

Evolución de los glaciares tropicales de Colombia (2010-2023) utilizando herramientas geoespaciales

Evolution of tropical glaciers in Colombia (2010-2023) using geospatial tools

José Eduardo Fuentes Delgado¹  & Luis Marino Santana Rodríguez² 

RESUMEN

Los glaciares tropicales de Colombia, ubicados cerca del Ecuador, son extremadamente vulnerables al cambio climático debido a las altas temperaturas y variables precipitaciones. En las últimas cinco décadas, los glaciares han retrocedido alarmantemente a nivel mundial, y Colombia no es una excepción. Para monitorear estos cambios, se utilizaron datos multiespectrales de alta resolución de las constelaciones Rapid Eye (2010-2016) y PlanetScope (2017-2023), junto con la herramienta de Deep Learning Segment Anything Model. También se analizaron datos de precipitación y temperatura de 1991 a 2023 mediante Google Earth Engine para calcular las anomalías climáticas. Entre 2010 y 2023, los glaciares colombianos han mostrado una disminución constante en su área total debido al cambio climático, con picos temporales de aumento en 2011 y 2021. Las altitudes promedio, máximas y mínimas de los glaciares se calcularon usando el modelo de elevación SRTM, variando entre 4804 y 5067 msnm, con un promedio de 4952 msnm. Los fenómenos El Niño y La Niña influyen en la superficie glaciar, aumentando durante La Niña y disminuyendo durante El Niño. A pesar de estas fluctuaciones, la masa glaciar se ha reducido significativamente entre 2010 y 2023, más de lo registrado en estudios previos.

Palabras clave: Google Earth Engine, PlanetScope, Segment Anything Model, SIG, Glaciares.

ABSTRACT

Tropical glaciers in Colombia, located near the equator, are extremely vulnerable to climate change due to high temperatures and variable precipitation. Over the past five decades, glaciers have been retreating alarmingly worldwide, and Colombia is no exception. High-resolution multispectral data from the RapidEye (2010-2016) and PlanetScope (2017-2023) constellations were used to monitor these changes, along with the Deep Learning Segment Anything Model tool. Additionally, precipitation and temperature data from 1991 to 2023 were analyzed using Google Earth Engine to calculate climate anomalies. Between 2010 and 2023, Colombian glaciers have shown a consistent decrease in their total area due to climate change, with temporary peaks of increase in 2011 and 2021. The average, maximum, and minimum altitudes of the glaciers were calculated using the SRTM elevation model, ranging between 4804 and 5067 meters above sea level (m asl), with an average of 4952 m asl. The El Niño and La Niña phenomena influence glacier surfaces, increasing during La Niña and decreasing during El Niño. Despite these fluctuations, the glacier mass has been significantly reduced between 2010 and 2023, more than what was recorded in previous studies.

¹ Universidad del Valle; Correo electrónico: jose.fuentes@correounivalle.edu.co

² Universidad del Valle; Correo electrónico: luis.santana@correounivalle.edu.co

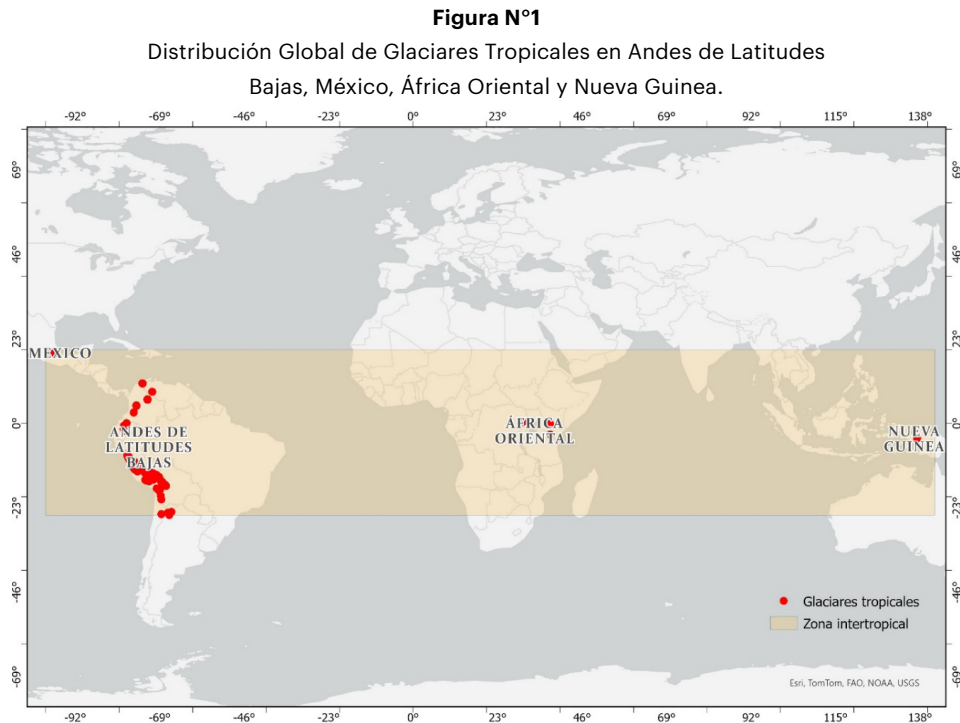
tuations, glacier mass has significantly reduced between 2010 and 2023, more so than recorded in previous studies.

Keywords:

Los glaciares tropicales son especialmente vulnerables al cambio climático debido a su ubicación cercana al ecuador, donde se enfrentan a una alta radiación solar durante todo el año y precipitaciones escasas, lo que los hace particularmente susceptibles al deshielo (Rabatel *et al.*, 2018). Con el aumento continuo de la temperatura global, es probable que estos glaciares experimenten un deshielo y retroceso acelerado, provocando una reducción significativa en su tamaño y volumen. Este deshielo puede tener importantes repercusiones en la disponibilidad de agua en estas regiones (Malone *et al.*, 2022; Vuille *et al.*, 2018).

El cambio climático también está alterando el calendario del deshielo y la escorrentía, lo que puede ocasionar inundaciones y sequías (Yucel *et al.*, 2015). Además, el retroceso glaciar puede aumentar la sedimentación en los ríos, afectando negativamente a los ecosistemas acuáticos (Zemp *et al.*, 2019) y a infraestructuras como represas y sistemas de riego y acueductos. Esta situación puede reducir los caudales de los ríos, ya que la nieve y el hielo que se habrían derretido ya no estarían disponibles. La disminución de la masa glaciar también puede resultar en temperaturas más cálidas, ya que la falta de hielo y nieve disminuye el albedo y la reflexión de los rayos solares hacia el espacio (Ceballos *et al.*, 2012). La disminución de las precipitaciones puede reducir el deshielo y, en algunos casos, incluso aumentar la masa glaciar (Ceballos *et al.*, 2012). Así, la relación entre temperatura y precipitaciones es compleja y puede tener distintos efectos sobre los glaciares según las circunstancias ambientales específicas de cada ubicación (Zemp *et al.*, 2019). Estas observaciones indican que una de las características más importantes de los glaciares es su dinamismo y su capacidad de cambiar a lo largo del tiempo.

En los últimos 50 años, los glaciares mundiales han retrocedido a un ritmo alarmante. En el estudio, Zemp *et al.*, 2019 combinaron un conjunto de datos glaciológicos y geodésicos para una evaluación global y muestran que los glaciares por sí solos perdieron 9625 mil millones de toneladas de hielo entre 1961 y 2016, lo que equivaldría a una altura de 27 milímetros en el nivel del mar. Zemp *et al.*, (2019, 2021) establecieron también que la pérdida global de masa de hielo glaciar ha aumentado significativamente en los últimos 30 años, alcanzando una tasa de pérdida de 335 mil millones de toneladas de hielo cada año (Zemp *et al.*, 2019; Zemp *et al.*, 2021). Esto último corresponde a un aumento del nivel del mar de casi 1 milímetro al año (Zemp *et al.*, 2019; Zemp *et al.*, 2021). Los glaciares tropicales se localizan en los Andes sudamericanos, América Central, África Oriental y Australia, distribuidos entre el Trópico de Cáncer y el Trópico de Capricornio (23°26'13.3" N; 23°26'13.3" S) dentro de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Figura N°1). En América Central, se han identificado glaciares en México, mientras que en Guatemala y Costa Rica se han localizado algunos sitios que conservan evidencia de glaciaciones ocurridas en tiempos pasados (Li *et al.*, 2019; Veettil & Wang 2018b; Quesada-Román *et al.*, 2020; Roy & Lachniet 2010). Más del 99% de los glaciares tropicales se encuentran en los Andes, abarcando países como Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina (Veettil & Kamp 2019). En África, los glaciares están limitados a dos volcanes, el Monte Kenia y el Monte Kilimanjaro, así como al macizo montañoso Ruwenzori, situado entre Uganda y la República Democrática del Congo. En Australia, los glaciares se encuentran en las cumbres más altas de Puncak Jaya, en Papúa, Indonesia (Veettil & Kamp 2019).



Fuente: Elaboración propia basada en datos del Randolph Glacier Inventory (RGI).

Los glaciares tropicales de Colombia se ubican en la zona de las cordilleras de los Andes y la Sierra Nevada de Santa Marta. Debido a su gran altitud (por encima de los 4800 msnm), estos glaciares están fuertemente influenciados por las variaciones en el régimen anual de precipitaciones (Poveda & Rueda, 2011). Así mismo, se debe considerar los efectos y fenómenos regionales que se presentan a nivel climático como El Niño y La Niña. En los últimos 30 años (1990 - 2020) el área glaciar colombiana se redujo en un 49% de su superficie total (IDEAM, 2021), lo que ha conllevado a un prominente retroceso. Dicho retroceso ha tenido un impacto significativo en las comunidades locales, ya que los glaciares son una fuente importante de agua para la región (Malone *et al.*, 2022; Rabatel *et al.*, 2018). A medida que los glaciares retroceden, disminuye la disponibilidad de agua para consumo, generación de energía hidroeléctrica, regadío y otros usos, lo que provoca escasez de agua y otros problemas.

Los seis nevados que actualmente existen en Colombia son masas de hielo de pequeña extensión, distribuidas geográficamente en cuatro zonas: en la Sierra Nevada de Santa Marta, sistema litoral montañoso del norte del país; en el sector norte de la cordillera Oriental; y dos en el sector medio de la cordillera Central de los andes. Los glaciares retroceden a un ritmo de área anual promedio de -3% año (Rabatel *et al.*, 2018). La pérdida de hielo en los seis glaciares colombianos comenzó a finales de la década de 1970, (Poveda & Pineda, 2009) pero para ese entonces al menos ocho glaciares ya habían desaparecido (Cisne, Quindío, Puracé, Pan de azúcar, Sotará, Galeras, Cumbal y Chiles); los que existieron hasta principios de los años 60. Es probable que la mayoría de los glaciares colombianos restantes desaparezcan en las próximas décadas (Rabatel *et al.*, 2018). En el análisis de cambios detallados, los estudios se han centrado en recopilar observaciones con mediciones in situ estandarizadas (balance de masa glaciológico), método de monitoreo que está

en línea con la estrategia internacional para el monitoreo de glaciares del World Glacier Monitoring Service (WGMS). Para el caso de Colombia se monitorea en detalle solamente el glaciar Santa Isabel, el cual tiene la mayor serie de datos de observación in situ desde marzo de 2006 con una periodicidad mensual (IDEAM, 2021).

