

# EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE BASD-CMIP6-PE Y PROYECCIONES CLIMÁTICAS DE PRECIPITACIÓN Y TEMPERATURA EN LA REGIÓN DE CAJAMARCA

Pedro I. Díaz Ramirez<sup>1</sup> y James E. Apaéstegui Campos<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

<sup>2</sup>Maestría en Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.

**Palabras clave:** Proyecciones futuras del clima, BASD-CMIP6-PE, temporadas húmedas/calientes y secas/frías

Citar como Díaz, P. & Apaéstegui, J., (2025). Evaluación del desempeño de BASD-CMIP6-PE y proyecciones climáticas de precipitación y temperatura en la región de Cajamarca. Boletín Científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol 12 n.º 08, págs. 11-21.

## ¿Cuál es la contribución de esta investigación para los tomadores de decisiones?

Para la gestión pública en Cajamarca, es importante anticipar cómo el cambio climático podría modificar las lluvias y las temperaturas a escalas útiles para la planificación. Este estudio aporta una herramienta de diagnóstico y proyección: BASD-CMIP6-PE, que reproduce el clima observado (1981–2010) y estima cambios futuros —incremento de temperatura, intensificación de precipitaciones en temporada húmeda y mayor variabilidad en la seca. Los resultados varían según el escenario de emisiones, por lo que se recomienda prudencia al usarlos. Para las autoridades públicas, estos hallazgos pueden ayudar a tomar decisiones sobre las inversiones hídricas, cómo organizar el calendario agrícola y qué medidas tomar para reforzar las acciones de prevención de riesgos.

## Resumen

El presente trabajo evalúa el desempeño del conjunto de datos BASD-CMIP6-PE, derivado de 10 Modelos Climáticos Globales (GCMs) del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 6 (CMIP6), en el departamento de Cajamarca. Se utilizaron registros del pasado reciente (1981–2010) como periodo de referencia y se analizaron las proyecciones de cambio climático bajo tres escenarios considerados SSP1-2.6, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 considerando tres períodos (corto plazo: 2015–2040, mediano plazo: 2041–2070 y largo plazo: 2071–2100), en comparación con el periodo de referencia. Los resultados muestran que el conjunto BASD-CMIP6-PE reproduce adecuadamente las principales características del clima de Cajamarca en el periodo de referencia. Asimismo, las proyecciones

climáticas indican un aumento de la temperatura, asociado a una intensificación de las precipitaciones, con mayor variabilidad en las temporadas secas. Se proyecta un incremento en la amplitud del ciclo estacional de precipitaciones y una reducción del ciclo térmico estacional, lo que sugiere mayores precipitaciones durante la temporada húmeda e inviernos con temperaturas más cercanas a las de verano. Bajo el escenario SSP126, la tasa de cambio en la temperatura y la precipitación se mantiene baja; en contraste, los escenarios SSP370 y SSP585 proyectan, a mediano y largo plazo, incrementos significativos que reflejan una mayor inestabilidad climática y un aumento de los riesgos asociados. Estos hallazgos aportan una base científica relevante para el diseño de estrategias de prevención y adaptación al cambio climático, especialmente en la gestión de los recursos hídricos de la región de Cajamarca.

## 1. Introducción

Los Modelos de Circulación General (GCM, por sus siglas en inglés) constituyen una herramienta fundamental para investigar los impactos futuros del cambio climático (IPCC, 2013). El proyecto de Intercomparación de Modelos acoplados en su fase 6 (Coupled Model Intercomparison CMIP6; Eyring et al., 2016) representa la versión más reciente y avanzada de resultados de los GCM, consolidándose como el estado del arte en el estudio de proyecciones climáticas. Esta nueva generación de modelos incorpora un conjunto de escenarios que combinan las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés; Riahi et al., 2017) y las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés; van Vuuren et al., 2011), con el fin de explorar la respuesta futura de los sistemas naturales y socioeconómicos bajo distintos niveles de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En este contexto, la base de datos BASD-CMIP6-PE, desarrollada recientemente para el dominio espacial que incluye Perú y Ecuador (Fernández-Palomino et al., 2024), constituye un avance significativo al proporcionar proyecciones climáticas de alta resolución (10 km, a nivel diario). No obstante, su potencial aún no ha sido suficientemente aprovechado, ya que los estudios basados en estas proyecciones son escasos (Fernández-Palomino et al., 2023). En particular, persiste una clara brecha de conocimiento respecto a la evaluación de los cambios proyectados en temperatura y precipitación durante las temporadas lluviosas/cálidas y secas/frías en el norte del Perú, especialmente en la región de Cajamarca, bajo los escenarios más recientes del CMIP6.

La región de Cajamarca, ubicada en el norte peruano, concentra una amplia diversidad de zonas ecológicas y actividades económicas (Gobierno Regional de Cajamarca, 2012), entre las que destaca la producción agropecuaria (INEI, 2024), lo que le confiere una especial relevancia. Su localización en la cordillera de los Andes genera un contraste marcado: hacia el oeste, un clima frío y seco, y hacia el este, condiciones cálidas y húmedas propias de la región amazónica (Espinoza et al., 2020). Esta compleja interacción entre relieve y atmósfera plantea un desafío para la representación adecuada de la temperatura y la precipitación en los modelos climáticos. Asimismo, analizar el comportamiento futuro de estas variables bajo diferentes escenarios del

