

Ecohydrological Heterogeneity by Watershed in the Dry Forest of the Coto de Caza El Angolo under ENSO Variability and Climate Change (1984–2025)

Ulises Francisco Giraldo Malca¹; Nahily Rubi Caldas Zumaran²; Adriano Ávila Apuy³; Valeria Camila Anglas Palomares⁴; Bianca Lucia Mendoza Manturano⁵; Karla Verónica Escate Buitrón⁶; Gabriela Chaves Soto⁷
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ, pcigugir@upc.edu.pe¹, U202215645@upc.edu.pe²,
U202211938@upc.edu.pe³, U202220809@upc.edu.pe⁴, U202217921@upc.edu.pe⁵, U20221B612@upc.edu.pe⁶
Laboratorio PRIAS, Centro Nacional de Alta Tecnología, Consejo Nacional de Rectores - (CR), Costa Rica,
gchaves@cenat.ac.cr⁷

Abstract– Tropical dry forests are highly sensitive to climate variability and regional warming trends, particularly under the influence of El Niño–Southern Oscillation (ENSO), whose intensity and frequency have increased in recent decades, likely due to a link with climate change. In this context, the influence of meteorological variability, climate change, ENSO and forest vigour on the different watersheds of the El Angolo Game Reserve was analysed during the period 1984–2025. Meteorological data, ENSO measurements and climate change data were processed to determine NDVI variation using Landsat imagery. The results revealed significant spatial heterogeneity, with higher NDVI values observed in the eastern watersheds (Tumbes and Chira), contrasting with arid conditions in the Pariñas watershed. Temporally, a sustained increase in NDVI was identified across all basins, exceeding 200% in the western basins (Fernández and Pariñas) due to a higher frequency of wet years and shorter dry periods. Correlations indicate that vegetation responds more closely to minimum and average temperatures than to the Coastal El Niño Index. Intense ENSOs act as hydrological pulses that trigger vegetation regrowth. Overall, the results demonstrate that the ecohydrological response is heterogeneous and structurally differentiated across basins within a non-stationary climate regime. This finding provides empirical evidence of the importance of taking spatial heterogeneity into account when evaluating ecosystems in the context of ENSO variability and regional warming.

Keywords– Global warming, climate variability, El Niño–Southern Oscillation, protected natural areas, Amotape Mountain Range.

Heterogeneidad ecohidrológica por cuencas en el bosque seco del Coto de Caza El Angolo bajo variabilidad ENOS y cambio climático (1984–2025)

Ulises Francisco Giraldo Malca¹; Nahily Rubi Caldas Zumaran²; Adriano Ávila Apuy³; Valeria Camila Anglas Palomares⁴; Bianca Lucia Mendoza Manturano⁵; Karla Verónica Escate Buitrón⁶; Gabriela Chaves Soto⁷
Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, PERÚ, pcigugir@upc.edu.pe¹, U202215645@upc.edu.pe²,
U202211938@upc.edu.pe³, U202220809@upc.edu.pe⁴, U202217921@upc.edu.pe⁵, U20221B612@upc.edu.pe⁶
Laboratorio PRIAS, Centro Nacional de Alta Tecnología, Consejo Nacional de Rectores - (CR), Costa Rica,
gchaves@cenat.ac.cr⁷

Resumen—Los bosques secos tropicales son altamente sensibles a la variabilidad climática y las tendencias de calentamiento regional, particularmente bajo la influencia de ENOS, cuya intensidad y recurrencia se han incrementado en las últimas décadas, por una probable relación con el cambio climático. En ese marco, se analizó la variabilidad meteorológica, el cambio climático, el ENOS y la vigorosidad del bosque en las diferentes cuencas hidrográficas del Coto de Caza El Angolo en el período 1984–2025, para lo que se procesó data meteorológica, mediciones del ENOS y del cambio climático, y se determinó la variación del NDVI a partir de imágenes Landsat. Los resultados evidencian una marcada heterogeneidad espacial, con mayores valores de NDVI en las cuencas orientales (Tumbes y Chira) y condiciones áridas en la cuenca Pariñas. A escala temporal, se identifica un incremento sostenido del NDVI en todas las cuencas, que supera el 200% en las cuencas occidentales (Fernández y Pariñas), por una mayor recurrencia de años húmedos y a la reducción de periodos secos. Las correlaciones indican que la respuesta vegetal está más vinculada a las temperaturas mínimas y medias que al Índice de El Niño Costero, mientras que los ENOS intensos son pulsos hidrológicos que generan el reverdecimiento. En conjunto, los resultados muestran que la respuesta ecohidrológica no es homogénea, sino estructuralmente diferenciada por cuencas bajo un régimen climático no estacionario. Este hallazgo aporta evidencia empírica sobre la importancia de considerar la heterogeneidad espacial en la evaluación de ecosistemas frente a la variabilidad ENSO y el calentamiento regional.

Palabras clave—calentamiento global, variabilidad climática, El Niño-Oscilación del Sur, áreas naturales protegidas, cordillera de los Amotape

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, se estima que las tierras secas cubren cerca del 45% de la superficie terrestre, lo que equivale a aproximadamente 2,4 mil millones de hectáreas [1]. Dentro de este conjunto, los bosques secos tropicales representan entre 40% y 50% del total de bosques de bajas latitudes [2]. No obstante, su extensión actual se ha reducido drásticamente, debido que solo permanece el 48,5% de su cobertura original a nivel global, y menos del 10% en el trópico americano [3]. En países como Etiopía, los bosques secos constituyen el 80% de la superficie forestal total [4], mientras que en el Perú se han identificado alrededor de 3'882,159 hectáreas de este tipo de ecosistemas [5].

Los bosques secos son ecosistemas que experimentan un clima de baja precipitación, anual con una variación

significativa a lo largo del año [6], como los bosques tropicales de la región del Pacífico que se extienden desde el sur de Panamá hasta el norte del Perú, considerados entre las zonas más importantes del planeta por su elevada diversidad biológica y altos niveles de endemismo (Maza-Maza et al., 2025). Por ejemplo, los bosques secos del Valle del Marañón han registrado 143 especies endémicas de plantas leñosas, que representa el 33% de todas sus especies arbóreas [3]. Estos bosques sostienen múltiples servicios ecosistémicos que benefician tanto al ambiente como a las comunidades humanas, incluyendo la provisión de alimentos, forraje, materiales de construcción, productos medicinales, resinas, bioproductos, plantas ornamentales y aromáticas [8], [9], [10], o desempeñando un papel fundamental en el ciclo del carbono [11]. Entre los rasgos adaptativos característicos destacan la caducidad durante la estación seca, la capacidad de almacenamiento de agua en troncos engrosados y la tolerancia fisiológica frente a las perturbaciones [12]. Actualmente, las variaciones climáticas están provocando cambios generalizados en la estructura y dinámica de la vegetación forestal, lo que probablemente se intensificará en escenarios de cambio climático global [13]. Aunque los bosques secos tropicales han mostrado ser ecosistemas resilientes con capacidad de recuperación frente a perturbaciones naturales y antrópicas [14], el aumento de las temperaturas y la alteración de los patrones de precipitación representan una amenaza creciente.

El cambio climático genera múltiples efectos ambientales, sociales y económicos a nivel mundial [15], como en el caso de los bosques secos tropicales que están enfrentando eventos climáticos extremos cada vez más frecuentes [16]. En el contexto neotropical, esta tendencia ha sido modelada para pronosticar la probable pérdida de especies y la reducción de rangos de distribución de más del 77% de la avifauna asociada a bosques secos para el periodo 2050-2070 [17]. Específicamente, en Sudamérica el modelado indica que los futuros escenarios climáticos provocarán una disminución del área total adecuada para hábitats de bosques secos tropicales, siendo el pronóstico incluso más desafiante que las condiciones actuales [6]. En ese contexto, el Perú es un país altamente vulnerable a los impactos del cambio climático [18], donde se proyecta que la biodiversidad será fuertemente afectada por alteraciones climáticas y antropogénicas futuras [19]. La

relación se manifiesta en que las condiciones más secas y cálidas esperadas comprometen la capacidad de amortiguamiento de los ecosistemas [16], lo que se traduce en una mayor vulnerabilidad ante estos eventos extremos como los generados por ENOS o aquellos que impulsan los cambios de cobertura y uso de suelo en bosques secos costeros peruanos [20].

