

Análisis de variabilidad climática en Nevados Colombianos mediante datos de TerraClimate y Google Earth Engine 1960 - 2022

**Maestría en Gestión de la Información y
Tecnologías Geoespaciales**

Juan Sebastián Hernández Santana

21 de diciembre de 2023

1 Introducción

Los nevados de Colombia, imponentes y místicos han sido durante siglos guardianes silenciosos de la historia climática del país. Sin embargo, en las últimas décadas, estos majestuosos picos han experimentado transformaciones significativas, reflejando la huella del cambio climático en su estructura térmica. En este análisis, nos adentramos en una descripción minuciosa de las variaciones de temperatura en estos nevados emblemáticos utilizando datos detallados de TerraClimate y la potencia analítica de Google Earth Engine. ¿Qué revelarán estas décadas de datos sobre la temperatura en estos ecosistemas vulnerables? La respuesta yace en la exploración de patrones climáticos anuales, identificación de tendencias significativas y la evaluación de la evolución térmica que podría moldear el futuro de estos paisajes.

Al analizar la temperatura en los nevados colombianos, no solo estamos observando datos; estamos descifrando las **crónicas climáticas** de estos icónicos paisajes. Desde el Nevado del Ruiz hasta el Nevado del Cocuy, estas altas cumbres han sido fuentes de agua y vida para comunidades locales, hábitats de biodiversidad excepcional y elementos fundamentales de la identidad nacional. La comprensión de cómo estas regiones han respondido a los cambios en el clima es crucial para discernir la dirección que podría tomar su destino. A través de métodos avanzados de análisis y la capacidad de extraer información detallada de conjuntos de datos complejos, este estudio busca desentrañar los secretos de la variabilidad climática en los nevados, iluminando así un camino hacia la preservación de estos tesoros naturales.

A medida que exploramos las variaciones de temperatura desde 1990 hasta la actualidad, nos embarcamos en un viaje hacia la comprensión más profunda de los desafíos y oportunidades que enfrentan estos ecosistemas únicos. ¿Qué perspectivas revelará el análisis de datos detallados? ¿Qué significado tienen estas variaciones para las comunidades locales, la biodiversidad y el futuro de estos paisajes de alta montaña? Destacando su importancia en el contexto del cambio climático global y su significado para el mañana que todos compartimos.

2 Contextualización de los Nevados de Colombia

La importancia ecológica de estos nevados es insustituible. Sus ecosistemas albergan una diversidad de flora y fauna adaptadas a condiciones extremas, contribuyendo a la regulación climática y al mantenimiento de cuencas hidrográficas vitales para la agricultura y abastecimiento de agua potable para comunidades aledañas. Socialmente, estos nevados son pilares de identidad para poblaciones locales, que encuentran en ellos su patrimonio cultural, mitológico y ancestral. Además, son destinos turísticos fundamentales que generan ingresos económicos, empleo y desarrollo para regiones aledañas, promoviendo el ecoturismo y la conservación de la naturaleza. La relación **simbiótica** entre estos nevados y las comunidades circundantes es un tejido fundamental en la historia y el presente de Colombia.

2.1 Nevado del Ruiz:

Ubicado en la Cordillera Central, el Nevado del Ruiz es el segundo volcán más alto de Colombia, con una altura de aproximadamente 5,321 metros sobre el nivel del mar. Es un ícono nacional y parte fundamental del Parque Nacional Natural Los Nevados. A lo largo de los años, ha sido testigo de erupciones volcánicas que han dejado una huella tanto en la geografía como en la historia del país.



Figura 1: Fotografía del Nevado del Ruiz. Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGC.

2.2 Nevado del Tolima:

También en la Cordillera Central, el Nevado del Tolima se eleva a alrededor de 5,220 metros. Este nevado es reconocido por su imponente silueta y su importancia en la mitología indígena,

siendo parte de la cosmovisión de comunidades locales. Su significancia ecológica radica en su contribución a la regulación hídrica y alberga ecosistemas únicos.



Figura 2: Fotografía del Volcán Nevado del Tolima. Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGC.

2.3 Nevado del Huila:

En la Cordillera Central, el Nevado del Huila se destaca por su altura, aproximadamente 5,750 metros sobre el nivel del mar. A pesar de ser uno de los menos explorados, su relevancia como fuente de ríos y sistemas hídricos es crucial para la región, proporcionando agua para la agricultura y el consumo humano.



Figura 3: Fotografía del Volcán Nevado del Huila. Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGC.

2.4 Nevado Santa Isabel:

Formando parte del Parque Nacional Natural Los Nevados junto al Ruiz y Tolima, el Nevado Santa Isabel destaca por sus glaciares y su importancia para la regulación hídrica en la región. Con alrededor de 4,950 metros, es un atractivo turístico y área de estudio científico.



Figura 4: Fotografía del Volcán Nevado de Santa Isabel. Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGC.

2.5 Nevado del Cocuy:

En la Sierra Nevada del Cocuy, este nevado tiene varias cumbres que superan los 5,000 metros de altura. Es un paraíso natural con una variedad de ecosistemas que van desde páramos hasta glaciares, albergando una rica biodiversidad.



Figura 5: Fotografía de Sierra nevada del Cocuy. Fuente: IDEAM

2.6 Nevado del Puracé:

Ubicado en la Cordillera Central, el Nevado del Puracé alcanza aproximadamente 4,760 metros de altura. Es reconocido por su cráter volcánico y lagunas, siendo una fuente crucial de agua para las comunidades locales y un sitio de importancia cultural e histórica.



Figura 6: Fotografía del Volcán Nevado del Tolima. Fuente: Servicio Geológico Colombiano SGC.

3 Metodología

En esta investigación, se empleó Google Earth Engine (GEE) como plataforma clave para el análisis climático de los nevados colombianos, centrándose en el estudio de las temperaturas a lo largo del tiempo. Se delinearon meticulosamente las áreas de estudio correspondientes a los principales nevados, como El Cocuy, Nevado del Ruíz, Nevado del Tolima, Nevado de Santa Isabel, Nevado del Huila y Puracé. A través de la extracción de datos climáticos del conjunto TerraClimate y el modelado con técnicas avanzadas como ARIMA, se exploraron las fluctuaciones y tendencias temporales de las temperaturas máximas, mínimas y promedio. Este enfoque multifacético permitió analizar no solo los extremos climáticos, sino también la variabilidad estacional y anual en estos entornos críticos. A continuación, las acciones realizadas dentro del proceso:

- **Conexión con Google Earth Engine:** Se estableció la conexión con Google Earth Engine (GEE) para acceder al conjunto de datos TerraClimate, permitiendo obtener

información climática a nivel global con un enfoque específico en los nevados colombianos.

- **Conformación de áreas de estudio:** Se delimitaron geometrías representativas de los principales nevados colombianos: El Cocuy, Nevado del Ruíz, Nevado del Tolima, Nevado de Santa Isabel, Nevado del Huila y Puracé. Estas áreas delimitadas sirvieron como zonas de estudio para el análisis de temperaturas.

Geometrías utilizadas	1. El Cocuy	
	2. Los nevados	Nevado del Ruíz
		Nevado del Tolima
		Nevado de Santa Isabel
	3. Nevado del Huila	
	4. Puracé	

Tabla 1: Geometrías utilizadas en el análisis. Fuente: Elaboración propia (2023).

- **Extracción de valores extremos de temperatura:** Se realizó la extracción de valores extremos de temperaturas máximas y mínimas en los nevados, obteniendo los intervalos de temperaturas extremas que definen los máximos y mínimos históricos registrados.
- **Análisis de temperatura:** Se extrajeron series temporales de temperaturas máximas, mínimas y promedio en los nevados seleccionados, permitiendo analizar el comportamiento temporal de estas variables a lo largo de años de estudio.
- **Predicción de la temperatura promedio con modelo ARIMA:** Se implementó un modelo de predicción basado en Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) para prever la tendencia futura de la temperatura promedio en los nevados. Se utilizaron datos históricos para entrenar y validar el modelo.
- **Distribuciones de temperatura mínima por año y mes:** Se generaron distribuciones de temperaturas mínimas por año y mes, ofreciendo una visión detallada de las variaciones estacionales y anuales en los nevados, permitiendo identificar patrones climáticos.

4 Resultados

A través del análisis exhaustivo de temperaturas máximas, mínimas y promedio en áreas específicas como El Cocuy, Nevado del Ruíz, Nevado del Tolima, Nevado de Santa Isabel, Nevado del Huila y Puracé, se descubrieron particularidades climáticas y estacionales. Estos resultados proporcionan una perspectiva detallada de la compleja dinámica climática en estos nevados, contribuyendo a una comprensión más profunda de los cambios ambientales en estas regiones montañosas colombianas.

4.1 Nevados del Ruiz, del Tolima y Santa Isabel

Puesto que, los tres (3) Nevados son colindantes entre sí, la zona de estudio se delimite al Parque Nacional los Nevados, el cual inmiscuye los objetos de estudio. En el Nevado del Ruíz, se registraron extremos térmicos más pronunciados, con intervalos de temperaturas máximas y mínimas más amplios en comparación con otros nevados. Se identificó una tendencia hacia temperaturas máximas y mínimas más elevadas en los últimos años. Las temperaturas en el Nevado del Tolima mostraron una estabilidad relativa en las mediciones de máximas y mínimas a lo largo del tiempo. Sin embargo, se destacaron variaciones notables en las temperaturas promedio, sugiriendo patrones climáticos más complejos en este nevado específico. La investigación reveló una marcada estacionalidad en las temperaturas del Nevado de Santa Isabel, con variaciones considerables entre los meses y años analizados. Se identificó un patrón de temperaturas mínimas más bajas en ciertos periodos, destacando la relevancia de los factores estacionales en esta región.

