

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA**



**CUANTIFICACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIO - TEMPORAL DE LA  
COBERTURA NIVAL EN LA MACROZONA CENTRO SUR DE CHILE**

**RODRIGO ALEJANDRO ALVAREZ DOMINGUEZ**

PROYECTO DE TITULO  
PRESENTADO A LA FACULTAD DE  
INGENIERIA AGRICOLA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN,  
PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL AGRICOLA

**CHILLAN – CHILE**

**2025**

## **AGRADECIMIENTOS**

Una especial mención al Dr. Sebastián Krogh por la constante motivación entregada en los períodos de flaqueza, cuando las pequeñas palabras generan un gran aliento. Muchas gracias por su tiempo, por las enseñanzas y por el desafío que me acompañó a cursar. También mencionar y agradecer el aporte económico proporcionados de una manera genuina por parte de Dr. Krogh a través de los proyectos Fondecyt de Iniciación 11230787 y VRID de iniciación 2022000427-INI.

Nuevamente decir gracias por la formación de este joven y por la de muchos más jóvenes que pasarán por su tutela.

**CUANTIFICACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIO - TEMPORAL DE LA  
COBERTURA NIVAL EN LA MACROZONA CENTRO SUR DE CHILE**

Aprobado por:

Sebastián Krogh Navarro  
Ingeniero Civil, Ph. D.  
Profesor Asociado

---

Profesor Guía

Jorge Felez Bernal  
Geógrafo, MCs.  
Colaborador Académico

---

Profesor Asesor

José Luis Arumí Ribera  
Ingeniero Civil, Ph. D.  
Profesor Titular

---

Profesor Asesor

José Luis Arumí Ribera  
Ingeniero Civil, Ph. D.  
Profesor Titular

---

Director de Departamento

Octavio Lagos Roa  
Ingeniero Civil Agrícola, Ph. D.  
Profesor Titular

---

Decano

## INDICE DE MATERIA

|   |    |
|---|----|
| RESUMEN.....  | 1  |
| ABSTRACT.....   | 3  |
| 1. INTRODUCCION.....  | 5  |
| 2. HIPOTESIS.....   | 9  |
| 3. OBJETIVOS.....   | 10 |
| 3.1. Objetivo general.....  | 10 |
| 3.2. Objetivo específico.....   | 10 |
| 4. METODOLOGIA.....   | 11 |
| 4.1. Creación de shapefiles de las zonas de estudio.....  | 12 |
| 4.2. Creación de unidades de respuesta nival (URN).....   | 13 |
| 4.2.1. Filtro de todas las subsubcuencas de interés en formato vectorial.....                   | 14 |
| 4.2.2. Generación de archivos ráster de elevación y aspecto.....                                | 15 |
| 4.2.3. Reclasificación de ráster de elevación y aspecto.....                                    | 17 |
| 4.2.4. Generación final de URN.....   | 18 |
| 4.3. Generación de mascara de bosques (ráster).....   | 20 |
| 4.4. Cargar shapefiles y ráster en Google Earth Engine.....                                     | 22 |
| 4.5. Código base de programación.....   | 23 |
| 4.5.1. Llamada de colección de imagen.....  | 24 |
| 4.5.2. Eliminación de píxeles con presencia de nubes.....                                       | 26 |
| 4.5.3. Eliminación de píxeles con bosques.....  | 26 |
| 4.5.4. Unión de las colecciones de imágenes previas en una gran sola colección de imágenes..... | 27 |
| 4.5.5. Creación de propiedad que indique el día juliano de cada imagen (INDEX_DAY).....         | 27 |
| 4.5.6. Unión de imágenes que contengan el mismo día juliano (INDEX_DAY).....                    | 28 |
| 4.5.7. Cálculo de área de las imágenes e insertar su valor como propiedad.....                  | 28 |
| 4.5.8. Descarte de imágenes sin información suficiente a través de un filtro espacial.....      | 30 |
| 4.5.9. Cálculo del SCA y FSC.....   | 31 |

|  |    |
|--|----|
| 4.5.10. Generación de matriz con los datos de interés. ....  | 31 |
| 4.5.11. Descarga de información para análisis en Excel .....   | 32 |
| 4.6. Criterios de selección periodos críticos a escala de subsubcuenca y URN.<br>.....                         | 32 |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....   | 35 |
| 5.1. Análisis de información satelital disponible a escala de subsubcuenca..                                   | 35 |
| 5.2. Análisis de tendencias históricas a escala subsubcuenca.....  | 43 |
| 5.3. Caracterización geomorfológica de las Unidades de Respuesta Nival<br>(URN).....                           | 50 |
| 5.4. Análisis de información satelital disponible a escala de URN. ....  | 52 |
| 5.5. Análisis de tendencias a escala de URN. ....  | 59 |
| 5.5.1. Análisis de tendencias respecto al inicio de acumulación nival a escala<br>de URN.....                  | 59 |
| 5.5.2. Análisis de tendencias en el inicio derretimiento de nieve a escala URN.<br>.....                       | 63 |
| 5.5.3. Análisis de tendencias en el fin de derretimiento de nieve a escala URN.<br>.....                       | 68 |
| 5.5.4. Análisis comparativo del día de inicio del derretimiento entre las URN<br>con aspectos norte y sur..... | 72 |
| 5.5.5. Análisis comparativo del día de fin del derretimiento entre las URN con<br>aspectos norte y sur. ....   | 75 |
| 6. CONCLUSIONES .....  | 77 |
| 7. BIBLIOGRAFIA.....   | 79 |
| 8. ANEXOS .....  | 81 |

## INDICE DE TABLAS

| En el texto   | Página |
|---|--------|
| Tabla 1. Rangos de discretización de alturas, con sus respectivos identificadores (valor de píxel). ..... | 17     |
| Tabla 2. Rangos de discretización de aspectos, con sus respectivos indicadores.....                       | 17     |
| Tabla 3. Unidades de Respuesta Nival (URN) reclasificadas con aspecto norte. ....                         | 18     |
| Tabla 4. Unidades de Respuesta Nival (URN) reclasificadas con aspecto sur. ....                           | 19     |
| Tabla 5. Nomenclatura final de las Unidades de Respuesta Nival. ....                                      | 19     |
| Tabla 6. Cantidad de datos validos disponibles a escala SSC para cada año. ....                           | 36     |
| Tabla 7. Determinación efectiva del inicio de acumulación a nivel SSC. ....                               | 40     |
| Tabla 8. Determinación efectiva del fin del derretimiento de nieve a escala SSC. ....                     | 41     |
| Tabla 9. Dia juliano que marca el inicio de acumulación nival a escala SSC. ....                          | 43     |
| Tabla 10. Dia juliano que marca el fin del derretimiento nival a escala SSC. ....                         | 44     |
| Tabla 11. Cuantificación de distribución espacial de las URN. ....  | 51     |
| Tabla 12. Disponibilidad de datos validos a escala URN. ....  | 52     |
| Tabla 13. Determinación del inicio de acumulación a escala URN. ....                                      | 54     |
| Tabla 14. Determinación del inicio de derretimiento a escala URN. ....                                    | 56     |
| Tabla 15. Determinación del fin del derretimiento de nieve a escala URN. ....                             | 58     |
| Tabla 16. Dia juliano que marca el inicio de acumulación nival para las URN con aspecto norte. ....       | 60     |
| Tabla 17. Dia juliano que marca el inicio de acumulación nival para las URN con aspecto sur. ....         | 61     |

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Tabla 18. | Día juliano que marca el inicio del derretimiento nival para las URN con aspecto norte. ....   | 64 |
| Tabla 19. | Día juliano que marca el inicio del derretimiento nival para las URN con aspecto sur. ....   | 65 |
| Tabla 20. | Día juliano que marca el fin del derretimiento nival para las URN con aspecto norte. ....  | 69 |
| Tabla 21. | Día juliano que marca el fin del derretimiento nival para las URN con aspecto sur. ....  | 70 |
| Tabla 22. | Días más tarde en que se presentó el inicio de derretimiento nival en las URN con aspecto sur respecto a las URN con aspecto norte. .... | 74 |
| Tabla 23. | Días más tarde en que se presentó el fin de derretimiento nival en las URN con aspecto sur respecto a las URN con aspecto norte. ....    | 23 |

| En el anexo |  | Página |
|-------------|--|--------|
| Tabla A1.   | Bandas del sensor multiespectral MSI de Sentinel-2. ....                     | 81     |
| Tabla A2.   | Bandas utilizadas por los sensores ETM y ETM+ de Landsat 5 y Landsat 7. .... | 81     |
| Tabla A3.   | Bandas utilizadas por los sensores OLI/TIR de Landsat 8. ....                | 82     |
| Tabla A4.   | Bandas utilizadas por los sensores OLI/TIR de Landsat 9. ....                | 82     |

## INDICE DE FIGURAS

|            |   | Página |
|------------|---|--------|
| Figura 1.  | Zonas de interés al estudio del comportamiento del manto nival. ....  | 11     |
| Figura 2.  | Procedimiento genérico de la creación de shapefiles de cada SSC. ....   | 13     |
| Figura 3.  | Procedimiento general de la creación de las unidades de respuesta nival. ....   | 14     |
| Figura 4.  | Visualización del Constructor de consultas y la filtración de zonas. ....   | 15     |
| Figura 5.  | Digital Elevation Model (DEM) cortado a las dimensiones de la zona de interés. ....   | 16     |
| Figura 6.  | Visualización de operación final efectuada en calculadora ráster. ....  | 20     |
| Figura 7.  | Ráster de presencia/ausencia de bosques generado en QGIS. ....  | 21     |
| Figura 8.  | Procedimiento de carga de shapefiles a la plataforma GEE. ....  | 22     |
| Figura 9.  | Procedimiento de carga de rasters a la plataforma GEE. ....   | 23     |
| Figura 10. | Procedimiento genérico de código de programación. ....  | 24     |
| Figura 11. | Ejemplo de la selección de las fechas críticas a nivel SSC, con sus principales componentes. ....   | 33     |
| Figura 12. | Ejemplificación de la selección de las fechas críticas a nivel URN, con sus principales componentes. ....   | 33     |
| Figura 13. | Ejemplo de un periodo con poca disponibilidad de datos (imposibilidad de selección de las fechas críticas). ....  | 34     |
| Figura 14. | Ejemplificación/comparación entre un año con baja y alta disponibilidad de datos, año 2007 y 2023 respectivamente en la subsubcuenca Ñuble Alto (SSC 08100). .... | 37     |
| Figura 15. | Mapa de temporal del lanzamiento de las misiones espaciales y discontinuación consideradas. ....  | 38     |
| Figura 16. | Visualización temporal de la variación nival disponible desde el año 2019 al 2023 a escala SSC. ....  | 42     |
| Figura 17. | Variabilidad temporal promedio del inicio de acumulación de nieve a escala SSC. ....  | 45     |
| Figura 18. | Variabilidad temporal promedio del fin del derretimiento a nivel SSC. ....  | 46     |

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Figura 19. | Variación temporal del inicio de acumulación nival de las subsubcuencas pertenecientes a la región de Ñuble. ....  | 47 |
| Figura 20. | Variación temporal del inicio de acumulación nival de las subsubcuencas pertenecientes a la región de Biobío. ....   | 48 |
| Figura 21. | Variación temporal del final de la acumulación de nieve para todas las subsubcuencas pertenecientes a la zona de estudio. ....                             | 49 |
| Figura 22. | Distribución espacial de las unidades de respuesta nival generadas. ....   | 50 |
| Figura 23. | Tendencia temporal del inicio de acumulación nival para las URN con orientación norte. ....  | 62 |
| Figura 24. | Tendencia temporal del inicio de acumulación nival para las URN con orientación sur. ....  | 63 |
| Figura 25. | Tendencia temporal del inicio del derretimiento nival para las URN con orientación norte. ....   | 66 |
| Figura 26. | Tendencia temporal del inicio del derretimiento nival para las URN con orientación sur. ....   | 67 |
| Figura 27. | Análisis de variación espaciotemporal de las URN con mayor flujo de fechas de inicio de derretimiento efectivamente seleccionadas. ....                    | 68 |
| Figura 28. | Ejemplificación del aumento del día en que se presenta el fin del derretimiento entre mayor altura. Temporada 2021/2022 en URN con orientación norte. .... | 71 |

## “CUANTIFICACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIO - TEMPORAL DE LA COBERTURA NIVAL EN LA MACROZONA CENTRO SUR DE CHILE”.

"QUANTIFICATION OF THE SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF SNOW COVER IN THE CENTRAL-SOUTH REGION OF CHILE".

**Palabras claves:** Cobertura Nival, Índice Normalizado de Nieve, Análisis de Información Geográfica, Unidad de Respuesta Nival, Google Earth Engine.

### RESUMEN

En la plataforma web *Google Earth Engine* (GEE) se procesaron imágenes recopiladas por los sensores portados por los satelitales Landsat (5, 7, 8 y 9) y Sentinel-2 a una resolución espacial de 30 metros (homogenizado por diferencias de resolución) y una frecuencia de revisita variable de entre una a dos semanas y media, para calcular el índice espectral NDSI (*Normalized Difference Snow Index*) e información derivada de este, y así, caracterizar la variabilidad espaciotemporal de la cobertura nival en cuencas de cabecera de las regiones del Ñuble y Biobío desde el 01/01/2000 hasta el 31/12/2024 en dos distintas escalas espaciales. La primera escala espacial es a nivel subsubcuenca, donde solo se logró caracterizar la evolución del manto nival entre los años 2019 y 2024, debido a que previo al año 2019 no existe suficiente información (alcance de metodología), por tanto, no se logró realizar un análisis de tendencia temporal. La segunda escala espacial son segmentaciones terrenales que comparten diferentes rangos de elevación y orientación denominadas Unidades de Respuesta Nival (URN), en estas se

cuantifico la diferencia de días en que se presentan los fenómenos de inicio de acumulación, inicio y fin del derretimiento de nieve entre las URN que comparten la misma discretización de altura, pero distinta orientación (norte y sur). Aquí no se encontró una diferencia significativa en cuando se presenta la fecha de inicio de acumulación de nieve entre las URN con orientaciones contrapuestas, pero si en las fechas de inicio y fin de derretimiento nival.

Este estudio contribuye a mejorar el entendimiento sobre la variabilidad espacio temporal de la cobertura de nieve integrando nuevas técnicas de análisis basadas en la computación en nube.

## "QUANTIFICATION OF THE SPATIO-TEMPORAL VARIABILITY OF SNOW COVER IN THE CENTRAL-SOUTH REGION OF CHILE".

**Keywords:** Snow cover, Normalized Difference Snow Index, Geographic Information Analysis, Nival Response Unit, Google Earth Engine.

### ABSTRACT

On the Google Earth Engine (GEE) web platform, images collected by the sensors carried by the Landsat (5, 7, 8 and 9) and Sentinel-2 satellites were processed at a spatial resolution of 30 meters (homogenized by resolution differences) and a variable revisit frequency of between one and two and a half weeks, to calculate the NDSI (Normalized Difference Snow Index) spectral index and information derived from it, and thus characterize the spatiotemporal variability of the coverage. Nival in headwaters in the Ñuble and Biobío regions from 01/01/2000 to 31/12/2024 on two different spatial scales. The first spatial scale is at the sub-basin level, where it was only possible to characterize the evolution of the nival mantle between 2019 and 2024, because prior to 2019, there is not enough information (scope of methodology), therefore, a time trend analysis was not possible. The second spatial scale are earthly segmentations that share different elevation and orientation ranges called Nival Response Units (NUR), in which the difference of days in which the phenomena of beginning of accumulation, beginning and end of snow melt between the NRU that share the same discretization of height, but different orientation (north and south) are quantified. A significant difference was not found here when the date

of start of snow accumulation between the URN with conflicting orientations is presented, but on the dates of start and end of natural melting.

This study helps improve understanding of the spatio-time variability of snow cover by integrating new analytics techniques based on cloud computing.

## 1. INTRODUCCION

La disponibilidad de los recursos hídricos a lo largo del mundo es heterogénea, observándose zonas con mayor cantidad de agua disponible para ciertos rubros comerciales y otros con menor cantidad (D'Odorico et al, 2018). Los caudales de deshielo sostienen actividades agrícolas, forestales, generación de energía hidroeléctrica, suministro de agua en las ciudades y la calidad de la vida silvestre. Las regiones de Ñuble, Maule, Biobío y la Araucanía concentran el 54% de la explotación agrícola dentro del país y están comprendidas en la zona centro sur de Chile (Odepa, 2016). La nieve es la mayor fuente de agua dulce en la zona centro sur de Chile lo que implica una importante dependencia del deshielo a la recarga de napas subterráneas y caudales primaverales (Guadalupe et al, 2021).

En los últimos años estudios medioambientales han puesto énfasis en el cambio climático, desarrollando modelos para predecir la tendencia del calentamiento sobre la superficie terrestre causados por la emisión de los gases de efecto invernadero hacia la atmosfera. Los resultados presentan incrementos de la temperatura de la superficie terrestre en función del tiempo, aumento en la durabilidad y frecuencia de las olas de calor y derretimiento del manto nival, entre otros (Barnett et al, 2005). En particular, el deshielo prematuro afecta directamente al ciclo hidrológico, generando un déficit en los meses de verano y otoño cuando la demanda del recurso hídrico es máxima (Gordon et al, 2022). Cuantificar cuánta agua es aportada desde la nieve es

clave para los usuarios de agua en la toma de decisiones sobre el manejo de los cultivos o frutales y sus respectivos riegos (Vicuña et al, 2013).

Los principales factores que afectan los procesos de acumulación y derretimiento de nieve son la exposición, formas de relieve, elevación, microclima, uso de suelo, entre otros (Stehr et al, 2017). Por ello, se deben considerar estos factores al momento de cuantificar la variabilidad espacio temporal del manto de nieve. Durante los últimos 20 años se ha observado una disminución constante del área cubierta por nieve en la zona centro sur de Chile (SCA; Guadalupe et al, 2021).

La sublimación es la transición directa de la fase sólida a fase de vapor del agua, se considera un componente fundamental del balance de nieve (Tarboton, 1994). La energía total requerida para esta transición es la sumatoria del calor latente de fusión y el calor latente de vaporación lo que es equivalente a 2,833 kJ/kg a 0°C y presión estándar. Como la energía requerida para producirse el fenómeno de sublimación es alto por lo general se considera que la tasa de sublimación es pequeña en comparación con el derretimiento (Strasser et al, 2008).

Múltiples modelos de balance de masa y energía han sido desarrollados para determinar la cantidad de nieve que se transforma en escorrentía aportante a las cuencas y/o napas subterráneas colindantes tomando en consideración diferentes factores tales como la radiación tanto de onda corta como de onda larga, calor latente de evaporación, intercambio de calor sensible y calor

advechado de las precipitaciones para el balance de energía. Algunos ejemplos son el modelo SNOBAL (Marks et al, 2001), SNOWPACK y CROCUS (Etchevers et al, 2004).

El viento afecta directamente en la dinámica de nieve arrastrando la nieve y produciendo su desplazamiento a través de procesos de arrastre, saltación y suspensión (Pomeroy et al, 1990). Los árboles pueden interceptar nieve y generar una sublimación preferencial, afectando la acumulación y derretimiento de nieve. En Chile, se estima que este efecto resulta en un 23,2% en promedio más nieve dentro de la masa forestal que fuera de la misma (Huerta et al, 2019).

Debido a los procesos antes descritos es que la distribución de nieve en la Cordillera de los Andes no es homogénea (Mernild et al, 2016). En la zona centro sur de Chile (33° a 36°S) es donde la Cordillera de los Andes presenta mayor presencia de nieve teniendo una dominancia de índice de cobertura nival (ICN) presentándose en promedio un porcentaje entre el 50-60%, desde 33°S hacia el norte este índice disminuye a valores menores al 50% presentándose también menor área de cobertura nival (SCA; Guadalupe et al, 2021).

En el estudio de la cobertura nival vinculado a los fenómenos de la niña y del niño en diversas cuencas de Chile se evidencio que cuando el fenómeno climático corresponde al niño existía una disminución del área de cobertura nival y de forma contraria las máximas acumulaciones de nieve coinciden con

el fenómeno de la niña (Cortes et al, 2017). Por otro lado, el viento, la altura, y las condiciones topográficas de las cadenas montañosas son también factores importantes al momento de identificar procesos que afectan a la variación espacio - temporal del manto de nieve apreciándose fenómenos como la ablación y sublimación (Mardones et al, 2017).

La nieve es altamente reflectiva, debido a su coeficiente albedo que usualmente se encuentra entre el rango de 0.8 - 0.9, pero en ocasiones puede tener valores más pequeños observándose valores del orden de 0.4 debido a impurezas originadas de diversas naturalezas tales como pueden ser las cenizas volcánicas (Kulkarni, 2002). El *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) es un índice normalizado de nieve utilizado por la comunidad científica basado en la alta reflectancia de la nieve en el espectro visible y la baja reflectancia en el infrarrojo de onda corta (Kulkarni, 2002). Ambas bandas del espectro electromagnético son combinadas para dar origen al NDSI debido a que existen zonas con presencia de nubes y estas al igual que el manto nival son altamente reflectivas en el espectro visible, pero a diferencia de la nieve las nubes presentan una alta reflectancia en el infrarrojo de onda corta (Kulkarni, 2002).

Tradicionalmente las mediciones de la cobertura nivales han sido realizadas *in situ* con la ayuda de estaciones meteorológicas dispuestas en las proximidades de la zona de estudio y diversas metodologías de medición. En las últimas décadas, han surgido nuevas tecnologías de monitoreos más

efectiva para buscar una aproximación de la cobertura nival en zonas de estudio más grande mediante la ayuda de imágenes satelitales (teledetección) y el posterior análisis de datos mediante Software creados por la comunidad científica (Stehr et al, 2017). Sensores como el MODIS (resolución espacial de 500 metros) han permitido acceder a décadas de información sobre la cobertura nival a escala diaria. Debido al problema de la nubosidad afecta a los sensores pasivos satelitales por lo que se busca ocupar diversos sensores remotos a la vez para buscar para complementar sus observaciones. Existen otros satélites con mayor resolución espacial, pero menor resolución temporal como lo son Sentinel-2 y la serie de satélites Landsat, los cuales trabajan con resoluciones espaciales de 20 y 30 metros respectivamente, entregando imágenes de mayor resolución espacial para diverso tipo de estudios (Gascoin et al, 2020). Esto permite la cuantificación de la variación espacial a escalas espaciales más pequeñas, lo cual no se puede realizar con sensores como MODIS.

## **2. HIPOTESIS**

El análisis de imágenes satelitales de Sentinel-2 y Landsat a resolución espacial de 30 metros nos permitirá observar diferencias significativas en las dinámicas de acumulación a diferentes elevaciones y orientaciones de laderas en cuencas de cabecera de la macrozona centro sur.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. Objetivo general**

Cuantificar la variación espacio - temporal de la cobertura nival en la macrozona centro sur de Chile.

#### **3.2. Objetivo específico**

- Caracterizar la cobertura nival a escala de subsubcuenca y sus tendencias temporales.
- Identificar tendencias temporales en la fecha de inicio de acumulación y fin de derretimiento de nieve a escala de unidad de respuesta nival.
- Cuantificar las diferencias entre la fecha de inicio de acumulación de nieve, inicio del derretimiento de nieve y fin del derretimiento de nieve entre laderas con aspectos norte y sur, en diferentes bandas de elevación.

#### 4. METODOLOGIA

El estudio está centrado en las principales cuencas de cabecera de las regiones de Ñuble y Biobío (segmentadas en subsubcuencas y visualizado en Figura 1).

