





Artículo

## Efectos del Cambio Climático Sobre los Ecosistemas de Montaña en la Cordillera Carabaya - Perú

Renny Daniel Diaz<sup>1</sup> , Aracely Dayana Machaca<sup>2</sup> , Germán Belizario<sup>3</sup> , Efrain Lujano<sup>3</sup> <sup>1</sup>*Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña, Cusco, Perú.*<sup>2</sup>*Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Juliaca, Perú.*<sup>3</sup>*Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.*

Recibido em: 21 de Outubro de 2022 - Aceito em: 8 de Junho de 2023

### Resumen

Entender como el cambio climático (CC) afectaría los ecosistemas de montaña, es clave para la planificación y gestión del territorio en los Andes. Se utilizó las zonas de vida de Holdridge (HLZ) para evaluar los efectos del CC sobre los ecosistemas de montaña en la cordillera Carabaya para un futuro centrado en el 2050 y 2070 bajo escenarios RCP-4.5 y RCP-8.5. Se utilizó el modelo bioclimático de Holdridge para obtener las HLZ de referencia (1961-1990) con información climática de WorldClim previa reducción de escala y validación con información observada. Se identificaron nueve HLZ, siendo las de mayor extensión el Páramo (41.2%), Bosque húmedo-Montano (20.3%) y Tundra (14.6%). Las HLZ y el mapa de ecosistemas del Perú presentaron un alto grado de concordancia (índice de Kappa de 0.83). Los ecosistemas más afectados por el CC serían los comprendidos en las HLZ Nival, Tundra y Páramo que se reducirían, bajo el escenario RCP-8.5, en -96.1, -92.7 y -33.9% para el 2050, y -98.8, -99.2 y -71.7% para el 2070 desplazándose a mayores altitudes; por otro lado, los ecosistemas comprendidos en el Bosque húmedo Montano aumentarían entre +86.8% y +131.6% para el escenario RCP-4.5 y RCP-8.5, respectivamente, desplazando a la Tundra y Páramo.

**Palabras clave:** Biodiversidad de montaña, Cambio de vegetación, Modelo bioclimático de Holdridge, WorldClim, Zonas de vida.

## Effects of Climate Change on Mountain Ecosystems in the Carabaya Mountain Range - Peru

### Abstract

Understanding how climate change (CC) would affect mountain ecosystems is key for planning and managing the territory in the Andes. Holdridge's life zones (HLZ) were used to evaluate the effects of CC on mountain ecosystems in the Carabaya mountain range for a future centered on 2050 and 2070 under RCP-4.5 and RCP-8.5 scenarios. Holdridge's bioclimatic model was used to obtain the reference HLZ (1961-1990) with climatic information from WorldClim after scaling down and validation with observed information. Nine HLZ were identified, with the highest extent being Paramo (41.2%), Humid-Montane Forest (20.3%), and Tundra (14.6%). The HLZ and the ecosystem map of Peru showed a high degree of concordance (Kappa index of 0.83). The ecosystems most affected by CC would be those within the Nival, Tundra, and Paramo HLZ, which would be reduced, under the RCP-8.5 scenario, by -96.1, -92.7, and -33.9% for 2050, and -98.8, -99.2, and -71.7% for 2070, moving to higher altitudes. On the other hand, ecosystems within the Humid-Montane Forest would increase by +86.8% and +131.6% for the RCP-4.5 and RCP-8.5 scenarios, respectively, displacing Tundra and Paramo.

**Keywords:** Mountain biodiversity, Vegetation change, Holdridge bioclimatic model, WorldClim, Life zones.

## 1. Introducción

Los andes tropicales (AT), presentan una alta variabilidad morfológica, climática y biótica (Herzog *et al.*, 2012) que lo hacen muy sensibles frente al cambio climático (CC) (Cuesta *et al.*, 2012). Esta variabilidad en geografía y clima (Fan y Bai, 2021), condicionan la existencia de ecosistemas singulares y el desarrollo de flora y fauna particular dándole la característica de alta biodiversidad a los AT (Kim *et al.*, 2020). Según el quinto informe del Panel Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC), el CC es una de las más importantes amenazas, y el más grande desafío para la humanidad del siglo XXI (Romero-Cuéllar *et al.*, 2018), pero también es el problema ambiental más relevante a nivel mundial debido a que sus impactos generarían el incremento de la temperatura media mundial y el cambio en la precipitación (Montero-Martínez *et al.*, 2013) que provocarían cambios dramáticos sobre todo en los ecosistemas de montaña. Se sabe que el CC representa una grave amenaza para los ecosistemas de los AT (Jiménez *et al.*, 2009), sin embargo, existe mucha incertidumbre sobre sus impactos en los ecosistemas de montaña, su biodiversidad y en los servicios ecosistémicos que brindan. Por lo tanto, es necesario tomar iniciativas para identificar los posibles impactos del CC sobre los ecosistemas de montaña, con el fin de planificar y tomar acciones para reducir la vulnerabilidad (IPCC, 2014), a través de la conservación y aprovechamiento sostenible (Josse *et al.*, 2009).

En las evaluaciones del CC, generalmente se utilizan Modelos de Circulación General (GCM) (IPCC, 2019), que son representaciones numéricas tridimensionales de la dinámica y de los procesos físicos químicos de la atmósfera, los océanos y los continentes (Salman *et al.*, 2020). Los GCM son los instrumentos más confiables para predecir futuras respuestas climáticas frente al incremento de los gases de efecto invernadero (IPCC, 2014), sin embargo, las escalas espaciales de los GCM son muy gruesas cuando se trata de representar la climatología de los AT, siendo necesarios realizar una reducción de escala para mejorar la representación espacial de la variabilidad climática.

Según Van der Hammen *et al.* (2002), las proyecciones climáticas indicarían que el calentamiento en los AT se intensifica con la altitud, siendo más sensible a los cambios los ecosistemas de mayor altitud. Por otro lado, Tovar *et al.* (2022) mencionan que el CC en el periodo (2040-2070) será más fuerte en las zonas altas de los AT (hasta +4 °C bajo el escenario RCP-8.5), mientras que en las zonas templadas se espera que aumenten hasta +2 °C, generando impactos en el alcance y la composición de los ecosistemas presentes en los biomas andinos. Del mismo modo, Zevallos y Lavado-Casimiro (2022), mencionan que la biodiversidad presente en el Perú se verá afectada por

el CC, donde los escenarios futuros coincidieron en que la cobertura actual de biomas se mantendrá estable al 82%, el 6% aproximadamente cambiará sus condiciones actuales a condiciones de mayor humedad, el 4,5% mantendrá una fisonomía estable, pero con aumento de la humedad; y finalmente, el 6% experimentará una disminución de la humedad manteniendo su apariencia.

La evidencia más notable del impacto del CC es la reducción de los glaciares y los modelos climáticos bajo diferentes escenarios futuros proyectan resultados poco alentadores. Según el INAIGEM (2018), entre 1962 y 2016 el Perú ha perdido 1284 km<sup>2</sup> de cobertura glaciar equivalente al 53.5% del área total. Por otro lado, Díaz *et al.* (2017) menciona que los nevados Chichi Capac y Allin Capac de la cordillera Carabaya perdieron el 67% de su cobertura glaciar en los últimos 40 años (1975-2015). Entender como el CC afectaría la relación que existe entre los ecosistemas de montaña como: glaciares, pajonales, bofedales, páramos y bosques montanos, es clave para entender como evolucionarían los servicios ecosistémicos que proveen los AT. Más del 85% de la población en el Perú dependen de manera directa o indirecta de los ecosistemas de montaña para el acceso a fuentes de agua, energía y alimentos. Por ello, es necesario desarrollar estrategias integrales de adaptación frente al CC que mejoren las capacidades para la adaptación de las poblaciones de los AT (Torres, 2014).

En la actualidad no existen metodologías claras para evaluar los impactos del CC sobre los ecosistemas de montaña. Sin embargo, diversos autores (Jiménez *et al.*, 2009; Alarcon y Pabón, 2013; Durán *et al.*, 2014; Serrano y Calderón, 2016; Derguy, 2017; Fan y Bai, 2021) utilizaron el modelo bioclimático desarrollado por Holdridge en la evaluación de los posibles impactos de los cambios climáticos sobre los ecosistemas. (Holdridge, 1967) desarrolló un modelo de calificación basado en variables bioclimáticas como la temperatura y humedad, como factores condicionantes para la existencia de la vegetación y de fauna asociada a ella, a la que se denominó Zonas de Vida de Holdridge (HLZ). Frente a la limitada disponibilidad de información climática observada y a la compleja geografía de los AT, el uso de las HLZ para la evaluación de los impactos del CC sobre los ecosistemas de montaña es una de las alternativas más viables.

