PERÚ | Ministerio del Ambiente

IGP Instituto Geofísico del Perú

BOLETÍN CIENTÍFICO EL NIÑO

Vol. 13 n.° 07 julio 2026

PROGRAMA PRESUPUESTAL n.° 068
"Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres"



En este boletín

- Variabilidad océano–atmósfera asociada a extremos hidroclimáticos compuestos y su impacto en la vegetación e hidrología amazónica | **Pág. 4**
- Caracterización temporal del material particulado ($PM_{2.5}$) durante el período de incremento de actividad del fuego en cusco, 2022 | **Pág. 15**
- Resumen del informe técnico de El Niño | **Pág. 20**
- Resumen de comunicado ENFEN | **Pág. 21**

Créditos

Vladimiro Huaroc Portocarrero
Ministro del Ambiente

Hernando Tavera
Jefe institucional

James Apaéstegui Campos
Director de Ciencias de la Atmósfera, Hidrósfera y Cambio Climático

Lina Godoy Encarnación
Coordinadora de la Unidad Funcional de Comunicaciones

Elisa Armijos Cárdenas
Ken Takahashi Guevara
Vania Ramos Pecho
Editores

Erick Manuel Dávalos Cucchi
Diseño y diagramación

Carátula: Fotografía de parte de la cicatriz de un incendio forestal, tomada en Ccorca, Cusco, Cusco.
Fuente: Katherine Cervantes

El boletín científico "El Niño" es generado en el marco del Programa Presupuestal n.° 068 "Reducción de la vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres"

Producto 1: Estudios para la estimación del riesgo de desastres
Actividad 5: Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño
Instituto Geofísico del Perú

** Los textos referidos a la contribución de cada investigación son aportes del equipo editorial del presente boletín*

Calle Badajoz 169 Mayorazgo, Ate, 15012

Teléfono: +51-1-3172300

Lima, julio de 2026

Puedes acceder a la colección completa de los boletines científicos El Niño escaneando el siguiente código QR.

Introducción

Los eventos El Niño y La Niña corresponden, a grandes rasgos, a situaciones en las que la temperatura de la superficie del mar está por encima o por debajo del promedio en el océano Pacífico ecuatorial. Estas fluctuaciones están fuertemente influenciadas por El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), el cual es uno de los modos de variabilidad climática más importantes en el océano Pacífico que ejerce una gran influencia sobre el clima a nivel global y regional. La fase cálida de ENOS se puede denominar El Niño "global".

En el Perú, los impactos de El Niño y La Niña son particularmente complejos debido a que recibimos influencias tanto costeras, asociadas a las fluctuaciones en el mar peruano en el Pacífico oriental, así como influencias remotas a través de teleconexiones atmosféricas desde el Pacífico central. En particular, El Niño en el Pacífico oriental o Costero puede producir lluvias y altas temperaturas en la costa y alterar el ecosistema marino-costero, mientras que El Niño en el Pacífico central o global puede reducir las precipitaciones e incrementar la temperatura en los Andes y en la Amazonía. Por el contrario, La Niña tendría efectos aproximadamente opuestos. Así, El Niño en el Pacífico oriental es el que causa mayores impactos para el Perú, ya que tiene el potencial de provocar grandes daños a infraestructuras, actividades económicas y, más importante, la seguridad y bienestar de las personas, además de sus medios de vida.

El Perú, como parte de la estrategia de gestión pública para enfrentar los peligros naturales, especialmente respecto a El Niño, establece el Programa Presupuestal por Resultados (PPR) 068 "Reducción de vulnerabilidad y atención de emergencias por desastres". A partir de 2014, el Instituto Geofísico del Perú (IGP), al igual que otras instituciones que conforman la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno El Niño (ENFEN), participa en este PPR con el producto denominado "Estudios para la estimación del riesgo de desastres". Este consiste en la entrega en forma oportuna de información científica sobre el monitoreo y pronóstico de este evento natural oceánico-atmosférico, mediante informes técnicos mensuales, que permita la toma de decisiones de las autoridades a nivel nacional y regional.