El seguimiento de la extensión y evolución de las masas glaciares a nivel mundial, incluyendo la mayoría de los glaciares tropicales, se basa principalmente en datos obtenidos mediante Sensores Remotos ópticos (Malone *et al.*, 2022). La investigación predominante ha utilizado la teledetección, dada la dificultad que presenta el terreno para realizar trabajos de campo (Veettil & Kamp, 2019). Se han utilizado fotografías aéreas desde mediados del siglo XX para inventariar los glaciares, pero posteriormente se utilizaron imágenes de satélite para poder monitorear grandes áreas (Veettil & Kamp, 2019). Se han realizado numerosos estudios en Latinoamérica y el mundo para examinar la evolución de las masas glaciares con enfoque geoespacial integrando Sensores Remotos y SIG (Cuadro N° 1). Siendo la serie de satélites LandSat la más utilizada por su amplio archivo histórico y fácil acceso.

Cuadro N°1

Estudios en el mundo con enfoque geoespacial que analizan los paleo glaciares y los glaciares tropicales.

LUGAR	SENSOR/PROCESO	AÑO	RESOLUCIÓN	REFERENCIA
Perú (Quelccaya)	Landsat	1985	30 m	(Albert, 2002)
Perú (Cordillera Blanca)	Landsat	1987-1996	30 m	(Silverio & Jaquet, 2005)
Colombia (Huila)	Landsat	1976-2001	30 m	(Ariza, 2006)
Perú (Cordillera Blanca)	Spot 5	2003	20 m	(Racoviteanu <i>et al.</i> , 2008)
Colombia	Landsat	1987-2007	30 m	(Poveda & Pineda, 2009)
Perú (Quelccaya)	Landsat/ Aster/ Corona	1975 - 2012	6,15,30 m	(Hanshaw & Bookhagen, 2014)
Glaciares norte de los Andes	Landsat/ Aster/ Spot/ ALOS	Múltiples años	5 a 30 m	(Albert <i>et al.</i> , 2014)
Ecuador (Cotopaxi)	Landsat	1979 - 2013	60,30 m	(Veettil <i>et al.</i> , 2014)
Bolivia (Cololo y Huanacuni)	Landsat/ LISS-3	1984 - 2011	24,30 m	(Veettil <i>et al.</i> , 2016)
Glaciares tropicales (Andes)	QuickBird, Landsat	Antes de 2015	Varias	(Veettil & Kamp, 2017)
Colombia (Norte y Andes)	ALOS, Rapid Eye	2007 - 2016	2.5 a 30 m	(Rabatel <i>et al.</i> , 2018)
Perú (Cordillera Blanca)	Landsat	1987 - 2016	60,30 m	(Silverio & Jaquet, 2017)
Bolivia	Landsat/ Sentinel	1975 - 2016	10,20,30, m	(Veettil <i>et al.</i> , 2018)
Perú (Cordillera Blanca)	Landsat/ Palsar/Radarsat/	1996 - 2016	10,30,100 m	(Chimner <i>et al.</i> , 2019)
Perú (Valle de Churup)	Landsat	1986 - 2016	30 m	(Emmer <i>et al.</i> , 2019)
Perú /Bolivia (Champara y Tilata)	Landsat/Sentinel	2002 - 2017	10,20,30, m	(Veettil & Simões, 2019)

LUGAR	SENSOR/PROCESO	AÑO	RESOLUCIÓN	REFERENCIA
Perú (Cordillera Blanca)	TerraSAR-X	2017 – 2020	3 m	(Kos <i>et al.</i> , 2021)
Perú (Queelccaya y Coropuna)	Landsat	1984 – 2021	30 m	(Malone <i>et al.</i> , 2022)
Glaciares tropicales (Sudamérica)	Landsat	1985 – 2020	30 m	(Turpo Cayo <i>et al.</i> , 2022)
Colombia (Cocuy)	Landsat	1985 – 2020	30 m	(Cepeda <i>et al.</i> , 2022)
Perú (Cordillera Blanca)	Sentinel	2020 – 2022	10,20, m	(García <i>et al.</i> , 2023)
Guatemala (Sierra los Cuchumatanes)	Foto aérea/DEM	1991 – 2003	50 m	(Roy & Lachniet, 2010)
Costa Rica (Parque Nacional de Chirripó)	Imágenes de Google Earth/ DEM	2018	1,30, m	(Li <i>et al.</i> , 2021)
Costa Rica (Parque Nacional de Chirripó)	Foto aérea/DEM	2005	10 m	(Quesada-Román <i>et al.</i> , 2020)
Costa Rica (Parque Nacional de Chirripó)	Foto aérea/DEM	2005	10 m	(Quesada-Román <i>et al.</i> , 2021)
México (Popocatepetl)	Foto aérea/DEM	1996 – 1999	2 m	(Delgado-Granados <i>et al.</i> , 2007)
México (Citlaltépetl)	Foto aérea/DEM	1958	10 m	(Cortés-Ramos <i>et al.</i> , 2015)
México (Iztaccíhuatl, Popocatepetl, Citlaltépetl)	Landsat/Sentinel/ DEM	1973 – 2017	10,20,30, m	(Veettil & Wang, 2018b)
Colombia y Venezuela	Landsat/ ASTER	1984 – 2004	15,30,90, m	(Morris <i>et al.</i> , 2006)
Venezuela (Cordillera de Mérida – Andes)	DEM/ ASTER	2007	15,90, m	(Stansell <i>et al.</i> , 2006)
Venezuela (Pico Humboldt)	Landsat/ GPS	2009 – 2011	30 m	(Braun & Bezada, 2013)
Indonesia (Puncak Jaya)	Landsat	1974 – 1983	80 m	(Williams & Ferrigno, 1989)
Indonesia (Puncak Jaya, Irian Jaya)	Ikonos	2000 – 2002	1 m	(Klein & Kincaid, 2006)
Indonesia (Puncak Jaya)	Landsat/ ASTER	1980 – 2015	30,90, m	(Veettil & Wang, 2018a)
Indonesia (Puncak Jaya, Irian Jaya)	DEM /Landsat/ Ikonos/ Worldview	2009 – 2016	1,30, m	(Permana <i>et al.</i> , 2006)
Tanzania (Kilimanjaro)	Quickbird/ fotografía aérea/ DEM	2003 – 2005	1 m	(Cullen <i>et al.</i> , 2006)
Tanzania (Kilimanjaro)	Foto aérea/DEM	2003	30 m	(Molg <i>et al.</i> , 2009)
Uganda (Rwenzori)	WorldView/GPS	2009 – 2016	1 m	(Jackson <i>et al.</i> , 2020)
África Oriental (Kilimanjaro, Monte Kenia, Rwenzori)	PlanetScope	2021 – 2022	3 m	(Hinzmann <i>et al.</i> , 2024)

Fuente: Elaboración propia.

Para Colombia, aunque existen estudios que evalúan las masas glaciares con sensores remotos (IDEAM, 2017; IDEAM, 2021; Ceballos *et al.*, 2012; Ceballos *et al.*, 2006; Poveda and Pineda, 2009; Rabatel *et al.*, 2018; Ariza, 2006; Cepeda *et al.*, 2022), estos han utilizado diferentes sensores ópticos, y con resoluciones espaciales distintas (1m, 5m, 10m, 30m) y con escalas muy amplias, lo que determina un amplio margen de incertidumbre en la interpretación de los datos. Por tanto, el objetivo de este trabajo es analizar la evolución histórica, mediante herramientas geoespaciales estandarizadas, de las masas glaciares tropicales de Colombia, a través de múltiples series temporales de imágenes de satélite de alta resolución desde 2010 hasta 2023. Donde el análisis GIS, en conjunto con Aprendizaje profundo, procesamiento de información meteorológica con Google Earth Engine (GEE) y el análisis topográfico son parte importante del estudio. Este es un paso hacia un mejor y continuo monitoreo de las fluctuaciones de los glaciares en el tiempo, lo que es fundamental para comprender la influencia del cambio climático y poder documentar la desaparición de los glaciares colombianos.

Área de estudio

Colombia se sitúa en la zona de convergencia intertropical, la cual se distingue por sus altas temperaturas a lo largo de todo el año y dos temporadas lluviosas bien definidas. Las intensas precipitaciones y un elevado porcentaje de procesos geomorfológicos, originados por el clima tropical húmedo, han contribuido al desarrollo de una topografía notablemente abrupta. Los glaciares en Colombia se localizan a altitudes superiores a 4800 metros sobre el nivel del mar (msnm), dependiendo de las condiciones meteorológicas y topográficas específicas de cada región. Las cumbres de las montañas con glaciares alcanzan alturas entre 5100 y 5700 msnm. Actualmente, Colombia cuenta con seis áreas nevadas, ubicadas entre los 11° N y 2° N (Figura N°2). A continuación, se describen sus principales características:

La Sierra Nevada de Santa Marta, ubicada en las coordenadas geográficas aproximadas de 10°49'N y 73°39'W, es la región donde las zonas glaciares se encuentran más dispersas, presentándose en algunas áreas como manchas aisladas, tal como se ilustra en la Figura N°2a. Este macizo litoral es el más alto del mundo, alberga el glaciar tropical más septentrional de Suramérica y cuenta con las cumbres gemelas más altas de Colombia, alcanzando los 5775 msnm (Duran & Olivero, 2021). Se caracteriza por una amplia formación de lagunas glaciáricas y extensos sistemas de morrenas. Su régimen climático difiere notablemente del de otras regiones glaciares, especialmente debido a su ubicación geográfica a menos de 50 km de la costa del Caribe, presentando un clima semiárido a semihúmedo (40 – 100 mm) según la clasificación climática de Lang. La Sierra Nevada El Cocuy se localiza alrededor de las coordenadas geográficas 6°27'N y 72°17'W, asentada sobre sedimentos del antiguo mar interior que una vez cubrió el territorio colombiano. Las masas de hielo se encuentran sobre rocas sedimentarias plegadas en un sistema sinclinal-anticlinal en el cual se diferencian zonas escarpadas (Figura N°2f). Actualmente, es el único nevado sobre la cordillera Oriental de Colombia, siendo su punto más alto el pico Ritacuba Blanco que se ubica a 5380 msnm. La región en la que se ubica presenta un clima húmedo, con precipitaciones que oscilan entre 100 y 160 mm, según la clasificación climática de Lang