Máximo de las temperaturas máximas	19.8
Máximo de las temperaturas mínimas	12.2
Mínimo de las temperaturas máximas	1.5
Mínimo de las temperaturas mínimas	-5.7

Tabla 2: Temperaturas máximas y mínimas 1960 – 2022 (Nevados del Ruíz, del Tolima y Santa Isabel). Fuente: Elaboración propia (2023).

A comparación de los demás Nevados objeto de estudio, los Nevados (Ruíz, Tolima y Santa Isabel) la temperatura máxima identificada demuestra el menor valor; mientras que, su temperatura mínima demostró ser la menor respecto a todos los demás nevados. Su ubicación

en la cordillera de Los Andes, a una considerable altitud, influye significativamente en las bajas temperaturas que experimenta. Su elevada altitud genera un ambiente más frío, especialmente en las cumbres, donde la presencia de nieve y hielo es más común.

Representación de temperaturas máximas y mínimas.

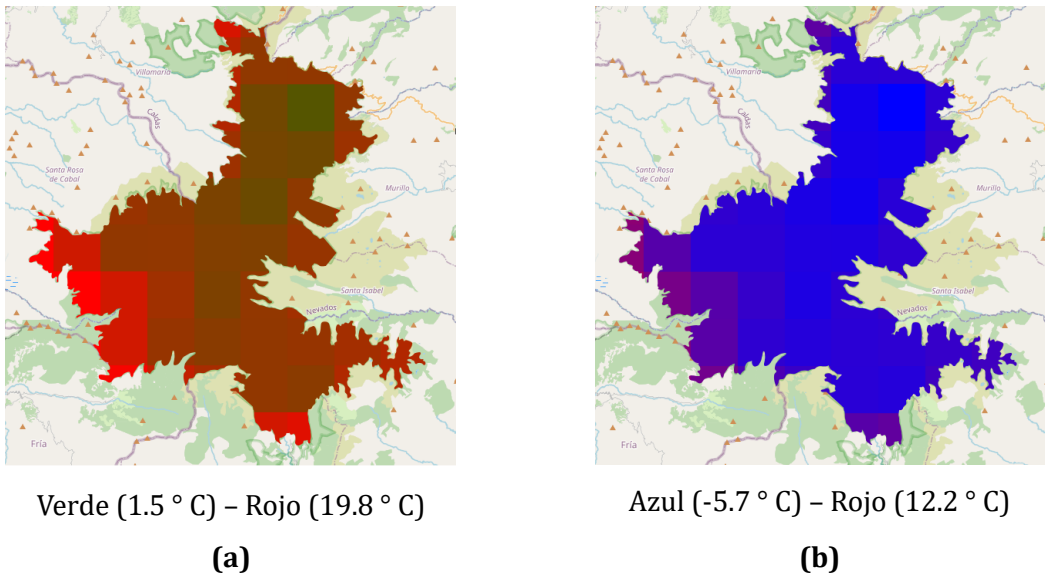


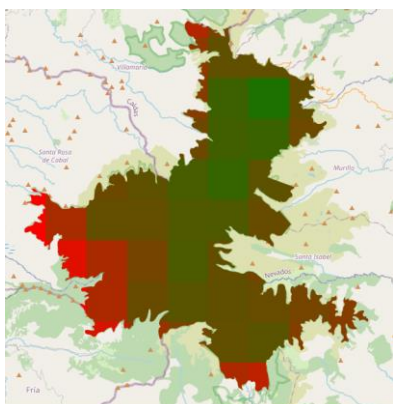
Figura 7. (a) Temperaturas máximas y (b) temperaturas mínimas en zona de estudio de los Nevados. Fuente: Elaboración propia (2023).

La representación espacial ilustra valores de temperatura bajos en zonas donde la cobertura corresponde a nieve, mientras que, aumentan su valor conforme se alejan de dicha cobertura.

Temperatura máxima de los promedios de todo el periodo	14.55
Temperatura mínima de los promedios de todo el periodo	-1.0

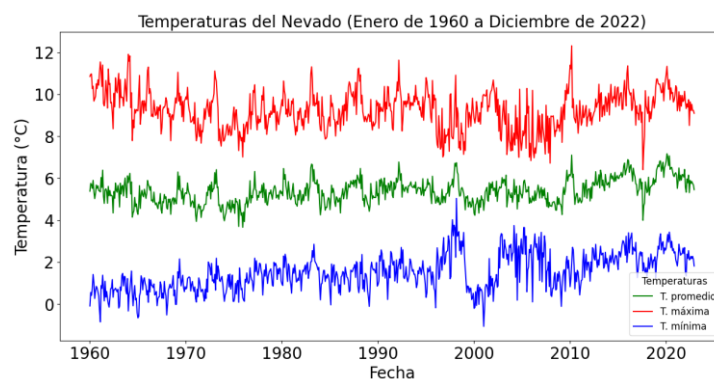
Tabla 3: Temperaturas máximas y mínimas de los promedios 1960 – 2022 (Nevados del Ruíz, del Tolima y Santa Isabel). Fuente: Elaboración propia (2023).

Conforme a las temperaturas promedio del intervalo de estudio, en Nevado del Ruíz enseña una temperatura máxima promedio de 14.55 ° C, mientras que, demuestra valores mínimos de -1 ° C.

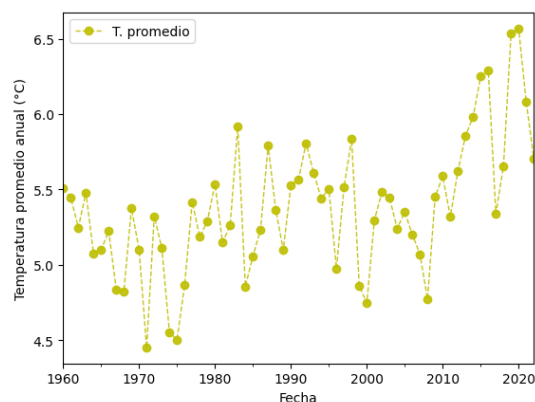


Verde (-1°C) – Rojo (14.6°C)

(a)



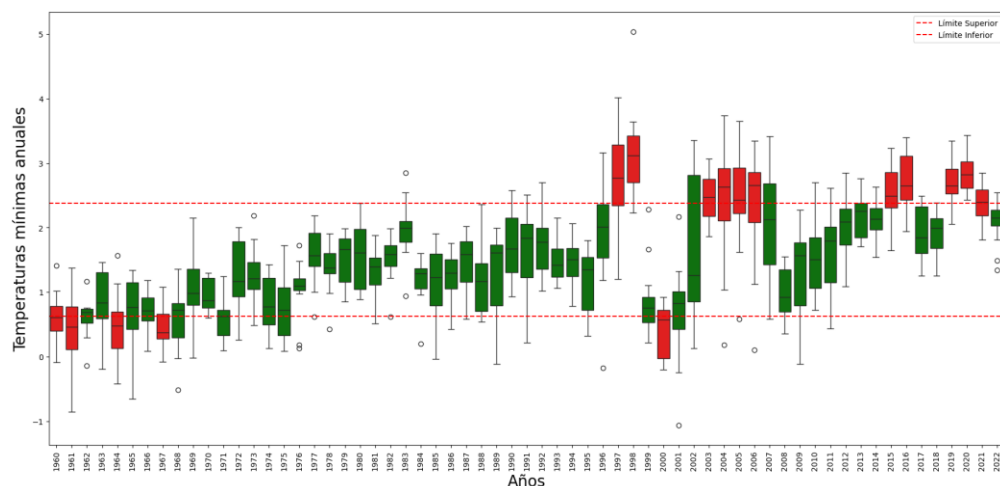
(b)



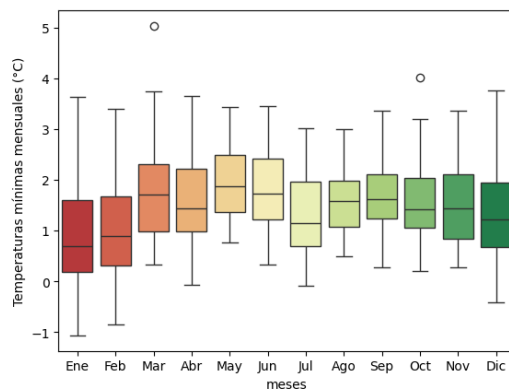
(c)

Figura 8. (a) Temperatura promedio, (b) Serie de tiempo de temperaturas máximas, mínimas y promedio 1960 – 2022, (c) Serie de tiempo de temperatura promedio 1960 – 2022 en zona de estudio de los Nevados. Fuente: Elaboración propia (2023).

La exploración encontró un aumento significativo en la temperatura promedio desde 1980 a 2000 y desde 2007 a 2022, esto presenta concordancia con el “Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de la temperatura máxima media para las regiones hidroclimáticas de Colombia” (IDEAM, s.f.), donde se manifiesta que dicho intervalo presenta las anomalías más altas, a diferencia del intervalo de 1960 a 1980, donde se presentó un decrecimiento del valor promedio.



(a)



(b)

Figura 9. (a) Gráfico de caja y bigotes de la temperatura mínima, (b) gráfico de caja y bigotes de temperatura mínima por mes en zona de estudio de los Nevados. Fuente: Elaboración propia (2023).

En términos de la distribución de la temperatura mínima por año, se identifican años que se salen de la primera desviación estándar de la distribución del histórico, siendo las más graves (Por aumento de temperatura) en 1997 – 1998 (CAF, s.f.), 2003 – 2006 (Martínez Navarro et al., 2004), 2015 – 2016 (OMM, 2016) y 2019 – 2021 (NOAA, s.f.). Lo anterior coincide con otras investigaciones que ilustran estos intervalos cómo los más calurosos desde 1980. Por otro lado, los meses con temperatura mínima considerable comprenden el mes de Marzo y Mayo.