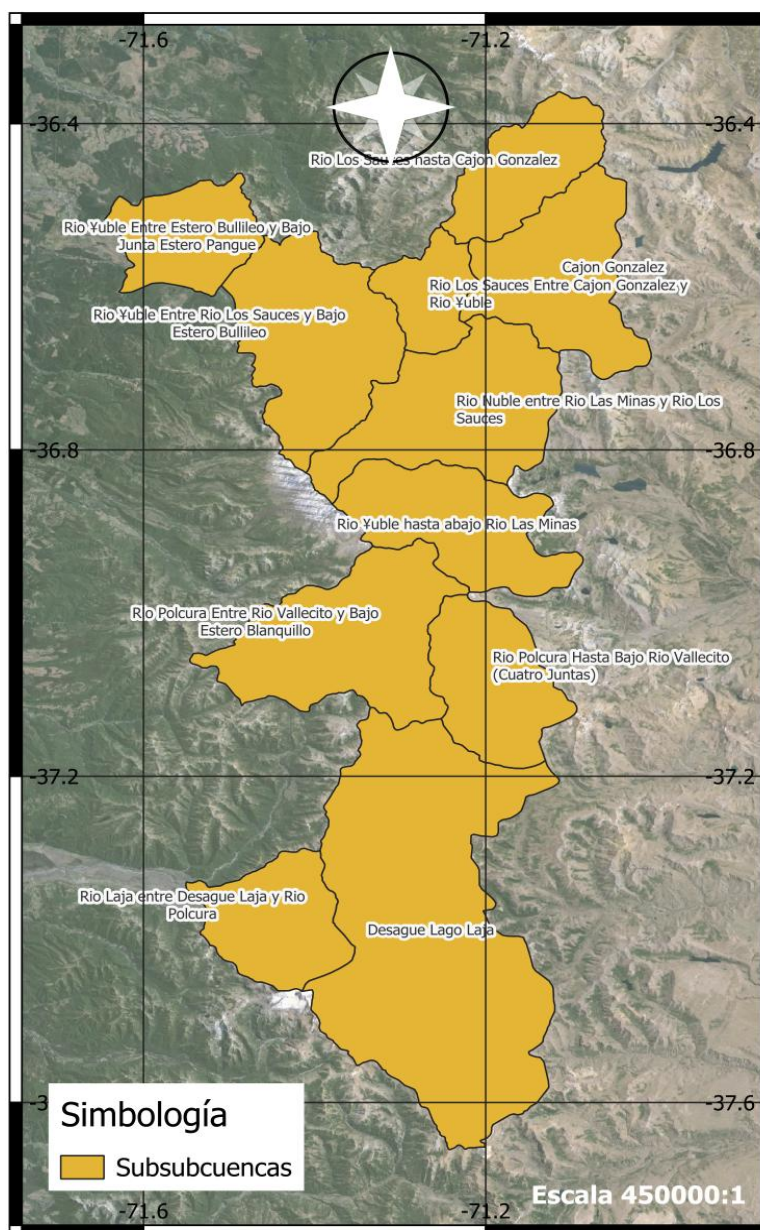


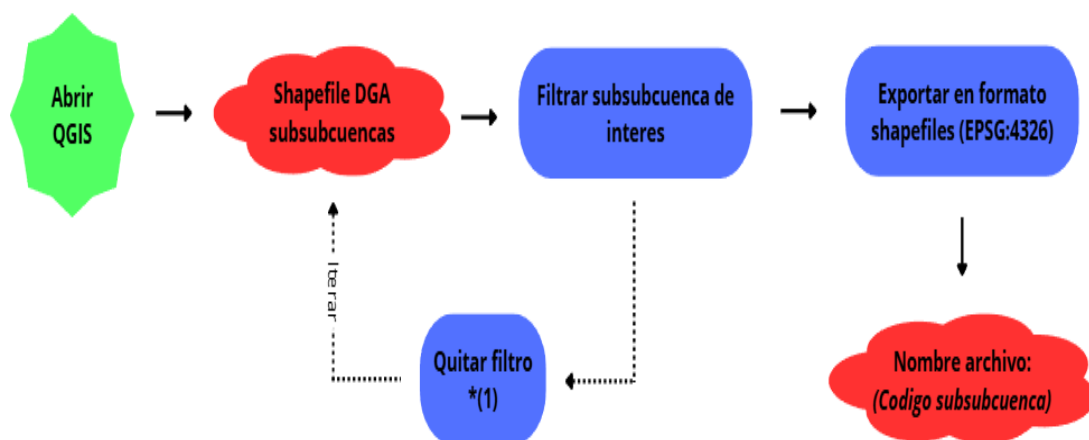
Figura 1. Zonas de interés al estudio del comportamiento del manto nival.

La idea central es generar una base de datos robusta para analizar la variación de nieve en diferentes escenarios. Por ello, se tomaron diferentes consideraciones, como eliminar los píxeles considerados bosques, descartar imágenes satelitales que contengan más de 15% de nubes y eliminar los píxeles que contengan nubes. En las últimas partes del script generado, se integró un filtro espacial para descartar imágenes que no cumplan con una ocupación mínima de espacio según la escala de estudio (especificado adelante).

Es importante aclarar que este código analiza solo una subsubcuenca y/o unidad de respuesta nival por cada ejecución del código. Debiendo repetirse la ejecución múltiples veces (por las limitaciones de GEE).

#### 4.1. Creación de shapefiles de las zonas de estudio.

En QGIS, se cargaron las unidades de respuesta nival y se filtraron solo las unidades de interés una por una para poder obtener y separar por unidad cada una de las subsubcuencas. Generando diferentes Shapefiles como muestra el procedimiento de la Figura 2.



\*(1) Cada vez que se filtra por una subsubcuenca diferente y esta es guardada en el formato deseado, se quita el filtro y se volverá a repetir el proceso hasta terminar todas las subsubcuencas.

Figura 2. Procedimiento genérico de la creación de shapefiles de cada SSC.

#### 4.2. Creación de unidades de respuesta nival (URN).

En el software QGIS, se cargó la cobertura vectorial asociada a las subsubcuencas del territorio nacional, clasificadas por la Dirección General de Aguas (DGA). Mediante el atributo “COD\_SSUBC”, fueron filtradas solo las subsubcuencas pertenecientes al área de interés del estudio, zonas montañosas comprendidas entre la Región de Ñuble y el Biobío. Es importante mencionar, que la plataforma de GEE es compatible para subir archivos del tipo ráster o shapefiles en sistema de coordenadas EPSG:4326, es por esto, que antes de cargarlas a dicha plataforma fue necesario reproyectar la capa filtrada (que inicialmente se encontraba en el sistema de coordenadas EPSG:32719). El procedimiento mencionado se sintetiza en la Figura 3.

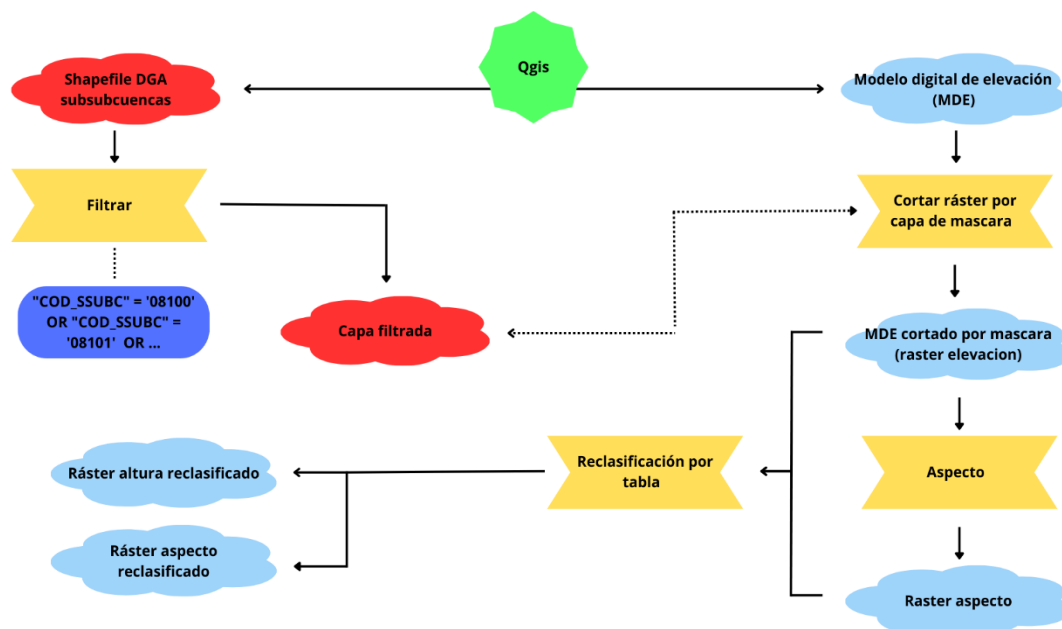


Figura 3. Procedimiento general de la creación de las unidades de respuesta nival.

#### 4.2.1. Filtro de todas las subsubcuencas de interés en formato vectorial.

En QGIS, se cargó el shapefiles proveniente de la DGA (utilizado en el paso 5.1) y se hizo un filtro de todas las subsubcuencas de interés. Utilizando la herramienta “Constructor de consultas” (Figura 4) y el atributo de identificación ‘COD\_SSUB’ del polígono y el conector lógico OR, se logró solo mantener las subsubcuencas que serían requeridas en el posterior análisis.

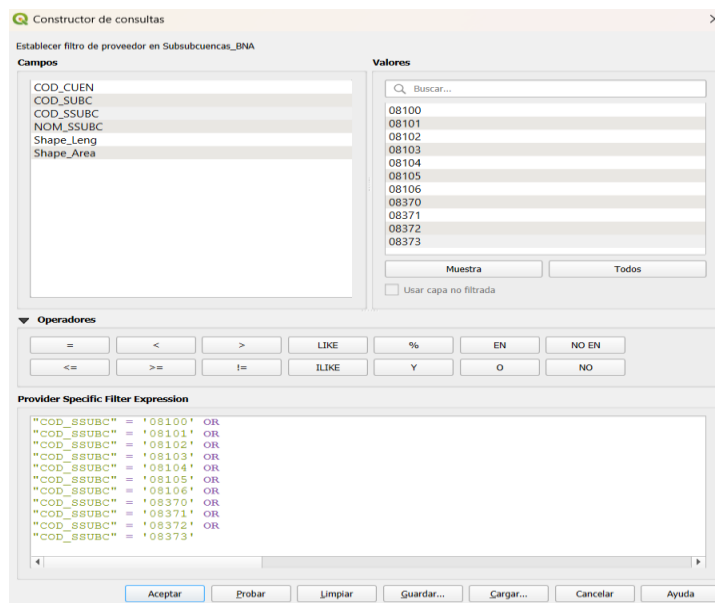


Figura 4. Visualización del Constructor de consultas y la filtración de zonas.

#### 4.2.2. Generación de archivos ráster de elevación y aspecto.

Es indispensable obtener un Modelo Digital de Elevación (MDE o DEM, por sus siglas en ingles) para poder crear diversas discretizaciones de elevación y aspecto. Existen diversos modelos de elevación digital, pero en este estudio escogió el DEM SRTM 30m V.003. Debido a la gran aceptación de la comunidad científica, además de ser un insumo de libre acceso es que se uso este MDE.

Una vez obtenido el DEM, fue cargado en la sección de capas de QGIS. Luego, con la herramienta *“Cortar ráster por capa de mascara”* se cortó el ráster utilizando como mascara la capa vectorial del paso 5.2.1, obteniendo el DEM solo en la superficie de interés como se observa en la Figura 5.

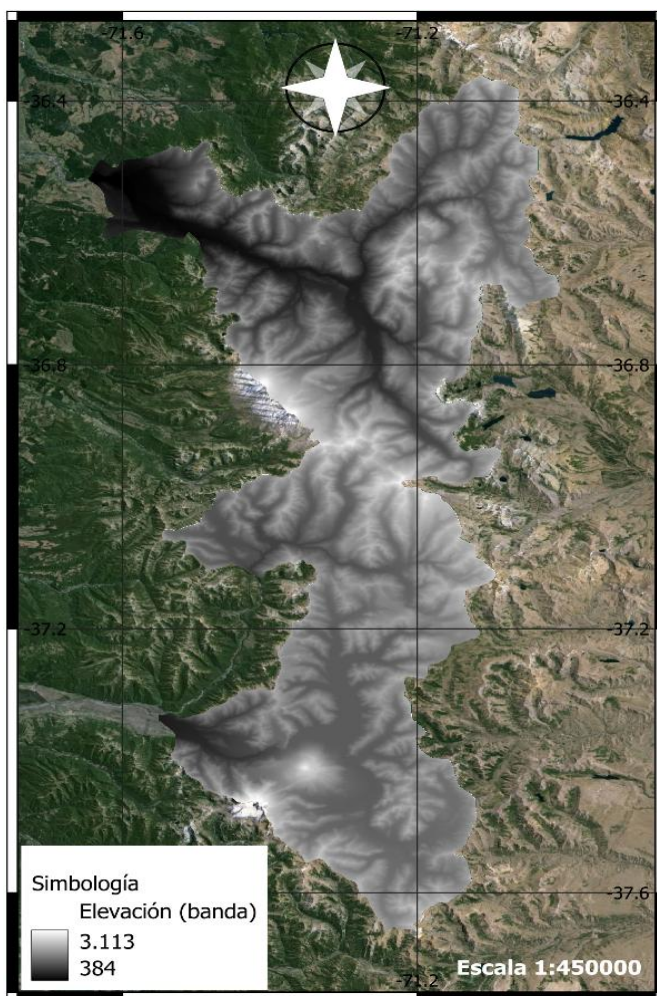


Figura 5. Digital Elevation Model (DEM) cortado a las dimensiones de la zona de interés.

Una vez generado el archivo ráster de elevación, se procedió a obtener el ráster que contiene la información de aspecto en cada píxel de la zona de estudio. Para ello, con la herramienta "aspecto" se obtendrá el ráster de orientación requerido posteriormente.

#### 4.2.3. Reclasificación de ráster de elevación y aspecto.

Con la herramienta de análisis ráster “reclasificar por tabla”, se generaron diversos intervalos de altura y aspecto. En la reclasificación de aspecto, se hizo la discretización de orientación norte y sur. Por otro lado, los intervalos considerados en las alturas se visualizan en la Tabla 1 y Tabla 2.

Tabla 1. Rangos de discretización de alturas, con sus respectivos identificadores (valor de píxel).

| Identificador | Rango de alturas  |
|---------------|-------------------|
| 1             | $]-\infty, 1500]$ |
| 2             | $]1500, 1750]$    |
| 3             | $]1750, 2000]$    |
| 4             | $]2000, 2250]$    |
| 5             | $]2250, 2500]$    |
| 6             | $]2500, 2750]$    |
| 7             | $]2750, 3000]$    |
| 8             | $]3000, +\infty[$ |

Tabla 2. Rangos de discretización de aspectos, con sus respectivos indicadores.

| Identificador | Rango                   | Observación   |
|---------------|-------------------------|---------------|
| 1             | $[270^\circ, 90^\circ[$ | Aspecto norte |
| 10            | $[90^\circ, 270^\circ[$ | Aspecto sur   |

#### 4.2.4. Generación final de URN.

Mediante la herramienta “calculadora ráster” (Figura 6), se efectuó una multiplicación entre las bandas creadas en el paso anterior (aspecto y elevación reclasificadas). La operación es aplicada píxel por píxel, resultando 16 valores diferentes entre los píxeles del ráster, esto hace alusión a 16 diversas combinaciones de elevación y alturas. Luego, se hizo una última “reclasificación por tabla” para acomodar las URN en valores consecutivos, obteniendo una banda con el valor mínimo del píxel de 1 y un valor máximo de 16 (resultados en Tabla 3 y Tabla 4).

Tabla 3. Unidades de Respuesta Nival (URN) reclasificadas con aspecto norte.

| URN | Aspecto                 | Rango de alturas  |
|-----|-------------------------|-------------------|
| 1   |                         | $]-\infty, 1500]$ |
| 2   |                         | $]1500, 1750]$    |
| 3   |                         | $]1750, 2000]$    |
| 4   | Norte                   | $]2000, 2250]$    |
| 5   | $[270^\circ, 90^\circ[$ | $]2250, 2500]$    |
| 6   |                         | $]2500, 2750]$    |
| 7   |                         | $]2750, 3000]$    |
| 8   |                         | $]3000, +\infty[$ |

Tabla 4. Unidades de Respuesta Nival (URN) reclasificadas con aspecto sur.

| URN | Aspecto                 | Rango de alturas  |
|-----|-------------------------|-------------------|
| 9   |                         | $]-\infty, 1500]$ |
| 10  |                         | $]1500, 1750]$    |
| 11  |                         | $]1750, 2000]$    |
| 12  | Sur                     | $]2000, 2250]$    |
| 13  | $[90^\circ, 270^\circ[$ | $]2250, 2500]$    |
| 14  |                         | $]2500, 2750]$    |
| 15  |                         | $]2750, 3000]$    |
| 16  |                         | $]3000, +\infty[$ |

Finalmente, para facilitar la comprensión se denominarán las URN de la numeración del 1 al 8 según su discretización de altura y serán acompañadas de unas “N” y “S” para hacer alusión a la orientación norte y sur respectivamente como se observa en la Tabla 5.

Tabla 5. Nomenclatura final de las Unidades de Respuesta Nival.

| URN | Rango de alturas  |
|-----|-------------------|
| 1N  |                   |
| 1S  | $]-\infty, 1500]$ |
| 2N  |                   |
| 2S  | $]1500, 1750]$    |
| 3N  |                   |
| 3S  | $]1750, 2000]$    |
| 4N  |                   |
| 4S  | $]2000, 2250]$    |
| 5N  |                   |
| 5S  | $]2250, 2500]$    |
| 6N  |                   |
| 6S  | $]2500, 2750]$    |
| 7N  |                   |
| 7S  | $]2750, 3000]$    |
| 8N  |                   |
| 8S  | $]3000, +\infty[$ |

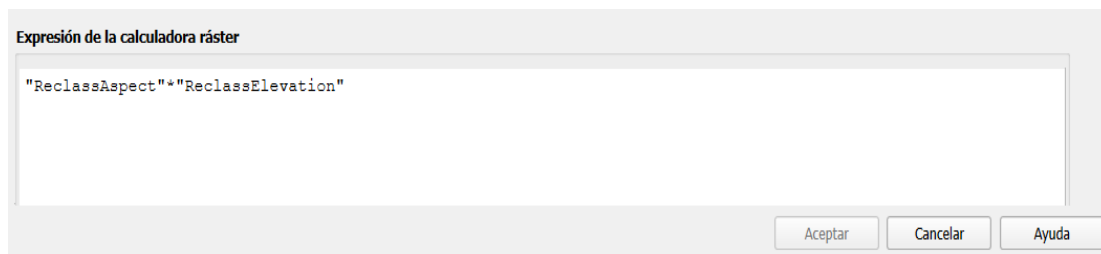


Figura 6. Visualización de operación final efectuada en calculadora ráster.

#### 4.3. Generación de máscara de bosques (ráster).

Desde la página web de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), se descargó el último catastro de uso del suelo para las regiones de Ñuble y el Biobío que comprenden la zona de estudio (2015 y 2016 respectivamente).

Nuevamente en QGIS, se trabajaron los archivos poligonales previamente descargados. El procedimiento fue seleccionar todos los polígonos que son considerados bosques mediante la tabla de atributos (SUBUSO), designándoles una nueva propiedad de identificación con el valor de 0, por el contrario, a los polígonos que tienen un uso de suelo diferente se le asignó el valor 1. Luego, usando la herramienta “*rasterizar*”, se hace una transformación de polígono a ráster dejando el archivo final en sistema de coordenadas EPSG:4326 (resolución 30 metros) . La Figura 7 muestra el resultado del procedimiento descrito.

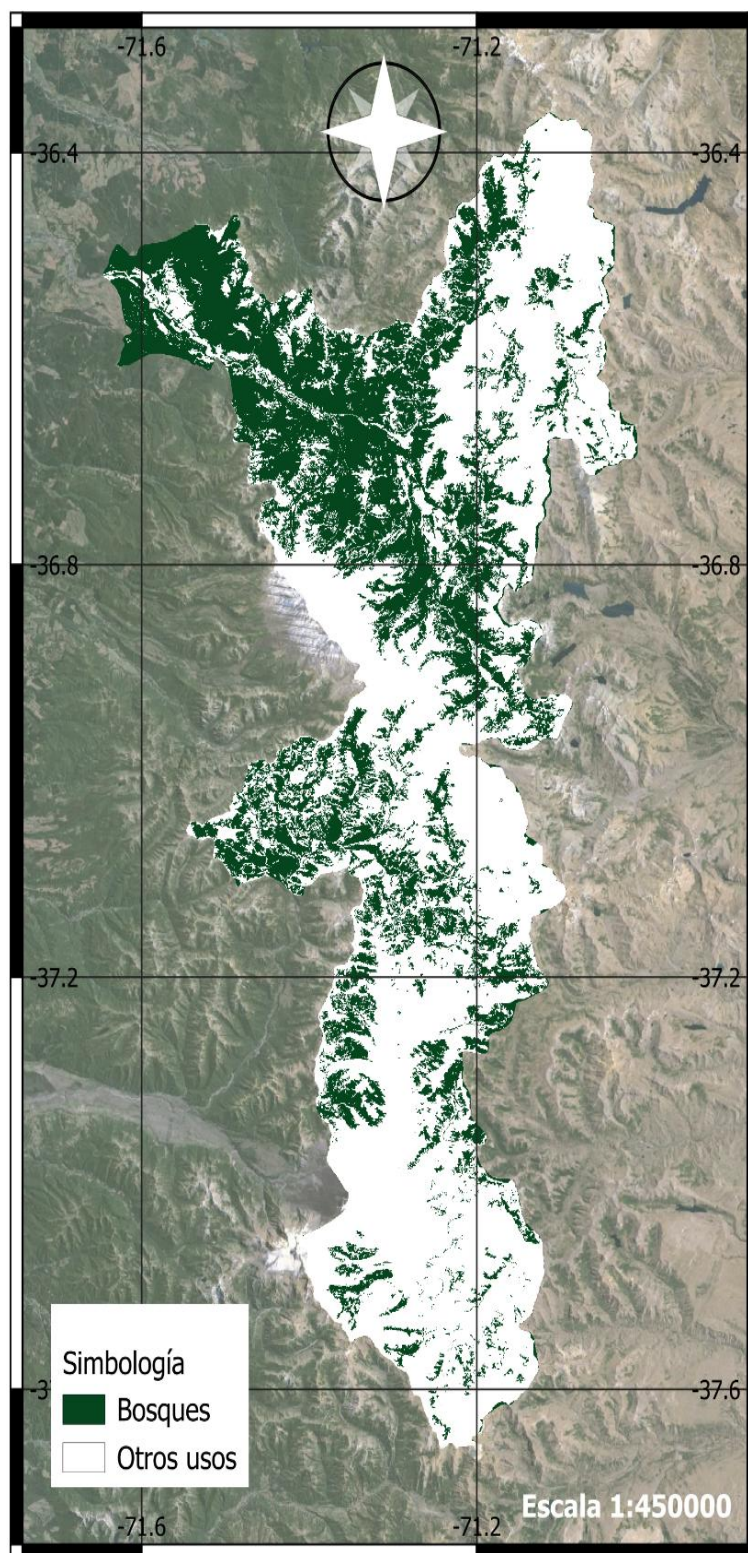


Figura 7. Ráster de presencia/ausencia de bosques generado en QGIS.

#### 4.4. Cargar shapefiles y ráster en Google Earth Engine.

Dentro de la plataforma, en la barra de utilidades principales, específicamente en la sección “Assets” cargamos cada una de las subsubcuencas de interés en sistemas de coordenadas EPSG:4326. Para esto, es necesario tener las extensiones .shp, .shx y .dbf de cada shapefiles para que la carga sea efectuada con éxito (Figura 8).

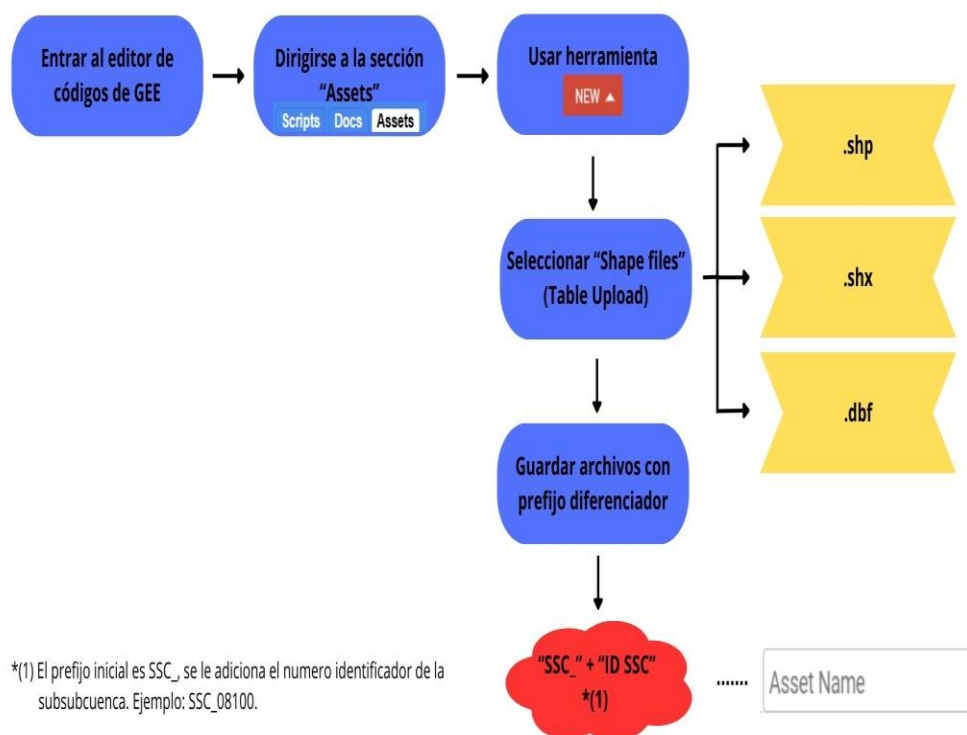


Figura 8. Procedimiento de carga de shapefiles a la plataforma GEE.

Para subir a la plataforma GEE el ráster de URN generado en el paso 5.2. y también el ráster de presencia/ausencia de bosques generado en el paso 5.3. el procedimiento de subida es similar al descrito para subir los archivos vectoriales anteriores, pero esta vez, el formato de subida es “GeoTIFF” (Figura 9).