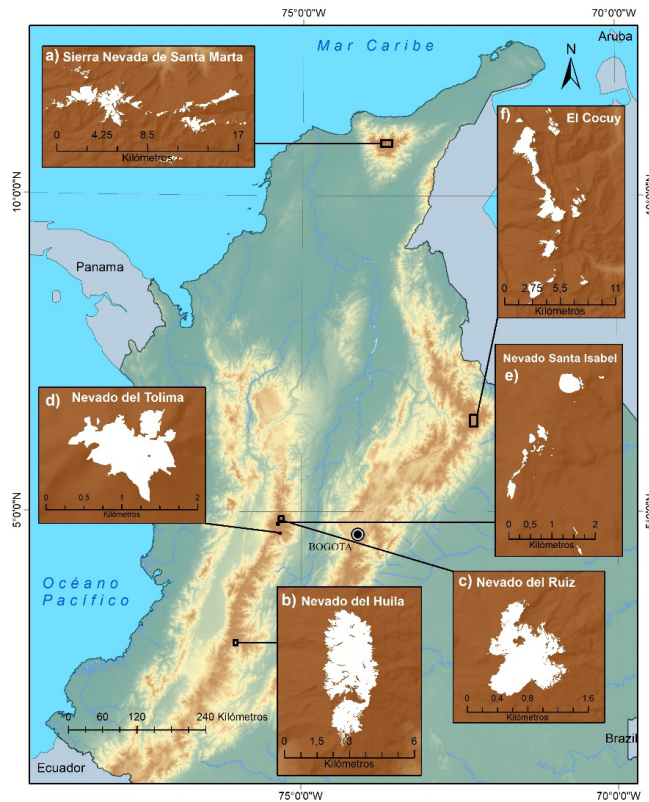
De los seis glaciares presentes en Colombia, cuatro están situados sobre estructuras volcánicas clasificadas como activas y se ubican en la categoría de superhúmedo de Lang. El Volcán

Nevado del Ruiz es el nevado más septentrional de la cordillera Central; se localiza alrededor de las coordenadas geográficas 4°53'N y 75°19'W como se muestra en la Figura N°2c. La masa glaciar del Ruiz se caracteriza por estar unida a una única matriz, conectada a dos manchas sobre la parte norte de la estructura, interrumpida por un Cráter (Rave & Sánchez, 2021). Tiene una altura máxima de 5330 msnm. De hecho, Colombia ha sufrido con diferencia la mayor interacción glaciar-volcánica y uno de los desastres volcánicos más graves de la historia: la catástrofe del Nevado del Ruiz de 1985, desencadenada por una erupción de tamaño medio que produjo lahares devastadores que se cobraron la vida de más de 20 000 personas (Ceballos *et al.*, 2012). El Volcán Nevado Santa Isabel (Figura N°2e), no es una estructura volcánica con un cráter y forma cónica convencional, sino un conjunto de domos o superficies convexas creadas por efusión de lavas, mayoritariamente a fines del período geológico Terciario y principios del Cuaternario (Ceballos *et al.*, 2012). Se localiza alrededor de las coordenadas geográficas 4°49'N y 75°22'W. Su punto más alto se ubica en la cumbre central a 4968 msnm.

El Volcán Nevado del Tolima es un estratovolcán de forma cónica que constituye una pequeña masa glaciar (Figura 2d) (Ceballos *et al.*, 2012). Contiene un pequeño cráter en el cual se presenta actividad fumarólica e hidrotermal. Hacia las laderas cercanas a la cumbre, es posible encontrar antiguos flujos de lava que se intercalan con pequeñas lenguas glaciares. Se localiza alrededor de las coordenadas geográficas 4°39'N y 75°22'W. Su punto más alto se ubica sobre los 5280 msnm. El Volcán Nevado del Huila es el segundo glaciar más alto y el más meridional de Colombia; se ubica sobre la cordillera Central de los Andes colombianos alrededor de las coordenadas geográficas 2°55'N y 76°03'W (Figura N°2b). Es un complejo volcánico activo con una cumbre de 5364 msnm, alargado en sentido norte-sur, conformado por domos volcánicos y lavas (García *et al.*, 2019). El área ha experimentado eventos eruptivos recientes en 2007 y 2008, lo que ha aumentado los riesgos glacio-volcánicos, especialmente en la cuenca del río Páez. Como resultado de la actividad volcánica, se ha formado un domo de considerable altura en el pico sur del volcán, tal como ha sido referenciado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

Figura N°2

Ubicación y distribución espacial de los glaciares tropicales de Colombia.



Fuente: Elaboración propia.

Material y Métodos

Conjuntos de datos

Se utilizaron 214 imágenes multispectrales libres de nubes de alta resolución adquiridas del sistema Explorer de la empresa Planet Labs Inc. dueña de la constelación PlanetScope y del inventario de los satélites ya retirados RapidEye. PlanetScope es la constelación de satélites de observación de la tierra más grande del mundo, con más de 200 satélites CubeSat en órbita; son los únicos satélites con sensores de alta resolución, alta frecuencia y cobertura a nivel mundial diaria (Cui *et al.*, 2022). RapidEye fue una constelación de cinco satélites lanzados simultáneamente el 28 de agosto de 2008 y que funcionó hasta 31 de marzo de 2020, reemplazada por la constelación PlanetScope (Mohr *et al.*, 2023). Las imágenes de PlanetScope y RapiEye utilizadas en este trabajo fueron las de los productos con el mayor nivel de corrección atmosférica y topográfica; se adquirieron imágenes de reflectancia Level 3B PlanetScope Ortho Scene (3 m) y Level 3B RapidEye Ortho Tile (5 m). Cada una incluye cuatro bandas espectrales: azul, verde, roja y del infrarrojo cercano. El modelo de elevación digital (DEM) utilizado en este estudio tiene una resolución de 30 m y se basa en mediciones del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), misión de la National

Aeronautics and Space Administration (NASA) y otros organismos destinados al desarrollo del DEM de más alta precisión de la tierra (Pretty et al., 2022). Este DEM global se generó a partir de información de interferometría radar que datan de febrero del año 2000. Se utilizaron los datos de elevación oficiales del SRTM disponibles en el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), entidad encargada de la cartografía oficial de Colombia. Los principales parámetros de los sensores que se utilizaron se muestran en el Cuadro N°2.

Cuadro N°2

Imágenes y productos de percepción remota utilizados para la extracción de zonas glaciares en este estudio.

SENSOR	RESOLUCIÓN	FUENTE	GLACIAR	AÑO	NUMERO
RapidEye Level 3B Ortho Tile	5 m	Planet labs Inc	Sierra Nevada Sta. Marta	2010 - 2016	22
			Nevado del Huila	2010 - 2016	9
			Nevado Santa Isabel	2010 - 2016	10
			Nevado del Ruiz	2010 - 2016	10
			Sierra Nevada El Cocuy	2010 - 2016	14
			Nevado del Tolima	2010 - 2016	14
PlanetScope Level 3B Ortho Scene	3 m	Planet labs Inc	Sierra Nevada Sta. Marta	2017 - 2023	24
			Nevado del Huila	2017 - 2023	27
			Nevado Santa Isabel	2017 - 2023	19
			Nevado del Ruiz	2017 - 2023	19
			Sierra Nevada El Cocuy	2017 - 2023	23
			Nevado del Tolima	2017 - 2023	23
Modelo digital de terreno - SRTM	30 m	(IGAC)	Todos los glaciares	2000	1

Fuente: Elaboración propia.

Para disminuir la incertidumbre durante la vectorización del área glaciar desde datos de Sensores Remotos al momento de la captura de las escenas se tuvo en cuenta el error posicional. Los productos Level 3B han sido procesados para eliminar las distorsiones causadas por el terreno y pueden utilizarse con fines cartográficos y de visualización. Los efectos relacionados con el sensor se corrigen utilizando la telemetría y un modelo de sensor. Los efectos relacionados con la plataforma espacial se corrigen utilizando telemetría y los mejores datos de efemérides disponibles. Además, se realiza una corrección del ángulo solar en cada imagen, teniendo en cuenta las diferencias de latitud y hora de adquisición, obteniendo una precisión posicional inferior a 10 m RMSE (Planet, 2022). Las imágenes de PlanetScope Ortho Products presentan una resolución horizontal de 3 metros, cubren un área de 25 × 25 km² y están ortorectificadas y ajustadas a la cuadrícula Universal Transverse Mercator (UTM) (Planet, 2022).

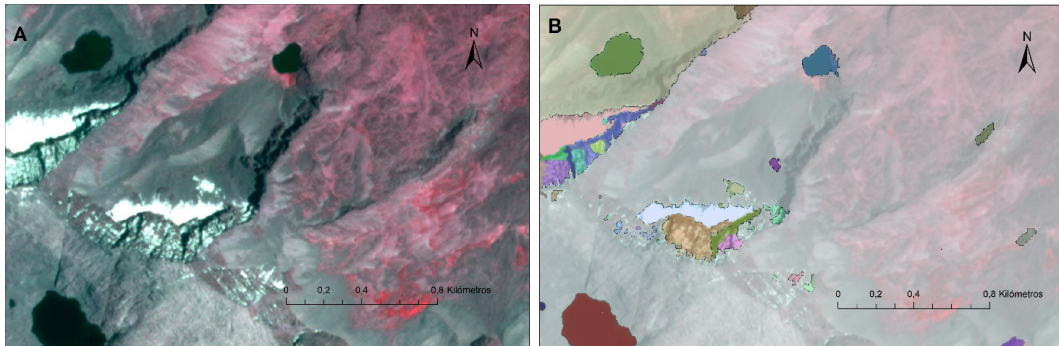
Aprendizaje profundo para identificar glaciares

Debido al gran número de imágenes satelitales (214), se llevó a cabo una segmentación basada en objetos de la línea del área glaciar para todos los lugares. Para esto, se utilizó aprendizaje profundo y visión por ordenador, empleando el recientemente propuesto Segment Anything Mo-

del (SAM) de la empresa Meta, un nuevo modelo de inteligencia artificial. SAM es un sistema de segmentación de objetos e imágenes, que se ejecuta sin necesidad de entrenamiento adicional (Kirillov *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023); fue creado con el mayor conjunto de datos de segmentación hasta la fecha, con más de 1.000 millones de máscaras de entrenamiento preentrenado (Giannakis *et al.*, 2023). Los modelos de segmentación realizan una clasificación por píxeles, agrupándolos en diferentes clases. Los píxeles clasificados corresponden a distintos objetos o regiones de la imagen. Estos objetos permitieron distinguir con mayor claridad las zonas de nieve y examinar las sombras con mayor detalle en la extensión de los glaciares. Para la delineación de los márgenes de los glaciares, se analizaron las bandas visuales como imágenes RGB de color verdadero y falso color sin realce adicional del contraste, ya que el producto de imagen PlanetScope seleccionado fue preprocesado específicamente para el análisis visual (Planet, 2022). Se utilizó el software ArcGIS Pro (v 3.1, ESRI, EE.UU.) junto con el paquete de aprendizaje profundo de ESRI Analytics, un complemento que se basa en el modelo de código abierto SAM y permite al usuario segmentar cualquier imagen mediante aprendizaje profundo (Figura N°3). Con ArcGIS Pro, se realizó una corrección adicional de la segmentación a través de la interpretación visual, asistiendo también en la detección manual de los márgenes de los cuerpos de nieve. Posteriormente, se prepararon las capas de inventarios para crear una línea base uniforme de la expansión de los glaciares en Colombia. Un procedimiento enteramente automático no podría ofrecer un resultado detallado y fiable debido a algunos artefactos mal clasificados y agrupados como nieve. Por lo tanto, es imprescindible realizar una verificación visual para reducir las incertidumbres, en la detección y agrupación de objetos.