El Niño Costero es una manifestación regional del sistema El Niño–Oscilación del Sur (ENOS), caracterizada por el calentamiento anómalo y localizado de la superficie del mar en las costas de Perú y Ecuador, que se produce de forma periódica y recurrente, teniendo efectos en la infraestructura, la economía y las poblaciones del ámbito [21]. A diferencia del ENOS global, El Niño Costero presenta un alcance espacial limitado, que genera alteraciones significativas en la circulación atmosférica regional del Pacífico Oriental, favoreciendo lluvias extremas en la costa norte del Perú, cuya recurrencia y efectos se han visto intensificados por el cambio climático [22]. Desde el punto de vista ecológico, los bosques secos del norte del Perú mantienen una estrecha relación con la dinámica de El Niño Costero, ya que su estructura, fenología y disponibilidad hídrica dependen de estos pulsos climáticos episódicos [23], [24]. La severidad de estos eventos es monitoreada mediante el Índice del Niño Costero (ICEN), el cual permite relacionar las anomalías térmicas oceánicas con respuestas hidrológicas y ecológicas en ecosistemas terrestres adyacentes [23]. Si bien, el bosque seco cumple un rol regulador frente a El Niño Costero, la intensificación de las precipitaciones altera la dinámica hídrica local, activando quebradas estacionales y aumentando los riesgos de erosión y degradación ecosistémica [25], [26]. Asimismo, es importante asumir que la fenología vegetal responde a las variaciones de humedad o precipitaciones con desfases temporales de entre 0 y 3 meses, un factor crítico para comprender la resiliencia de los bosques secos [27].

Los bosques secos tropicales se reconocen entre los ecosistemas más amenazados del planeta, debido principalmente a las altas tasas de deforestación y fragmentación que han reducido drásticamente su extensión original, por lo que la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza los ha clasificado como ecosistemas en peligro crítico [28]. A pesar de su relevancia ecológica y de los múltiples servicios ambientales que proporcionan, la atención científica, política y mediática se ha concentrado de forma desproporcionada en las selvas tropicales húmedas, lo que ha invisibilizado la fragilidad y vulnerabilidad de los bosques secos [29]. Además, se estima que menos de un tercio de su cobertura original permanece en pie, y que menos del 25 % de estos remanentes se encuentran actualmente bajo algún tipo de protección oficial [30].

Durante episodios intensos de ENOS, como los ocurridos en 1998, 2017 o 2023, los cursos de agua en la vertiente occidental de los Andes incrementan abruptamente su caudal, amplían sus cauces, generan inundaciones, erosionan de suelos e incrementan la mortandad de animales, pero también favorecen procesos de regeneración, especialmente en los

bosques secos [31], [32]. A su vez, el cambio climático ha sido relacionado con la disminución de las precipitaciones y de la escorrentía anual, afectando la resiliencia de estos ecosistemas [33]. Estas condiciones secas pueden comprometer las estrategias naturales de supervivencia y uso del agua de la vegetación en bosques secos, lo que resalta la necesidad de evaluarlos, especialmente en espacios de conservación [33].

Las áreas naturales protegidas (ANP) desempeñan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad y la mitigación de los impactos climáticos sobre sus ecosistemas [34]. En el caso del Perú, la extensión y número de ANP se ha incrementado significativamente en los últimos años, en reconocimiento de su extraordinaria diversidad específica y ecosistémica [35]. No obstante, los bosques secos representan alrededor del 3 % del territorio nacional, y de este porcentaje, solo el 5 % se encuentra incluido dentro del sistema de ANP [36]. Asimismo, la relación entre el bosque y el agua está influenciada por factores como el clima, la topografía, el suelo, la estructura y composición del bosque, así como por la gestión forestal [38]; sin embargo, estas interacciones siguen siendo poco conocidas en contextos específicos debido a la alta variabilidad natural de los recursos hídricos entre cuencas [38]. En bosques tropicales secos, se ha evidenciado que la rápida infiltración en sustratos fracturados y los flujos subterráneos locales influyen significativamente en la distribución de la vegetación y en el mantenimiento del flujo base de los arroyos, asociándose incluso a lineamientos geológicos donde el potencial hídrico es mayor [39].

La teledetección destaca por su capacidad de generar datos con alta resolución espacial y temporal, facilitando la obtención rápida de información sobre la superficie terrestre y sus ecosistemas [40]. Se ha consolidado como una herramienta esencial para el monitoreo a diferentes escalas, permitiendo evaluar la dinámica de la vegetación en regiones donde la instrumentación terrestre es limitada [41]. Mediante técnicas como el *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* y el *Enhanced Vegetation Index (EVI)*, se puede caracterizar la respuesta fenológica y la productividad boscosa, que han reportado coeficientes de fuerte correlación ($r = 0.81$) entre el vigor vegetal y productividad primaria bruta en bosques secos [42]. El *NDVI* es particularmente sensible a la densidad de la vegetación y contenido de clorofila [43], con el que se puede extrapolar observaciones puntuales a escalas regionales, proporcionando datos detallados sobre el impacto de las anomalías climáticas por ejemplo [42]. Asimismo, en los últimos años, la alta frecuencia de adquisición de un mayor número de sensores ópticos aumenta la probabilidad de obtener escenas libres de cobertura nubosa, asegurando una continuidad necesaria para el monitoreo ambiental en zonas tropicales [43]. Finalmente, el monitoreo meteorológico a través de bases de datos como NASA POWER ayuda a superar la falta de registros históricos en estaciones físicas, permitiendo integrar parámetros de causa (precipitación) e impacto (vigor vegetal) [44].

En este contexto, en el Coto de Caza El Angolo (CCEA) ubicado en el noroeste del Perú, tiene como objetivo conservar una muestra representativa del bosque estacionalmente seco [45], [46]. En los últimos años, la mayor recurrencia de eventos ENOS ha comenzado a modificar la dinámica de la vegetación, favoreciendo incrementos temporales de la cobertura foliar asociados a la reducción de los periodos secos. Sin embargo, estos cambios también generan efectos negativos sobre componentes clave del ecosistema, como las poblaciones de venado cola blanca [47]. Dado que el clima constituye el principal factor externo no controlable en la gestión de esta ANP, surge la necesidad de comprender cómo las variaciones asociadas al cambio climático y al ENOS se manifiestan espacialmente al interior del CCEA, para identificar las vertientes donde estos cambios climáticos se presentan con mayor intensidad, información que permitiría orientar acciones de monitoreo, evaluación y gestión adaptativa del ecosistema. Por ello, el objetivo del presente estudio es analizar las diferencias que genera la variabilidad meteorológica, influencia del cambio climático y el ENOS, sobre la vigorosidad del bosque en las diferentes cuencas hidrográficas del CCEA durante el período 1984–2025.

II. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra en la región Piura (Fig. 1), al noroeste del Perú, que comprende el CCEA y su zona de amortiguamiento (ZA), entre las coordenadas $4^{\circ}30'35.96''$ - $4^{\circ}8'9.6''$ de latitud sur, y $80^{\circ}58'55.2''$ - $80^{\circ}33'29.88''$ de longitud oeste, con un rango altitudinal de 112 hasta 1,542 m s.n.m. El CCEA tiene una extensión de 65,000 hectáreas y su zona de amortiguamiento de 29,606.3 hectáreas, que cubre el sector más austral de la Cordillera de los Amotapes [45], administrada por el Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado (SERNANP) [48].

Este territorio se distribuye entre las microcuencas de la quebrada Fernández, quebrada Pariñas, río Chira, río Tumbes, Quebrada Seca y quebrada Bocapán, pero sin presencia de ríos permanentes [49], como el caso de las quebradas Pariñas y Fernández, que se activan principalmente durante episodios de El Niño Costero [50][51].

El clima se caracteriza por bajas precipitaciones y temperaturas altas, siendo predominantemente seco y con un marcado déficit hídrico anual [47]. Además, según el Mapa Nacional de Ecosistemas de la plataforma Geoservidor del Ministerio del Ambiente (MINAM), en este ámbito se identifican únicamente dos unidades: el bosque estacionalmente seco de colina y montaña, y el bosque estacionalmente seco ribereño [47].

El CCEA se caracteriza por un sistema hidrológico dominado por cuencas de régimen estacional e intermitente [52], [53], donde quebradas como Pariñas, Fernández o el río Chira, definen la dinámica hídrica del bosque seco ecuatorial, incrementando sus caudales durante la temporada de lluvias, especialmente por las intensas precipitaciones asociadas a eventos ENOS [48]. En condiciones normales, la precipitación

es escasa e irregular, concentrándose entre diciembre y abril, mientras que el resto del año predomina una marcada aridez, reduciendo los flujos a pequeños ojos de agua aislados, vitales para la fauna silvestre y las actividades humanas [48] [53].



Fig. 1. División por unidades hidrográficas del CCEA y su ZA (área de estudio).

III. MÉTODOS

El presente estudio corresponde a una investigación cuantitativa y correlacional, donde se empleó herramientas de informática para análisis estadístico, determinar la influencia del cambio climático y de los eventos ENOS en la hidrología, la climatología y las coberturas vegetales, identificando diferencias y similitudes entre las diferentes cuencas. La información fue obtenida de diversas fuentes, incluyendo artículos científicos de bases de datos como SCOPUS, Web of Science, Dialnet, Scielo, entre otras, además de informes técnicos, tesis y bases de datos oficiales vinculadas a la gestión del agua, manejo de cuenca, monitoreo climático y gestión de áreas protegidas, como la Autoridad Nacional del Agua (ANA), SERNANP, MINAM, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Instituto Geofísico del Perú (IGP), Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).

