2017. Snow cover dynamics in Andean watersheds of Chile (32.0–39.5° S) during the years 2000-2016. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(10), 5111-5126.

- Stern, N. 2008. The economics of climate change. *American Economic Review*, 98(2), 1-37.
- Stewart, I. T. 2009. Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions. *Hydrological Processes*, 23(1), 78-94.
- Silva, E. 2016. Patagonia, without Dams! Lessons of a David vs. Goliath campaign. *The Extractive Industries and Society*. 947-957.
- Torres-Gómez, M., Delgado, L. E., Marín, V. H. & R. O. Bustamante. 2009. Estructura del paisaje a lo largo de gradientes urbano-rurales en la cuenca del río Aisén (Región de Aisén, Chile). *Revista Chilena de Historia Natural*, 82(1), 73-82.
- Tippett, M. K., Ranganathan, M., L'Heureux, M., Barnston, A. G. & T. DelSole. 2017. Assessing probabilistic predictions of ENSO phase and intensity from the North American Multimodel Ensemble. *Climate Dynamics*, 1-22.
- Varhola, A., Coops, N. C., Weiler, M., & R. D. Moore. 2010. Forest canopy effects on snow accumulation and ablation: An integrative review of empirical results. *Journal of Hydrology*, 392(3), 219-233.
- Vaughan, D., Comiso, J., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R. et al. 2013. Observations: Cryosphere Climate Change 2013: The Physical Science Basis. et al., Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1(1), 1-2.
- Veblen, T. T.; A. Holz, J. Paritsis; E. Raffaele; T. Kitzberger & M. Blackhall. 2011. Adapting to global environmental change in Patagonia: what role for disturbance ecology?. *Austral Ecology*, 36(8): 891-903.

## 9. APÉNDICES

### Apéndice I: Coberturas de suelo de la cuenca del río Aysén.

Cuadro 9. Clases de coberturas de suelo

| Valor | Clase   |
|-------|---|
| 10    | Cropland  |
| 11    | Herbaceous cover  |
| 30    | Mosaic cropland (>50%)/natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (<50%)  |
| 40    | Mosaic natural vegetation (tree, shrub, herbaceous cover) (>50%)/ cropland (<50%) |
| 50    | Tree cover, broadleaved, evergreen, close to open (>15%)                          |
| 60    | Tree cover, broadleaved, deciduous, close to open (>15%)                          |
| 61    | Tree cover, broadleaved, deciduous, closed (>40%)                                 |
| 62    | Tree cover, broadleaved, deciduous, open (15-40%)                                 |
| 90    | Tree cover, mixed leaf type (broadleaved and needleleaved)                        |
| 100   | Mosaic tree and shrub (>50%)/ herbaceous cover (<50%)                             |
| 110   | Mosaic herbaceous cover (>50%)/tree and shrub (<50%)                              |
| 120   | Shrubland   |
| 130   | Grassland   |
| 150   | Sparse vegetation   |
| 153   | Sparse herbaceous cover   |
| 180   | Sparse or herbaceous cover  |
| 190   | Urban areas   |
| 200   | Bare areas  |
| 210   | Water bodies  |
| 220   | Permanent snow and ice  |