La aplicación de las HLZ en el Perú viene desde 1960, con el primer mapa de HLZ para el Perú (Tossi, 1960). La Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales - ONERN publicó una segunda versión del mapa de HLZ para el Perú (ONERN, 1976), que fue actualizada por el Instituto Nacional de Recursos Naturales - INRENA en 1995. Finalmente, Aybar-Camacho *et al.* (2017) y Zevallos y Lavado (2021) publican una última actualización del mapa de HLZ para el Perú. Si bien, todas las actualizaciones siguen el modelo bioclimático de Hol-

dridge, se observan diferencias en los últimos resultados debido principalmente a la información base utilizada. Se podría esperar mayor precisión de la última actualización del mapa de HLZ respecto de las primeras versiones, sin embargo, persiste la incertidumbre por la baja resolución espacial (~10 km) utilizada, no representando adecuadamente los ecosistemas de los AT.

Por lo tanto, nuestro estudio tuvo como objetivo utilizar las HLZ como una metodología para evaluar los efectos del CC sobre los ecosistemas de montaña en la cordillera Carabaya para un futuro centrado en el 2050 y 2070 bajo los escenarios de emisión RCP-4.5 y RCP-8.5, con una resolución espacial de 20 m, generando de esta manera una mayor precisión y menor incertidumbre sobre el futuro de los ecosistemas de montaña en los AT frente al CC. Los escenarios RCP-4.5 y RCP-8.5 permiten evaluar posibles impactos del cambio climático en la distribución y la diversidad de las especies, representando dos extremos de posibles futuros. El escenario RCP-4.5 proporciona una estimación de los posibles cambios climáticos en un futuro en el que las emisiones de gases de efecto invernadero se reduzcan significativamente, mientras que el escenario RCP8.5 pro-

porciona una estimación de los posibles cambios en un futuro en el que no se tomen medidas significativas para reducir las emisiones. Nuestra investigación busca proveer una base científica que aporte a la planificación de estrategias y políticas que fortalezcan las medidas de adaptación frente a los impactos del CC sobre los ecosistemas de montaña y sus servicios ecosistémicos que proveen.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1. Área de estudio

La cordillera Carabaya (Fig. 1) se ubica al sur de la cordillera de los Andes del Perú entre los departamentos de Cusco y Puno, y tiene una extensión de 11,679.00 km<sup>2</sup> (INAIGEM, 2018). Presenta una gradiente altitudinal que va desde los 437 m.s.n.m. en el valle del río Inambari hasta los 5,804 m.s.n.m. en el pico más alto del nevado Allin Ccapac. Se encuentra entre dos vertientes hidrográficas (Amazónica y Titicaca), y de acuerdo al mapa de ecosistemas del Perú (MINAM, 2019), la cordillera Cara-

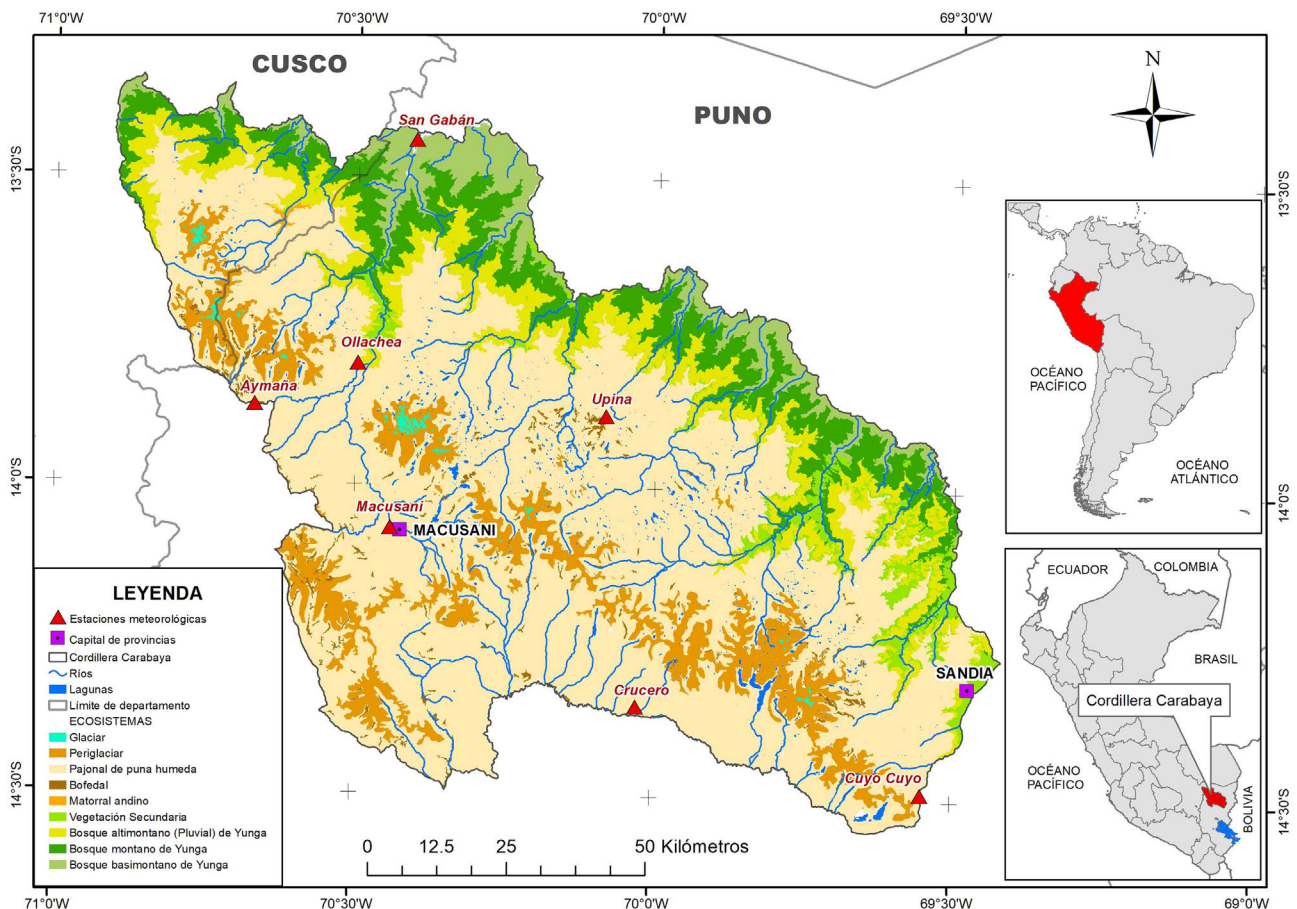


Figura 1 - Ubicación geográfica y ecosistemas (MINAM, 2019) de la cordillera Carabaya.

baya alberga 8 ecosistemas que van desde el ecosistema glaciar hasta el ecosistema de bosques yungas.

## 2.2. Información climática

Se utilizaron registros mensuales de precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima de siete estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (Fig. 1). Primero, realizamos un control de calidad manual de los datos de temperatura y precipitación que consistió en una verificación de límites físicos, consistencia interna, y consistencia espacial. Luego utilizamos un proceso automático para la homogeneización, control de calidad y relleno de valores faltantes de las series de datos con R Climatol (Guijarro, 2019).

Para representar la distribución espacial de las variables climáticas, se utilizó la base de datos climática WorldClim (WC) (Fick y Hijmans, 2017). WC es un conjunto de datos interpolados a una resolución espacial de 1 km de variables climáticas y bioclimáticas globales (precipitación y temperatura), esta base de datos engloba datos climáticos promedios mensuales monitoreados por estaciones meteorológicas de todo el mundo, cubriendo un periodo de referencia (1961 a 1990) y un periodo futuro centrado en los años 2050 y 2070 (Riquetti *et al.*, 2020). Para generar los mapas climáticos correspondientes al periodo de referencia de WC, se utilizó una técnica de reducción de escala estadística mediante regresión lineal múltiple, que permitió pasar de una resolución espacial de 1 km a 20 m. Se empleó el modelo de elevación digital (DEM ALOS) como covariable. Posteriormente, se validaron los mapas climáticos de precipitación y temperatura con reducción de escala mediante información climática observada de las estaciones meteorológicas. Para esta validación, se usaron tres métricas de desempeño (Tabla 1), a saber, el coeficiente de correlación ( $r$ ), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo porcentual (PBIAS) (Ferreira *et al.*, 2020), estas métricas son ampliamente utilizadas para evaluaciones climáticas (Narvaez-Montoya *et al.*, 2022; Llauca y Lavado, 2023). Además, se

**Tabla 1** - Métricas estadísticas de desempeño para evaluar los productos de WorldClim.

Métricas	Ecuación	Unidad	Valor óptimo
Coeficiente de correlación ( $r$ )	$r = \frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}}$	-	$\pm 1$
Raíz del error medio cuadrático (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}$	mm	0
Sesgo porcentual (PBIAS)	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100$	%	0

Nota:  $S$  son los valores simulados de WorldClim;  $O$  los valores observados;  $\bar{s}$  y  $\bar{o}$  denotan los valores medios de  $S$  y  $O$  respectivamente;  $n$  indica el número de pares de datos.

llevó a cabo una corrección del sesgo del conjunto de datos de WC (precipitación y temperatura) mediante el método de regresión lineal. Finalmente, se verificó que la corrección hubiera eliminado el sesgo de los datos climáticos mediante la utilización de métricas estadísticas de desempeño.