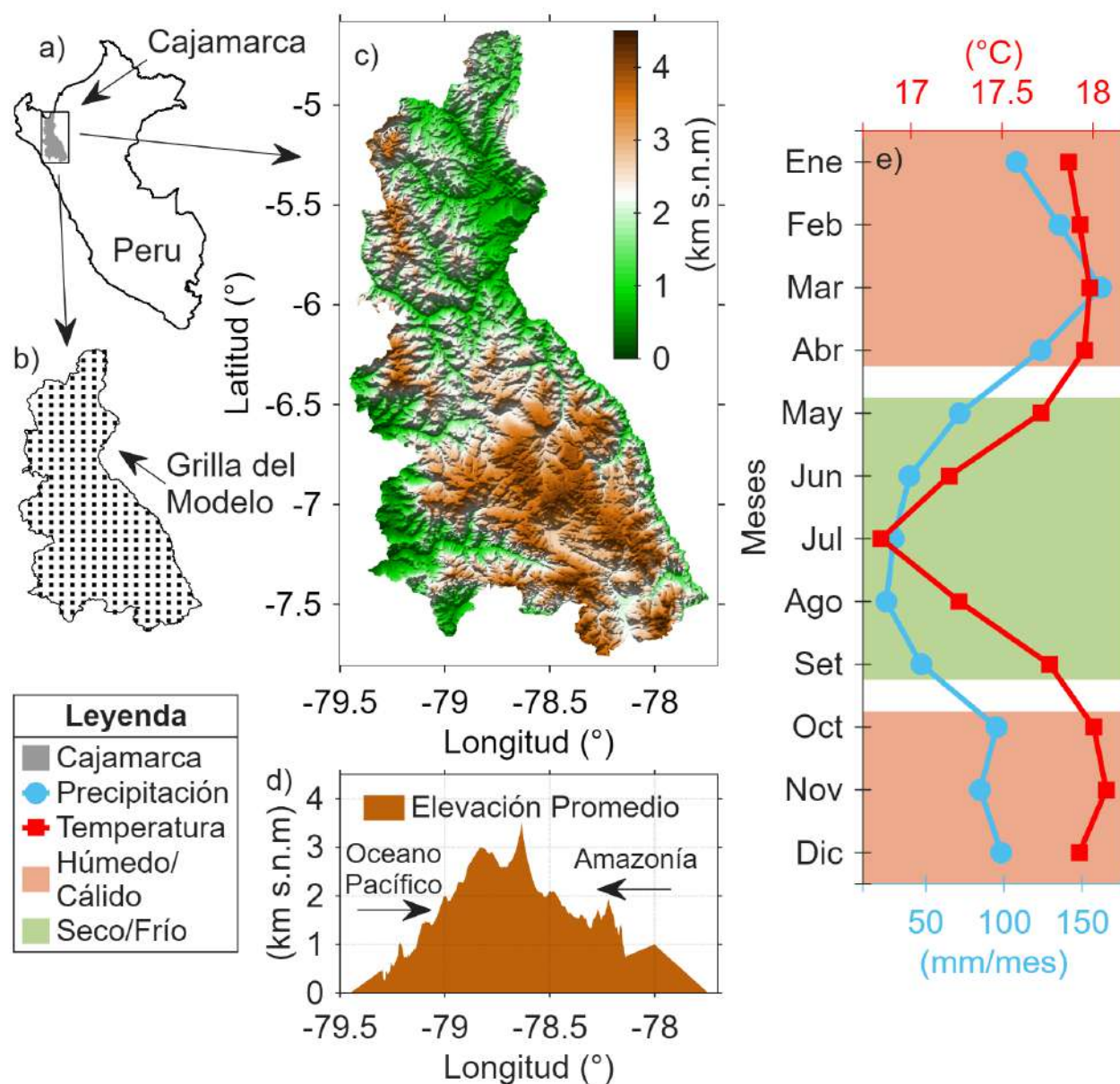
CMIP6 resulta esencial para comprender los cambios en el ciclo anual y sus implicancias en actividades económicas claves de la región (Gobierno Regional de Cajamarca, 2012; Giráldez et al., 2020; Atalaya-Marín et al., 2025).

En este estudio se evalúa el desempeño de la base de datos BASD-CMIP6-PE en la región de Cajamarca durante el periodo histórico y se analizan las proyecciones futuras de la temperatura y precipitación hasta finales del siglo XXI bajo tres escenarios de cambio climático. El análisis se desarrolló a partir de promedios climatológicos mensuales y anuales, considerando un dominio espacial centrado en Cajamarca. Asimismo, se evaluó la capacidad de las simulaciones frente a un conjunto de datos observacionales grillados y se compararon los cambios futuros de las temporadas húmedas/cálidas y secas/frías en relación con las condiciones climáticas actuales.

## 2. Metodología

### Área de estudio

El área de estudio se ubica al noroeste de Perú, en el departamento de Cajamarca. Abarca un rango altitudinal que va de ~255 a ~3 500 m s. n. m. (GEBCO, 2024) (Fig. 1 –a, c y d). Por el lado oeste de la cordillera de los Andes, la variabilidad climática está influenciada por los modos de variabilidad del océano Pacífico, lo que genera un clima frío y seco, con excepción de los años de ocurrencia de eventos El Niño (Takahashi et al., 2004). En contraste, hacia el este se presenta una Amazonía caliente y húmeda (Espinoza et al., 2020) (Fig. 1 – d). Entre los procesos de gran escala que influyen en clima de Cajamarca destacan el desplazamiento estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI) (Waliser y Gautier, 1993), el Sistema de Monzón Sudamericano (SMS) (Vera et al., 2006), asociados a los ciclos de insolación en el hemisferio austral. La climatología (1981-2010) muestra una precipitación total anual de 1020 mm/año, con una mayor concentración de la precipitación durante el verano austral (máximos en febrero-abril; línea celeste, eje inferior: mm/mes), al cual denominaremos temporada húmeda/cálida. Entre mayo y septiembre se establece una temporada seca y fría (temporada seca/fría), con las temperaturas más bajas en junio-agosto (línea roja, eje superior: °C).



**Figura 1.** Área de estudio. a) Perú. b) Puntos de grilla del conjunto de modelos BASD-CMIP6-PE en el dominio espacial de Cajamarca. c) Dominio espacial de la región Cajamarca representando la elevación del terreno respecto del nivel de mar (km s.n.m). d) Sección representativa de la elevación del terreno en el dominio espacial de Cajamarca. e) Ciclo anual de precipitación (línea celeste, eje inferior; mm/mes) y temperatura (línea roja, eje superior; °C) para el periodo 1981-2010, obtenido por el conjunto de modelos BASD-CMIP6-PE.