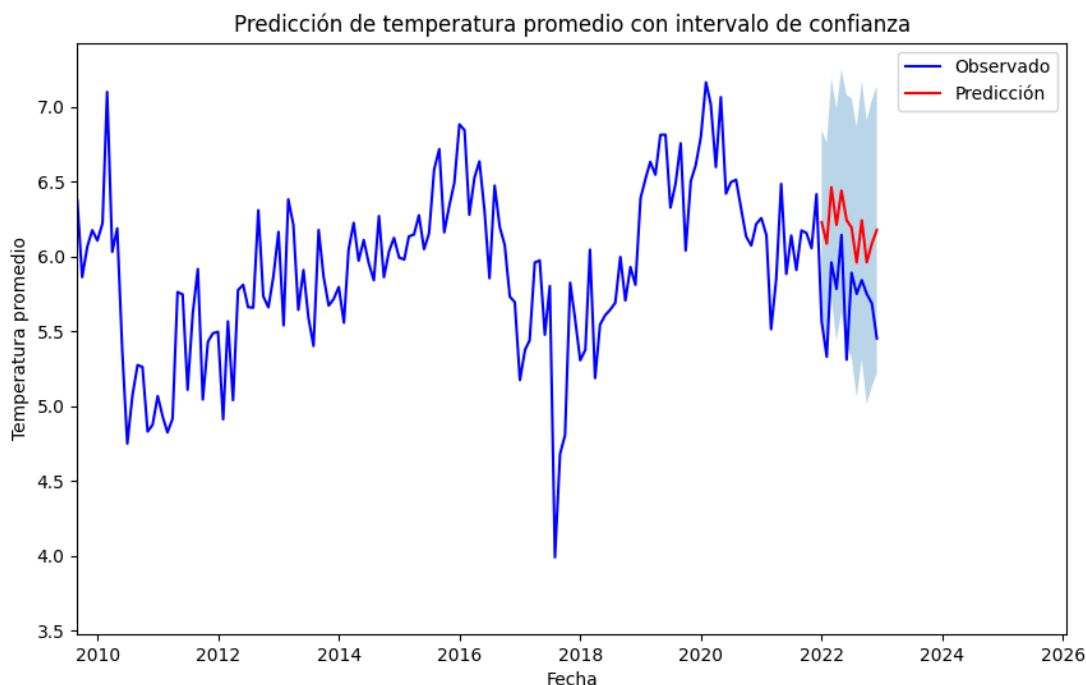


Figura 10. Previsión del cambio en temperatura para el año 2022 yuxtapuesto con el registro real presentado en zona de estudio de los Nevados. Fuente: Elaboración propia (2023).

MSE	0.286
MAE	0.486

Tabla 4: Métricas de precisión de modelo ARIMA para previsión de temperaturas promedio 2022 (Nevados del Ruíz, del Tolima y Santa Isabel). Fuente: Elaboración propia (2023).

Una vez se caracterizó el comportamiento de la temperatura promedio, se procedió a realizar un modelo ARIMA con los siguientes parámetros:

- **p (Lag de autorregresión):** Este parámetro indica el número de términos de autorregresión (AR) en el modelo. Un valor de $p = 120$ significa que se considerarán los últimos 120 periodos.
- **d (Diferenciación):** Este parámetro representa el grado de diferenciación necesario para hacer que la serie temporal sea estacionaria. Un valor de $d=1$ indica que se está utilizando una diferenciación de primer orden.

- **q (Términos de media móvil):** Este parámetro representa el número de términos de media móvil (MA) en el modelo. Un valor de $q=0$ significa que solo se considera el término de autoregresión sin términos de media móvil.

En promedio, los cuadrados de los errores entre las predicciones y los valores reales de temperatura son relativamente bajos. En este caso, un valor de 0.286 sugiere que las predicciones tienden a desviarse moderadamente de los valores reales, pero en general, el modelo muestra una buena capacidad para ajustarse a los datos observados. En concordancia, un MAE de 0.486 indica que, en promedio, las diferencias absolutas entre las predicciones y los valores reales de temperatura son de aproximadamente 0.486 grados centígrados. Un valor de MAE más bajo indica una menor dispersión entre las predicciones y los valores reales. El modelo esperaba temperaturas promedio más altas de las ocurridas realmente.

4.2 Nevado del Huila:

Los análisis en el Nevado del Huila señalaron una relativa estabilidad en las temperaturas máximas, mientras que las mínimas presentaron fluctuaciones más notables. Se observó una tendencia al incremento gradual de las temperaturas promedio en los últimos años, sugiriendo posibles cambios climáticos en este nevado.

Máximo de las temperaturas máximas	21.5
Máximo de las temperaturas mínimas	13.4
Mínimo de las temperaturas máximas	2.3
Mínimo de las temperaturas mínimas	-3.6

Tabla 5: Temperaturas máximas y mínimas 1960 – 2022 (Nevado del Huila). Fuente:
Elaboración propia (2023).

A comparación de los demás Nevados objeto de estudio, el Nevado del Huila muestra una temperatura máxima similar a la obtenida en los Nevados, mientras que difiere de forma considerable con el Nevado del Cocuy, esto plantea una posible relación entre las diversas latitudes tratadas en el análisis; mientras que, su temperatura mínima demostró ser mayor a la encontrada en los Nevados y el Nevado del Cocuy.

Representación de temperaturas máximas y mínimas.

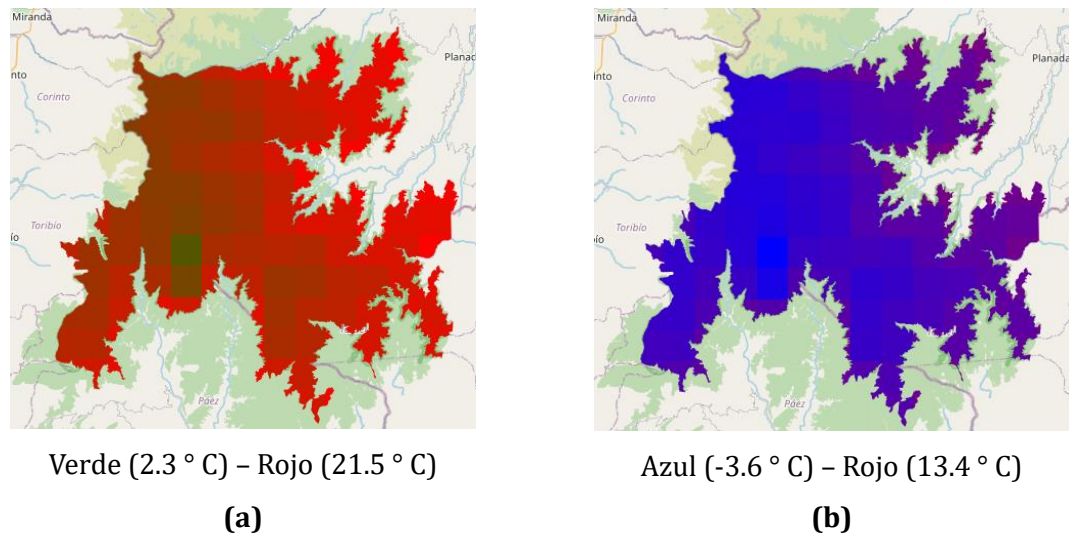


Figura 11. (a) Temperaturas máximas y (b) temperaturas mínimas en zona de estudio del Nevado del Huila. Fuente: Elaboración propia (2023).

La representación espacial de las temperaturas revela una relación significativa con la presencia de nieve en las zonas montañosas. Las áreas cubiertas por nieve tienden a exhibir temperaturas más bajas, lo cual está directamente asociado con la capacidad de la nieve para reflejar la radiación solar, limitando la absorción de calor. Este fenómeno es fundamental en las altitudes elevadas de los nevados, donde la incidencia de luz solar es alta, pero la absorción es menor debido a la presencia de la capa de nieve. En consecuencia, áreas con cobertura de nieve, como la cumbre del Nevado, tiende a mostrar valores de temperatura más bajos.

Temperatura máxima de los promedios de todo el periodo	16.1
Temperatura mínima de los promedios de todo el periodo	-0.05

Tabla 6: Temperaturas máximas y mínimas de los promedios 1960 – 2022 (Nevado del Huila). Fuente: Elaboración propia (2023).

Conforme a las temperaturas promedio del intervalo de estudio, en Nevado del Ruíz enseña una temperatura máxima promedio de 16.1 ° C, mientras que, demuestra valores mínimos de -0.05 ° C. Siendo (En promedio) más caluroso que los Nevados (Ruíz, Tolima y Santa Isabel).