Los mapas climáticos futuros se produjeron mediante el enfoque del método delta, el cual se define como la diferencia entre la media de una variable climática en el futuro y el periodo de referencia (Navarro-Racines *et al.*, 2020). El procedimiento se basa en: (1) cálculo de la climatología de referencia y futura de alta resolución obtenidos de WC, (2) cálculo de anomalías como la diferencia absoluta entre valores futuros y actuales en las temperaturas y diferencias proporcionales en la precipitación, (3) interpolación de anomalías de alta resolución a partir de puntos de cuadrícula de pixel, (4) adición de las superficies interpoladas a la climatología de referencia de alta resolución.

Los cambios en la precipitación y temperatura fueron evaluados a través del método cambio de delta (anomalía):

Precipitación:

$$P_f = P_c \times (1 + \Delta P)$$

$$\Delta P = \frac{(P_f - P_c)}{P_c}$$

Temperatura:

$$T_f = T_c + \Delta T$$

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = T_f - T_c$$

donde  $P_f$  es la precipitación futura de acuerdo a los GCM,  $\Delta P$  es la tasa de variación de la precipitación para un futuro,  $P_c$  es la precipitación de referencia.  $T_f$  es la temperatura futura de acuerdo a los GCM,  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) es la tasa de variaciones de la temperatura para un futuro, y  $T_c$  es la temperatura referencia.

Los mapas futuros estuvieron centrados en los años 2050 y 2070 de acuerdo a los escenarios de emisión RCP-4.5 y RCP-8.5 de 10 modelos de circulación general (GCM): ACCESS1.0, CCSM4, GFDL-CM3, HadGEM2-AO, HadGEM2-CC, IPSL-CM5A-LR, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, MIROC5 y MRI-CGCM3.

## 2.3. Determinación de zonas de vida de Holdridge (HLZ)

La biotemperatura se obtuvo a partir del promedio de las temperaturas máximas y mínimas, usando la información mensual directamente a través de la ecuación propuesta por Holdridge. La biotemperatura fue reclasificada en categorías de zonas latitudinales establecidas en el dia-

grama de Holdridge (Tabla 2). La precipitación acumulada anual fue obtenida por sumatoria de la precipitación promedio por cada mes. La evapotranspiración potencial (ETP) se estimó siguiendo la metodología de Thornthwaite (Fernandez Long et al., 2014). Las provincias de humedad (ratio precipitación - evapotranspiración), se determinó dividiendo la evapotranspiración potencial con la precipitación media anual (Tabla 2). Finalmente, para obtener las HLZ, se utilizó el diagrama bioclimático de Holdridge (Fig. 2) que emplea 3 ejes: precipitación, biotemperatura y ratio evapotranspiración - precipitación.

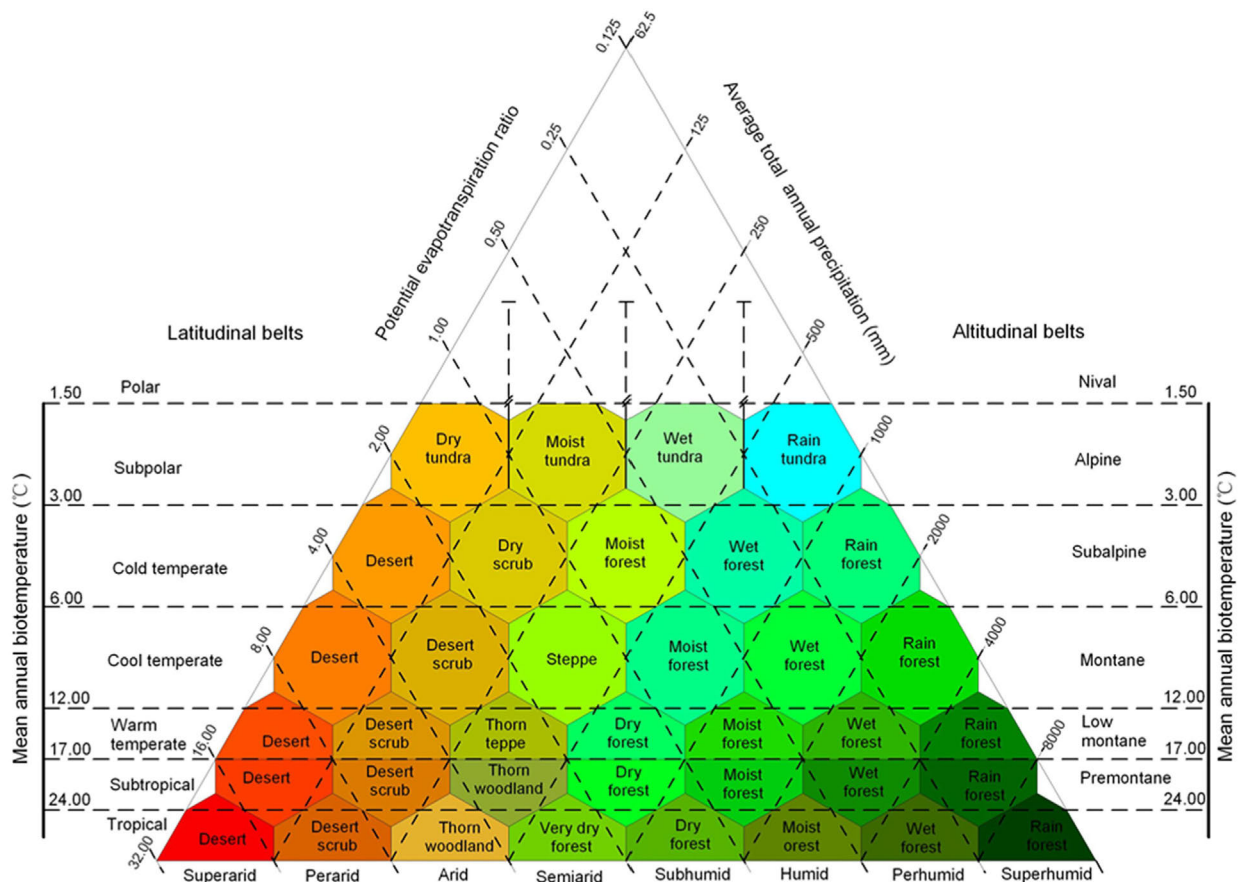
La integración de las variables bioclimáticas y topográficas para generar el mapa de HLZ se realizó con la herramienta estadísticas zonales de ArcGIS. Para la validación se obtuvieron 385 puntos de control utilizando el muestreo aleatorio (Cochran, 1997), 44 puntos de control fueron validados con información recogida en campo utilizando fichas de descripción y fotografías de acuerdo a la accesibilidad. Por otro lado, los 341 puntos de control restantes fueron utilizados para evaluar la similitud con el mapa de ecosistemas del Perú (MINAM, 2019) previa homogeneización de las categorías del mapa de HLZ (Fig. 3), para la evaluación de la correlación entre ambos mapas se utilizó la matriz de confusión para obtener

**Tabla 2** - Intervalos de biotemperatura y ratio evapotranspiración - precipitación según Holdridge.

Biotemperatura (°C)		Ratio evapotranspiración - precipitación	
Rango	Piso altitudinal	Rango	Provincias de humedad
< 1.5	Nival	0.125 a 0.25	Superhúmedo o pluvial
1.5-3	Alpino (Andino)	0.25 a 0.5	Perhúmedo o muy húmedo
3-6	Subalpino (Subandino)	0.5 a 1	Húmedo
6-12	Montano	1 a 2	Subhúmedo o seco
12-18	Montano Bajo	2 a 4	Semiárido
18-24	Premontano	4 a 8	Árido
> 24	Piso basal	8 a 16	Perárido
		16 a 32	Superárido

Fuente: Aybar et al., 2017.

métricas como el índice global y el coeficiente de Kappa (Lugo et al., 1999). La estadística Kappa es una métrica de precisión que incluye toda la información con un error de matriz, varía de 0 a 1, donde 0 indica que no es preciso y 1 indica que es totalmente preciso (Ambinakudige y Intsisful, 2022).



