

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/minerva.v7i19.284>

Efectos del cambio climático en el ecosistema matorral andino

Ruben Martinez Cabrera*
<https://orcid.org/0000-0002-4561-8627>
rmartinezc@unfv.edu.pe
Universidad Nacional Federico Villarreal
Lima, Perú

Karina Ines Hinojosa Pedraza
<https://orcid.org/0000-0003-1237-9110>
khinojosa@unfv.edu.pe
Universidad Nacional Federico Villarreal
Lima, Perú

Cristian German Hinojosa Pedraza
<https://orcid.org/0009-0004-1616-3151>
cristian.hinojosa@hotmail.com
Universidad Nacional Federico Villarreal
Lima, Perú

*Autor de correspondencia: rmartinezc@unfv.edu.pe

Recibido: (3/11/2025), Aceptado: (16/01/2026)

Resumen. El estudio analiza los efectos del cambio climático sobre el ecosistema de matorral andino en el departamento de Lima (Perú) durante el periodo 1970–2022. Se emplearon datos climáticos de temperatura y precipitación (*WorldClim*) y el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) a partir de imágenes *Landsat*, complementados con percepción comunitaria. Los resultados evidencian variabilidad térmica interdecadal, irregularidad en el régimen de precipitaciones y una relación significativa entre disponibilidad hídrica y vigor vegetal. Se identificaron periodos de degradación asociados a sequías y amplitud térmica elevada. La triangulación metodológica confirma la alta sensibilidad del matorral andino frente a la variabilidad climática regional.

Palabras clave: cambio climático, matorral andino, SAVI, variabilidad climática.

Effects of Climate Change on the Andean Shrubland Ecosystem

Abstract. This study analyzes the effects of climate change on the Andean shrubland ecosystem in the department of Lima (Peru) during the period 1970–2022. Climate data on temperature and precipitation (*WorldClim*) were used together with the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) derived from *Landsat* imagery, complemented with community perception. The results reveal interdecadal thermal variability, irregular precipitation regimes, and a significant relationship between water availability and vegetation vigor. Periods of ecosystem degradation associated with drought events and high thermal amplitude were identified. The methodological triangulation confirms the high sensitivity of the Andean shrubland ecosystem to regional climatic variability.

Keywords: climate change, Andean shrubland, SAVI, climatic variability.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático, impulsado principalmente por las actividades antropogénicas, está generando alteraciones profundas en los sistemas naturales y humanos, afectando de manera desproporcionada a las poblaciones más vulnerables [1]. Sus impactos se manifiestan en múltiples escalas territoriales, particularmente en regiones de montaña, donde los ecosistemas presentan alta sensibilidad climática y limitadas capacidades de recuperación.

En la subcuenca del Chicón, ubicada en Urubamba, Cusco (Perú), las comunidades rurales han percibido modificaciones significativas en la temperatura y los patrones de precipitación, asociadas a la intensificación de sequías, heladas y otros eventos extremos que afectan directamente la agricultura y el acceso al agua [2]. Si bien las estrategias de respuesta se han basado en conocimientos ancestrales y prácticas tradicionales de convivencia con la naturaleza, surge la interrogante sobre la suficiencia de estos mecanismos frente a un fenómeno climático cuya magnitud y velocidad superan las variaciones históricas conocidas.

En el ámbito altoandino peruano, los efectos del cambio climático se reflejan en procesos de desglaciación, alteración de ciclos hidrológicos y variabilidad en la productividad agrícola, comprometiendo la biodiversidad y la seguridad alimentaria [3]. Estas transformaciones, vinculadas al incremento de gases de efecto invernadero y al uso inadecuado del territorio, no solo deterioran ecosistemas estratégicos, sino que también incrementan los costos de producción y profundizan la vulnerabilidad socioeconómica de las comunidades rurales.

A nivel nacional, el Perú ha desarrollado marcos normativos alineados con los lineamientos internacionales de adaptación climática, reconociendo su alta vulnerabilidad derivada de su diversidad geográfica, desigualdad social y debilidades institucionales [4]. Se han identificado múltiples zonas críticas, incluyendo ecosistemas montañosos frágiles y territorios expuestos a sequías e inundaciones. En el ámbito local, el Plan Local de Cambio Climático de Lima 2021–2030 evidencia cómo la expansión urbana y el cambio de uso del suelo han fragmentado ecosistemas naturales, afectando la biodiversidad y los recursos hídricos subterráneos [5].

En este contexto, resulta imprescindible analizar los efectos del cambio climático sobre ecosistemas estratégicos como el matorral andino, considerando tanto sus dimensiones ecológicas como socio-territoriales, con el fin de fortalecer estrategias de adaptación basadas en evidencia científica y planificación sostenible.

II. MARCO TEÓRICO

El cambio climático se define como la alteración significativa y persistente de los patrones climáticos globales, atribuida directa o indirectamente a las actividades humanas que modifican la composición de la atmósfera y se superponen a la variabilidad natural del clima en escalas temporales comparables [6]. Esta definición subraya el carácter antropogénico del fenómeno y su diferencia respecto a las fluctuaciones climáticas históricas.

El cambio climático (CC) es consecuencia principalmente del uso intensivo de combustibles fósiles, la deforestación, la quema de biomasa y la transformación acelerada de ecosistemas naturales, procesos que incrementan la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera [7]. Entre sus impactos más relevantes se encuentran el retroceso glaciario, la alteración de los ciclos hidrológicos, la variabilidad en los regímenes de precipitación, el aumento del nivel del mar y la afectación directa a la producción agrícola. En regiones andinas, estos efectos adquieren especial gravedad debido a la dependencia de los glaciares como reguladores hídricos y a la vulnerabilidad de los sistemas productivos de subsistencia.