Figura N°3

A) Imagen en falso color de PlanetScope. B) Segmentación de la imagen de entrada utilizando Segment Anything Model sobre el área glaciar en la Sierra Nevada de Santa Marta.



Fuente: Elaboración propia.

Datos meteorológicos

Colombia está ubicada en el norte de América del Sur, en medio de características geográficas e hidro climatológicas complejas que surgen de los fuertes gradientes topográficos y de la zona de convergencia intertropical (Poveda & Rueda, 2011). Las partes central y occidental de Colombia experimentan un régimen de precipitación bimodal con dos períodos de alta precipitación (abril-mayo y octubre-noviembre) y dos períodos de menor precipitación (diciembre-febrero y junio- agosto). Por otro lado, la costa del Caribe muestra un régimen de precipitación unimodal

(mayo-octubre), producto de la posición más septentrional de la ZCIT. La cadena montañosa más al este, también experimenta un único pico de precipitación durante junio-agosto, que resulta de la convección profunda de la humedad transportada desde el Amazonas que se encuentra con la barrera orográfica de los Andes (Poveda & Rueda, 2011). Para el estudio se consideró los registros mensuales de precipitación (1991-2023) obtenidos de Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) con una resolución de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, alrededor de 4.8 km (Funk *et al.*, 2014; Funk *et al.*, 2015; Aksu & Akgül, 2020). Para el área de trabajo se utilizan datos de temperatura con una resolución de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, alrededor de 9.6 km para el período 1991-2023 proporcionados por el sistema de información de Copernicus Climate Change Service el cual recopila información del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) en un análisis de datos históricos denominado ERA5 (ECMWF, 2023). Estos datos resultan de la combinación de promedios mensuales de datos de modelos y observaciones de todo el mundo, en un conjunto de datos globalmente completo y consistente (Fuentes *et al.*, 2022). Se procesó la información geoespacial dentro de Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017), seleccionando las áreas glaciares y el conjunto de datos anuales de precipitación y temperatura para calcular las anomalías de estas variables de los periodos 2010-2023. La anomalía de precipitación se calcula mediante la fórmula (Edgar & Bocanegra, 2014):

$$Ap = (Tpa / Tpma) * 100 \quad (1)$$

En donde:

- Ap = Anomalía de Precipitación.
- Tpa = Total de precipitación durante el año de análisis.
- Tpma = Precipitación total anual promedio multianual (1991-2023).

Para el caso de la anomalía de temperatura se calcula mediante la fórmula (Edgar & Bocanegra, 2014) como se enuncia a continuación:

$$At = (Tmedn - Tmedr) \quad (2)$$

En donde:

- At = Anomalía de temperatura media.
- Tmedn = Es la temperatura media anual del ámbito geográfico de referencia en un año.
- Tmedr = Es la temperatura media de ese ámbito geográfico en el periodo de referencia (1991-2023).

Mapeo de los glaciares

Para asegurar la homogeneidad en las observaciones, se estimaron las variaciones del área glaciar anual para todos los sitios durante el período 2010-2023, minimizando el efecto de la nubosidad al centrarse en el período seco de enero a febrero. Este trabajo incluyó ajustes basados en la visualización de la información utilizando combinaciones de bandas (color natural y falso color infrarrojo) para resaltar los límites de los glaciares. La segmentación de todas las imágenes se llevó a cabo utilizando el algoritmo SAM, y las áreas cubiertas de nieve fueron ajustadas mediante

digitalización manual e inspección visual. Se delimitó el período más antiguo disponible de cada glaciar utilizando imágenes RapidEye, y se comparó con las imágenes más recientes obtenidas de PlanetScope. Este proceso permitió refinar los contornos de los glaciares y calcular las áreas glaciares anuales. Además, se empleó la elevación para relacionar los diferentes rangos altitudinales con los cambios en la superficie de los glaciares. Adicionalmente, se examinaron las estimaciones anuales de las variaciones del área glaciar en relación con los datos meteorológicos, incluyendo anomalías de precipitación y temperatura, para analizar los efectos de la variabilidad climática sobre el retroceso de los glaciares colombianos. Este análisis permitió identificar patrones y tendencias en la dinámica glaciar, proporcionando una comprensión más detallada de cómo el cambio climático está afectando a estas masas de hielo. Finalmente, se consideraron diversos factores geográficos y climáticos que podrían influir en la tasa de retroceso glaciar, incluyendo la orientación de las laderas, la exposición al sol y las características topográficas locales. Estos factores se integraron en el análisis para proporcionar una visión comprensiva y detallada del comportamiento de los glaciares en Colombia en respuesta a las condiciones climáticas cambiantes.

Resultados

Cambios y estimación del área glaciar durante 2010-2023

La Figura N°4 ilustra las áreas y los cambios para todos los glaciares: Nevado del Ruiz (4a), Nevado del Tolima (4b), Sierra Nevada de Santa Marta (4c), Santa Isabel (4d), y Sierra Nevada de El Cocuy (4e), utilizando como fondo las imágenes más antiguas de RapidEye. La extensión del glaciar se muestra desde el año inicial 2010 en color rojo hasta el año final 2023 en color amarillo. En el caso del volcán Nevado del Huila, se utiliza el año 2011 como año inicial de comparación debido a la erupción ocurrida a las 9:45 pm del 20 de noviembre de 2008, la cual eliminó grandes áreas glaciares, dejando solo pequeños remanentes (Figura N°4f). Durante la erupción, el material caliente interactuó con la capa glaciar circundante, derritiéndola y formando flujos de lodo y lahares de hasta 30 metros de altura, que descendieron por los ríos Páez y Símbola, destruyendo infraestructura, cultivos, viviendas y causando la muerte de animales. Los glaciares en Colombia han experimentado variaciones en tamaño a lo largo del tiempo, con aumentos significativos en los años 2011 y 2021, coincidiendo con la ocurrencia del fenómeno de La Niña en los períodos 2011-2012 y 2020-2022. En Colombia, La Niña tiende a ser más húmeda y fría, lo que podría haber contribuido a una mayor cobertura de nieve en estos años y, por ende, a un incremento significativo en el área glaciar. Sin embargo, en general, los glaciares han mostrado una tendencia de pérdida de superficie en la mayoría de los años del período 2010-2023. Las reducciones más significativas se registraron en la Sierra Nevada de Santa Marta (-56%), Nevado del Huila (-23%), Nevado del Ruiz (-13%) y Nevado del Tolima (-12%). El único glaciar que presenta una variación positiva del 68% es el Nevado de Santa Isabel, que ha mostrado una menor disminución de su área y varios incrementos en diferentes años (Cuadro 3).

Cuadro N°3

Cambio del Área Glaciar en las Seis zonas Glaciares de Colombia:
Evolución en km² y su Variación Promedio (2010-2023).

Año	Nevado del Huila	Sierra Nev Sta. Marta	Sierra Nev El Cocuy	Nevado del Tolima	Nevado de Santa Isabel	Nevado del Ruiz	Área anual km ²
2023	8,3	8,5	13,6	0,66	0,31	2,4**	33,8
2022	7,1	6,2	13,4	0,67	0,56	3	30,9
2021	8,5	10,6	14,2	0,59	0,55	6,6	41,0
2020	5	7	13,3	0,32	0,39	3,5	29,5
2019	6,1	8,1	14,9	0,5	0,42	4,5	34,5
2018	6,6	9,6	15	0,52	0,57	5,1	37,4
2017	7,8	8,8	14,7	0,62	0,73	4,6	37,3
2016	6,3	10,3	16,4	0,3	0,66	7,8	41,8
2015	7,3	11,6	15,5	0,73	0,64	7,1	42,9
2014	8,1	8,9	13,8	0,98	0,75	10,6	43,1
2013	8,2	13,2	14,2	0,8	0,5	8,5	45,4
2012	9,7	14,4	15,6	0,87	1,05	10,6	52,2
2011	9,1	23,3	16,6	1,03	1,43	12,3	63,8
2010	0,2*	27,5	16	0,76	0,38	7,7	52,5
Promedio	-23%	-56%	-8%	-12%	68%	-13%	-19%

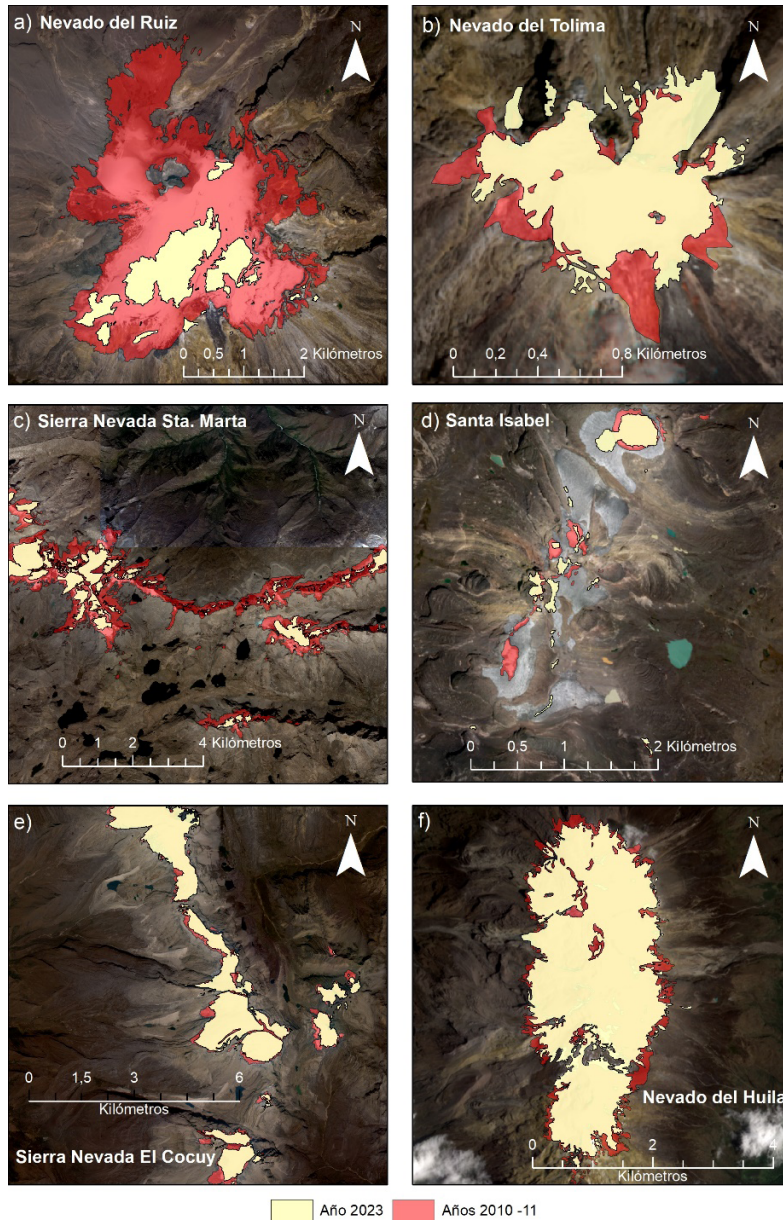
* El 20 de noviembre de 2008, el volcán Nevado del Huila entró en erupción, derritiendo el glaciar y generando corrientes de lodo, por lo que el glaciar perdió su masa total desde este año.