**Figura 2** - Diagrama Bioclimático de Holdridge (de Fan et al., 2013).

Biomás (a)	Ecosistemas (b)	Zonas de Vida - HLZ (c)
Glaciar	Glaciar	Nival Subtropical (NS)
	Periglaciar	
Puna Humeda	Bofedal	Tundra pluvial (tp-AS)
	Pajonal de puna húmeda	
Páramo	Matorral andino	Páramo muy húmedo (pmh-SaS)
Bosque Yunga	Bosque altimontano (Pluvial) de Yunga	Bosque húmedo - Montano (bh-MS)
		Bosque muy húmedo - Montano (bmh-MS)
	Bosque montano de Yunga	Bosque húmedo - Montano Bajo (bh-MBS)
		Bosque muy húmedo - Montano Bajo (bmh-MBS)
	Bosque basimontano de Yunga	Bosque muy húmedo - Premontano (bmh-PS)
Bosque pluvial - Premontano (bp-PS)		

**Figura 3** - Distribución de biomás, ecosistemas y zonas de vida en la cordillera Carabaya, (a) Zevallos y Waldo 2021, Tovar *et al.* 2013 y (b) MINAM 2019.

$$n = \frac{z^2}{d^2} O(1 - O)$$

donde  $O$  es la precisión general expresado como una proporción (0.75),  $z$  es el percentil de la distribución normal estándar ( $z = 1.96$  para un 95% de intervalo de confianza) y  $d$  es la mitad del ancho del intervalo de confianza para  $O$  (0.03).

#### 2.4. Estimación de HLZ al 2050 y 2070

Para el análisis del futuro se adecuó el modelo bioclimático de Holdridge considerando las proyecciones climáticas de los GCM y bajo los escenarios RCP-4.5 y RCP-8.5. Para comparar si los cambios en las HLZ futuros y de referencia son estadísticamente significativos se aplicó la prueba  $t$  de Student (Rodrigues *et al.*, 2021; Ocampo-Zuleta y Parrado-Rosselli, 2022; Builes-Jaramillo *et al.*, 2023). Se utilizó  $t$  de Student (Feng *et al.*, 2017), con un nivel de significancia del 5% ( $\alpha = 0.05$ ), donde se estableció una hipótesis nula de que los valores futuros son iguales a los de referencia y una hipótesis alternativa de que los valores futuros son diferentes a los de referencia.

### 3. Resultados y Discusión

Los datos climáticos de WC presentaron una alta correlación con los datos observados de precipitación y temperatura del aire (máxima y mínima) con coeficientes de correlación ( $r$ ) de 0.997, 0.95 y 0.94, un PBIAS de -14.60% y -64.3% y una RMSE de 420.6 mm/año, 3.5 °C

y 3.83 °C, respectivamente. Estas diferencias posiblemente se deban a la alta variabilidad espacial de las variables climáticas en zonas de alta montaña. Por ejemplo, en la estación Macusani se registran precipitaciones de 737.3 mm/año, sin embargo, a 68.0 km al norte la estación San Gabán registra precipitaciones de 6,354.6 mm/año, de manera similar, las temperaturas medias anuales varían desde los 4.8 °C hasta los 21.1 °C para las estaciones de Macusani y San Gabán respectivamente. Finalmente se procedió a corregir el sesgo de los datos WC en donde se obtuvieron valores óptimos del coeficiente de correlación, PBIAS y RMSE para los datos de precipitación y temperatura del aire. Estos resultados indican que la corrección del sesgo fue efectiva y permitió mejorar la precisión de los datos climáticos de WC. Es importante destacar que estos resultados son relevantes para la interpretación adecuada de los datos y para la toma de decisiones basadas en información climática confiable.

Se determinaron nueve HLZ para la cordillera Carabaya siendo las de mayor extensión, el Páramo muy húmedo - Subandino Subtropical (pmh-SaS) con el 41.2%, el Bosque húmedo-Montano Subtropical (bh-MS) con el 20.3% y la Tundra pluvial - Andino Subtropical (tp-AS) con el 14.6%. Por otro lado, se observa que la HLZ Nival Subtropical representa el 2.2%. El 21.8% restante de HLZ agrupa a diferentes tipos de bosques que van desde bosques montanos a pre-montanos de muy húmedo a pluvial (Fig. 4). Estos resultados difieren de los obtenidos en el atlas de zonas de vida del Perú por Aybar *et al.* (2017)



**Figura 4** - HLZ de la cordillera Carabaya: a) Nival subtropical (NS), b) Tundra pluvial - Andino Subtropical (tp-AS), c) Páramo muy húmedo - Sub andino subtropical (pmh-SaS), d) Bosque húmedo - Montano Subtropical (bh - MS), e) Bosque húmedo - Montano Bajo Subtropical (bh - MBS), f) Bosque pluvial - Premontano Subtropical (bp - PS).

quienes identificaron áreas importantes de matorral y estepa. De acuerdo al modelo bioclimático de Holdridge, para matorral y estepa el rango de precipitación debe ser de 250-500 mm/año y 125-250 mm/año respectivamente, sin embargo, la precipitación en la cordillera Carabaya no bajarían de los 600.0 mm/año. Estas diferencias en los resultados podrían deberse a la resolución espacial utilizada y a las pocas estaciones en zonas de alta montaña limitando la posibilidad de mejorar los ajustes a las variables climáticas, por otro lado, observamos que las HLZ obtenidas a partir de WC son más coherentes con lo observado en el campo, sin embargo, es necesario establecer criterios para validar los HLZ siendo esta una tarea pendiente.

El mapa de HLZ fue comparado con el mapa de ecosistemas (MINAM, 2019), obteniendo como resultado el índice global de 81.83 y el coeficiente de Kappa de 0.84, de categoría “muy bueno” (Altman, 1991). En ese sentido, las HLZ obtenidas presentan un alto grado de con-

cordancia con el mapa de ecosistemas, otorgando confiabilidad para la utilización de las HLZ como método de referencia para la evaluación de ecosistemas en la cordillera Carabaya.

### 3.1. Proyecciones de temperatura

El ensamble realizado de todos los modelos evaluados muestra que la temperatura aumentaría entre +1.5 °C y +3 °C para el 2050 y entre los +2 °C y +4 °C para el 2070 bajo el escenario RCP-4.5. En cambio, bajo el escenario RCP-8.5 las temperaturas aumentarían entre +2 °C y +4 °C para el 2050 y hasta los +3 °C y +5 °C para el 2070 (Fig. 5). El aumento de la temperatura sería mayor en la región amazónica (noreste de la cordillera) con temperaturas superiores a los +3 °C, a diferencia de la región altiplánica (suroeste de la cordillera) en donde se observa incrementos entre los +1.5 y +3 °C. La tendencia del aumento de temperatura coincide con lo registrado en otros estudios similares, Llacza *et al.*, (2021) menciona que, en los Andes del Perú, los cambios de temperatura serán superiores a 2 °C. Así también, Nogues-Bravo *et al.* (2007), Martín Esquivel *et al.* (2021) y Rathore *et al.* (2022) mencionan que las proyecciones climáticas de temperatura indicarían que el calentamiento en la cordillera de los Andes se intensifica con la altitud.

### 3.2. Proyecciones de precipitación

Las proyecciones de precipitación muestran un comportamiento variable en la cordillera Carabaya, se espera que la precipitación aumente entre +10% a +30% para la región amazónica (noreste de la cordillera) al 2050 y 2070 respectivamente, un panorama distinto se prevé en la región del altiplano (suroeste de la cordillera), con reducciones de la precipitación en -10% a -30% al 2050 y 2070 respectivamente. Las tendencias mostradas son similares para ambos escenarios RCP evaluados (Fig. 4), y concuerdan con los obtenidos por (Llacza *et al.*, 2021), que prevén incrementos y disminuciones no muy significativas en la precipitación entre +10% a -10% en promedio.

