

Estimation of glacial retreat of Nevado Artesonraju in the Cordillera Blanca, Perú, CMIP5 climate scenarios

Ariana Portal Sanchez¹; Emily Carbajal Chirinos²; Juan de Dios Fernández Vega³; Romel Principe Aguirre⁴; Anita Arrascue Lino⁵ and Samuel Astete Perez⁶

^{1,2,5,6} *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201913592@upc.edu.pe, u201915364@upc.edu.pe, pcigsast@upc.edu.pe, anita.arrascue@upc.pe*; ³ *Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, pm_inglog@inaigem.gob.pe*; ⁴ *Pontificia Universidad Católica del Perú, epincipe@pucp.pe*.

Abstract -- *The Artesonraju glacier, located in the Cordillera Blanca of the Central Andes, is a key indicator of climate change and plays a crucial role in water supply in glacial basins. This research seeks to estimate the future retreat of Artesonraju in response to climate change. For this purpose, geospatial analysis tools (ArcMap, Google Earth Engine, USGS Earth Explorer, Python) and Landsat 5 and 7 (1986-2012) and Landsat 8 and 9 (2013-2023) satellite image data were used. The main indicator to measure retreat is the Glacial Equilibrium Line (ELA). To project the future evolution of ELA, a multiple linear regression model was used, considering the current temperature of the planet and the RCP4.5 and RCP8.5 scenarios. The model presented a significant coefficient ($R^2 = 0.76$), indicating a moderate correlation between the variables ELA, year and precipitation. The results suggest that ELA could reach 5301 m.a.s.l. in RCP 4.5 and 5310 m.a.s.l. in RCP8.5, which would imply the disappearance of the glacier by 2073 and 2074, respectively.*

Keywords: *Tropical Glacier, Glacier retreat, Climate Change, ELA, Cordillera Blanca, CMIP5 Scenarios, RCP4.5, RCP8.5, Artesonraju, Peru*

Estimación del retroceso glaciar del Nevado Artesonraju en la Cordillera Blanca, Perú, utilizando escenarios climáticos CMIP5

Ariana Portal Sanchez¹; Emily Carbajal Chirinos²; Juan de Dios Fernández Vega³; Romel Principe Aguirre⁴
Anita Arrascue Lino⁵ and Samuel Astete Perez⁶

^{1,2,5,6} *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u201913592@upc.edu.pe, u201915364@upc.edu.pe, pcigsast@upc.edu.pe, anita.arrascue@upc.pe*; ³ *Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, inglog@inaigem.gob.pe*; ⁴ *Pontificia Universidad Católica del Perú, erincipe@pucp.pe*.

Resumen --El glaciar Artesonraju, ubicado en la Cordillera Blanca de los Andes Centrales, es un indicador clave del cambio climático y tiene un papel crucial en el abastecimiento de agua en cuencas glaciares. Esta investigación tiene el objetivo de estimar el retroceso futuro de Artesonraju en respuesta al cambio climático. Para ello, se emplearon herramientas de análisis geoespacial e imágenes satelitales Landsat 5 y 7 (1986-2012) y Landsat 8 y 9 (2013-2021), considerando a la altitud de la Línea de Equilibrio (ELA) como indicador principal para medir el retroceso. Estos insumos se agregaron en un modelo de regresión lineal múltiple, considerando la temperatura actual del planeta, los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. El modelo presentó un coeficiente significativo ($R^2 = 0.76$), indicando una correlación moderada entre las variables ELA, año y precipitación. Los resultados sugieren que la ELA podría alcanzar los 5301 m.s.n.m. en RCP 4.5 y 5310 m.s.n.m. en RCP8.5, lo que implicaría la desaparición del glaciar para el año 2073 y 2074, respectivamente

Palabras clave: Glaciar Tropical, Retroceso glaciar, Cambio Climático, ELA, Cordillera Blanca, Escenarios CMIP5, RCP4.5, RCP8.5, Nevado Artesonraju, Perú

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es la problemática que enfrenta el mundo a raíz de la revolución industrial y se observan consecuencias desde la mitad del siglo XX [1]. Los glaciares se han vuelto indicadores de la intensidad del cambio climático por responder rápidamente ante cualquier cambio en nuestro clima [2]. Los glaciares situados en latitudes cercanas al Ecuador se clasifican como glaciares tropicales y son reconocidos como ecosistemas únicos [3], pues, manifiestan una pérdida de masa glaciar (ablación) durante todo el año, siendo más sensibles al cambio climático que los glaciares en zonas templadas [4; 5]. Los glaciares son reservorios críticos de agua dulce para comunidades circundantes, por lo que, el deshielo genera escorrentía superficial alimentando los cursos de agua en la tierra [6].

En el Perú, los glaciares se clasifican como Andes tropicales [7] y representan aproximadamente el 70% de los glaciares

tropicales en el mundo [5]. En las últimas décadas, se ha visto la pérdida significativa de masa de hielo en la Cordillera Blanca (CB), ubicada en los Andes peruanos, pasando de 649 km² a 311 km², lo que corresponde a una disminución del 25% del área total desde 1987 hasta 2010 [8]. El retroceso glaciar es causado por diversos factores, entre ellos el carbono negro, que, al adherirse principalmente en las zonas bajas e intermedias de los glaciares, absorbe la luz solar y reduce el albedo, acelerando el derretimiento [9;10].