** El 24 de marzo de 2023, la actividad sísmica en el flanco sur del volcán empezó a incrementar de manera importante.

Fuente: Elaboración propia.

Figura N°4

Cambios en el área de los glaciares en todas las zonas estudiadas (2010-2023)

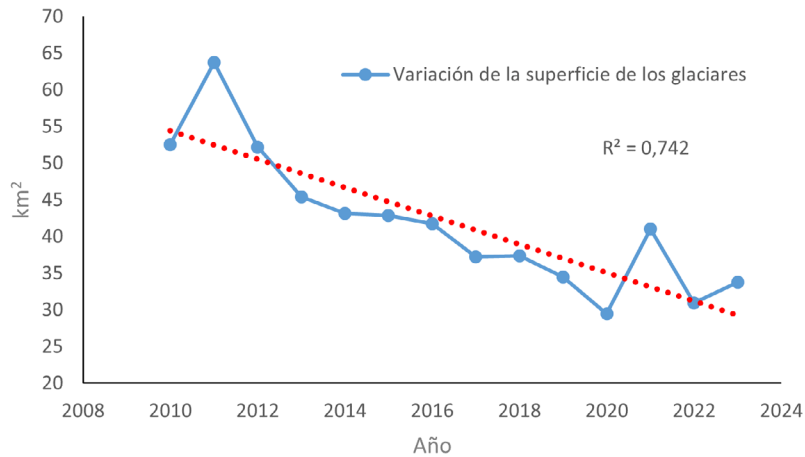


Fuente: Elaboración propia.

A lo largo de un periodo de trece años, se ha observado una clara tendencia lineal hacia la reducción del área de los glaciares colombianos, como se esperaría debido al impacto del cambio climático en la disminución anual de las masas glaciares tropicales a nivel global. La Figura N°5 ilustra estos cambios, destacando picos de aumento en la masa glaciar durante los años 2011 y 2021, coincidiendo con los eventos del fenómeno de La Niña en Colombia, caracterizados por un incremento significativo en la precipitación.

Figura N°5

Variación de área glaciar total para todas las áreas nevadas 2010-2023.

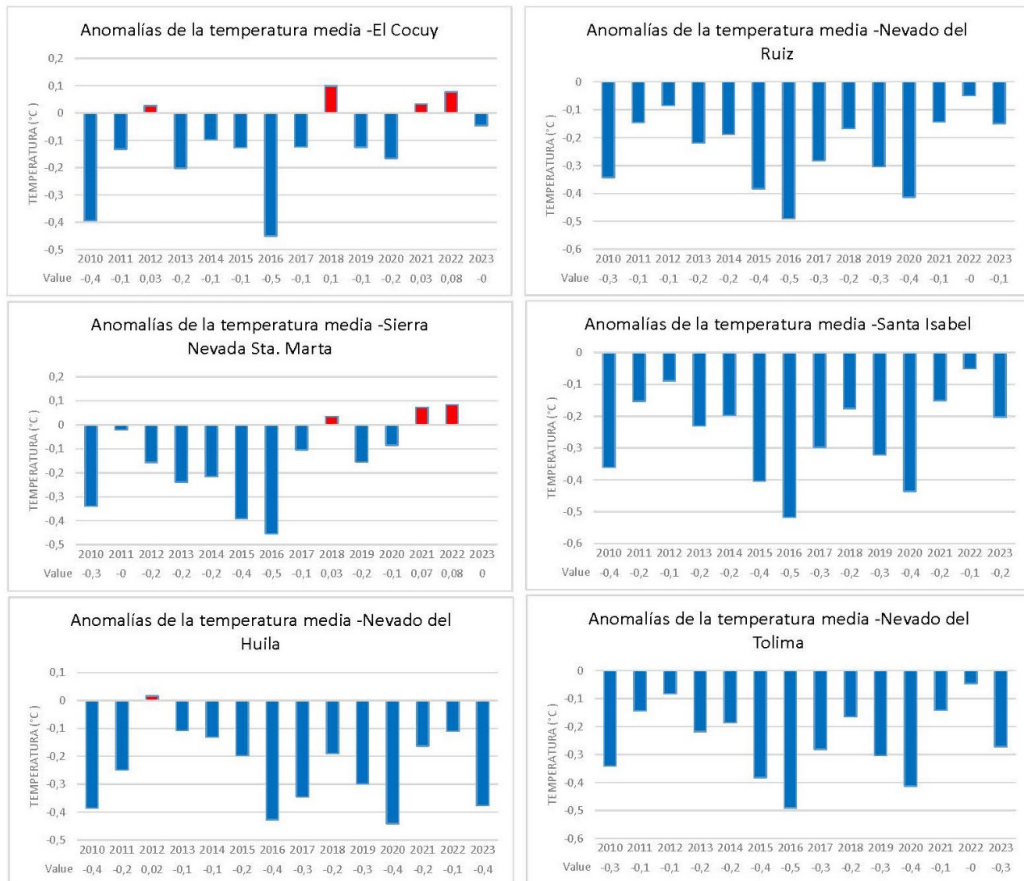


Fuente: Elaboración propia.

Anomalías en temperatura y precipitación en área de los glaciares

Las anomalías de temperatura y precipitación se calcularon a partir de los conjuntos de datos CHIRPS y ERA5 para cada una de las áreas donde se ubican los glaciares tropicales de Colombia, promediando los datos desde 1991 a 2023 dentro de Google Earth Engine. Se empleó la anomalía de temperatura media como indicador, representando la diferencia en °C entre la temperatura observada media multianual y la media del periodo de referencia 1991-2023. La Figura N°6 exhibe estas anomalías para todas las ubicaciones, revelando una consistente tendencia de temperaturas inferiores a lo normal durante los años 2015-2016 y 2020 en todos los sitios analizados, correlacionada con la presencia del fenómeno de El Niño en esos periodos. El evento de 2015-2016, el más severo del período estudiado, se asoció con las mayores anomalías (temperaturas más bajas respecto al promedio) registradas en los seis nevados. Por otro lado, el impacto de La Niña en las anomalías de temperatura mostró una consistencia menor, evidenciándose únicamente temperaturas por encima del promedio en las áreas de Sierra Nevada de Santa Marta, Cocuy, y en menor medida en el Nevado del Huila, durante los eventos de La Niña en los años 2012, 2018 y 2020-2021.

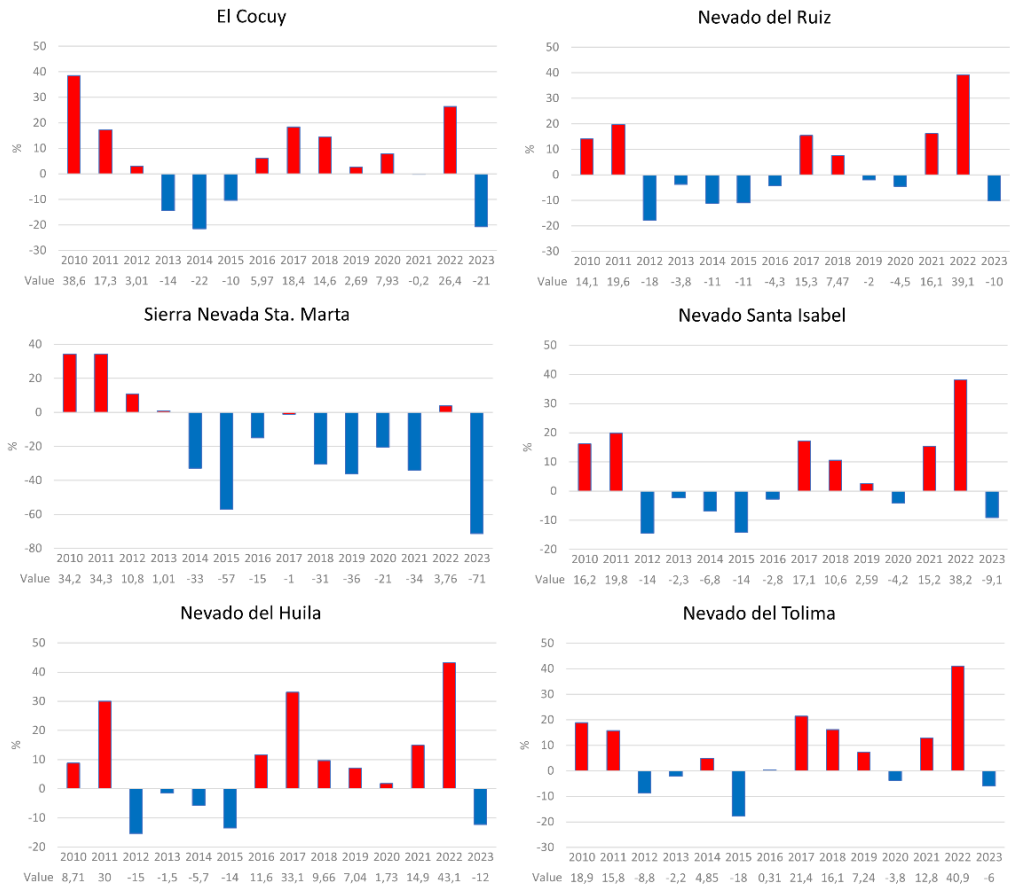
Figura N°6
Anomalías de temperatura en glaciares tropicales de Colombia (2010-2023)



Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de la anomalía de la precipitación cuantifica el porcentaje de precipitación total anual en la región de los seis glaciares tropicales observada por encima o por debajo de la media en el periodo de referencia 1991 a 2023. En la Figura N°7 se visualiza los años en que La Niña (2010- 2011, 2017 y 2020-2022) estuvieron asociados con precipitaciones más altas. La anomalía de precipitación en el caso de Sierra Nevada de Santa Marta y Sierra Nevada de El Cocuy muestra patrones similares que los otros lugares en 2011, pero no muestra una marcada precipitación en 2021 sino en el año 2022. Los eventos ENSO (El Niño-Southern Oscillation) tienden a alcanzar su punto máximo hacia el final del año calendario (Kim & Yu, 2022). Por lo tanto, los eventos más fuertes de La Niña en 2020, 2021 pueden extenderse a 2022 respectivamente.