### 3.3. Proyecciones futuras de las HLZ y ecosistemas

Los resultados indicarían cambios significativos en la distribución espacial y altitudinal de los ecosistemas en la cordillera Carabaya. Los ecosistemas más afectados por el CC serían los que albergan la HLZ Nival Subtropical (ecosistemas glaciar y periglaciar), y la HLZ Tundra pluvial (ecosistemas pajonal de puna húmeda y bofedales). Bajo el escenario RCP-4.5 la HLZ Nival se reduciría en 92.2% y 96.4% para el 2050 y 2070 respectivamente, mientras que la HLZ Tundra se reduciría en 85.8% y 91.4% para el 2050 y 2070 respectivamente. Bajo el escenario RCP-8.5 la HLZ Nival se reduciría en 96.1% y 98.8% para el 2050 y 2070 respectivamente, mientras que la HLZ Tundra se reduciría en 92.7% y 99.2% para el 2050 y 2070 respectivamente. De manera similar la HLZ

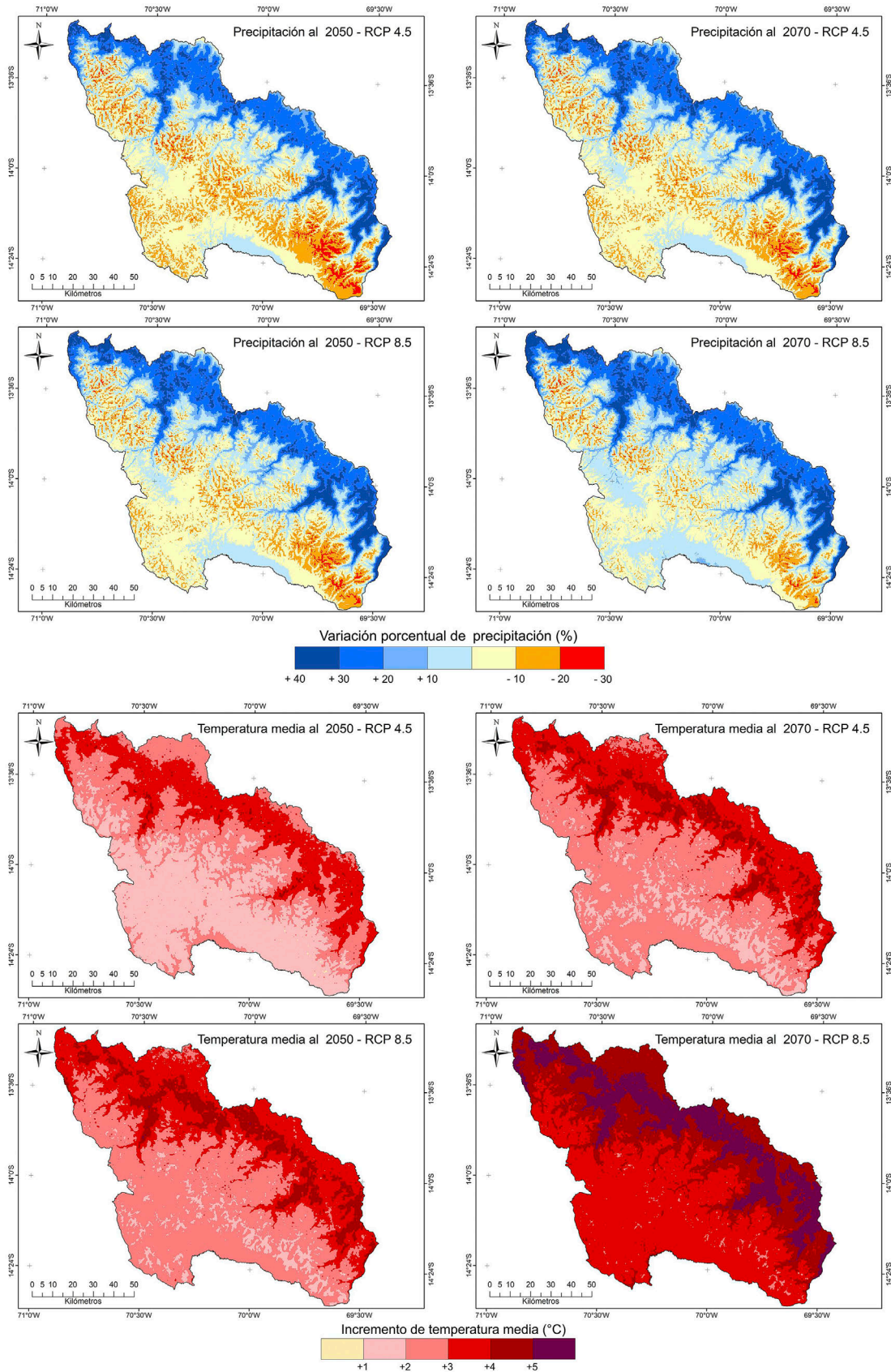


Figura 5 - Ensamble de precipitación y temperatura media al 2050 y 2070 para los escenarios RCP-4.5 y RCP-8.5.



Páramo muy húmedo (ecosistemas matorral andino y pajonal de puna húmeda), se reduciría en 19.8% y 32.4% para el 2050 y 2070 respectivamente bajo el escenario RCP-4.5, mientras que bajo el escenario RCP-8.5 se reduciría en 33.9% y 71.74% para el 2050 y 2070 respectivamente.

Las HLZ Bosque húmedo Montano y Bosque muy húmedo Montano, que se encuentran dentro del ecosistema de bosque altimontano de Yunga, presentarían cambios variables. Mientras que la HLZ Bosque húmedo - Montano aumentaría en extensión entre los 74.5% y 99.0% al 2050 y 2070 respectivamente bajo el escenario RCP-4.5 y bajo el escenario RCP-8.5 aumentaría en 101.9% y 161.0% para el 2050 y 2060 respectivamente; la HLZ Bosque muy húmedo - Montano se reduciría en un 64.2% y 72.5 para el 2050 y 2070 bajo el escenario RCP-4.5 y bajo el escenario RCP-8.5 se reduciría en un 67.8% y 93.2% para el 2050 y 2070 respectivamente.

Las HLZ Bosque muy húmedo Premontano y Bosque pluvial, comprendidos en el ecosistema de bosque basimontano de Yunga, aumentarían en extensión frente al cambio climático. Bajo el escenario RCP-4.5 el bosque muy húmedo - premontano aumentaría en 45.3% y 47.2% para el 2050 y 2070 respectivamente y el bosque pluvial - premontano aumentaría en 127.9% y 102.5% para el 2050 y 2070 respectivamente, estas tendencias se mantienen para el escenario RCP-8.5 con incrementos de 46.0% y 39.8% al 2050 y 2070 respectivamente para el bosque muy húmedo y con incrementos de 104.5 y 10.4% al 2050 y 2070 respectivamente para el bosque pluvial (Tabla 3).

Finalmente, los incrementos de temperatura y precipitación al noreste de la cordillera, condicionan la aparición de nuevas HLZ como el Bosque húmedo-Premontano Subtropical (bh-PS) y Bosque muy húmedo-Subtropical (bm-S). Por otro lado, la reducción de la precipitación generaría condiciones para la aparición del Bosque seco-Montano Bajo Subtropical (bs-MBS), el Páramo húmedo - Subandino Subtropical (ph-SaS) y Estepa - Montano Subtropical (e-MS) (Fig. 6).

La reducción dramática de los ecosistemas glaciar y periglaciar se debería al mayor incremento de las temperaturas a mayor altitud, es decir alrededor de los picos principales de los nevados Allincapac y Chichicapac. De acuerdo a los modelos evaluados, se espera que el límite inferior de la zona Nival se desplace desde los 4759 m.s.n.m. hasta los 5065 (RCP-4.5) y 5163 (RCP-8.5) m.s.n.m. para el 2050 y hasta los 5163 (RCP-4.5) y 5438 (RCP-8.5) m.s.n.m. para el 2070. Según Díaz *et al.* (2017), en 1975 el 35% de los glaciares de los nevados Allincapac y Chichicapac se encontraban por debajo de la cota 5000 m.s.n.m., para el año 2015 este se redujo a un 9%, es decir que para 1975 los frentes glaciares se extendían entre las cotas 4676 y 4849 m.s.n.m. en promedio, sin embargo, para el 2015 los frentes retrocedieron hasta las cotas 4763 y 4970 m.s.n.m. Resultados similares fueron obtenidos Jiménez *et al.*

**Tabla 3** - Tasas de cambio porcentual de las HLZ para el 2050 y 2070 para los escenarios RCP-4.5 y RCP-8.5.

HLZ	Área actual		Variación de área (%)			
	(km <sup>2</sup> )	(%)	RCP-4.5 2050	RCP-4.5 2070	RCP-8.5 2050	RCP-8.5 2070
NS	254.8	2.2	-92.2	-96.4	-96.1	-98.9
tp-AS	1700.1	14.6	-85.8	-91.4	-92.7	-99.0
pmh-SaS	4814.9	41.2	-19.8	-32.4	-33.9	-71.7
bh-MS	2372.4	20.3	74.5	99.0	101.9	161.0
bmh-MS	279.2	2.4	-64.2	-72.5	-67.8	-93.1
bh-MBS	1103.8	9.5	6.6	2.5	0.5	-14.5
bmh-MBS	153.4	1.3	-81.1	-85.6	-85.6	-100
bmh-PS	802.3	6.9	45.3	47.2	46	39.8
bp-PS	198.8	1.7	127.9	102.5	104.5	10.4
ph-SaS			-	-	-	0.2
e-MS			-	-	-	1.2
bs-MBS			1.9	2.7	2.8	6.5
bs-PS			-	0.1	0.1	0.6
bh-PS			1.5	2.2	2.4	5
bh-S			0.6	1.3	1.3	1.2
bmh-S			0.7	1.2	1.2	2.7

Nota: Nival Subtropical (NS); Tundra pluvial - Andino Subtropical (tp-AS); Páramo muy húmedo - Subandino Subtropical (pmh-SaS); Bosque húmedo - Montano Subtropical (bh-MS); Bosque muy húmedo - Montano Subtropical (bmh-MS); Bosque húmedo - Montano Bajo Subtropical (bh-MBS); Bosque muy húmedo - Montano Bajo Subtropical (bmh-MBS); Bosque muy húmedo - Premontano Subtropical (bmh-PS); Bosque pluvial - Premontano Subtropical (bp-PS); Páramo húmedo - Subandino Subtropical (ph-SaS); Estepa - Montano Subtropical (e-MS); Bosque seco - Montano Bajo Subtropical (bs-MBS); Bosque seco - Premontano Subtropical (bs-PS); Bosque húmedo - Premontano Subtropical (bh-PS); Bosque húmedo - Subtropical (bh-S); Bosque muy húmedo - Subtropical (bmh-S)

(2009) y Alarcon y Pabón (2013), quienes afirman que los ecosistemas de montañas serían los más vulnerables frente al CC por el retroceso rápido de los glaciares debido a las temperaturas más cálidas generando condiciones para que el pajonal de puna húmeda gane mayor altitud.