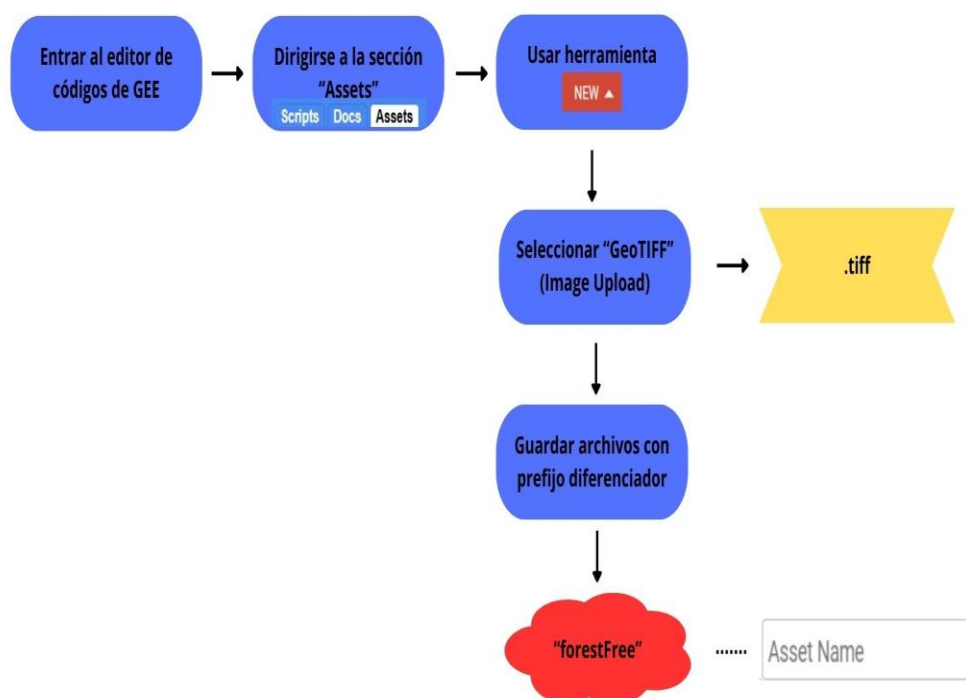
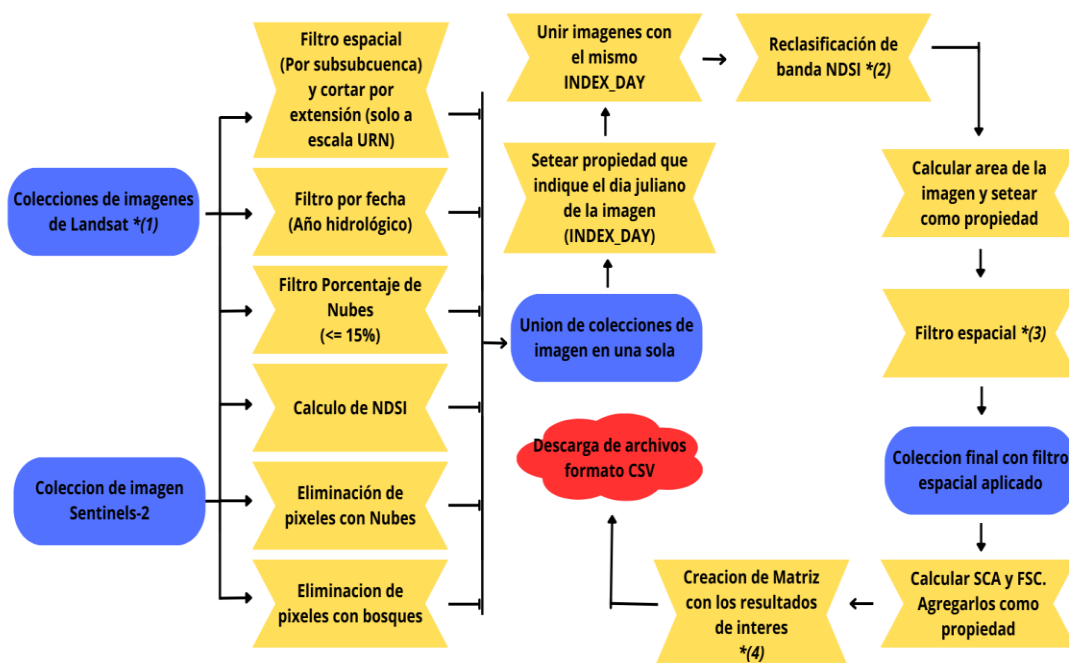


Figura 9. Procedimiento de carga de rasters a la plataforma GEE.

#### 4.5. Código base de programación.

En esta esta sección se desglosará el procedimiento del código de programación realizado en GEE, detallando cada una de sus fases en las a continuación (véase el diagrama de flujo en la Figura 10).



\*(1) se utilizan la colección de imágenes de Landsat 5, Landsat 7, Landsat 8, Landsat 9

\*(2) Se consideran valores 0 (ausencia de nieve) a los píxeles con un valor NDSI menor a 0.4 y 1 (presencia de nieve) a los píxeles con NDSI mayores o igual a 0.4.

\*(3) Se conservarán en el estudio solo las imágenes que conserven al menos el 70% del área total analizada en cada iteración.

\*(4) Se conserva la fecha de obtención de la imagen, snow cover área (SCA), fractional snow cover (FSC) y el área del ráster de cada día.

Figura 10. Procedimiento genérico de código de programación.

#### 4.5.1. Llamada de colección de imagen.

Se creó una función que fuera capaz de filtrar la colección de imagen por espacio (subsubcuenca), fecha (año común o año hidrológico) y que tan solo utilice las imágenes que estén cubiertas por 15% o menos de nubes. Simultáneamente, se eliminaron los píxeles ocupados por nubes y bosques de las imágenes pre filtradas, homogenizó las bandas a utilizar y se calculó el NDSI.

La función utilizada para hacer el prefiltro espacial se llama *“filterBounds”*, esta se encarga de solo utilizar las imágenes que tienen dominio sobre la geometría ingresada como parámetro. Para filtrar por fecha es necesario utilizar la función *“filterDate”*, cuya función requiere dos parámetros, fecha de inicio y final del análisis.

Con la finalidad de poder descartar todas las imágenes que contengan más de un 15% de cobertura de nubes, se aprovechara la propiedad que contiene el porcentaje de nubes en cada una de las imágenes que pasaron los filtros anteriores y la función *“filterMetadata”* que permite conservar las imágenes que cumplan la regla lógica (mayor que, menor que, mayor o igual que y menor o igual que). En el caso de las imágenes derivada de los sensores de la familia Landsat, esta propiedad se llama ‘CLOUD\_COVER\_LAND’ y para Sentinels-2 recibe el nombre ‘CLOUDY\_PIXEL\_PERCENTAGE’.

Se uso la función *“reproject”* para homogenizar las bandas de las imágenes satelitales y así evitar perdida de información y errores al operar bandas de diferentes escalas, dejando todas las bandas a una resolución de 30 metros (Sentinel-2 tiene algunas bandas de resolución de 10, 20 y 60 metros).

En la determinación del valor del Normalized Difference Snow Index (NDSI), se aplicó la función *“normalizedDifference”*. Es necesario ingresar dos bandas, en este caso para obtener NDSI, correspondiente a la banda verde el espectro visible y la banda electromagnética del infrarrojo de onda corta (SWIR). Finalmente, se reclasifico la banda obtenida de NDSI, considerando los pixeles

con un valor menor a 0.4 como ausencia de nieve y para los valores iguales o mayores a 0.4 como presencia de nieve.

#### 4.5.2. Eliminación de píxeles con presencia de nubes.

En las colecciones de imágenes multiespectrales utilizadas, existe una banda de calidad (QA). Cuya banda permite la detección de píxeles con presencia de nubes, haciendo una posible diferenciación de diversos tipos de nubes (nubes dilatadas, cirros, entre otros).

En Sentinel-2, la banda recibe el nombre de 'QA60'. El "60" hace alusión a la resolución espacial la cual corresponde a 60 metros. Por otro lado, la banda utilizada para la máscara de nubes de las imágenes proveniente de los sensores de la familia Landsat es conocida como 'QA\_PIXEL' y su resolución es de 30 metros.

Para poder eliminar los píxeles que tengan presencia de nubes o cirros (nubes altas que se componen de cristales de hielo) fue necesario utilizar las bandas QA. El mecanismo es sencillo, se genera una imagen del tipo ráster que identifica con valor 0 la presencia de nubes y como valor 1 las demás secciones. Así finalmente, utilizando la función *"updateMask"* se crea una máscara, eliminando todos los píxeles con nubes.

#### 4.5.3. Eliminación de píxeles con bosques.

Con la disposición del rasters de ausencia/presencia de bosques generado en el paso 5.3. la eliminación de bosques es sencilla. Tan solo fue necesario

aplicar la función *“updateMask”* a la colección de imagen, descartando todos los píxeles que contengan bosques de cada una de las imágenes.

#### 4.5.4. Unión de las colecciones de imágenes previas en una gran sola colección de imágenes.

Principalmente por la máscara de nubes, fue necesario trabajar la colección de imágenes proveniente de Sentinel-2 de manera separada a las de la familia Landsat (en ambos casos se utilizó la colección de reflectancia superficial), una vez ya se aplicaron tanto la máscara de nubes como la de bosques, es posible unificar la colección de imágenes para facilitar el manejo a posterior. La unificación se consigue utilizando la función *“merge”* (unir) entre las diferentes colecciones previamente segmentadas.

#### 4.5.5. Creación de propiedad que indique el día juliano de cada imagen (INDEX\_DAY).

Cada imagen que se encuentra en la colección de trabajo obtenida en el paso anterior posee una propiedad que indica la fecha y hora de obtención (*‘system:time\_start’*). Para transformar a día juliano es necesario inicialmente solicitar a la imagen el valor de *‘system:time\_start’* y es posible con la función *“get”* (obtener/conseguir). Una vez obtenido, se transformó a día juliano, haciéndose posible gracias a la función *“getRelative”* cuya finalidad es otorgar un valor numérico respecto a otra variable horaria. En este caso es necesario obtener el día respecto al año en cuestión.

Últimamente, se crea la propiedad que identifica el día juliano de obtención mediante la función “set”. Esta función crea una nueva propiedad con el nombre y valor ingresados en los parámetros. En este caso, el día juliano se le dio el nombre ‘INDEX\_DAY’ (propiedad).

#### 4.5.6. Unión de imágenes que contengan el mismo día juliano (INDEX\_DAY).

Al trabajar con diferentes recopilaciones de imágenes satelitales, es más probable que en la colección de trabajo se encuentren varias imágenes obtenidas el mismo día. Sería contraproducente trabajar cada una de estas imágenes por separado, por ello, al poder identificar el día juliano de recopilación es posible unificar las imágenes que compartan el mismo ‘INDEX\_DAY’. Debido a ello, con la biblioteca de funciones de la sección “Join”, fue posible unificar las imágenes que comparten esta propiedad en una sola.

#### 4.5.7. Cálculo de área de las imágenes e insertar su valor como propiedad.

##### 4.5.7.1. Análisis a escala de subsubcuenca.

Cuando la colección de imágenes posee la propiedad ‘INDEX\_DAY’, buscamos saber cuál es el área de cada una de las imágenes, para discretizar si nos aportan información suficiente. Para ello, convertiremos cada una de las imágenes en formato ráster (NDSI) a formato vectorial con la función “reduceToVectors”. Una vez en formato vectorial, se utilizó la función disponible en la librería de geometrías “area”, función que calcula el área de una geometría como su nombre lo dice. Finalmente, se setea el área de cada

una de las imágenes como propiedad en la colección de trabajo (“set”). La propiedad generada se le dio el nombre ‘relativeArea’.

#### 4.5.7.2. Análisis a escala de URN.

A nivel URN, se utilizará el ráster de las unidades de respuesta nival generado en el paso 5.2. Dependiendo de que URN deseemos analizar se usará la función “eq” (igual). Esta función retorna valor 1 (true) a todos los píxeles que cumplen el valor del parámetro ingresado en “eq”, por el contrario, retorna el valor 0 (false).

Por ejemplo, si deseamos cortar la extensión de una imagen a las dimensiones de la URN número 1 (menor a 1500 metros de altura y orientación norte), deberíamos seleccionar solo el valor de banda del ráster URN requerido y guardarlo en una variable y luego generar una máscara en cada una de las imágenes de la colección de imágenes. También se puede aplicar directamente todo dentro de una sola línea de código como se mostrará en el ejemplo.

Dentro de GEE existe una función llamada “*map*” cuya utilidad se enfoca en generar un bucle dentro de cada una de las imágenes de una colección de imágenes, así como un “for” en los lenguajes de programación más tradicionales. Se menciona más que nada para entender el fragmento de código que se mostrará a continuación como ejemplo.

```
var example = ImageCollection.map(function(image) return
image.updateMask(imageURN.eq(1)));
```

Una vez cortada cada una de las imágenes de la colección de imágenes con respecto a la URN analizada, se procedió a transformar cada imagen a formato vectorial y luego se seteó el área como propiedad al igual que el estudio a escala subsubcuenca (*relativeArea*).

#### 4.5.8. Descarte de imágenes sin información suficiente a través de un filtro espacial.

Agregamos como propiedad el área relativa de cada imagen recopilada, pero también necesitamos otra información valiosa. A nivel subsubcuenca se agregó como propiedad el área total de cada una de las subsubcuencas y a nivel URN, se agrega a cada imagen el área total de la URN analizada (*totalArea*). Una vez se tuvo en posesión el área relativa y áreas totales adjuntadas como propiedad en cada una de las imágenes en los dos diversos estudios realizados (a escala subsubcuenca y URN). Se generó la tercer y más importante propiedad la cual hace alusión al porcentaje del área utilizada por las imágenes satelitales respecto al área total para cada una de las diversas combinaciones de parámetros.

Posteriormente, con la función *filterMetadata* se descartaron todas las imágenes que no cumplieran el porcentaje que fue considerado como

información deficiente (el criterio fue conservar las imágenes que contengan al menos el 70%).

#### 4.5.9. Cálculo del SCA y FSC.

Para determinar el área cubierto por nieve (SCA, del inglés *Snow Cover Area*) se aprovechó la función `ee.Image.pixelArea`, la cual se encarga de calcular el área de todos los píxeles con valores numéricos diferentes a cero de una banda previamente seleccionada (`'NDSI_RECLASS'`). Al tener el valor del área de cada imagen guardada en una variable esta fue seteada como propiedad tal cual se ha realizado en procedimientos anteriores utilizando la función `set`.

La fracción cubierta por nieve (FSC, del inglés *Fractional Snow Cover*) se derivada del cociente entre SCA y el área relativa de cada imagen (obtenida y guardada en una variable con la función `get`). Así, fue seteada FSC como propiedad.

#### 4.5.10. Generación de matriz con los datos de interés.

Existen diversos métodos para poder generar una matriz de datos dentro de GEE. En este estudio se creó una `featureCollection` (conjunto de propiedades) dejando tan solo las propiedades generadas a lo largo del código que serán importantes de analizar posteriormente. Las propiedades extraídas son la fecha y hora de obtención de la imagen satelital, área relativa, área cubierta por nieve y día juliano.

#### 4.5.11. Descarga de información para análisis en Excel

“Export.table.toDrive” es la función que permite descargar “*Feature Collection*” en diversos formatos. En este caso se utilizó el formato de descarga .csv para un posterior análisis de los datos resultantes en Excel.

Repetir la ejecución al código cambiando los parámetros de subsubcuenca, periodo de análisis y unidades de respuesta nival es la última parte para poder obtener la materia prima del estudio.

#### 4.6. Criterios de selección periodos críticos a escala de subsubcuenca y URN.

Ambas escalas comparten el inicio de acumulación y fin de derretimiento de nieve en el análisis, incorporando también el estudio del inicio de derretimiento a escala URN, considerados como los periodos críticos. La selección del inicio de acumulación de nieve se estima desde cuando la fracción cubierta por nieve respecto al área de la imagen satelital (FSC) supera al menos el 20% por dos semanas consecutivas. Por ende, cuando se presencié un nevazón leve que se derritió en los días próximos, no fue tomada en cuenta (como se visualiza en los óvalos amarillos marcados en las figuras 11 y 12). El inicio de derretimiento (solo a nivel de unidad de respuesta nival) es determinado cuando se observa una clara tendencia a la disminución desde los valores peak de acumulación (véase en la figura 12). Finalmente, el fin del derretimiento será considerado cuando FSC bajo del 20% para ese día puntual y para los siguientes dentro de la gráfica.

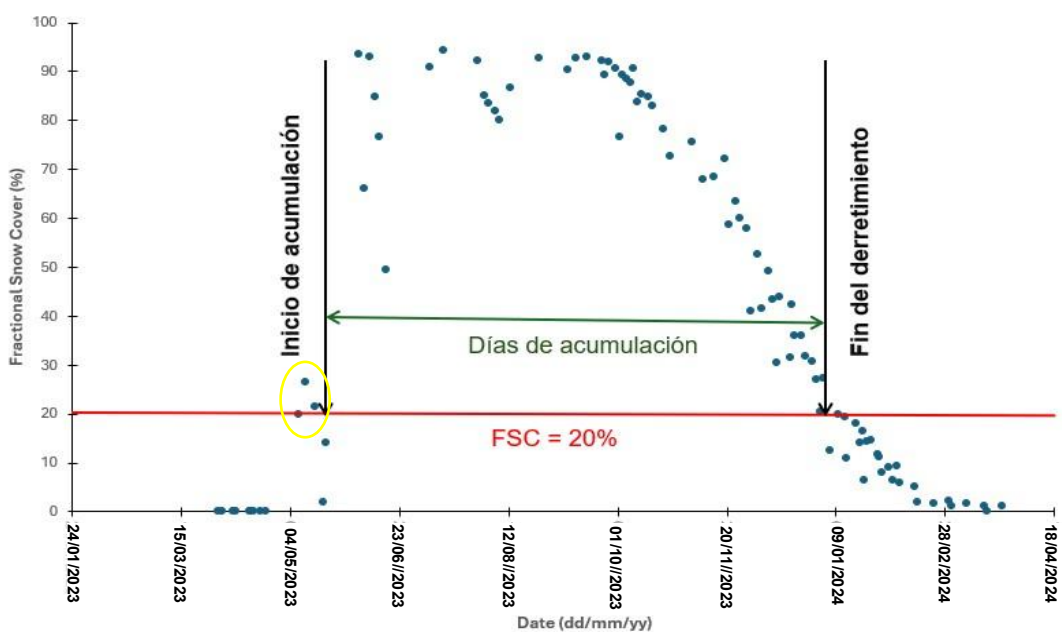


Figura 11. Ejemplo de la selección de las fechas críticas a nivel SSC, con sus principales componentes.

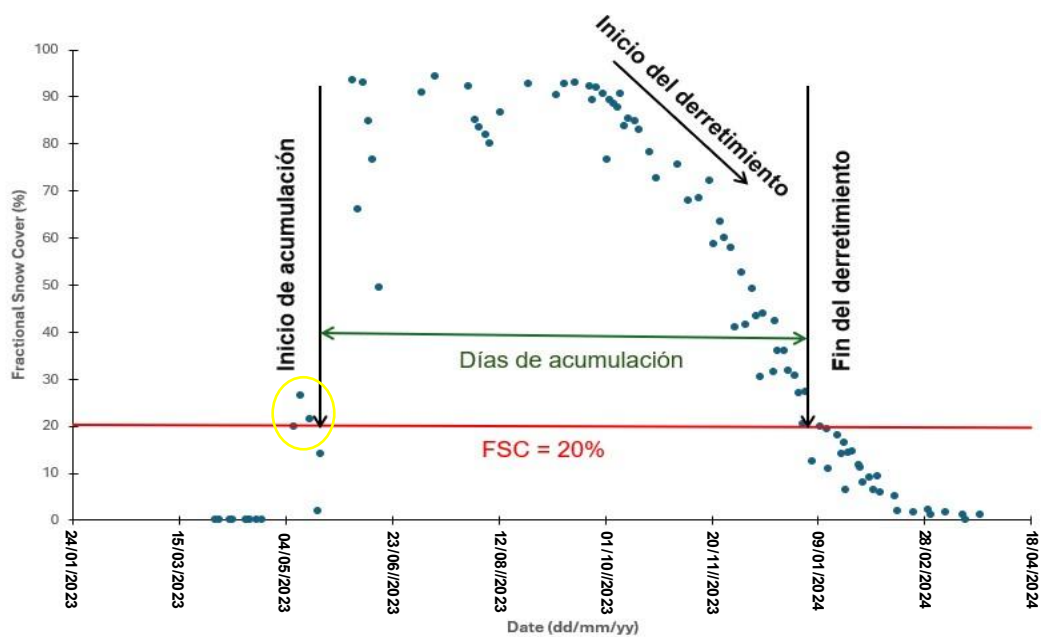


Figura 12. Ejemplificación de la selección de las fechas críticas a nivel URN, con sus principales componentes.

Si al analizar cualquiera de los periodos críticos se presenta un vacío de datos o existe una gran dispersión temporal entre un dato y otro, se considera como “sin información” (gran incertidumbre, Figura 13). El análisis de la selección de fechas críticas es de carácter visual y se determinó la condición óptima con la información disponible. Adicionalmente, la Figura 15 mostrada más adelante nos muestra la comparación entre un año con alta y baja disponibilidad de datos.

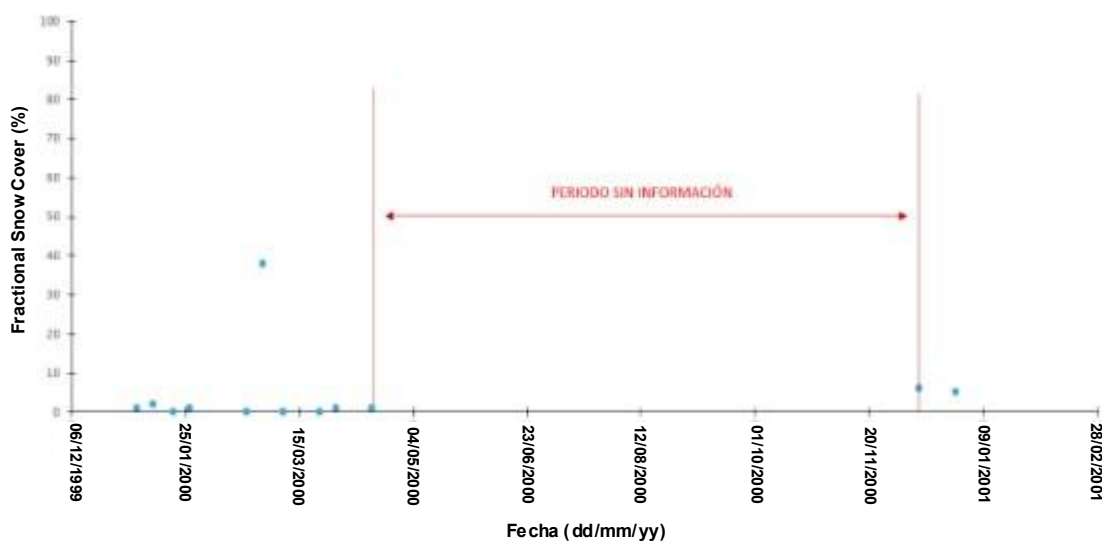


Figura 13. Ejemplo de un periodo con poca disponibilidad de datos (imposibilidad de selección de las fechas críticas).

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Análisis de información satelital disponible a escala de subsubcuenca.

El análisis a escala subsubcuenca abarca desde el 1 de enero del 2000 hasta el 31 de diciembre del 2023. Se investigó para cada una de las subsubcuencas y para cada uno de los años participantes, si era posible determinar los periodos críticos de estudio con la información disponible. La Tabla 6, nos muestra los datos validos disponibles para cada año en cada una de las subsubcuencas. Un “dato valido” hace alusión a un día dentro de un año especifico que paso todos los filtros y prefiltros considerados en el código de programación, por lo cual, para ese día se tienen la información vital como FSC y SCA. Además, se observa que desde el año 2000 al 2018 los datos validos disponibles son considerablemente menos a comparación del año 2019 al 2023, afectando en la discretización de los periodos de inicio de acumulación y baja del umbral mínimo, considerado como el fin del derretimiento ( $FSC < 20\%$ ) como se observa y analizada más adelante.

