

**ESTIMACIÓN DE LOS CAMBIOS DEL GLACIAR EN LA SIERRA NEVADA DE
SANTA MARTA ASOCIADOS AL DESHIELO EN EL PERIODO DE 2016 A 2022**

MÓNICA ROCIO CORREAL OTÁLORA

Informe final de trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Especialista en sistemas de información geográfica

Grupo de Investigación y Desarrollo en Informática y Telecomunicaciones

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, Año 2022

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo esta dedicado a la memoria de mi compañero y amigo Luis Fernando Cardenas Santos, con quien nos propusimos ser especialistas SIG, aquí queda plasmado su conocimiento, dedicación, esfuerzo y parte de la motivación para que hoy yo, pueda culminar esta meta.

A mi madre y mi pareja por todo su apoyo incondicional en mi vida académica y profesional.

A mis compañeros de la especialización y a cada uno de los profesores por su profesionalismo, empatia y conocimiento aportado.

Resumen

La presente investigación se llevó a cabo, en la Sierra Nevada de Santa Marta, en la región Caribe, ubicada al noroccidente de Colombia, para el periodo de tiempo 2016- 2022.

Para lograr los objetivos, se realizó la comparación con algunos de los software gratuitos para el procesamiento de las imágenes satelitales y posteriormente la aplicación de técnicas de procesamiento digital de imágenes como: clasificación no supervisada. De esta manera mediante el uso de imágenes multiespectrales a bordo del satélite Sentinel-2, se determinó la pérdida en área y porcentaje del glaciar de La Sierra Nevada de Santa Marta.

Así mismo, a partir de los métodos de procesamiento digital de las imágenes adquiridas previamente se realiza la corrección atmosférica la cual se hace aplicando la herramienta SEN 2COR en el programa SNAP, y con el complemento Semi-automatic classification plugin- CSP, con el fin de mostrar la mejor metodología que permita evaluar el comportamiento del glaciar.

Palabras Claves: Glaciar, píxel, deshielo.

Abstract

This research was carried out in the Sierra Nevada de Santa Marta, in the Caribbean region, located in northwestern Colombia, for the period 2016-2022.

To achieve the objectives, the comparison was made with some of the free software for the processing of satellite images and later the application of digital image processing techniques such as: unsupervised classification. In this way, through the use of multispectral images on board the Sentinel-2 satellite, the loss in area and percentage of the Sierra Nevada de Santa Marta glacier was determined.

Likewise, from the digital processing methods of the previously acquired images, the atmospheric correction is performed, which is done by applying the SEN 2COR tool in the SNAP program, and with the Semi-automatic classification plugin-CSP, in order to show the best methodology. to evaluate the behavior of the glacier.

Keywords: Glaciar, píxel, thaw, satellite image.

Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	9
1.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA PROBLEMÁTICA.....	10
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	12
2. OBJETIVOS.....	14
3. ANTECEDENTES	15
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL.	23
5. REFERENTE TEÓRICO (CONCEPTUAL)	29
6. METODOLOGÍA.....	34
6.1 ENFOQUE METODOLOGICO	35
6.2 TIPO DE ESTUDIO.....	35
6.3 PROCEDIMIENTO	42
7. RESULTADOS	43
8. CONCLUSIONES	50
9. RECOMENDACIONES	51
10. REFERENCIAS.....	52

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1	37
Tabla 2	37
Tabla 3	46
Tabla 4	49

Lista de figuras

Figura 1	36
Figura 2	39
Figura 3	40
Figura 4	43
Figura 5	44
Figura 6	45
Figura 7	45
Figura 8	46
Figura 9	48

Lista de símbolos y abreviaturas

Ablación: Fusión parcial de un glaciar a causa del calor.

Casquetes Polares: Grandes masas de hielo ubicadas en los polos de la tierra. Cubierta nival: Superficie altitudinal caracterizado por la presencia de nieve permanente. Desglaciación: Reducción de la masa de hielo.

Glacial: Corresponde a temperaturas bajo 0 grados Celsius, presentes en zonas cubiertas de hielo o nieves perpetuas.

Glaciar: Gruesa capa de hielo que se origina en la superficie terrestre por acumulación, compactación y re-cristalización de la nieve a través del tiempo.

Masa de hielo: Corresponden a grandes masas de agua congelada situadas sobre la superficie terrestre generalmente ubicadas en zonas de latitudes alta o zonas de montaña con suficiente altura para formar nevados; también corresponde a aquellas aguas congeladas que se encuentran flotando en los océanos.

Neviza: Nieve compactada por su propio peso antes de convertirse en hielos.

Nieves Perpetuas: Son aquellos cristales de hielo que se acumulan en las partes superiores de la montaña, donde los rayos del sol no llegan con la misma intensidad impidiendo su fácil deshielo.

Permafrost: Suelo que se encuentra bajo el punto de congelación del agua o 0 grados Celsius.\

Radiancia: Total de energía radiada en una determinada dirección por unidad de área y por un ángulo sólido de medida. Describe precisamente lo que mide un sensor remoto.

Sublimación: Proceso que consiste en el cambio de estado de sólido a estado gaseoso sin pasar por el estado líquido.

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

El deshielo es un tema muy actual y que preocupa mucho a gran cantidad de organizaciones ambientales. El deshielo es la transformación de hielo en agua, pero para definir mejor el término conviene decir que es la fusión de la nieve y del hielo, lo cual se debe al aumento de la temperatura y a causa de la actividad del hombre por lo cual la capa de ozono ha comenzado a deteriorarse lentamente, permitiendo que una mayor cantidad de rayos ultravioletas entren en el planeta.

Según Lucas Echeverry el director de la fundación pro-sierra (fundación de la Sierra Nevada de Santa Marta) “El calentamiento global, más la mano devastadora del hombre hacen mella en el deshielo de sus nieves perpetuas y cada día produce menos agua para los 30 ríos que nacen en sus estribaciones”. (Suarez, 2015).

Bajo el escenario del deshielo de los glaciares tropicales, es importante realizar seguimientos a los diferentes nevados de todo el territorio Colombiano y tomar medidas para así evitar lo sucedido en el Nevado del Tolima y el de Santa Isabel, los cuales han tenido un impacto negativo por la disminución en sus nieves, generando la desaparición de los ríos y quebradas nacidas de estos afectando el desarrollo económico (Rodríguez; 2000).

La zona de glaciar se ha visto afectada por el calentamiento global y sumado a otros factores como las malas prácticas agrícolas, deforestación, contaminación del aire entre otros, ha generado el fenómeno del deshielo. Esto implica que con el paso del tiempo habrá una reducción sustancial en la disponibilidad y calidad del agua, debido a que el desequilibrio en la cobertura del glaciar producirá la desaparición de muchos afluentes.

La identificación de esta problemática hace mención de un conjunto de factores que van desde lo ambiental hasta lo social, teniendo como puente y vínculo metodológico, las herramientas SIG sin embargo para efectos de clasificación, la fortaleza de la investigación está en la aplicación de procesos como interpretación y análisis de información espacial, para la visualización de los cambios de glaciar en el periodo de los años 2009 al 2022, por consiguiente se puede hablar de dos líneas: una ambiental y de los Sistemas de Información Geográfica.

1.1. Descripción del área problemática.

La falta de difusión de los estudios que muestran los efectos del calentamiento global conlleva a la despreocupación de la gente del común, que no es consciente de los impactos que tiene este fenómeno en la vida diaria; uno de los efectos esperados del cambio climático es la desaparición masiva de los hielos permanentes de la superficie de la tierra en los casquetes polares y diversos cuerpos de hielo sobre los continentes. Este fenómeno viene sucediendo de manera sostenida en las últimas décadas y son múltiples los impactos asociados, la reducción de los glaciares y masas de hielo permanentes sobre los continentes es una de las consecuencias más directas y de alcance global provocando el aumento del nivel de los océanos, induciendo a un crecimiento de la temperatura del ambiente por efecto de una mayor radiación solar absorbida por la superficie terrestre. (Katz, 2010).

En el caso de Colombia es de vital importancia realizar acciones que conlleven a un constante registro de los recursos hídricos, especialmente a sus nevados para así tomar decisiones sobre los planes de contingencia que permitan prolongar la vida de estos y garantizar a las futuras generaciones el recurso hídrico de gran importancia para la supervivencia humana, el presente

estudio se enmarcará dentro de la observación del comportamiento de los hielos o nieves de la Sierra Nevada De Santa Marta, esto con el fin de analizar su dinámica para el periodo 2015–2020 causado por el calentamiento global.

El presente proyecto de investigación aplico diferentes conocimientos adquiridos en diferentes áreas de la ingeniería Catastral y Geodesia, mediante técnicas de percepción remota y procesamiento digital de imágenes, que permitieron el análisis de factores ambientales, característicos de la zona, para su posterior análisis. El tema ambiental se desarrolla académicamente en un nivel importante al presentar conceptos que describen la relación de las comunidades y su ambiente.

1.2. Formulación del problema

Los cambios climáticos que se están produciendo y se perciben a diario, permiten reflexionar en las consecuencias a futuro, estas variaciones en el clima perjudican el desarrollo y se evidencia en la escasez de agua potable en las grandes urbes. (Mayr, 1985).

Este tipo de situaciones nos hace reflexionar en los yacimientos de aguas dulces, los cuales nacen en las cumbres de las montañas y son indispensables para la supervivencia de los seres vivos, una de las fuentes más importantes son los nevados, que por la posición que ocupa Colombia son exóticos, ya que se encuentran en una zona tropical. El parque nacional natural Sierra Nevada de Santa Marta, se despliega como una de las montañas más grandes de la nación y como la única en su formación litoral y costera del planeta tierra por ello fue declarada por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) como reserva de la biosfera y patrimonio de la humanidad en el año de 1979, (Mayr, 1985).

Bajo el escenario del deshielo de los glaciares tropicales, es importante realizar seguimiento a La Sierra Nevada de Santa Marta y como se ha visto afectada con la disminución en sus nieves perpetuas teniendo un impacto negativo por la disminución en sus nieves, generando variación en relación al problema del cambio climático, que se han venido acelerando, a tal grado que afecta actualmente el ecosistema y su comunidad.