## Datos

Para el análisis comparativo de las simulaciones durante el periodo histórico, se usaron datos mensuales de precipitación y temperatura de CHIRPS v2.0 (Funk et al., 2015) y del reanálisis ERA5 (Hersbach et al., 2023), respectivamente (Tabla 1). La base de datos CHIRPS v2.0 fusiona datos infrarrojos de satélite con lecturas tomadas directamente, enriqueciendo así la visualización espacial de las lluvias en áreas con pocos puntos de medición. Así mismo, ERA5, creado por el Centro Europeo de Predicciones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), brinda cálculos atmosféricos muy detallados usando la asimilación de datos por medio del sistema IFS-CY41R2, que reúne datos de tierra, satélites y radares. Se ha comprobado que ambos datos grillados funcionan bien al evaluar los modelos CMIP para la proyección del clima en Sudamérica y otras regiones del mundo (como en Arias et al., 2021; Almazroui et al., 2021; Li et al., 2021; Zhao et al., 2021), lo que refuerza que son válidas como

punto de referencia observacional para evaluar las simulaciones históricas en este estudio.

Los datos simulados obtenidos corresponden a datos basados en las proyecciones climáticas CMIP6 de 10 modelos del GCM regionalizado denominado BASD-CMIP6-PE (Fernandez-Palomino et al., 2024) (Tabla 2). BASD-CMIP6-PE aplicó el método de ajuste de sesgo y reducción de escala estadística (Lang, 2019), utilizando como forzantes físicos datos de temperatura de PISCO (Huerta et al., 2018) y precipitación de RAIN4PE (Fernandez-Palomino et al., 2021) para generar un conjunto de 10 modelos de alta resolución con proyecciones climáticas que incluyen un periodo histórico (1850 - 2014) y tres escenarios futuros: SSP1-2.6 (SSP126), vinculado con políticas sostenibles de calentamiento global; SSP3-7.0 (SSP370), representativo de un calentamiento global intermedio-alto; y SSP5-8.5 (SSP585), que proyecta un escenario de calentamiento global extremo con un continuo desarrollo de combustibles fósiles (IPCC, 2021).

**Tabla 1.** Datos grillados usados en este estudio.

VARIABLE	CONJUNTO DE DATOS	RESOLUCIÓN (lon x lat)	ENLACE WEB
Precipitación (mm/mes)	Climate Hazards group Infra-Red Precipitation with Stations (CHIRPS v2.0)	0.05° x 0.05°	<a href="https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_monthly/netcdf/byYear/">https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/global_monthly/netcdf/byYear/</a>
Temperatura 2m sobre el suelo (°C)	ERA5 – reanalysis	0.25° x 0.25°	<a href="https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/Reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=download">https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/Reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=download</a>

**Tabla 2.** Detalle de los 10 modelos BASD-CMIP6-PE usados en este estudio.

N°	NOMBRE DEL MODELO CMIP6	TEMPORALIDAD	RESOLUCIÓN (lon x lat)	ENLACE WEB
1	CanESM5	Histórico (1850-2014); SSP 126, SSP 370 y SSP 585 (2015-2100)	0.1° x 0.1°	<a href="https://dataservices.gfz-potsdam.de/pik/showshort.php?id=473f27a6-86dd-11ed95b8-f851ad6d1e4b">https://dataservices.gfz-potsdam.de/pik/showshort.php?id=473f27a6-86dd-11ed95b8-f851ad6d1e4b</a>
2	IPSL-CM6A-LR			
3	CNRM-CM6-1			
4	CNRM-ESM2-1			
5	UKESM1-0-LL			
6	GFDL-ESM4			
7	MIROC6			
8	MRI-ESM2-0			
9	MPI-ESM1-2-HR			
10	EC-Earth3			

## Procedimiento y métodos

Se evaluó la capacidad de los modelos BASD-CMIP6-PE para representar el clima de la región Cajamarca en el periodo histórico. Posteriormente, se analizaron los cambios futuros de las temporadas húmedas/cálidas y secas/frías en los escenarios del clima futuro (SSP126, SSP370 y SSP585) respecto del clima presente. La evaluación consideró cuatro ventanas temporales: el periodo 1981-2010 como clima de referencia (Ref), y tres periodos futuros: corto plazo (ST, 2015-2040), mediano plazo (MT, 2041-2070) y largo plazo (LT, 2071-2100).

Para la evaluación, todos los modelos BASD-CMIP6-PE y los datos grillados (CHIRPS y ERA5 reanálisis) fueron escalados a una resolución espacial común de 0.1° de longitud y latitud, mediante interpolación bilineal usando la función `griddedInterpolant` de MATLAB R2025a (MathWorks, 2025).

En relación al análisis de validación de los datos de precipitación y temperatura en el periodo de referencia se incluyó la comparación del ciclo anual (Fig. 1e) y del patrón espacial, definido como la serie formada por los promedios anuales en cada punto de grilla (Fig. 1b). Para esta comparación se emplearon métricas estadísticas como la desviación estándar ( $\sigma$ ), el coeficiente de correlación ( $\rho$ , con prueba de significancia  $p < 0.01$ ) y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

La definición de las temporadas se realizó a partir de los promedios mensuales: la temporada húmeda (R)/cálida (C) se consideró entre octubre y abril, mientras que la temporada seca (S)/fría (F) se definió entre mayo y septiembre (Fig. 1 – e). Asimismo, se evaluó la amplitud estacional, definida como la diferencia entre las temporadas húmedas (cálidas) y secas (frías).

Finalmente, dichas temporadas se analizaron mediante la variación porcentual entre el periodo de referencia (Ref) y los tres horizontes futuros considerados: corto plazo (ST), mediano plazo (MT) y largo plazo (LT), bajo los tres escenarios de cambio climático evaluados.