Tabla 6. Cantidad de datos validos disponibles a escala SSC para cada año.

| Año  | CÓDIGO SSC |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 08100      | 08101 | 08102 | 08103 | 08104 | 08105 | 08106 | 08370 | 08372 | 08373 |
| 2000 | 8          | 12    | 12    | 15    | 7     | 7     | 8     | 12    | 12    | 9     |
| 2001 | 13         | 23    | 24    | 26    | 12    | 11    | 15    | 5     | 23    | 14    |
| 2002 | 13         | 15    | 20    | 20    | 9     | 9     | 10    | 19    | 14    | 10    |
| 2003 | 21         | 24    | 30    | 31    | 17    | 12    | 13    | 30    | 24    | 17    |
| 2004 | 19         | 23    | 30    | 30    | 17    | 15    | 18    | 30    | 20    | 19    |
| 2005 | 27         | 29    | 34    | 32    | 18    | 15    | 18    | 32    | 31    | 18    |
| 2006 | 26         | 33    | 33    | 35    | 20    | 14    | 17    | 33    | 32    | 20    |
| 2007 | 31         | 29    | 30    | 31    | 26    | 15    | 17    | 31    | 31    | 26    |
| 2008 | 30         | 33    | 35    | 39    | 31    | 22    | 23    | 35    | 34    | 31    |
| 2009 | 29         | 27    | 35    | 34    | 28    | 14    | 18    | 37    | 30    | 28    |
| 2010 | 21         | 26    | 34    | 33    | 26    | 15    | 16    | 34    | 23    | 26    |
| 2011 | 24         | 24    | 28    | 28    | 12    | 10    | 10    | 28    | 27    | 12    |
| 2012 | 23         | 19    | 17    | 19    | 11    | 6     | 6     | 19    | 22    | 11    |
| 2013 | 23         | 24    | 24    | 26    | 14    | 10    | 13    | 24    | 25    | 14    |
| 2014 | 30         | 33    | 36    | 42    | 21    | 19    | 20    | 36    | 35    | 21    |
| 2015 | 29         | 22    | 31    | 43    | 24    | 16    | 19    | 31    | 37    | 24    |
| 2016 | 25         | 30    | 32    | 39    | 24    | 19    | 20    | 32    | 30    | 24    |
| 2017 | 28         | 27    | 32    | 37    | 20    | 15    | 17    | 32    | 28    | 20    |
| 2018 | 30         | 35    | 29    | 48    | 21    | 19    | 21    | 29    | 44    | 21    |
| 2019 | 74         | 81    | 86    | 55    | 80    | 45    | 49    | 86    | 89    | 80    |
| 2020 | 89         | 91    | 99    | 108   | 104   | 57    | 62    | 93    | 100   | 106   |
| 2021 | 93         | 96    | 104   | 110   | 89    | 49    | 50    | 101   | 119   | 87    |
| 2022 | 94         | 94    | 116   | 124   | 91    | 52    | 56    | 114   | 114   | 93    |
| 2023 | 89         | 91    | 99    | 109   | 85    | 51    | 54    | 96    | 106   | 88    |

Se presentaron años para cada subsubcuenca donde se contó con una alta concentración de datos válidos, lo cual facilito la discretización de los periodos críticos, en caso opuesto, hubo años donde los datos validos eran pocos lo que impidió la selección de la fecha en que se presentan los hitos a relevantes como ejemplifica la Figura 14.

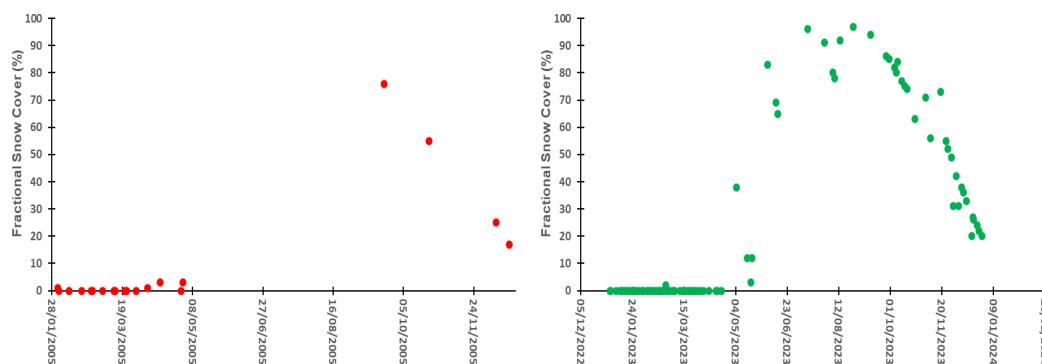


Figura 14. Ejemplificación/comparación entre un año con baja y alta disponibilidad de datos, año 2007 y 2023 respectivamente en la subsubcuenca Ñuble Alto (SSC 08100).

La Figura 15, nos entrega una perspectiva general del inicio/fin de las misiones espaciales y también algunos acontecimientos relevantes, como el lanzamiento de Sentinel-2B (6 de marzo de 2017), y 2C (2024), así como la falla del Scan Line Corrector (SLC) del sensor ETM+ Landsat 7 (31 de mayo de 2003). Además, brinda la instancia de analizar los periodos en que los satelitales proporcionaron imágenes en simultaneo y la diferencia entre la cantidad/calidad de datos entregados en dichos periodos.

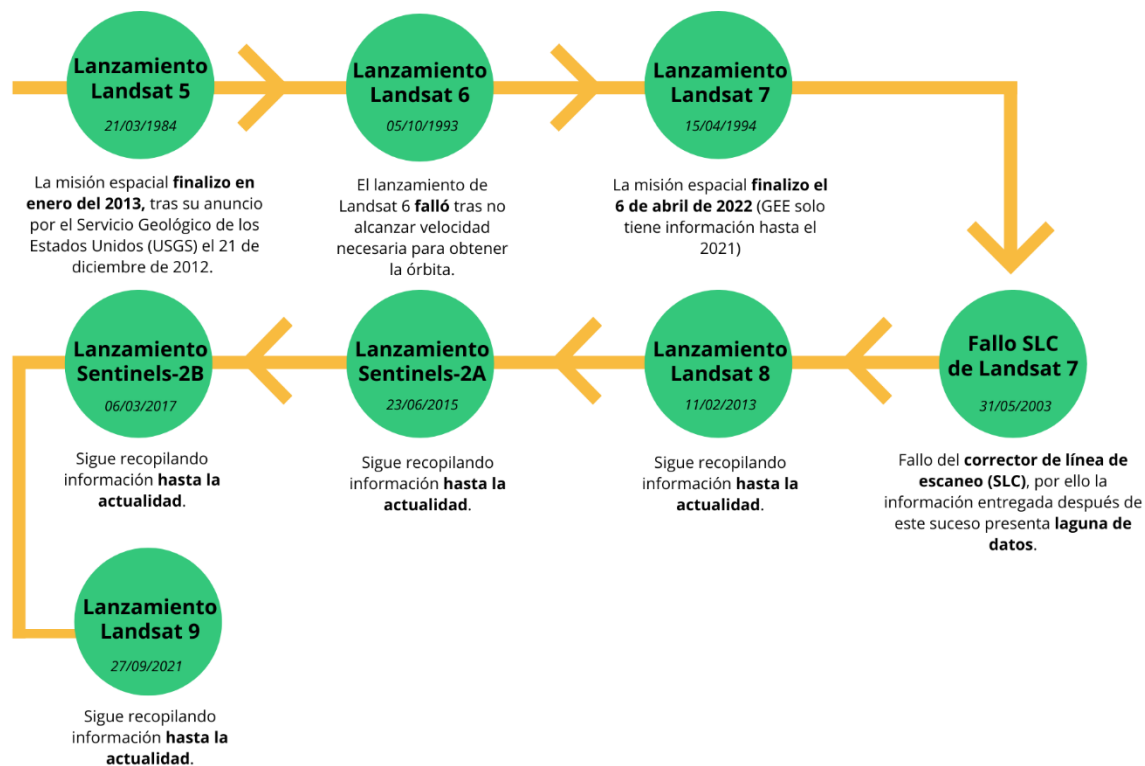


Figura 15. Mapa de temporal del lanzamiento de las misiones espaciales y discontinuación consideradas. Fuente: Elaboración propia.

Desde el año 2000 al año 2012 solo se contaba con la información satelital proveniente de Landsat 5 y Landsat 7, disponiendo en promedio de 21 datos validos al año para cada subsubcuenca, cuya información no es suficiente para apreciar correctamente el comportamiento de los periodos críticos anualmente (gran dispersión). Se esperaba que con la incorporación de otras misiones espaciales como fuentes información adicional el panorama mejorará significativamente, lo que no resulto así del todo. Del año 2013 al 2018 en donde paulatinamente se fue agregando al análisis Landsat 8, Sentinel-2A y Sentinel-2B, y 2C, y así, tan solo se dispuso en promedio de 26 datos validos

al año para cada subsubcuenca, teniendo en cuenta que ya en este periodo Landsat 5 dejó de aportar información en enero del 2013 tras el fin de la misión espacial anunciada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), sigue siendo pocos datos para el análisis, considerando que se trabajaba con la información entregada por los sensores de 4 satélites en simultáneo (en el periodo mencionado). Desde el año 2019 en adelante esto cambió, teniendo alrededor de 87 datos válidos al año para cada subsubcuenca, y con ello, fue posible discretizar los periodos críticos con mayor exactitud y en más ocasiones como se observa más adelante. La Tabla 7 y la Tabla 8 nos muestran los años en que fue posible determinar las fechas críticas.

Tabla 7. Determinación efectiva del inicio de acumulación a nivel SSC.

| Año  | CODIGO SSC |      |      |      |      |      |      |      |      | Datos al año (%) |
|------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
|      | 8100       | 8101 | 8102 | 8103 | 8104 | 8105 | 8370 | 8372 | 8373 |                  |
| 2000 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2001 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2002 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2003 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2004 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2005 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2006 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2007 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2008 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2009 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2010 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 11%              |
| 2011 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2012 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2013 | 1          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 1    | 0    | 33%              |
| 2014 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2015 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2016 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2017 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2018 | 0          | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    | 1    | 1    | 33%              |
| 2019 | 1          | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 100%             |
| 2020 | 1          | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 100%             |
| 2021 | 1          | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 100%             |
| 2022 | 1          | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 100%             |
| 2023 | 1          | 1    | 1    | 1    | 1    | 0    | 1    | 1    | 1    | 89%              |

\* valor 1 indica cuando fue posible determinar la fecha en que se presentó el inicio de acumulación nival.

\* valor 0 indica cuando no fue posible determinar la fecha en que se presentó el inicio de acumulación nival.

Tabla 8. Determinación efectiva del fin del derretimiento de nieve a escala SSC.

| Año  | CODIGO SSC |      |      |      |      |      |      |      |      | Datos al año (%) |
|------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------|
|      | 8100       | 8101 | 8102 | 8103 | 8104 | 8105 | 8370 | 8372 | 8373 |                  |
| 2000 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2001 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2002 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2003 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2004 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2005 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2006 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2007 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2008 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2009 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2010 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2011 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2012 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 11%              |
| 2013 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2014 | 0          | 1    | 1    | 1    | 0    | 0    | 1    | 1    | 1    | 67%              |
| 2015 | 0          | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 1    | 1    | 0    | 33%              |
| 2016 | 0          | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0%               |
| 2017 | 0          | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 1    | 1    | 0    | 33%              |
| 2018 | 0          | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 11%              |
| 2019 | 1          | 1    | 1    | 1    | 0    | 1    | 1    | 1    | 1    | 89%              |
| 2020 | 1          | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 100%             |
| 2021 | 1          | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 100%             |
| 2022 | 1          | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 100%             |
| 2023 | 1          | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 100%             |

\* valor 1 indica cuando fue posible determinar la fecha en que se presentó el fin del derretimiento nival

\* valor 0 indica cuando no fue posible determinar la fecha en que se presentó el fin del derretimiento nival.

Como se mencionaba desde el año 2019 hasta la actualidad, la cantidad de datos disponible es elevada, lo cual es posible apreciar en la Figura 16, donde se divisa cada una de las SSC participantes.

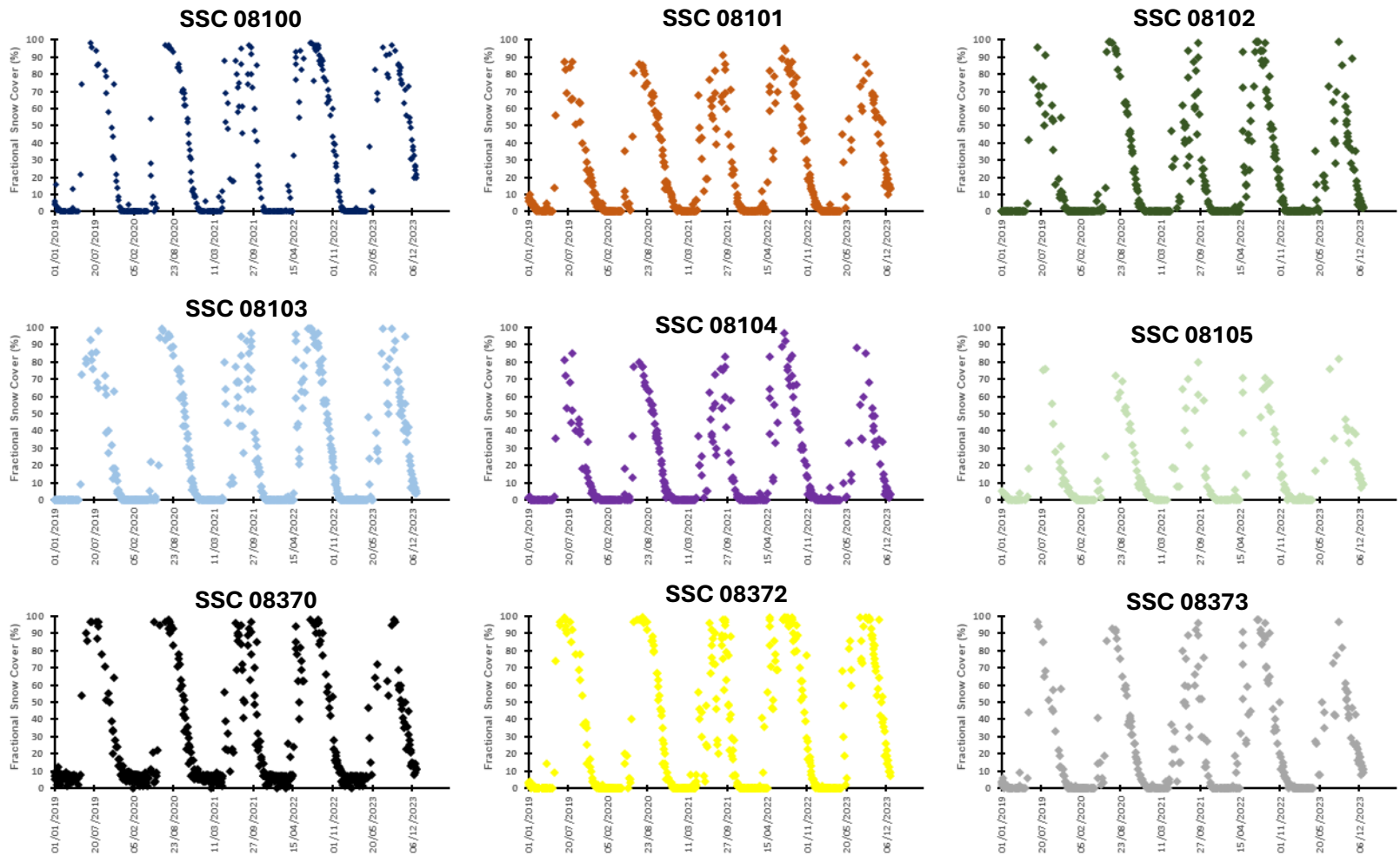


Figura 16. Visualización temporal de la variación nival disponible desde el año 2019 al 2023 a escala SSC.

## 5.2. Análisis de tendencias históricas a escala subsubcuenca.

Como se deriva del análisis preliminar, no fue posible hacer un estudio de tendencia temporal del comportamiento de la nieve en los periodos críticos en una escala de subsubcuencas (pocos años con información válida). La Tabla 9 y la Tabla 10 indican el día juliano en que se detectó el inicio de acumulación y fin del derretimiento respectivamente a escala subsubcuenca.

Tabla 9. Día juliano que marca el inicio de acumulación nival a escala SSC.

| Año  | CÓDIGO SSC |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 08100      | 08101 | 08102 | 08103 | 08104 | 08105 | 08370 | 08372 | 08373 |
| 2000 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2001 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2002 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2003 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2004 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2005 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2006 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2007 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2008 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2009 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2010 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | 97    |
| 2011 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2012 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2013 | 110        | -     | -     | -     | -     | -     | 141   | -     | 125   |
| 2014 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2015 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2016 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2017 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2018 | -          | -     | -     | 140   | -     | -     | 131   | 131   | -     |
| 2019 | 118        | 119   | 133   | 133   | 133   | 138   | 133   | 133   | 133   |
| 2020 | 108        | 120   | 161   | 146   | 161   | 138   | 125   | 150   | 150   |
| 2021 | 116        | 114   | 169   | 117   | 169   | 167   | 115   | 116   | 115   |
| 2022 | 104        | 109   | 109   | 109   | 137   | 137   | 104   | 107   | 104   |
| 2023 | 134        | 138   | 139   | 139   | 139   | -     | 112   | 112   | 122   |

Tabla 10. Día juliano que marca el fin del derretimiento nival a escala SSC.

| Año  | CÓDIGO SSC |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|      | 08100      | 08101 | 08102 | 08103 | 08104 | 08105 | 08370 | 08372 | 08373 |
| 2000 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2001 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2002 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2003 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2004 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2005 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2006 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2007 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2008 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2009 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2010 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2011 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2012 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | 292   |
| 2013 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2014 | -          | 297   | 281   | 284   | -     | -     | 313   | 313   | 332   |
| 2015 | -          | -     | -     | 300   | -     | -     | 316   | 307   | -     |
| 2016 | -          | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2017 | -          | -     | -     | 321   | -     | -     | 321   | 313   | -     |
| 2018 | -          | -     | -     | 299   | -     | -     | -     | -     | -     |
| 2019 | 313        | 300   | 270   | 295   | -     | 294   | 315   | 295   | 310   |
| 2020 | 321        | 320   | 303   | 320   | 305   | 313   | 314   | 320   | 315   |
| 2021 | 292        | 291   | 289   | 291   | 289   | 291   | 300   | 299   | 291   |
| 2022 | 326        | 310   | 299   | 309   | 302   | 307   | 310   | 312   | 309   |
| 2023 | 347        | 334   | 327   | 330   | 327   | 327   | 324   | 339   | 334   |

Con la finalidad de analizar el comportamiento general de las subsubcuencas en los periodos críticos, se hizo un análisis en donde se trabajan los valores promedio anuales de FSC para todas las subsubcuencas y cada uno de los periodos críticos en los años que se contara al menos con el 33% de las fechas

en que estos sucesos ocurren (inicio de acumulación y fin del derretimiento), dando origen a las figuras 17 y 18.

De la Figura 17, se contempla que el inicio de acumulación de nieve entre los años 2018 al año 2021, se origina en promedio entre el 10 de mayo al 20 de mayo, luego en el año 2022 se presentó un inicio prematuro respecto a los años anteriores presentándose el día 23 de abril. Finalmente, en el año 2023 se observa el 10 de mayo, día que entra en el rango de días en que se solía presentarse en los años anteriores. Respecto al estudio utilizando valores promedios para observar el comportamiento de la dinámica de nieve respecto al inicio de acumulación, se infiere que no es posible debido a los pocos años que se posee de información.

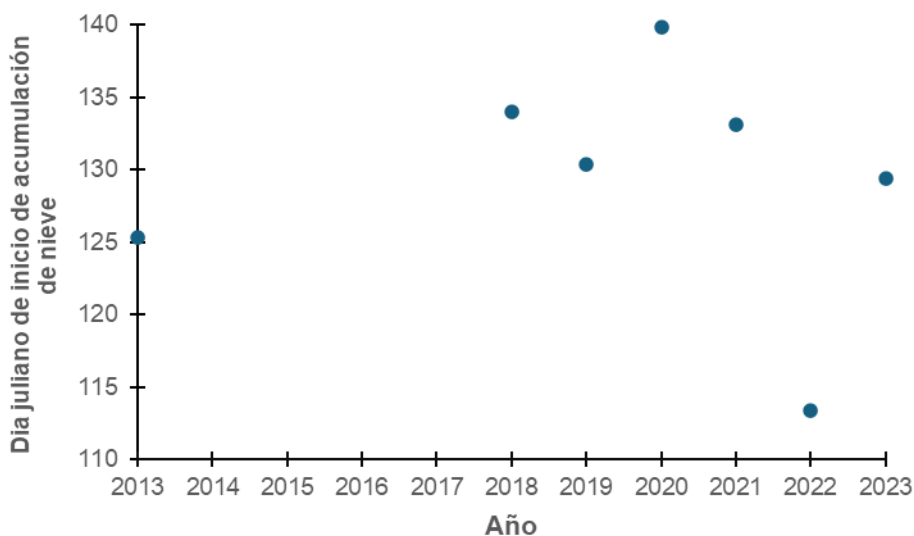


Figura 17. Variabilidad temporal promedio del inicio de acumulación de nieve a escala SSC.

De la Figura 18, se observa que el fenómeno del fin del derretimiento utilizando valores promedios anuales se presenta entre el 22 de octubre al 28 de noviembre, observándose un rango de días amplio a diferencia del análisis promedio del inicio de acumulación de nieve cuyo rango de días fue más acotado. El año 2021 observo su mínimo el 22 de octubre del año 2022 y este fue aumentando, teniendo su peak el 28 de noviembre del 2023. Aunque si fue posible inferir que el fin del derretimiento de nieve presenta una mayor variabilidad interanual a comparación del inicio de acumulación de nieve, y que también en los últimos tres años existe una pequeña tendencia a que la nieve se estaba derritiendo después en las principales subsubcuencas de la macrozona centro sur, es imposible asegurar que esta tendencia siga por la poca disponibilidad de datos que se posee información.

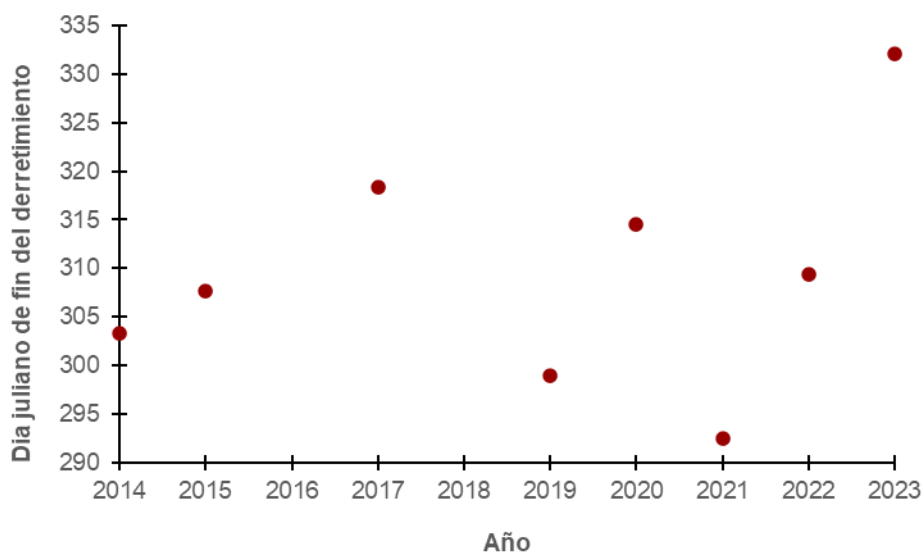


Figura 18. Variabilidad temporal promedio del fin del derretimiento a nivel SSC.

Se analizó si hay una diferencia relevante entre el comportamiento de la dinámica nival para las subsubcuencas que pertenecen a las dos diversas regiones participantes en el estudio (Ñuble y Biobío). En general, se observa como las SSC de la región del Biobío tienen un comportamiento similar (Figura 20) en comparación a las SSC de la región de Ñuble las cuales poseen una alta variabilidad interanual (Figura 19) respecto al inicio de acumulación de nieve. En el año 2023, se observa como la totalidad de las SSC pertenecientes a VIII región convergen alrededor 20 de mayo como principio de la acumulación nival.

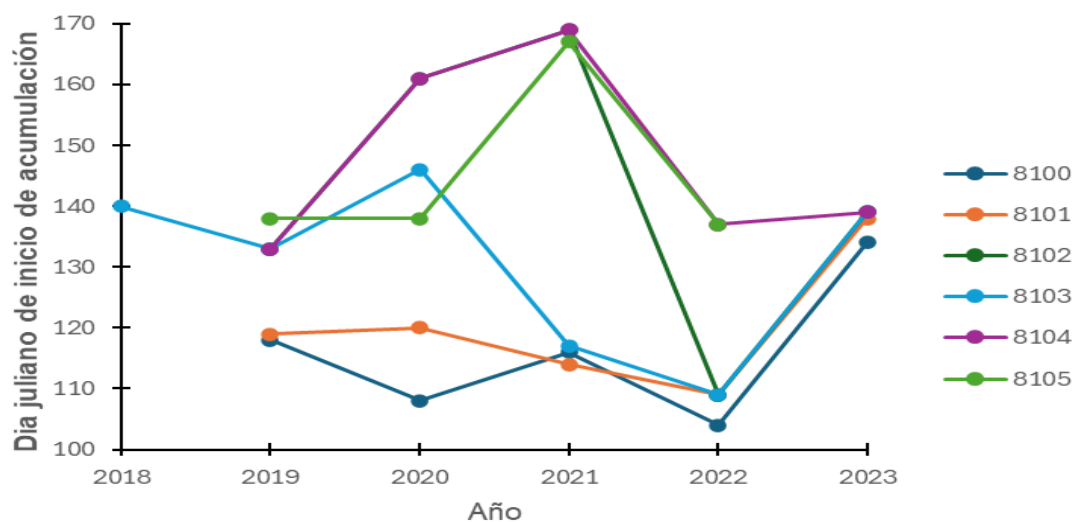


Figura 19. Variación temporal del inicio de acumulación nival de las subsubcuencas pertenecientes a la región de Ñuble.