1.3. Justificación

El uso de las tecnologías informáticas y satelitales como medio para interpretar la información del espacio geográfico, constituyen un marco generativo de conocimiento interdisciplinario, a través del cual se quiere aportar al desarrollo de los usos y aplicaciones de los SIG como campo científico. Es allí donde su aplicación para el estudio del retroceso del deshielo a través de imágenes satelitales nos permite identificar los cambios que ha tenido el glaciar de la sierra de santa marta en el periodo 2015 a 2022.

En el caso de Colombia es de vital importancia realizar acciones que conlleven a un constante registro de los recursos hídricos, especialmente a sus nevados para así tomar decisiones sobre los planes de contingencia que permitan prolongar la vida de estos y garantizar a las futuras generaciones el recurso hídrico de gran importancia para la supervivencia humana, el presente estudio se enmarcará dentro de la observación del comportamiento de los hielos o nieves de la Sierra Nevada De Santa Marta, esto con el fin de analizar su dinámica en las últimas décadas causado por el calentamiento global.

El presente proyecto de investigación aplico diferentes conocimientos adquiridos en diferentes áreas mediante técnicas de percepción remota y procesamiento digital de imágenes, el cual

facilita su comprensión e interpretación permitiendo la toma de decisiones de las entidades competentes con el fin de mitigar la pérdida del glaciar, siendo este un recurso básico de agua dulce que funciona también como regulador climático, por tanto la pérdida de masa glaciar conlleva a un incremento de la erosión costera y elevación de las marejadas a medida que el calentamiento del aire y del mar ocasiona tormentas costeras con mayor frecuencia e intensidad, como huracanes y tifones, poniendo en riesgo el medio ambiente y la vida de todo un ecosistema.

2. Objetivos

2.1. *Objetivo general*

Evaluar los cambios del area del glaciar de la Sierra Nevada de Santa Marta con imágenes satelitales *Sentinel-2* entre el periodo 2015-2022.

2.2. *Objetivos específicos*

- Clasificar y reclasificar las imágenes satelitales Sentinel-2 de la Sierra Nevada y hacer un comparativo entre los años analizados
- Calcular el área de deshielo de la Sierra Nevada de Santa Marta teniendo en cuenta los comparativos realizados.
- Describir las pautas técnicas y metodológicas, a tener en cuenta para el procesamiento de imágenes Sentinel-2

3. Antecedentes

La presente investigación, pretende tener un seguimiento de los glaciares de Colombia en este caso la Sierra Nevada de Santa Marta, el cual corrobora la desglaciación que han tenido estos, a través del tiempo, los métodos que utiliza esta institución es el prospección geofísica, este método es el más exacto para calcular la profundidad y espesor, aunque solo lo llevan a cabo en el Nevado del Ruiz. (Rodríguez & Leonardo 2000).

Los cambios climáticos que vienen sucediendo en nuestro planeta, permiten tener un acercamiento a lo que está ocurriendo en los glaciares de montaña de nuestro país, que se caracterizan por su fragilidad y el impacto que causa su desaparición de manera constante por este fenómeno climático. Los primeros estudios detallados de glaciología en Colombia se comenzaron a realizar a partir de los años ochenta, en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Estos estudios y aplicaciones de la Geomática por medio del uso de imágenes satelitales, han logrado determinar áreas de deshielo de glaciares, con estos estudios y herramientas logor determinar el comportamiento de los glaciares de Colombia, con herramientas de software como PCI Geomatics, y ArcGis, entre otros obtuvieron la clasificación espectral y conversión vectorial para calcular el área glaciar del Nevado del Cocuy para el periodo de 1992 a 2014, por último se realizaron estadísticas del comportamiento y dieron el resultado del porcentaje de área de pérdida glaciar del nevado del cocuy en los últimos años. (Suarez, 2015) (Adolfo, 2007). La evidente disminución y pérdida de estas reservas como consecuencia del acelerado proceso de desglaciación y sus

repercusiones, son motivo de una preocupación creciente en la comunidad científica del mundo estando íntimamente relacionados al aspecto del Cambio Climático Global, Este proceso natural viene siendo acelerado por los procesos antrópicos que incrementan las temperaturas ambientales. Por lo tanto, es claro que el calentamiento en regiones de alta montaña conduciría a la reducción o desaparición de superficies significativas de nieve y hielo. (Alva & Meléndez, 2009).

El impacto de cambio climático es una de las grandes preocupaciones que aquejan a la humanidad, de acuerdo con el informe del 2013 de Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, en la actualidad se reportó que el año más caluroso fue el 2010, seguido por el 2005 y en tercer lugar el 2009. Los efectos del cambio climático y la inestabilidad del clima en los ecosistemas son evidentes a nivel mundial y sus futuros impactos son inevitables, a corto y mediano plazo. "*El cambio climático tiene el potencial de reconfigurar el escenario de la producción alimentaria del planeta*", dijo Graziano da Silva" (Field, 2014).

Los trabajos de Hastenrath y Ames (1995), Hoyos (1996), y Ceballos et al. (2006) entre otros, evidencian un retroceso del orden de 20m/año en todos los glaciares Colombianos de montaña, incluyendo los nevados Puracé, Tolima, Huila, los del Parque Nacional Natural de los Nevados (Ruiz, Cisne, Santa Isabel), la Sierra Nevada del Cocuy, y la Sierra Nevada de Santa Marta (referencias). Entre los años de 1959 y 1996, el glaciar del nevado Santa Isabel disminuyó su área en un 44%. Se prevé que para el año 2021 el glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy habrá desaparecido completamente, y lo mismo para los demás glaciares Colombianos hacia la mitad de este siglo. Este fenómeno, asociado a la alta

deforestación de los Andes tropicales tendrán importantes implicaciones sobre los ecosistemas y el sobre el ciclo hidrológico de páramos y bosques de montaña, por otro lado el estudio realizado por Herrera, G., & Ruiz, J. (2009). Retroceso glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá - Colombia, 1986-2007, contempla el retroceso del glaciar tropical en la Sierra Nevada del Cocuy, al noreste de los Andes colombianos, mediante la utilización de tres imágenes de satélite: LANDSAT, TM y ETM+, órbita 7 fila 56, adquiridas en enero de 1986, 2003 y 2007, aunque en esta época del año la probabilidad de detectar nieve en lugar de hielo es reducida. La imagen LANDSAT 7 ETM+. La proporción de retroceso del glaciar fue más del doble para los cuatro años, 2003-2007, los resultados comparados con el lapso de 1986- 2003. Así como prácticamente todos aquellos analizados, este estudio exhibió una tendencia lineal en la pérdida del glaciar, si la tendencia para el período 2003- 2007 continúa, el glaciar desaparecería en aproximadamente 20 años, otros estudios según el autor E Tobón y Ceballos J en el Boletín de Geología, 2007 se ha podido reconstruir la evolución de área desde el Neoglacial para los seis masas glaciares actuales del país, teniendo una extensión para el periodo 2002 – 2003 de 55 km², lo cual representa una disminución cercana al 80% durante los últimos 150 años. Actualmente la pérdida de área se estima entre el 1 y 3% anual. En cuanto a la pérdida de espesor de hielo se ha observado en un periodo de 10 meses un promedio de tres metros aproximadamente en el volcán nevado Santa Isabel (Cordillera Central). Estos datos anuncian la inevitable desaparición del hielo en la alta montaña colombiana en tan solo algunas décadas.

También en otros artículos de Ceballos, J. L. (2009). Acerca de la Manifestación de cambio climático los glaciares de Colombia. Revista La Tadeo (Cesada a Partir De 2012), (74), registran algunos datos de la acelerada pérdida de glaciar, según la comunidad científica, está asociada con el aumento térmico de la atmósfera debido a la acumulación de gases de efecto invernadero. De persistir la actual tendencia de pérdida de área glaciar de 3 a 5% anual, se considera que en tres a cuatro décadas estén extintos los glaciares en Colombia, este se ha venido incrementando fuertemente desde hace más de tres décadas, con una pérdida constante de las seis masas glaciares en Colombia que ocupan un área de 47,2 km² respectivamente.

Otras investigaciones plantean que por medio de datos proporcionados por el IDEAM y de metodologías empleadas para delimitación glaciar a partir de imágenes satelitales Sentinel 2. se procede a calcular parámetros topográficos como elevaciones máximas y mínimas, pendientes y aspecto u orientación, todo esto como información complementaria para la actualización del inventario glaciar en Colombia para los años 2016 – 2017 el impacto que han sufrido los glaciares en los últimos años, A partir de las imágenes satelitales Sentinel 2 y la metodología utilizada se determinaron las áreas de los seis glaciares colombianos para el año 2017 donde, los glaciares VNH, VNT, VNSI, VNR, SNCG y SNSM tuvieron un área glaciar del 7.29 km², 0.57 km², 0.66 km², 8.4 km², 13.32 km² y 6.65 km² respectivamente, con un total de área glaciar para Colombia de 36.89 km² ~ 37 km², una vez determinada el área glaciar para Colombia en el año 2017 (37 km²), fue posible calcular el retroceso glaciar con respecto al año 2016 (39.15 km²) el cual fue de 2.23 km² de área glaciar desaparecida.

Según Díaz, FA (2021) la estimación del retroceso glaciar en la sierra nevada de Santa Marta, permitió identificar su estado y variaciones en el tiempo. Dicho esto, se realizó un estudio de recuperación de glaciares en la Sierra Nevada de Santa Marta a partir de imágenes satelitales y técnicas de fotointerpretación como lo son la clasificación supervisada, la cual permitió definir y separar las coberturas glaciares para los años 2000 al 2020 donde posteriormente fue posible identificar las zonas de mayor pérdida para la zona de estudio.