### 3. Resultados

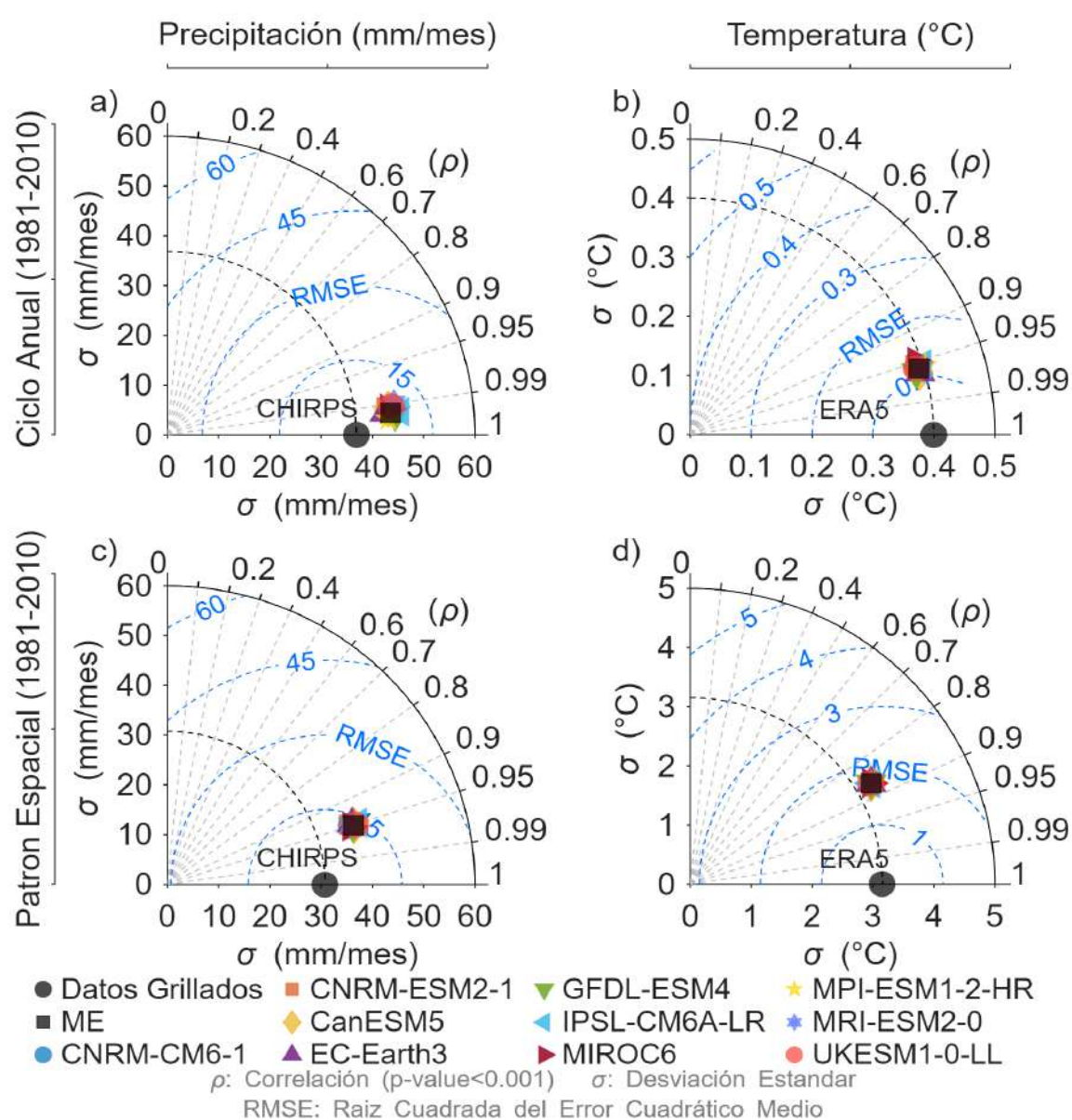
#### Validación de los modelos BASD-CMIP6-PE en el periodo de referencia (1981-2010)

La comparación entre los 10 modelos climáticos y los datos grillados para el periodo histórico mostró altos niveles de concordancia, con coeficientes de correlación de 0.99 para el ciclo anual y de 0.95–0.96 para el patrón espacial de la precipitación ( $p$ -valor < 0.01). De manera complementaria, los valores de error cuadrático medio (RMSE) se situaron en rangos de 6.95–9.91 mm y 0.11–0.13 mm, respectivamente (Fig. 2 a y c).

Para la temperatura, las correlaciones alcanzaron valores de 0.95 para el ciclo anual y 0.87 para el patrón espacial, con RMSE de 12.64–13.90 °C y 1.71–1.72 °C, respectivamente (Fig. 2 b y d).

La evaluación del promedio multimodelo (ME) mostró correlaciones similares a las obtenidas con los modelos individuales, tanto para el ciclo anual como para el patrón espacial de precipitación y temperatura (Fig. 2). No obstante, se observó una reducción sistemática del RMSE en el ME, lo que indica una mejora en la representación de las variables analizadas. En conjunto, estos resultados confirman la capacidad de los modelos BASD-CMIP6-PE para reproducir adecuadamente la variabilidad de la precipitación y la temperatura, tanto en su ciclo anual como en el patrón espacial promedio en la región de Cajamarca.

En función de esta evaluación, los análisis posteriores se realizaron empleando los resultados del promedio multimodelo (ME), al considerarse la representación más consistente y cercana al clima observado en comparación con los modelos individuales.