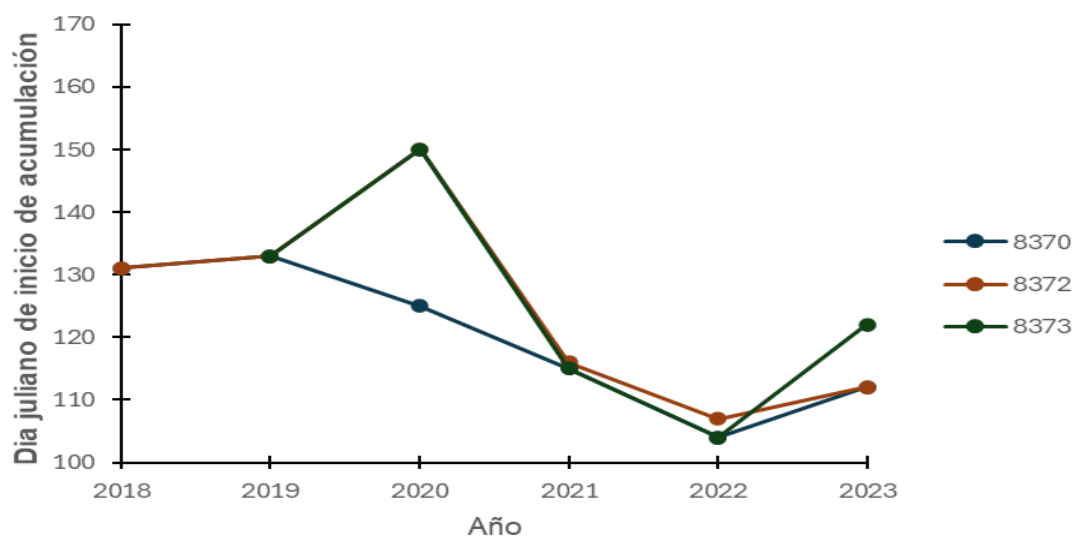


Figura 20. Variación temporal del inicio de acumulación nivel de las subsubcuencas pertenecientes a la región de Biobío.

A nivel general todas las subsubcuencas tuvieron un comportamiento similar (véase Tabla 21) en toda el área de estudio respecto al fin del derretimiento de nieve, apreciando su peak el año 2023 dentro de los años que fue posible determinar este hito (ablación).

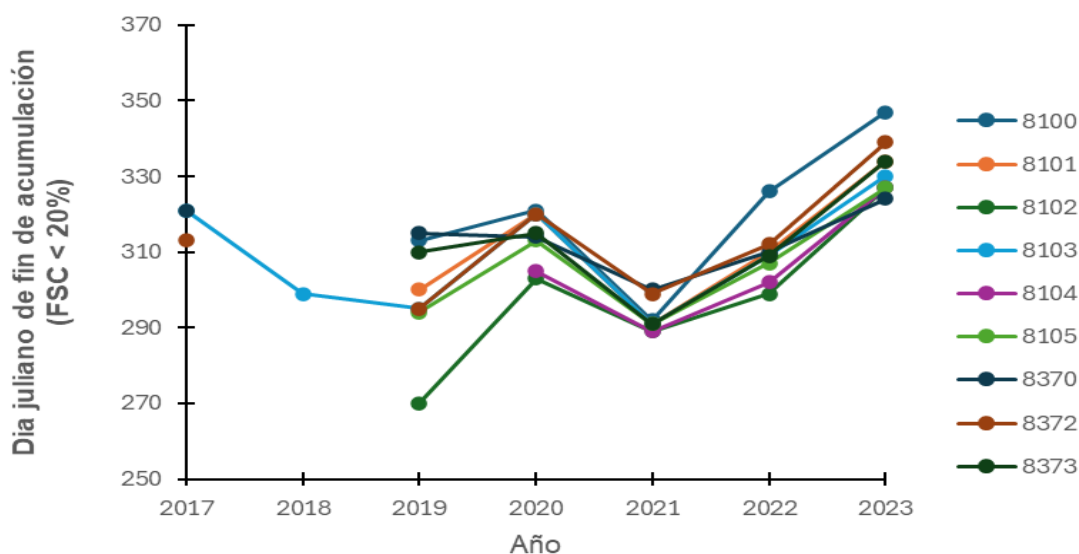


Figura 21. Variación temporal del final de la acumulación de nieve para todas las subsubcuencas pertenecientes a la zona de estudio.

Aunque se hizo un análisis tomando promedios anuales de FSC y también el análisis individual de las subsubcuencas pertenecientes a las dos regiones participantes, no fue posible determinar tendencias históricas desde el año 2000 al 2023 debido a la baja densidad de información disponible para lograr determinar los periodos críticos con la menor incertidumbre posible (como se ejemplifica en la Figura 14).

### 5.3. Caracterización geomorfológica de las Unidades de Respuesta Nival (URN)

Tras la creación de las Unidades de Respuesta Nival en el software QGIS, resultaron 16 combinaciones geomorfológicas siguiendo criterios de elevación y aspecto, las cuales se presentan en Tabla 3 y Tabla 4. La distribución espacial de las URN se presenta en la Figura 22.

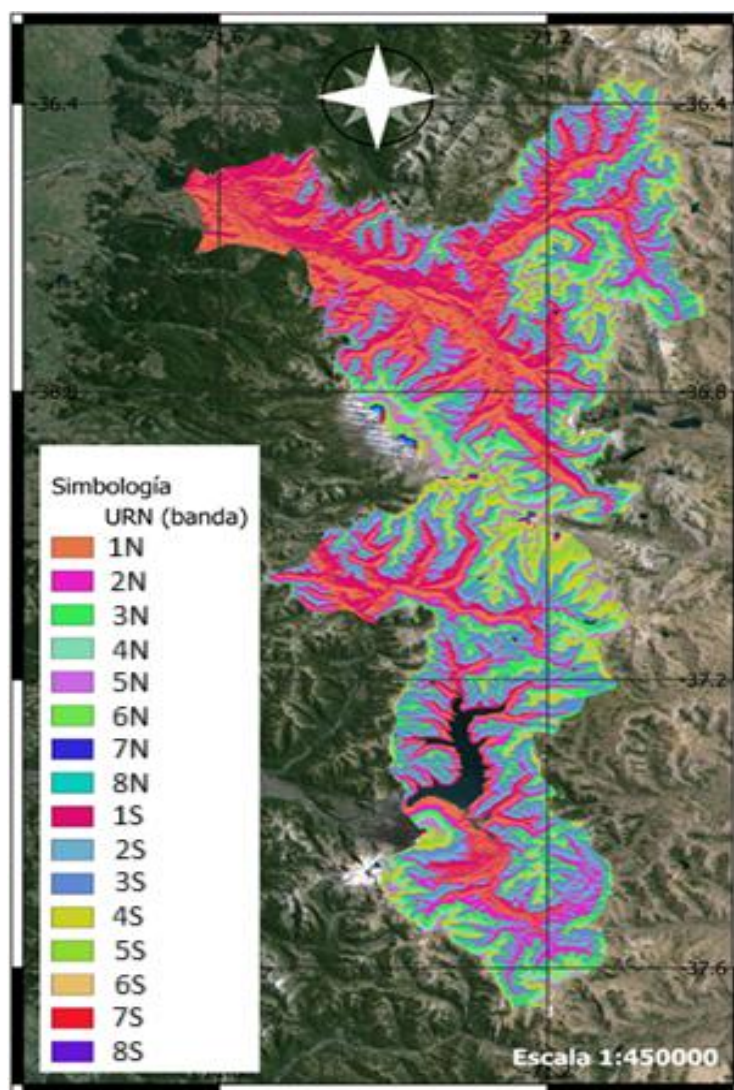


Figura 22. Distribución espacial de las unidades de respuesta nival generadas.

Una vez generada el archivo ráster que identifica las diferentes URN, se analizaron las áreas de ocupación, altura promedio, pendiente promedio y aspecto medio de cada una de ellas (Tabla 11).

Tabla 11. Cuantificación de distribución espacial de las URN.

| URN    | Área<br>(km <sup>2</sup> ) | Porcentaje área<br>respecto al área<br>total<br>(%) | Altura<br>promedio<br>(msnm) | Aspecto<br>promedio<br>(°) | Moda<br>aspecto<br>(°) | Pendiente<br>promedio<br>(°) | Moda<br>pendiente<br>(°) |
|--------|----------------------------|---|------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------------|--------------------------|
| URN 1N | 459                        | 14.20%  | 1153.6                       | 156,9                      | 36,0                   | 15,5                         | 0,0                      |
| URN 2N | 323                        | 10.00%  | 1623.9                       | 181,6                      | 270,0                  | 22,4                         | 26,1                     |
| URN 3N | 364                        | 11.20%  | 1861.5                       | 184,2                      | 272,3                  | 22,8                         | 28,0                     |
| URN 4N | 204                        | 6.30%   | 2105.6                       | 188,4                      | 270,4                  | 22,7                         | 25,2                     |
| URN 5N | 169                        | 5.20%   | 2348.8                       | 185,6                      | 270,2                  | 22,1                         | 20,3                     |
| URN 6N | 81                         | 2.50%   | 2594.8                       | 165,2                      | 80,5                   | 22,3                         | 16,3                     |
| URN 7N | 97                         | 3.00%   | 2833.9                       | 150,1                      | 80,3                   | 28,1                         | 23,4                     |
| URN 8N | 55                         | 1.70%   | 3008.5                       | 139,1                      | 40,8                   | 28,3                         | 14,5                     |
| URN 1S | 486                        | 15.00%  | 1184.5                       | 182,7                      | 90,1                   | 18,8                         | 2,0                      |
| URN 2S | 348                        | 10.70%  | 1625.1                       | 177,7                      | 90,2                   | 22,1                         | 25,2                     |
| URN 3S | 347                        | 10.70%  | 1864.2                       | 176,7                      | 93,2                   | 21,5                         | 23,8                     |
| URN 4S | 186                        | 5.80%   | 2104.5                       | 174,3                      | 92,6                   | 21,4                         | 17,1                     |
| URN 5S | 68                         | 2.10%   | 2353.2                       | 172,2                      | 90,3                   | 20,4                         | 10,4                     |
| URN 6S | 17                         | 0.50%   | 2581.6                       | 160,8                      | 94,7                   | 21,6                         | 12,1                     |
| URN 7S | 21                         | 0.60%   | 2831.3                       | 160,0                      | 108,0                  | 27,8                         | 34,0                     |
| URN 8S | 13                         | 0.40%   | 3050.4                       | 128,1                      | 126,0                  | 28,5                         | 36,1                     |

Las URN con orientación norte tienen una leve predominancia respecto al área, teniendo una ocupación del 54,1% (equivalentes a 1751,7 km<sup>2</sup>) y las zonas con disposición sur contienen el 45,9% (1486,2 km<sup>2</sup>) del total de 3238 km<sup>2</sup> de la superficie investigada.

#### 5.4. Análisis de información satelital disponible a escala de URN.

Como se contrasta entre la Tabla 9 y la Tabla 12, es posible distinguir una disponibilidad mayor de datos válidos para la discretización de los periodos críticos que esta escala espacial nos ofrece a comparación a la escala de SSC. En promedio se tienen 34 datos previos al año 2015, para luego aumentar a un promedio de 94 con la incorporación de Sentinels y Landsat 9.

Tabla 12. Disponibilidad de datos validos a escala URN.

| PERIODO<br>NIVAL | URN |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                  | 1N  | 2N  | 3N  | 4N  | 5N  | 6N  | 7N  | 8N  | 1S  | 2S  | 3S  | 4S  | 5S  | 6S  | 7S  | 8S  |
| 2000/2001        | 23  | 21  | 19  | 20  | 20  | 19  | 18  | 18  | 23  | 21  | 21  | 21  | 19  | 20  | 16  | 18  |
| 2001/2002        | 35  | 31  | 30  | 28  | 28  | 26  | 21  | 21  | 34  | 30  | 28  | 27  | 27  | 28  | 20  | 20  |
| 2002/2003        | 23  | 22  | 22  | 22  | 22  | 22  | 17  | 17  | 23  | 22  | 21  | 22  | 21  | 22  | 17  | 18  |
| 2003/2004        | 44  | 43  | 41  | 38  | 37  | 36  | 25  | 27  | 42  | 41  | 40  | 39  | 36  | 36  | 23  | 25  |
| 2004/2005        | 44  | 39  | 39  | 38  | 36  | 35  | 27  | 28  | 43  | 39  | 39  | 36  | 34  | 34  | 25  | 27  |
| 2005/2006        | 36  | 33  | 29  | 30  | 30  | 30  | 27  | 28  | 35  | 32  | 31  | 30  | 30  | 31  | 28  | 27  |
| 2006/2007        | 50  | 45  | 43  | 34  | 37  | 36  | 31  | 33  | 48  | 45  | 43  | 41  | 38  | 37  | 30  | 32  |
| 2007/2008        | 46  | 43  | 41  | 49  | 40  | 41  | 38  | 40  | 45  | 45  | 44  | 43  | 40  | 42  | 38  | 40  |
| 2008/2009        | 46  | 45  | 44  | 43  | 43  | 42  | 34  | 35  | 45  | 44  | 43  | 42  | 42  | 41  | 31  | 35  |
| 2009/2010        | 41  | 40  | 38  | 36  | 37  | 37  | 25  | 27  | 40  | 39  | 37  | 36  | 37  | 36  | 24  | 26  |
| 2010/2011        | 32  | 31  | 31  | 30  | 30  | 30  | 26  | 27  | 31  | 31  | 30  | 29  | 29  | 27  | 23  | 27  |
| 2011/2012        | 28  | 26  | 25  | 25  | 25  | 25  | 22  | 23  | 27  | 26  | 26  | 26  | 25  | 26  | 22  | 22  |
| 2012/2013        | 28  | 27  | 27  | 26  | 26  | 26  | 25  | 25  | 27  | 27  | 27  | 26  | 26  | 26  | 25  | 26  |
| 2013/2014        | 47  | 46  | 44  | 43  | 43  | 45  | 38  | 39  | 46  | 43  | 42  | 41  | 42  | 44  | 37  | 37  |
| 2014/2015        | 52  | 50  | 47  | 47  | 48  | 49  | 39  | 40  | 50  | 46  | 46  | 46  | 46  | 48  | 38  | 39  |
| 2015/2016        | 48  | 49  | 45  | 46  | 48  | 48  | 42  | 42  | 48  | 44  | 42  | 42  | 46  | 47  | 41  | 42  |
| 2016/2017        | 43  | 42  | 41  | 41  | 40  | 41  | 35  | 34  | 42  | 41  | 41  | 41  | 40  | 39  | 34  | 35  |
| 2017/2018        | 44  | 42  | 42  | 40  | 41  | 42  | 36  | 34  | 41  | 39  | 38  | 37  | 39  | 42  | 34  | 34  |
| 2018/2019        | 87  | 87  | 87  | 79  | 81  | 80  | 69  | 72  | 85  | 82  | 80  | 77  | 78  | 76  | 66  | 73  |
| 2019/2020        | 122 | 115 | 111 | 107 | 105 | 108 | 98  | 96  | 121 | 115 | 110 | 107 | 108 | 108 | 96  | 96  |
| 2020/2021        | 132 | 128 | 123 | 118 | 112 | 108 | 101 | 102 | 130 | 126 | 124 | 115 | 112 | 113 | 99  | 104 |
| 2021/2022        | 135 | 134 | 131 | 132 | 132 | 129 | 128 | 124 | 134 | 132 | 132 | 131 | 128 | 129 | 125 | 125 |
| 2022/2023        | 150 | 144 | 143 | 141 | 142 | 144 | 137 | 134 | 147 | 137 | 138 | 137 | 137 | 138 | 136 | 136 |
| 2023/2024        | 111 | 109 | 106 | 104 | 103 | 102 | 97  | 97  | 110 | 105 | 103 | 105 | 101 | 101 | 94  | 100 |

De la sección 6.3, se infiere la creación de 16 unidades de respuesta nival distintas y también la participación de 24 periodos hidrológicos diferentes, lo que da lugar a 384 escenarios diferentes.

El hito de inicio de acumulación nival (Tabla 13), solo se logró determinar un 27,1% del total años y URN. Como se mencionaba anteriormente, a escala URN se posee mayor disponibilidad de datos válidos, pero, el porcentaje de determinación efectiva de las fechas en que se presenta el inicio de acumulación de nieve sigue resultando bajo. Esto está ligado directamente al descarte de imágenes que se hace en el prefiltro de nubosidad y la eliminación de píxeles con nubes realizado posteriormente (mencionado en el los puntos 5.5.1 y 5.5.2) lo que conlleva a un área de imagen total más baja en comparación de las imágenes satelitales resultantes luego de los mismos procesos en días del año con menor nubosidad (próximas a los hitos de inicio y fin del derretimiento de nieve) y finalmente llevando al descarte de varias imágenes cercanas a cuando este fenómeno ocurre tras el filtro espacial descrito en la metodología.

Tabla 13. Determinación del inicio de acumulación a escala URN.

| AÑO<br>HIDROLOGICO | URN |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Datos<br>al año<br>(%) |
|--------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------------------|
|                    | 1N  | 2N | 3N | 4N | 5N | 6N | 7N | 8N | 1S | 2S | 3S | 4S | 5S | 6S | 7S | 8S |                        |
| 2000/2001          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2001/2002          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2002/2003          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2003/2004          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2004/2005          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 6%                     |
| 2005/2006          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2006/2007          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 19%                    |
| 2007/2008          | 0   | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 25%                    |
| 2008/2009          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 19%                    |
| 2009/2010          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 6%                     |
| 2010/2011          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2011/2012          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2012/2013          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2013/2014          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 25%                    |
| 2014/2015          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2015/2016          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 19%                    |
| 2016/2017          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 13%                    |
| 2017/2018          | 1   | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 25%                    |
| 2018/2019          | 1   | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 31%                    |
| 2019/2020          | 1   | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 75%                    |
| 2020/2021          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 94%                    |
| 2021/2022          | 1   | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 94%                    |
| 2022/2023          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |
| 2023/2024          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |

\* valor 1 indica cuando fue posible determinar la fecha en que se presentó el inicio de acumulación nival.

\* valor 0 indica cuando no fue posible determinar la fecha en que se presentó el inicio de acumulación nival.

Para el inicio de derretimiento de nieve (Tabla 14), se obtuvo un 38,8% de estimaciones de hito con respecto a la totalidad de escenarios posibles, lo cual sigue siendo bajo para un análisis de tendencias históricas, pero, se obtuvo más del 50% de datos entre las distintas URN desde el año hidrológico 2015/2016 hasta la temporada hidrológica que comprende los años 2023 y 2024, teniendo como excepción el periodo que comprende los años 2016 y 2017.

En un ámbito general, el problema en esta sección es el mismo que el análisis hecho a lo largo del estudio, baja disponibilidad de datos validos previos a la incorporación de Sentinels-2 (pero levemente menor, ya que hay más información a esta escala espacial que a nivel SSC como se menciona). Mejoraría ampliamente los datos validos disponibles si se hubiera usado un criterio más bajo en el filtro espacial final, ya que esta escala lo permite, debido a que hablamos de superficies que comparten una discretización de altura y aspecto, por lo cual su comportamiento resulta similar respecto a la dinámica de nieve, se pudo trabajar con un criterio de utilizar las imágenes que tuvieran un área del 30% - 50% obteniendo mejores resultados, pero como análisis investigativo, esto se fue descubriendo sobre la marcha.

Tabla 14. Determinación del inicio de derretimiento a escala URN.

| AÑO<br>HIDROLOGICO | URN |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Datos<br>al<br>año (%) |
|--------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------------------|
|                    | 1N  | 2N | 3N | 4N | 5N | 6N | 7N | 8N | 1S | 2S | 3S | 4S | 5S | 6S | 7S | 8S |                        |
| 2000/2001          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2001/2002          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2002/2003          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2003/2004          | 0   | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 6%                     |
| 2004/2005          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 6%                     |
| 2005/2006          | 0   | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 19%                    |
| 2006/2007          | 0   | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 44%                    |
| 2007/2008          | 0   | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 25%                    |
| 2008/2009          | 0   | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 50%                    |
| 2009/2010          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 6%                     |
| 2010/2011          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2011/2012          | 0   | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 19%                    |
| 2012/2013          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 19%                    |
| 2013/2014          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 44%                    |
| 2014/2015          | 0   | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 25%                    |
| 2015/2016          | 0   | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 50%                    |
| 2016/2017          | 0   | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 0  | 25%                    |
| 2017/2018          | 1   | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 56%                    |
| 2018/2019          | 1   | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 63%                    |
| 2019/2020          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 81%                    |
| 2020/2021          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 94%                    |
| 2021/2022          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |
| 2022/2023          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |
| 2023/2024          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |

\* valor 1 indica cuando fue posible determinar la fecha en que se presentó el inicio del derretimiento nival

\* valor 0 indica cuando no fue posible determinar la fecha en que se presentó el inicio del derretimiento nival.

Finalmente, para el análisis del fin de derretimiento de nieve se logró determinar un 69.8% del total (Tabla 15). Se aprecia como las URN con cotas más bajas (menor a 2000 metros de altura, representadas por las URN 1N, 1S, 2N, 2S, 3N Y 3S) tanto en aspecto norte como sur, presentan la similitud de que se pudo determinar este periodo levemente con menor frecuencia a diferencia de las URN con alturas intermedias y elevadas en las cuales se logró identificar más fecha que marcan el fin del derretimiento. A lo largo del estudio, se observó la tendencia que cuanto más pequeña sea el área analizada, más datos validos se tendrán dentro de esa superficie para un periodo "x", eso tiene lógica, debido a que la metodología implementada premia a las superficies de menor tamaño, ya que, tiene más probabilidad de tener un área de imagen satelital cercana al área total de la superficie analizada, lo que explica por qué se logró discretizar más periodos críticos en las URN de cotas más bajas respecto a las intermedias y altas (las URN con cotas bajas tienen una superficie mayor), exceptuando el hito de inicio de acumulación de nieve a escala URN en donde esto no generó mayor diferencia.

Tabla 15. Determinación del fin del derretimiento de nieve a escala URN.

| AÑO<br>HIDROLOGICO | URN |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Datos<br>al<br>año (%) |
|--------------------|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------------------------|
|                    | 1N  | 2N | 3N | 4N | 5N | 6N | 7N | 8N | 1S | 2S | 3S | 4S | 5S | 6S | 7S | 8S |                        |
| 2000/2001          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0%                     |
| 2001/2002          | 0   | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 6%                     |
| 2002/2003          | 0   | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 13%                    |
| 2003/2004          | 0   | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 69%                    |
| 2004/2005          | 0   | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 31%                    |
| 2005/2006          | 0   | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 56%                    |
| 2006/2007          | 1   | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 69%                    |
| 2007/2008          | 1   | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 88%                    |
| 2008/2009          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |
| 2009/2010          | 0   | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 63%                    |
| 2010/2011          | 0   | 0  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 69%                    |
| 2011/2012          | 0   | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 75%                    |
| 2012/2013          | 0   | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 63%                    |
| 2013/2014          | 0   | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 81%                    |
| 2014/2015          | 0   | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 63%                    |
| 2015/2016          | 1   | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 88%                    |
| 2016/2017          | 0   | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 56%                    |
| 2017/2018          | 1   | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 94%                    |
| 2018/2019          | 1   | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 94%                    |
| 2019/2020          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |
| 2020/2021          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |
| 2021/2022          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |
| 2022/2023          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |
| 2023/2024          | 1   | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 100%                   |

\* Determinación de la fecha en que se presentó el fin del derretimiento nival (1 y/o verde).

\* Imposibilidad de determinar la fecha en que se presentó el fin del derretimiento nival (0 y/o rojo).

## 5.5. Análisis de tendencias a escala de URN.

### 5.5.1. Análisis de tendencias respecto al inicio de acumulación nival a escala de URN.

Las Tablas 16 y 17, nos muestran el día juliano del inicio de acumulación de nieve en las URN con orientación norte y sur respectivamente. Con la baja densidad de información disponible respecto al inicio de acumulación nival, no fue posible distinguir tendencias históricas, pues como se indago en el análisis de datos preliminar, tan solo se cuenta con información suficiente desde la temporada 2019/2020. Por otro lado, aunque no se pueda analizar una tendencia histórica, si es posible hacer un análisis en los periodos de mayor cantidad de datos de la variabilidad/relación que existe entre estas características geomorfológicas y la dinámica de nieve desde la temporada que comprende los años 2019 y 2020 hasta la última temporada nival estudiada como se analizara más adelante.