Desde una perspectiva ambiental, el retroceso glaciar tiene como efecto el ascenso de la línea de equilibrio (ELA), la cual es influenciada especialmente por la temperatura y precipitación [11]. La ELA separa la zona de acumulación y ablación de un glaciar, la línea representa el nivel en el que el balance de masa del glaciar es igual a cero [12]. En el caso del nevado Artesonraju, se ha observado un ascenso de la ELA de 5009 a 5050 m.s.n.m entre 2004 y 2007 [13]. Además, se identificó una reducción de área de 20% - 30% entre 1962 y 2003 [7]

Ante este panorama, el uso de escenarios climáticos como CMIP5 ayudan anticipar y evaluar los posibles impactos del cambio climático en cuatro trayectorias de concentración representativa (RCP): RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 que simulan diferentes niveles de emisión y forzamiento radiativo hasta el año 2100. Esta investigación tiene como objetivo evaluar el impacto del retroceso glaciar del Nevado Artesonraju a causa del calentamiento global, utilizando escenarios climáticos (RCP4.5 y RCP8.5) para la estimación de la ELA futura.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

II.1 Área de Estudio

II.1.1 Nevado Artesonraju y la cuenca Parón-Llullán

Como se observa en la figura 1, el Artesonraju es un nevado ubicado en la Cordillera Blanca, tiene una superficie de 4.81 km² con una altura máxima de 6025 m.s.n.m [14]; presenta una lengua glaciar definida que forma la laguna Artesoncocha [13]. El deshielo del nevado aporta a la subcuenca Parón-Llullán

[15], la Laguna Parón tiene una longitud máxima de 4 135m, el volumen 80 460 266 m³ y profundidad máxima 69 metros [16]. El río Lullán tiene 24 km de longitud y un área de 153m², el cual desemboca en la ciudad de Caraz y pertenece a la provincia de Huaylas en Ancash, Perú [17]. La subcuenca Parón-Lullán alberga a 21 346 habitantes, distrito Caraz, [18] y a 15 943 habitantes, ciudad de Caraz, [19].



Fig. 1 Ubicación del Artesonraju en la cuenca Parón-Lullán

II.1.II Estimar la línea de equilibrio (ELA) futura

Para proyectar la altitud futura de la Línea de Equilibrio (ELA), se analizaron las tendencias históricas de su variabilidad altitudinal en relación con los registros de precipitación. Este enfoque permitió modelar la trayectoria esperada de ascenso de la ELA.

II.1.II.I Análisis de Cobertura Glaciar con MapBiomias

La evaluación de la cobertura glaciar en el Nevado Artesonraju, se empleó la plataforma MapBiomias, la cual proporciona series temporales de cobertura y uso del suelo a partir del procesamiento de imágenes satelitales. A través de esta herramienta, se analizaron datos multitemporales de la extensión glaciar durante el período 1986-2021. La información fue extraída utilizando Google Earth Engine, permitiendo la segmentación y filtrado de las áreas de interés.

II.1.II.II Modelamiento de la Línea de Equilibrio (ELA)

Para el modelamiento de la Línea de Equilibrio (ELA), se recopilamos imágenes satelitales de los satélites Landsat 4, 5, 7 y 8. Posteriormente, se accedió al Modelo Digital de Elevación (DEM) ASTER GDEM con una resolución de 30 metros para el periodo 1986-2010, y al DEM ALOS PALSAR, con una resolución de 12.5 metros, para el periodo 2010-2021.

Las imágenes satelitales se descargaron de MapBiomias, y en simultáneo se descargaron imágenes USGS Earth Explorer con el fin de utilizar ambas fuentes como base para delimitar con mayor precisión el área del Artesonraju. Posteriormente, se utilizó ArcMap para calcular el área, la ELA y la cobertura

glaciar. Para este último proceso, se aplicó la metodología descrita en [20] que establece una relación directa entre la altitud de la línea de nieve (SLA) y la altitud de la ELA en glaciares ubicados en los trópicos exteriores, concluyendo que la altitud de la línea de nieve puede ser un buen indicador de la ELA durante los meses de estiaje (mayo-agosto). Este criterio fue utilizado durante los 10 años analizados (1986 y 2021).

II.1.II.III Data climatológica

La base de datos climáticos utilizada para estimar la altitud futura de la Línea de Equilibrio son principalmente registros de precipitación y temperatura. Los datos de precipitación fueron obtenidos a partir del producto satelital Climate Hazards InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS) y posteriormente descargados mediante Google Earth Engine, aplicando un recorte espacial para delimitar el área de estudio y garantizar la representatividad de la información en el análisis.

II.1.II.IV Estimación de la Línea de Equilibrio (ELA) futura

La proyección de la altitud futura de la Línea de Equilibrio se realizó a partir del análisis de datos climáticos históricos y del cálculo de la ELA en el periodo 1986-2021. Estos datos fueron integrados en un modelo de regresión lineal múltiple para estimar la evolución futura (2030-2100) de la ELA en función de las variables predictoras: altitud de la ELA y precipitación.

La implementación del modelo se llevó a cabo en Visual Studio Code utilizando el lenguaje de programación Python, lo que permitió automatizar el proceso de cálculo y optimizar el ajuste de los parámetros del modelo. Para evaluar la precisión de la proyección, se aplicaron herramientas estadísticas de validación, incluyendo el margen de error estándar, los intervalos de confianza al 95 %, el error estándar de la estimación (SEE) y el coeficiente de determinación (R^2).