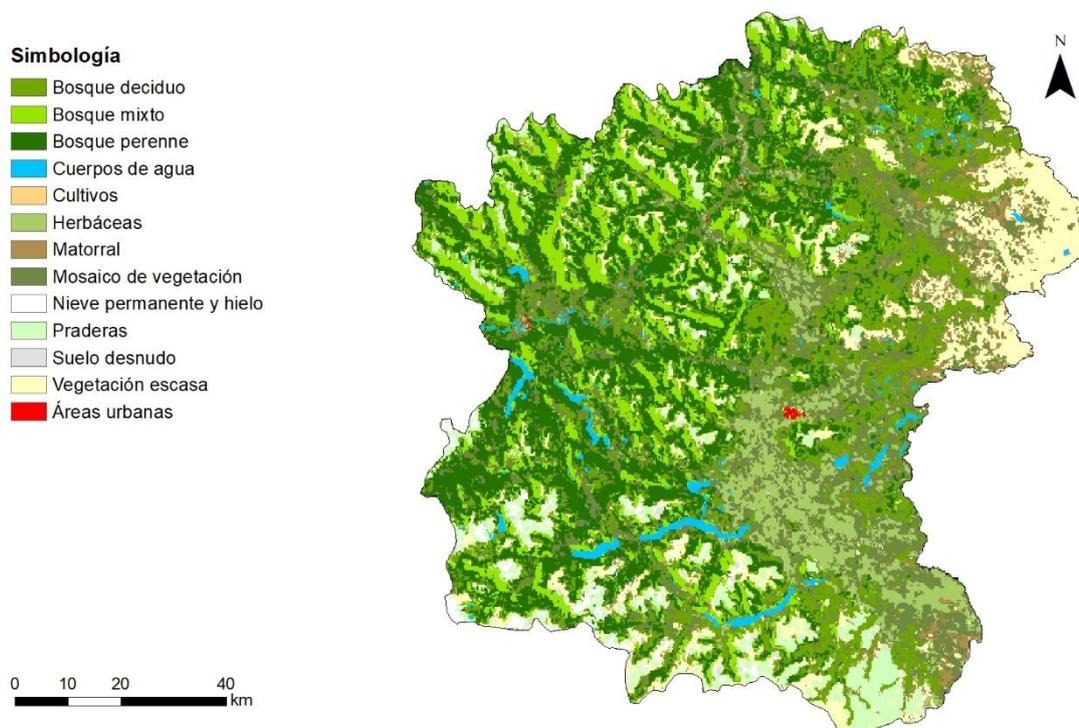


Figura 17. Mapa de coberturas de suelo del año 2015.

**Apéndice II: FSCA a escala diaria por año hidrológico.**



Figura 18. FSCA a escala diaria por año hidrológico.