En otras investigaciones se analiza el retroceso glaciar del nevado del Ruiz con 27 imágenes del satélite Landsat con un periodo de monitoreo que inicia en el año 1976 y va hasta 2018. Las imágenes fueron procesadas para lograr discriminar el área glaciar usando el índice espectral NDSI (normalized difference snow index) El análisis de los resultados obtenidos de la serie de tiempo muestra que el glaciar es afectado en periodos ENSO de altas temperaturas (El Niño), perdiendo gran parte de su área glaciar y recuperándola en periodos ENSO más fríos (La Niña), contradiciendo los estudios que definen la pérdida de área glaciar con una función lineal negativa. (GEFEM,2019)

Otro artículo que contempla la sensibilidad de los glaciares tropicales a las condiciones de temperatura fría durante la Inversión Fría Antártica, e seleccionaron 53 morrenas de 25 glaciares localizados en Colombia, Perú y Bolivia, entre los analizados por Jomelli et al. (2014) y se procedió a realizar dos cálculos diferentes. En primer lugar, se tuvo en cuenta la morrena más antigua y su incertidumbre para cada glaciar, de acuerdo con cinco períodos distintos abarcando ACR y Younger Dryas (YD): pre-ACR, ACR, ACR-YD, YD y post-YD

respectivamente. Los resultados revelaron el predominio de señales pre-ACR, ACR en el 60% de los casos. (Ceballos, 2017)

Otras investigaciones del Parque Nacional Natural Sierra Nevada del Cocuy (PNN Cocuy) exhibe la mayor extensión de glaciares en Colombia y elevaciones que alcanzan los 5330 m. La Sierra es una de las fuentes de agua más importantes del país, pues alberga numerosos lagos, ríos y quebradas, sabemos muy poco sobre cómo este derretimiento afecta la biodiversidad de estos ecosistemas. Por ello, en 2012 y 2017 establecimos 24 parcelas permanentes en cuatro sitios del PNN Cocuy ubicados en el límite entre el páramo propiamente dicho y el superáramos. Esperamos observar 1) un desplazamiento direccional de las macollas, con lo cual el límite superior del páramo de gramíneas subiría y 2) una reducción en el superáramos bajo, que será colonizado por especies de zonas más bajas. (Olivares, 2017)

Según la revista topográfica se muestra el análisis del comportamiento temporal del glaciar volcán nevado del Ruíz. El trabajo tuvo como propósito realizar una estimación de la pérdida glaciar a partir de la información de las imágenes satelitales de los sensores TM, ETM y OLI, a bordo de los satélites Landsat 5, 7 y 8, de los años 1999, 2002, 2014 y 2016, lo cual permitió abordar el comportamiento de la regresión glaciar en un periodo de 17 años. Mediante el procesamiento digital de imágenes se categorizó las cubiertas de las imágenes satelitales usando el clasificador de mínima distancia y realizando una homogenización radiométrica se generaron imágenes comparables entre sí, la calidad de la clasificación fue validada con el coeficiente Kappa. A partir del área de los cuatro periodos se buscó ajustar la tendencia de deshielo a una regresión que nos permitiera conocer el año de pérdida total del área glaciar. (Salas, 2018).

Según la investigación de Ramos, Las problemáticas ambientales que hoy en día están tendientes a empeorar han tenido bastantes aristas, una de ella (que es el tema de discusión de este artículo) es la desaparición constante de los glaciares en el mundo. En este caso se toma como caso de estudio la Sierra Nevada de Santa Marta, que generalmente es medida a partir de imágenes satelitales provenientes de distintos satélites (Landsat TM/ETM, Spot, ALOS, RapidEye, QuickBird y Sentinel). La información nueva que se genera es el área glaciar medida con imágenes satelitales Spot 6 de los años 2014 y 2018; estas dos áreas complementarán la información de 1850, 1939, 1954, 1981, 1995, 2010, 2016 y 2017. Con este conjunto de datos se realizará un análisis de pérdida de glaciar con base en regresiones matemáticas, para que con ello se obtenga un modelo que se ajuste correctamente a estos datos. Este estudio concluirá con la comprobación del constante retroceso de área de este glaciar a través de los años; y además se presenta la tasa de pérdida medida en área y en metros lineales. (Ramos, 2019).

Otras investigaciones, Los glaciares andinos representan una de las fuentes principales del recurso hídrico en Suramérica y durante las últimas décadas se han reducido significativamente como producto del cambio climático y la variabilidad climática. A partir de imágenes satelitales de Landsat-4 (1987), Landsat-5 (1991, 1997, 2009), Landsat-7 (2000, 2003), Landsat-8 (2014, 2016, 2017), y Sentinel-2 (2019, 2021) se realizó una clasificación orientada a píxel usando el software PCI Geomatics, en la cual se definieron 4 tipos de cobertura: área glaciar, suelo-roca, vegetación y agua. Para la validación de exactitud (accuracy) fueron utilizadas como datos de referencia, imágenes satelitales de alta resolución espacial, presentando como resultado Este análisis reveló que el área glaciar disminuyó aproximadamente en un 37,92% con respecto a la primera escena (1987). Según dicha tendencia, el glaciar de la SRC se extinguiría para el año

2048. La tasa de retroceso glaciar está influenciada principalmente por factores relacionados con el calentamiento global como lo son el aumento de la temperatura media anual y la disminución en las tasas de precipitación, y factores de variabilidad climática como el fenómeno de El Niño. (Molano, 2022)

En estudios de Cabrera, en los glaciares de los Andes ecuatorianos han experimentado pérdidas de cobertura glaciar a causa de diversos factores antrópicos que propician el cambio climático. Este estudio tuvo como objetivo generar información cuantitativa, donde se detecta y localiza la pérdida de la cobertura glaciar del nevado Cayambe siendo el área de estudio de interés para las últimas tres décadas (1990, 2010 y 2020) mediante imágenes satelitales Landsat, como estos cambios se relacionan con las tendencias de variabilidad climática y como estas pueden continuar con el pasar de los años por medio de una proyección futura. El resultado del cambio en la cobertura glaciar se obtuvo mediante la digitalización en pantalla de imágenes satelitales y el cálculo de las áreas de los polígonos resultantes. Se realizó un análisis de las tendencias de variables climáticas (precipitación y temperatura) mediante la prueba de Mann Kendall y su relación con el retroceso glaciar. Con las áreas obtenidas se aplicó el modelo matemático de la proyección futura del retroceso glaciar y la tendencia de decrecimiento. La información obtenida con la proyección futura determinó que para el año 2050 el glaciar tendrá un área de 6.1 km² y para el año 2080 desaparecerá. En conclusión, el nevado Cayambe se encuentra en retroceso constante con la variación de los años y el cambio climático se hace cada vez más evidente, a pesar de que se presentó datos estadísticamente no significativos, si muestran relación entre el cambio climático y el retroceso glaciar. (Montenegro, 2022)

4. Referente normativo y legal.

Los derechos inician desde el reconocimiento y valorización de los seres humanos a partir de la prevención y protección que pretende la regulación y creación de reglas que se realizan para controlar la sociedad y así generar un bienestar en la cotidianidad. Diferentes Leyes, decretos, Pactos y convenciones promueven el mejoramiento de la calidad de vida de las personas.

Decreto ley 2811 de 1974 por el cual se dicta el código nacional de los recursos naturales renovables y de protección al medio ambiental esta normatividad que incluye el principio según el cual el que contamina paga. (Bermúdez, 2021). El derecho a un ambiente sano, el derecho al uso de los recursos naturales y y elementos de participación comunitaria en el cuidado del ambiente tiene los siguientes objetivos:

... lograr la preservación y restauración del ambiente y la conservación mejoramiento y utilización racional de los recursos naturales renovables según criterios de la equidad que aseguren el desarrollo armónico del hombre y de dichos recursos la disposición la disponibilidad permanente de estos y la máxima participación social para beneficio de la salud y el bienestar de los presentes y futuros habitantes del territorio nacional.

1. Prevenir y controlar los efectos nocivos de la explotación de los recursos naturales no renovables sobre los demás recursos.

2. Regular la conducta humana individual y colectiva y la actividad de la administración pública respecto al ambiente y de los recursos naturales renovables y de las relaciones que surgen del aprovechamiento y conservación de tales recursos del ambiente. Este decreto regula lo relacionado con:

a. El manejo de los recursos naturales renovables a saber

1.la atmósfera y el espacio aéreo nacional , 2. las aguas en cualquiera de sus estados 3.la tierra el suelo y el subsuelo, 4.la flora, 5.la fauna, 6.las fuentes primarias de energía no agotables, 7.las pendientes topográficas del potencial energético, 8.los recursos geotérmicos, 9.los recursos biológicos de las aguas del suelo y el subsuelo del mar territorial y la zona económica de dominio continental e insular de la República, 10.los recursos del paisaje.

b. La defensa del ambiente y de los recursos naturales renovables contra la acción nociva de los fenómenos naturales...(Funcion publica, 2021, p.1.)

En el artículos 74, “Se prohibirá, restringirá o condicionará la descarga, en la atmósfera de polvo, vapores, gases, humos, emanaciones y, en general, de sustancias de cualquier naturaleza que puedan causar enfermedad, daño o molestias a la comunidad o a sus integrantes, cuando sobrepasen los grados o niveles fijados” (Funcion publica, 2021, p.11.).

El articulo 83 señala, que:

... Salvo derechos adquiridos por particulares, son bienes inalienables e imprescriptibles del Estado:

1. El álveo o cauce natural de las corrientes; 2.El lecho de los depósitos naturales de agua; 3. La playas marítimas, fluviales y lacustres; 4. Una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho; 5. Las áreas ocupadas por los nevados y por los cauces de los glaciares; 6. Los estratos o depósitos de las aguas subterráneas. (Funcion pública, 2021, p.12.)

Otro de los decreto que se tienen en cuenta en general para la conservación y el cuidado de los nevados es el decreto 622 de 1977 por el cual se reglamenta parcialmente el capítulo V, título II, parte XIII del decreto ley número 2811 de 1974 dentro del item del Sistema Nacional de parques nacionales.(Funcion pública, 2021).