II.1.II.V Escenarios Climáticos CMIP5

En esta investigación, empleamos los resultados de [21] como insumo para la proyección de cambios climáticos, las cuales fueron obtenidas mediante el modelo WRF utilizando como condición de contorno los datos ERA5. Los datos empleados corresponden al dominio de 4 km que comprende a la cuenca del río Santa. Dicho estudio utilizó los escenarios del Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), un conjunto con el modelo de circulación general (GCMs) que simulan la interacción entre la atmósfera, el océano, la criosfera y la biosfera [22]. Las proyecciones climáticas se basan en las Trayectorias de Concentración Representativa (RCPs), que establecen escenarios futuros en función de la concentración de gases de efecto invernadero, aerosoles y cambios en el uso del suelo. En particular, se consideraron los escenarios RCP4.5 y

RCP8.5, que representan una trayectoria de estabilización y un escenario de altas emisiones, respectivamente [22;23].

III. RESULTADOS

III.1 Estimación de la línea de equilibrio (ELA)

A lo largo del período analizado de 1986 - 2021, la evolución de la ELA del Artesonraju ha mostrado variaciones significativas que reflejan la compleja interacción entre la temperatura y la dinámica del glaciar. Se observó en la figura 2 una pérdida del 13.39% de su superficie glaciar, equivalente a una reducción de 0.75 km². Si bien el retroceso glaciar fue de casi 1 km², el nevado ha mantenido una relativa estabilidad en su área en comparación con otros glaciares situados a menores altitudes. Esta estabilidad puede atribuirse a la elevación del pico del Artesonraju, que supera los 5400 m.s.n.m., lo que favorece la persistencia de una zona de acumulación activa, mitigando en parte los efectos del cambio climático sobre la dinámica glaciar [7]

En la figura 2 se observa que en 1986 la ELA alcanzó los 4825 m s.n.m., con una superficie glaciar de 5.61 km². En 1991, la ELA aumentó a 4920 m s.n.m., ascendiendo casi 100 metros. A pesar de la relación teórica entre el ascenso de la ELA y la reducción del área glaciar [24], la cobertura de hielo aumentó a 5.72 km², posiblemente debido a un balance de masa positivo. En 1996, la ELA descendió a 4891 m s.n.m., pero el área glaciar continuó reduciéndose, cayendo a 5.24 km². En 2001, la ELA solo perdió 13 metros y la cobertura glaciar siguió disminuyendo, llegando a 5.03 km².

En 2006, la ELA subió a 4924 m.s.n.m. y la superficie glaciar disminuyó a 4.91 km², lo que respalda que un aumento de la ELA reduce la extensión del glaciar. En 2011, la ELA aumentó abruptamente a 5051 m.s.n.m., subiendo 127 metros respecto al registro anterior. De manera atípica, la superficie glaciar aumentó 0.04 km², lo que podría deberse a condiciones climáticas extraordinarias o variaciones en la acumulación estacional [25]. En 2015, la ELA descendió 73 metros a 4975 m.s.n.m., coincidiendo con el evento El Niño de categoría "Fuerte", lo que provocó el ascenso de la ELA y la pérdida de área glaciar, reduciéndola a 4.68 km².

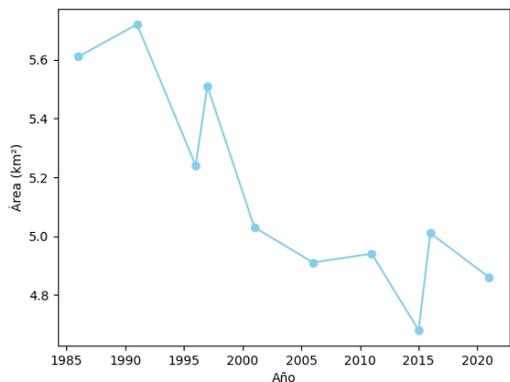


Fig. 2 Variación de área del Artesonraju 1986-2021

En el año 2016, la ELA mostró un ligero descenso de 32 metros (5007 m.s.n.m), en concordancia con un leve incremento de 0.33 km² en la superficie glaciar (5.01 km²). En 2021, la ELA descendió 40 metros a 4967 m.s.n.m., con una leve disminución del área glaciar a 4.86 km², lo que refleja la acelerada transformación del glaciar y su creciente vulnerabilidad al cambio climático.

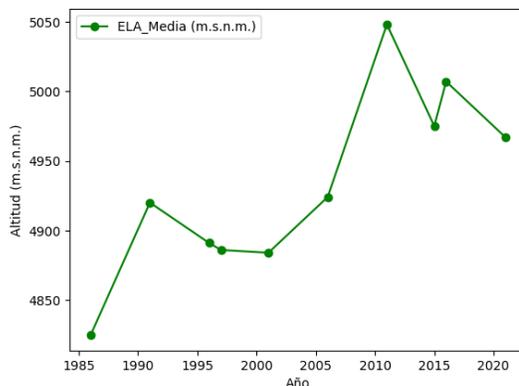


Fig. 3 Evolución de la Línea de Equilibrio (ELA) del Nevado Artesonraju (1986-2021)"

En la figura 3 indica la evolución de la línea de Equilibrio considerando la temperatura actual del planeta, donde alcanzará una altura aproximada de 5305 m.s.n.m. en el año 2064. Teniendo en cuenta que la altitud máxima del Nevado Artesonraju es de 6025 m.s.n.m. [26], esta proyección sugiere una reducción drástica en la zona de acumulación, disminuyéndola a solo 720 metros por encima de la ELA. En consecuencia, el balance de masa glaciar será negativo, con una pérdida de hielo superior a la acumulación, lo que acelerará el retroceso del nevado.