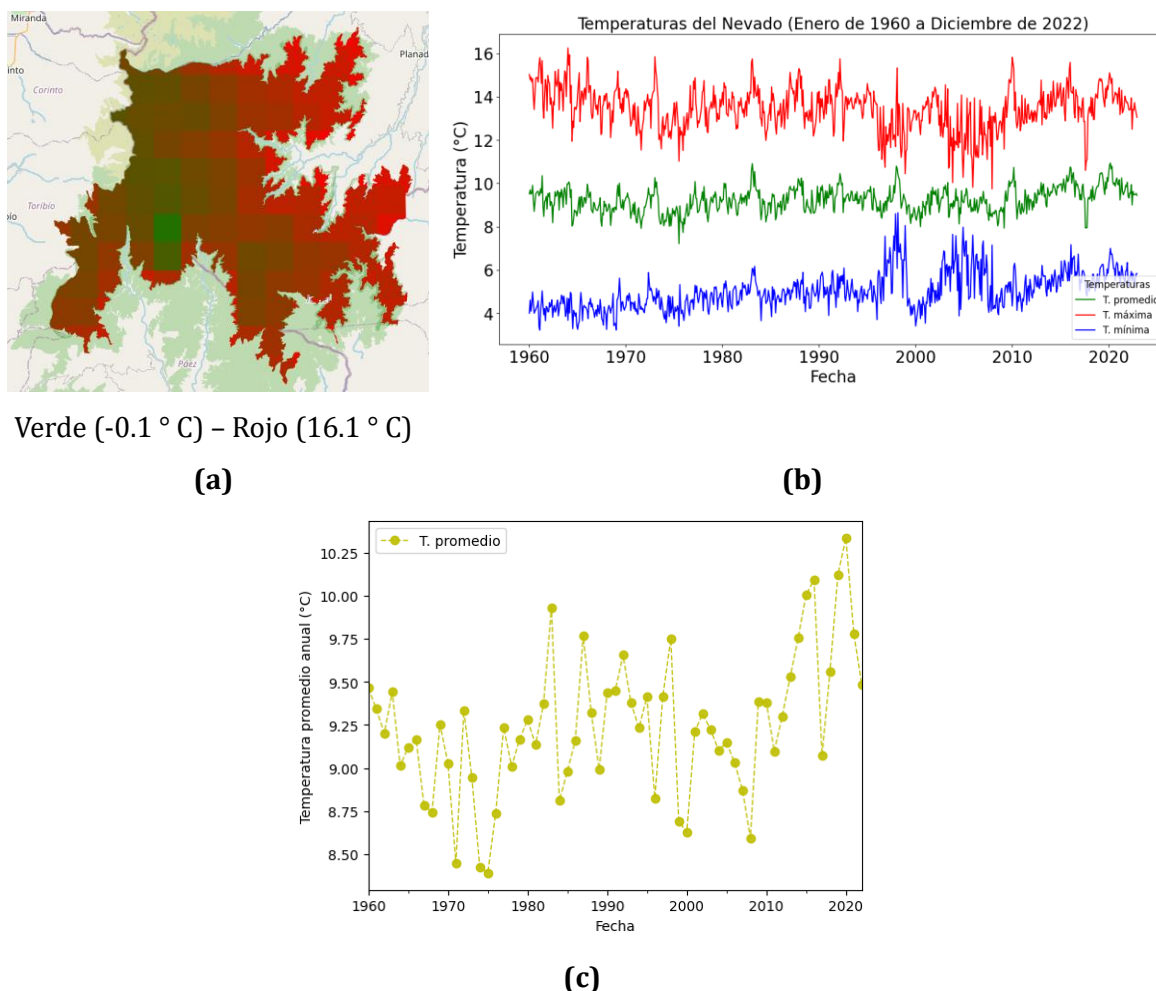
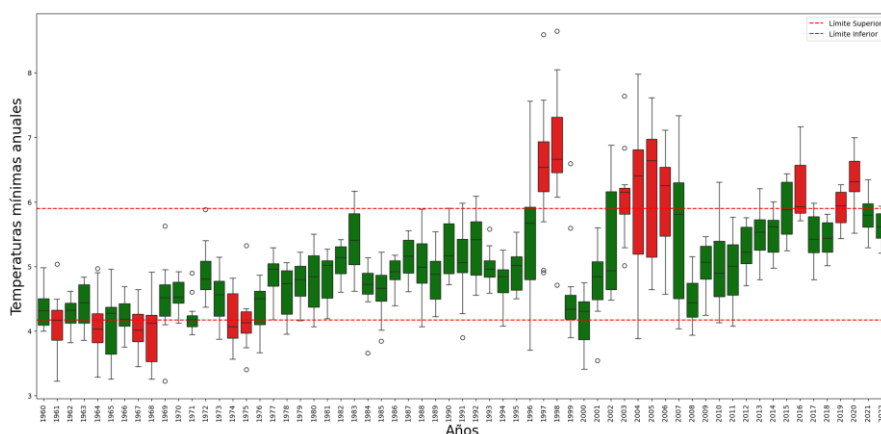
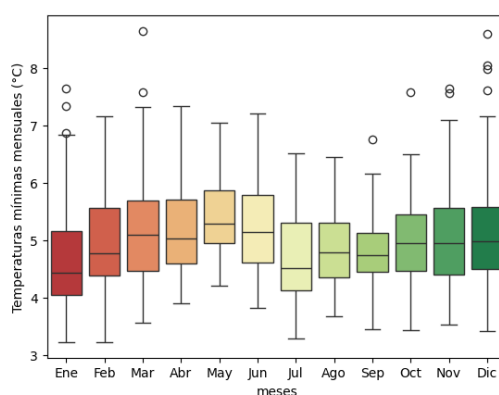


Figura 12. (a) Temperatura promedio, (b) Serie de tiempo de temperaturas máximas, mínimas y promedio 1960 – 2022, (c) Serie de tiempo de temperatura promedio 1960 – 2022 en zona de estudio del Nevado del Huila. Fuente: Elaboración propia (2023).

La exploración encontró un aumento significativo en la temperatura promedio desde 1980 a 1995 y desde 2007 a 2022, esto presenta concordancia con el “Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de la temperatura máxima media para las regiones hidroclimáticas de Colombia” (IDEAM, s.f.), donde se manifiesta que dicho intervalo presenta las anomalías más altas, a diferencia del intervalo de 1960 a 1975, donde se presentó un decrecimiento del valor promedio. Desde 1975 a 1995 se evidencia un aumento significativo de la temperatura promedio.



(a)



(b)

Figura 13. (a) Gráfico de caja y bigotes de la temperatura mínima, (b) gráfico de caja y bigotes de temperatura mínima por mes en zona de estudio del Nevado del Huila.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En términos de la distribución de la temperatura mínima por año, se identifican años que se salen de la primera desviación estándar de la distribución del histórico, siendo las más graves (Por aumento de temperatura) en 1997 – 1998 (CAF, s.f.), 2003 – 2006 (Martínez Navarro et al., 2004), 2016 (OMM, 2016) y 2019 – 2020 (NOAA, s.f.). Lo anterior coincide con otras investigaciones que ilustran estos intervalos cómo los más calurosos desde 1980. Por otro lado, los meses con temperatura mínima considerable comprenden el mes de Mayo y Junio. Mientras que, los meses con temperatura mínima más baja corresponden a Enero, Julio y Septiembre. Si bien es cierto, las medianas de algunos años no sobrepasan la primera desviación por una mínima diferencia, se presentan menos años que sobrepasen este nivel, comparado con los Nevados, que presentaban un mayor número de intervalos con aumentos significativos.

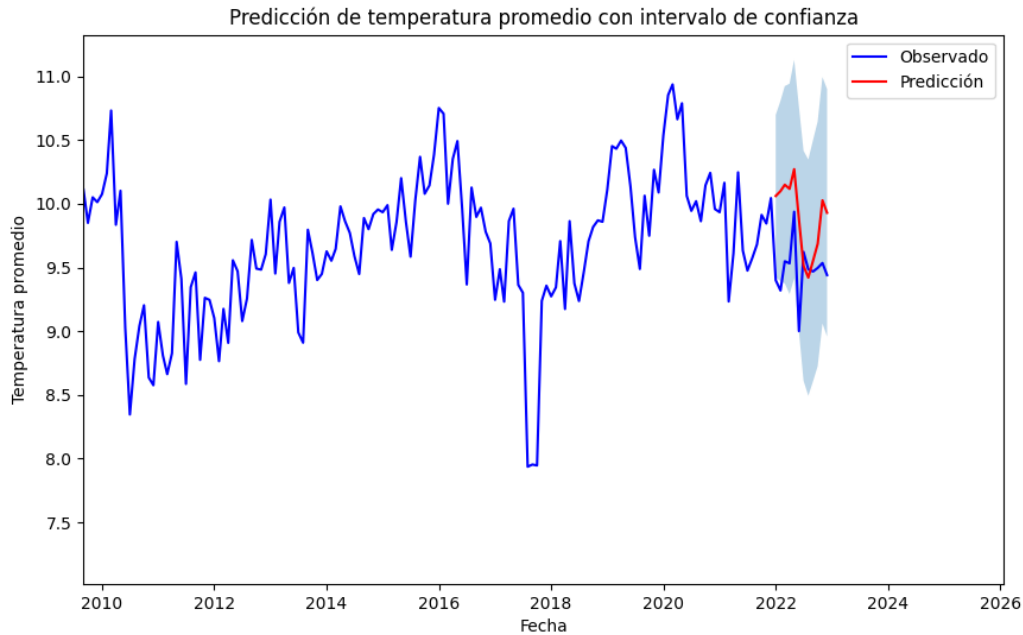


Figura 14. Previsión del cambio en temperatura para el año 2022 yuxtapuesto con el registro real presentado en zona de estudio del Nevado del Huila. Fuente: Elaboración propia (2023).

MSE	0.264
MAE	0.439

Tabla 7: Métricas de precisión de modelo ARIMA para previsión de temperaturas promedio 2022 (Nevado del Huila). Fuente: Elaboración propia (2023).

Con un MSE de 0.264, se observa que el modelo tiene un rendimiento razonablemente bueno en términos de ajuste a los datos reales. Esto indica que, en promedio, los errores al cuadrado entre las predicciones y los valores reales son relativamente bajos, sugiriendo una buena capacidad del modelo para predecir las variaciones en las temperaturas. Además, el MAE de 0.439 indica que las diferencias absolutas entre las predicciones y los valores reales promedio son alrededor de 0.439 grados centígrados. Un valor de MAE más bajo indica una menor dispersión entre las predicciones y los valores reales, lo que sugiere un buen ajuste del modelo a los datos observados. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, aunque los errores son moderados, el modelo

podría beneficiarse de refinamientos adicionales para mejorar aún más su precisión en la predicción de las temperaturas promedio.