El pajonal de puna húmeda y el matorral andino subirían de piso altitudinal ganando territorio a los ecosistemas glaciar y peri-glaciar respectivamente, pero a su vez se reducirían en extensión debido a condiciones más cálidas de los límites inferiores dando paso a los ecosistemas páramo y bosque montano respectivamente. Para el caso de la tundra, su borde inferior actualmente está alrededor de los 4512 m.s.n.m. y este se desplazaría hasta los 4826 m.s.n.m. (RCP-4.5) y 4896 m.s.n.m. (RCP-8.5) para el 2050 y hasta los 4896 m.s.n.m. (RCP-4.5) y 4928 m.s.n.m. (RCP-8.5) para el 2070. Por otro lado, el borde inferior

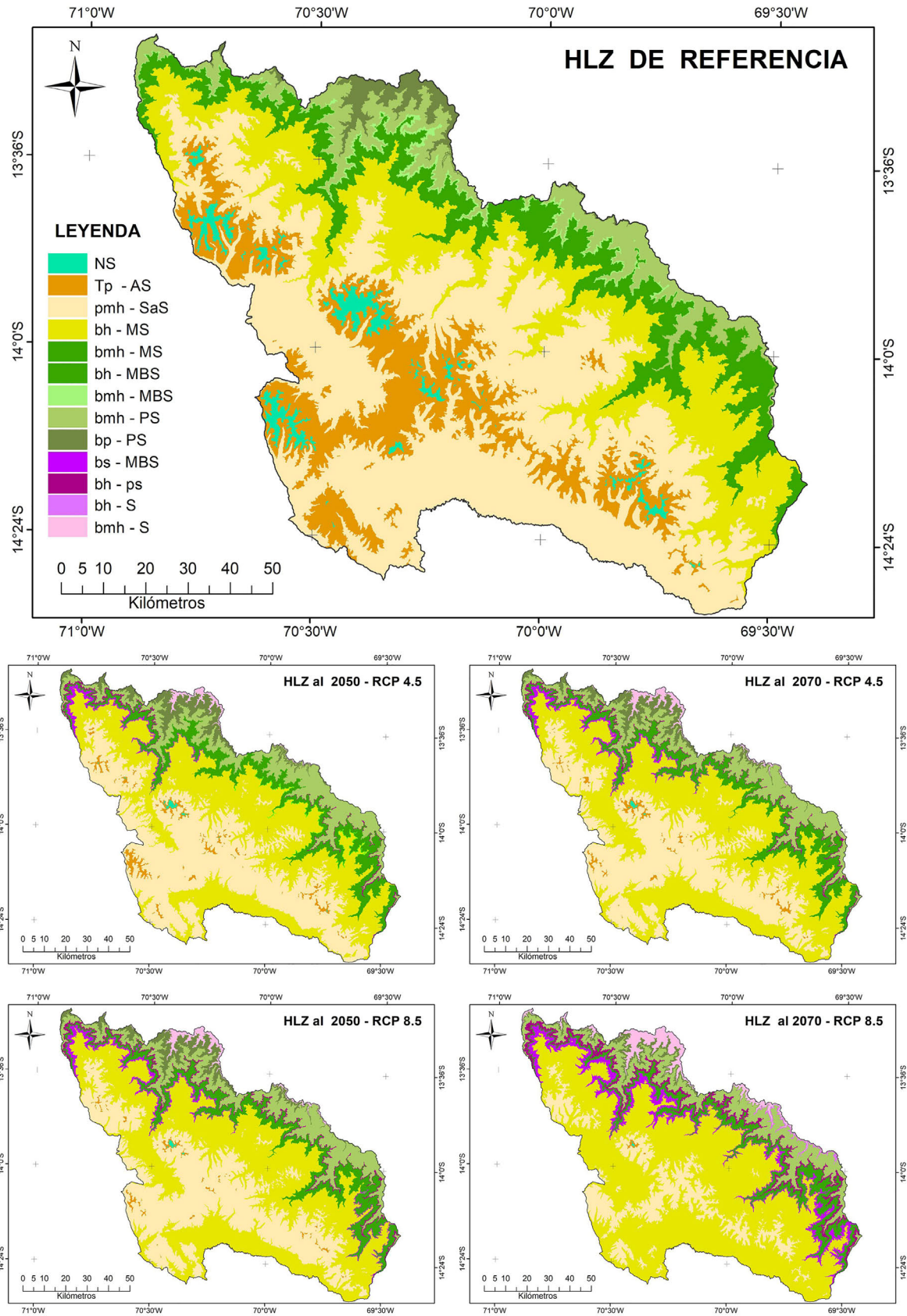


Figura 6 - HLZ para el periodo de referencia y al 2050 y 2070 para los escenarios RCP-4.5 y RCP-8.5.

del páramo se desplazaría desde los 3845 msnm hasta los 4232 m.s.n.m. (RCP-4.5) y 4309 m.s.n.m. (RCP-8.5) para el 2050 y hasta los 4316 m.s.n.m. (RCP-4.5) y 4585 m.s.n.m. (RCP-8.5) para el 2070 (Fig. 7).

Sobre la tundra andina Cardona (2017), señala que podría desaparecer debido a que el acelerado incremento de la temperatura en zonas de montaña viene superando la capacidad adaptativa de los ecosistemas a las nuevas condiciones climáticas y con ello provocando su extinción. En el caso de los páramos, Van der Hammen *et al.* (2002) menciona que son muy vulnerables frente al CC por sus extensiones y ubicación convirtiéndolas en HLZ con pocas capacidades adaptativas. Gran parte del área que cubren los páramos actualmente se encuentran en el límite de elevación inferior, es decir, muy vulnerables frente al incremento de las temperaturas, que provocarían la colonización de otras especies arbóreas.

Por otro lado, se observa que la HLZ Bosque húmedo - Montano ganaría mayor territorio desplazándose a mayores altitudes debido a las condiciones más cálidas. El borde inferior del bosque montano pasaría desde los 2571 m.s.n.m. hasta los 3266 y 3319 m.s.n.m. para el 2050 y hasta los 3283 y 3579 m.s.n.m. para el 2070 en ambos escenarios RCP-4.5 y RCP-8.5 respectivamente. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Jiménez *et al.* (2009), Fernanda y Serrano (2017) y Durán *et al.* (2014), quienes concuerdan que los incrementos de área se deben al aumento de la temperatura y precipitación en la región

amazónica, favoreciendo el crecimiento de varias especies arbustivas y arbóreas (De Meyer *et al.*, 2022; Elmendorf *et al.*, 2011). Finalmente, los demás tipos de bosques de pisos más bajos, presentan mayores incertidumbres con respecto a pisos altitudinales que se desplazaría, principalmente por las variaciones de la precipitación.

#### 4. Conclusiones

Existe una gran similitud entre las HLZ y los ecosistemas de montaña para la cordillera Carabaya, pudiendo ser utilizada las HLZ como referencia para las evaluaciones del CC sobre los ecosistemas de montaña. En la cordillera Carabaya se determinaron nueve HLZ siendo el Bosque húmedo - Montano Subtropical (bh-MS), Tundra pluvial - Andino Subtropical (tp-AS) y Páramo muy húmedo - Subandino Subtropical (ph-SaS) los de mayor extensión ocupando el 41.2%, 20.3% y 14.6% del área total de la cordillera respectivamente; la HLZ Nival Subtropical (NS) ocupando el 2.2% del área de la cordillera.