Las estrategias para mitigar y adaptarse al cambio climático poseen un alcance global y requieren compromisos de largo plazo. En este contexto, los acuerdos internacionales y los lineamientos científicos impulsados por organismos especializados orientan la reducción de emisiones y la transformación de sectores estratégicos como energía, transporte, industria, silvicultura y agricultura [8]. Estas directrices promueven no solo la mitigación, sino también la transición hacia modelos de desarrollo resilientes y sostenibles.

América Latina constituye una de las regiones con mayor biodiversidad del planeta. Países como Perú, Brasil, México y Colombia concentran una proporción significativa de regiones ecológicas y hábitats de especies de flora y fauna a nivel mundial [9]. Sin embargo, esta riqueza biológica también implica alta vulnerabilidad frente al cambio climático, ya que muchas especies presentan rangos altitudinales y térmicos restringidos. El aumento de temperatura y la modificación de los patrones de precipitación alteran los hábitats, modifican las interacciones ecológicas y favorecen la expansión de especies invasoras, acelerando procesos de pérdida de biodiversidad.

En el caso peruano, la diversidad geográfica y ecosistémica incrementa la exposición a riesgos climáticos. El país presenta múltiples condiciones reconocidas internacionalmente como factores de vulnerabilidad, incluyendo ecosistemas montañosos frágiles, zonas forestales y amazónicas sensibles, y áreas marino-costeras expuestas a variabilidad climática [4], [10]. Particularmente, los ecosistemas andinos —entre ellos el matorral altoandino— enfrentan presiones combinadas de variabilidad climática, cambio de uso del suelo y limitaciones institucionales para la gestión adaptativa.

III. METODOLOGÍA

El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo de tipo correlacional, con el propósito de analizar la relación entre las variables climáticas (temperatura y precipitación) y la dinámica del ecosistema de matorral andino en el departamento de Lima, Perú. El diseño fue no experimental y longitudinal, al emplearse series históricas de datos climáticos y registros multitemporales de cobertura vegetal. Para el análisis climático se utilizaron datos históricos correspondientes al período 1970–2022, obtenidos de la plataforma *WorldClim*. Se consideraron las variables de temperatura máxima y mínima y la precipitación anual acumulada. La resolución espacial de los datos corresponde a píxeles aproximados de 85,7 hectáreas. Para efectos comparativos y reducción de ruido interanual, se realizaron análisis decenales (1990, 2000, 2010 y 2022), permitiendo identificar tendencias de mediano y largo plazo.

El estado de la vegetación del matorral andino fue evaluado mediante imágenes satelitales Landsat, aplicando el Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), debido a que este índice es particularmente adecuado para ecosistemas con cobertura vegetal dispersa y suelos expuestos, como los matorrales de montaña [11]. El procesamiento de imágenes se realizó en *ArcMap*, aplicando la expresión (1):

$$SAVI = \left(\frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo} \right) \times (1 + L) \quad (1)$$

Donde: NIR corresponde a la banda del infrarrojo cercano; Rojo a la banda del rojo visible; y L representa el factor de corrección del suelo. El índice SAVI toma valores entre -1 y $+1$. Para la clasificación del estado de la vegetación se utilizaron los siguientes rangos, adaptados de Huete [12]: $< 0,0$ vegetación inexistente o suelo desnudo; $0,0 - 0,1$ vegetación con estrés severo; $0,1 - 0,5$ vegetación con vigor moderado; y $> 0,6$ vegetación sana o vigorosa. Este procedimiento permitió estimar cambios en la salud y densidad del matorral andino a lo largo del periodo analizado.

Se realizó además un análisis comparativo entre las tendencias de temperatura y precipitación y los valores promedio de SAVI por década, con el fin de identificar patrones de asociación entre variabilidad climática y condición de la cobertura vegetal [13], [14]. Por otra parte, para realizar una apropiada validación en campo y percepción comunitaria, y con el objetivo de complementar y validar los resultados satelitales, se efectuaron visitas de campo y se aplicó una encuesta estructurada a población local. El instrumento recopiló información sobre percepción de cambios en temperatura y precipitación, incluyendo variaciones en calendarios agrícolas, cambios en disponibilidad hídrica, observación de flora y fauna y transformaciones en prácticas tradicionales y conocimientos ancestrales. Esta triangulación metodológica permitió contrastar la evidencia espacial con la experiencia territorial, fortaleciendo la interpretación integral de los resultados [15].

IV. RESULTADOS

A. Resultados del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

La salud de la vegetación del matorral andino fue evaluada mediante el índice SAVI calculado a partir de imágenes *Landsat*, analizadas en intervalos decenales entre 1970 y 2022. Se generaron seis mapas temáticos (Figura 1), los cuales evidencian variaciones espaciales moderadas a lo largo del tiempo. En 1970, los valores bajos se concentraron hacia el este (Huaora y Huarochirí) y los altos hacia el sur (Yauyos). En 1980, los valores bajos se desplazaron al noroeste (Oyón y Cajatambo), mientras que los altos se localizaron al suroeste.

En 1990 predominaron valores medios con concentraciones altas en la zona central (Huaral, Canta y Huarochirí). En 2000, los valores bajos se desplazaron al oeste (Huaral y Cañete) y los altos al centro-suroeste. Para 2010 se observó una distribución más homogénea de valores medios, mientras que en 2020 los valores bajos se concentraron en el sector central y sur, cercanos a la franja costera, y los altos hacia el oeste, reflejando una dinámica espacial variable del ecosistema.