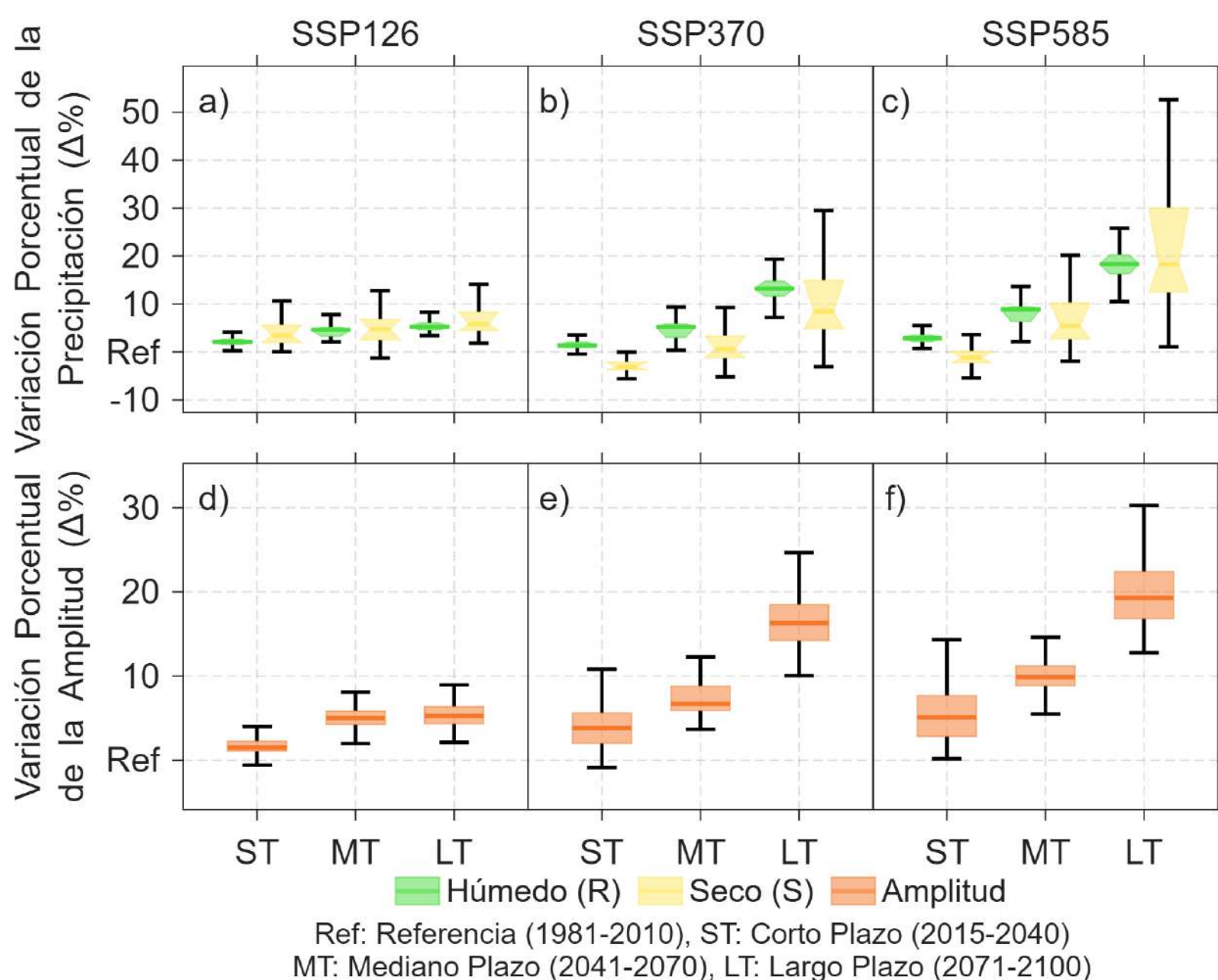
**Figura 2.** Diagramas de Taylor (Taylor, 2001) que muestra las métricas estadísticas del ciclo anual de la precipitación y la temperatura (a y b respectivamente), y del patrón espacial (c y d respectivamente) entre los 10 modelos BASD-CMIP6-PE y los datos grillados (CHIRPS y ERA5) para el periodo 1981-2010. ME es el promedio multimodelo. La coordenada radial indica la desviación estándar ( $\sigma$ , línea negra discontinua), y la coordenada angular muestra la correlación ( $\rho$ ,  $p$ -valor < 0.01, líneas grises discontinuas). Las líneas azules concéntricas discontinuas representan la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE).

## Variaciones porcentuales de las temporadas húmedas y secas

La variación porcentual de la precipitación acumulada con respecto a la tendencia central mostró cambios futuros de 1.6 % durante la temporada húmeda y 1.2 % en la temporada seca desde el periodo ST al LT para el escenario de cambio climático SSP126 (Fig. 3a). Así mismo, bajo los escenarios SSP370 y SSP585, las tasas de cambio fueron de 6.0 % y 5.8 %, y 9.7 % y 7.8 % para las temporadas húmeda y seca, respectivamente (Fig. 3 b y c). Estos resultados indican un incremento de la cantidad de las precipitaciones futuras, particularmente durante la temporada húmeda. Por otro lado, la distribución espacial de la precipitación mostró un rango promedio de variación respecto a la tendencia central de 4.5 %-7.8 % en la

temporada seca y 2 %-2.8 % en la temporada húmeda bajo el escenario SSP126 (Fig. 3a). Para el escenario SSP370, los valores oscilaron entre 6.6 %-11 % en la temporada seca y 4 % en la temporada húmeda (Fig. 3b), mientras que en el escenario SSP585 se observaron valores de 9.6 %-18 % y 5.5 %-5 % en las temporadas seca y húmeda, respectivamente. Estos resultados evidencian una mayor dispersión en las proyecciones de la precipitación en la temporada seca que en la húmeda en Cajamarca, desde el periodo de corto plazo hasta finales de siglo.

Finalmente, la amplitud estacional presentó incrementos de 1.2 % bajo el escenario SSP126, 5.8 % en SSP370 y 9.7 % en SSP585 (Fig. 3d, 3e y 3f), lo que evidencia un mayor contraste entre la temporada húmeda y seca hacia finales de siglo.



**Figura 3.** Variaciones porcentuales en la precipitación ( $\Delta\%$ ) de las temporadas húmeda y seca entre los periodos futuros (ST, MT y LT) con respecto al periodo de referencia (Ref) bajo los tres escenarios futuros SSP126 (a), SSP370 (b) y SSP585 (c) respectivamente. (d, e y f) Similar que a, b y c pero para variaciones porcentuales en la amplitud ( $\Delta\%$ ). Cada diagrama de caja representa, los valores extremos límite inferior y superior, el cuartil 25 (Q25), el cuartil 50 (Q50 o mediana o término central) y el cuartil 75 (Q75).