A. Recopilación y procesamiento de data meteorológica

Se consiguieron registros de las estaciones meteorológicas (EM) ubicadas en el área de estudio y sus alrededores, de la página web de SENAMHI, desde julio de 1983 hasta junio de 2025. Las EM seleccionadas fueron Cabo Inga, Cañaveral, El Alto, El Tigre, Huasimo, La Esperanza, Lancones, Mallares, Pananga, Partidor y Rica Playa. Estos datos se procesaron en hojas de cálculo y tablas dinámicas de *Microsoft Excel*, organizados en periodos interanuales (julio-junio) con el fin de garantizar comparabilidad temporal y consistencia en el análisis de tendencias de los principales parámetros y sus correlaciones con las otras variables de estudio.

Se utilizó la plataforma NASA POWER para la obtención de registros históricos con series continuas y comparable entre los reportes correspondientes a los sectores sur y norte del área de estudio.

B. Eventos ENOS y calentamiento global

El registro de eventos ENOS y su intensidad se obtuvieron de plataformas web que publican los reportes del Comité Multisectorial Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), IMARPE e IGP, así como la publicación de los valores mensuales del ICEN. Además, se extrajo reportes de anomalías térmicas en relación con la temperatura media global preindustrial, emitidos por la *National Aeronautics and Space Administration* de los Estados Unidos de Norteamérica (NASA) - *Goddard Institute for Space Studies*. Estos indicadores fueron utilizados para diferenciar entre forzantes climáticos episódicos (ENSO) y tendencias térmicas estructurales asociadas al calentamiento global.

C. Variación de la vigorosidad vegetal por cuenca hidrográfica

Se utilizó el aplicativo de Sistemas de Información Geográfica QGIS para determinar la variación de vigorosidad vegetal dentro del área de estudio, mediante el procesamiento de imágenes satelitales, extraídas del portal *USGS Global Visualization Viewer (GloVis)*, y el cálculo de *NDVI*. Se procesó una escena multispectral por año, clasificando los valores *NDVI* en tres grupos: sin cobertura foliar ($NDVI < 0.1$); con cobertura foliar escasa ($0.1 < NDVI < 0.5$); y con cobertura foliar densa ($NDVI > 0.5$) [54]. Asimismo, tras superponer los mapas *NDVI* con los límites de las cuencas hidrográficas, se sistematizó en *Microsoft Excel* los valores de máximos ($NDVI_{máx}$), mínimos ($NDVI_{mín}$) y promedio ($NDVI_{medio}$) de cada

cuenca para cada año, para su posterior análisis de correlación con las otras variables, y la heterogeneidad espacial bajo un mismo contexto climático regional.

Además, se comparó los resultados en función de la distribución de las estaciones meteorológicas y las diferentes cuencas hidrográficas, para identificar diferencias entre las vertientes de la cordillera de los Amotapes, explorar posibles efectos orográficos en la modulación de la respuesta vegetal y determinar su relación con otros factores hidroclimáticos y ecológicos.

IV. RESULTADOS

La distribución espacial del *NDVI* muestra un patrón claramente diferenciado entre las vertientes oriental y occidental de la cordillera de los Amotapes. Por un lado, las cuencas de Fernández ($NDVI_{medio}=0.1284$) y Pariñas ($NDVI_{medio}=0.0921$) ubicadas hacia el Pacífico (occidente), muestran condiciones más secas, con escasa cobertura vegetal. En cambio, las cuencas de la vertiente oriental como Chira ($NDVI_{medio}=0.1560$) y Tumbes ($NDVI_{medio}=0.3060$), presentan mayor humedad y vegetación más vigorosa. De igual forma, se observa que las cuencas ubicadas al norte (Tumbes y Fernández), presentan condiciones más húmedas en relación con las cuencas ubicadas hacia el sur (Chira y Pariñas) en sus respectivas vertientes (Fig. 2).

Los ecosistemas de la cuenca Tumbes destacan por su mayor vigorosidad, alcanzando valores de $NDVI_{máx}$ de hasta 0.94 en el año 2025, y una baja variabilidad promedio del $NDVI_{medio}$ ($\sigma=0.0676$) en relación con las otras cuencas. En contraste, la cuenca de Pariñas presenta los valores promedio más bajos de $NDVI_{medio}$ (0.0920) y $NDVI_{máx}$ (0.4632) a lo largo de todo el periodo de estudio, registrando el valor más bajo de

$NDVI_{medio}$ con 0.033 en el año 2012 y la menor variabilidad promedio de todo el análisis ($\sigma=0.0667$). Curiosamente, las cuencas de la quebrada de Fernández (ubicada al noroeste del CCEA) y del río Chira (ubicada al sur este del CCEA), a pesar de no tener los valores más altos o bajos de *NDVI*, son las que muestran mayor variabilidad promedio ($\sigma=0.1079$ y $\sigma=0.0973$ respectivamente).

Los registros de precipitaciones en las EM de los alrededores del área de estudio, así como los registros de NASA POWER, presentan tendencias ligeramente descendentes, con una fuerte fluctuación asociada a la ocurrencia de eventos ENOS, excepto la EM de Pananga (la más cercana al CCEA) que plantea una clara tendencia incremental ($y=3.3722x+246.02$), donde las precipitaciones anuales se han elevado en un 54% aproximadamente en las últimas cuatro décadas.

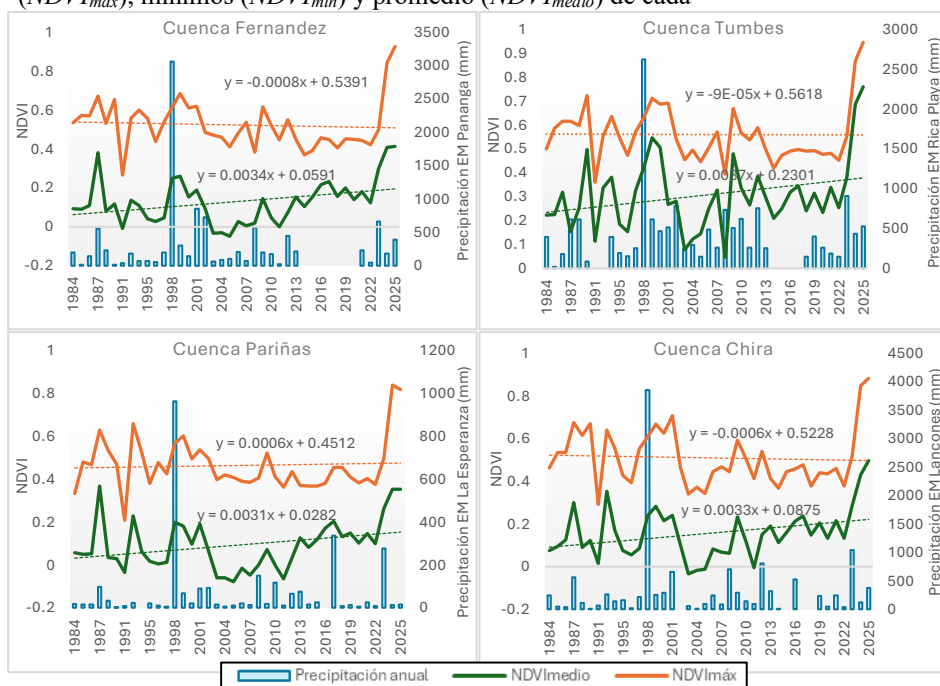


Fig. 2. Variación de precipitaciones, *NDVI* máximo y medio por cuenca entre 1984 y 2025.

Al revisar la distribución de las precipitaciones anuales por sectores, se encontró que las EM ubicadas hacia en el noreste del CCEA (departamento de Tumbes) como Cabo Inga (770 mm), Huasimo (640 mm), Rica Playa–El Tigre (429 mm) y Cañaveral (347 mm), tienen precipitaciones más altas en promedio, superiores a las EM del sureste como Mallares (225 mm), Lancones (352 mm) y Pananga (269 mm), y las EM del oeste y suroeste que registran los valores más bajo como El Alto (131 mm) y La Esperanza (95 mm), por estar ubicadas cerca de litoral (Fig. 2).

A escala temporal, se identifican picos abruptos de precipitación en los periodos de 1997–1998, 2016–2017 y 2022–2023, los cuales coinciden con intensos eventos de El Niño Costero, clasificados como moderados (2016–2017), fuertes (2023–2024) y extraordinarios (1997–1998). Durante estos periodos, las EM como los registros en NASA POWER muestran incrementos marcados en la precipitación interanual, con valores extremos en las EM de Pananga y Mallares en el periodo 1997–1998 (3,060 mm y 3,059mm), en las EM de Cabo Inga y Huasimo durante el periodo 2016–2017 (1,585 mm y 1,700 mm), y finalmente en el periodo 2022–2023 en las EM Cabo Inga (1,182 mm) y Rica Playa – El Tigre (908 mm). En contraste, los periodos asociados a condiciones de La Niña, presentaron valores significativamente menores de precipitación, como en las EM de Pananga (16.4 mm), La Esperanza (14.36mm), El Tigre (20.83mm) y Mallares (14.5mm) durante 1984–1985, La Esperanza (13.8 mm) en 1988–1989, Mallares (2.8 mm) en 1995–1996, y Lancones (3.2 mm) en 2013–2014.