4.3 Nevado del Cocuy:

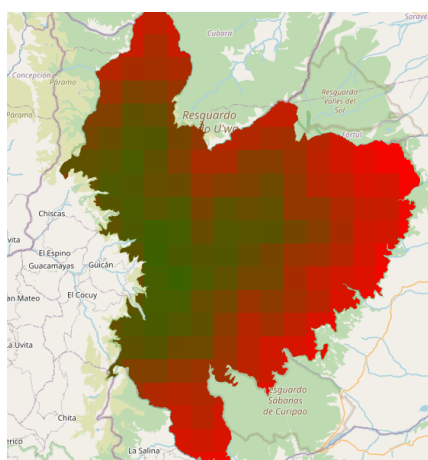
Tras analizar las temperaturas en El Cocuy, se evidenció una variabilidad marcada a lo largo de los años, con fluctuaciones significativas en las temperaturas máximas y mínimas. Se observó un aumento gradual en las temperaturas promedio durante los últimos años, lo que indica un posible patrón de calentamiento en esta región montañosa.

Máximo de las temperaturas máximas	32.7
Máximo de las temperaturas mínimas	21.5
Mínimo de las temperaturas máximas	2.2
Mínimo de las temperaturas mínimas	-5.6

Tabla 8: Temperaturas máximas y mínimas 1960 – 2022 (Nevado del Cocuy). Fuente: Elaboración propia (2023).

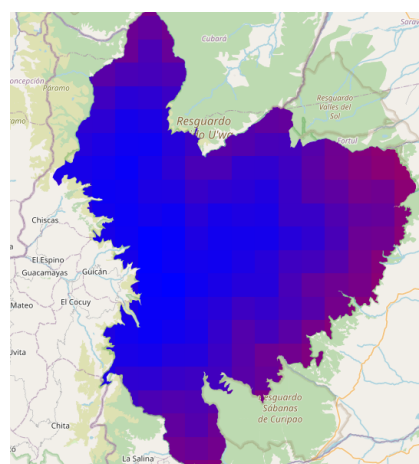
A comparación de los demás Nevados objeto de estudio, el Nevado del Cocuy demuestra la temperatura máxima más elevada que la encontrada en los demás Nevados. A su vez, presenta la temperatura mínima más baja.

Representación de temperaturas máximas y mínimas.



Verde (2.2 ° C) – Rojo (32.7 ° C)

(a)



Azul (-5.6 ° C) – Rojo (21.5 ° C)

(b)

Figura 15. (a) Temperaturas máximas y (b) temperaturas mínimas en zona de estudio del Nevado del Cocuy. Fuente: Elaboración propia (2023).

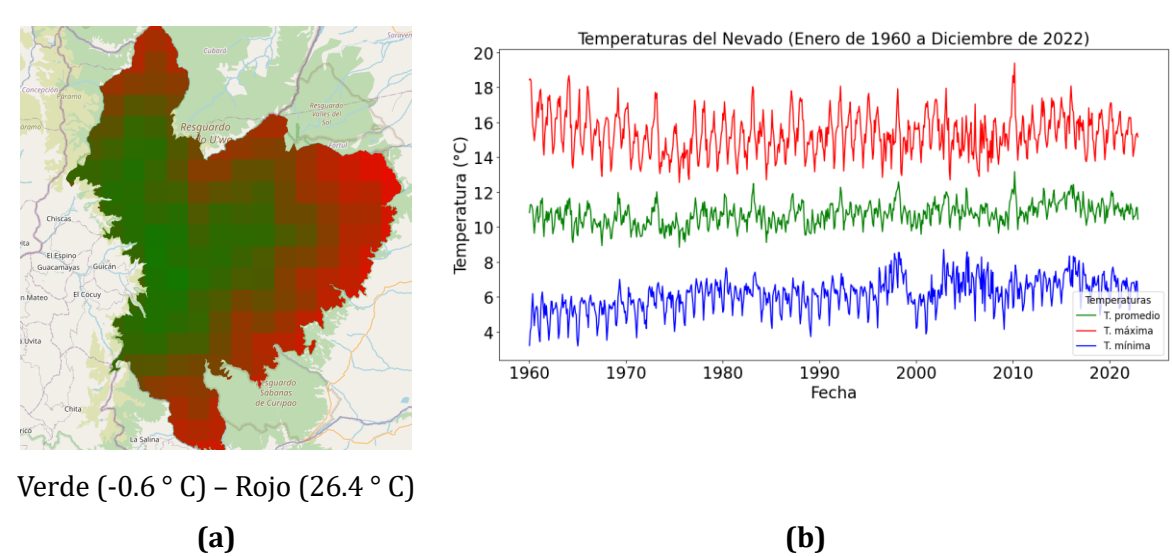
El Nevado del Cocuy, con sus altitudes notables y su cobertura montañosa, exhibe patrones térmicos distintivos relacionados con la presencia de nieve. A medida que se asciende, se observa un descenso significativo en las temperaturas, especialmente en las zonas donde la cobertura de nieve es más extensa. Estas áreas más elevadas y cubiertas de nieve reflejan una menor absorción de radiación solar, lo que conlleva a temperaturas más bajas.

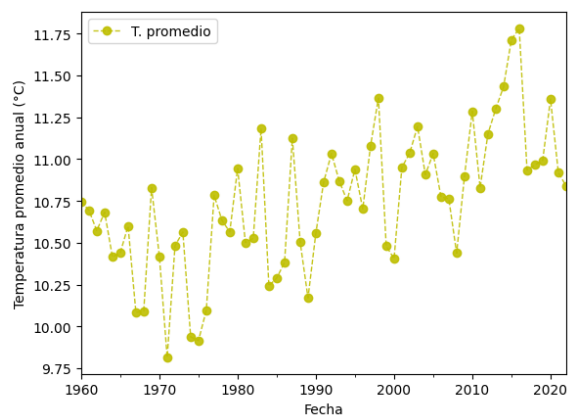
En las áreas más elevadas y cubiertas de nieve del Nevado del Cocuy, este fenómeno se manifiesta de manera más prominente, con valores térmicos significativamente inferiores en comparación con las regiones circundantes.

Temperatura máxima de los promedios de todo el periodo	26.35
Temperatura mínima de los promedios de todo el periodo	-0.6

Tabla 9: Temperaturas máximas y mínimas de los promedios 1960 – 2022 (Nevado del Cocuy). Fuente: Elaboración propia (2023).

Conforme a las temperaturas promedio del intervalo de estudio, en Nevado del Ruíz enseña una temperatura máxima promedio de 26.35 ° C, mientras que, demuestra valores mínimos de -0.6 ° C. Siendo (En promedio) más caluroso que todos los demás Nevados estudiados.

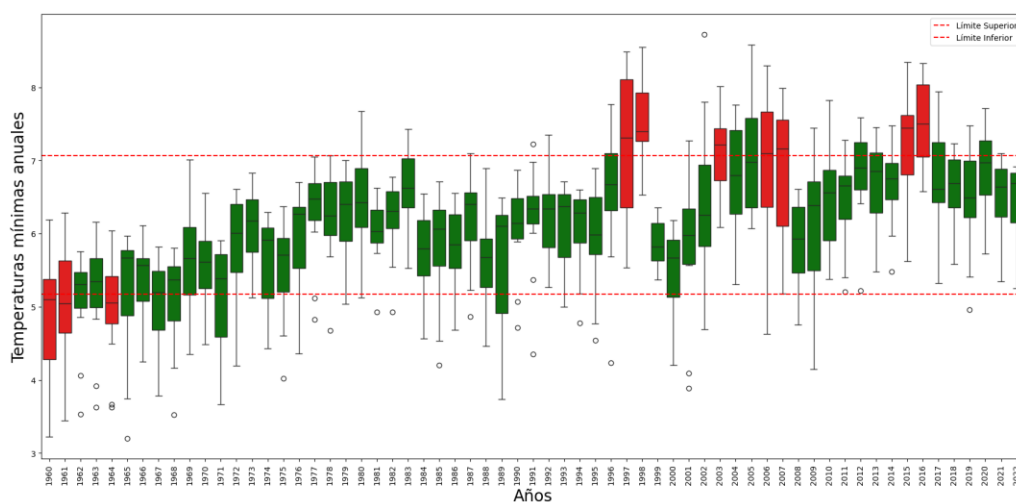




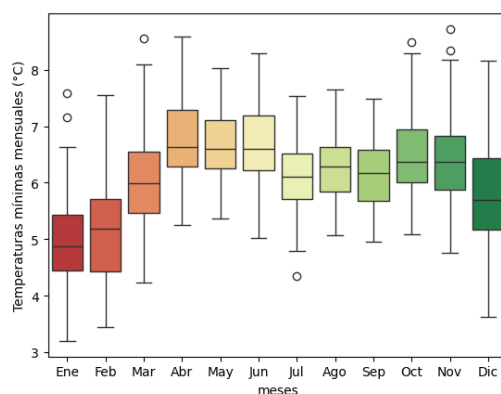
(c)

Figura 16. (a) Temperatura promedio, (b) Serie de tiempo de temperaturas máximas, mínimas y promedio 1960 – 2022, (c) Serie de tiempo de temperatura promedio 1960 – 2022 en zona de estudio del Nevado del Cocuy. Fuente: Elaboración propia (2023).