Tabla 16. Día juliano que marca el inicio de acumulación nival para las URN con aspecto norte.

| Temporada Nival | URN |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | 1N  | 2N  | 3N  | 4N  | 5N  | 6N  | 7N  | 8N  |
| 2000/2001       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2001/2002       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2002/2003       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2003/2004       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2004/2005       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2005/2006       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2006/2007       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2007/2008       | -   | -   | -   | 127 | -   | 143 | -   | -   |
| 2008/2009       | -   | -   | -   | -   | -   | 146 | -   | -   |
| 2009/2010       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 108 |
| 2010/2011       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2011/2012       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2012/2013       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2013/2014       | -   | 167 | 142 | -   | -   | -   | -   | 111 |
| 2014/2015       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2015/2016       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2016/2017       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2017/2018       | 161 | 162 | 146 | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2018/2019       | 157 | -   | -   | -   | -   | 132 | -   | 92  |
| 2019/2020       | 160 | -   | 134 | 139 | 134 | 120 | 134 | -   |
| 2020/2021       | 162 | 153 | 156 | 156 | 146 | 139 | 134 | 134 |
| 2021/2022       | 185 | 170 | -   | 158 | 124 | 113 | 118 | 110 |
| 2022/2023       | 158 | 138 | 138 | 118 | 110 | 108 | 108 | 108 |
| 2023/2024       | 168 | 168 | 140 | 140 | 128 | 113 | 113 | 128 |

Tabla 17. Día juliano que marca el inicio de acumulación nival para las URN con aspecto sur.

| Temporada Nival | URN |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | 1S  | 2S  | 3S  | 4S  | 5S  | 6S  | 7S  | 8S  |
| 2000/2001       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2001/2002       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2002/2003       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2003/2004       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2004/2005       | -   | -   | -   | -   | -   | 122 | -   | -   |
| 2005/2006       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2006/2007       | -   | -   | 132 | 132 | 132 | 132 | -   | -   |
| 2007/2008       | 158 | 143 | 143 | 143 | -   | -   | -   | -   |
| 2008/2009       | -   | -   | -   | -   | 129 | 129 | -   | -   |
| 2009/2010       | -   | -   | 156 | 156 | -   | -   | -   | -   |
| 2010/2011       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2011/2012       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2012/2013       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2013/2014       | -   | -   | 142 | 142 | -   | -   | 111 | -   |
| 2014/2015       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2015/2016       | 169 | -   | -   | -   | -   | 133 | 100 | 92  |
| 2016/2017       | -   | -   | -   | -   | 134 | -   | 95  | 87  |
| 2017/2018       | -   | -   | 139 | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2018/2019       | 161 | 157 | -   | -   | -   | -   | 92  | 92  |
| 2019/2020       | 157 | 134 | 134 | 134 | 132 | 120 | 120 | 120 |
| 2020/2021       | -   | 156 | 151 | 151 | 139 | 139 | 111 | 101 |
| 2021/2022       | 160 | 170 | 158 | 158 | 118 | 117 | 108 | 93  |
| 2022/2023       | 170 | 138 | 108 | 108 | 108 | 108 | 108 | 91  |
| 2023/2024       | 162 | 168 | 140 | 140 | 104 | 113 | 113 | 110 |

Tanto en las zonas con orientación norte y orientación sur, se observa una clara tendencia a presentarse la fecha de inicio de acumulación de nieve de manera más anticipada en las URN con mayor elevación que en las de menor elevación. Además, las superficies más altas (sobre los 2750 m.s.n.m) con orientación sur presentan en general un leve adelanto en el día que se

presenta el inicio de acumulación de nieve respecto a su contraparte (véase figuras 23 y 24). Por ejemplo, las temporadas 2021/2022, 2022/2023 y 2023/2024, en donde, el inicio de acumulación comenzó en promedio 21 días antes en las URN con orientación sur que, en las URN con orientación norte, acontecimiento que no se repite en la misma magnitud en el resto discretizaciones de alturas, inclusive la fecha de aparición es igual o insignificante.

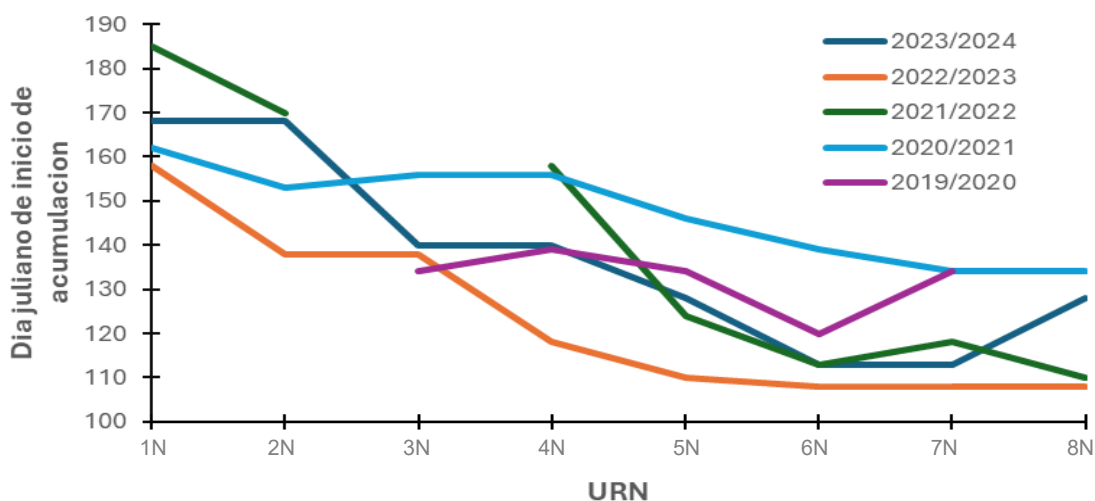


Figura 23. Tendencia temporal del inicio de acumulación nival para las URN con orientación norte.

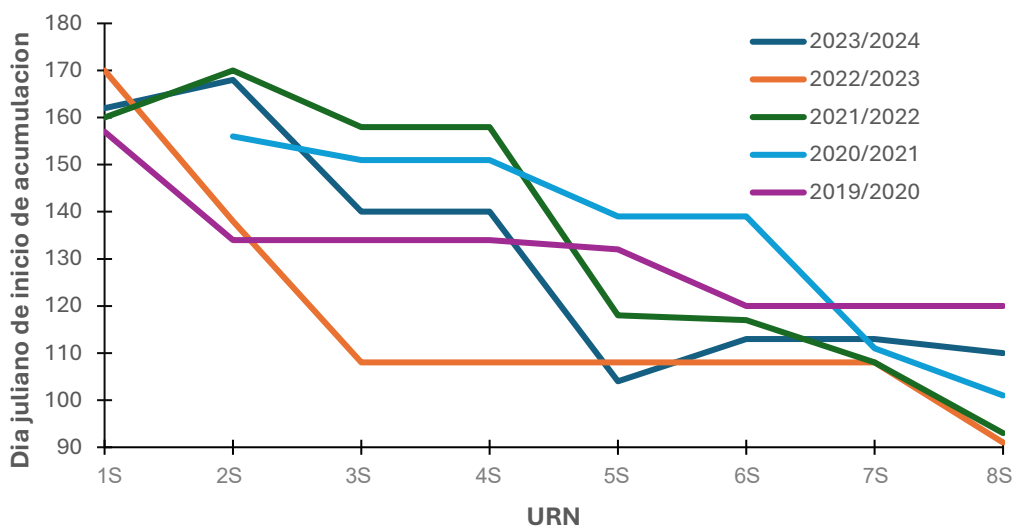


Figura 24. Tendencia temporal del inicio de acumulación nival para las URN con orientación sur.

#### 5.5.2. Análisis de tendencias en el inicio derretimiento de nieve a escala URN.

La Tabla 18 y la Tabla 19 nos muestran el día juliano donde se presenta el inicio del derretimiento para cada una de las temporadas nivales. Desde la temporada comprendida entre los 2017 y 2018, se posee la información necesaria para poder hacer un análisis de tendencia respecto a las características geomorfológicas como se realizó en el punto 6.5.1 (excepción de la temporada 2018/2019). Por otro lado, para algunas URN se analizó si es posible apreciar la existencia de alguna tendencia histórica respecto al día del año en donde se presenta el comienzo del derretimiento.

Tabla 18. Día juliano que marca el inicio del derretimiento nival para las URN con aspecto norte.

| Temporada Nival | URN |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | 1N  | 2N  | 3N  | 4N  | 5N  | 6N  | 7N  | 8N  |
| 2000/2001       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2001/2002       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2002/2003       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2003/2004       | -   | -   | 204 | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2004/2005       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2005/2006       | -   | -   | -   | 264 | -   | 264 | -   | -   |
| 2006/2007       | -   | -   | 244 | 257 | -   | -   | 299 | -   |
| 2007/2008       | -   | -   | -   | 231 | 254 | 270 | -   | -   |
| 2008/2009       | -   | -   | 250 | 257 | 257 | 289 | -   | -   |
| 2009/2010       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | 316 |
| 2010/2011       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2011/2012       | -   | 258 | -   | -   | 258 | -   | -   | -   |
| 2012/2013       | -   | -   | -   | -   | -   | 300 | -   | -   |
| 2013/2014       | -   | -   | -   | -   | -   | 319 | 319 | 319 |
| 2014/2015       | -   | -   | 273 | -   | 258 | 313 | -   | -   |
| 2015/2016       | -   | -   | -   | -   | 261 | 301 | 341 | 332 |
| 2016/2017       | -   | -   | -   | 247 | -   | 296 | -   | -   |
| 2017/2018       | 250 | 250 | 250 | 282 | -   | 314 | 314 | -   |
| 2018/2019       | 244 | 244 | 244 | -   | 276 | 348 | 333 | 340 |
| 2019/2020       | 224 | 224 | 255 | 255 | 261 | 303 | 281 | -   |
| 2020/2021       | 243 | 246 | 250 | 256 | 261 | 298 | 330 | -   |
| 2021/2022       | 261 | 258 | 258 | 276 | 288 | 288 | 303 | 288 |
| 2022/2023       | 231 | 232 | 253 | 256 | 271 | 328 | 319 | 328 |
| 2023/2024       | 260 | 260 | 260 | 303 | 303 | 331 | 331 | 325 |

Tabla 19. Día juliano que marca el inicio del derretimiento nival para las URN con aspecto sur.

| Temporada Nival | URN |     |     |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 | 1S  | 2S  | 3S  | 4S  | 5S  | 6S  | 7S  | 8S  |
| 2000/2001       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2001/2002       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2002/2003       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2003/2004       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2004/2005       | -   | -   | -   | -   | -   | 297 | -   | -   |
| 2005/2006       | -   | -   | -   | -   | 289 | -   | -   | -   |
| 2006/2007       | -   | 244 | 260 | -   | 292 | 299 | -   | -   |
| 2007/2008       | -   | -   | -   | 254 | -   | -   | -   | -   |
| 2008/2009       | -   | 250 | 250 | -   | 289 | 289 | -   | -   |
| 2009/2010       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2010/2011       | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2011/2012       | -   | 258 | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2012/2013       | 259 | -   | -   | -   | 284 | -   | -   | -   |
| 2013/2014       | -   | -   | 287 | 287 | 287 | -   | 319 | -   |
| 2014/2015       | -   | 258 | -   | -   | -   | -   | -   | -   |
| 2015/2016       | -   | -   | -   | 293 | -   | 305 | 341 | 332 |
| 2016/2017       | -   | -   | -   | -   | 294 | -   | 328 | -   |
| 2017/2018       | -   | -   | 266 | 318 | 295 | -   | -   | -   |
| 2018/2019       | -   | -   | -   | -   | 282 | -   | 340 | 348 |
| 2019/2020       | 224 | -   | 274 | 303 | 285 | 303 | 295 | -   |
| 2020/2021       | 243 | 244 | 276 | 291 | 284 | 306 | 330 | 344 |
| 2021/2022       | 260 | 260 | 268 | 288 | 288 | 308 | 319 | 288 |
| 2022/2023       | 233 | 235 | 273 | 303 | 303 | 336 | 336 | 336 |
| 2023/2024       | 260 | 260 | 303 | 331 | 323 | 333 | 354 | 347 |

La Figura 25 y Figura 26 muestran el comportamiento de la fecha del inicio del derretimiento de nieve para todas la URN. Se observa la tendencia de un inicio del derretimiento que se produce más tarde a medida que se aumenta la elevación de la URN. Por ejemplo, en la temporada 2022/2023 en las superficies con orientación norte, el inicio del derretimiento en la URN con la

discretización más baja de altura se presentó el 19 de agosto del año 2022 y para la misma temporalidad en las superficies más altas se presentó el día 24 de noviembre del año 2022. También, existe la tendencia de presentarse más tardío este fenómeno en las zonas con orientación sur con relación a su contraparte en las superficies más altas, siendo similares o con diferencias poco relevantes en las cotas más bajas. Por ejemplo, para las temporadas 2022/2023 y 2023/2024 en la discretización de altura más baja (menos a 1500 metros) la diferencia es de 2 días y ninguno respectivamente, en cambio, para las zonas más altas (sobre 3000 metros), la diferencia es de 8 días y 22 días respectivamente.

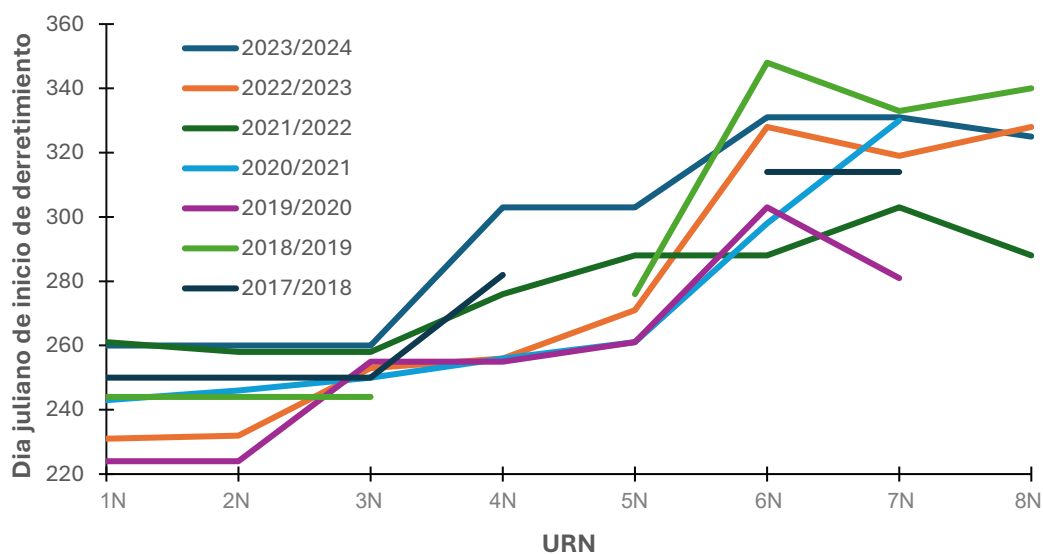


Figura 25. Tendencia temporal del inicio del derretimiento nival para las URN con orientación norte.

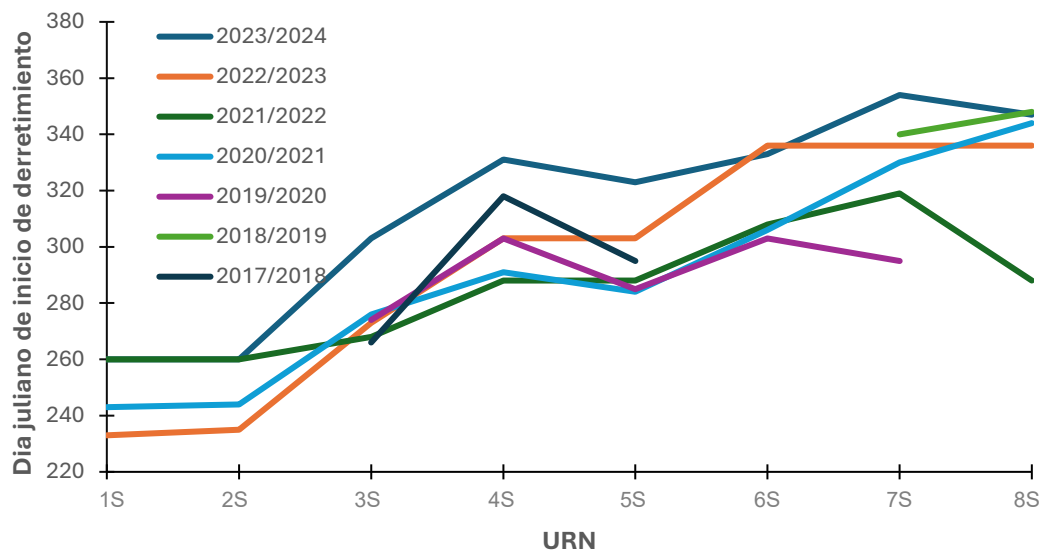


Figura 26. Tendencia temporal del inicio del derretimiento nival para las URN con orientación sur.

Para el posible análisis histórico, tan solo se consideraron las URN en que se pudieron seleccionar al menos 10 inicios del derretimiento con respecto a las temporadas nivales. Las URN que cumplen este criterio son URN 3N, URN 4N, URN 5N, URN 6N, URN 7N y URN 5S (solo la URN 5S representa orientación sur).

En la mayoría de los casos, las fechas de comienzo de ablación seleccionadas no son continuas, presentándose lagunas de datos entre las temporadas nivales visualizadas (Figura 27). Este suceso imposibilita determinar si existe alguna tendencia histórica en el comportamiento de la nieve (URN 3N, URN 4N, URN 5N Y URN 5S). Tan solo las URN 6N y 7N poseen más de 10 datos

de selección fechas y además la mayoría de estas son continuas, pero cómo es posible observar, no se presenta ninguna tendencia clara y marcada.

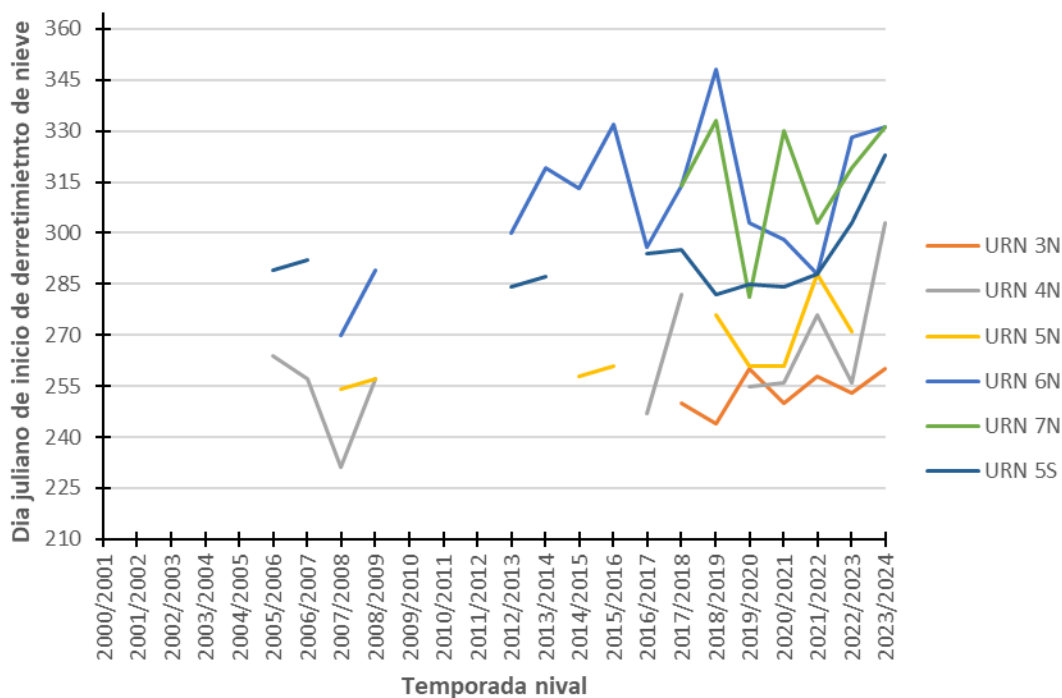


Figura 27. Análisis de variación espaciotemporal de las URN con mayor flujo de fechas de inicio de derretimiento efectivamente seleccionadas.

### 5.5.3. Análisis de tendencias en el fin de derretimiento de nieve a escala URN.

La Tabla 20 y la Tabla 21, nos indican el día juliano que se presentó el fin de desaparición de nieve a escala URN, como se puede visualizar se cuenta con una base de datos más robusta en comparación con todos los demás análisis que se realizaron (como se indago en la sección 6.4).

Tabla 20. Día juliano que marca el fin del derretimiento nival para las URN con aspecto norte.

| Temporada<br>Nival | URN |     |     |     |      |      |      |      |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|                    | 1N  | 2N  | 3N  | 4N  | 5N   | 6N   | 7N   | 8N   |
| 2000/2001          | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -    |
| 2001/2002          | -   | -   | -   | 284 | -    | -    | -    | -    |
| 2002/2003          | -   | -   | -   | -   | 11 > | -    | -    | -    |
| 2003/2004          | -   | -   | 290 | -   | 330  | 331  | 346  | 356  |
| 2004/2005          | -   | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -    |
| 2005/2006          | -   | 280 | -   | 336 | 336  | 27 > | 42 > | 52 > |
| 2006/2007          | 258 | -   | -   | 330 | 362  | 5 >  | 20 > | 30 > |
| 2007/2008          | 278 | -   | -   | 310 | 349  | 16 > | 31 > | 41 > |
| 2008/2009          | 256 | 264 | 312 | 313 | 328  | 344  | 359  | 4 >  |
| 2009/2010          | -   | 266 | 307 | -   | 354  | -    | -    | -    |
| 2010/2011          | -   | -   | 310 | -   | 326  | 326  | 341  | 351  |
| 2011/2012          | -   | -   | 295 | 305 | 337  | 353  | 3 >  | 13 > |
| 2012/2013          | -   | -   | 267 | 292 | 324  | -    | -    | -    |
| 2013/2014          | -   | -   | 285 | 310 | 333  | 358  | 8 >  | 18 > |
| 2014/2015          | -   | 281 | 297 | 313 | 329  | -    | -    | -    |
| 2015/2016          | 260 | -   | 307 | 307 | 348  | 363  | 13 > | 23 > |
| 2016/2017          | -   | -   | -   | 271 | 303  | 342  | 357  | 2 >  |
| 2017/2018          | 264 | -   | 313 | 321 | 329  | 353  | 3 >  | 13 > |
| 2018/2019          | 252 | 284 | -   | 308 | 356  | 23 > | 38 > | 48 > |
| 2019/2020          | 245 | 263 | 288 | 310 | 330  | 355  | 5 >  | 15 > |
| 2020/2021          | 249 | 289 | 298 | 314 | 350  | 362  | 12 > | 22 > |
| 2021/2022          | 264 | 282 | 284 | 291 | 308  | 312  | 327  | 337  |
| 2022/2023          | 255 | 277 | 292 | 322 | 335  | 354  | 4 >  | 14 > |
| 2023/2024          | 269 | 284 | 312 | 334 | 5 >  | 45 > | 60 > | 70 > |

\* Las casillas destacadas en amarillo y acompañadas del símbolo ">" significa que el valor indicado corresponde al día juliano del último año que comprende la temporada hidrológica. Ejemplo: Para la URN 8N en la temporada nival 2023/2024 el valor 70 > implica que el fin de desaparición de nieve se presentó el día juliano 70 del año 2024.