Tabla I
Estimación de la altitud de la ELA futura

Año	Altitud de ELA (m.s.n.m)
2030	5101.66
2040	5161.71
2050	5221.76
2060	5281.81
2064	5305.83
2080	5401.91
2090	5461.96
2100	5522.01

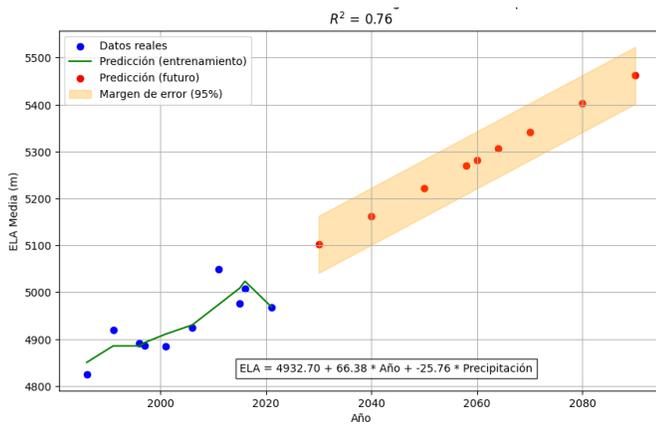


Fig. 4 Regresión lineal múltiple para predicción de elevación media

En la Tabla I se observa un ascenso sostenido en la altitud de la ELA, desde 5101.66 m.s.n.m en 2030 hasta 5522.01 m.s.n.m en el año 2100. Este incremento de más de 400 metros en siete décadas refleja una tendencia alarmante hacia un balance de masa glaciar cada vez más negativo, donde la zona de acumulación se reduce significativamente, favoreciendo procesos de ablación y acelerando el retroceso del glaciar. Por otro lado, en la Figura 4 se observa el gráfico de la regresión lineal que predice la elevación media (ELA_media) en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) a lo largo del tiempo, considerando la temperatura actual del planeta. Los puntos azules representan los datos reales de elevación media del Artesonraju cada 5 años desde el año 1986 hasta el 2021, mientras los puntos rojos representan las predicciones de la elevación media desde el 2030 hasta el 2090 obtenidas a través del modelo de regresión. La tendencia general indica un incremento en la elevación media con el paso del tiempo. El R^2 de 0.76 significa que el 76% de la variabilidad en ELA_media puede ser explicada por el modelo de regresión lineal múltiple. Este nivel de explicación puede considerarse moderado y adecuado para estimaciones de tendencias a largo plazo. El coeficiente de la ecuación 66.38 indica que la ELA aumenta aproximadamente 66.38 metros por año. Este incremento de altitud corresponde a la magnitud de retroceso que el glaciar sufrirá, ya que la ELA más alta significa menos extensión glaciar.

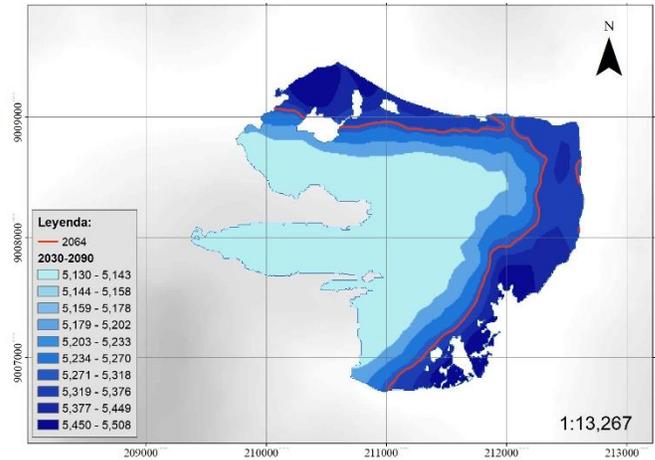


Fig. 5 Mapa de la línea de equilibrio (ELA) para el año 2064

El mapa de la figura 5 presenta el retroceso progresivo del glaciar, siendo en 2064 la pérdida del umbral de equilibrio, representado por la línea roja (altitud de la ELA). Esta gradiente destaca cómo la capacidad del glaciar de acumular y mantener un balance ha disminuido considerablemente. El ascenso de la Línea de Equilibrio (ELA) conlleva la fractura de la unidad glaciar, marcando el punto en el cual el glaciar deja de ser reconocido como tal. Este fenómeno indica el momento en que la ELA alcanza o supera la altitud crítica, donde la zona de acumulación ya no es capaz de sostener al glaciar, por la pérdida del umbral de equilibrio glaciar.

III.II Proyección del ascenso de la Línea de Equilibrio (ELA) bajo escenarios climáticos RCP 8.5 y RCP 4.5

La proyección del ascenso de la Línea de Equilibrio (ELA) se realizó considerando los escenarios climáticos RCP 8.5 y RCP 4.5 junto con tendencias históricas de precipitación y altitud de la ELA.

III.III.1 Estimación de la Línea de Equilibrio en el escenario climático RCP 8.5

Tabla II
Estimación de la altitud de la ELA futura con escenario climático RCP 8.5

Año	Altitud de ELA (m.s.n.m)
2030	5069.92
2040	5061.92
2050	5109.49
2060	5250.54
2073	5310.92
2080	5341.53
2090	5380.67
2100	5478.60