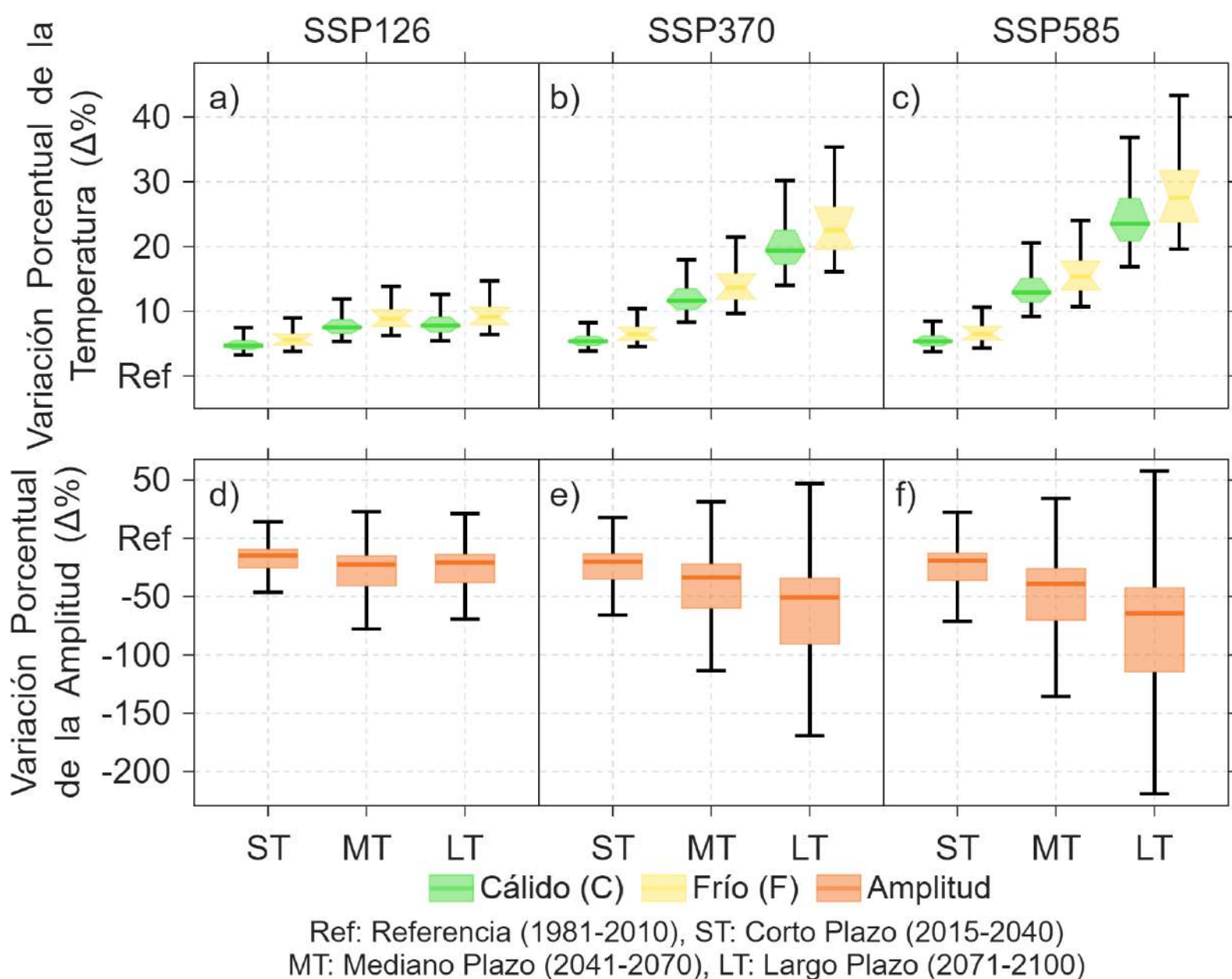
## Variaciones porcentuales de las temporadas cálidas y frías

Los cambios proyectados en la temperatura evidenciaron una variación de la tendencia central de 0.3°C para la temporada fría y 0.27°C para la temporada cálida bajo el escenario de cambio climático SSP126 desde el periodo a corto plazo (ST) hasta finales de siglo (Fig. 4a). En el escenario SSP370, los incrementos fueron de 1.39°C y 1.25°C, y en el escenario SSP585 alcanzaron 1.82°C y 1.62°C para las temporadas fría y cálida, respectivamente (Fig. 4b y 4c). Estos resultados muestran que el aumento de las temperaturas futuras sería más pronunciado durante la temporada fría que en la cálida.

La distribución espacial de la temperatura en el dominio de Cajamarca presentó un rango de

variación promedio respecto a la tendencia central de 2.4 %-4.6 % en la temporada fría y 2 %-4 % en la cálida bajo el escenario SSP126 (Fig. 4a). Para el escenario SSP370, los valores oscilaron entre 4 %-8 % y 3.4 %-6.7 %, mientras que en el SSP585 fueron de 5 %-9.6 %, respectivamente (Fig. 4 b y 4c). Estos resultados indican que la variabilidad espacial de la temperatura será mayor en la temporada fría que en la cálida a lo largo del periodo de análisis.

Respecto a la amplitud térmica estacional, se identificaron reducciones en la tendencia central de -3.0 %, -15.3 % y -22.5 % en los escenarios SSP126, SSP370 y SSP585, respectivamente (Fig. 4 d, e y f). Tales disminuciones apuntan a un debilitamiento progresivo de la amplitud térmica, de modo que hacia finales de siglo las temperaturas de la temporada fría tenderán a asemejarse cada vez más a las de la temporada cálida.



**Figura 4.** Variaciones porcentuales en la temperatura (Δ%) de las temporadas húmeda y seca entre los periodos futuros (ST, MT y LT) con respecto al periodo de referencia (Ref) bajo los tres escenarios futuros SSP126 (a), SSP370 (b) y SSP585 (c) respectivamente. (d, e y f) Similar que a, b y c pero para variaciones porcentuales en la amplitud (Δ%). Cada diagrama de caja representa, los valores extremos límite inferior y superior, el cuartil 25 (Q25), el cuartil 50 (Q50 o mediana o término central) y el cuartil 75 (Q75).