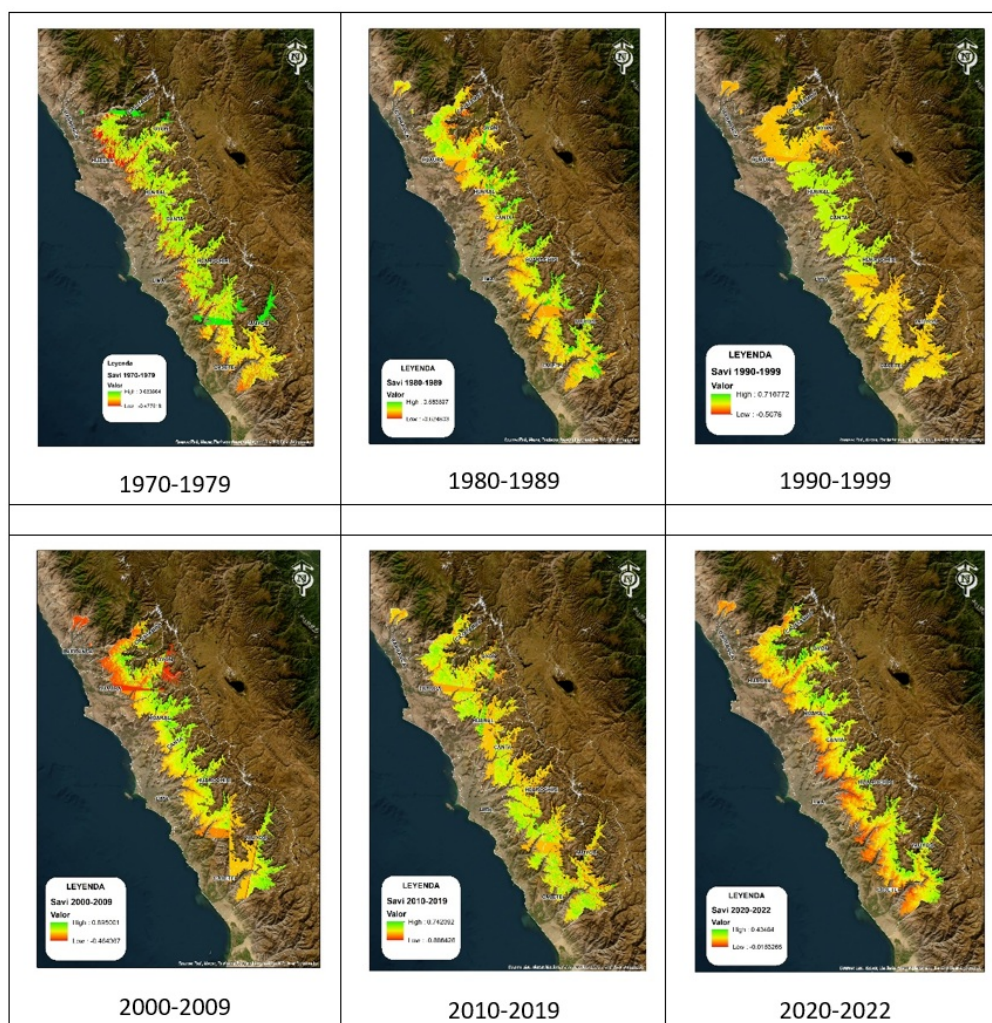


Fig. 1. Representación gráfica del SAVI en los periodos de años 1970 al 2022.

B. Distribución espacial de variables climáticas (1970–1979)

La Figura 2 presenta la configuración climática inicial del matorral andino (1970–1979), utilizada como línea base para el análisis temporal. Se observa un marcado contraste territorial, donde las zonas de menor altitud registran mayores amplitudes térmicas, mientras que los sectores altoandinos combinan temperaturas mínimas más bajas con mayores niveles de precipitación. Estas condiciones definen los

límites fisiológicos de la vegetación, ya que la temperatura mínima influye en la ocurrencia de heladas y la precipitación regula el vigor y densidad vegetal.

Por ello, esta figura establece el marco ecológico de referencia para interpretar las variaciones posteriores del índice SAVI y la dinámica del ecosistema.

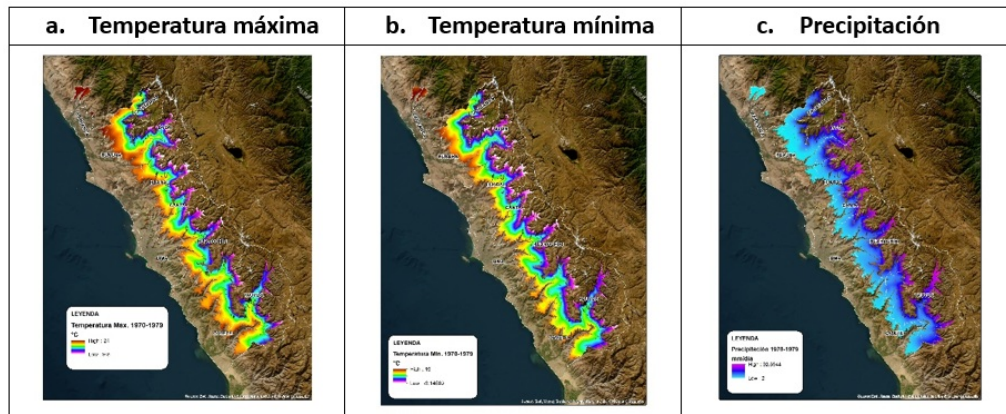


Fig. 2. Distribución de la temperatura y precipitación para el periodo 1970 al 1979.