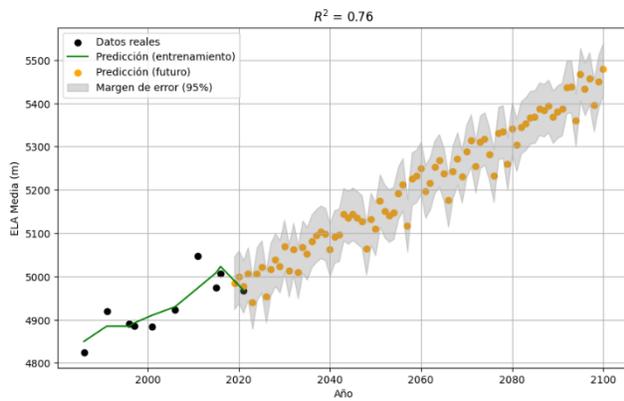


Fig. 6 Regresión múltiple para predicciones RCP 8.5

La tendencia ascendente en la elevación media de la Línea de Equilibrio (ELA) bajo el escenario climático RCP 8.5 como se muestra en la figura 6 permite proyectar su altitud en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Los puntos en color representan los valores observados de la ELA media del Nevado Artesonraju entre 1986 y 2021, mientras que los puntos amarillos corresponden a las proyecciones modeladas para el período 2030-2100. Los resultados indican que la ELA alcanzará los 5069.92 m.s.n.m. en 2030 y los 5250.54 m.s.n.m. en 2060, de acuerdo con la tabla II, evidenciando un incremento sostenido en su altitud. Para el año 2080, se estima que la ELA se situará aproximadamente a 5341.53 m.s.n.m., y para 2100 superará los 5478.60 m.s.n.m. Este ascenso progresivo de la ELA sugiere una reducción significativa de la superficie glaciar del Artesonraju, con implicaciones directas en su balance de masa. Se estima que el umbral de equilibrio del glaciar se perderá en 2073, cuando la ELA alcance aproximadamente los 5310.92 m.s.n.m., lo que marcaría un punto crítico en su proceso de retracción.

III.II.II Estimación de la Línea de Equilibrio en el escenario climático RCP 4.5

Tabla III
Estimación de la altitud de la ELA futura con escenario climático RCP 4.5

Año	Altitud de ELA (m.s.n.m)
2030	5034.83
2040	5100.07
2050	5136.76
2060	5240.42
2074	5301.88
2080	5368.49
2090	5401.14
2100	5487.50

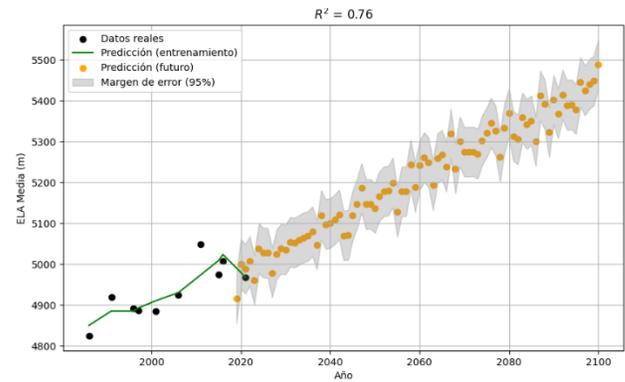


Fig. 7 Regresión múltiple para predicciones RCP 4.5

En la figura 7 se registra una tendencia ascendente en la elevación media de la Línea de Equilibrio (ELA) bajo el escenario RCP 4.5, lo que permite proyectar su altitud en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.). Los puntos negros representan los valores observados de la ELA media del Nevado Artesonraju entre 1986 y 2021, mientras que los puntos amarillos corresponden a las proyecciones modeladas para el período 2030-2100. Además, se estima que la ELA alcanzará los 5034.83 m.s.n.m. en 2030 y los 5240.42 m.s.n.m. en 2060, evidenciando un ascenso progresivo. Para el año 2080, la ELA se situará aproximadamente en 5368.49 m.s.n.m., y hacia el 2100 se prevé que supere los 5478.50 m.s.n.m. conforme a la tabla III. La proyección de la elevación media de la ELA indica que el umbral de equilibrio del glaciar Artesonraju se perdería en 2074, cuando alcance aproximadamente los 5301.88 m.s.n.m., marcando un punto crítico en su proceso de retroceso.

II.II.III Contraste del ascenso de la Línea de Equilibrio con RCP 8.5 RCP 4.5

La evolución de la altitud de la Línea de Equilibrio (ELA) en el Nevado Artesonraju, bajo los escenarios climáticos RCP 8.5 y RCP 4.5, se muestra en la figura 8, la cual evidencia una tendencia ascendente en ambos casos, con diferencias significativas en la tasa de incremento y en el momento en que la ELA alcanza el umbral crítico que divide la masa glaciar. A lo largo del periodo de estudio, se observa que la ELA en el escenario RCP 8.5 se mantiene sistemáticamente a mayor altitud en comparación con el escenario RCP 4.5, lo que sugiere un retroceso glaciar más acelerado bajo condiciones de mayores emisiones. En 2030, la ELA proyectada bajo el escenario RCP 8.5 alcanza los 5069.92 m.s.n.m., mientras que en RCP 4.5 se sitúa en 5034.83 m.s.n.m., evidenciando una diferencia inicial relevante. Para 2060, la brecha entre ambos escenarios persiste, con una ELA de 5250.54 m.s.n.m. en RCP 8.5 y 5240.42 m.s.n.m. en RCP 4.5. Aunque en esta última fecha las altitudes

de la ELA son relativamente similares, la proyección indica que en el escenario de altas emisiones (RCP 8.5), la ELA sigue ascendiendo a un ritmo más acelerado, lo que anticipa una mayor reducción de la superficie glaciar en las décadas siguientes. Un aspecto crítico de esta proyección es la estimación del momento en que la ELA alcanza una altitud suficiente para fragmentar la unidad glaciar del Artesonraju, un indicador clave del retroceso glaciar extremo. Bajo el escenario RCP 8.5, esta división ocurre en 2073, cuando la ELA se eleva a 5310.92 m.s.n.m., mientras que en el escenario RCP 4.5 el proceso se retrasa apenas un año, ocurriendo en 2074 con una ELA de 5301.88 m.s.n.m.