A este producto, el IGP contribuye con la actividad "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño", la cual incluye la síntesis y evaluación de los modelos de pronóstico de El Niño generados internacionalmente, como es el caso de los modelos climáticos globales, así como de aquellos obtenidos a partir de modelos propios como el de predicción de ondas oceánicas ecuatoriales, el modelo de inteligencia artificial y el recientemente desarrollado modelo de Sistema Tierra regional de pronóstico para el territorio peruano y el océano Pacífico (IGP RESM-COW v1). Asimismo, incluye el desarrollo de investigaciones y estudios científicos que permiten entender la variabilidad climática y los procesos asociados al cambio climático, a fin de fortalecer, en forma continua, las capacidades para el pronóstico de El Niño.

En esta línea, el IGP ha estructurado y desarrollado el Boletín Científico El Niño, un producto que contiene, en gran medida, los aportes científicos en el estudio y vigilancia del ENOS, con énfasis en El Niño. El Boletín, que se publica mensualmente desde 2014, cuenta con aportes nacionales e internacionales en diversos temas asociados a El Niño, sus impactos, procesos vinculados, temas asociados y otros igual de relevantes, que se presentan en las secciones de "Divulgación Científica" y "Avances Científicos". De igual forma, se comparte en el Boletín una versión resumida del informe técnico que el IGP elabora mensualmente para cumplir con los compromisos asumidos en el marco del PPR 068 (https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/5356). Dicho informe contiene información actualizada operativamente que el IGP proporciona como insumo para que el ENFEN genere en forma colegiada la evaluación final que será entregada a los usuarios. Finalmente, el Boletín presenta los comunicados ENFEN publicados durante el periodo correspondiente.

El IGP busca consolidar al Boletín Científico El Niño como una publicación técnica-científica de referencia, tanto para la comunidad científica y académica, así como para instituciones y autoridades vinculadas a la gestión del riesgo de desastres ávidas de conocimientos e información actualizada sobre El Niño, sus impactos y procesos asociados. Puede consultar la colección completa de Boletines Científicos El Niño en este enlace: https://repositorio.igp.gob.pe/handle/20.500.12816/4974

VARIABILIDAD OCÉANO–ATMÓSFERA ASOCIADA A EXTREMOS HIDROCLIMÁTICOS COMPUESTOS Y SU IMPACTO EN LA VEGETACIÓN E HIDROLOGÍA AMAZÓNICA

Botetano G.[1,4*], Espinoza J.C.[2,3], Takahashi K.[4], Gutierrez Villarreal R.[4], Marengo J.[5,6,7], Wongchuig S.[8]

[1] Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú.
[2] Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS, Grenoble INP, Institut des Géosciences de l'Environnement, France.
[3] Instituto de Investigación sobre la Enseñanza de las Matemáticas, PUCP, Peru.
[4] Instituto Geofísico del Perú, Peru.
[5] National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters/CEMADEN, São José dos Campos, Brazil.
[6] Graduate Program in Natural Disasters, UNESP/CEMADEN, São José dos Campos, Brazil.
[7] Graduate School of International Studies. Korea University, Seoul, South Korea.
[8] Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS), Université de Toulouse, CNES/CNRS/IRD/UT3, Toulouse, 31000, France.



Gianella Botetano es estudiante de doctorado en Coastal and Marine System Science e investigadora doctoral en ciencias atmosféricas en Texas A&M University–Corpus Christi (EE. UU.). Es bachiller en Meteorología por la Universidad Nacional Agraria La Molina y becaria de investigación de Conservación Amazónica–ACCA. Desarrolló su tesis en el marco del proyecto AMAZCLIM del Instituto Geofísico del Perú (IGP), en colaboración con el Institut de Recherche pour le Développement (IRD, Francia), donde estudió la variabilidad océano-atmósfera asociada a extremos compuestos en la Amazonía. Sus intereses de investigación se centran en física atmosférica, procesos convectivos multiescala y variabilidad hidroclimática en la región andino-amazónica.

Palabras clave: Extremos compuestos; Variabilidad hidroclimática; Forzantes océano–atmósfera; Vegetación amazónica; Cuenca Amazónica.

Citar como: Botetano, G., Espinoza, J. C., Takahashi, K., Gutierrez Villarreal, R. A., Marengo, J., & Wongchuig, S. (2026). Variabilidad océano-atmósfera asociada a extremos hidroclimáticos compuestos y su impacto en la vegetación e hidrología amazónica. Boletín Científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 13 n.°07, págs. 4-14.