C. Distribución espacial de variables climáticas (1980–1989)

La Figura 3 muestra la distribución espacial de temperatura máxima, mínima y precipitación en el matorral andino. Se observa una intensificación de las temperaturas máximas en sectores occidentales y de menor altitud, lo que podría incrementar la evapotranspiración y el estrés hídrico. La temperatura mínima mantiene el contraste altitudinal, aunque con redistribución de áreas frías que puede influir en la ocurrencia de heladas.

La precipitación conserva mayores acumulaciones en zonas orientales y altoandinas, pero con mayor heterogeneidad respecto al periodo base. En conjunto, estas variaciones reflejan una reorganización climática que ayuda a explicar las fluctuaciones del índice SAVI y el comportamiento del ecosistema.

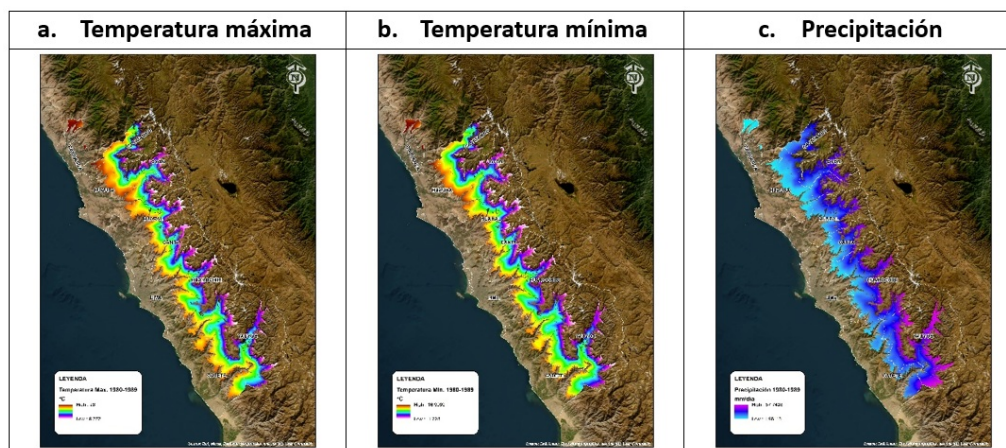


Fig. 3. Distribución de la temperatura y precipitación para el periodo 1980 al 1989.

La Figura 4 muestra la evolución espacial de las variables climáticas en el matorral andino, evidenciando una intensificación térmica y redistribución hídrica. La temperatura máxima se expande hacia sectores intermedios del gradiente altitudinal, lo que sugiere mayor carga térmica y posible aumento de evapotranspiración. La temperatura mínima mantiene el contraste altitudinal, aunque con reorganización de valores extremos que podrían modificar la frecuencia de heladas.

La precipitación conserva su concentración en zonas orientales y altoandinas, pero con mayor fragmentación espacial. En conjunto, estos cambios reflejan una creciente variabilidad climática intra-regional, que contribuye a explicar las fluctuaciones observadas en el índice SAVI y el estrés del matorral andino.

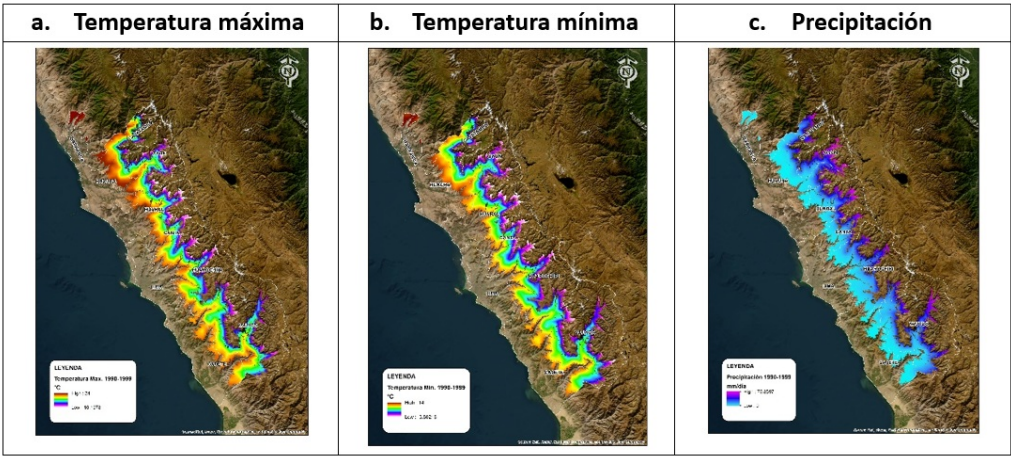


Fig. 4. Distribución de la temperatura y precipitación para el periodo 1990 al 1999.

D. Evolución espacial de las variables climáticas

El análisis espacial de las variables climáticas correspondientes al periodo evaluado evidencia un patrón estructural definido por el gradiente altitudinal del ecosistema de matorral andino en el departamento de Lima. La temperatura máxima presenta valores más elevados en los sectores occidentales y de menor altitud, próximos a la franja costera, mientras que disminuye progresivamente hacia las zonas altoandinas. Esta distribución confirma la influencia del relieve en la configuración térmica regional y sugiere una mayor carga térmica en áreas intermedias del ecosistema.