La ley 99 de 1993 por la cual se crea el Ministerio del medio ambiente se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables se organiza el Sistema Nacional ambiental SINA y se dictan otras disposicione, (Corpoboyaca, 2015) En esta ley se establecen como fundamentos de la política ambiental colombiana los siguientes principios generales:

... 1.El proceso de desarrollo económico y social del país se orientará según los principios universales y el desarrollo sostenible contenidos en la declaración de Río de Janeiro de junio de 1992 sobre el medio ambiente y desarrollo

2. La biodiversidad del país por ser Patrimonio Nacional y de interés de la humanidad deberá ser protegida prioritariamente y aprovechada en forma sostenible

3.Las zonas de páramos sus páramos los nacimientos de agua y las zonas de recarga acuíferos serán objeto de protección especial.

4.El estado fomentará la incorporación de los costos ambientales y el uso de instrumentos económicos para la prevención corrección y restauración del territorio ambiental y para la conservación de los recursos naturales renovables.

5.El paisaje por ser patrimonio común deberá ser protegido.

6.La preservación de desastres será materia de interés colectivo y las medidas tomadas para evitar o mitigar los efectos de su ocurrencia serán de obligatorio cumplimiento.

7. Los estudios de impacto ambiental serán instrumento básico para la toma de decisiones respecto a la construcción de obras y actividades que afecten significativa del medio significativamente el medio ambiente natural o artificial.

8. Las instituciones ambientales del Estado se estructurarán teniendo como base criterios de manejo integral del medio ambiente y su interrelación con los procesos de planificación económico social y física (Corpoboyaca, 2015)

Ley 629 del 27 de diciembre del 2000 por medio de la cual se aprueba el “Protocolo de Kyoto de la convención del marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático” hecho en Kyoto el 11 de diciembre de 1997, cuyo objeto es la reducción de emisiones y fomentar la eficiencia energética. (UPME, 2018)

Ley 164 del 27 de octubre de 1994 mediante la cual se ratifica el convenio marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático, el cual propende por lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera. A un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático. El protocolo contempla “Mecanismos de desarrollo limpio” para que los países en vías de desarrollo ayuden a los países desarrollados a reducir el inventario atmosférico de los gases de efecto invernadero GEI a los niveles establecidos por el protocolo.

La ley 812 del 2003 aprueba el Plan Nacional de Desarrollo 2003-2006, hacia un Estado comunitario":

...artículo 1°. Objetivos nacionales y sectoriales de la acción estatal:

- Construir equidad social, mejorando la distribución del ingreso y el crecimiento económico. Se buscará la consolidación de un país de propietarios, que al mismo tiempo vincule al Estado en el gasto social eficiente y en *la protección a los sectores más vulnerables de la sociedad*. (Minciencias, 2003)

5. Referente teórico (conceptual)

El desarrollo del marco conceptual se enfoca en los principales conceptos, métodos y procedimientos que enmarcan el procesamiento digital de imágenes y análisis multitemporal.

5.1 Glaciar

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático definió un glaciar de montaña como "una masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo, encerrado por elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes; la topografía del lecho de roca es el factor que ejerce mayor influencia en la dinámica de un glaciar y en la pendiente de su superficie, y es un elemento que subsiste gracias a la acumulación de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo a baja altura o a la descarga del mar" (IPCC. 2001. Climate Change 2001: The scientific basis. Cambridge University Press, USA). Por su parte el IDEAM define glaciar como una "masa de hielo en movimiento que incluye detritos rocosos y se caracteriza por el balance entre la alimentación (acumulación) y la fusión (ablación)" (IDEAM y Universidad Nacional de Colombia. 1997. Geosistemas de la alta montaña. Bogotá). En suma, como consecuencia de la dependencia directa de los glaciares a condiciones atmosféricas, dicha masa de hielo tiene un carácter dinámico, lo cual implica que sus componentes y su funcionamiento cambian permanentemente con el tiempo.

Un glaciar puede dividirse en dos zonas: la zona de acumulación superior, donde la masa de nieve se acumula, y la zona de ablación inferior, donde se pierde más masa glaciar que la que se capta gracias a las nevadas. La ablación puede ser el resultado del deshielo, la erosión por el

viento y los desprendimientos frontales “calving” (Centro Nacional de Datos sobre Nieve y Hielos, 2018).

El punto entre las dos zonas donde la acumulación es igual a la ablación se denomina línea de equilibrio. La línea de equilibrio es visible en los glaciares templados. Es la línea que marca el límite entre la nieve nueva y la nieve antigua (firm) y que queda expuesta tras el deshielo. Sin embargo, la línea tiende a ser difusa en los glaciares politérmicos, que presentan una estructura térmica complicada (Hambrey & Alean, 2016).

5.2 Metodologías de estudio de cobertura de Glaciar

Diversas metodologías se han presentado para el estudio de área cubierta de nieve a partir de imágenes satelitales. (Azzorin C, Baena R, 2012) realizaron la aplicación de algoritmos para detectar diferentes tipos de nubes, y discriminar entre nubes, superficie cubierta de nieve y el suelo a través de datos de imágenes satelitales, empleando técnicas multiespectrales usando la combinación de canales.

en una zona de los Andes centrales se utilizaron imágenes NOAA - AVHRR para delimitar las áreas cubiertas con nieve, mediante un análisis inicial visual de la combinación RGB 134 que les permitió separar las clases de cobertura: agua, suelo, nube, nieve. Posteriormente, seleccionaron los píxeles correspondientes a nieve mediante el análisis digital por bandas y por sus cocientes o diferencias obteniendo un mapa de cobertura de nieve que integraron con un mapa topográfico para evaluar cobertura de nieve por cuencas. (Lazcano y Velasco,2007)

5.3 Técnicas de procesamiento digital de imágenes

El procesamiento digital de imágenes, es la aplicación de técnicas matemáticas, estadísticas y computacionales, que permiten mejorar, corregir, analizar y extraer información de las imágenes captadas por los sensores a bordo de los satélites. El procesamiento digital permite realizar operaciones complejas, muy costosas o inaccesibles para el análisis visual. Tiene la ventaja de permitir una rápida comparación de fenómenos multitemporales por la accesibilidad a la información que posee.

Una imagen satelital, es una imagen digital, la cual, dada su condición, posee una diferente manera de adquisición de información que la fotografía común. Así como en la fotografía, la imagen se obtiene a través del registro de los objetos sobre una superficie sensible a la luz, en el caso de los sensores óptico- electrónicos, dicha superficie, no existe. Y lo que realiza el sensor es captar, a intervalos regulares, la radiación que proviene de la superficie. Ese intervalo regular, traducido a la superficie terrestre, es un área determinada, donde el sensor detecta un valor medio de la radiancia de todos los objetos que la conforman. Esa unidad mínima de captación de energía, es lo que se denomina "pixel" o picture element. El pixel es la mínima unidad visual que aparece en una imagen digital. El valor de la energía captada, se envía a una serie de mecanismos que lo transforman en un valor numérico. Este valor es denominado, Nivel de Gris, Valor de Gris, Nivel de Brillo, Nivel Digital (ND).

De ahí, surge la definición de una imagen digital: es una "colección de números organizados en forma matricial".

Una vez comprendido el carácter matricial de los datos de la imagen, es factible sobre la misma aplicar todas las operaciones matemáticas y estadísticas correspondientes. Se podrán calcular

valores medios, cambiar su orientación, realizar operaciones entre bandas, etc. Toda esta información numérica es almacenada en cintas compatibles con computadoras para un posterior grabado en formatos accesibles a los usuarios.

Se pueden considerar tres grupos de tratamiento de la información proveniente de los satélites:

- **Correcciones:** A los fines de la utilización de una imagen es necesario corregirlos los errores de los datos obtenidos por el sensor. Los defectos pueden provenir por la distorsión de la geometría particular que guarda la plataforma y el sensor con la escena y la fuente de iluminación, por condiciones atmosféricas, etc.
- **Mejoramiento:** Incluye tratamientos de realce de la imagen, mediante la transformación de los datos con el fin de poner en evidencia ciertos patrones en la imagen.
- **Extracción de información:** Incluye la clasificación de los datos relativos a la escena a efectos de obtener información.

Los anteriores procesos, se basan para su realización en la condición matricial de la imagen satelital. Es una matriz almacenada en archivo, conteniendo información y por lo tanto es factible aplicar sobre ella, los métodos de análisis estadísticos aplicables a cualquier matriz.

Es así, que para el tratamiento digital de las imágenes, se recurre a la estadística, que se convierte así, en una herramienta principal para el procesamiento de la información.

5.4 Índices espectrales

Son un conjunto de métodos que permiten generar imágenes que destacan coberturas específicas, las imágenes digitales al estar formadas por una matriz numérica que contiene información espectral de las coberturas de la tierra, pueden ser sometidas a diferentes algoritmos algebraicos que permiten generar imágenes derivadas, donde aparecen reflejados los distintos tipos de información, dependiendo del proceso realizado, además de poder destacar ciertas características. (Moreno & Alonso 1996) (Bon, 2001).

5.5 Índice de nieve

El índice NDSI es una medida de la magnitud relativa de la diferencia de reflectancia entre el rango visible del espectro (verde) y el infrarrojo de onda corta (SWIR). Controla la varianza de dos bandas (una en el infrarrojo cercano o en el infrarrojo de onda corta y otra en las partes visibles del espectro). Esto es útil para el mapeo de nieve. La nieve no sólo es muy reflectante en las partes visibles del espectro electromagnético sino también muy absorbente en el infrarrojo cercano (NIR) o en la parte infrarroja de onda corta del espectro mientras que la mayor parte de la reflectancia de las nubes sigue siendo alta en las mismas partes del espectro, lo que permite una buena separación de la mayoría de las nubes y la nieve. (Bluemarblegeo, 2019).