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

Este artículo nos muestra que a través de un índice que integra la precipitación, temperatura y niveles de río, se puede comprender mejor la evolución de eventos extremos. Nos muestra que se debe relacionar señales climáticas de gran escala: El Niño–Oscilación del Sur durante la estación húmeda y el calentamiento del Caribe–Atlántico Norte Tropical durante la estación seca, para de este modo poder fortalecer los sistemas de alerta temprana y orientar decisiones sobre gestión hídrica, prevención de incendios, conservación de bosques y reducción del riesgo frente a sequías e inundaciones en la Amazonía con menor incerteza.

Resumen

Durante las últimas décadas, la Amazonía ha experimentado una marcada intensificación de inundaciones y sequías. La sequía récord de 2023–2024, excepcionalmente cálida y seca, motivó el análisis de los eventos hidroclimáticos compuestos, sus forzantes océano–atmósfera y su impacto sobre la vegetación amazónica durante 1982–2024. La variabilidad interanual dominante de la precipitación, la temperatura, los niveles de río y el almacenamiento terrestre de agua está representada por un modo coherente de variabilidad

hidroclimática compuesta, dominado por eventos extremos. Para caracterizarlo se desarrolló el Índice de Extremos Hidroclimáticos Compuestos de la Cuenca Amazónica (AB-CHEX), construido a partir de la precipitación, la temperatura y los niveles de río. El AB-CHEX identifica dos estados predominantes, seco–cálido y húmedo–frío. Asimismo, muestra una evolución de largo plazo contrastante entre las estaciones: hacia condiciones más húmedas–frías en la temporada húmeda (noviembre–abril) y progresivamente más secas–cálidas en la temporada seca (junio–septiembre). El 67.8 % de la cuenca durante la temporada húmeda y el 75.8 % durante la temporada seca presentan una variabilidad dominada por condiciones compuestas. Esta variabilidad está controlada principalmente por la temperatura superficial del mar (TSM) del Pacífico ecuatorial asociada a El Niño–Oscilación del Sur durante la temporada húmeda; mientras que, durante la temporada seca, predomina el control regional de la TSM del Caribe–Atlántico Norte Tropical. Bajo condiciones secas–cálidas, la respuesta de la vegetación contrasta entre temporadas: durante la temporada húmeda, la evapotranspiración y la transpiración aumentan en el noroeste amazónico bajo un régimen limitado por energía, mientras que durante la temporada seca, disminuyen la evapotranspiración, la productividad fotosintética y el vigor del dosel sobre el sur y sureste amazónico bajo un régimen limitado por agua.

El artículo científico original se encuentra en: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00382-026-08382-y.pdf

1. Introducción

La cuenca amazónica, el sistema hidrológico más extenso del planeta, desempeña un papel clave en la regulación del clima global. En las últimas décadas, la frecuencia e intensidad de los extremos hidroclimáticos han aumentado, amenazando la integridad de los bosques y la estabilidad ecológica de la región (Marengo y Espinoza, 2016; Ferreira et al., 2025).

Estos extremos no ocurren de forma aislada. La ocurrencia simultánea de anomalías en múltiples variables a escala de cuenca, como condiciones secas-cálidas o húmedas-frías, define los extremos hidroclimáticos compuestos, cuyos impactos sobre los ecosistemas, los recursos hídricos y los sistemas socioeconómicos superan a los de los eventos individuales (Arias et al., 2025; Marengo et al., 2026). La sequía de 2023–2024, una de las más intensas en más de un siglo, y las recientes inundaciones extremas evidencian la intensificación de esta variabilidad y sus repercusiones a escala regional (Barichivich et al., 2018; Espinoza et al., 2024; Miranda et al., 2026).

Estos extremos se han asociado principalmente con El Niño–Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés) y el Atlántico Norte Tropical (TNA, por sus siglas en inglés), que modulan la precipitación y el transporte de humedad sobre la Amazonía (Marengo y Espinoza, 2016). Sin embargo, la magnitud de extremos recientes sugiere que la variabilidad de la TSM ya no explica por sí sola esta intensificación (Espinoza et al., 2024; Marengo et al., 2026). Además, variables como la precipitación, la temperatura y el nivel de los ríos no necesariamente responden a los mismos forzantes, y aún se comprende poco cómo estos se combinan para generar eventos compuestos y cómo dicha interacción difiere entre temporadas. En este contexto, este artículo resume los resultados del estudio de Botetano et al. (2026), el cual analiza la variabilidad océano–atmósfera asociada a los extremos hidroclimáticos compuestos y su impacto en la vegetación e hidrología amazónica durante 1982–2024.