Otro hallazgo que se destaca en todas las cuencas del área de estudio es el incremento en el tiempo de los valores $NDVI_{medio}$, cuya tendencia da a entender que sus bosques secos son más vigorosos y verdes que en el pasado, desde valores que fluctuaban entre $0.055 < NDVI_{medio} < 0.234$ en 1984, pasaron a tener valores entre $0.174 < NDVI_{medio} < 0.386$ en 2025, que en 42 años representa un aumento de 64% en la cuenca Tumbes, de 81% en la cuenca Chira, 216% en la cuenca Pariñas y 223% en la cuenca Fernández.

En los patrones de cambio que muestran los valores $NDVI_{máx}$ y $NDVI_{medio}$, en un primer periodo de 1984 a 2002, se tiene una mayor fluctuación ($0.090 < \sigma < 0.126$) y valores más elevados, especialmente en el caso del $NDVI_{máx}$, pero a partir de 2003 hasta 2022 se tiene un segundo periodo más estable con valores $NDVI$ más bajos y una variabilidad menor ($0.037 < \sigma < 0.103$). Sin embargo, a partir del 2023 los valores $NDVI$ vuelven a incrementarse considerablemente mostrando una mayor variabilidad ($0.042 < \sigma < 0.185$).

A lo largo de todo el periodo de análisis (1983–2025), las temperaturas medias, máximas y mínimas muestran tendencias ascendentes, en la mayoría de las EM y registros de NASA POWER. Como parte de sus fluctuaciones presenta picos térmicos, como en los periodos 1997–1998 (ENOS extraordinario) con cerca de $+3^{\circ}\text{C}$ por encima de la media en la EM La Esperanza, o el 2023–2024 (ENOS fuerte) con $+2^{\circ}\text{C}$ sobre la temperatura media histórica en la EM Mallares, siendo

este último el valor más alto registrado en toda la serie analizada. Únicamente la EM de Lancones muestra tendencias negativas en las temperaturas máximas ($y = -0.0846x + 32.044$) y medias ($y = -0.0648x + 25.347$), mientras que sus temperaturas mínimas presentan tendencia incremental.

De acuerdo con los registros de las EM analizadas, las más cálidas son Cañaveral con 26.7°C (al norte del CCEA), Mallares con 25.7°C (al sureste del CCEA), Rica Playa con 25.5°C y Cabo Inga con 25°C (al noreste del CCEA). En tanto las EM que mostraron temperaturas medias más bajas fueron Lancones con 24.7°C (al sureste del CCEA), La Esperanza con 24.1°C (al suroeste del CCEA), El Alto con 23.3°C (al oeste del CCEA) y Huasimo con 22.2°C (al noreste del CCEA).

En cuanto a las condiciones del $NDVI_{medio}$, la cuenca Tumbes tuvo la mayor variabilidad a lo largo de todo el periodo de estudio ($\sigma = 0.1481$) en relación con las otras cuencas, en tanto que la mayor variabilidad de $NDVI_{máx}$ la tuvo la cuenca Chira ($\sigma = 0.1311$), ambas ubicadas en la vertiente oriental de la cordillera de los Amotape. En cambio, las cuencas del flanco occidental de la cordillera (Pariñas y Fernández) tuvieron como resultados valores menores de variabilidad en el $NDVI_{medio}$ ($\sigma < 0.1139$) y en el $NDVI_{máx}$ ($\sigma < 0.1221$).

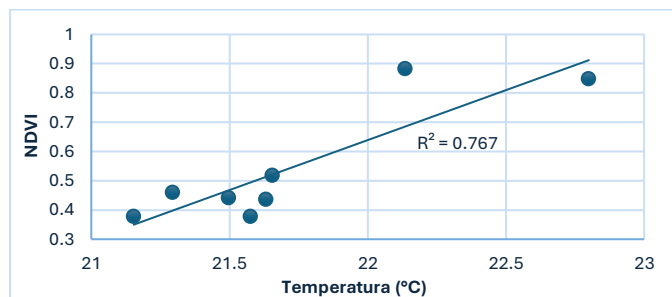


Fig. 3. Correlación entre $NDVI_{medio}$ de la cuenca Chira y la temperatura máxima promedio anual registrada en la EM Rica Playa (Tumbes).

Al analizar las correlaciones de los valores de temperatura, se destaca la fuerte relación entre $NDVI_{medio}$ y $NDVI_{máx}$ (de todas las cuencas) con las temperaturas de la EM Rica Playa, como en el caso del promedio de mínimas ($0.795 < r < 0.876$; $p < 0.02$) y medias ($0.709 < r < 0.847$, $p < 0.05$). De igual forma, se tuvo una fuerte correlación entre la temperatura mínima promedio de la EM Cañaveral y el $NDVI_{máx}$ en la cuenca Chira ($r = 0.816$; $p = 0.048$), entre las temperaturas máximas en la EM Huasimo con $NDVI_{máx}$ de las cuatro cuencas ($0.669 < r < 0.714$, $p < 0.04$) y el $NDVI_{medio}$ de la cuenca Tumbes ($r = 0.635$, $p = 0.048$). En el caso de la EM Lancones, el $NDVI_{medio}$ y el $NDVI_{máx}$ de todas las cuencas, tuvieron correlaciones moderadas con sus temperaturas máximas, máximas promedio ($-0.527 < r < -0.479$; $p < 0.05$), mínimas y mínimas promedio ($0.474 < r < 0.618$; $p < 0.05$).

Para el caso de las precipitaciones, en la EM de Rica Playa se tuvieron correlaciones fuertes con el $NDVI_{medio}$ y $NDVI_{máx}$ de la cuenca de Quebrada Seca ($r = 0.816$, $p = 0.014$ y $r = 0.802$, $p = 0.017$ respectivamente), y en la EM de Pananga este parámetro mostró correlaciones moderadas con el $NDVI_{medio}$ de

las cuencas Chira, Fernández y Pariñas ($0.394 < r < 0.488$; $p < 0.03$).

Al comparar los resultados *NDVI* con las fluctuaciones que presenta el ICEN, se obtuvieron correlaciones directas moderadas y moderadamente bajas entre sus valores promedio con el *NDVI*_{medio} y *NDVI*_{máx} de las cuencas Chira, Fernández y Pariñas ($0.369 < r < 0.421$, $p < 0.04$) y para el caso del ICEN máximo las correlaciones fueron moderadamente bajas con los *NDVI*_{medio} de las cuencas Fernández ($r = 0.362$, $p = 0.036$) y Pariñas ($r = 0.355$, $p = 0.039$), siendo la cuenca de Fernández la que tuvo valores más altos. Asimismo, la cuenca Tumbes no mostro ninguna correlación significativa.

Finalmente, se encontró correlaciones moderadamente bajas entre las variables de máximas, mínimas y promedio de anomalías térmicas anuales a nivel global con los valores de *NDVI*_{medio} de todas las cuencas ($0.316 < r < 0.427$; $p < 0.04$), mostrando las correlaciones más altas los *NDVI* de las cuencas ubicadas hacia el norte (especialmente Fernández), y menores en las cuencas ubicadas hacia el sur del área de estudio.

V. DISCUSIÓN.

Los resultados muestran que existe una diferencia significativa en la vigorosidad de los bosques secos del CCEA en función de su distribución espacial y el tiempo. En ese sentido, la variación espacial de los bosques muestra que las cuencas ubicadas hacia el norte (Tumbes y Fernández) presentan una mayor humedad debido a su cercanía a la línea ecuatorial, por lo que serían más afectadas por la dinámica de la zona de convergencia intertropical (ZCIT), así como por las aguas cálidas de la corriente El Niño, factores que según Jiang & Tian y Waliser & Jiang, favorecen un incremento de lluvias y humedad [55], [56]. En cambio, las cuencas ubicadas hacia el sur son más secas por estar menos afectadas por la fluctuación de la ZCIT y la mayor influencia de las aguas frías de la corriente Humboldt, que reducen la evaporación y estabilizan la atmósfera, limitando el desarrollo de nubosidad y precipitaciones [57], especialmente en la cuenca Pariñas, debido a su mayor exposición a masas de aire provenientes del océano Pacífico y el desierto piurano.