En cuanto a la temperatura mínima, se observa un comportamiento similar, aunque con mayor sensibilidad en las zonas de mayor elevación, donde los valores más bajos indican condiciones propicias para la ocurrencia de heladas. Este factor resulta determinante para la dinámica del matorral andino, dado que las bajas temperaturas nocturnas limitan el crecimiento vegetativo y pueden generar estrés fisiológico en especies adaptadas a rangos térmicos estrechos. Respecto a la precipitación, los mayores acumulados se concentran en los sectores orientales y en áreas de mayor altitud, mientras que las zonas occidentales presentan menores registros. Esta distribución responde al efecto orográfico característico de la región andina, donde las masas de aire húmedo ascienden y condensan en las laderas. Estas condiciones climáticas configuran un escenario de alta heterogeneidad ambiental, donde la combinación de amplitud térmica y disponibilidad hídrica define los límites ecológicos del matorral andino y establece el marco explicativo para las variaciones observadas en la salud de la vegetación.

E. Distribución espacial reciente de las variables climáticas

El análisis espacial correspondiente al periodo más reciente evaluado muestra una consolidación del patrón térmico-hídrico característico del ecosistema de matorral andino, aunque con señales de intensificación en algunos sectores. La temperatura máxima mantiene valores más elevados en las zonas occidentales y de menor altitud, próximas a la franja costera, extendiéndose hacia áreas intermedias del ecosistema. Este comportamiento indica una mayor exposición térmica en sectores que tradicionalmente han presentado condiciones más cálidas, lo cual puede incrementar procesos de evapotranspiración y reducir la humedad disponible en el suelo.

La temperatura mínima conserva el gradiente altitudinal típico del sistema andino, con valores más bajos en las áreas de mayor elevación. No obstante, se observa una ampliación espacial de zonas con temperaturas mínimas críticas, lo que podría favorecer una mayor frecuencia de eventos de enfriamiento nocturno y estrés térmico en la vegetación. En cuanto a la precipitación, se mantienen mayores acumulaciones en los sectores orientales y altoandinos, mientras que las áreas occidentales presentan registros

inferiores. Sin embargo, la distribución muestra mayor heterogeneidad espacial, lo que sugiere variaciones locales en la disponibilidad hídrica. Estas condiciones evidencian un escenario de persistente contraste climático intra-regional, donde el incremento térmico y la variabilidad hídrica constituyen factores determinantes para la dinámica del matorral andino y su respuesta ecosistémica.

F. Análisis de la distribución climática en el periodo evaluado

La figura muestra la configuración espacial de la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación en el ecosistema de matorral andino para el periodo analizado. En conjunto, los mapas evidencian una consolidación del patrón térmico-hídrico característico de la región, aunque con indicios de intensificación en el componente térmico. La temperatura máxima presenta una expansión de valores elevados hacia zonas intermedias del gradiente altitudinal, particularmente en la franja occidental del ecosistema. Este comportamiento sugiere un aumento sostenido de la carga térmica superficial, lo cual puede favorecer mayores tasas de evapotranspiración y reducir la disponibilidad hídrica en el suelo.

En relación con la temperatura mínima, se observa una persistencia de valores bajos en las zonas altoandinas, aunque con mayor continuidad espacial en comparación con periodos anteriores. Esta condición podría influir en la frecuencia de eventos de enfriamiento nocturno y en la dinámica de estrés térmico de la vegetación. Respecto a la precipitación, se mantiene la concentración de mayores acumulados en sectores orientales y de mayor altitud; sin embargo, la distribución muestra mayor fragmentación espacial, lo que indica posibles variaciones locales en el régimen hídrico. La figura sugiere una tendencia hacia mayor variabilidad climática intra-regional, donde el incremento térmico y la irregularidad en la distribución de precipitaciones constituyen factores que pueden incidir directamente en la estabilidad y vigor del matorral andino.

G. Análisis temporal de las variables climáticas (1970–2020)

La figura 5 evidencia la evolución temporal de la temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación en el ecosistema de matorral andino durante el periodo 1970–2020, permitiendo identificar señales consistentes con procesos de cambio climático regional. En el componente térmico se observa una tendencia general al incremento de la temperatura máxima, particularmente hacia el periodo más reciente (2020), luego de una ligera disminución en las décadas intermedias. Este comportamiento sugiere una intensificación progresiva de la carga térmica superficial, lo que puede favorecer mayores tasas de evapotranspiración y estrés hídrico en la vegetación.

La temperatura mínima presenta oscilaciones, con un descenso marcado hacia el año 2000 y posterior recuperación en las décadas siguientes. Esta variabilidad indica una posible ampliación de la amplitud térmica en ciertos periodos, lo que implica mayor exposición a extremos térmicos, especialmente en ecosistemas de montaña donde la vegetación es sensible a heladas y enfriamientos nocturnos. En cuanto a la precipitación máxima, se evidencia una alta variabilidad interdecadal, con un descenso significativo alrededor del año 2000 y una recuperación posterior hacia 2020. Este comportamiento refleja una mayor irregularidad en el régimen hídrico, característica frecuentemente asociada a escenarios de cambio climático. La precipitación mínima muestra variaciones más moderadas, aunque mantiene una tendencia a valores reducidos en las décadas centrales del periodo analizado.

La Figura 5 sugiere tres consecuencias climáticas relevantes para el matorral andino:

1. Incremento progresivo de las temperaturas máximas.
2. Mayor variabilidad térmica interdecadal.
3. Irregularidad en el régimen de precipitación, con episodios de disminución significativa.