Para calcular la relación entre las dos bandas captadas que componen una imagen de satélite en un momento y lugar específicos, usamos para Sentinel-2 la siguiente fórmula:

$$\text{NDSI} = \frac{\text{Banda 3} - \text{Banda 11}}{\text{Banda 3} + \text{Banda 11}}$$

Donde:

Banda 3: Parte visible Verde del espectro (Green), 0.54 – 0.57 micrómetros, resolución de 10 m

Banda 11: Infrarrojo de Onda Corta, 1.56 – 1.65 micrómetros, resolución de 20 m

6. Metodología

El proceso de tratamiento de la información es un elemento fundamental en el presente trabajo de grado. Haciendo referencia a las tecnologías de la información y en especial a las tecnologías que se encargan de administrar la información espacial y geográfica, se hace necesario determinar los pasos precisos que permitan encontrar la información adecuada. En ese sentido, como bien es sabido, las fuentes de información serán primarias, ya que en efecto son las imágenes de satélite y cartografía resultante las que aportarán la mayor parte de la información a analizar.

En este trabajo de grado se utilizó información descargada en el Centro de acceso abierto de Copernicus el cual brinda acceso completo, gratuito y abierto a los productos de usuario Sentinel-1 , Sentinel-2 , Sentinel-3 y Sentinel-5P , para el proyecto se descargaron imágenes de entre los años 2015 -2022 del Sentinel-2 esta cobertura glaciar se analizó y se determinó el retroceso.

El software que se utilizó para el análisis y presentación de los resultados es ArcGis 10.8, Q-gis 3.14 y SNAP.

Una vez obtenido los resultados se realizó un análisis multitemporal de cobertura glaciar para determinar cuánto ha sido el retroceso de estas superficies. Toda esta información es de vital importancia para la actualización del inventario de los glaciares colombianos. A continuación, se explicará más detalladamente el proceso para llegar a los resultados obtenidos.

6.1 Enfoque metodológico

El desarrollo del trabajo de grado se enmarcó en un estudio mixto, como enfoque cuantitativo se muestra el cálculo del área glaciar que se ha perdido en el periodo de 2016 a 2022, y como enfoque cualitativo la descripción de las técnicas en el momento de procesar las imágenes Sentinel 2.

6.2 Tipo de estudio

Este proyecto se expone un estudio descriptivo, y en 3 fases:

Fase 1: Adquisición de información: Búsqueda y descarga de imágenes Sentinel de la zona de estudio a través de la página web corpernicus.

Fase 2: Procesamiento de las imágenes de satélites.

Fase 3: Uso de herramientas GIS y análisis de datos.

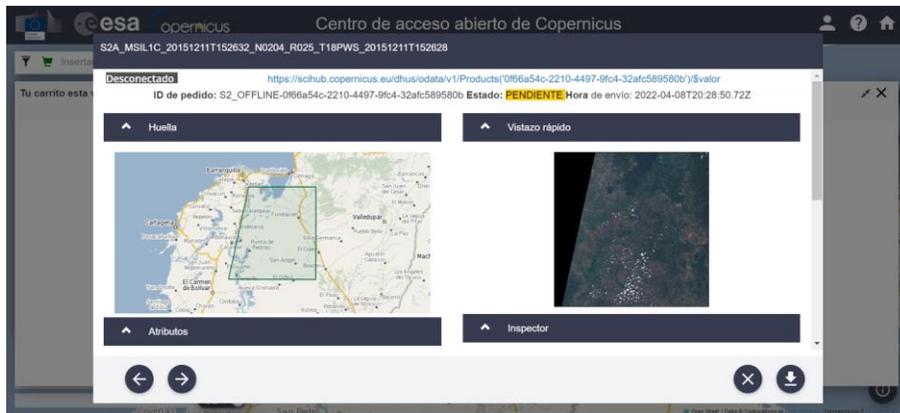
Fase 1

Adquisición de las imágenes Sentinel-2 entre los años 2015 y 2020 debido a que este satélite empezó su operación el 23 de junio del 2015, para el estudio se buscaron las correspondientes al mes de enero, ya que de acuerdo con la información manejada por el IDEAM este mes corresponde a la temporada de sequía y bajo porcentaje de nubosidad.

Una vez se identifico el periodo mensual a trabajar, se realizo la búsqueda de las imágenes en la zona de estudio por medio de la plataforma *Copernicus*, la cual pertenece a la Agencia Espacial Europea (ESA por sus siglas en Ingles). Para el proceso de búsqueda y descarga se genero un usuario indicando fines académicos, y se encontraron diferentes imágenes de los años mas recientes disponibles (año 2020, 2021 y 2022) sin embargo para los años anteriores relacionados al estudio (años 2015, 2016, 2017 y 2018), no se encontraban las imágenes disponibles, por tanto se realizo la solicitud y máximo 3 días, las imágenes estaban disponibles.

Figura 1

Plataforma Copernicus, Solicitud de imagen a descargar



Nota. Plataforma Copernicus- Europe's eyes on Earth, descarga de imágenes satelitales.

La búsqueda para las imágenes empleadas en el documento, se tuvo en cuenta su nomenclatura para identificar el tipo de producto, el satélite empleado o las fechas de barrido. Para esto se presentan fragmentos de codificación con algunos parámetros básicos de la imagen . En tus inicios, deberás prestar atención a ciertos fragmentos de codificación para asegurar los parámetros básicos de la imagen como se observa en la tabla 1. Las imágenes sentinel mostrarán un inicio descriptivo de imagen con la siguiente estructura: **MS2_MSILLL_YYYYMMDD**

Tabla 1

Paramentros en la Nomenclatura Imagenes sentinel 2

Nomenclatura
MS2: identifica la misión de Sentinel 2, pudiendo encontrar S2A (para Sentinel 2A) o S2B (para Sentinel 2B)
MSI: indica el instrumento de operación (MultiSpectral instrument)
LLL: indica el nivel de procesado del producto pudiendo encontrar los niveles L0, L1C, L1B o L2A
YYYY: designa el momento temporal UTC (año) en el que fue tomada la imagen
MM: designa el momento temporal UTC (mes) en el que fue tomada la imagen
DD: designa el momento temporal UTC (día) en el que fue tomada la imagen

Nota. Fuente: Mapping-gis

Para la ejecución del proyecto se descargaron, revisaron y usaron las imágenes relacionadas en la tabla 2, donde se observa la nomenclatura anteriormente mencionada.

Tabla 2

Imágenes seleccionadas para el Glaciar de la Sierra nevada de Santa marta, con fecha de adquisición

Imágenes sierra nevada de Santa Marta	Nomenclatura original
1 de enero de 2016	S2A_MSIL1C_20160110T152632_N0201_R025_T18PXT_20160110T152627
13 de febrero de 2017	S2A_MSIL1C_20170213T152631_N0204_R025_T18PXS_20170213T152633
3 de febrero de 2019	S2A_MSIL1C_20190203T152641_N0207_R025_T18PXT_20190203T170527
18 de febrero de 2020	S2A_MSIL1C_20200218T152631_N0209_R025_T18PXT_20200218T185233
28 de enero de 2022	S2A_MSIL1C_20220128T152641_N0400_R025_T18PXS_20220128T170548

Nota. Fuente: Copernicus, Europe's eye on Earth.

Fase 2

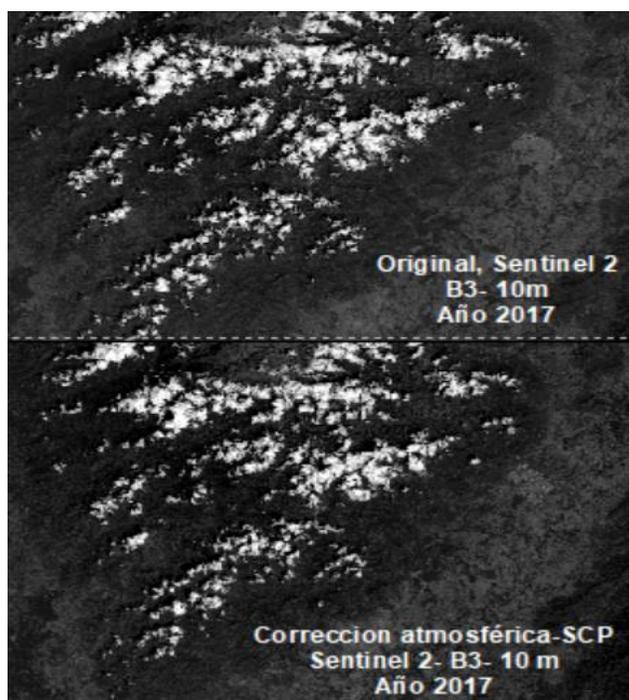
- **Pre procesamiento**

A partir de las imágenes adquiridas previamente Sentinel 2 cuyas imágenes son de nivel 1C las cuales se encuentran ortorectificadas y con niveles de reflectancia por encima de la atmósfera (TOA), corresponden a imágenes que aun no están corregidas atmosféricamente. Por tanto se realizó la corrección atmosférica con el complemento de clasificación semiautomática (SCP) el cual es gratuito de código abierto para QGIS que permite la clasificación supervisada de imágenes de detección remota, proporcionando herramientas para la descarga, el preprocesamiento y el posprocesamiento de imágenes.

El objetivo general de SCP es proporcionar un conjunto de herramientas entrelazadas para el procesamiento de ráster con el fin de realizar un flujo de trabajo automático y facilitar la clasificación de la cobertura terrestre, que también podría ser realizada por personas cuyo campo principal no sea la teledetección. (Luca,2021). Para las imágenes trabajadas se hizo la corrección atmosférica utilizando este método, sin embargo para el análisis no se tuvo en cuenta dicho procesamiento, debido a que la herramienta SNAP, aporta mas corrección en las imágenes.