El análisis *NDVI*, determina que la cuenca del río Tumbes, por su ubicación al noreste del CCEA, es la que tiene los valores más elevados, debido a las mayores precipitaciones que recibe, como lo muestra los registros las EM Cabo Inga y Huasimo ubicados en dicha cuenca. Asimismo, se pudo observar que, a diferencia de las demás cuencas, las lluvias de la EM Pananga no tendrían mayor impacto en el ciclo fenológico de sus coberturas vegetales, debido a que su régimen climático estaría definido por masas de aire de distinto origen, menos influenciadas por la corriente marina fría de Humboldt. En ese sentido, Barboza et al., indica que el clima de la región de Tumbes se caracteriza por una precipitación anual que varía desde los 300 mm en tierras bajas hasta los 700 mm en zonas altas (Barboza et al., 2022), generada por la humedad proveniente principalmente de la ZCIT y de perturbaciones atmosféricas que se originan en la cuenca del Amazonas, que

actúan como el principal motor de los eventos convectivos costeros en el norte del Perú [59]. Asimismo, Peña-Murillo et al., refieren que la cuenca Puyango-Tumbes tiene su origen hidrológico en las provincias ecuatorianas de El Oro y Loja, lo que integra al sistema climático local masas de aire tropicales del hemisferio norte que son ajenas a la influencia del desierto costero [60] predominante en el sector sur del área de estudio.

En contraste, la cuenca de la quebrada Pariñas tuvo los valores *NDVI*_{medio} y *NDVI*_{máx}, más bajos debido a que representa el extremo más seco del área de estudio, al ser parte del desierto costero de Piura, caracterizado por vegetación de sabana arbustiva dispersa, suelos poco profundos y una marcada influencia de la corriente fría de Humboldt, que limita fuertemente la precipitación anual [61]. A pesar de que sus temperaturas medias son las más bajas y presenta una variación mínima, refleja un déficit hídrico permanente y limitada respuesta estacional de la vigorosidad vegetal en sus ecosistemas, cuya tendencia casi plana confirma que las condiciones atmosféricas no son suficientes para generar recuperación hídrica significativa en su vegetación [62].

Sin embargo, es importante acotar que las correlaciones moderadas entre las precipitaciones de la EM Pananga y el *NDVI*_{medio} en las cuencas de Pariñas, Fernández (pertenecientes a la vertiente occidental de los Amotapes) y Chira (ubicada al sureste de la cordillera), indican que la dinámica de la vegetación en esos territorios es afectada por otros factores, además de las precipitaciones que se producen en la extensión sur de la cordillera de los Amotapes.

En ese sentido, se tiene que la correlación inversa moderada entre la temperatura máxima promedio de la EM Lancones y el *NDVI*_{medio} de las cuencas Pariñas y Fernández, sugiere que la vegetación del flanco occidental de la cordillera de los Amotapes mejora cuando las temperaturas del mediodía son más bajas de lo normal en la zona oriental de la cordillera, efecto que se produce cuando se incrementa la nubosidad. Esta mayor presencia de nubes es generada durante los eventos de El Niño Costero, ante una mayor carga de humedad y el ascenso forzado por la cordillera de los Amotape, provocando la formación de nubes que humedecen la vertiente a barlovento (flanco occidental) y se extienden hacia el oriente cubriendo en mayor medida la vertiente a sotavento donde se encuentra la localidad de Lancones.

La cuenca de la quebrada Fernández, según ANA, alcanza cotas de hasta 1,600 m s.n.m., pero el cauce es intermitente y permanece seco la mayor parte del año, llegando a presentar caudales significativos sólo cada 5–6 años, principalmente durante eventos ENOS, generando crecidas muy fuertes y erosión en sus márgenes [63]. Sus bosques presentan la mayor variabilidad de valores *NDVI*, debido a su ubicación en la vertiente occidental (barlovento) de la cordillera de los Amotapes (de clima árido), que ante la ocurrencia de un evento ENOS, recibe mayores precipitaciones, superando hasta en 620% los niveles normales, efecto que se produce porque la cordillera de los Amotapes actúa como una barrera orográfica [64] que fuerza la elevación de masas de aire húmedo provenientes del

océano Pacífico (calentado), generando condensación, precipitaciones y el consecuente reverdecimiento de sus ecosistemas en los meses siguientes.

Las fuertes correlaciones registradas entre la temperatura mínima promedio de las EM El Alto y Cañaveral con el *NDVI* de las cuatro cuencas principales, se produce porque la temperatura mínima está definida por las características de la masa de aire predominante en un momento determinado, a diferencia de la temperatura máxima determinada por la insolación y la nubosidad. En ese sentido, el incremento de la temperatura mínima está asociado a una mayor humedad específica en el aire y a condiciones más inestables, como las generadas por un evento ENOS, que provoca mayores precipitaciones y un aumento de la vigorosidad vegetal.

Otro hallazgo para destacar son las fuertes correlaciones que muestran las temperaturas medias y mínimas promedio de la EM Rica Playa con los *NDVI* de todas las cuencas, además las fuertes correlaciones de sus precipitaciones con los valores *NDVI* de la cuenca Quebrada Seca, efecto que se debe a su ubicación en la zona premontana de Tumbes en la vertiente occidental, donde normalmente las precipitaciones son bajas ($\mu=305\text{mm}$), y solo se incrementan cuando se presenta un evento de El Niño Costero ($\mu= 681\text{mm}$). Estos resultados indican que las condiciones atmosféricas que rigen este sector de Tumbes son determinantes del estado fenológico de las coberturas vegetales en el área de estudio.

Las correlaciones directas significativas halladas entre los valores de *NDVI* y el ICEN, indica que ante un evento de El Niño Costero se puede tener una mayor respuesta vegetativa en el área de estudio. Sin embargo, la magnitud de estas correlaciones se mantiene en rangos moderadamente bajos debido a que el incremento significativo de las precipitaciones solo se produce en eventos ENOS intensos, por lo que, ante un evento ENOS débil, la ausencia de lluvias hará que la vegetación no mejore su vigorosidad, sugiriendo que, aunque el ENOS actúa como un factor impulsor de cambio, la dinámica de la cobertura vegetal está condicionada por otros factores más determinantes. Sin embargo, esta lectura discrepa de los efectos que tiene un evento ENOS en las precipitaciones del área de estudio y el reverdecimiento consecuente de sus ecosistemas. Esta contradicción puede ser explicada con la definición del ICEN, que mide las condiciones oceánicas del Pacífico Sur de manera constante, tanto en episodios de ENOS (que genera lluvias esporádicas más intensas), como en condiciones neutras y eventos de la Niña (más secas y constantes) que no provocaran cambios fenológicos importantes en el bosque seco. En ese sentido, Tovar et al., manifiestan que existe una falta de estudios que cuantifiquen las respuestas de la vegetación costera a largo plazo, específicamente durante la fase de La Niña, ya que la mayoría de los estudios se enfoca en El Niño, y se desconoce procesos como el que se generó durante la transición hacia La Niña tras el ENOS de 1997-1998 que provocó una pérdida de la estacionalidad en el bosque seco del norte peruano, manifestado como una presencia atípica y continua de cobertura vegetal durante meses que normalmente

serían secos, debido a la persistencia de la biomasa generada por las lluvias previas [65].

Lavado Casimiro & Espinoza precisan que únicamente los ENOS fuertes generan marcadas anomalías de precipitación con un incremento destacado en la vertiente del Pacífico en el norte de Perú [66], por lo que se puede afirmar que la fuerte influencia de eventos extremos asociados a ENOS, incrementan el promedio regional de lluvias, pero no representan un aumento sostenido de la precipitación [67]. Nuestros resultados discrepan de ese argumento, porque si bien los promedios interanuales de precipitaciones en las EM analizadas muestran tendencias débiles ascendentes, cercanas a cero o incluso descendentes, el análisis desagregado por estación y sectores (excluyendo los registros extraordinarios de 1997-1998, porque alteran las estadísticas), evidencian marcadas tendencias incrementales, coherente con el aumento de valores *NDVI*_{medio} que presenta el CCEA en las últimas dos décadas. En ese sentido, Esta observación coincide con la variabilidad climática espacio-temporal detectada en los Andes del norte peruano, donde las discrepancias entre los modelos globales y los registros locales de las estaciones suelen dificultar una interpretación precisa de las lluvias a pequeña escala [68].

Los patrones espaciales y temporales del *NDVI* observados en las cuencas del área de estudio muestran una alta dependencia de la variabilidad climática regional, comparable a la descrita para la Caatinga semiárida de Brasil. En ambos sistemas, la disponibilidad hídrica está fuertemente condicionada por aportes episódicos de precipitación asociados al desplazamiento latitudinal de la ZCIT, lo que genera marcados gradientes espaciales de vigor vegetal y una elevada sensibilidad interanual [54]. Asimismo, el incremento del *NDVI* medio a lo largo de las últimas cuatro décadas y los picos de reverdecimiento coincidentes con eventos intensos de ENOS, sugieren que la vegetación responde de manera no lineal a la reorganización de los sistemas atmosféricos regionales, de forma similar a la modulación ejercida por la Zona de Convergencia del Atlántico Sur sobre la lluvia en el centro-este de Sudamérica, controlada por gradientes térmicos océano-continente [69]. Estos resultados refuerzan la idea de que los ecosistemas semiáridos actúan como amplificadores de la variabilidad climática de gran escala, reflejando en su dinámica vegetal los cambios en la intensidad, frecuencia y persistencia de los forzantes atmosféricos dominantes.