Figura N°7
Anomalías de precipitación en glaciares tropicales de Colombia (2010-2023)



Fuente: Elaboración propia.

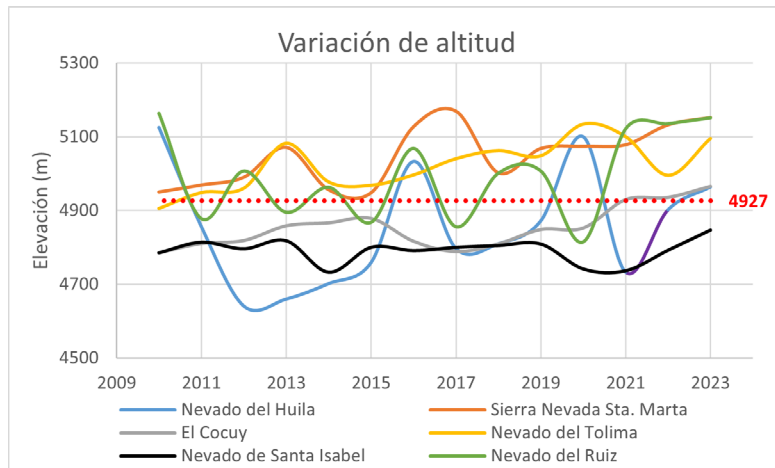
Variación de la altitud en los glaciares tropicales colombianos

Las altitudes promedio, máximas y mínimas de los glaciares fueron calculadas utilizando datos del modelo de elevación SRTM y la función estadística zonal de ArcGIS Pro aplicada a cada área glaciar específica. La altitud juega un papel crucial en la comprensión de la variabilidad en la superficie glaciar en diferentes rangos altitudinales (Romshoo *et al.*, 2022; Dimri *et al.*, 2022; Pepin *et al.*, 2022). La línea de equilibrio altitudinal de las áreas glaciares tropicales de Colombia oscila entre 4804 y 5067 metros sobre el nivel del mar (msnm), con una elevación promedio de 4927 msnm (Figura N°8). Los mayores retrocesos altitudinales se observan en la Sierra Nevada de Santa Marta, alcanzando los 5169 msnm, seguido por el Nevado del Ruiz con 5163 msnm, el Nevado del Tolima con 5134 msnm y el Nevado del Huila con 5125 msnm. En el caso del Nevado del Huila, este experimentó erupciones volcánicas en 2008 que condujeron a la pérdida completa de su cobertura glaciar. A partir de 2010, se observó un comienzo de recuperación en las regiones de mayor altitud, siendo notable la restauración de su masa glaciar durante los años 2011 y 2012. En

las restantes áreas, la pérdida de área se concentra a altitudes inferiores a los 5000 msnm desde 2010 hasta 2023, registrándose 4965 msnm para la Sierra Nevada de El Cocuy y 4847 msnm para el Nevado de Santa Isabel. Las diferencias promedio entre las altitudes mínimas y máximas de los glaciares colombianos alcanzan los 263 m, destacándose el Nevado del Huila con 484 m y el Nevado del Ruiz con 348 m como los mayores contrastes altitudinales.

Figura N°8

Variación de la altitud en los glaciares tropicales colombianos 2010-2023.



Fuente: Elaboración propia.

Discusión

En general, todas las regiones glaciares de Colombia han experimentado un rápido retroceso en las últimas décadas. A nivel regional, se pueden observar diferencias en el ritmo de retroceso, lo que indica la influencia de la topografía y el microclima local en el comportamiento de los glaciares. Analizar la evolución de los glaciares colombianos es fundamental para comprender los efectos del cambio climático en áreas tan sensibles a la variación climática (López-Moreno *et al.*, 2020; Luis *et al.*, 2019). Los eventos climáticos regionales, como el ENSO, impactan de manera particular la superficie de los glaciares. La fase cálida, El Niño, aumenta drásticamente la fusión de la nieve y el hielo, mientras que la fase fría, La Niña, causa una acumulación de nieve, aunque con mucha menor intensidad (IDEAM, 2021). En el análisis con las herramientas geoespaciales de 2010 a 2023 se encontró que el mayor cambio por reducción de la masa glaciar se registró en el año 2020 con 29.9 km². Los momentos de mayor crecimiento glaciar coincidieron con las épocas del fenómeno de la Niña en 2011 con 63.8 km² y en 2021 con 41 km². La masa glaciar en los últimos 13 años ha tenido una tendencia significativa ($R^2 = 0.74$) hacia la reducción con un porcentaje promedio anual de 19% si se compara con los datos más actualizados de Colombia del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de 2010 hasta 2020 (IDEAM, 2021). En dicho estudio se encontró un porcentaje promedio anual mayor de 26% y una masa glaciar nacional de 34.8 km² que también reflejaba una tendencia a la reducción. Las marcadas diferencias entre los valores de nuestro trabajo con este estudio se explican en que el estudio de IDEAM (IDEAM, 2021). mayoritariamente utiliza datos con una mezcla de distintas resoluciones espaciales

y de varios satélites (Alos, LandSat, Spot, Sentinel, PlanetScope) que aumenta el margen de error en cuanto a estimación de las áreas glaciares. También se debe a que el cubrimiento temporal en nuestro trabajo es más amplio, pudiendo evidenciar una mayor tendencia influenciada por el fenómeno de La Niña 2020-2022.

Este estudio empleó las anomalías de temperatura y precipitación para la estimación de la variabilidad espacial de estos fenómenos. La aparición de El Niño se hizo más evidente en las anomalías de temperatura, principalmente en el año 2016, con periodos anormalmente fríos, lo cual puede explicarse porque la escasez de nubes permite una más rápida pérdida de radiación y la aparición de La Niña fue más evidente en las anomalías de precipitación, durante la última década en 2011 y 2022 con mayores lluvias. Se observa que los años de ocurrencia de La Niña se asociaron con temperaturas bajas y precipitaciones más altas, lo que ha ralentizado el retroceso de los glaciares (Ceballos *et al.*, 2006). Los años de El Niño se asociaron con temperaturas bajas y menor precipitación. Esta última afirmación coincide con lo aseverado por Veettil & Simões, 2019 y Dasari *et al.*, 2022 en donde los años de El Niño estuvieron asociados con precipitaciones inferiores al promedio en la mayoría de los casos. También con las afirmaciones de Cepeda *et al.*, 2022. Diciembre a febrero, es más seco de lo normal en la fase de El Niño y más húmedo de lo normal en la fase de La Niña. Las precipitaciones tienen una influencia significativa, tanto directa como indirecta, en el balance de masa de los glaciares tropicales. La estacionalidad de estas precipitaciones es causada por la oscilación de la ZCIT, que provoca temporadas pico de precipitación en Colombia de marzo a mayo y de septiembre a noviembre (Ceballos *et al.*, 2006). Finalmente, Poveda & Pineda, 2009 aseveran que La Niña produce períodos húmedos por encima de lo normal y más prolongados en los Andes de Colombia. Los efectos indirectos de la variabilidad de las precipitaciones en el balance de masa de los glaciares se manifiestan a través de mecanismos de retroalimentación que afectan el albedo (Ceballos *et al.*, 2006).

Nuestros resultados indican que las mayores alturas de retroceso registradas en los glaciares colombianos se observan en la Sierra Nevada de Santa Marta, alcanzando los 5169 msnm. En general, los datos muestran un marcado retroceso hacia límites más elevados, con una elevación promedio de 4927 msnm y un retroceso de 263 m en 14 años. Esta tendencia señala la rápida y futura extinción de los glaciares en Colombia, comparado con datos anteriores en los que la línea promedio se ubicaba en 4830 msnm en 2010 (Ceballos *et al.*, 2012). Aparte de los cambios observados en Colombia, el retroceso glaciar más significativo en regiones intratropicales se ha registrado en el monte Kilimanjaro, donde se observó una reducción del 85% de la superficie glaciar en un período de 100 años (1912-2011) (Veettil & Wang, 2018a). En las montañas de Irian Jaya se ha documentado una pérdida del 84,9% de la superficie glaciar entre 1988 y 2015 (Cullen *et al.*, 2013), mientras que el retroceso de los glaciares en las montañas Rwenzori alcanzó el 54% durante el período de 5 años entre 2014 y 2019 (Jackson *et al.*, 2020). En definitiva, es probable que los glaciares tropicales colombianos desaparezcan antes de 2040.

Conclusiones

El presente estudio utilizó un enfoque cuantitativo con tecnología geoespacial. La incorporación de variables meteorológicas, y topográficas en conjunto con la alta resolución espacial, permite tener una visión integral y más precisa de la evolución de las masas glaciares con menor

incertidumbre. Los resultados se vincularon con los regímenes climáticos regionales de las fases ENSO y al retroceso de los glaciares por la influencia del cambio climático. Como consecuencia, este análisis reveló que los glaciares tropicales colombianos son muy vulnerables a las variaciones climáticas. Si esta situación continúa, es evidente que la población se verá extremadamente afectada por la disminución del recurso hídrico y que en el transcurso de unas décadas los eventos como el fenómeno del Niño y la Niña acelerarán la desaparición por completo de los glaciares en Colombia. La disponibilidad de imágenes diarias proporcionadas por Planet Labs ofrece la oportunidad de realizar estudios multitemporales en regiones caracterizadas por alta convección nubes y dinámicas cambiantes en la cobertura de nieve, como es el caso de Colombia. Este trabajo utilizó datos disponibles de sensores ópticos, sin embargo, a futuro se podría utilizar los datos de sensores activos de alta resolución de Radar o Laser como el Light Detection And Ranging (LIDAR) que pueden generar resultados más precisos en la modelización del terreno y del volumen en las áreas glaciares.