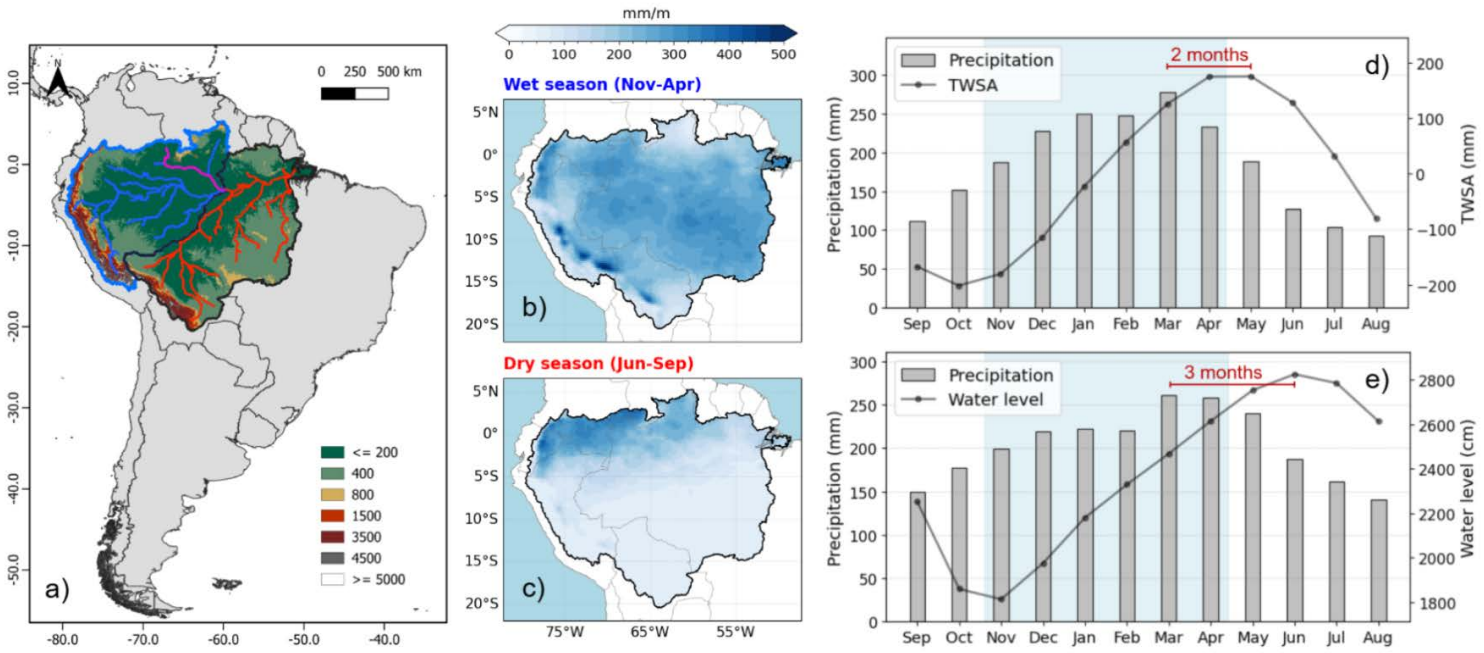


Figura 1. (a) Cuenca amazónica y subcuenca de Manaos (contorno azul), con la elevación (m s.n.m.) y los principales ríos; el río Negro se resalta en magenta y los ríos fuera de la subcuenca, en gris. (b, c) Climatología estacional de la precipitación (mm mes^{-1}) durante las temporadas húmeda y seca, respectivamente, 1981–2024. (d) Ciclo anual de la precipitación media de la cuenca (barras) y TWSA (línea gris). (e) Ciclo anual de la precipitación (barras) y WL del río Negro en Manaos (línea gris). El sombreado celeste indica la temporada húmeda.