El CC generaría cambios significativos en todos los ecosistemas de la cordillera Carabaya, los cambios más dramáticos se darían bajo el escenario RC-P8.5 afectando aquellos ecosistemas presentes en las HLZ Nival, Tundra y Páramo que se reducirían en 96.1%, 92.7% y 33.9% para el 2050, y 98.8%, 99.2% y 71.7% para el 2070 respectivamente. Mientras que bajo el escenario RC-P4.5, las HLZ Nival, Tundra y Páramo se reducirían en 92.2%, 85.8% y

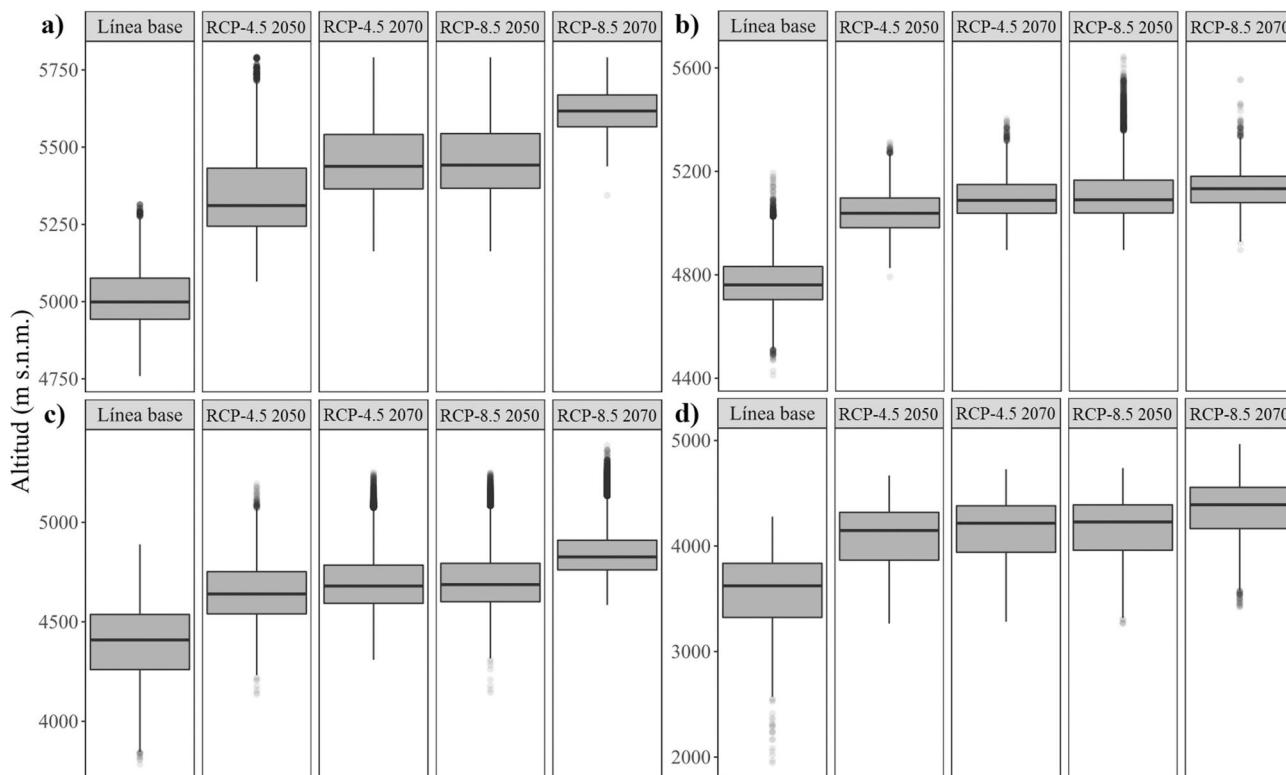


Figura 7 - Variación altitudinal de las HLZ al 2050 y 2070, a) Nival, b) Tundra, c) Páramo y d) Bosque montano.

19.8% para el 2050, y 96.4%, 91.4% y 32.2% para el 2070 respectivamente. Por otro lado, la HLZ Bosque húmedo-Montano Subtropical aumentaría en un 86.8% y 131.6% para los escenarios RCP-4.5 y RCP-8.5 respectivamente. La aparición de nuevas HLZ, como el Bosque seco-Montano Bajo Subtropical, Bosque húmedo-Premontano Subtropical, Bosque húmedo-Subtropical y Bosque muy húmedo - Subtropical se deben a las condiciones más cálidas en la cordillera.

Una de las principales limitaciones de nuestra investigación fue la falta de disponibilidad de datos climáticos observados para validar los datos obtenidos de WC. Esta limitación puede generar incertidumbres en zonas de alta variabilidad temporal y espacial de las variables climáticas en la cordillera Carabaya, especialmente en las zonas de mayor elevación, donde la red de estaciones es nula o muy limitada. Para obtener datos más precisos en futuras investigaciones, sería importante contar con una red de estaciones más densa en las zonas de montaña clave o la implementación de técnicas de interpolación o modelización. Además, en nuestro estudio solo se utilizó la base de datos climáticos de WC, pero existen otras alternativas como Worldclim2, TerraClimate o CHELSA, que podrían mejorar la distribución de la precipitación en zonas de montaña como los Andes Tropicales. Por lo tanto, en futuras investigaciones sería relevante considerar estas alternativas de bases de datos climáticas y evaluar su contribución para reducir las incertidumbres en los datos meteorológicos de la cordillera Carabaya.

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú por proporcionar los datos de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas ubicadas en el ámbito de estudio y a la base de datos WorldClim por poner a disposición los datos climáticos globales actuales y futuros en alta resolución espacial.

## Referencias

- ALARCON, J.; PABÓN, J. El cambio climático y la distribución espacial de las formaciones vegetales en Colombia. **Colombia Forestal**, v. 16, n. 2, p. 171-185, 2013.
- ALTMAN, D.G. **Practical Statistics for Medical Research**. London: Chapman and Hall, 1991.
- AMBINAKUDIGE, S.; INTSIFUL, A. Estimation of area and volume change in the glaciers of the Columbia Icefield, Canada using machine learning algorithms and Landsat images. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 26, p. 100732, 2022. doi
- AYBAR-CAMACHO, C.; LAVADO-CASIMIRO, W.; SABINO, E.; RAMÍREZ, S.; HUERTA, J.; *et al.* **Atlas de Zonas de Vida del Perú: Guía Explicativa**. Nota Técnica N° 003 SENAMH-DHI-2017, 2017.
- AYBAR, C.; LAVADO-CASIMIRO, W.; HUERTA, A.; FERNÁNDEZ, C.; VEGA, F.; *et al.* **Uso del Producto Grilado de PISCO de Precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico**. Nota Técnica N° 001 SENAMHI-DHI-2017, 2017.
- BUILES-JARAMILLO, A., VALENCIA, J.; SALAS, H.D. The influence of the El Niño-Southern Oscillation phase transitions over the northern South America hydroclimate. **Atmospheric Research**, v. 290, p. 106786, 2023. doi
- COCHRAN, W. **Therapeutic Drug Monitoring and Toxicology by Liquid Chromatography**. Oxfordshire: Routledge, 1997.
- CUESTA, F.; MURIEL, P.; BECK, S.; MENESES, R.; HALLOY, S.; *et al.* **Biodiversidad y Cambio Climático en los Andes Tropicales. Conformación de una Red de Investigación para Monitorear sus Impactos y Delinear Acciones de Adaptación**. Lima: Red Gloria-Andes, p. 22-30, 2012.
- DE MEYER, A.P.; ORTEGA-ANDRADE, H.M.; MOULATLET, G.M. Assessing the conservation of eastern Ecuadorian cloud forests in climate change scenarios. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 20, n. 2, p. 159-167, 2022. doi
- DERGUY, M.R. Clasificación ecológica para la república Argentina a partir del modelo de zonas de vida de Holdridge: Mapeo, caracterización y tendencias de cambio. **Revista de Ciencias, Artes y Tecnología**, n. 6, p. 140-151, 2017.
- DÍAZ, R.; SANCHEZ, S.; LUJANO, E.; LUJANO, A. Análisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú. **Revista de Investigaciones Altoandinas**, v. 19, n. 3, p. 265-274, 2017.
- CHÁVEZ, Á.A.; FLORES, H.E.; DE LA MORA, C.; RUÍZ, J.A.; RAMÍREZ, G.; *et al.* Sensibilidad de zonas bioclimáticas de México frente al cambio climático. **Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas**, v. 5, n. 10, p. 2021-2033, 2014.
- FAN, Z.; BAI, X. Scenarios of potential vegetation distribution in the different gradient zones of Qinghai-Tibet Plateau under future climate change. **Science of the Total Environment**, v. 796, p. 148918, 2021. doi
- FAN, Z.M.; LI, J.; YUE, T.X. Land-cover changes of biome transition zones in loess plateau of China. **Ecological Modelling**, v. 252, n. 1, p. 129-140, 2013. doi
- FENG, Y.C.; HUANG, Y.C.; MA, X.M. The application of Student's t-test in internal quality control of clinical laboratory. **Frontiers in Laboratory Medicine**, v. 1, n. 3, p. 125-128, 2017. doi
- FERNANDEZ LONG, M.E.; CAÑÁS, S.; OCAMPO, D.; RIVAS, R. Estimación de la evapotranspiración potencial en la Argentina: Comparación de metodologías. En: **Reunión Binacional Uruguay-Argentina de Agrometeorología y XV Reunión Argentina de Agrometeorología**, Uruguay, 2014.
- DE LIMA, P.M.; DA PAZ, A.R.; BRAVO, J.M. Objective functions used as performance metrics for hydrological models: State-of-the-art and critical analysis. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 25, p. 1-15, 2020. doi