Agradecimientos:

Este estudio fue desarrollado en el marco de las actividades del grupo de investigación Análisis y Gestión para la Sostenibilidad Ambiental y Territorial (AGESAT), cuya contribución intelectual y apoyo institucional han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

Referencias

AKSU, H. AND M. A. AKGÜL (2020). "Performance evaluation of CHIRPS satellite precipitation estimates over Turkey." *Theoretical and Applied Climatology* 142(1): 71-84. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03301-5>

ALBERT, T., A. KLEIN, J. L. KINCAID, C. HUGGEL, A. E. RACOVITEANU, Y. ARNAUD, W. SILVERIO AND J. L. CEBALLOS (2014). Remote sensing of rapidly diminishing tropical glaciers in the northern Andes. *Global Land Ice Measurements from Space*. J. S. Kargel, G. J. Leonard, M. P. Bishop, A. Kääb and B. H. Raup. Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg: 609-638. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-79818-7_26

ALBERT, T. H. (2002). "Evaluation of Remote Sensing Techniques for Ice-Area Classification Applied to the Tropical Quelccaya Ice Cap, Peru." *Polar Geography* 26(3): 210-226. doi: <https://doi.org/10.1080/789610193>

ARIZA, A. (2006). "Análisis del retroceso de glaciares tropicales en los Andes Centrales de Colombia mediante imágenes Landsat." *Revista Cartográfica*: 57+.

<https://link.gale.com/apps/doc/A166944564/IFME?u=anon-cc8f22a7&sid=googleScholar&xid=7e685988>

BRAUN, C. AND M. BEZADA (2013). "The History and Disappearance of Glaciers in Venezuela." *Journal of Latin American Geography* 12(2): 85-124. doi:<https://doi.org/10.1353/lag.2013.0016>

CEBALLOS, J. L., C. EUSCÁTEGUI, J. RAMÍREZ, M. CAÑON, C. HUGGEL, W. HAEBERLI AND H. MACHGUTH (2006). "Fast shrinkage of tropical glaciers in Colombia." *Annals of Glaciology* 43: 194-201. doi:<https://doi.org/10.3189/172756406781812429>

CEBALLOS, J. L., C. E. RODRÍGUEZ MURCIA AND E. L. REAL-NÚÑEZ (2012). "Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo." Bogotá: IDEAM: 344.

CEPEDA ARIAS, E., J. CAÑON BARRIGA AND J. F. SALAZAR (2022). "Changes of streamflow regulation in an Andean watershed with shrinking glaciers: implications for water security." *Hydrological Sciences Journal* 67(11): 1755-1770. doi: <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2105650>

CHIMNER, R. A., L. BOURGEOU-CHAVEZ, S. GRELIK, J. A. HRIBLIJAN, A. M. P. CLARKE, M. H. POLK, E. A. LILLESKOV AND B. FUENTEALBA (2019). "Mapping Mountain Peatlands and Wet Meadows Using Multi-Date, Multi-Sensor Remote Sensing in the Cordillera Blanca, Peru." *Wetlands* 39(5): 1057-1067. doi: <https://doi.org/10.1007/s13157-019-01134-1>

CORTÉS-RAMOS, J. AND H. J. G. I. DELGADO-GRANADOS (2015). "Reconstruction of glacier area on Citlaltépetl volcano, 1958 and implications for Mexico's deglaciation rates." 54(2): 111-125. doi:<https://doi.org/10.1016/j.gi.2015.04.008>

CUI, B., W. HUANG, H. YE AND Q. CHEN (2022) "The Suitability of PlanetScope Imagery for Mapping Rubber Plantations." *Remote Sensing* 14(5), 1061. doi:<https://doi.org/10.3390/rs14051061>.

CULLEN, N. J., T. MÖLG, G. KASER, K. HUSSEIN, K. STEFFEN AND D. R. HARDY (2006). "Kilimanjaro Glaciers: Recent areal extent from satellite data and new interpretation of observed 20th century retreat rates." 33(16). doi:<https://doi.org/10.1029/2006GL027084>

CULLEN, N. J., P. SIRGUEY, T. MÖLG, G. KASER, M. WINKLER AND S. J. FITZSIMONS (2013). "A century of ice retreat on Kilimanjaro: the mapping reloaded." *The Cryosphere* 7(2): 419-431. doi:<https://doi.org/10.5194/tc-7-419-2013>

DASARI, H. P., Y. VISWANADHAPALLI, S. LANGODAN, Y. ABUALNAJA, S. DESAMSETTI, K. VANKAYALAPATI, L. THANG AND I. HOTEIT (2022). "High-resolution climate characteristics of the Arabian Gulf based on a validated regional reanalysis." *Meteorological Applications* 29(5): e2102. doi: <https://doi.org/10.1002/met.2102>

DELGADO GRANADOS, H., P. JULIO MIRANDA, C. HUGGEL, S. ORTEGA DEL VALLE AND M. A. ALATORRE IBARGÜENGOITIA (2007). "Chronicle of a death foretold: Extinction of the small-size tropical glaciers of Popocatepetl volcano (Mexico)." *Global and Planetary Change* 56(1): 13-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.010>

DIMRI, A. P., E. PALAZZI AND A. S. DALOZ (2022). "Elevation dependent precipitation and temperature changes over Indian Himalayan region." *Climate Dynamics* 59(1): 1-21. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06113-z>

DURAN-IZQUIERDO, M. AND J. OLIVERO-VERBEL (2021). "Vulnerability assessment of Sierra Nevada de Santa Marta, Colombia: World's most irreplaceable nature reserve." *Global Ecology and Conservation* 28: e01592. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01592>

ECMWF. (2023). "ERA5 monthly averaged data on single levels from 1959 to present." Retrieved 05-05-2022, 2023, from <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview>.

EDGAR, J. AND M. BOCANEGRA (2014). Actualización del componente Meteorológico del modelo institucional del IDEAM sobre el efecto climático de los fenómenos El Niño y La Niña en Colombia, como insumo para el Atlas Climatológico. Bogotá DC, ideam.

EMMER, A., A. JUŘICOVÁ AND B. K. VEETIL (2019). "Glacier retreat, rock weathering and the growth of lichens in the Churup Valley, Peruvian Tropical Andes." *Journal of Mountain Science* 16(7): 1485-1499. doi: <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5431-x>.

FUENTES, J. E., R. A. OLAYA AND C. E. GARCIA (2022) "Evaluation of Coastal Erosion in the Watersheds of Municipality of Buenaventura, Colombia: Using Geospatial Techniques and the Composite Vulnerability Index." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 11(11), 568. doi: <https://doi.org/10.3390/ijgi11110568>

FUNK, C., A. VERDIN, J. MICHAELSEN, P. PETERSON, D. PEDREROS AND G. HUSAK (2015). "A global satellite-assisted precipitation climatology." *Earth Syst. Sci. Data* 7(2): 275-287. doi: <https://doi.org/10.5194/essd-7-275-2015>

FUNK, C. C., P. J. PETERSON, M. F. LANDSFELD, D. H. PEDREROS, J. P. VERDIN, J. D. ROWLAND, B. E. ROMERO, G. J. HUSAK, J. C. MICHAELSEN AND A. P. VERDIN (2014). "A quasi-global precipitation time series for drought monitoring." *US Geological Survey data series* 832(4): 1-12.

GARCÍA-TADEO, D. A., M. MONTOYA-ZVALETA AND Y. TAN (2023) "Understanding the Susceptibility of the Tropical Proglacial Environment in Peru Using Optical Imagery and Radon Measurements." *Atmosphere*, 14(3), 568. doi: <https://doi.org/10.3390/atmos14030568>

GARCÍA, M. A., C. A. VARGAS AND I. Y. KOULAKOV (2019). "Local Earthquake Tomography of the Nevado del Huila Volcanic Complex (Colombia): Magmatic and Tectonic Interactions in a Volcanic-Glacier Complex System." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 124(2): 1688-1699. doi: <https://doi.org/10.1029/2018JB016324>

GIANNAKIS, I., A. BHARDWAJ, L. SAM AND G. LEONTIDIS (2023). "Deep learning universal crater detection using Segment Anything Model (SAM)." *arXiv preprint arXiv:2304.07764*. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.07764>

GORELICK, N., M. HANCHER, M. DIXON, S. ILYUSHCHENKO, D. THAU AND R. Moore (2017). "Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone." *Remote Sensing of Environment* 202: 18-27. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

HANSHAW, M. N. AND B. BOOKHAGEN (2014). "Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru." *The Cryosphere* 8(2): 359-376. doi: <https://doi.org/10.5194/tc-8-359-2014>

HU, M., Y. LI AND X. YANG (2023). "Breastsam: A study of segment anything model for breast tumor detection in ultrasound images." arXiv preprint arXiv:2305.12447. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.12447>

IDEAM (2017). Informe del Estado de los Glaciares Colombianos 2016. Bogotá, Colombia, IDEAM

IDEAM (2021). Informe del Estado de los Glaciares Colombianos 2020. Bogotá, Colombia, IDEAM

JACKSON, M. S., M. A. KELLY, J. M. RUSSELL, A. M. DOUGHTY, J. A. HOWLEY, J. W. CHIPMAN, D. A. CAVAGNARO, M. B. BABER, S. R. H. ZIMMERMAN AND B. NAKILEZA (2020). "Glacial fluctuations in tropical Africa during the last glacial termination and implications for tropical climate following the Last Glacial Maximum." *Quaternary Science Reviews* 243: 106455. doi: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106455>

KIM, J.-W. AND J.-Y. YU (2022). "Single- and multi-year ENSO events controlled by pantropical climate interactions." *npj Climate and Atmospheric Science* 5(1): 88. doi: <https://doi.org/10.1038/s41612-022-00305-y>.

KIRILLOV, A., E. MINTUN, N. RAVI, H. MAO, C. ROLLAND, L. GUSTAFSON, T. XIAO, S. WHITEHEAD, A. C. BERG AND W.-Y. LO (2023). "Segment anything." arXiv preprint arXiv:2304.02643. doi: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.02643>

KLEIN, A. G. AND J. L. KINCAID (2006). "Retreat of glaciers on Puncak Jaya, Irian Jaya, determined from 2000 and 2002 IKONOS satellite images." *Journal of Glaciology* 52(176): 65-79. doi: <https://doi.org/10.3189/S0022143000209994>

KOS, A., F. AMANN, T. STROZZI, J. OSTEN, F. WELLMANN, M. JALALI AND A. DUFRESNE (2021) "The Surface Velocity Response of a Tropical Glacier to Intra and Inter Annual Forcing, Cordillera Blanca, Peru." *Remote Sensing*, 13(14), 2694. doi: <https://doi.org/10.3390/rs13142694>

LI, Y., T. TIECHE, S. P. HORN, Y. LI, R. CHEN AND K. J. R. G. D. A. C. H. ORVIS (2019). "Mapping glacial landforms on the Chirripó massif, Costa Rica, based on Google Earth, a digital elevation model, and field observations." (60): 109-121. doi: <http://dx.doi.org/10.15517/rgac.v2019i60.36465>

LÓPEZ-MORENO, J. I., J. L. CEBALLOS, F. ROJAS-HEREDIA, J. ZABALZA-MARTINEZ, I. VIDALLER, J. REVUELTO, E. ALONSO-GONZÁLEZ, E. MORÁN-TEJEDA AND J. M. GARCÍA-RUIZ (2020). "Topographic control of glacier changes since the end of the Little Ice Age in the Sierra Nevada de Santa Marta mountains, Colombia." *Journal of South American Earth Sciences* 104: 102803. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102803>.