Tabla 21. Día juliano que marca el fin del derretimiento nival para las URN con aspecto sur.

| Temporada<br>Nival | URN |     |     |      |      |      |      |      |
|--------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|
|                    | 1S  | 2S  | 3S  | 4S   | 5S   | 6S   | 7S   | 8S   |
| 2000/2001          | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -    | -    |
| 2001/2002          | -   | -   | -   | -    | -    | -    | -    | -    |
| 2002/2003          | -   | -   | -   | 11 > | -    | -    | -    | -    |
| 2003/2004          | -   | -   | 291 | 330  | 339  | 14 > | 34 > | 49 > |
| 2004/2005          | -   | -   | -   | -    | 1 >  | 9 >  | 29 > | 44 > |
| 2005/2006          | -   | 295 | -   | 352  | 27 > | -    | -    | -    |
| 2006/2007          | 266 | 307 | 330 | 362  | 5 >  | -    | -    | -    |
| 2007/2008          | 294 | 310 | 317 | 333  | 350  | 16 > | 36 > | 51 > |
| 2008/2009          | 264 | 288 | 313 | 328  | 344  | 360  | 15 > | 30 > |
| 2009/2010          | 258 | -   | 330 | 347  | 13 > | 22 > | 42 > | 57 > |
| 2010/2011          | -   | -   | 325 | 333  | 342  | 9 >  | 29 > | 44 > |
| 2011/2012          | -   | -   | 328 | 337  | 353  | 20 > | 40 > | 55 > |
| 2012/2013          | -   | 251 | 292 | 308  | 7 >  | 7 >  | 27 > | 42 > |
| 2013/2014          | -   | 285 | 310 | 333  | 358  | 9 >  | 29 > | 44 > |
| 2014/2015          | -   | -   | 313 | 344  | 12 > | 19 > | 39 > | 54 > |
| 2015/2016          | 265 | -   | 307 | 339  | 364  | 15 > | 35 > | 50 > |
| 2016/2017          | -   | -   | -   | -    | 327  | 342  | 362  | 12 > |
| 2017/2018          | 281 | 291 | 328 | 353  | 353  | 11 > | 31 > | 46 > |
| 2018/2019          | 252 | 284 | 323 | 339  | 356  | 23 > | 43 > | 58 > |
| 2019/2020          | 252 | 288 | 315 | 334  | 334  | 358  | 13 > | 28 > |
| 2020/2021          | 255 | 298 | 328 | 354  | 362  | 4 >  | 24 > | 39 > |
| 2021/2022          | 269 | 291 | 308 | 323  | 323  | 339  | 359  | 9 >  |
| 2022/2023          | 267 | 297 | 324 | 342  | 347  | 364  | 19 > | 34 > |
| 2023/2024          | 269 | 294 | 334 | 5 >  | 21 > | 55 > | 75 > | 80 > |

\* Las casillas destacadas en amarillo y acompañadas del símbolo ">" significa que el valor indicado corresponde al día juliano del último año que comprende la temporada hidrológica. Ejemplo: Para la URN 4S en la temporada nival 2003/2004, el valor "11 >" implica que el fin de desaparición de nieve se presentó el día juliano 11 del año 2004.

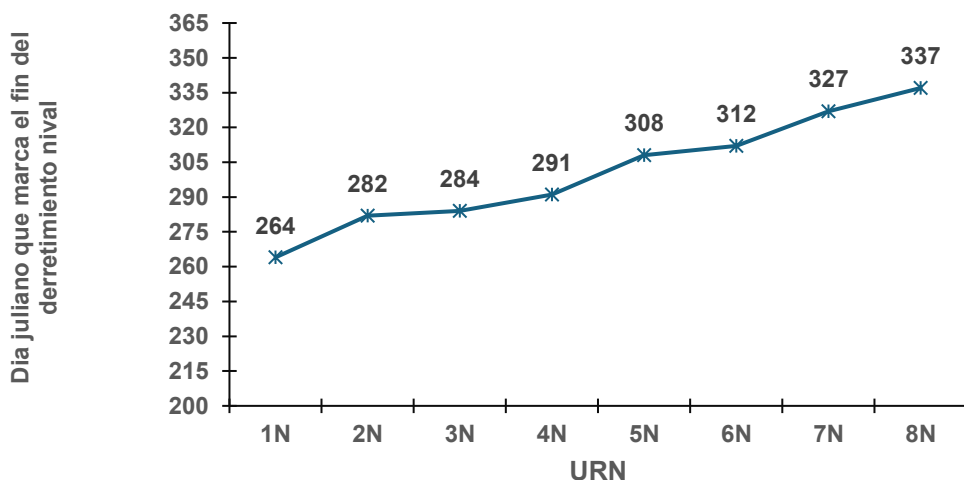


Figura 28. Ejemplificación del aumento del día en que se presenta el fin del derretimiento entre mayor altura. Temporada 2021/2022 en URN con orientación norte.

Al igual que en el análisis de tendencias del inicio del derretimiento de nieve se presenta que entre mayor sea la altura de la superficie el hito analizado se presenta más tarde a comparación de las zonas más bajas (ejemplificación en la Figura 28). Las diferencias entre los días que se presenta el fin del derretimiento no son significativas en las URN más bajas (menores a 17500 metros) y esta va aumentando entre más altas sean las superficies comparadas, análisis que vera a mayor detalle en las siguientes secciones.

#### 5.5.4. Análisis comparativo del día de inicio del derretimiento entre las URN con aspectos norte y sur.

En la Tabla 22 se visualiza para cada una de las URN con distinto aspecto e igual elevación la diferencia de días en que se inicia el derretimiento nival. Una cifra positiva indica los días extras en que se presenta el inicio de derretimiento de nieve entre la URN con orientación sur sobre la URN con aspecto norte, las cifras negativas representan los días extras en que se presenta el inicio de derretimiento de la URN con orientación norte por sobre la URN con aspecto sur. El valor 0 representa que no hubo una diferencia de días entre las URN comparadas y cuando no existe un valor significa que no fue posible la comparación ya sea por la falta de la determinación en la URN norte, URN sur o ambas.

Las URN con una discretización de altura menor a los 1750 metros sobre el nivel del mar, no presentaron una diferencia significativa en la fecha en que se presentó el inicio de derretimiento de nieve.

Las URN con discretización de altura entre los 1750 msnm y los 2500 msnm, fue donde el inicio del derretimiento fue más tardío en las URN con orientación sur sobre las URN con orientación norte. El inicio de derretimiento se presentó alrededor de 18,8 días, 32,7 días y 19,6 días más tarde en las superficies con orientación sur para los pares de URN en las bandas de elevación ]1750,2000], ]2000,2250] y ]2250,2500] respectivamente (URN 3N – URN 3S, URN 4N – URN 4S Y URN 5N – URN 5S). Por lo cual existe al menos dos semanas de

diferencia y en el caso más extremo una diferencia de un mes en presentarse el inicio de ablación.

Para las URN con una clasificación de altura sobre los 2500 msnm, también se presentó posteriormente el inicio de derretimiento en las URN con orientación sur, pero no fue tan elevado como en el grupo anterior (URN con alturas entre 1750 msnm y los 2500 msnm). En esta categoría, las URN con orientación sur tiene un inicio de derretimiento de nieve de aproximadamente una semana más tarde que su contraparte., esto puede explicarse por las bajas temperaturas presente en estos puntos ralentiza en gran medida el derretimiento de nieve y el factor orientación pierde levemente su relevancia en estas condicione

Tabla 22. Días más tarde en que se presentó el inicio de derretimiento nival en las URN con aspecto sur respecto a las URN con aspecto norte.

|                       | URN 1S           | URN 2S       | URN 3S       | URN 4S       | URN 5S       | URN 6S       | URN 7S       | URN 8S      |
|-----------------------|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
|                       | URN 1N           | URN 2N       | URN 3N       | URN 4N       | URN 5N       | URN 6N       | URN 7N       | URN 8N      |
|                       | Rangos de altura |              |              |              |              |              |              |             |
| Temporada hidrológica | ] -∞, 1500]      | ]1500, 1750] | ]1750, 2000] | ]2000, 2250] | ]2250, 2500] | ]2500, 2750] | ]2750, 3000] | ]3000, + ∞[ |
| 2006/2007             |                  |              | 16 día       |              |              |              |              |             |
| 2007/2008             |                  |              |              | 23 día       |              |              |              |             |
| 2008/2009             |                  |              | 0 día        |              | 32 día       | 0 día        |              |             |
| 2011/2012             |                  | 0 día        |              |              |              |              |              |             |
| 2012/2013             |                  |              |              |              |              |              |              |             |
| 2013/2014             |                  |              |              |              |              |              | 0 día        |             |
| 2015/2016             |                  |              |              |              |              | 4 día        | 0 día        | 0 día       |
| 2017/2018             |                  |              | 16 día       | 36 día       |              |              |              |             |
| 2018/2019             |                  |              |              |              | 6 día        |              | 7 día        | 8 día       |
| 2019/2020             | 0 día            |              | 19 día       | 48 día       | 24 día       | 0 día        | 14 día       |             |
| 2020/2021             | 0 día            | -2 día       | 26 día       | 35 día       | 23 día       | 8 día        | 0 día        |             |
| 2021/2022             | -1 día           | 2 día        | 10 día       | 12 día       | 0 día        | 20 día       | 16 día       | 0 día       |
| 2022/2023             | 2 día            | 3 día        | 20 día       | 47 día       | 32 día       | 8 día        | 17 día       | 8 día       |
| 2023/2024             | 0 día            | 0 día        | 43 día       | 28 día       | 20 día       | 2 día        | 23 día       | 22 día      |
| PROMEDIO (días)       | 0.2 día          | 0.6 día      | 18.8 día     | 32.7 día     | 19.6 día     | 6.0 día      | 9.6 día      | 7.6 día     |
| DESV. ESTANDAR (días) | 1.1 día          | 1.9 día      | 12.5 día     | 12.9 día     | 12.3 día     | 7.0 día      | 9.1 día      | 9.0 día     |

#### 5.5.5. Análisis comparativo del día de fin del derretimiento entre las URN con aspectos norte y sur.

Al igual que en el punto 6.5.3, la idea es cuantificar las diferencias de días cuando finaliza el derretimiento de nieve. Además, los valores dentro de la Tabla 23, tienen los mismos significados que en la Tabla 20 que se explica en el punto anterior (valores positivos, negativos, ceros y sin información).

Como se visualiza en la Tabla 23, en todos los casos las URN con orientación sur presentaron el fin de derretimiento luego que las URN con orientación norte (mayor permanencia) durante cada una de las temporadas analizadas y en la mayoría de la diferencia en igualdad de condiciones fue significativa.

Dentro de las URN con una discretización de altura menor a los 1750 msnm presentan una diferencia promedio de una semana a dos semanas aproximadamente en los días que se presenta el hito analizado, a favor de la orientación sur. Las URN con más de 1750 msnm la diferencia promedio asciende a aproximadamente 3 semanas, alcanzando valores cercanos al mes en las URN con clasificación de altura entre los 2000 a 2250 msnm y en las URN con alturas sobre los 3000 msnm.

Tabla 23. Días más tarde porque se presentó el inicio de derretimiento nivn en las URN con aspecto sur respecto a las URN con aspecto norte.

| Temporada Hidrológica | Rango altura     |                  |                  |                  |                  |                  |                  |                  |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|                       | ]-∞, 1500]       | ]1500, 1750]     | ]1750, 2000]     | ]2000, 2250]     | ]2250, 2500]     | ]2500, 2750]     | ]2750, 3000]     | ]3000, + ∞[      |
|                       | URN 1N<br>URN 1S | URN 2N<br>URN 2S | URN 3N<br>URN 3S | URN 4N<br>URN 4S | URN 5N<br>URN 5S | URN 6N<br>URN 6S | URN 7N<br>URN 7S | URN 8N<br>URN 8S |
| 2006/2007             | 8 día            | 0 día            |                  | 3 día            | 1 día            |                  |                  |                  |
| 2008/2009             | 8 día            | 3 día            | 1 día            | 15 día           | 17 día           | 16 día           | 21 día           | 26 día           |
| 2009/2010             |                  |                  | 23 día           |                  | 24 día           |                  |                  |                  |
| 2010/2011             |                  |                  | 15 día           |                  | 16 día           | 48 día           | 53 día           | 58 día           |
| 2011/2012             | 12.5 día         | 18.8 día         | 19 día           | 33 día           | 17 día           | URN 3N<br>URN 3S | 32 día           | 37 día           |
| 2012/2013             |                  | 4.3 día          | 26 día           | 19 día           | 16 día           | 16 día           | 21 día           | 26 día           |
| 2013/2014             |                  |                  | 25 día           | 23 día           | 25 día           |                  |                  |                  |
| 2014/2015             |                  |                  | 16 día           | 31 día           | 48 día           |                  |                  |                  |
| 2015/2016             | 5 día            | 32.7 día         | 48 día           | 36 día           | 32 día           | URN 4N<br>URN 4S | 17 día           | 22 día           |
| 2016/2017             | 0 día            | 28 día           | 35 día           | 48 día           | 23 día           | URN 4N<br>URN 4S | 0 día            | 5 día            |
| 2017/2018             | 17 día           |                  | 15 día           | 32 día           | 23 día           | URN 4N<br>URN 4S | 23 día           | 28 día           |
| 2018/2019             |                  |                  |                  | 31 día           | 31 día           |                  | 5 día            | 10 día           |
| 2019/2020             | 7 día            | 19.6 día         | 24 día           | 27 día           | 24 día           | URN 5N<br>URN 5S | 3 día            | 8 día            |
| 2020/2021             | 6 día            | 20 día           | 23 día           | 30 día           | 40 día           | URN 5N<br>URN 5S | 7 día            | 12 día           |
| 2021/2022             | 5 día            | 19.6 día         | 23 día           | 24 día           | 32 día           | URN 5N<br>URN 5S | 27 día           | 32 día           |
| 2022/2023             | 12 día           |                  | 20 día           | 32 día           | 20 día           |                  | 10 día           | 15 día           |
| 2023/2024             | 0 día            |                  | 10 día           | 22 día           | 36 día           |                  | 10 día           | 15 día           |
| PROMEDIO (días)       | 7.6 día          | 6.0 día          | 0 día            | 20.6 día         | 27.2 día         | URN 6N<br>URN 6S | 19.8 día         | 22.1 día         |
| DES. ESTANDAR (días)  | 5.6 día          | 2 día            | 8 día            | 8.7 día          | 7.3 día          | URN 6N<br>URN 6S | 13.5 día         | 13.9 día         |
|                       |                  | 9.1 día          | 14 día           | 7 día            | 0 día            | URN 7N<br>URN 7S |                  |                  |
|                       |                  | 9.6 día          | 0 día            | 0 día            | 0 día            | URN 7N<br>URN 7S |                  |                  |
|                       |                  | 23 día           | 0 día            | 16 día           | 0 día            | URN 8N<br>URN 8S |                  |                  |
|                       |                  | 17 día           | 8 día            | 8 día            | 8 día            | URN 8N<br>URN 8S |                  |                  |
|                       |                  | 22 día           | 22 día           | 7.6 día          | 9.0 día          | URN 8N<br>URN 8S |                  |                  |
|                       |                  | 7.6 día          | 9.0 día          |                  |                  | URN 8N<br>URN 8S |                  |                  |

## 6. CONCLUSIONES

Mediante este estudio, se pudo observar que utilizando de forma combinada imágenes de diversas misiones espaciales se logra aumentar significativamente el número de imágenes disponibles para el análisis de variabilidad espaciotemporal del manto nival. A pesar de esto, no se pudo determinar las tendencias históricas propuestas inicialmente debido a la baja frecuencia temporal en la disponibilidad de dato previos al año 2019. Luego del año 2019, la información disponible es mucho más abundante con la metodología implementada. Por ello, es posible seguir con este estudio en un futuro y generar resultados bastante satisfactorios y útiles.

El análisis de la dinámica de nieve entre diversas condiciones geomorfológicas reflejó que, en las URN, a alturas más elevadas la aparición del manto nival se presentaba antes, comenzaba a derretirse después y tenía mayor tiempo de acumulación en comparación de las zonas más bajas. Pero también, que en las zonas con cotas inferiores las diferencias no eran tan significativas y en ocasiones, no existía diferencia (por lo general bajo los 1750 msnm). También se observa como las zonas con una incidencia menor a la radiación solar (caras sur) conservan la nieve por una mayor cantidad de días que los sectores con mayor incidencia (cara norte), observando diferencias promedio entre 1 semana a un mes dentro de las diversas clasificaciones de alturas.

Se identifican varias oportunidades de mejorar este estudio, tales como crear mayor cantidad de intervalos de discretización de alturas, integrar el factor de pendiente dentro de la creación de unidades de respuesta nival (suaves, moderadas y altas), extrapolar el estudio a diversas regiones del planeta, dar la posibilidad de comparar regiones con diversas condiciones climatológicas, utilizar mayor cantidad de misiones espaciales que proporcionen imágenes multiespectrales de alta resolución, y también, generación una plataforma que ejecute el código proporcionando al usuario poder manipular parámetros relevantes abriendo un amplio abanico posibilidades.

## 7. BIBLIOGRAFIA

- Barnett, T., Adam, J., y Lettemaier, D. (2005): *Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions*, *Nature*, 438, 303-309.
- Borràs, J., Delegido, J., Pezzola, A., Pereira, M., Morassi, G., Camps-Valls, G. (2017): *Clasificación de usos del suelo a partir de imágenes Sentinel-2*, *Crossfer*, 55-66.
- Cortes, G., Margulis, S. (2017): *Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes: Results from a high-resolution 31-year reanalysis*, *Agu*. 6859-6867.
- D'Odorico, P., Daves, K., Carr, J., Chiarelli, D., Dell'Angello, J., Gephart, J., MacDonald, G., Seekell, D., Samir Suweis, Rulli, M. (2018): *The Global Food-Energy-Water Nexus*, *Reviews of Geophysics*, 456-531.
- Etchevers, P., Martin, E., Brown, R., Fierz, C., Lejeune, Y., Bazile, E., Boone, A., Dai, Y., Essery, R., Fernandez, A., Gusev, Y., Jordan, R., Koren, V., Kowalczyk, E., Nasonova, O., Pyles, D., Schlosser, A., Shmakin, A., Smirnova, T., Strasser, U., Verseghy, D., Yamazaki, T., Yang, Z. (2004): *Validation of the energy budget of an alpine snowpack simulated by several snow models (SnowMIP project)*, *Annals of Glaciology*, 150-158.
- European Space Agency (2015): *Sentinels-2*. [https://www.esa.int/Space\\_in\\_Member\\_States/Spain/SENTINEL\\_2](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/SENTINEL_2)
- Gascoin, S., Barrau, Z., Deschamps-Berger, C., Marti, F., Salgues, G., Lopez, J., Revuelto, J., Michon, T., Schattan, P., Hagallone, O. (2020): *Estimating fractional snow cover in open terrain from Sentinel-2 using the Normalized Difference Snow Index*, *Remote Sensing*, 1-19.
- Gordon, B., Brooks, P., Krogh, S., Boisrime, G., Carroll, R., McNamara, P., Harpold, A. (2022): *Why does snowmelt-driven streamflow response to warming vary? A data-driven review and predictive framework*. *Environmental Research Letters*, 1-20.
- 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.
- Guadalupe, A., Francois, J., Contreras, V., Saud, F. (2021): *Changes in snow cover and its relationship with flow for the characterization, monitoring and management of mountain basins in the extratropical Andes of Chile between 29° and 37°S using remote sensing*, *Boletín de Estudios Geográficos*, 123-155.

- Huerta, M., Molotoch, N., McPhee, J. (2019): *Snowfall interception in a deciduous Nothofagus forest and implications for spatial snowpack distribution*, WILEY, 1818- 1834.
- Kulkarni, A., Srinivasulu, J., Manjul, S., Mathur, P. (2002): *Field based spectral reflectance studies to develop NDSI method for snow cover monitoring*, Photonirvachak, 73-80.
- Loveland, T., Irons, J. (2016): *Landsat 8: The plans, the reality, and the legacy*, ELSEVIER, 1-6.
- Mancero, H., Toctaguano, D., Tacuri, C. (2015): *Evaluacion de Modelos Digitales de Elevacion obtenidos por diferentes sensores remotos*, ESPE, 107- 111.
- Mardones, P., Garreud, R. (2017): *Impactos del cambio climatico en la altura de la isoterma 0°C sobre Chile Central*, [Tesis academica].
- Marks, D., Winstral, A. (2001): *Comparison of Snow Deposition, the Snow Cover Energy Balance, and Snowmelt at Two Sites in a Semiarid Mountain Basin*, JOURNAL OF HYDROMETEOROLOGY, 214-227.
- Mazurkiewicz, A., Calley, D., McDonnell, J. (2008): *Assessing the controls of the snow energy balance and water available for runoff in a rain-on-snow environment*, Journal of Hydrology, 354-368.
- Mernild, S., Liston, Glen., Hiemstra, C., Malmros, J., Yde, J., Mcphee, J. (2016): *Tje andes Cordillera. Part I: Snow distribution, properties and trends (1979-2014)*, International Journal of Climatology, 1680-1698.
- Pomeroy, J., Gray, D. (1990): *Saltation of snow*, Water Resources Research, 1583-1594.
- Stehr, A., Aguayo, M. (2017): *Snow cover dynamics in Andean watersheds of Chile (32-39,5°S) during the years 2000-2016*, Hydrology and Earth System Sciences, 5111-5126.
- Strasser, U., Bernhardt, M., Weber, M., Liston, G., Mauser, W. (2008): *Is snow sublimation important in the alpine water balance?*, The Cryosphere, 53-66.
- Taborton, G. (1994): *Measurements and Modeling of Snow Energy Balance and Sublimation from Snow*, Utah Water Research Laboratory, 1-22.
- Vicuña, S., Gironás, J., Meza, F., Cruzat, M., Jelinek, M., Bustos, E., Poblete, D., Bambach, N. (2013): *Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile*, Hidrologic Sci. J., 58, 1598-1619.

## 8. ANEXOS

### RESUMEN DE BANDAS MULTIESPECTRALES UTILIZADAS POR CADA SENSOR DE LOS SATELITES.

Tabla A1. Bandas del sensor multiespectral MSI de Sentinel-2.

| Band<br>a | Descripción   | Tamaño<br>píxel | Longitud de onda<br>S2A | Longitud de onda<br>S2B |
|-----------|---------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| B1        | Aerosols      | 60 metros       | 443,9 nm                | 442,3 nm                |
| B2        | Blue          | 10 metros       | 496,6nm                 | 492,1 nm                |
| B3        | Green         | 10 metros       | 560,0 nm                | 559,0 nm                |
| B4        | Red           | 10 metros       | 664,5 nm                | 665,0 nm                |
| B5        | Red Edge 1    | 20 metros       | 703,9 nm                | 703,8 nm                |
| B6        | Red Edge 2    | 20 metros       | 740,2 nm                | 739,1 nm                |
| B7        | Red Edge 3    | 20 metros       | 782,5 nm                | 779,7 nm                |
| B8        | NIR           | 10 metros       | 835,1 nm                | 833,0 nm                |
| B8A       | Red Edge 4    | 20 metros       | 864,8 nm                | 864,0 nm                |
| B9        | Water vapor   | 60 metros       | 945,0 nm                | 943,2 nm                |
| B11       | SWIR 1        | 20 metros       | 1613,7 nm               | 1610,4 nm               |
| B12       | SWIR 2        | 20 metros       | 2202,4 nm               | 2185,7 nm               |
| QA60      | CLOUD<br>MASK | 60 metros       | -                       | -                       |

Tabla A2. Bandas utilizadas por los sensores ETM y ETM+ de Landsat 5 y Landsat 7.

| Banda    | Descripción   | Tamaño<br>píxel | Longitud de onda          |
|----------|---------------|-----------------|---------------------------|
| SR_B1    | Blue          | 30 metros       | 0,45 - 0,52 $\mu\text{m}$ |
| SR_B2    | Green         | 30 metros       | 0,52 - 0,60 $\mu\text{m}$ |
| SR_B3    | Red           | 30 metros       | 0,63 - 0,69 $\mu\text{m}$ |
| SR_B4    | NIR           | 30 metros       | 0,77 - 0,90 $\mu\text{m}$ |
| SR_B5    | SWIR 1        | 30 metros       | 1,55 - 1,75 $\mu\text{m}$ |
| SR_B7    | SWIR 2        | 30 metros       | 2,08 - 2,35 $\mu\text{m}$ |
| QA_PIXEL | CLOUD<br>MASK | 30 metros       | -                         |

Tabla A3. Bandas utilizadas por los sensores OLI/TIR de Landsat 8.

| Banda    | Descripción | Tamaño píxel | Longitud de onda            |
|----------|-------------|--------------|-----------------------------|
| SR_B1    | Ultra blue  | 30 metros    | 0,435 - 0,451 $\mu\text{m}$ |
| SR_B2    | Blue        | 30 metros    | 0,452 - 0,512 $\mu\text{m}$ |
| SR_B3    | Green       | 30 metros    | 0,533 - 0,590 $\mu\text{m}$ |
| SR_B4    | Red         | 30 metros    | 0,636 - 0,673 $\mu\text{m}$ |
| SR_B5    | NIR         | 30 metros    | 0,851 - 0,879 $\mu\text{m}$ |
| SR_B6    | SWIR 1      | 30 metros    | 1,566 - 1,651 $\mu\text{m}$ |
| SR_B7    | SWIR 2      | 30 metros    | 2,107 - 2,294 $\mu\text{m}$ |
| QA_PIXEL | CLOUD MASK  | 30 metros    | -                           |

Tabla A4. Bandas utilizadas por los sensores OLI/TIR de Landsat 9.

| Banda    | Descripción | Tamaño píxel | Longitud de onda            |
|----------|-------------|--------------|-----------------------------|
| SR_B1    | Ultra blue  | 30 metros    | 0,435 - 0,451 $\mu\text{m}$ |
| SR_B2    | Blue        | 30 metros    | 0,452 - 0,512 $\mu\text{m}$ |
| SR_B3    | Green       | 30 metros    | 0,533 - 0,590 $\mu\text{m}$ |
| SR_B4    | Red         | 30 metros    | 0,636 - 0,673 $\mu\text{m}$ |
| SR_B5    | NIR         | 30 metros    | 0,851 - 0,879 $\mu\text{m}$ |
| SR_B6    | SWIR 1      | 30 metros    | 1,566 - 1,651 $\mu\text{m}$ |
| SR_B7    | SWIR 2      | 30 metros    | 2,107 - 2,294 $\mu\text{m}$ |
| QA_PIXEL | CLOUD MASK  | 30 metros    | -                           |