La exploración encontró un aumento significativo en la temperatura promedio desde 1980 a 2022, esto es preocupante, puesto que, no es similar a las anteriormente expuestas, sino que, se ve un aumento constante de la temperatura, lo que puede generar una mayor afectación a su cobertura de nieve, en caso de no detenerse este aumento, el Nevado tiene gran riesgo de desaparecer.



(a)



(b)

Figura 17. (a) Gráfico de caja y bigotes de la temperatura mínima, (b) gráfico de caja y bigotes de temperatura mínima por mes en zona de estudio del Nevado del Cocuy.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En términos de la distribución de la temperatura mínima por año, se identifican años que se salen de la primera desviación estándar de la distribución del histórico, siendo las más graves (Por aumento de temperatura) en 1997 – 1998 (CAF, s.f.), 2003, 2006 – 2007 (Martínez Navarro et al., 2004), 2016 (OMM, 2016). Lo anterior coincide con otras investigaciones que ilustran estos intervalos cómo los más calurosos desde 1980. Por otro lado, los meses con temperatura mínima considerable comprenden el mes de Abril y Junio. Mientras que, los meses con temperatura mínima más baja corresponden a Enero y Febrero. Si bien es cierto, las medianas de algunos años no sobrepasan la primera desviación por una mínima diferencia, se presentan menos años que sobrepasen este nivel, comparado con los Nevados, que presentaban un mayor número de intervalos con aumentos significativos, algunos de ellos corresponden a 2004, 2005, 2019 - 2022.

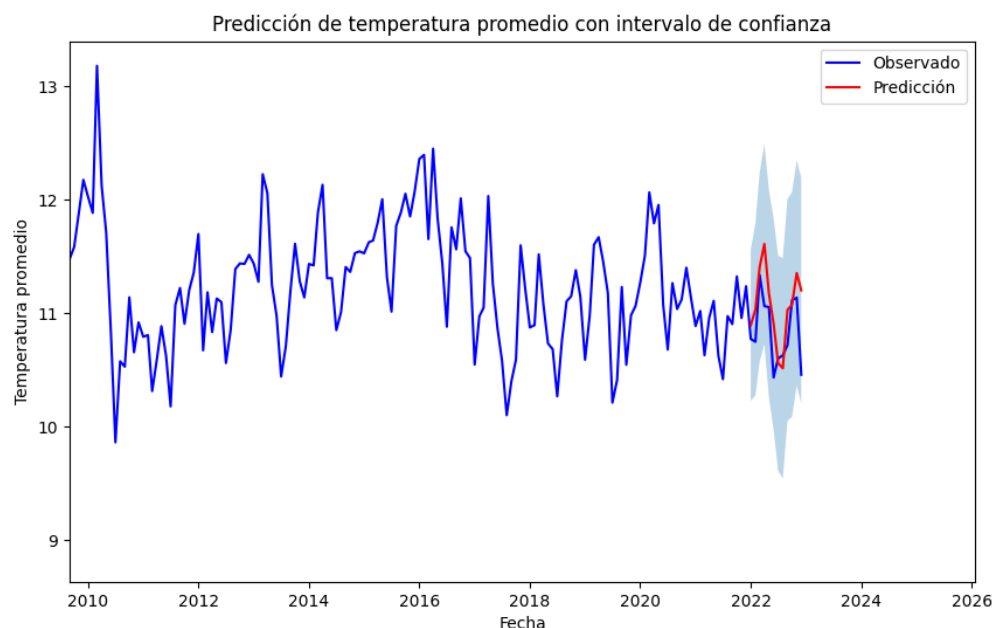


Figura 18. Previsión del cambio en temperatura para el año 2022 yuxtapuesto con el registro real presentado en zona de estudio del Nevado del Cocuy. Fuente: Elaboración propia (2023).

MSE	0.113
MAE	0.257

Tabla 10: Métricas de precisión de modelo ARIMA para previsión de temperaturas promedio 2022 (Nevado del Cocuy). Fuente: Elaboración propia (2023).

Con un MSE de 0.113, se destaca que el modelo exhibe una precisión considerable en su capacidad para ajustarse a los datos reales. Este bajo MSE indica que, en promedio, los errores al cuadrado entre las predicciones y los valores reales son significativamente bajos, lo que sugiere una buena capacidad del modelo para predecir con precisión las variaciones en las temperaturas. Asimismo, con un MAE de 0.257, se observa que las diferencias absolutas entre las predicciones y los valores reales promedio son de aproximadamente 0.257 grados centígrados. Este valor relativamente bajo del MAE indica una menor dispersión entre las predicciones y los valores reales, lo que sugiere un buen ajuste del modelo a los datos observados. En general, estos resultados indican una mayor precisión y confiabilidad en las predicciones del modelo respecto a las temperaturas. Este modelo mostró el menor error respecto a los demás aplicados a los Nevados, dando como resultado, un comportamiento muy similar a lo que realmente ocurrió para el año 2022.

4.4 Nevado del Puracé:

En el Nevado Puracé, se identificaron variaciones considerables en las temperaturas máximas y mínimas, mostrando un patrón de oscilación entre periodos específicos. Las temperaturas promedio revelaron cambios significativos, destacando la dinámica climática particular de esta área.

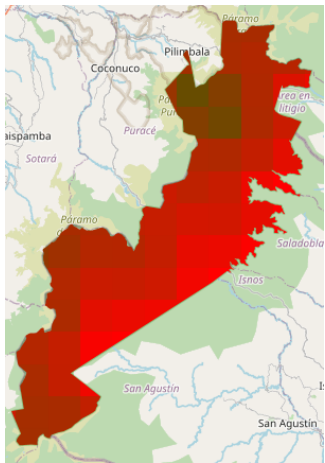
Máximo de las temperaturas máximas	20.3
Máximo de las temperaturas mínimas	11.8
Mínimo de las temperaturas máximas	4.7
Mínimo de las temperaturas mínimas	-1.3

Tabla 11: Temperaturas máximas y mínimas 1960 – 2022 (Nevado del Puracé).

Fuente: Elaboración propia (2023).

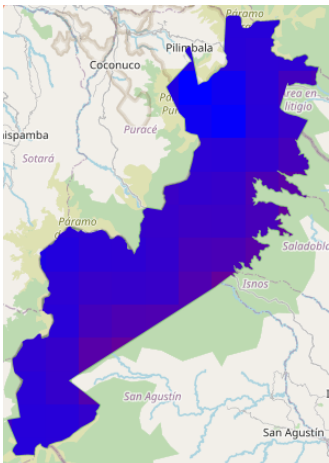
A comparación de los demás Nevados objeto de estudio, el Nevado del Huila muestra una temperatura máxima similar a la obtenida en los Nevados, mientras que difiere de forma considerable con el Nevado del Cocuy, esto plantea una posible relación entre las diversas latitudes tratadas en el análisis; mientras que, su temperatura mínima demostró ser mayor a la encontrada en los Nevados, el Nevado del Cocuy y el Nevado del Huila.

Representación de temperaturas máximas y mínimas.



Verde (4.7 ° C) – Rojo (20.3 ° C)

(a)



Azul (-1.3 ° C) – Rojo (11.8 ° C)

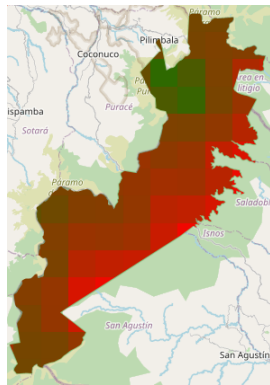
(b)

Figura 19. (a) Temperaturas máximas y (b) temperaturas mínimas en zona de estudio del Nevado del Puracé. Fuente: Elaboración propia (2023).

Temperatura máxima de los promedios de todo el periodo	14.6
Temperatura mínima de los promedios de todo el periodo	2.1

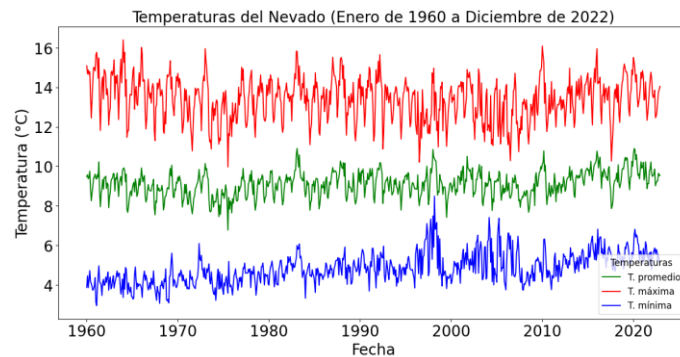
Tabla 12: Temperaturas máximas y mínimas de los promedios 1960 – 2022 (Nevado del Puracé). Fuente: Elaboración propia (2023).

Conforme a las temperaturas promedio del intervalo de estudio, en Nevado del Ruíz enseña una temperatura máxima promedio de 14.6°C , mientras que, demuestra valores mínimos de 2.1°C , siendo el Nevado con temperatura mínima promedio más alta, teniendo diferencias de hasta 7°C .