LUIS, D. L., B. MARÍA TERESA, P. MANUEL, A. ANDRÉS, B. MARTÍN AND J. D. LIZ (2019). "Monitoring Biodiversity and Ecosystem Services in Colombia's High Andean Ecosystems: Toward an

Integrated Strategy.” *Mountain Research and Development* 39(3): A8. doi: <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-19-00020.1>

MALONE, A. G. O., E. T. BROGLIE AND M. WRIGHTSMAN (2022) “The Evolution of the Two Largest Tropical Ice Masses since the 1980s.” *Geosciences* 12 DOI: 10.3390/geosciences12100365. doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences12100365>

MOHR, J., A. TEWES, H. AHRENDTS AND T. GAISER (2023) “Assessing the Within-Field Heterogeneity Using Rapid-Eye NDVI Time Series Data.” *Agriculture* 13 DOI: 10.3390/agriculture13051029. doi: <https://doi.org/10.3390/agriculture13051029>

MÖLG, T., N. J. CULLEN, D. R. HARDY, M. WINKLER AND G. KASER (2009). “Quantifying Climate Change in the Tropical Midtroposphere over East Africa from Glacier Shrinkage on Kilimanjaro.” *Journal of Climate* 22(15): 4162-4181. doi: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2954.1>

MORRIS, J., A. POOLE AND A. KLEIN (2006). “Retreat of Tropical Glaciers in Colombia and Venezuela from 1984 to 2004 as Measured from ASTER and Landsat Images.”

PEPIN, N. C., E. ARNONE, A. GOBIET, K. HASLINGER, S. KOTLARSKI, C. NOTARNICOLA, E. PALAZZI, P. SEIBERT, S. SERAFIN, W. SCHÖNER, S. TERZAGO, J. M. THORNTON, M. VUILLE AND C. ADLER (2022). “Climate Changes and Their Elevational Patterns in the Mountains of the World.” *Reviews of Geophysics* 60(1): e2020RG000730. doi: <https://doi.org/10.1029/2020RG000730>

PERMANA, D. S., L. G. THOMPSON, E. MOSLEY-THOMPSON, M. E. DAVIS, P.-N. LIN, J. P. NICOLAS, J. F. BOLZAN, B. W. BIRD, V. N. MIKHALENKO, P. GABRIELLI, V. ZAGORODNOV, K. R. MOUNTAIN, U. SCHOTTERER, W. HANGGORO, M. N. HABIBIE, Y. KAIZE, D. GUNAWAN, G. SETYADI, R. D. SUSANTO, A. FERNÁNDEZ AND B. G. MARK (2019). “Disappearance of the last tropical glaciers in the Western Pacific Warm Pool (Papua, Indonesia) appears imminent.” *PNAS* 116(52): 26382-26388. doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1822037116>

PLANET (2022). Planet imagery product specification: PlanetScope & RapidEye, Planet Team San Francisco, CA, USA.

POVEDA, G., D. M. ÁLVAREZ AND Ó. A. RUEDA (2011). “Hydro-climatic variability over the Andes of Colombia associated with ENSO: a review of climatic processes and their impact on one of the Earth’s most important biodiversity hotspots.” *Climate Dynamics* 36(11): 2233-2249. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0931-y>

POVEDA, G. AND K. PINEDA (2009). “Reassessment of Colombia’s tropical glaciers retreat rates: are they bound to disappear during the 2010–2020 decade?” *Adv. Geosci.* 22: 107-116. doi: <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-107-2009>

PREETY, K., A. K. PRASAD, A. K. VARMA AND H. EL-ASKARY (2022) “Accuracy Assessment, Comparative Performance, and Enhancement of Public Domain Digital Elevation Models (ASTER 30 m, SRTM 30 m, CARTOSAT 30 m, SRTM 90 m, MERIT 90 m, and TanDEM-X 90 m) Using DGPS.” *Remote Sensing* 14 doi: 10.3390/rs14061334.

QUESADA-ROMÁN, A., N. CAMPOS, J. ALCALÁ-REYGOSA AND S. GRANADOS-BOLAÑOS (2020). "Equilibrium-line altitude and temperature reconstructions during the Last Glacial Maximum in Chirripó National Park, Costa Rica." *Journal of South American Earth Sciences* 100: 102576. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102576>

QUESADA-ROMAN, A., N. CAMPOS AND S. GRANADOS-BOLANOS (2021). "Tropical glacier reconstructions during the last Glacial Maximum in Costa Rica." 38(1): 55-64. doi: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2021.1.1600>

RABATEL, A., J. L. CEBALLOS, N. MICHELETTI, E. JORDAN, M. BRAITMEIER, J. GONZÁLEZ, N. MÖLG, M. MÉNÉGOZ, C. HUGGEL AND M. ZEMP (2018). "Toward an imminent extinction of Colombian glaciers?" *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 100(1): 75-95. doi: <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1383015>.

RACOVITEANU, A. E., Y. ARNAUD, M. W. WILLIAMS AND J. ORDOÑEZ (2008). "Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing." *Journal of Glaciology* 54(186): 499-510. doi: <https://doi.org/10.3189/002214308785836922>

RAVE-BONILLA, Y. P. AND J. J. SÁNCHEZ (2021). "Estructuras de disyunción columnar en lavas asociadas al Complejo Volcánico Nevado del Ruíz (Colombia): facies, dimensiones y geometría J Boletín de Geología." 43: 45-62.

ROMSHOO, S. A., K. O. MURTAZA AND T. ABDULLAH (2022). "Towards understanding various influences on mass balance of the Hoksar Glacier in the Upper Indus Basin using observations." *Scientific Reports* 12(1): 15669. doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20033-w>.

ROY, A. J. AND M. S. LACHNIET (2010). "Late Quaternary glaciation and equilibrium-line altitudes of the Mayan Ice Cap, Guatemala, Central America." *Quaternary Research* 74(1): 1-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2010.04.010>

SILVERIO, W. AND J.-M. JAQUET (2005). "Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery." *Remote Sensing of Environment* 95(3): 342-350. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.012>

SILVERIO, W. AND J.-M. JAQUET (2017). "Evaluating glacier fluctuations in Cordillera Blanca (Peru) by remote sensing between 1987 & 2016 in the context of ENSO." *Archives des Sciences* 69: 145-161.

STANSELL, N. D., P. J. POLISSAR AND M. B. ABBOTT (2007). "Last glacial maximum equilibrium-line altitude and paleo-temperature reconstructions for the Cordillera de Mérida, Venezuelan Andes." *Quaternary Research* 67(1): 115-127. doi: <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2006.07.005>

TURPO CAYO, E. Y., M. O. BORJA, R. ESPINOZA-VILLAR, N. MORENO, R. CAMARGO, C. ALMEIDA, K. HOPFGARTNER, C. YARLEQUE AND C. M. SOUZA (2022) "Mapping Three Decades of Changes in the Tropical Andean Glaciers Using Landsat Data Processed in the Earth Engine." *Remote Sensing* 14 DOI: 10.3390/rs14091974.

VEETTIL, B. K., U. F. BREMER, S. F. DE SOUZA, É. L. B. MAIER AND J. C. SIMÕES (2016). "Influence of ENSO and PDO on mountain glaciers in the outer tropics: case studies in Bolivia." *Theoretical and Applied Climatology* 125(3): 757-768. doi: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1545-4>.

VEETTIL, B. K. AND U. KAMP (2017). "Remote sensing of glaciers in the tropical Andes: a review." *International Journal of Remote Sensing* 38(23): 7101-7137. doi: <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1371868>

VEETTIL, B. K. AND U. KAMP (2019) "Global Disappearance of Tropical Mountain Glaciers: Observations, Causes, and Challenges." *Geosciences* 9 doi: <https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>

VEETTIL, B. K., É. LEANDRO BAYER MAIER, U. F. BREMER AND S. F. DE SOUZA (2014). "Combined influence of PDO and ENSO on northern Andean glaciers: a case study on the Cotopaxi ice-covered volcano, Ecuador." *Climate Dynamics* 43(12): 3439-3448. doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2114-8>

VEETTIL, B. K. AND J. C. SIMÕES (2019). "The 2015/16 El Niño-related glacier changes in the tropical Andes." *Frontiers of Earth Science* 13(2): 422-429. doi: <https://doi.org/10.1007/s11707-018-0738-4>

VEETTIL, B. K. AND S. WANG (2018a). "State and fate of the remaining tropical mountain glaciers in australasia using satellite imagery." *Journal of Mountain Science* 15(3): 495-503. doi: <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4539-0>

VEETTIL, B. K. AND S. WANG (2018b). "An update on recent glacier changes in Mexico using Sentinel-2A data." *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 100(3): 307-318. doi: <https://doi.org/10.1080/04353676.2018.1478672>

VEETTIL, B. K., S. WANG, J. C. SIMÕES AND S. F. R. PEREIRA (2018). "Glacier monitoring in the eastern mountain ranges of Bolivia from 1975 to 2016 using Landsat and Sentinel-2 data." *Environmental Earth Sciences* 77(12): 452. doi:<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7640-y>.

VUILLE, M., M. CAREY, C. HUGGEL, W. BUYTAERT, A. RABATEL, D. JACOBSEN, A. SORUCO, M. VILLACIS, C. YARLEQUE, O. ELISON TIMM, T. CONDOM, N. SALZMANN AND J.-E. SICART (2018). "Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead." *Earth-Science Reviews* 176: 195-213. doi: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>.

WILLIAMS JR, R. S. AND J. G. FERRIGNO (1989). *Glaciers of Irian Jaya, Indonesia, and New Zealand*.

YUCEL, I., A. GÜVENTÜRK AND O. L. SEN (2015). "Climate change impacts on snowmelt runoff for mountainous transboundary basins in eastern Turkey." *International Journal of Climatology* 35(2): 215-228. doi: <https://doi.org/10.1002/joc.3974>.

ZEMP, M., M. HUSS, E. THIBERT, N. ECKERT, R. MCNABB, J. HUBER, M. BARANDUN, H. MACHGUTH, S. U. NUSSBAUMER, I. GÄRTNER-ROER, L. THOMSON, F. PAUL, F. MAUSSION, S. KUTUZOV AND J. G.

COGLEY (2019). "Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016." *Nature* 568(7752): 382-386. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1071-0>.

ZEMP, M., S. U. NUSSBAUMER, I. GÄRTNER-ROER, J. BANNWART, F. PAUL AND M. HOELZLE (2021). "Global Glacier Change Bulletin Nr. 4 (2018-2019)." WGMS 4.