## CÓDIGO DE PROGRAMACION PARA GENERAR LA BASE DE DATOS DE SCA Y FSC A ESCALA SSC.

```

// Modules
var callM_JoinByDay = require('users/rodcode16/tesis:Modules/JoinByDay');
var batch = require('users/fitoprincipe/geetools:batch');

// Function general
function TemporalAnalysis (In_SelectSA, In_StartDate, In_EndDate, In_PerCloudCover,
In_PerTolerance){

// Geometries

var stringListFeatCol = [
  'users/rodcode16/SSC_08100',
  'users/rodcode16/SSC_08101',
  'users/rodcode16/SSC_08102',
  'users/rodcode16/SSC_08103',
  'users/rodcode16/SSC_08104',
  'users/rodcode16/SSC_08105',
  'users/rodcode16/SSC_08106',
  'users/rodcode16/SSC_08370',
  'users/rodcode16/SSC_08372',
  'users/rodcode16/SSC_08373'
];

var toStringFC =
ee.String(ee.List(stringListFeatCol).get(ee.Number(In_SelectSA)).getInfo());
var mainFeatCol = ee.FeatureCollection(toStringFC);
var studyArea = mainFeatCol.geometry();
var areaSA = studyArea.area().divide(1e6);

// Utility Layers

```

```

var forestFree_Raster =
ee.Image('users/rodcode16/forestFree_V6').clipToCollection(mainFeatCol).toInt();

var forestPick = forestFree_Raster.eq(0);
var forestMaskUpdate = forestPick.updateMask(forestPick);

Map.addLayer(mainFeatCol);

var vectorFF = forestMaskUpdate.reduceToVectors({
  geometry: studyArea,
  crs: forestMaskUpdate.projection(),
  scale: 30,
  geometryType: 'polygon',
  eightConnected: false,
  labelProperty: 'zone',
  reducer: ee.Reducer.countEvery() });

var geoFF = vectorFF.geometry(geoFF);

var mainFC_FF_Diff = studyArea.difference(geoFF, 0.01);
var areaSA_FF = mainFC_FF_Diff.area().divide(1e6);

// Cloud Mask

function f_maskS2clouds(image) {

  var qa = image.select('QA60');
  var cloudBitMask = 1 << 10;
  var cirrusBitMask = 1 << 11;
  var valueCloudMask = 1;
  var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0).and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));

  return image.updateMask(mask)

```

```

        .copyProperties(image, ["system:time_start"])
        .set('MASK_CLOUD', valueCloudMask);
    }

function f_maskCloudsLS(image){

var qaMask = image.select('QA_PIXEL').toInt().bitwiseAnd(parseInt('11111', 2)).eq(0);
var saturationMask = image.select('QA_RADSAT').eq(0);
var opticalBands = image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2);
var valueCloudMask = 1;

return image.addBands(opticalBands, null, true)
    .updateMask(qaMask)
    .updateMask(saturationMask)
    .copyProperties(image, ["system:time_start"])
    .set('MASK_CLOUD', valueCloudMask);
}

// Main collections to use

function workIC (imageCollection, cloudCover, listBandsNdsi, indexSatellite){

imageCollection = imageCollection.filterBounds(studyArea)
    .filterDate(In_StartDate, In_EndDate)
    .filterMetadata(cloudCover, 'less_than', In_PerCloudCover)
    .map(function(image){return image.clipToCollection(mainFeatCol)});

if (indexSatellite == "Sentinels"){ imageCollection =
imageCollection.map(f_maskS2clouds); }

else if (indexSatellite == "Landsat"){ imageCollection =
imageCollection.map(f_maskCloudsLS);}

```

```

var ndsiBand = imageCollection.map(function(image){
  var ndsi = image.normalizedDifference(listBandsNdsi).rename('NDSI');
  var ndsiReclass = ndsi.where(ndsi.lt(0.4),0).where(ndsi.gte(0.4),
1).rename('NDSI_RECLASS');
  return image.addBands(ndsi).addBands(ndsiReclass).select('NDSI_RECLASS');
});

return ndsiBand;
}

var mainCol_S2 = workIC(ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED'),
'LOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', ['B3', 'B11'], "Sentinels");

var mainCol_L5 = workIC(ee.ImageCollection('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2'),
'LOUD_COVER_LAND', ['SR_B2', 'SR_B5'], "Landsat");

var mainCol_L7 = workIC(ee.ImageCollection('LANDSAT/LE07/C02/T1_L2'),
'LOUD_COVER_LAND', ['SR_B2', 'SR_B5'], "Landsat");

var mainCol_L8 = workIC(ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2'),
'LOUD_COVER_LAND', ['SR_B3', 'SR_B6'], "Landsat");

var mainCol_L9 = workIC(ee.ImageCollection('LANDSAT/LC09/C02/T1_L2'),
'LOUD_COVER_LAND', ['SR_B3', 'SR_B6'], "Landsat");

// Main Collection L7 Fixed

var mainColFix_L7 = mainCol_L7.map(function(image){

  var imageFill = image.focal_mean(1, 'square', 'pixels', 8);

  return imageFill.blend(image).copyProperties(image, ["system:time_start",
"MASK_FOREST", "MASK_CLOUD"]);

});

var mergeLS =
mainCol_L5.merge(mainColFix_L7).merge(mainCol_L8).merge(mainCol_L9);

// Collections without cloud mask

```

```

var maskCloudsS2 = mainCol_S2;
var maskCloudsLS = mergeLS;
var mergeMaskClouds = maskCloudsLS.merge(maskCloudsS2);

// Collecion mask/unmask with property INDEX_DAY added

var byDayMaskClouds = callM_JoinByDay.joinByDay(mergeMaskClouds, In_StartDate,
In_EndDate, ["system:time_start", 'MASK_CLOUD', 'INDEX_DAY', "MASK_FOREST"]);

var forestMaskApply = byDayMaskClouds.map(function(image){

var forestMask = image.updateMask(forestFree_Raster);
var valueForestMask = 1;

return forestMask.set('MASK_FOREST', valueForestMask);

});

//URN derived from the analysis

var selectBand = forestMaskApply.map(function(image){return
image.select('NDSI_RECLASS').toInt()});

var imageSetArea = selectBand.map(function(image){

var imageToVector = image.reduceToVectors({
  geometry: studyArea,
  crs: image.projection(),
  scale: 30,
  geometryType: 'polygon',
  eightConnected: false,
  labelProperty: 'zone',
  reducer: ee.Reducer.countEvery() });

```

```

var imageGeometry = imageToVector.geometry();
var imageArea = imageGeometry.area(0.001).divide(1e6);

return image.set("IMAGE_AREA", imageArea);

});

//var pickImage = imageSetArea.first();
//Map.addLayer(pickImage);

// Spatial Filter Apply

var tolerance = areaSA_FF.multiply(In_PerTolerance);
var filterTolerance = imageSetArea.filterMetadata('IMAGE_AREA', 'Greater_than',
tolerance);

print(filterTolerance.size());

// SCA Calculation

var scaCalculation = filterTolerance.map(function(image){

//var selectBand = image.select(['NDSI_RECLASS']).toInt();

var SCA = ee.Image.pixelArea()
  .updateMask(image)
  .divide(1e6)
  .reduceRegion(
    {
      reducer: ee.Reducer.sum(),
      geometry: studyArea,

```

```

    scale: 30,
    bestEffort: true
  }).getNumber('area');

var getArealmg = image.get('IMAGE_AREA');
var getSystemTime = image.get('system:time_start');
var toDate = ee.Date(getSystemTime).format('YYYY-MM-dd');
var fscPerImage = SCA.divide(getArealmg).multiply(100).toInt();

return image.set('SCA', SCA).set('FSC', fscPerImage).set('DATE', ee.Number(toDate));

});

var sortDate = scaCalculation.sort('DATE');

return filterTolerance;
}

// Prefix

for (var i = 2000; i<=2023; i++){

var year = i;
var prefixInitial = '-01-01';
var prefixEnd = '-12-31';
var initialDate = year + prefixInitial;
var endDate = year + prefixEnd;

// Parameters

var In_SelectSA = 9;
var In_StartDate = initialDate;

```

```

var In_EndDate = endDate;
var In_PerCloudCover = 15;
var In_PerTolerance = 0.7;
var savedData = TemporalAnalysis (In_SelectSA, In_StartDate, In_EndDate,
In_PerCloudCover, In_PerTolerance);

var sizeData = savedData.size();

var toFeature = savedData.map(function(image){

    var getIndexDay = image.get('INDEX_DAY');
    var getFSC = image.get('FSC');
    var getSCA = image.get('SCA');
    var getDate = image.get('DATE');

    return ee.Feature(null, {'DATE': getDate, 'INDEX_DAY': getIndexDay, 'SCA': getSCA,
'FSC': getFSC });

})

var toFeatureCollection = ee.FeatureCollection(toFeature);

Export.table.toDrive({
    collection: toFeatureCollection,
    folder: 'SSC_08373',
    description: year,
    fileFormat: 'CSV'
});
}

```

## CÓDIGO DE PROMACIÓN PARA GENERAR URN (FUNCIÓN).

```

function GenerationURN (In_SelectSA){

// Geometries

var stringListFeatCol = [
  'users/rodcode16/SSC_08100',
  'users/rodcode16/SSC_08101',
  'users/rodcode16/SSC_08102',
  'users/rodcode16/SSC_08103',
  'users/rodcode16/SSC_08104',
  'users/rodcode16/SSC_08105',
  'users/rodcode16/SSC_08106',
  'users/rodcode16/SSC_08370',
  'users/rodcode16/SSC_08373' ];

var toStringFC = ee.String(ee.List(stringListFeatCol).get(ee.Number(In_SelectSA)).getInfo());
var mainFeatCol = ee.FeatureCollection(toStringFC);
var studyArea = mainFeatCol.geometry();
var areaSA = studyArea.area().divide(1e6);

// Lifting bands and derivated

var dem = ee.Image('CGIAR/SRTM90_V4').clipToCollection(mainFeatCol);
var elevationBand = dem.select('elevation').rename('ELEVATION').toFloat();
var aspectBand = ee.Terrain.aspect(dem).rename('ASPECT');
var topographicsBands = elevationBand.addBands(aspectBand);

// Reclass Bands

// Def. Limit Values

```

```

var aspect0 = 0;
var aspect90 = 90;
var aspect270 = 270;
var aspect360 = 360;

var ltElevation = 1500;
var btw1_Elevation = 1750;
var btw2_Elevation = 2000;
var btw3_Elevation = 2250;
var btw4_Elevation = 2500;
var btw5_Elevation = 2750;
var gteElevation = 3000;

// Select Bands

var selectElevation = topographicsBands.select('ELEVATION');
var selectAspect = topographicsBands.select('ASPECT');

// Executed Reclass Bands

var reclassElevation = selectElevation.where(selectElevation.lt(ltElevation), 1)
  .where(selectElevation.gte(ltElevation).and(selectElevation.lt(btw1_Elevation)), 2)
  .where(selectElevation.gte(btw1_Elevation).and(selectElevation.lt(btw2_Elevation)), 3)
  .where(selectElevation.gte(btw2_Elevation).and(selectElevation.lt(btw3_Elevation)), 4)
  .where(selectElevation.gte(btw3_Elevation).and(selectElevation.lt(btw4_Elevation)), 5)
  .where(selectElevation.gte(btw4_Elevation).and(selectElevation.lt(btw5_Elevation)), 6)
  .where(selectElevation.gte(btw5_Elevation).and(selectElevation.lt(gteElevation)), 7)
  .where(selectElevation.gte(gteElevation), 8).rename('ELEVATION_RECLASS');

var reclassAspect =
selectAspect.where(selectAspect.gte(aspect270).and(selectAspect.lte(aspect360)), 1)

```

```

    .where(selectAspect.gte(aspect0).and(selectAspect.lt(aspect90)), 1)

.where(selectAspect.gte(aspect90).and(selectAspect.lt(aspect270)), 10).rename('ASPECT_RECLASS');

var reclassNewBands =
topographicsBands.addBands(reclassElevation).addBands(reclassAspect);

// Operations Bands

var selectReclassElevation = reclassNewBands.select('ELEVATION_RECLASS');
var selectReclassAspect = reclassNewBands.select('ASPECT_RECLASS');
var executedOperation =
selectReclassElevation.multiply(selectReclassAspect).rename('URN');
var bandURN = reclassNewBands.addBands(executedOperation);

// Last Reclassification

var selectURN = bandURN.select('URN');

var lastReclasification = selectURN.where(selectURN.eq(10), 9)
    .where(selectURN.eq(20), 10)
    .where(selectURN.eq(30), 11)
    .where(selectURN.eq(40), 12)
    .where(selectURN.eq(50), 13)
    .where(selectURN.eq(60), 14)
    .where(selectURN.eq(70), 15)
    .where(selectURN.eq(80), 16);

// Image Viewer

Map.addLayer( lastReclasification, { min: 0, max: 16, palette: ['#ffffff', '#000000'] });

```

```
// Download Images

var noDataVal = -9999;
var unmaskedImage = executedOperation.unmask({value: noDataVal, sameFootprint:
false});

Export.image.toDrive({

  image: unmaskedImage,
  description: 'TEST',
  folder: 'URN_DOWNLOAD_TEST',
  scale: 30,
  crs: 'EPSG:4326',
  fileFormat: 'GeoTIFF',
  maxPixels: 1E13,
  formatOptions: {
    noData: noDataVal

  }
});}
```

## CÓDIGO DE PROMACION PARA GENERAR LA BASE DE DATOS DE SCA Y FSC A ESCALA URN.

```

// Modules

var callM_JoinByDay = require('users/rodcode16/tesis:Modules/JoinByDay');

var batch = require('users/fitoprincipe/geetools:batch');

// Function general

function TemporalAnalysis (In_SelectSA, In_StartDate, In_EndDate, In_PerCloudCover,
In_SelectURN, In_PerToleranceURN){

// Geometries

var stringListFeatCol = [

'users/rodcode16/SSC_08100',

'users/rodcode16/SSC_08101',

'users/rodcode16/SSC_08102',

'users/rodcode16/SSC_08103',

'users/rodcode16/SSC_08104',

'users/rodcode16/SSC_08105',

'users/rodcode16/SSC_08106',

'users/rodcode16/SSC_08370',

'users/rodcode16/SSC_08372',

'users/rodcode16/SSC_08373'

];

var toStringFC =
ee.String(ee.List(stringListFeatCol).get(ee.Number(In_SelectSA)).getInfo());

var mainFeatCol = ee.FeatureCollection(toStringFC);

var studyArea = mainFeatCol.geometry();

var areaSA = studyArea.area().divide(1e6);

```

```
// Utility Layers
```

```
var forestFree_Raster =
ee.Image('users/rodcode16/forestFree_V6').clipToCollection(mainFeatCol);

var imageURN =
ee.Image('users/rodcode16/ZE_URN_ORIGINAL_V8').clipToCollection(mainFeatCol);

var selectURN = imageURN.eq(In_SelectURN);
var updateMaskURN = selectURN.updateMask(selectURN);
var forestUpdateMaskURN = updateMaskURN.updateMask(forestFree_Raster);
```

```
// Cloud Mask
```

```
function f_maskS2clouds(image) {

var qa = image.select('QA60');
var cloudBitMask = 1 << 10;
var cirrusBitMask = 1 << 11;
var valueCloudMask = 1;
var mask = qa.bitwiseAnd(cloudBitMask).eq(0).and(qa.bitwiseAnd(cirrusBitMask).eq(0));

return image.updateMask(mask)
  .copyProperties(image, ["system:time_start"])
  .set('MASK_CLOUD', valueCloudMask);
}

function f_maskCloudsLS(image){
var qaMask = image.select('QA_PIXEL').toInt().bitwiseAnd(parseInt('11111', 2)).eq(0);
var saturationMask = image.select('QA_RADSAT').eq(0);
var opticalBands = image.select('SR_B.').multiply(0.0000275).add(-0.2);
var valueCloudMask = 1;
```

```

return image.addBands(opticalBands, null, true)
    .updateMask(qaMask)
    .updateMask(saturationMask)
    .copyProperties(image, ["system:time_start"])
    .set('MASK_CLOUD', valueCloudMask);
}

// Main collections to use

function workIC (imageCollection, cloudCover, listBandsNdsi, indexSatellite){

    imageCollection = imageCollection.filterBounds(studyArea)
        .filterDate(In_StartDate, In_EndDate)
        .filterMetadata(cloudCover, 'less_than', In_PerCloudCover)
        .map(function(image){return image.clipToCollection(mainFeatCol)});

    if (indexSatellite == "Sentinels"){ imageCollection =
imageCollection.map(f_maskS2clouds); }

    else if (indexSatellite == "Landsat"){ imageCollection =
imageCollection.map(f_maskCloudsLS);}

    var ndsiBand = imageCollection.map(function(image){
        var ndsi = image.normalizedDifference(listBandsNdsi).rename('NDSI');
        var ndsiReclass = ndsi.where(ndsi.lt(0.4),0).where(ndsi.gte(0.4),
1).rename('NDSI_RECLASS');

        return image.addBands(ndsi).addBands(ndsiReclass).select('NDSI_RECLASS');
    });

    return ndsiBand;
}

```

```

    var mainCol_S2 = workIC(ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED'),
    'CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', ['B3', 'B11'], "Sentinels");

    var mainCol_L5 = workIC(ee.ImageCollection('LANDSAT/LT05/C02/T1_L2'),
    'CLOUD_COVER_LAND', ['SR_B2', 'SR_B5'], "Landsat");

    var mainCol_L7 = workIC(ee.ImageCollection('LANDSAT/LE07/C02/T1_L2'),
    'CLOUD_COVER_LAND', ['SR_B2', 'SR_B5'], "Landsat");

    var mainCol_L8 = workIC(ee.ImageCollection('LANDSAT/LC08/C02/T1_L2'),
    'CLOUD_COVER_LAND', ['SR_B3', 'SR_B6'], "Landsat");

    var mainCol_L9 = workIC(ee.ImageCollection('LANDSAT/LC09/C02/T1_L2'),
    'CLOUD_COVER_LAND', ['SR_B3', 'SR_B6'], "Landsat");

    // Main Collection L7 Fixed
    var mainColFix_L7 = mainCol_L7.map(function(image){
        var imageFill = image.focal_mean(1, 'square', 'pixels', 8);
        return imageFill.blend(image).copyProperties(image, ["system:time_start",
    "MASK_FOREST", "MASK_CLOUD"]);
    });

    var mergeLS =
    mainCol_L5.merge(mainColFix_L7).merge(mainCol_L8).merge(mainCol_L9);

    // Collections without cloud mask

    var maskCloudsS2 = mainCol_S2;
    var maskCloudsLS = mergeLS;
    var mergeMaskClouds = maskCloudsLS.merge(maskCloudsS2);

    // Colleccion mask/unmask with property INDEX_DAY added

    var byDayMaskClouds = callM_JoinByDay.joinByDay(mergeMaskClouds, In_StartDate,
    In_EndDate, ["system:time_start", 'MASK_CLOUD', 'INDEX_DAY', "MASK_FOREST"]);

```

```

var forestMaskApply = byDayMaskClouds.map(function(image){

  var forestMask = image.updateMask(forestFree_Raster);
  var valueForestMask = 1;

  return forestMask.set('MASK_FOREST', valueForestMask);

});

var urnMask = forestMaskApply.map(function(image){

  return image.updateMask(selectURN);
});
// Calculate areas of Rasters

// Original Unwooded URN

var urnOriginalVectorFF = forestUpdateMaskURN.reduceToVectors({
  geometry: studyArea,
  crs: updateMaskURN.projection(),
  scale: 30,
  geometryType: 'polygon',
  eightConnected: false,
  labelProperty: 'zone',
  reducer: ee.Reducer.countEvery() });

var urnOriginalGeometryFF = urnOriginalVectorFF.geometry();
var urnOriginalAreaFF = urnOriginalGeometryFF.area(0.001).divide(1e6);
var urnOriginalFeatureFF = ee.Feature(urnOriginalAreaFF);

```

```

//URN derived from the analysis

    Var selectBand = urnMask.map(function(image){return
image.select('NDSI_RECLASS').toInt()});

var urnDerivateAreaSet = selectBand.map(function(image){

    var urnDerivateVector = image.reduceToVectors({
        geometry: studyArea,
        crs: image.projection(),
        scale: 30,
        geometryType: 'polygon',
        eightConnected: false,
        labelProperty: 'zone',
        reducer: ee.Reducer.countEvery() });

var urnDerivateGeometry = urnDerivateVector.geometry();
var urnDerivateArea = urnDerivateGeometry.area(0.001).divide(1e6);
var perImageURN = urnDerivateArea.divide(urnOriginalFeatureFF).multiply(100).toInt();

return image.set("URN_DERIVATE_AREA", urnDerivateArea)
    .set("URN_ORIGINAL_AREA", urnOriginalAreaFF)
    .set("URN_PER_IMAGE", perImageURN);

})

// Spatial Filter Apply

var filterTolerance = urnDerivateAreaSet.filterMetadata("URN_PER_IMAGE", 'Greater_than',
In_PerToleranceURN);

// SCA Calculation

```

```

var scaCalculation = filterTolerance.map(function(image){

//var selectBand = image.select(['NDSI_RECLASS']).toInt();

var SCA = ee.Image.pixelArea()
    .updateMask(image)
    .divide(1e6)
    .reduceRegion(
    {
    reducer: ee.Reducer.sum(),
    geometry: urnOriginalGeometryFF,
    scale: 30,
    bestEffort: true
    }).getNumber('area');

var getArealmg = image.get('URN_DERIVATE_AREA');
var getSystemTime = image.get('system:time_start');
var toDate = ee.Date(getSystemTime).format('YYYY-MM-dd');
var fsaPerImageURN = SCA.divide(getArealmg).multiply(100).toInt();

    return image.set('URN_DERIVATE_SCA', SCA).set('URN_DERIVATE_FSC',
    fsaPerImageURN).set('DATE', ee.Number(toDate));

});

var sortDate = scaCalculation.sort('DATE');
return sortDate;
}

var numbersImages = ee.List([]);

```

```
for (var i = 0; i <= 9; i++){

    // Prefix

    var yearInitial = 2016;
    var yearEnd = yearInitial + 1;
    var prefixInitial = '-04-01';
    var prefixEnd = '-03-31';
    var initialDate = yearInitial + prefixInitial;
    var endDate = yearEnd + prefixEnd;
    var prefixINDEX = 'HY';
    var prefixSeparation0 = '/';

    var INDEX = prefixINDEX + prefixSeparation0 + yearInitial + prefixSeparation0 + yearEnd
+ prefixSeparation0;

    // Parameters

    var In_SelectSA = i;
    var In_StartDate = initialDate;
    var In_EndDate = endDate;
    var In_PerCloudCover = 15;
    var In_SelectURN = 16;
    var In_PerToleranceURN = 70;

    var savedData = TemporalAnalysis (In_SelectSA, In_StartDate, In_EndDate,
In_PerCloudCover, In_SelectURN, In_PerToleranceURN);

    var sizeSD = savedData.size().getInfo();
    var elementToAdd = sizeSD - 1;
    var getElement = ee.Number(elementToAdd);
    var toList = savedData.toList(sizeSD);
```

```

for (var j = 0; j <= elementToAdd ; j++){

    var getImages = toList.get(j);
    var setIndexSA = ee.Image(getImages).set('INDEX_STUDY_AREA', j);
    numbersImages = numbersImages.add(setIndexSA);

}}

var toIC = ee.ImageCollection.fromImages(numbersImages);

var setIndex = toIC.map(function(image){return image.set("INDEX_IMAGE", INDEX)});

var finalSort = setIndex.sort('DATE');

var toFeature = finalSort.map(function(image){

    var getIndexDay = image.get('INDEX_DAY');
    var getUrnAreaIC = image.get('URN_DERIVATE_AREA');
    var getUrnScalC = image.get('URN_DERIVATE_SCA');
    var getDate = image.get('DATE');
    var getIndex = image.get('INDEX_IMAGE');
    var getIndexSA = image.get('INDEX_STUDY_AREA');

    return ee.Feature(null, {'DATE': getDate, 'INDEX_DAY': getIndexDay,
'URN_DERIVATE_SCA': getUrnScalC,
'URN_DERIVATE_AREA': getUrnAreaIC, 'INDEX_IMAGE':getIndex,
'INDEX_STUDY_AREA': getIndexSA
});

});

var prefixURN = 'URN';

```

```
var prefixSeparation = '_';  
var prefixHY = 'HY_';  
var folderName = prefixURN + In_SelectURN;  
var fileName = prefixURN + In_SelectURN + prefixSeparation + prefixHY + yearInitial;  
  
var toFeatureCollection = ee.FeatureCollection(toFeature);  
  
Export.table.toDrive({  
  collection: toFeatureCollection,  
  folder: folderName,  
  description: fileName,  
  fileFormat: 'CSV'  
});
```

Observación: Los códigos visualizados son de referencia, posee la estructura general, pero algunos de los módulos implementados en scripts anexos no son mostrados para no extender.