Figura 2

Imagen original vs imagen con corrección atmosférica-scp, procesada en Q-gis

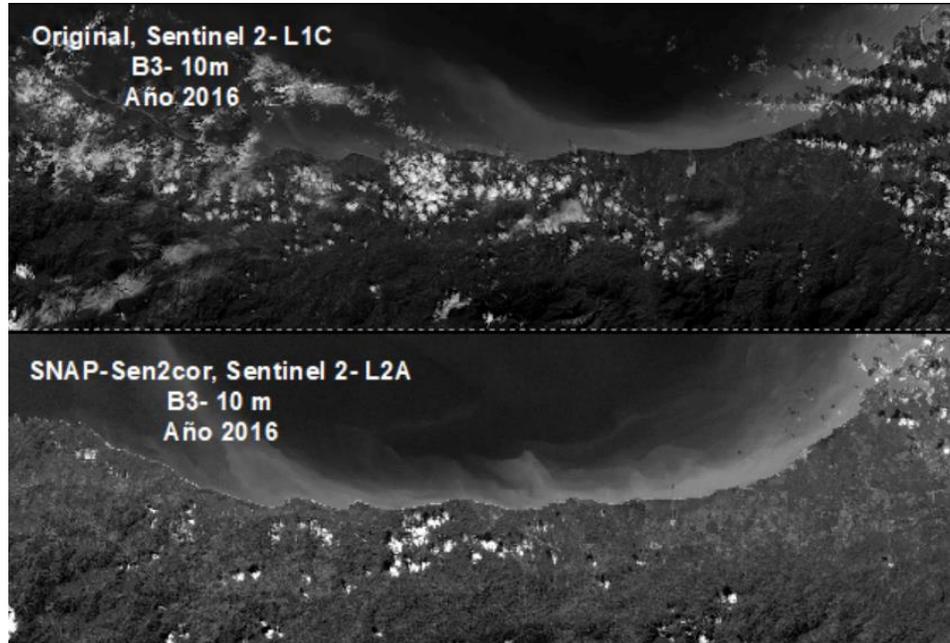


Nota. Uso de la herramienta de la herramienta de clasificación semiautomática en el software Q-gis, con imágenes sentinel del año 2017.

La corrección permite diferenciarlas visualmente ya que las imágenes de nivel 2A son más nítidas, con mayor brillo, contraste y no presentan la textura blanquecina producida por el efecto de la presencia de la atmósfera.

Figura 3

Procesamiento de imágenes, original a SNAP.



Nota. Procesamiento de imágenes en el software SNAP, uso de herramienta SEN2COR. Imagen original L1C vs Imagen procesada L2A.

- **Procesamiento**

Una vez hecho el pre-procesamiento se realizó el recorte de la imagen cuya área de estudio es de aproximadamente de unas 4.013,65 km² de acuerdo a la capa obtenida por El Registro Único Nacional de Áreas Protegidas, donde se evidencia el área total del parque nacional Natural Sierra nevada de Santa Marta.

Las clasificaciones espectrales de la zona de estudio se realizaron mediante la clasificación no supervisada, las cuales se convirtieron en datos vectoriales con los que se calculó el área del glaciar y por consiguiente su porcentaje de pérdida.

Fase 3

Al obtener el índice normalizado de nieve se utilizaron las bandas 3 (verde) y 11 (infrarojo de onda corta), componente importante para el proceso hidrológico, y se considera una de los ecosistemas más amenazados por el calentamiento global.

Por tanto se identifica el área de los años 2016, 2017, 2019, 2020 y 2022.

❖ Clasificación no Supervisada

La clasificación no supervisada es una forma de clasificación basada en píxeles y es esencialmente una clasificación automatizada con el uso de software's, donde se especifican el número de clases y las clases espectrales y se crean únicamente en función de la información numérica de los datos. (Toribio, 2020)

Las ventajas de usar este método es que es bastante rápida y fácil de ejecutar. Las clases se crean basándose en información espectral, por lo que no son tan subjetivas como la interpretación visual manual. (Toribio, 2020)

● Análisis de Área del glaciar

Para determinar el área del glaciar se realizó la delimitación de las masas glaciales para los periodos entre 2015 y 2022, posteriormente se generó la vectorización de las imágenes correspondientes. Una vez hecho esto a partir de la imagen vectorizada se generó una tabla representando el área ocupada del glaciar en km² y su equivalencia en porcentaje en función del tiempo.

Finalmente se calculó la tasa de pérdida del glaciar tomando como referencia que el 100% del área del glaciar corresponde a la imagen vectorial con el periodo de tiempo más antiguo que para el proyecto corresponde al año 2016.

6.3 Procedimiento

- **Análisis de resultados**

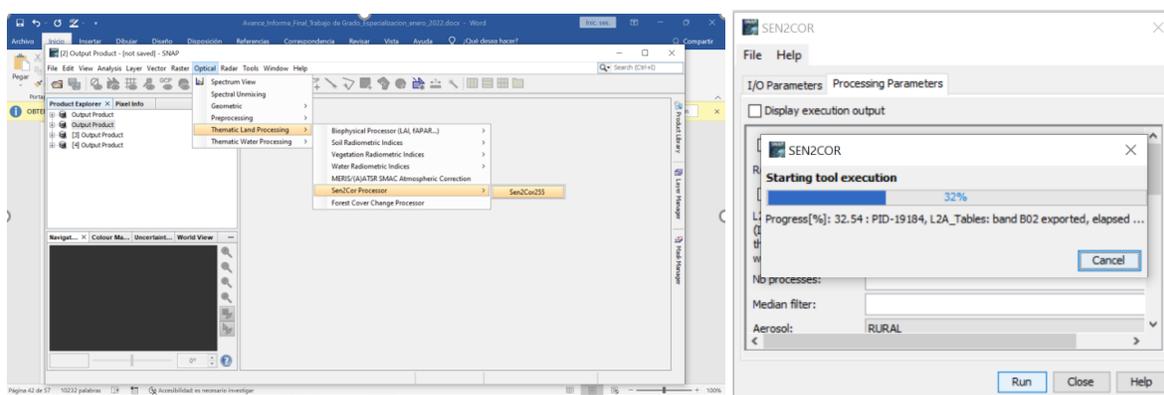
Se realizó un conjunto de consideraciones finales a la realización de este proyecto, evidenciado el área que ha perdido el nevado de la Sierra nevada de Santa Marta y los diversos geoprocesos para obtener dichas áreas, desde las imágenes satelitales Sentinel-2.

7. Resultados

Como uno de los resultados del proyecto, se logró identificar y utilizar una metodología viable con la rápida respuesta de las peticiones hacia la plataforma de Copernicus, el filtrado de imágenes y la gratuidad de la transferencia de datos, hacen que sea la opción mas certera al momento de elaborar análisis y proyectos con imágenes satelitales. Se decide realizar las correcciones con la opción es SEN2COR ya que permite correcciones atmosféricas para una mejor visualización de las imágenes.

Figura 4

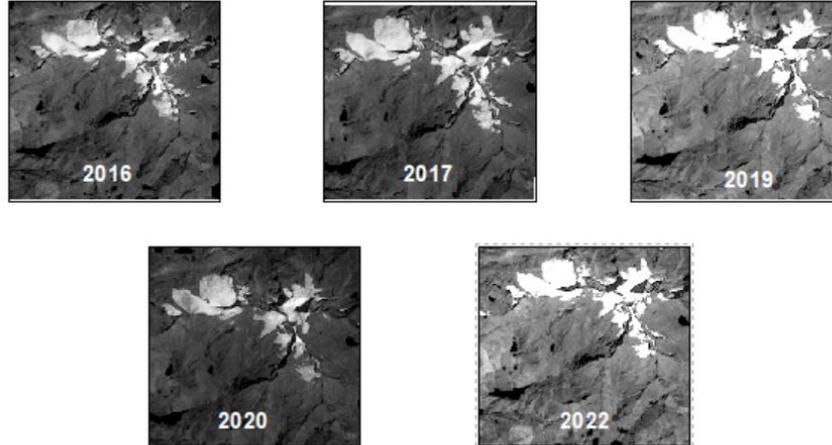
Uso de herramienta SEN2COR



Nota. Proceso para la corrección de la imagen satelital por medio de la herramienta de SEN2COR en el software SNAP.

Figura 5

Imágenes sentinel 2, Correccion SEN2COR

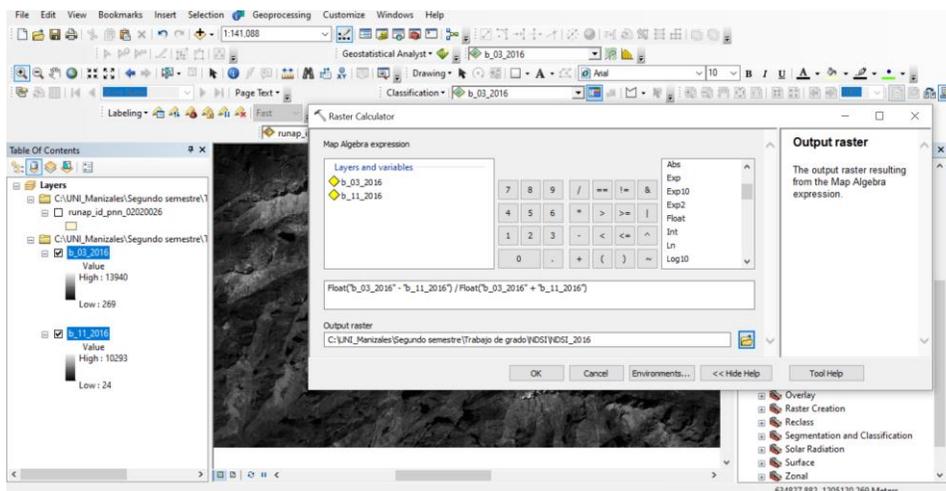


Nota. Glaciar Sierra nevada de Santa Marta, imagenes sentinel 2 con la Correccion SEN2COR, en los diferenes años de estudio del proyecto.

Al corregir las imágenes se procede a calcular el NDSI, con el software de Arcgis 10.8 como se observa en la tabla 3 y se realiza la comparación de cada uno de los años para determinar el retroceso del glaciar.