Continuación

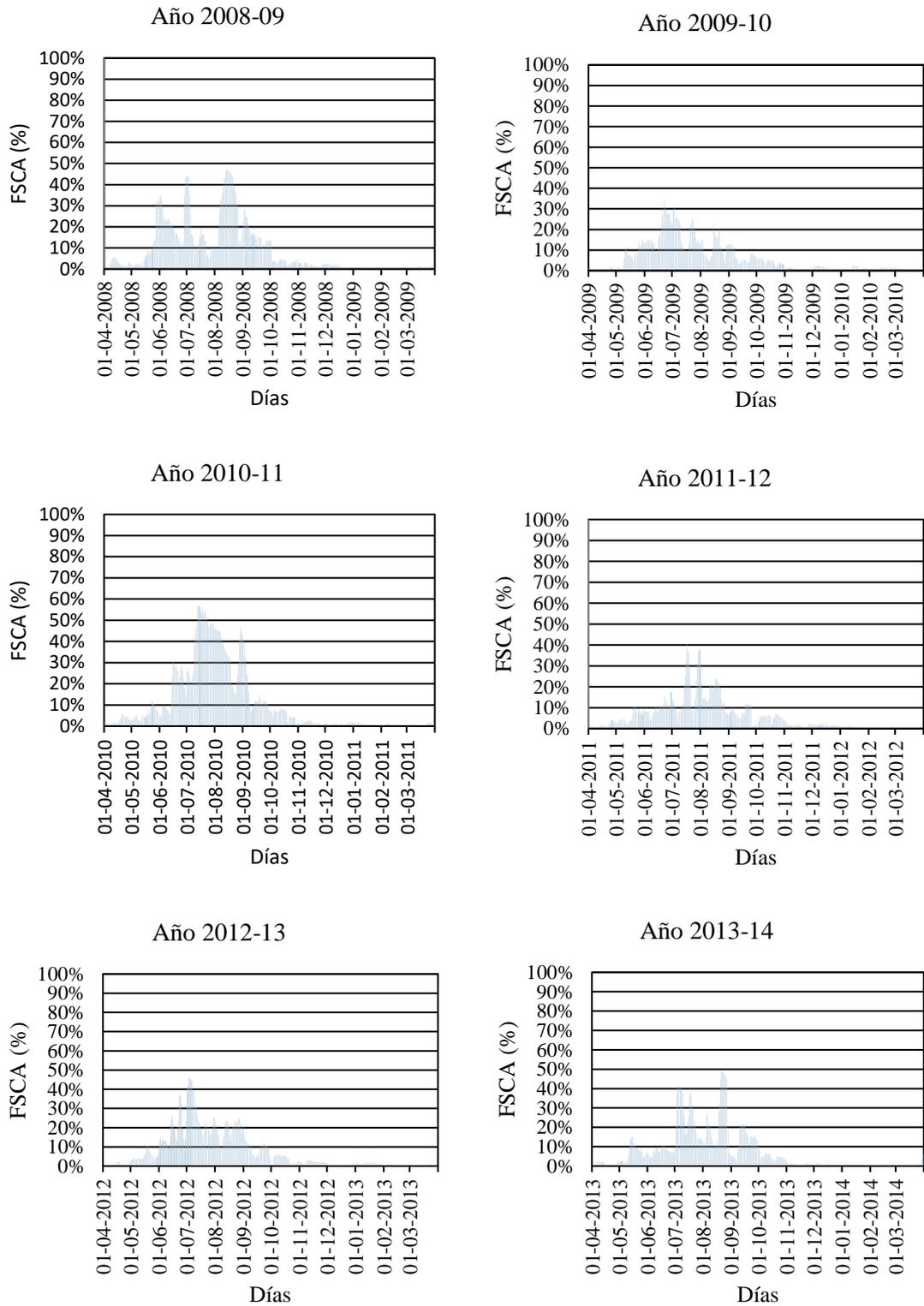


Figura 17. FSCA a escala diaria por año hidrológico.