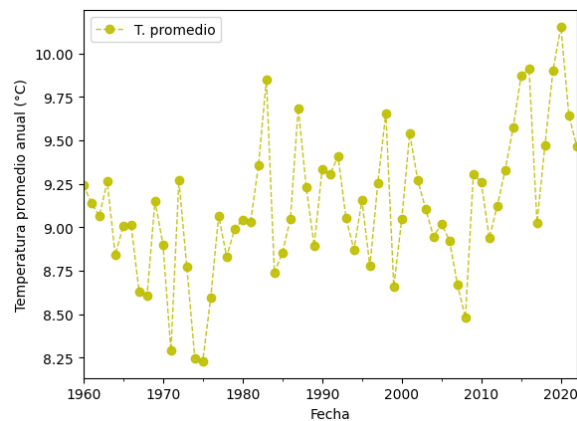


Verde (2.1°C) – Rojo (14.6°C)

(a)



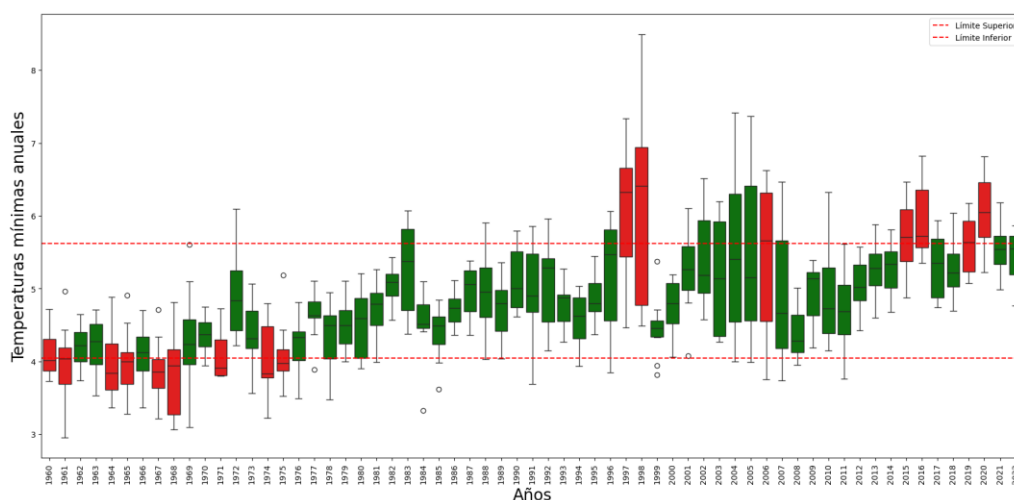
(b)



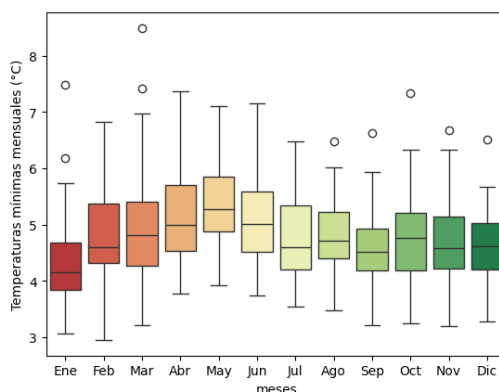
(c)

Figura 20. (a) Temperatura promedio, (b) Serie de tiempo de temperaturas máximas, mínimas y promedio 1960 – 2022, (c) Serie de tiempo de temperatura promedio 1960 – 2022 en zona de estudio del Nevado del Puracé. Fuente: Elaboración propia (2023).

La exploración encontró un aumento significativo en la temperatura promedio desde 1975 a 1992 y desde 2007 a 2022, esto presenta concordancia con el “Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de la temperatura máxima media para las regiones hidroclimáticas de Colombia” (IDEAM, s.f.), donde se manifiesta que dicho intervalo presenta las anomalías más altas, a diferencia del intervalo de 1960 a 1975, donde se presentó un decrecimiento del valor promedio. Desde 1975 a 1992 se evidencia un aumento significativo de la temperatura promedio.



(a)



(b)

Figura 21. (a) Gráfico de caja y bigotes de la temperatura mínima, (b) gráfico de caja y bigotes de temperatura mínima por mes en zona de estudio del Nevado del Puracé.

Fuente: Elaboración propia (2023).

En términos de la distribución de la temperatura mínima por año, se identifican años que se salen de la primera desviación estándar de la distribución del histórico, siendo las más graves (Por aumento de temperatura) en 1997 – 1998 (CAF, s.f.), 2006 (Martínez Navarro et al., 2004), 2015 - 2016 (OMM, 2016) y, 2019 - 2020. Lo anterior coincide con otras investigaciones que ilustran estos intervalos cómo los más calurosos desde 1980. Por otro lado, los meses con temperatura mínima considerable comprenden el mes de Mayo y Junio. Mientras que, los meses con temperatura mínima más baja corresponden a Enero y Febrero. Si bien es cierto, las medianas de algunos años no sobrepasan la primera desviación por una mínima diferencia, se presentan más años que sobrepasen este nivel, comparado con los Nevados, que presentaban un mayor número de intervalos con aumentos significativos, algunos de ellos corresponden a 2015 - 2016, 2019 - 2020.

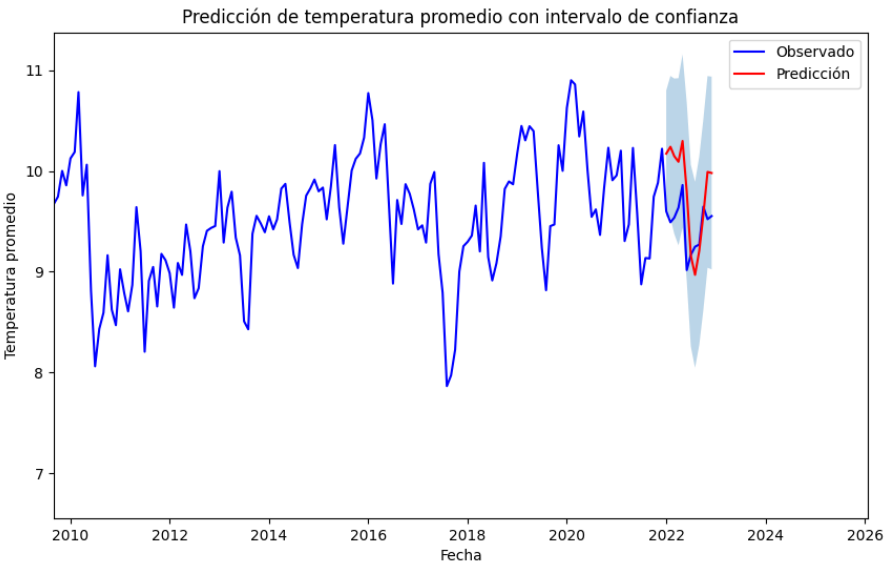


Figura 22. Previsión del cambio en temperatura para el año 2022 yuxtapuesto con el registro real presentado en zona de estudio del Nevado del Puracé. Fuente: Elaboración propia (2023).

MSE	0.229
MAE	0.411

Tabla 13: Métricas de precisión de modelo ARIMA para previsión de temperaturas promedio 2022 (Nevado del Puracé). Fuente: Elaboración propia (2023).

Un MSE de 0.229 señala que, en promedio, los errores cuadráticos entre las predicciones y los valores reales son moderados. Esto sugiere que el modelo tiene cierta capacidad para ajustarse a los datos, aunque con una variación algo más alta en sus predicciones. Además, un MAE de 0.411 indica que las diferencias absolutas entre las predicciones y los valores reales promedio son de aproximadamente 0.411 grados centígrados. Este valor más alto en el MAE sugiere una mayor dispersión entre las predicciones y los valores reales, lo que podría interpretarse como una precisión algo menor en las predicciones del modelo en comparación con los valores observados. En resumen, aunque el modelo muestra capacidad para ajustarse a los datos, las predicciones tienden a desviarse moderadamente de los valores reales, mostrando una mayor variabilidad en las estimaciones. No obstante, las predicciones correspondientes a los últimos meses del año 2022 si presentan concordancia con la realidad.

Por otro lado, se observa en todos los modelos ARIMA generados para cada Nevado, que intervalos atípicos pueden afectar la precisión del modelo, así que, temporadas de mayor o menor temperatura por fenómenos externos podrán no ser ilustrados en las predicciones generadas. Una investigación futura comprende el uso de otros modelos que permitan solventar las dificultades anteriormente expuestas.

5 Conclusiones

Se observa una marcada variabilidad estacional y anual en las temperaturas de los nevados estudiados. Esta variabilidad puede asociarse a patrones climáticos específicos en diferentes períodos del año, lo que sugiere la importancia de considerar múltiples factores ambientales al analizar el comportamiento térmico de estas zonas montañosas.

El modelo ARIMA aplicado para predecir la temperatura promedio muestra una capacidad razonable para estimar las tendencias futuras. Aunque existen discrepancias entre las predicciones y los valores reales, los errores son relativamente bajos (según MSE y MAE), lo que indica que el modelo tiene cierta habilidad predictiva. Sin embargo, se recomienda continuar ajustando y refinando el modelo para mejorar su precisión.

Los nevados estudiados no solo son emblemáticos por su belleza natural, sino que también juegan un papel crucial en el ecosistema, la economía y la sociedad colombiana. Sus variaciones térmicas tienen un impacto significativo en la regulación hídrica, la biodiversidad y las

actividades económicas locales, subrayando la importancia de monitorear y comprender los cambios en sus condiciones climáticas para la toma de decisiones informadas en la gestión ambiental y el desarrollo sostenible.

6 Futuras investigaciones

Dentro de las posibles investigaciones futuras, se podrían contemplar:

- Incorporación de Datos Multifactoriales: Ampliar el análisis incluyendo datos adicionales, como la precipitación, la altitud, la radiación solar y la cobertura de nieve, para comprender mejor la influencia de estos factores en las variaciones térmicas de los nevados.
- Modelos de Machine Learning: Explorar el uso de modelos de aprendizaje automático más complejos y avanzados, como redes neuronales o métodos de ensemble, para mejorar las predicciones de temperatura. Estos modelos podrían capturar patrones no lineales y relaciones más complejas en los datos, potencialmente mejorando la precisión de las predicciones.
- Análisis de Impacto Climático: Realizar estudios sobre el impacto del cambio climático en los nevados de Colombia. Investigar cómo las tendencias climáticas a largo plazo podrían afectar la distribución y el comportamiento térmico de estos ecosistemas, así como sus implicaciones para la biodiversidad, los recursos hídricos y las comunidades locales.
- Monitoreo Continuo: Establecer sistemas de monitoreo continuo utilizando tecnologías como sensores remotos y estaciones meteorológicas en sitio para recopilar datos en tiempo real.