Por otro lado, las correlaciones moderadas que se tienen entre valores *NDVI* y las anomalías térmicas globales, dan a entender que, a mayores temperaturas, hay mejor vigorosidad de la vegetación. Este fenómeno estaría asociado al incremento de las precipitaciones que se producen en los años más cálidos como 1997-1998, 2011-2012, 2015-2016, 2016-2017 y 2023-2024, que en la mayoría de los casos corresponden a eventos ENOS intensos.

Un hallazgo para destacar es el comportamiento que tienen las precipitaciones en los últimos tres periodos, especialmente en las EM ubicadas en zonas premontanas y hacia el este del área de estudio, donde se observa un fuerte incremento en el

periodo 2022-2023 debido a la activación del evento ENOS fuerte a partir de febrero de 2023 y que se prolonga hasta marzo de 2024 [70], por lo que se da un ligero descenso para el periodo 2023-2024. Sin embargo, para el siguiente periodo (2024-2025) cuando no se cuenta con un evento ENOS activo, las precipitaciones se vuelven a incrementar, teniendo por tanto un periodo de más de 3 años consecutivos sin un marcado periodo seco, fenómeno que probablemente este gatillando cambios en los ecosistemas del bosque seco que puede afectar a especies sensibles o amenazadas, poniendo en riesgo su viabilidad en la zona, o afectando recursos que aprovechan las poblaciones locales en sus alrededores.

Un cambio igual de llamativo es el observado en la evolución de los *NDVI* a lo largo del periodo de estudio, notando que entre los años 1984 y 2002 se presenta un incremento de sus valores, a diferencia del periodo 2002 al 2014 que presenta niveles de vigorosidad de los ecosistemas más bajos, pero que a partir de 2015 nuevamente se incrementa hasta la actualidad. Este cambio en el patrón de evolución de los bosques secos en la costa norte de Perú se debe a que en las dos últimas décadas del siglo XX se presentó un aumento de la temperatura debido a las fuertes manifestaciones de ENSO, mientras que entre los años 2000 y 2015, no se observa un calentamiento claro debido a una baja intensidad del ENSO, que a partir del evento de 2015-2016 habría ingresado en un nuevo periodo de mayor actividad [71], [72].

Finalmente, al analizar los registros de precipitaciones en las EM con data históricas se encontró que en las dos primeras décadas se tienen algunos años con incrementos de la precipitación separados por periodos de varios años secos. Sin embargo, en todas las EM se observa que, en las últimas dos décadas, la ocurrencia de años con precipitaciones superiores al promedio es más frecuente, con periodos secos más cortos, en muchos casos de apenas un año. Este cambio en el régimen de recurrencia de lluvias estacionales en el CCEA, explicaría el incremento de los niveles de vigorosidad que muestran sus bosques secos, con modificaciones de las condiciones ambientales en su interior, fenómeno que estaría impactando a poblaciones de fauna como el venado de cola blanca (*Odocoileus virginianus*), porque según Escate et al., los cambios en el clima significan modificaciones en la humedad y la flora, afectando a su vez a la fauna que alberga, evidenciado por la decreciente densidad poblacional y número de venados cobrados por SERNANP en el CCEA desde 2011 [47].

VI. CONCLUSIONES

El análisis evidencia un incremento sostenido de la temperatura promedio entre 1984 y 2025, así como una marcada heterogeneidad espacio-temporal en la respuesta del bosque seco, fuertemente controlada por gradientes latitudinales, posición orográfica y recurrencia de eventos ENOS. Las cuencas de la vertiente oriental de los Ampotape, presentan mayor vigorosidad vegetal asociada a una mayor disponibilidad hídrica, mientras que Pariñas representa el extremo árido del sistema, con respuestas fenológicas limitadas y déficit hídrico persistente. A escala temporal, se identifica un

incremento sostenido del *NDVI* medio en todo el CCEA, con aumentos superiores al 200 % en las cuencas Fernández y Pariñas, lo que sugiere un reverdecimiento progresivo del bosque seco durante las últimas cuatro décadas, estrechamente vinculado al aumento en la frecuencia de años húmedos y a la reducción de los periodos secos prolongados

El análisis integrado de *NDVI*, precipitación y temperatura indica que la respuesta vegetal no depende ICEN, sino que está mediada por la intensidad de los eventos ENOS y por condiciones atmosféricas locales, especialmente las temperaturas mínimas y medias, que mostraron las correlaciones más robustas con la vigorosidad vegetal. Los episodios ENOS intensos (1997–1998, 2016–2017 y 2022–2023) generaron pulsos de precipitación que detonaron el reverdecimiento, particularmente en cuencas áridas del flanco occidental, donde la orografía favorece la condensación y retención de humedad. Las correlaciones moderadas entre el *NDVI* y las anomalías térmicas globales indican que el calentamiento regional, al interactuar con la circulación atmosférica, amplifica indirectamente la productividad del bosque seco a través del incremento episódico de lluvias, confirmando el rol de estos ecosistemas como amplificadores de la variabilidad climática de gran escala.

Finalmente, la mayor recurrencia de años húmedos, junto con el aumento sostenido del *NDVI*, sugiere una transición ecohidrológica, con implicancias directas sobre la estructura del bosque seco del Pacífico y la disponibilidad de recursos para la fauna silvestre. Si bien este reverdecimiento podría interpretarse como una señal de resiliencia, también implica riesgos ecológicos asociados a la alteración de nichos, cambios en la composición florística y presiones adicionales sobre especies sensibles, como ya se evidencia en la dinámica poblacional del venado cola blanca. Estos hallazgos resaltan la necesidad de implementar esquemas de monitoreo climático-fenológico por cuencas hidrográficas y de fortalecer estrategias de gestión adaptativa, incorporando explícitamente la variabilidad ENOS y el calentamiento regional como ejes centrales de planificación, conservación y manejo del bosque seco costero del norte del Perú.

REFERENCES

- [1] C. M. Santos e Silva et al., "Rainfall and rain pulse role on energy, water vapor and CO2 exchanges in a tropical semiarid environment," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 345, p. 109829, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.agrformet.2023.109829.
- [2] R. I. Jasso-Flores and R. O. Corona-Núñez, "Recovery of carbon dynamics, soil nutrients and tree diversity during secondary succession within the tropical dry forests in the Yucatán Peninsula," *J. Environ. Manage.*, vol. 394, p. 127345, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.jenvman.2025.127345.
- [3] J. L. Marcelo-Peña, K. R. López-Fernandez, C. Reynel R., R. Linares-Palomino, and K. Dexter, "Dynamics of the seasonally dry tropical forests of the Marañón Valley, northern Peru," *Trees, Forests and People*, vol. 21, p. 100900, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.tfp.2025.100900.
- [4] M. Sheko, G. Kassa, D. Abebaw, H. Kassa, and A. Abdelkadir, "Importance of socio-economic and institutional factors in the collection of dry forest products: The case of gum and resin in Jawi District, Northwest Ethiopia," *Trees, Forests and People*, vol. 11, p. 100379, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.tfp.2023.100379.