Figura 6

Cálculo de índice diferencial normalizado de nieve- NDSI

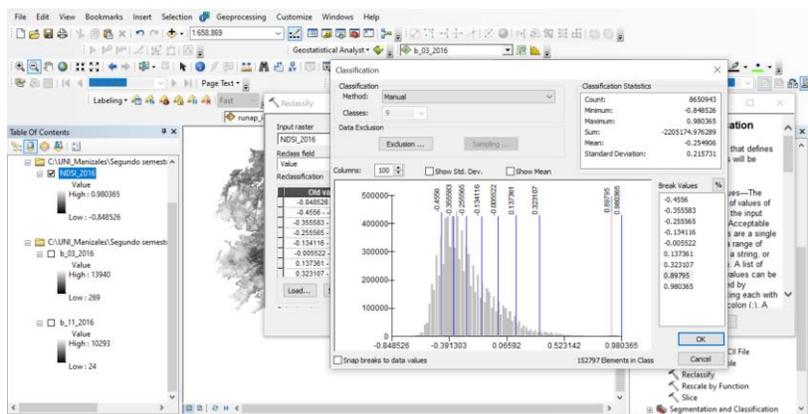


Nota. Cálculo de NDSI, en el software Arc gis 10.8

Al generar NDSI se reclasificó el resultado y posteriormente se convierte la el raster en un vector, para obtener el área en cada año.

Figura 7

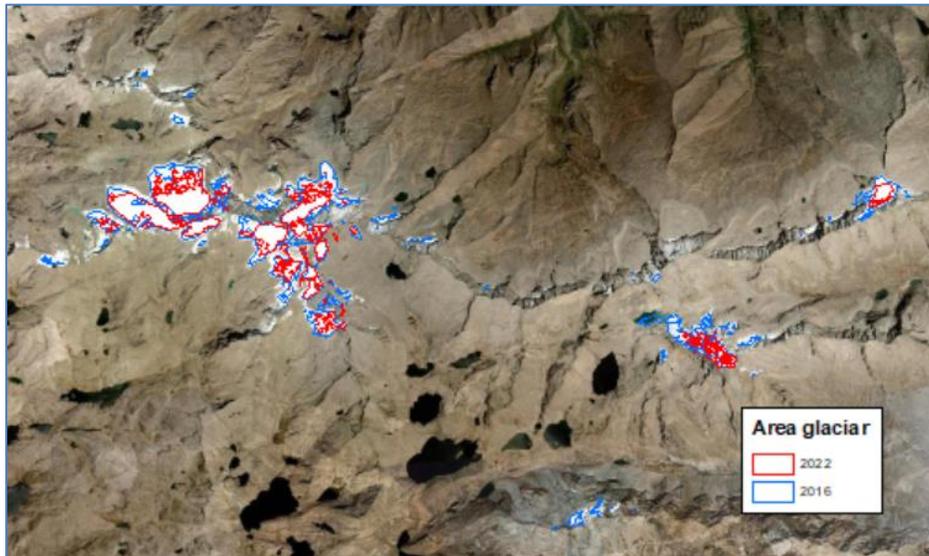
Clasificación NO supervisada



Nota. Proceso de clasificación NO supervisada para identificar la nieve del glaciar de la sierra nevada de Santa Marta

Tabla 3*Área del glaciar en km² y en porcentaje.*

Glaciar Sierra nevada de Santa Marta - Sentinel 2			
Fecha de adquisición	Pixeles	Área de nieve en Km²	% de pérdida de área.
1 de enero de 2016	388068	4.839216	
13 de febrero de 2017	358005	4.823236	0,3%
3 de febrero de 2019	287469	4.356553	1.0%
18 de febrero de 2020	328176	3.72215	1.40%
28 de enero de 2022	147456	2.391567	3,5%

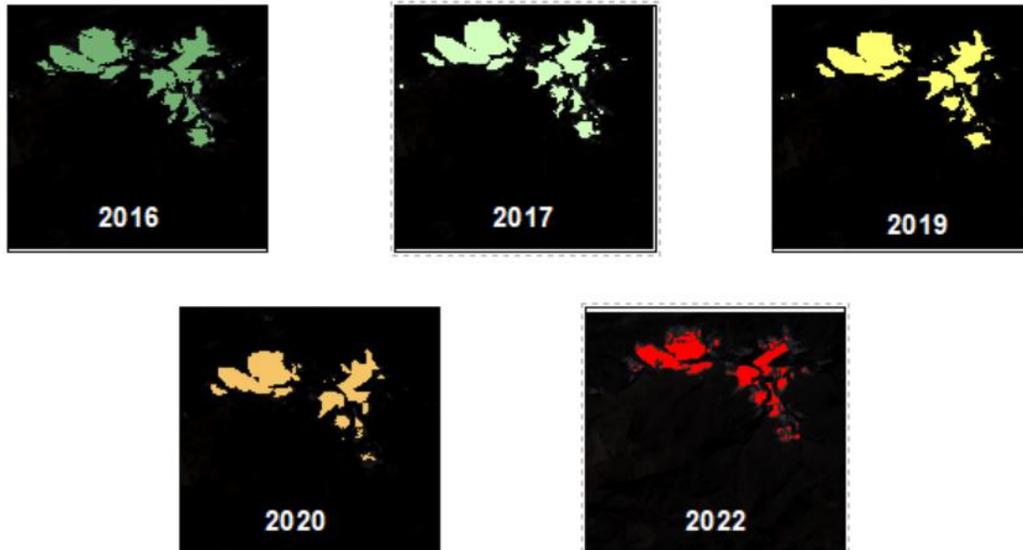
*Nota. Fuente: Elaboración propia***Figura 8***Visualización de la capa vectorial del área glaciar**Nota. Área de glaciar, 2016 y 2022*

La pérdida anual para los glaciares colombianos en promedio durante las últimas cinco décadas es aproximadamente entre 3% y 5%, este retroceso se relaciona a los fenómenos de variabilidad climática como el fenómeno del Niño el cual incide en el clima del país de forma que disminuyen las lluvias y aumentan las temperaturas (IDEAM, 2012).

Como se evidencia desde el año 2016 hasta el año 2022, el área del glaciar ha disminuido, y se observa un cambio significativo entre los años 2020 a 2022, cabe mencionar que para el presente análisis del deshielo no se tienen en cuenta los años 2018 y 2021, debido a que no se encontraron imágenes con calidad en los meses de sequía (enero-marzo), presentando una diferencia de dos años, sin embargo como se observa en el periodo de 2017 a 2019 la pérdida fue de 1% y para el periodo de 2020 a 2022 la pérdida de glaciar fue de 3.5%, lo cual indica el rápido aumento de pérdida en los últimos años.

Figura 9

Capa vectorial, Glaciar Sierra Nevada de Santa Marta



Nota. Capa vectorial generada para identificar el área del Glaciar Sierra Nevada de Santa Marta,

Escala: 1:142000

Con lo anterior se realizó la tasa de cambio anual teniendo en cuenta la diferencia en tiempo de acuerdo al ultimo periodo trabajado (2022) como lo indica la ecuación:

$$\text{Tasa de cambio anual} = (\text{Superficie 1} / \text{Superficie 2})^{1/T} - 1$$

Superficie 1 = Área acumulada de la imagen sentinel (1)

Superficie 2 = Área acumulada de la imagen sentinel (2)

T = Intervalo de tiempo

Tabla 4*Tasa de cambio anual*

Sentinel 2022	Sentinel 2020	Tasa de cambio anual
2.391567	3.72215	-0.198424673
Sentinel 2022	Sentinel 2019	Tasa de cambio anual
2.391567	4.356553	-0.181196199
Sentinel 2022	Sentinel 2017	Tasa de cambio anual
2.391567	4.823236	-0.130901885
Sentinel 2022	Sentinel 2016	Tasa de cambio anual
2.391567	4.839216	-0.110830431

Nota. Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la formula aplicada la cual nos indica la relación entre la cantidad y la frecuencia del deshielo, para las imágenes 2016 a 2022 la tasa de cambio es de -0.110830431 por año, lo que representa menos área glaciar.

Para el presente año con las áreas calculadas en la tabla de atributos de la capa vectorial se identificó una disminución total de 5,5 % de acuerdo al área inicial es decir año 2016, una de las causas principales que pueden incidir a esta perdida del glaciar son los factores climáticos lo cual podría afectar el ecosistema generando efectos secundarios en su equilibrio ecológico, y efectos a la población ya que representa área glaciar para las cuencas Alto Cesar, Ciénaga Grande de Santa Marta, Río Ancho, otros directos al Caribe y Río Don Diego, para lo cual esta superficie glaciar es una de las principales fuentes de abastecimiento para todos los tributarios de estas cuencas hidrográficas. (Quintero, 2018)

8. Conclusiones

- ✓ Los resultados muestran el potencial de herramientas gratuitas tanto para la obtención de las imágenes como el uso de software libre, como es el caso de SNAP, su fácil instalación y el acceso a plugins (SEN2COR) para la corrección de las mismas, logrando obtener imágenes de alta calidad para el desarrollo de proyectos y análisis de fenómenos a un bajo costo.
- ✓ El satélite Sentinel 2 permite un mayor nivel de detalle con su resolución espacial, por tanto al aplicar la clasificación No supervisada las clases se crean basándose en información espectral, permitiendo que la información al identificar el área del glaciar sea más acertada.
- ✓ Cada una de las metodologías descritas y empleadas en el presente estudio (SCP y SEN2COR) permitió observar el retroceso glaciar en la sierra nevada de Santa Marta.
- ✓ A partir de las imágenes satelitales es posible obtener un cálculo de áreas, permitiendo para el caso de estudios multitemporales identificar los cambios en proporción de superficie que se presentan en una zona de interés; siendo para este caso la cobertura glaciar de la Sierra Nevada de Santa Marta con un área final de 2.391567 km² a partir de los insumos y técnicas utilizadas en este cálculo.

- ✓ Visualmente es posible apreciar la diferencia de cobertura glaciar desde el año 2016 al año 2022, lo que nos muestra la realidad de la reducción del glaciar, por tal motivo se ve necesario la búsqueda de estrategias que permitan preservar el recurso actual y recuperar si es posible este ecosistema.