Referencias

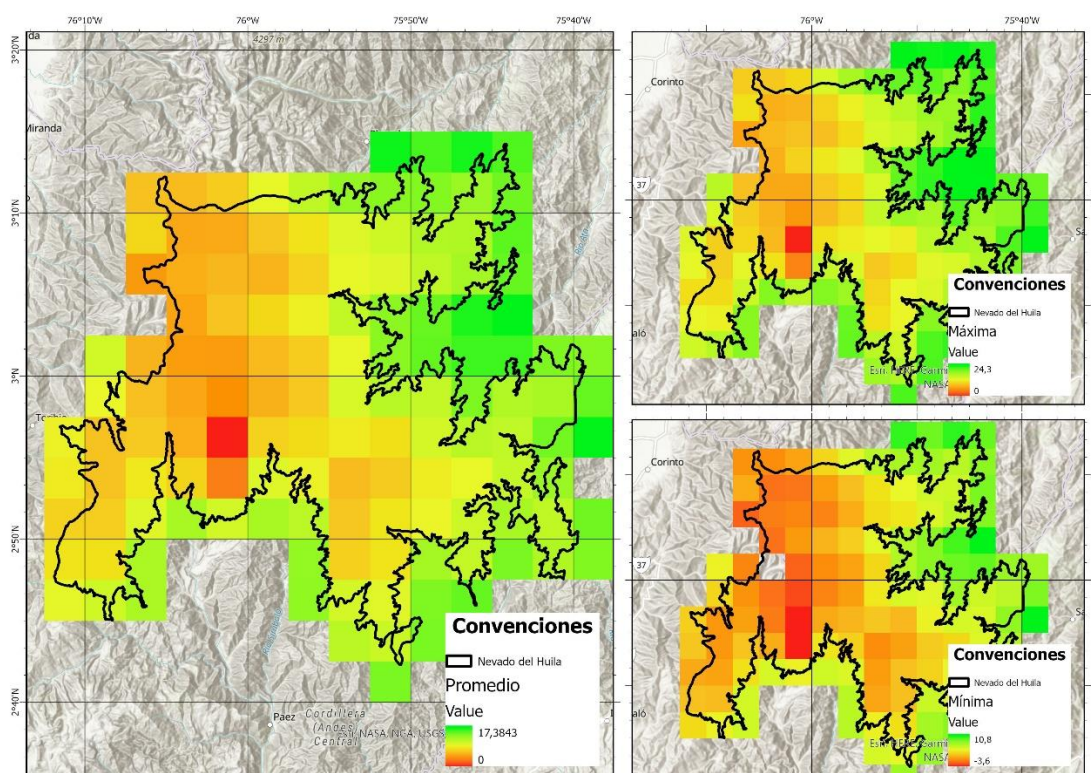
1. CAF. El fenómeno del niño. Memoria, retos y soluciones. Volumen III, s.f. Accedido: 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dipecholac.net/docs/files/994-las-lecciones-de-el-nino.pdf>
2. IDEAM. Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de la temperatura máxima media para las regiones hidroclimáticas de Colombia. S.f.

Accedido: 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Analisis+del+Comportamiento+de+la+Temperatura+Maxima.pdf/2a2f247c-f457-45f3-ac9a-f2a481f8daa6>

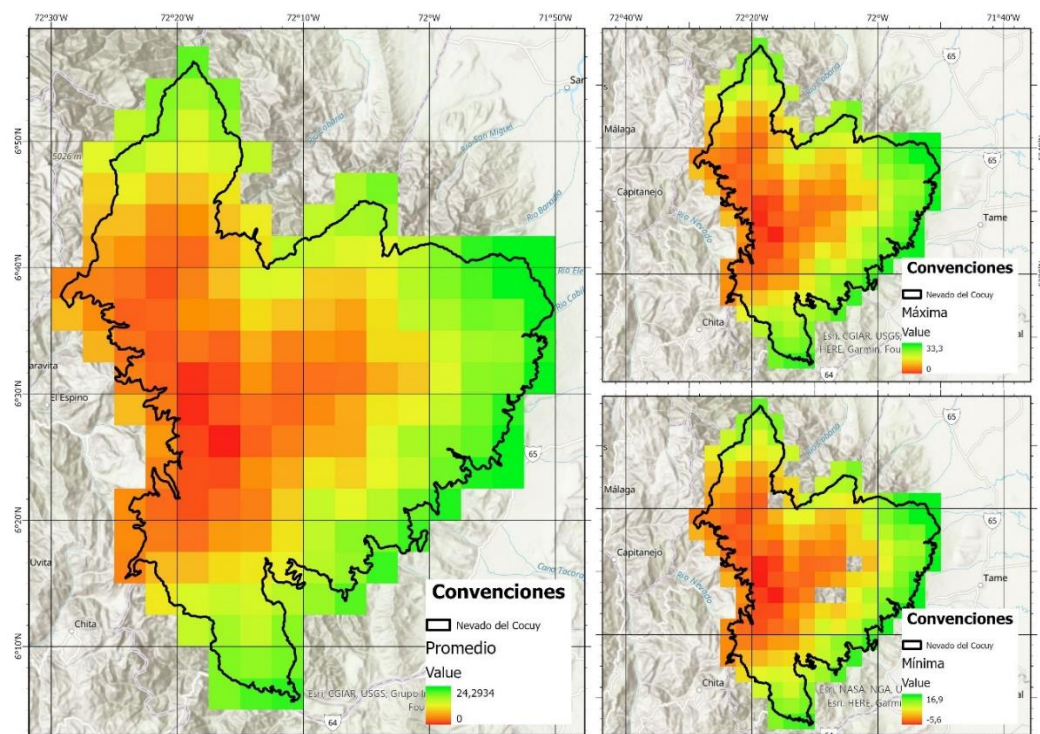
3. F. Martínez Navarro, F. Simón-Soria, y G. López-Abente, «Valoración del impacto de la ola de calor del verano de 2003 sobre la mortalidad», Gaceta Sanitaria, vol. 18, n.º 4, pp. 250-258, ago. 2004.
4. «OMM reporta un ritmo alarmante de cambios climáticos en 2015», Desarrollo Sostenible. Accedido: 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2016/03/omm-reporta-un-ritmo-alarmante-de-cambios-climaticos-en-2015/>
5. «NOAA: El año 2019 fue el segundo año más cálido desde los comienzos de los registros en 1880 | Annual 2019 Global Climate Report | National Centers for Environmental Information (NCEI)». Accedido: 21 de diciembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/201913/supplemental/page-5>

Anexos

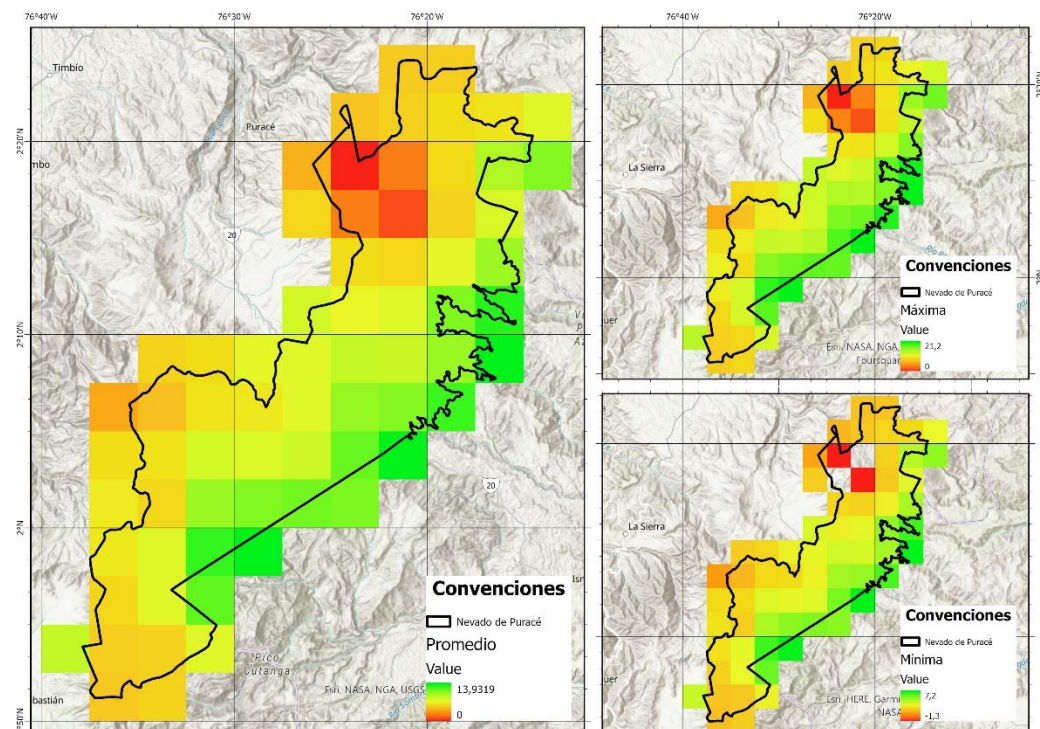
- Mapa de Nevado del Huila



- Mapa de Nevado del Cocuy



- Mapa de Nevado de Puracé



- Mapa de Nevados (Ruíz, Tolima y Santa Isabel)