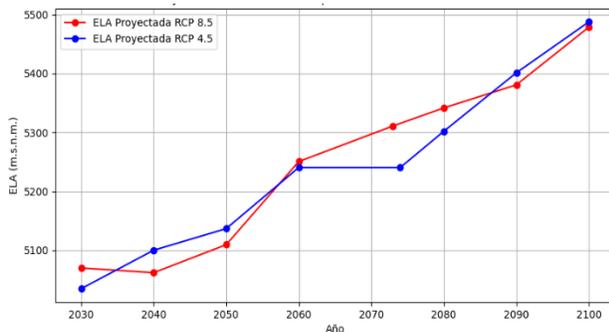


Fig. 8 Proyección de la línea de equilibrio RPC 8.5 y RPC 4.5

VI. DISCUSIÓN

El Nevado Artesonraju ha experimentado un retroceso glaciar significativo de aproximadamente 206 metros, lo que representa un indicador crítico del impacto del cambio climático en los glaciares de la Cordillera Blanca (CB). Estos resultados son consistentes con estudios previos en la CB [27;8], que evidencian una reducción sostenida en la extensión glaciar de la región. La variación observada en la altitud de la Línea de Equilibrio (ELA) concuerda con investigaciones anteriores [28; 29] las cuales reportaron valores similares a los obtenidos en esta investigación para el periodo 1986-2021. El ascenso de la ELA es un parámetro clave en la evaluación del retroceso glaciar [30;12], ya que, pequeños incrementos en su altitud pueden generar cambios sustanciales en la dinámica de acumulación y ablación, afectando directamente el estado de salud del glaciar [31]. Según las proyecciones obtenidas, se estima que para el año 2064 la ELA del Nevado Artesonraju podría alcanzar una altitud de 5305 m.s.n.m, lo que resultará en una zona de acumulación significativamente menor que la de ablación. Este umbral crítico marca la transición hacia un balance de masa negativo irreversible, donde la pérdida de hielo superará de manera sostenida la capacidad de acumulación, acelerando el proceso de desaparición del glaciar [32].

En términos históricos, las fluctuaciones de la ELA desde 1986 hasta 2021 presentan un aumento promedio anual de

51.02 metros en la ELA y la pérdida del 13.39%, influido por fenómenos climáticos extremos, como El Niño y La Niña [21]. Por ejemplo, el fenómeno de 1997 (El Niño) llevó a un aumento de área a pesar del incremento en la ELA, lo cual resalta la complejidad de los efectos climáticos locales sobre la dinámica glaciar, similar a lo observado por [33] en donde se demuestra que el tiempo de respuesta ante los fenómenos climáticos son de un año. Este patrón coincide con [13; 29] que revelan la pérdida de extensión en el Artesonraju influenciado por el albedo y la variabilidad de las precipitaciones, se registran [34] tasas de sublimación diaria en el Artesonraju, siendo más intensas en temporada seca.

En relación con la precipitación, los datos recolectados de CHIRPS han demostrado un desempeño bueno en diversas regiones del Perú, capturando data de periodos secos y húmedos con correlaciones significativas a los datos observados [35]. De acuerdo con [36], el análisis del modelo climático CMIP5, señala que, si bien no se proyectan cambios relevantes en el acumulado anual de precipitación, sí se prevén modificaciones en su distribución estacional. Siendo consistente con [21], quien sugiere un aumento de la precipitación anual en la CB del 12.1% bajo RCP8.5 y 5.8% bajo RCP4.5 bajo CMIP5; sin embargo, debido al incremento de la evapotranspiración por el aumento de temperaturas en ambos escenarios, se espera un incremento del número de meses de sequía en casi el 50 % bajo el escenario RCP 4.5 y una duplicación de este fenómeno bajo el escenario RCP 8.5; como consecuencia, se proyecta una disminución en el flujo de agua disponible en las cuencas hidrográficas. Esto resalta que no solo el volumen de lluvia es significativo, sino también su distribución temporal y la interacción con la temperatura [8]

Respecto a la incertidumbre del modelo y las líneas de nieve, el coeficiente de determinación del modelo propone un R^2 de 0.76 lo que explica en un 76% la variabilidad del modelo. Este valor es similar a lo reportado por [28] (0.89) lo que nos indica una incertidumbre aceptable. En los modelos glaciares por [8] mostró una correlación entre la precipitación y la temperatura con un R^2 de 0.62 en el glaciar Yanamarey y un R^2 de 0.84 en el glaciar Artesonraju, evidenciando que los glaciares responden diferente a los cambios en el régimen de lluvias. [37] señala que los modelos climáticos suelen enfrentar dificultades para representar con precisión la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones, lo que introduce incertidumbres significativas en las proyecciones del retroceso glaciar. En esta misma línea, [38] destaca que persisten discrepancias entre los datos observacionales y los estimados por modelos climatológicos, especialmente en zonas de alta montaña, debido a la escasa cobertura de estaciones meteorológicas. En consecuencia, [39] subraya la necesidad de contar con series de datos climáticos reales y extensas, con el fin de reducir el riesgo de sobreestimación o subestimación en las simulaciones modeladas.