- ✓ Al observar el retroceso glaciar se hace evidente los efectos del calentamiento global, lo cual ha provocado aumentos en la temperatura del ambiente.

9. Recomendaciones

- ✓ Si bien las imágenes Sentinel 2 dan buenos resultados aplicando este tipo de metodologías, para análisis de periodos de tiempo tan cortos (año a año) y el tamaño del glaciar es pequeño, se hace un poco compleja la delimitación de estos cuerpos por la resolución espacial de estas imágenes (10 mt), para lo cual se requieren de insumos de mejor resolución (menor a 1 mt) para una óptima interpretación del límite glaciar, sin embargo los resultados que se obtienen con las imágenes Sentinel 2 son muy acertados.

- ✓ Se podrían usar las mascarar producidas por la herramienta SEN2COR para potenciar validar desarrollos de clasificación con imágenes satelitales y realizar análisis mas profundos para obtener provecho de los software libres y de su fácil instalación.

10. Referencias

1. Andrés de Pablo, N., Tanarro García, L. M., & Palacios Estremera, D. (2010). Aplicaciones de los SIG al estudio de amenazas naturales asociadas al retroceso de glaciares y desprendimientos. *Ciudad Y Territorio Estudios Territoriales (CyTET)*, 42(165-6), 529-550. Recuperado a partir de <https://recyt.fecyt.es/index.php/CyTET/article/view/76015>.
2. Zeballos, Gabriel, Soruco, Álvaro, Cusicanqui, Diego, Joffré, Rafael, & Rabatel, Antoine. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 49(3), 14-26. Recuperado en 18 de abril de 2021, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282014000300003&lng=es&tlng=es
3. Leiva, J. L. (2017). Análisis multitemporal del retroceso glaciar de los nevados de Colombia a través de la utilización de herramientas SIG. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/17348>.
4. Iza, Alejandro y Brunilda Rovere, M. (2006). Aspectos jurídicos de la conservación de los glaciares. UICN, Gland, Suiza. Recuperado de: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/EPLP-061.pdf>
5. IDEAM (2014). Ecosistemas. Recuperado de:

<http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/glaciares>

6. Marcelo E. Lascano, Ines Velasco, Estimación de Cobertura de Nieve en los Andes centrales con datos NOAA-AVHRR. Cuencas de los ríos Colorado y Neuquen (2007). Recuperado de:
<http://www.geocities.ws/infraestructurateritorial/Nieveenlosandes.pdf>

7. Paéz González, Blanca Lucila, García, Carlos Andrés (2016). Análisis multitemporal del retroceso glaciar en la sierra nevada de Santa Marta – Colombia- para los períodos 1986, 1996, 2007 y 2014. Recuperado de:
<https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/3508>

8. Cornelius Raasveldt, H. (2017). Las glaciaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat.*, 41(Suplemento), 450-466.
<https://doi.org/10.18257/raccefyn.582>

9. Herrera, G., & Ruiz, J. (2009). Retroceso glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá - Colombia, 1986-2007. *Perspectiva Geográfica*, 1(13), 27-36. <https://doi.org/10.19053/01233769.1710>

10. Quevedo, D. (2020). ¿Cuál es el régimen de protección de los glaciares y los humedales en Colombia?. Universidad externado de Colombia. Recuperado de:

<https://medioambiente.uexternado.edu.co/cual-es-el-regimen-de-proteccion-de-los-glaciares-y-los-humedales-en-colombia/>

- 11.** Axorin.C, Baerna. R, Echave. I, Connell. B, Algoritmo de detección de nubes en imágenes NOAA-AVHRR para el análisis de la variabilidad espacio-temporal de tormentas. Asociación Española de Climatología. Recuperado de:
<http://hdl.handle.net/10261/65793>

- 12.** Rodríguez Eduardo. M., & Leonardo, R. N. (2000). Los Glaciares Colombianos Expresión del Cambio Climático Global. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Medioambientales.

- 13.** Suarez, J. C. (2015). Análisis Multitemporal del Retroceso Glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy Ubicada en los Departamentos de Boyacá y Arauca entre los años 1992, 2003 y 2014. Bogotá.

- 14.** Adolfo, E., & Domínguez, M. C. (2007). Deshielo en el ártico y la Antártida. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino a través de la agencia estatal de meteorología con el proyecto GLACKMA.

- 15.** Alva, E., & Meléndez, F. (2009). Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca. Investigaciones sociales, Lima Perú.

-
- 16.** Field, C.B. (2014). CAMBIO CLIMÁTICO 2014, Impactos, Adaptación, Vulnerabilidad. Quinto Informe de Evaluación (GTII IE5) del IPCC.
- 17.** Hoyos, F., Glaciers of Colombia, Satellite Images Atlas of Glaciers of the World, U. S. Geological Survey Professional Paper 1386-Y, Chapter 11, Reston, VA., 1996.
- 18.** Ceballos, J. L., C. Euscátegui, J. Ramírez, M. Cañón, C. Huggel, W. Haeberli, and H. Machguth, Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia, *Annals of Glaciology* 43, 194-201, 2006.
- 19.** Herrera G. & Ruiz, J. (2009). Retroceso Glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá - Colombia 1986-2007. *Perspectiva Geográfica*, 27-36.
- 20.** Ceballos, J. L. (2009). Manifestación de cambio climático - Los glaciares de Colombia. *Revista La Tadeo (Cesada a Partir De 2012)*, (74). Recuperado a partir de <https://revistas.utadeo.edu.co/index.php/RLT/article/view/516>
- 21.** Díaz, F (2021). Estimación del retroceso glaciar en la sierra nevada de santa marta para el periodo 2000-2020 a partir de imágenes landsat
- 22.** ESA, (2022). <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>
- 23.** Chuvieco, E., & Hantson, S. (2010). Procesamiento estándar de imágenes Landsat, 1-21.

24. Velilla, M. (2014). La construcción colectiva del medio ambiente, consejo de estado de Colombia. 266-297.
25. Funcion publica. (2022).
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=8795>
26. Congedo, Luca, (2021). Complemento de clasificación semiautomática: una herramienta de Python para la descarga y el procesamiento de imágenes de detección remota en QGIS. Revista de software de código abierto, (64),3172, <https://doi.org/10.21105/joss.03172>
27. Bermúdez,C y Obando, J (2021), “Quien contamina paga” en la jurisprudencia de la corte constitucional, Universidad Externado, Departamento de derecho del medio ambiente. Recuperado de: <https://medioambiente.uexternado.edu.co/quien-contamina-paga-en-la-jurisprudencia-de-la-corte-constitucional/>
28. Toribio,G. (2020), Clasificación no supervisada en qgis 3, Cursos Teledeteccion, Recuperado de: <https://www.cursosteledeteccion.com/clasificacion-no-supervisada-en-qgis-3/#:~:text=La%20clasificaci%C3%B3n%20no%20supervisada%20es,informaci%C3%B3n%20num%C3%A9rica%20de%20los%20datos.>

-
- 29.** JOMELLI, V., MARTIN, L., BLARD, P. H., FAVIER, V., VUILLÉ, M., & CEBALLOS, J. L. (2017). Revisiting the Andean Tropical Glacier Behavior during the Antarctic Cold Reversal. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 43(2), 629–648.
- 30.** Cleef, A., Van Reenen, G., Cámara-Leret, R., Hoeck, H., Ariano, R., & Olivares, I. (2017). Monitoreo De Los Efectos Del Calentamiento Global en La Sierra Nevada Del Cocuy. *Ciencia En Desarrollo*, 8, 78–79.
- 31.** Salas Pérez, C., & Duarte Gómez, K. D. (2018). Análisis del retroceso glaciar del volcán nevado del Ruíz, mediante un estudio multitemporal de imágenes satelitales del periodo 1999-2016. *Revista de Topografía AZIMUT*, 9(1), 9–16.
- 32.** Ramos, AF (2019). Análisis multitemporal del cambio del área de cobertura glaciar sobre la Sierra Nevada de Santa Marta en los años 2014 y 2018.
- 33.** Cabrera Montenegro, E. B., & Vega Tamba, J. C. (2022). Análisis del retroceso glaciar en los Andes del Norte del Ecuador durante un período de 30 años empleando teledetección [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]
- 34.** Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá - Colombia. Semillero de investigación GRSS. Grupo GEFEM <file:///C:/Users/ASUS/Downloads/15660-Texto%20del%20art%C3%ADculo-79968-5-10-20200726.pdf>

35. Molano, S. M. ., Cardenas, D. P., Gómez, H. S., Alvarado, D. M., Galindo, A. F., Sanabria, J. F., & Gómez-Neita, J. S. (2022). Evaluación del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy, Colombia a partir de la clasificación de imágenes multisensor. *Boletín De Geología*, 44(1), 49–73
36. Corpoboyaca. Ley 99- 1993. Recuperado en:<https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2015/11/Ley-99-1993.pdf>
37. Salazar, I. C. (2018). *Análisis comparativo de imágenes satelitales sentinel 1, para la detección de cambios del embalse de Neusa en el departamento de Cundinamarca*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/20413>.
38. Ministerio de ciencia, tecnología e innovación. Ley 812 de 2003. Recuperado en: <https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/reglamentacion/ley-812-2003.pdf>
39. Niño, D. (2020). Integración de imágenes satelitales sentinel-2 en cdcol. Universidad de los Andes, facultad de ingeniería. Recuperado en: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/51466/22742.pdf?sequence=1>

- 40.** Casella, A ; Barrionuevo, N ; Pezzola, A y Winschel, C. (2018). Pre-procesamiento de imágenes satelitales del sensor Sentinel 2a y 2b con el software SNAP 6.0. Instituto de Clima y Agua. C.I.R.N. INTA Castelar y EEA Hilario Ascasubi. CERBAS. Buenos Aires. Recuperado en:
https://inta.gob.ar/sites/default/files/tutorial_snap_preproc_acasella_et_al_2018_inta.pdf