Estas condiciones favorecen procesos de estrés fisiológico en la vegetación, alteraciones en los ciclos fenológicos y posibles cambios en la estructura y densidad del matorral andino. Dichos efectos resultan coherentes con las variaciones observadas en el índice SAVI durante periodos recientes, lo que sugiere una relación directa entre la dinámica climática regional y la respuesta de la cobertura vegetal del ecosistema.

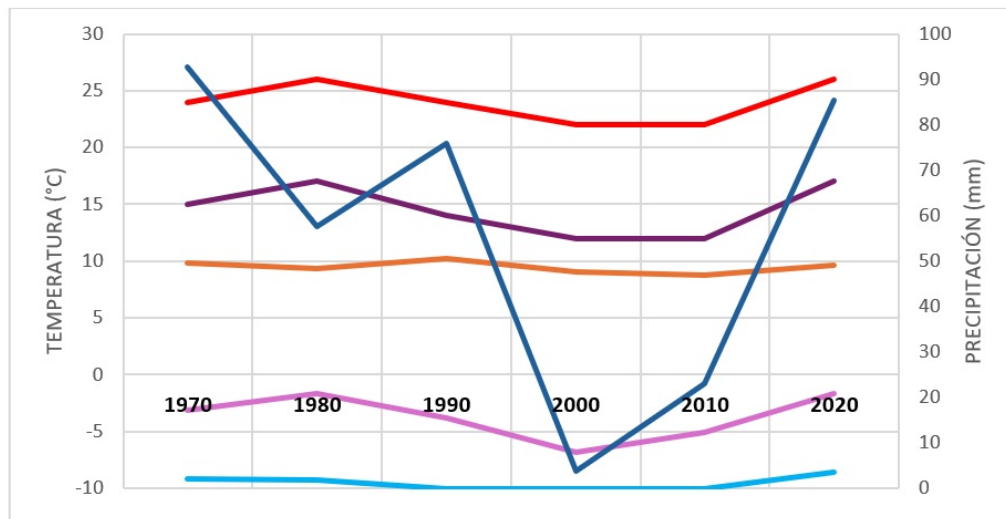


Fig. 5. Valores térmicos y de precipitación entre los años 1970 y 2022.

H. Análisis de la variación de extremos climáticos (1970–2020)

La Figura 6 muestra la evolución de los valores extremos mínimos y máximos a lo largo del periodo 1970–2020, permitiendo evaluar la dinámica de la variabilidad climática en el ecosistema de matorral andino.

Se observa que los valores máximos presentan una tendencia general ascendente desde 1970 hasta el año 2000, alcanzando su punto más alto en ese periodo. Posteriormente, aunque se mantiene cierta elevación en 2010, se registra una disminución en 2020. Este comportamiento sugiere una fase de intensificación térmica hacia finales del siglo XX, seguida de una estabilización relativa en las décadas recientes.

Por su parte, los valores mínimos muestran una mayor variabilidad y una profundización progresiva hasta el año 2010, donde se registra el valor más bajo del periodo analizado. Esta ampliación del extremo negativo indica una intensificación de condiciones frías o eventos mínimos más marcados, lo que incrementa la amplitud térmica en determinados periodos.

La combinación de máximos más elevados y mínimos más extremos durante las décadas centrales del análisis evidencia una mayor amplitud climática interdecadal, característica asociada a escenarios de cambio climático regional. En ecosistemas de montaña como el matorral andino, esta intensificación de extremos puede traducirse en mayor estrés fisiológico, alteraciones en ciclos fenológicos y cambios en la estructura vegetal.

En términos generales, la Figura 6 sugiere que el periodo comprendido entre 1990 y 2010 representó la fase de mayor inestabilidad climática, lo cual resulta consistente con los cambios observados en la dinámica de la vegetación en el mismo intervalo temporal.

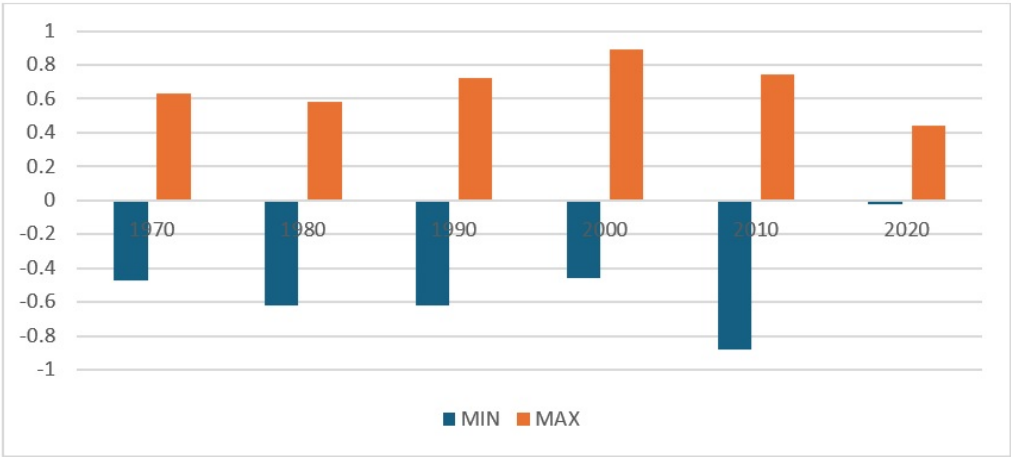


Fig. 6. Tendencia de valores del SAVI de los años 1970 a 2022.