- FICK, S.E.; HIJMANS, R.J. WorldClim 2: New 1km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017. doi
- GUIJARRO, J.A. **Manual de Usuario de Paquete Climatol versión 4.0.0**. Nota Técnica, 40 p., 2020.
- HERZOG, S.; MARTÍNEZ, R.; JORGENSEN, P.; TIESSEN, H. Climate change and biodiversity in the Tropical Andes. **Mountain Research and Development**, v. 32, n. 2, p. 258-260, 2012.
- HOLDRIDGE, L. **Life Zone Ecology**. Costa Rica: Tropical Science Center, 1967.
- INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN GLACIARES Y ECOSISTEMAS DE MONTAÑA (INAI-GEM). **Inventario Nacional de Glaciares: Las Cordilleras Glaciares del Perú**. Disponible en <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/69842963-64e0-4de9-9c24-f886a5c5a40d>, acceso el 1 de nov. 2022.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Cambio Climático 2014: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Resúmenes, Preguntas Frecuentes y Recuadros Multicapítulos**. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial, 2014.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Resumen para Responsables de Políticas: Calentamiento Global de 1,5 °C**. Ginebra: Organización Meteorológica Mundial, 2019.
- JIMÉNEZ, M.; CHAIN, A.; LOCATELLI, B. Efectos del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica. **Recursos Naturales y Ambiente**, n. 59-60, p. 32-40, 2009.
- JOSSE, C.; CUESTA, F.; NAVARRO, G.; BARRENA, V.; CABRERA, E.; *et al.* **Ecosistemas de los Andes del Norte y Centro. Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela**. Lima: Secretaría General de la Comunidad Andina, 2009.
- KIM, Y.H.; MIN, S.K.; ZHANG, X.; SILLMANN, J.; SANDSTAD, M. Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. **Weather and Climate Extremes**, v. 29, 100269, 2020. doi
- LLACZA, A.; ACUÑA, D.; JÁCOME, G.; DE LA CRUZ, G.; PAREDES, J.; *et al.* **Escenarios Climáticos al 2050 en el Perú: Cambios en el Clima Promedio**. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2021.
- LLAUCA, H.; LEON, K.; LAVADO-CASIMIRO, W. Construction of a daily streamflow dataset for Peru using a similarity-based regionalization approach and a hybrid hydrological modeling framework. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 47, 101381, 2023. doi
- LUGO, A.E.; BROWN, S.L.; DODSON, R.; SMITH, T.S.; SHUGART, H.H. The Holdridge life zones of the conterminous United States in relation to ecosystem mapping. **Journal of Biogeography**, v. 26, p. 1025-1038, 1999.
- MARTÍN ESQUIVEL, J.L.; MARRERO-GÓMEZ, M.V.; GONZÁLEZ MANCEBO, J.M. Efectos del cambio climático en la vegetación de la alta montaña de Tenerife. **Ecosistemas**, v. 30, n. 1, p. 1-10, 2021. doi
- MINAM. **Mapa Nacional de Ecosistemas del Perú: Memoria Descriptiva**. Lima: Ministerio del Ambiente, 2019.
- MONTERO-MARTÍNEZ, M.J.; OJEDA-BUSTAMANTE, W.; SANTANA-SEPÚLVEDA, J.S.; PRIETO-GONZÁLEZ, R.; LOBATO-SÁNCHEZ, R. Sistema de consulta de proyecciones regionalizadas de cambio climático para México. **Tecnología y Ciencias del Agua**, v. 4, n. 2, p. 113-128, 2013.
- NARVAEZ-MONTOYA, C.; TORRES-MARTÍNEZ, J.A.; PINO-VARGAS, E.; CABRERA-OLIVERA, F.; LOGE, F.J.; MAHLKNECHT, J. Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the Atacama Desert (Peru/Chile). **Science of The Total Environment**, v. 806, 150386, 2022. doi
- NAVARRO-RACINES, C.; TARAPUES, J.; THORNTON, P.; JARVIS, A.; RAMIREZ-VILLEGAS, J. High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 1-14, 2007. doi
- NOGUES-BRAVO, D.; ARAÚJO, M.B.; ERREA, M.; MARTÍNEZ-RICA, J. Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century. **Global Environmental Change**, v. 17, n. 3-4, p. 420-428, 2007. doi
- OCAMPO-ZULETA, K.; PARRADO-ROSSELLI, Á. Functional diversity in an Andean subpáramo affected by wildfire in Colombia. **Plant Diversity**, 2022. doi
- OFICINA NACIONAL DE EVALUACIÓN DE RECURSOS NATURALES (ONERN). **Mapa Ecológico del Perú: Guía Explicativa**. Lima: ONERN, 1976.
- RATHORE, P.; ROY, A.; KARNATAK, H. Predicting the future of species assemblages under climate and land use land cover changes in Himalaya: A geospatial modelling approach. **Climate Change Ecology**, v. 3, p. 100048, 2022. doi
- RIQUETTI, N.B.; MELLO, C.R.; BESKOW, S.; VIOLA, M.R. Rainfall erosivity in South America: Current patterns and future perspectives. **Science of the Total Environment**, v. 724, 138315, 2020. doi
- RODRIGUES, D.T.; SANTOS E SILVA, C.M.; DOS REIS, J.S.; PALHARINI, R.S.A.; CABRAL JÚNIOR, J.B.; *et al.* Evaluation of the Integrated Multi-SatellitE Retrievals for the Global Precipitation Measurement (IMERG) Product in the São Francisco Basin (Brazil). **Water**, v. 13, n. 19, p. 2714, 2021. doi
- ROMERO-CUÉLLAR, J.; BUITRAGO-VARGAS, A.; QUINTERO-RUIZ, T.; FRANCÉS, F. Simulación hidrológica de los impactos potenciales del cambio climático en la cuenca hidrográfica del río Aipe, en Huila, Colombia. **Ribagua**, v. 5, n. 1, p. 63-78, 2018. doi
- SALMAN, S.A.; NASHWAN, M.S.; ISMAIL, T.; SHAHID, S. Selection of CMIP5 general circulation model outputs of precipitation for peninsular Malaysia. **Hydrology Research**, v. 51, n. 4, p. 781-798, 2020. doi
- SERRANO, P.; CALDERÓN, M. Análisis geoespacial del cambio de las zonas de vida de Holdridge en la provincia del Guayas. En: **4th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology**, Costa Rica, 2016.
- TORRES, J. **Contribución del conocimiento y tecnologías tradicionales a la adaptación al cambio climático en las**

- montañas de América Latina**, Apunte de investigación N° 2 Soluciones prácticas-ITDG, 2014.
- TOSSI, J. **Zonas de Vida Natural en el Perú. Memoria Explicativa Sobre el Mapa Ecológico del Perú**. Boletín Técnico N° 05 Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA), 1960.
- TOVAR, C.; CARRIL, A.F.; GUTIÉRREZ, A.G.; AHREND, A.; FITA, L.; *et al.* Understanding climate change impacts on biome and plant distributions in the Andes: Challenges and opportunities. **Journal of Biogeography**, v. 49, p. 1420-1442, 2022. [doi](#)
- VAN DER HAMMEN, T.; PABÓN, J.; GUTIÉRREZ, H.; ALARCÓN, J. El cambio global y los ecosistemas de Alta Montaña de Colombia. Páramos y ecosistemas alto andinos de Colombia en condición hotspot y global climatic tensor. In: **Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en Condición HotSpot y Global Climatic Tensor**, Bogotá, p. 163-209. 2002.
- ZEVALLLOS, J.; LAVADO-CASIMIRO, W. Climate change impact on Peruvian biomes. **Forests**, v. 13, n. 2, 238, 2022. [doi](#)
- ZEVALLLOS, J.; LAVADO, W. **Atlas de Biomasa del Perú: Una Evaluación Presente y Futura**. Lima: SENAMHI, 2021.



License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.