Los glaciares tropicales son altamente sensibles a las condiciones climáticas, como demuestra [13] sobre la influencia del clima en el funcionamiento de un glaciar. Estos hallazgos son coherentes con los resultados obtenidos en esta

investigación, los cuales indican que, bajo el escenario RCP8.5, el Nevado Artesonraju alcanzaría un punto crítico en 2073, mientras que en el escenario RCP 4.5 este umbral se alcanzaría en 2074. En ambos casos, el glaciar superaría su capacidad para mantener un balance de masa estable, ingresando en un estado de retroceso irreversible. Contextualizando estos resultados con otros glaciares en la Cordillera Blanca, de acuerdo con [40], los glaciares Shallap y Yanamarey sufrieron un retroceso aproximado de 100 metros en la línea de equilibrio entre 2001-2021 y 2004-2019, respectivamente. Estos cambios corresponden a aumentos significativos de la temperatura mínima y la precipitación que guarda una relación inversa con la ELA [8]. De manera similar, el glaciar Pastoruri ha evidenciado una notable reducción, con un retroceso de 140 metros entre 1999 y 2011, y una fluctuación promedio entre 10 a 12 metros por año, lo cual ha llevado a proyecciones alarmantes: se estima que para el año 2050 solo quedarán 500 hectáreas de superficie glaciar, y que para el 2064 podría desaparecer por completo [41;42]. Por su parte, el glaciar Llaca ha mostrado un adelgazamiento promedio de -0.75 m durante el periodo 2014-2015, equivalente a una pérdida total de aproximadamente 156,000 m³ de hielo. Algunas zonas incluso han perdido hasta 18 metros de elevación vertical debido al colapso del frente glaciar [43]. En conjunto, estos casos evidencian una disminución acelerada de los glaciares tropicales en la Cordillera Blanca, impulsada por las condiciones climáticas extremas y el forzamiento térmico.

V. CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos evidencian una tendencia ascendente en la altitud de la Línea de Equilibrio (ELA) del Nevado Artesonraju, lo que indica un retroceso progresivo de la masa glaciar. Desde 1986 hasta 2021, la ELA ha mostrado fluctuaciones, pero con una tendencia ascendente que ha llevado a una reducción de casi 1 km² de su extensión. Las proyecciones para los próximos años, basadas en modelos de regresión, refuerzan esta tendencia, con estimaciones que sitúan la ELA en aproximadamente 5305 m.s.n.m. para el año 2064, con la temperatura actual del planeta, lo que generará una reducción acelerada del área glaciar. Bajo los escenarios climáticos RCP 8.5 y RCP 4.5, se observa que el incremento de la ELA se mantiene, aunque con diferencias en la velocidad del retroceso. En el escenario RCP 8.5 la elevación de la ELA superará los 5310 m.s.n.m. para el 2073, lo que provocará la fragmentación de la unidad glaciar del Artesonraju. En el caso del RCP 4.5, la pérdida del umbral de equilibrio tendría lugar hacia 2074, indicando que, incluso con una reducción de emisiones, el retroceso glaciar continuará avanzando.

Estos resultados contribuyen a la evaluación de los efectos del cambio climático sobre la dinámica glaciar en la Cordillera Blanca. La aceleración del retroceso glaciar plantea la necesidad de estrategias de adaptación y gestión del recurso hídrico, considerando que la reducción de ecosistemas glaciares afectará la regulación natural del agua en la zona.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecemos a MapBiomass por la elaboración de mapas que facilitaron el análisis espacial y por su apoyo en la descarga de imágenes satelitales. También extendemos nuestro agradecimiento al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña y al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú por su constante compromiso en la generación y difusión de información clave.

REFERENCIAS

- [1] A. K. Laha, "Linear Regression for Predictive Analytics," Springer Proceedings in Business and Economics, pp. 13–19, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-1208-3_2.
- [2] M. José Rubial and F. Y. Conceptuales Didácticos, "Formación y movimiento de los glaciares," LOS GLACIARES: Dinámica y Relieve, 2005.
- [3] B. M. P. Chandler and D. J. A. Evans, "Glacial Processes and Sediments," in Encyclopedia of Geology, 2nd ed., vol. 2, 2020. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.11902-5.
- [4] A. Ames Marquez and B. Francou, "Cordillera Blanca - Glaciares en la historia," Bulletin de l'Institut Français d'Études Andines, vol. 24, no. 1, pp. 37–64, 1995. doi: 10.3406/BIFEA.1995.1172.
- [5] G. Kaser and C. Georges, "Changes of the equilibrium-line altitude in the tropical Cordillera Blanca, Peru, 1930–50, and their spatial variations," Annals of Glaciology, vol. 24, pp. 344–349, 1997. doi: 10.3189/s0260305500012428.
- [6] UNESCO, El Atlas de Glaciares y Aguas Andinos, 2018. [Online]. Available: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000266209>
- [7] A. Rabatel et al., "Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change," The Cryosphere, vol. 7, no. 1, pp. 81–102, 2013. doi: 10.5194/tc-7-81-2013.
- [8] E. Calizaya et al., "Snow Cover Temporal Dynamic Using MODIS Product..." Sustainability, vol. 15, no. 9, 2023. doi: 10.3390/su15097610.
- [9] E. A. Herrador et al., Pasaje a la Ciencia, I.E.S. Antonio de Mendoza, 2022.
- [10] INAIGEM and W. E. Sánchez Rodríguez, "Estimación de la contribución del carbono negro..." Repositorio Institucional - ANA, 2016. [Online]. Available: <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4440>
- [11] X. Xu and N. F. Glasser, "Glacier sensitivity to equilibrium line altitude..." Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, vol. 440, pp. 614–620, 2015. doi: 10.1016/j.palaeo.2015.09.025.
- [12] A. Ohmura and M. Boettcher, "On the Shift of Glacier Equilibrium Line Altitude..." Water, vol. 14, no. 18, 2022. doi: 10.3390/w14182821.
- [13] M. F. L. Gacha and M. Koch, "Distributed energy balance flux modelling..." Climate, vol. 9, no. 9, 2021. doi: 10.3390/cli9090143.
- [14] R. Pellitero, Evolución del Balance de Masas y Retroceso Glaciar en el Nevado Artesonraju, 2018. [Online]. Available: <https://addi.ehu.es/handle/10810/30075>
- [15] R. Vargas et al., "Reconocimiento de peligros naturales en la laguna nueva Artesoncocha Alta," 2016.
- [16] Autoridad Nacional del Agua and Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, "Seguimiento al Comportamiento de Glaciares..." 2023.
- [17] INGEMMET, Instituto Geológico Minero y Metalúrgico - Dirección General de Geología, 1989.
- [18] INEI, "Sistema de Información Distrital para la Gestión Pública," [Online]. Available: <https://estadist.inei.gob.pe/map>
- [19] S. Huerta, Carta de Transparencia EPS Chavín, 2024.
- [20] A. Rabatel et al., "Can the snowline be used as an indicator..." Journal of Glaciology, 2012. doi: 10.3189/2012JoG12J027.