I. *Relación de los parámetros meteorológicos y el SAVI*

La Tabla 1 sintetiza la relación interdecadal entre precipitación y comportamiento del índice SAVI, integrando los principales patrones climáticos y su respuesta ecosistémica. Esta síntesis permite visualizar de manera comparativa la correspondencia —y en algunos casos la divergencia— entre disponibilidad hídrica y vigor vegetal, facilitando la interpretación de las fluctuaciones observadas en el matorral andino durante el periodo 1970–2020.

Tabla 1. Relación climática–ecosistémica por década.

Década	Condición climática dominante	Respuesta del SAVI	Interpretación ecosistémica
1970	Alta precipitación	SAVI moderado–alto	Condiciones favorables para crecimiento.
1980	Reducción hídrica	Ligera disminución del SAVI	Inicio de estrés moderado.
1990	Precipitación moderada	Incremento del SAVI	Recuperación parcial.
2000	Déficit hídrico severo	SAVI alto (anómalo)	Respuesta localizada / efecto de reflectancia.
2010	Sequía + amplitud térmica	SAVI muy bajo	Degradación significativa.
2020	Recuperación hídrica parcial	SAVI moderado–bajo	Respuesta limitada por degradación acumulada.

Fuente: elaboración propia con base en el análisis climático y satelital del periodo 1970–2020.

J. *Triangulación de resultados*

La triangulación evidencia coherencia entre los datos instrumentales (Tabla 2), los análisis satelitales y la percepción comunitaria, particularmente en relación con el incremento térmico y la variabilidad del régimen hídrico. Las diferencias observadas en algunos aspectos reflejan procesos adaptativos locales y la naturaleza gradual del cambio climático en el área de estudio.

Tabla 2. Relación entre parámetros meteorológicos, SAVI y percepción comunitaria.

Dimensión analizada	Evidencia instrumental (clima)	Evidencia satelital (SAVI)	Percepción comunitaria	Convergencia
Temperatura	Tendencia de incremento en T° máxima y variabilidad en T° mínima.	Fluctuaciones en vigor vegetal en décadas centrales.	Percepción de aumento de temperatura.	Alta
Precipitación	Variabilidad interdecadal con descenso alrededor del 2000.	Reducción localizada de valores altos de SAVI en periodos secos.	Retraso de lluvias y disminución de agua en quebradas.	Alta
Agricultura	Cambios térmicos e hídricos afectan disponibilidad de agua.	Áreas con estrés moderado en ciertos periodos.	Cambio en fechas de siembra y aparición de enfermedades.	Media-Alta
Biodiversidad	Mayor amplitud térmica y variabilidad hídrica.	Redistribución espacial de cobertura vegetal.	Disminución de ciertas especies y aparición de otras.	Media
Dinámica socio-cultural	No migración asociada a extremos climáticos.	Cambios localizados en cobertura.	Adaptación técnica y cambio de prácticas agrícolas.	Media

Fuente: elaboración propia con base en el análisis integrado de datos climáticos, satelitales y entrevistas comunitarias.

CONCLUSIONES

El análisis del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI), cuyos valores oscilan entre -1 y $+1$, evidenció una variabilidad significativa en el ecosistema de matorral andino durante el periodo estudiado (1970–2022). Se registró un valor mínimo de -0.88 en el año 2010, asociado a condiciones de estrés severo y posible exposición de suelo desnudo, y un valor máximo de 0.89 en el año 2000, correspondiente a un periodo de mayor vigor vegetal. Estos resultados indican que la dinámica del SAVI responde de manera directa a la variabilidad climática interdecadal.

Los periodos caracterizados por disminución de precipitaciones y mayor amplitud térmica se relacionaron con valores bajos del SAVI, lo que sugiere procesos de degradación vegetal y reducción de cobertura. En contraste, las décadas con mayor disponibilidad hídrica y temperaturas moderadas mostraron una mejora en el vigor de la vegetación, evidenciando la alta sensibilidad del matorral andino a las condiciones térmico-hídricas.

En el componente climático, se identificaron valores máximos de temperatura cercanos a 26°C en varias décadas recientes y eventos mínimos extremos de hasta -6.8°C en el año 2000, lo que refleja la presencia de episodios térmicos contrastantes. Asimismo, la precipitación presentó alta variabilidad interdecadal, con máximos registrados en 1970 (92.7 mm) y periodos de reducción significativa entre 1990 y 2010, configurando escenarios recurrentes de sequedad.

El análisis correlacional evidenció una relación significativa entre los parámetros meteorológicos y el comportamiento del SAVI, particularmente entre la precipitación y el vigor vegetal. Estos hallazgos confirman que las fluctuaciones climáticas influyen directamente en la estructura y salud del matorral andino. La percepción de la población local respalda estos resultados, señalando aumento de temperatura, cambios en los calendarios agrícolas, disminución de fuentes hídricas y percepción de reducción del matorral andino. Esta coincidencia entre evidencia instrumental, análisis satelital y percepción comunitaria refuerza la validez del estudio.

En términos generales, el periodo 2000 mostró condiciones favorables para la vegetación, mientras que el año 2010 evidenció mayor degradación asociada a condiciones climáticas adversas. Para 2020, se identificaron señales consistentes con escenarios de cambio climático, caracterizadas por incremento térmico y reducción del vigor vegetal. Los resultados confirman que el ecosistema de matorral andino presenta alta vulnerabilidad frente a la variabilidad climática, mostrando respuestas directas en su cobertura y salud vegetal, lo que constituye una señal consistente con procesos regionales de cambio climático.