- [5] SINIA, "Mapa de bosques secos del Perú," Oct. 2010. Accessed: Oct. 01, 2025. [Online]. Available: <https://sinia.minam.gob.pe/mapas/mapa-bosques-secos-peru>
- [6] M. S. D. Branco *et al.*, "Were Dry Forests widespread in the Pleistocene and what is their fate under climate change? A modelling approach using a specialist plant," *Flora*, vol. 321, p. 152629, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.flora.2024.152629.
- [7] J. Maza-Maza, E. Rodríguez-Caballero, B. Rodríguez-Lozano, and Y. Cantón, "Impact of deforestation on ecosystem functions of Ecuador's tropical dry forest under different protection status," *Trees, Forests and People*, p. 101032, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.tfp.2025.101032.
- [8] A. Khosravi Mashizi and M. Sharafatmandrad, "Dry forests conservation: A comprehensive approach linking ecosystem services to ecological drivers and sustainable management," *Glob. Ecol. Conserv.*, vol. 47, p. e02652, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.gecco.2023.e02652.
- [9] S. Saha *et al.*, "Recurrent forest fires, emission of atmospheric pollutants (GHGs) and degradation of tropical dry deciduous forest ecosystem services," *Total Environment Research Themes*, vol. 7, p. 100057, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.totert.2023.100057.
- [10] B. W. Kassun, M. Kallio, E. Trømborg, and M. M. Rannestad, "Land use and land cover change, trade-offs, and synergies between ecosystem services in a dry Afrotropical Forest," *J. Nat. Conserv.*, vol. 85, p. 126874, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.jnc.2025.126874.
- [11] M. A. Pagotto *et al.*, "Biomass production by tree species is negatively affected by decreased precipitation and chronic anthropogenic disturbance in a Caatinga dry forest," *J. Arid Environ.*, vol. 228, p. 105340, Jun. 2025, doi: 10.1016/j.jaridenv.2025.105340.
- [12] R. T. Pennington, C. E. R. Lehmann, and L. M. Rowland, "Tropical savannas and dry forests," *Current Biology*, vol. 28, no. 9, pp. R541–R545, May 2018, doi: 10.1016/j.cub.2018.03.014.
- [13] N. G. McDowell *et al.*, "Pervasive shifts in forest dynamics in a changing world," *Science (1979)*, vol. 368, no. 6494, May 2020, doi: 10.1126/science.aaz9463.
- [14] R. S. Vanderlei, M. F. Barros, K. G. Dexter, M. Tabarelli, and M. G. Santos, "Human disturbances reduce tree abundance and stimulate woody plant resprouting and clonal growth in a tropical dry forest," *For. Ecol. Manage.*, vol. 555, p. 121694, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.foreco.2024.121694.
- [15] V. I. Tafur Anzualdo, F. Aguirre Chavez, M. Vega-Guevara, D. Esenarro, and J. Vilchez Cairo, "Causes and Effects of Climate Change 2001 to 2021, Peru," *Sustainability*, vol. 16, no. 7, p. 2863, Mar. 2024, doi: 10.3390/su16072863.
- [16] M. Godoy-Veiga *et al.*, "The value of climate responses of individual trees to detect areas of climate-change refugia, a tree-ring study in the Brazilian seasonally dry tropical forests," *For. Ecol. Manage.*, vol. 488, p. 118971, May 2021, doi: 10.1016/j.foreco.2021.118971.
- [17] D. A. Prieto-Torres, A. Lira-Noriega, and A. G. Navarro-Sigüenza, "Climate change promotes species loss and uneven modification of richness patterns in the avifauna associated to Neotropical seasonally dry forests," *Perspect. Ecol. Conserv.*, vol. 18, no. 1, pp. 19–30, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.pecon.2020.01.002.
- [18] V. I. Tafur Anzualdo, F. Aguirre Chavez, M. Vega-Guevara, D. Esenarro, and J. Vilchez Cairo, "Causes and Effects of Climate Change 2001 to 2021, Peru," *Sustainability*, vol. 16, no. 7, p. 2863, Mar. 2024, doi: 10.3390/su16072863.
- [19] J. Zevallos and W. Lavado-Casimiro, "Climate Change Impact on Peruvian Biomes," *Forests*, vol. 13, no. 2, p. 238, Feb. 2022, doi: 10.3390/f13020238.
- [20] E. Barboza *et al.*, "Cover and Land Use Changes in the Dry Forest of Tumbes (Peru) Using Sentinel-2 and Google Earth Engine Data," in *The 3rd International Electronic Conference on Forests—Exploring New Discoveries and New Directions in Forests*, Basel Switzerland: MDPI, Oct. 2022, p. 2. doi: 10.3390/IECF2022-13095.
- [21] E. C. Angulo and J. A. M. Orsini, "Resilience and Responses to El Niño Costero 2017: A Multidimensional Impact Analysis in Peru," Mar. 14, 2024. doi: 10.21203/rs.3.rs-3946046/v1.
- [22] Z. Aligishiev and D. Kolpakova, "Building Macroeconomic Resilience to Natural Disasters and Persistent Temperature Changes," *IMF Working Papers*, vol. 2025, no. 144, p. 1, Jul. 2025, doi: 10.5089/9798229017879.001.
- [23] N. Pécastaing and C. Chávez, "The impact of El Niño phenomenon on dry forest-dependent communities' welfare in the northern coast of Peru," *Ecological Economics*, vol. 178, p. 106820, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ecolecon.2020.106820.
- [24] E. Barboza *et al.*, "Cover and Land Use Changes in the Dry Forest of Tumbes (Peru) Using Sentinel-2 and Google Earth Engine Data," in *The 3rd International Electronic Conference on Forests—Exploring New Discoveries and New Directions in Forests*, Basel Switzerland: MDPI, Oct. 2022, p. 2. doi: 10.3390/IECF2022-13095.
- [25] N. Laurie, A. C. G. Henderson, R. Rodríguez Arismendiz, O. Calle, D. Clayton, and A. J. Russell, "For an Environmental Ethnography in Human and Physical Geography: Reenvisioning the Impacts and Opportunities of El Niño in Peru," *Ann. Am. Assoc. Geogr.*, vol. 114, no. 10, pp. 2240–2263, Nov. 2024, doi: 10.1080/24694452.2024.2377222.
- [26] O. Velasquez-Hidalgo *et al.*, "IMPACTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO PIURA. CASO CANCHAQUE," *Scientia*, vol. 27, no. 27, Jan. 2025, doi: 10.31381/scientia.v27i27.7189.
- [27] D. M. Álvarez and G. Poveda, "Spatiotemporal Dynamics of NDVI, Soil Moisture and ENSO in Tropical South America," *Remote Sens. (Basel)*, vol. 14, no. 11, p. 2521, May 2022, doi: 10.3390/rs14112521.
- [28] J. Maza-Maza, E. Rodríguez-Caballero, B. Rodríguez-Lozano, and Y. Cantón, "Impact of deforestation on ecosystem functions of Ecuador's tropical dry forest under different protection status," *Trees, Forests and People*, vol. 22, p. 101032, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.tfp.2025.101032.
- [29] R. T. Pennington, C. E. R. Lehmann, and L. M. Rowland, "Tropical savannas and dry forests," *Current Biology*, vol. 28, no. 9, pp. R541–R545, May 2018, doi: 10.1016/j.cub.2018.03.014.
- [30] K. D. Stan, A. Sanchez-Azofeifa, and H. F. Hamann, "Widespread degradation and limited protection of forests in global tropical dry ecosystems," *Biol. Conserv.*, vol. 289, p. 110425, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.biocon.2023.110425.
- [31] R. Rodríguez, A. Mabres, E. Palacios, and P. Salazar, "El Niño registrado en especies arbóreas del bosque seco de la costa norte del Perú," vol. 5, no. 4, pp. 5–9, Apr. 2018, Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5129>
- [32] Instituto Geofísico del Perú, "Ecosistemas del norte del Perú: zona de amortiguamiento del Coto de Caza El Angolo," Apr. 2019. Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/4433>
- [33] S. Sirigu and N. Montaldo, "Climate Change Impacts on the Water Resources and Vegetation Dynamics of a Forested Sardinian Basin through a Distributed Ecohydrological Model," *Water (Basel)*, vol. 14, no. 19, p. 3078, Sep. 2022, doi: 10.3390/w14193078.
- [34] M. J. Specht *et al.*, "Socioeconomic differences among resident, users and neighbour populations of a protected area in the Brazilian dry forest," *J. Environ. Manage.*, vol. 232, pp. 607–614, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2018.11.101.
- [35] S. Shancee, N. Shancee, W. Lock, and M. J. Espejo-Urbe, "The Development and Growth of Non-Governmental Conservation in Peru: Privately and Communally Protected Areas," *Hum. Ecol.*, vol. 48, no. 6, pp. 681–693, Dec. 2020, doi: 10.1007/s10745-020-00188-8.
- [36] SERNANP, "Coto de Caza El Angolo," Jan. 2019. Accessed: Oct. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/informes-publicaciones/1793080-coto-de-caza-el-angolo>
- [37] Z. Zhang, Z. He, K. Su, S. Wu, and L. Liu, "Global evolution of ecosystem services research in watersheds: Insights from large language models," *Land use policy*, vol. 160, p. 107849, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.landusepol.2025.107849.
- [38] M. Kolb *et al.*, "Is there a forest-water-nexus for Mexican temperate forests?," *Ecohydrology & Hydrobiology*, vol. 22, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.ecohyd.2021.08.007.
- [39] L. C. Orozco-Urbe, M. A. Ortega-Guerrero, M. Maass, and H. Paz, "Dinámica hidrológica ecosistémica en un bosque tropical seco asociado a un medio fracturado," *Bosque (Valdivia)*, vol. 44, no. 3, pp. 547–561, 2023, doi: 10.4067/S0717-92002023000300547.
- [40] L. Chen, L. Liu, S. Liu, Z. Shi, and C. Shi, "The Application of Remote Sensing Technology in Inland Water Quality Monitoring and Water