## 4. Discusión

### Desempeño histórico de los modelos BASD-CMIP6-PE

A partir de los cálculos de medias climatológicas mensuales y anuales en el dominio espacial de Cajamarca, se demostró que el conjunto de datos BASD-CMIP6-PE reproduce de manera consistente el clima observado, en términos de precipitación y temperatura para el periodo de referencia 1981–2010, mostrando altas correlaciones y bajos valores de RMSE (Fig. 2). Estos hallazgos confirman que el conjunto de datos BASD-CMIP6-PE constituye una herramienta robusta para el análisis de la variabilidad climática y puede aplicarse no sólo en dominios espaciales a escala regional, sino también en contextos subnacionales, como el caso de Cajamarca, caracterizado por una marcada variabilidad altitudinal.

Asimismo, se evidenció que el promedio multimodelo (ME) reduce los errores en comparación con los modelos individuales, lo que otorga una mayor confiabilidad para el análisis de proyecciones climáticas. Este resultado es consistente con hallazgos previos reportados en otras regiones (Ge et al., 2021; Kurniadi et al., 2022; Zhang et al., 2024; Marengo et al., 2024).

### Cambios futuros de la precipitación y temperatura en Cajamarca

La intensificación simultánea de las temporadas húmedas y cálidas podría alterar de manera significativa el equilibrio entre evaporación y evapotranspiración, debido al aumento proyectado de las temperaturas (Marengo et al., 2024). Este incremento conjunto durante dichas temporadas favorecería la ocurrencia de precipitaciones más intensas en periodos cortos. Considerando este contexto, sería idóneo realizar una validación espacial acompañada de un análisis de tendencias en todo el dominio de estudio, con el objetivo de identificar las regiones con mayor probabilidad de experimentar un incremento en las lluvias y por ende en su productividad agrícola y ecológica.

Por otra parte, el aumento de la temperatura durante la temporada fría a valores cercanos a los de la temporada cálida en la época seca podría intensificar la escasez hídrica del suelo, afectar la vegetación y

reducir la disponibilidad de agua para los cultivos. Esta situación incrementaría también la probabilidad de incendios forestales (Aragão et al., 2018).

Adicionalmente, el aumento simultáneo de la sequedad y la precipitación acumulada bajo condiciones de altas temperaturas contribuiría a la disminución del caudal de ríos y lagos durante la época de estiaje debido a la irregularidad de las lluvias. En conjunto, este escenario configuraría un clima futuro altamente inestable, asociado a riesgos significativos derivados del cambio climático, incluyendo impactos en las personas y comunidades, pérdidas económicas y consecuencias profundas en los ámbitos ambiental, social y económico (IPCC, 2014).

Estos cambios en el clima de Cajamarca podrían ocurrir con mayor impacto bajo escenarios de alta misión, como el SSP370 y el SSP585, particularmente durante los periodos de mediano y largo plazo (Fig. 3 y 4b, 4c, 4e y 4f). En este contexto, desde una perspectiva preventiva, resulta fundamental implementar políticas de adaptación al cambio climático que integren estos escenarios, los cuales proyectan variaciones más severas en la precipitación y la temperatura.

## 5. Conclusiones

El análisis de validación mostró que los modelos BASD-CMIP6-PE reproducen de manera adecuada el ciclo anual, así como el patrón espacial promedio de la precipitación y la temperatura en la región de Cajamarca.

El análisis de las proyecciones climáticas indica una intensificación progresiva de las precipitaciones, caracterizada por un aumento de su magnitud durante las temporadas húmedas y una mayor heterogeneidad espacial de las lluvias durante las temporadas secas. En cuanto a la temperatura, los escenarios futuros evidencian un incremento más pronunciado durante las temporadas frías, lo que conlleva a una reducción de la amplitud térmica, dado que los valores invernales tienden a aproximarse de manera sostenida a los registros característicos de las temporadas cálidas desde el corto plazo hasta finales de siglo. Estos cambios se mantienen en niveles mínimos de intensidad bajo el escenario SSP126; no obstante, a partir del mediano y largo plazo, los escenarios SSP370 y SSP585 proyectan incrementos

significativos en dichas intensidades, lo que evidencia una mayor inestabilidad del clima hacia finales de siglo y un aumento de los riesgos asociados.

En conjunto, estos resultados ofrecen un aporte significativo para la evaluación del impacto del cambio climático en Cajamarca y pueden extrapolarse a otras regiones del Perú con características similares, fortaleciendo la toma de decisiones informadas para el diseño de estrategias de prevención, adaptación y resiliencia relacionadas con los recursos hídricos.