REFERENCIAS

- [1] Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), "Políticas, planificación y financiamiento para la gestión de cambio climático, soluciones basadas en la naturaleza y adaptación basada en ecosistemas de Colombia," En línea, Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible, Tech. Rep., 2023, disponible en: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/CV-SbN-CO-002-Es.pdf>.
- [2] W. Pino Ticona, "Percepciones y estrategias de convivencia acerca del cambio climático de los pobladores en la subcuenca del Chicón - Urubamba - Cusco: 2017-2018," Tesis, Universidad Nacional del Altiplano, 2019, disponible en: https://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14082/13839/Pino_Ticona_William_Edward.pdf.
- [3] L. Requelme, "Impactos del cambio climático en la vegetación alto-andina y producción agrícola," Tesis, Universidad Nacional de Educación Enrique Guzmán y Valle, 2021, disponible en: <https://repositorio.une.edu.pe/server/api/core/bitstreams/63dfa784-99ae-44b4-a3cd-9c7c607a4f00/content>.
- [4] K. Pödvín and S. Nathalie, "Políticas y planificación de cambio climático, soluciones basadas en la naturaleza y adaptación basada en ecosistemas en Perú," En línea, IUCN, Tech. Rep., 2022, disponible en: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/CV-SbN-PE-002-Es.pdf>.
- [5] Municipalidad Metropolitana de Lima, "Plan local de cambio climático de la provincia de Lima 2021-2030," En línea, Municipalidad Metropolitana de Lima, Tech. Rep., 2021, disponible en: <https://smia.munlima.gob.pe/uploads/documento/126a7e4afdc8a8ba.pdf>.
- [6] Ministerio del Ambiente (MINAM), "Plan de acción de adaptación y mitigación frente al cambio climático," En línea, Ministerio del Ambiente, Tech. Rep., 2010, disponible en: <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/plan-accion-adaptacion-mitigacion-frente-cambio-climatico>.
- [7] —, "Cambio climático y desarrollo sostenible en el Perú," En línea, Ministerio del Ambiente, Tech. Rep., 2009, disponible en: <https://www.minam.gob.pe/cambioclimatico/wp-content/uploads/sites/11/2013/10/CDAM0000323.pdf>.
- [8] Yepes-Mayorga, "Cambio climático: estrategias de gestión con el tiempo en contra..." En línea, Universidad de los Llanos, Meta, Colombia, 2012, disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/896/89625076008.pdf>.
- [9] ONU-CEPAL, "El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad de América Latina. síntesis de políticas públicas sobre cambio climático," En línea, CEPAL, Tech. Rep., 2017, disponible en: https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/sintesis_pp_cc_cc_y_sus_efectos_en_la_biodiversidad.pdf.
- [10] ONU-Migración, "Evaluación de la evidencia: Cambio climático y migración en el Perú," ONU-Migración, Tech. Rep., 2021.
- [11] B. Klimisch, D. Maglione, P. Pardes, and J. Soto, "Análisis del comportamiento de la vegetación a partir de índices del sensor MODIS en Santa Cruz, Argentina," *ICT-UNPA*, 2022, doi: 10.22305/ict-unpa.v14.n3.895.
- [12] A. R. Huete, "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)," *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, no. 3, pp. 295-309, 1988, doi: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
- [13] R. Díaz, A. Machaca, G. Belizario, and E. Lujano, "Efectos del cambio climático sobre los ecosistemas de montaña en la cordillera Carabaya - Perú," *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 36, 2023, doi: 10.1590/0102-778638230088.

- [14] A. Llacza *et al.*, "Escenarios climáticos al 2050 en el Perú: cambios en el clima promedio," En línea, SENAMHI, Tech. Rep., 2021, disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/1470>.
- [15] J. Ramirez-Barahona *et al.*, "Upslope plant species shifts in mesoamerican cloud forests driven by climate and land use change," En línea, 2025, disponible en: <https://elpais.com/america-futura/2025-03-07/las-plantas-de-los-bosques-nublados-de-mesoamerica-trepan-las-montanas-para-escapar-del-cambio-climatico.html>.

AUTORES



Rubén Martínez Cabrera es Doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Posee una Maestría en Gestión Ambiental y es Ingeniero Geógrafo. Actualmente se desempeña como docente en la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la Universidad Nacional Federico Villarreal (Perú). Su labor académica se orienta al estudio de las interacciones entre territorio, ambiente y desarrollo sostenible, con énfasis en el análisis ambiental y la gestión territorial.



Karina Inés Hinojosa Pedraza es Abogada y posee el grado de Maestra en Técnicas de Gestión Medioambiental y es egresada de la Maestría en Derecho Civil y Comercial, así como del Doctorado en Derecho. Actualmente se desempeña como docente en la Universidad Nacional Federico Villarreal (Perú), donde desarrolla actividades académicas y de investigación vinculadas al derecho y la gestión ambiental.



Cristian Germán Hinojosa Pedraza es Contador Público Colegiado. Posee un MBA, Magíster en Administración de Negocios por la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), y un Máster en Gerencia y Administración por la Escuela de Negocios EOI (España). Actualmente se desempeña como docente universitario en diversas instituciones de educación superior, entre ellas la Universidad Privada del Norte (UPN), la Universidad César Vallejo (UCV), la Universidad Marítima del Perú (UMA), la Universidad Nacional Federico Villarreal (UNFV) y la Universidad Inca Garcilaso de la Vega (UIGV).