- [21] E. R. Potter et al., "A future of extreme precipitation and droughts in the Peruvian Andes," *NPJ Climate and Atmospheric Science*, vol. 6, no. 1, 2023. doi: 10.1038/s41612-023-00409-z.
- [22] S. Emori et al., "CMIP5 data provided at the IPCC Data Distribution Centre," 2016. [Online]. Available: http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html
- [23] C. Field et al., "Cambio Climático 2014: Informe de síntesis," IPCC, 2014.
- [24] W. S. B. Paterson, *The Physics of Glaciers*, 1981. [Online]. Available: <https://archive.org/details/physicsofglacier0000unse>
- [25] A. N. Ibáñez Blancas et al., "Cambios en las áreas nevadas y tendencias en la cobertura de nieve..." 2020. [Online]. Available: <https://www.redalyc.org/journal/721/72166221002/>
- [26] L. Dávila Roller et al., "Inventario Nacional de Glaciares: Las cordilleras glaciares del Perú," 2018.
- [27] P. Burns and A. Nolin, "Using atmospherically-corrected Landsat imagery..." *Remote Sensing of Environment*, vol. 140, 2014. doi: 10.1016/j.rse.2013.08.026.
- [28] E. Loarte et al., "Determinación de la variación espacio-temporal..." SENAMHI, 2015. [Online]. Available: www.senamhi.gob.pe/rpga
- [29] C. D. Lopez Arenas and J. R. Cadena, *Glaciares, nieves y hielos de América Latina*, Ingeominas, 2010.
- [30] A. M. Lorrey et al., "Southern Alps equilibrium line altitudes..." *Journal of Glaciology*, vol. 68, no. 272, 2022. doi: 10.1017/jog.2022.27.
- [31] E. Lee et al., "Palaeglaciación in the Low Latitude, Low Elevation Tropical Andes..." *Frontiers in Earth Science*, vol. 10, 2022. doi: 10.3389/feart.2022.838826.
- [32] E. Serrano, C. Agudo, and J. J. González Trueba, "La deglaciación de alta montaña - Morfología," 2002.
- [33] A. Richardson, R. Carr, and S. Cook, "Investigating the Past, Present and Future Responses of Shallap and Zongo Glaciers..." *Journal of Glaciology*, 2024. doi: 10.1017/jog.2023.107.
- [34] M. Winkler et al., "Measured and modelled sublimation on the tropical Glaciar Artesonraju, Perú," *The Cryosphere*, vol. 3, no. 1, pp. 21–30, 2009. doi: 10.5194/tc-3-21-2009.
- [35] I. A. Díaz Pabló et al., "Validación de los datos CHIRPS de precipitación..." Dirección General de Hidrología y Recursos Hídricos, 2015.
- [36] A. Llacza Rodríguez et al., "Escenarios climáticos al 2050 en el Perú: Cambios en el clima promedio," SENAMHI, 2021. [Online]. Available: <http://repositorio.senamhi.gob.pe/handle/20.500.12542/1470>
- [37] J. Valdivia et al., "Rethinking Water Sustainability: Precipitation Changes in the Peruvian Andes..." 2023. doi: 10.21203/rs.3.rs-3040667/v1.
- [38] A. G. Rosales et al., "Valley–Mountain Circulation Associated with the Diurnal Cycle of Precipitation..." *Atmosphere*, vol. 13, no. 2, 2022. doi: 10.3390/atmos13020344.
- [39] P. Krajčí, L. Holko, R. A. P. Perdigão, and J. Parajka, "Estimation of regional snowline elevation (RSLE)..." *Journal of Hydrology*, vol. 519(PB), 2014. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.064.
- [40] J. de D. Fernandez Vega, *Automatización del cálculo de la línea altitudinal de nieve mediante machine learning*, Tesis de pregrado, UNMSM, 2024.
- [41] N. Angeles et al., "Post-Glacial Chronosequence Of The Pastoruri Snow-Capped..." LACCEI International Multi-Conference, 2021. doi: 10.18687/LACCEI2021.1.1.38.
- [42] Y. Tarazona, "Aplicación de la Teledetección como una herramienta para el análisis multitemporal..." UNMSM, 2012.
- [43] O. Wigmore and B. Mark, "Monitoring tropical debris-covered glacier dynamics..." *The Cryosphere*, vol. 11, no. 6, pp. 2463–2480, 2017. doi: 10.5194/tc-11-2463-2017.