Continuación

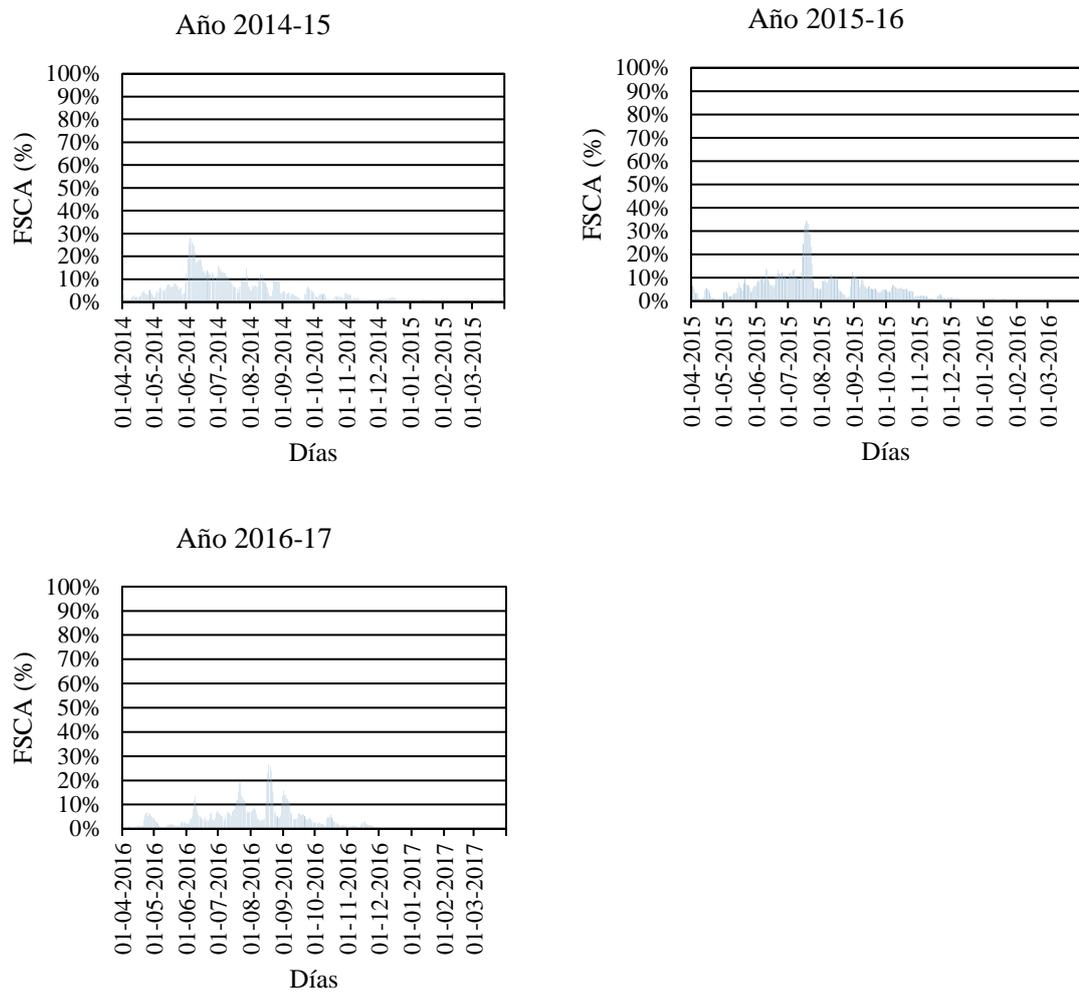


Figura 17. FSCA a escala diaria por año hidrológico.

**Apéndice III: SCA a escala mensual por año hidrológico.**

Cuadro 10. SCA a escala mensual por año hidrológico.

| Año     | Meses  |         |         |         |         |            |         |           |           |        |         |        |
|---------|--------|---------|---------|---------|---------|------------|---------|-----------|-----------|--------|---------|--------|
|         | Abril  | Mayo    | Junio   | Julio   | Agosto  | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre | Enero  | Febrero | Marzo  |
| 2002-03 | 117,14 | 869,76  | 2955,32 | 1562,69 | 976,77  | 263,43     | 233,30  | 309,04    | 190,68    | 115,52 | 85,94   | 77,23  |
| 2003-04 | 211,88 | 337,40  | 1534,03 | 1245,44 | 1318,67 | 284,85     | 230,60  | 141,01    | 80,40     | 155,35 | 123,38  | 77,89  |
| 2004-05 | 445,32 | 439,06  | 1031,48 | 3093,51 | 970,89  | 443,72     | 137,24  | 194,37    | 93,90     | 75,06  | 85,05   | 96,60  |
| 2005-06 | 366,28 | 1252,04 | 2651,75 | 4944,31 | 3360,13 | 2092,28    | 548,31  | 146,99    | 235,17    | 123,70 | 82,22   | 97,11  |
| 2006-07 | 226,73 | 601,52  | 1714,60 | 3459,97 | 3900,58 | 964,56     | 490,06  | 200,49    | 42,97     | 136,94 | 90,66   | 78,78  |
| 2007-08 | 288,93 | 782,40  | 2971,36 | 3888,98 | 2217,84 | 1645,95    | 462,82  | 178,65    | 101,11    | 107,62 | 75,21   | 68,00  |
| 2008-09 | 297,13 | 1018,46 | 2592,08 | 1881,37 | 3541,19 | 1908,24    | 458,81  | 215,66    | 139,72    | 52,27  | 31,04   | 73,24  |
| 2009-10 | 117,78 | 842,10  | 2202,10 | 2093,15 | 1276,31 | 797,15     | 478,07  | 96,78     | 154,78    | 131,67 | 115,72  | 105,74 |
| 2010-11 | 297,70 | 660,07  | 1895,91 | 5032,82 | 3920,50 | 1720,53    | 637,02  | 176,53    | 129,60    | 98,44  | 88,96   | 88,38  |
| 2011-12 | 187,37 | 634,26  | 1133,55 | 2171,62 | 1927,15 | 833,25     | 576,75  | 192,92    | 189,22    | 88,08  | 48,09   | 53,11  |
| 2012-13 | 134,55 | 594,90  | 2031,36 | 3167,99 | 2211,28 | 1051,62    | 405,66  | 239,09    | 48,73     | 139,98 | 50,36   | 65,77  |
| 2013-14 | 136,62 | 775,77  | 881,04  | 2937,49 | 2717,15 | 1536,20    | 569,15  | 120,18    | 107,81    | 74,75  | 54,38   | 118,86 |
| 2014-15 | 319,72 | 666,12  | 1926,26 | 1131,07 | 830,98  | 402,71     | 268,69  | 170,60    | 118,06    | 94,48  | 74,45   | 74,47  |
| 2015-16 | 296,41 | 562,32  | 1114,04 | 1717,14 | 828,01  | 719,76     | 523,55  | 184,58    | 74,81     | 85,88  | 48,95   | 51,58  |
| 2016-17 | 273,29 | 202,52  | 611,14  | 1003,23 | 1120,64 | 756,18     | 290,57  | 151,34    | 25,85     | 32,34  | 33,57   | 45,10  |