## Referencias

- Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M., Rashid, I., Shahzad, K., Abid, M. A., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M., Sörensson, A., Arias, P., Alves, L., Tippet, M., Saeed, S., Haarsma, R., Doblas, F., Saeed, F., Kucharski, F., Nadeem, I., & Sylla, M. (2021). Assessment of CMIP6 performance and projected temperature and precipitation changes over South America. *Earth Systems and Environment*, 5, 1–20.  
<https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>
- Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., Silva, C. V. J., Silva Junior, C. H. L., Arai, E., Aguiar, A. P., Barlow, J., Berenguer, E., Deeter, M. N., Domingues, L. G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J. A., Miller, J. B., Phillips, O. L. & Saatchi, S. (2018). 21st century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, 9(1), 536.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Arias, P. A., Ortega, G., Villegas, L. D., & Martínez, J. A. (2021). Colombian climatology in CMIP5/CMIP6 models: Persistent biases and improvements. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (100), 75–96.  
<https://doi.org/10.17533/udea.redin.20210525>
- Atalaya-Marin, N., Goñas, M., Tineo, D., Chuquibala-Checan, B., Arce-Inga, M., Tarrillo, E., Alvarez-Robledo, Y. A., Tafur-Culqui, J., Cabrera-Hoyos, H., & Gómez-Fernández, D. (2025). Integrating remote sensing and in-situ data to determine climate diversity and variability in cocoa systems in the provinces of Jaén and San Ignacio, Cajamarca (NW Perú). *Trees, Forests and People*, 19, 100749.  
<https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100749>
- Espinoza, J.-C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P. A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., & Scaff, L. (2020). Hydroclimate of the Andes. Part I: Main climatic features. *Frontiers in Earth Science*, 8, 64.  
<https://doi.org/10.3389/feart.2020.00064>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organisation. *Geoscientific Model Development*, 8, 10539–10583.  
<https://doi.org/10.5194/gmdd-8-10539-2015>
- Fernandez-Palomino, C. A., et al. (2021). Rain for Peru and Ecuador (RAIN4PE) (Version 1.0) [Dataset]. GFZ Data Services.  
<https://doi.org/10.5880/pik.2020.010>
- Fernandez-Palomino, C., Hattermann, F., Krysanova, V., Vega, F., Lavado, W., Santini, W., Gutierrez, R., & Bronstert, A. (2023). Pan-Peruvian simulation of present and projected future hydrological conditions using novel data products and CMIP6 climate projections. *Social Science Research Network*.  
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4602668>
- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., et al. (2024). High-resolution climate projection dataset based on CMIP6 for Peru and Ecuador: BASD-CMIP6-PE. *Scientific Data*, 11(1), 34.  
<https://doi.org/10.1038/s41597-023-02863-z>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1), 150066.  
<https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- GEBCO Compilation Group. (2024). GEBCO 2024 Grid [Data set].  
<https://doi.org/10.5285/1c44ce99-0a0d-5f4f-e063-7086abc0ea0f>
- Ge, F., Zhu, S., Luo, H., Zhi, X., & Wang, H. (2021). Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: Insights from CMIP6 multi-model ensemble. *Environmental Research Letters*, 16(2), 24013.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd7ad>
- Giráldez, L., Silva, Y., Zubieta, R., & Sulca, J. (2020). Change of the rainfall seasonality over Central

Peruvian Andes: Onset, end, duration and its relationship with large-scale atmospheric circulation. *Climate*, 8(2), 23.

<https://doi.org/10.3390/cli8020023>

Gobierno Regional de Cajamarca. (2012). Zonificación ecológica y económica: Base para el ordenamiento territorial del departamento de Cajamarca.

<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/zonificacion-ecologica-economica-base-ordenamiento-territorial>

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Biavati, G., Horányi, A., Muñoz Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Rozum, I., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Dee, D., & Thépaut, J.-N. (2023). ERA5 monthly averaged data on single levels from 1940 to present [Data set]. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).

<https://doi.org/10.24381/cds.f17050d7>

Huerta, A., Aybar, C., & Lavado-Casimiro, W. (2018). PISCO temperatura v1.1 [Dataset]. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

[http://iridl.ldeo.columbia.edu/documentation/.pisco/.PISCOt\\_report.pdf](http://iridl.ldeo.columbia.edu/documentation/.pisco/.PISCOt_report.pdf)

Instituto Nacional de Estadística e Informática - [INEI]. (2024). Compendio estadístico departamental: Cajamarca 2024. Instituto Nacional de Estadística e Informática.

Intergovernmental Panel on Climate Change - [IPCC]. (2014). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Intergovernmental Panel on Climate Change - [IPCC]. (2014). Summary for policymakers. In C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, & L. L. White (Eds.), *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects* (pp. 1–32). Cambridge University Press.

Kurniadi, A., Weller, E., Kim, Y., & Min, S. (2022). Evaluation of coupled model intercomparison project phase 6 model-simulated extreme precipitation over

Indonesia. *International Journal of Climatology*, 43(1), 174–196.

<https://doi.org/10.1002/joc.7744>

Lange, S. (2019). Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 12, 3055–3070.

<https://doi.org/10.5194/gmd-12-3055-2019>

Li, C., Zwiers, F., Zhang, X., Li, G., Sun, Y., & Wehner, M. (2020). Changes in annual extremes of daily temperature and precipitation in CMIP6 models. *Journal of Climate*, 34(1), 1–61.

<https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-1013.1>

Marengo, J., Espinoza, J., Fu, R., Jimenez, J.-C., Alves, L., Rocha, H., & Schöngart, J. (2024). Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. *Acta Amazonica*, 54(spe1), e54es22098.

<https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980>

MathWorks. (2025). griddedInterpolant (MATLAB R2025a). The MathWorks, Inc.

<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/corrcoef.html>

Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., Kc, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42(C), 153–168.

<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>

Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192.

<https://doi.org/10.1029/2000JD900719>

Takahashi, K. (2004). The atmospheric circulation associated with extreme rainfall events in Piura, Peru, during the 1997–1998 and 2002 El Niño events. *Annales Geophysicae*, 22(11), 3917–3926.

<https://doi.org/10.5194/angeo-22-3917-2004>

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M.,

Nakicenovic, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Vera, C., Higgins, W., Amador, J., Ambrizzi, T., Garreaud, R., Gochis, D., Gutzler, D., Lettenmaier, D., Marengo, J., Mechoso, C., Nogues-Paegle, J., Silva Diaz, P. L., & Zhang, C. (2006). Towards a unified view of the American Monsoon System. *Journal of Climate*, 19(20), 4977–5000.  
<https://doi.org/10.1175/JCLI3896.1>

Waliser, D. E., & Gautier, C. (1993). A satellite-derived climatology of the ITCZ. *Journal of Climate*, 6(11), 2162–2174.  
[https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<2162:ASDCOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<2162:ASDCOT>2.0.CO;2)

Zhang, W. Q., Liu, L., Li, X. P., Cheng, L., Cheng, Y. C., & Li, H. (2024). Intensified response of extreme precipitation to rising temperature over the Tibetan Plateau from CMIP6 multi-model ensembles. *Journal of Hydrology*, 637, 131397.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131397>

Zhao, L., Jin, S., Liu, X., Wang, B., Song, Z., Hu, J., & Guo, Y. (2021). Assessment of CMIP6 model performance for wind speed in China. *Frontiers in Climate*, 3, 735988.  
<https://doi.org/10.3389/fclim.2021.735988>