- Environment Science: Recent Progress and Perspectives,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 17, no. 4, p. 667, Feb. 2025, doi: 10.3390/rs17040667.
- [41] C. V. B. dos Santos *et al.*, “Validation of SMAP, SMOS, and ESA CCI SM soil moisture products in a seasonally dry tropical forest,” *J. South Am. Earth Sci.*, vol. 169, p. 105857, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.jsames.2025.105857.
- [42] G. B. Costa *et al.*, “Seasonal Ecosystem Productivity in a Seasonally Dry Tropical Forest (Caatinga) Using Flux Tower Measurements and Remote Sensing Data,” *Remote Sens. (Basel)*, vol. 14, no. 16, p. 3955, Aug. 2022, doi: 10.3390/rs14163955.
- [43] A. Essaadia, A. Abdellah, A. Ahmed, F. Abdelouahed, and E. Kamal, “The normalized difference vegetation index (NDVI) of the Zat valley, Marrakech: comparison and dynamics,” *Heliyon*, vol. 8, no. 12, p. e12204, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12204.
- [44] I. Choudhury and B. K. Bhattacharya, “Satellite Based Composite Weather Insurance Product for assessing mid-term adversary,” *Remote Sens. Appl.*, vol. 36, p. 101373, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.rsase.2024.101373.
- [45] SERNANP, “Coto de Caza El Angolo,” 2019, Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/sernanp/informes-publicaciones/1793080-coto-de-caza-el-angolo>
- [46] A. Martinez, D. Flores, and L. Céspedes, “Ecosistemas del norte del Perú: El coto de caza El Angolo,” Dec. 2017. Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/1273>
- [47] K. V. Escate Buitrón, N. R. Caldas Zumaran, A. Ávila Apuy, B. L. Mendoza Manturano, J. M. Colonna Montero, and U. F. Giraldo Malca, “Impact of droughts and El Niño Costero on dry forest and white-tailed deer in Coto de Caza El Angolo - Perú,” in *Proceedings of the 22nd LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology (LACCEI 2024)*, Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2024, doi: 10.18687/LACCEI2024.1.1.1288.
- [48] IGP, “Ecosistemas del norte del Perú: El coto de caza El Angolo,” 2017, Accessed: Feb. 04, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.igp.gob.pe/items/0ead4f9b-ce30-4585-9f73-21a063e9d2f9>
- [49] A. Martinez, D. Flores, and L. Céspedes, “Ecosistemas del norte del Perú: El Coto de Caza El Angolo,” Lima, Dec. 2017. Accessed: Jan. 31, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.igp.gob.pe/items/0ead4f9b-ce30-4585-9f73-21a063e9d2f9>
- [50] T. E. CRUZ ARISMENDIZ, “CARACTERIZACION FISIONOMICA DEL BOSQUE SECO DE QUEBRADA PARÍÑAS-TALARA,” 2015. Accessed: Sep. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.arocha.pe/wp-content/uploads/sites/20/2015/06/Tesis-Tania-Arismendiz.pdf>
- [51] T. E. Cruz Arismendiz, “CARACTERIZACION FISIONOMICA DEL BOSQUE SECO DE QUEBRADA PARÍÑAS-TALARA,” 2015. Accessed: Feb. 04, 2026. [Online]. Available: <https://www.arocha.pe/wp-content/uploads/sites/20/2015/06/Tesis-Tania-Arismendiz.pdf>
- [52] F. B. Regal Gastelumendi, “UTILIZACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DE HÁBITAT DEL VENADO COLA BLANCA (Odocoileus virginianus Zimmermann, 1780),” UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA, Lima, 2013. Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/02e13f8c-b4b5-45ad-ae93-48014f24b7bd/content>
- [53] J. A. Salgado Redhead, “DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA COBERTURA PARA EL VENADO COLA BLANCA EN EL COTO DE CAZA EL ANGOLO, SECTOR SAUCE GRANDE,” UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA, Lima, 2022. Accessed: Jan. 28, 2026. [Online]. Available: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/850b8a81-3928-4c3e-b901-5ea12c227a7a/content>
- [54] S. Ezaidi *et al.*, “Multi-temporal Landsat-derived NDVI for vegetation cover degradation for the period 1984-2018 in part of the Arganeraie Biosphere Reserve (Morocco),” *Remote Sens. Appl.*, vol. 27, p. 100800, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.rsase.2022.100800.
- [55] X. Jiang and B. Tian, “Tropical Meteorology: Intertropical Convergence Zone,” in *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, Elsevier, 2024, doi: 10.1016/B978-0-323-96026-7.00141-7.
- [56] D. E. Waliser and X. Jiang, “TROPICAL METEOROLOGY AND CLIMATE | Intertropical Convergence Zone,” in *Encyclopedia of Atmospheric Sciences*, Elsevier, 2015, pp. 121–131, doi: 10.1016/B978-0-12-382225-3.00417-5.
- [57] P. Waylen and G. Poveda, “El Niño–Southern Oscillation and aspects of western South American hydro-climatology,” *Hydrol. Process.*, vol. 16, no. 6, pp. 1247–1260, Apr. 2002, doi: 10.1002/hyp.1060.
- [58] E. Barboza *et al.*, “Cover and Land Use Changes in the Dry Forest of Tumbes (Peru) Using Sentinel-2 and Google Earth Engine Data,” in *The 3rd International Electronic Conference on Forests—Exploring New Discoveries and New Directions in Forests*, Basel Switzerland: MDPI, Oct. 2022, p. 2, doi: 10.3390/IECF2022-13095.
- [59] M. W. Douglas, J. Mejia, N. Ordinola, and J. Boustead, “Synoptic Variability of Rainfall and Cloudiness along the Coasts of Northern Peru and Ecuador during the 1997/98 El Niño Event,” *Mon. Weather Rev.*, vol. 137, no. 1, pp. 116–136, Jan. 2009, doi: 10.1175/2008MWR2191.1.
- [60] R. Peña-Murillo, W. Lavado-Casimiro, and L. Bourrel, “Impacts of LULC and climate change on runoff and sediment production for the Puyango-Tumbes basin (Ecuador-Peru),” *Frontiers in Remote Sensing*, vol. 5, Dec. 2024, doi: 10.3389/frsen.2024.1471144.
- [61] Autoridad Autónoma de la Cuenca Hidrográfica Chira Piura (AACHCP), “Diagnóstico de la cuenca del río Piura con enfoque de gestión de riesgos y énfasis en los recursos agua, suelo y cobertura vegetal,” 2001, Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12543/34>
- [62] M. Á. Segura-Castruita and C. A. Ortiz-Solorio, “Modelación de la evapotranspiración potencial mensual a partir de temperaturas máximas-mínimas y altitud,” *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 08, no. 3, pp. 93–110, Jun. 2017, doi: 10.24850/j-tyca-2017-03-06.
- [63] ANA, “Hidrografía - RÍO TUMBES.” Accessed: Dec. 03, 2025. [Online]. Available: https://www.ana.gob.pe/2019/consejo-de-cuenca/tumbes/Hidrograf%C3%ADa?utm_source
- [64] R. Linares-Palomino and S. I. Ponce Alvarez, “Tree community patterns in seasonally dry tropical forests in the Cerros de Amotape Cordillera, Tumbes, Peru,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 209, no. 3, pp. 261–272, May 2005, doi: 10.1016/j.foreco.2005.02.003.
- [65] C. Tovar, E. Sánchez Infantas, and V. Teixeira Roth, “Plant community dynamics of lomas fog oasis of Central Peru after the extreme precipitation caused by the 1997-98 El Niño event,” *PLoS One*, vol. 13, no. 1, p. e0190572, Jan. 2018, doi: 10.1371/journal.pone.0190572.
- [66] W. Lavado Casimiro and J. C. Espinoza, “Entendiendo los impactos de diferentes tipos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú,” vol. 1, no. 3, pp. 4–7, Mar. 2014, Accessed: Feb. 09, 2026. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12816/5043>
- [67] S. B. Morera, T. Condom, A. Crave, P. Steer, and J. L. Guyot, “The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012),” *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 11947, Sep. 2017, doi: 10.1038/s41598-017-12220-x.
- [68] F. L. Newell, I. J. Ausprey, and S. K. Robinson, “Spatiotemporal climate variability in the Andes of northern Peru: Evaluation of gridded datasets to describe cloud forest microclimate and local rainfall,” *International Journal of Climatology*, vol. 42, no. 11, pp. 5892–5915, Sep. 2022, doi: 10.1002/joc.7567.
- [69] A. Amaral e Silva *et al.*, “Multivariate statistical analysis of rainfall variability in Brazil: Assessing climatic and environmental drivers of precipitation,” *Remote Sens. Appl.*, vol. 41, p. 101849, Jan. 2026, doi: 10.1016/j.rsase.2025.101849.
- [70] IGP, “Eventos El Niño y La Niña Costeros.”
- [71] R. D. Díaz Aguilar, S. V. Sanchez Larico, E. Lujano Laura, and A. Lujano Laura, “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 - Journal of High Andean Research*, vol. 19, no. 3, pp. 265–274, Sep. 2017, doi: 10.18271/ria.2017.291.
- [72] U. F. Giraldo Malca *et al.*, “The loss of glacier resilience due to climate change throughout the Cordillera Blanca, Peru between 1984 and 2023,” *Quaternary Science Advances*, vol. 19, p. 100286, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.qsa.2025.100286.