2. Metodología

2.1. Caracterización de la variabilidad hidroclimática

Dada la marcada estacionalidad de la cuenca (Figura 1b, c), se definieron las temporadas extendidas húmeda (noviembre–abril) y seca (junio–septiembre) para caracterizar los extremos hidroclimáticos. El nivel del río Negro en Manaos (WL) se utilizó como indicador de la variabilidad hidrológica integrada de aproximadamente 3 millones de km² de la cuenca aguas arriba. Las anomalías del almacenamiento terrestre de agua (TWSA) y el WL presentaron desfases respecto a la precipitación de 2 y 3 meses, respectivamente (Figura 1d, e). Estos desfases reflejan la respuesta retardada del sistema hidrológico, asociada al almacenamiento temporal de agua en los suelos y las planicies de inundación. Por ello, ambas series hidrológicas fueron desplazadas temporalmente antes de calcular los promedios estacionales.

La variabilidad hidroclimática se caracterizó mediante el análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF, también conocido como análisis de componentes principales), aplicadas a los campos estacionales de la precipitación, la temperatura del aire y la TWSA. Únicamente se retuvieron la primera función (EOF1) y su componente principal (PC1), que representan el patrón dominante de variabilidad espacial y temporal a escala de cuenca.

2.2. Índice de Extremos Hidroclimáticos Compuestos de la Cuenca Amazónica (AB-CHEX)

Se desarrolló el Índice de Extremos Hidroclimáticos Compuestos de la Cuenca Amazónica (AB-CHEX) para representar la variabilidad hidroclimática interanual. Para ello, el índice se definió como la media aritmética de la PC1 de precipitación, la PC1 de temperatura (con signo invertido) y el nivel del río en Manaos estandarizado, utilizando todos los componentes sin tendencia. La PC1 de TWSA no se incluyó en la construcción del AB-CHEX, pero se utilizó para validar su representatividad hidrológica. Las fases negativas (≤ P15) y positivas (≥ P85) del AB-CHEX definieron eventos secos–cálidos y húmedos–fríos, respectivamente, que se compararon con registros históricos documentados (Espinoza et al., 2024; Marengo et al., 2024a).

La respuesta espacial asociada al AB-CHEX se evaluó mediante regresiones lineales con anomalías estacionales de la precipitación, la temperatura y la TWSA. Adicionalmente, se construyó el AB-CHEXLT (Índice de Extremos Hidroclimáticos Compuestos de Largo Plazo de la Cuenca Amazónica), una versión del AB-CHEX que conserva las tendencias de sus componentes, con el objetivo de cuantificar la contribución relativa de la variabilidad interanual y de largo plazo.

2.3. Condiciones océano–atmósfera de gran escala

Se realizaron composiciones de las anomalías estacionales de la circulación atmosférica y de la TSM durante las fases secas–cálidas y húmedas–frías del AB-CHEX, con el objetivo de identificar los patrones océano–atmósfera asociados a los extremos compuestos. La circulación regional de Hadley y la circulación tipo Walker, asociadas a los componentes meridional y zonal de la circulación atmosférica, respectivamente, se caracterizaron mediante secciones latitud–presión y longitud–presión. La significancia estadística de las composiciones se evaluó mediante la prueba t de Welch ($p < 0.05$). Para caracterizar los principales forzantes, se construyeron índices regionales de Hadley (ωH), Walker (ωW) y TSM para las temporadas húmeda y seca durante el periodo 1982–2024. Los índices de circulación se estimaron mediante el marco de circulación de vuelco local propuesto por Schwendike et al. (2014), mientras que los índices de TSM se calcularon para las regiones Niño-3.4 y Caribe–Atlántico Norte Tropical (Caribe–TNA). Finalmente, las relaciones entre estos índices y el AB-CHEX se evaluaron mediante correlaciones de Pearson a partir de series sin tendencia. También se calcularon correlaciones parciales para separar las contribuciones de la TSM del Pacífico y del Caribe–TNA al AB-CHEX, controlando la variabilidad compartida entre ambas regiones oceánicas.

2.4. Respuesta vegetativa a forzantes hidroclimáticos

La respuesta de la vegetación a los eventos compuestos se evaluó mediante anomalías estandarizadas de la evapotranspiración real (ET), la transpiración, la productividad primaria bruta (GPP) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Mediante correlaciones desfasadas se identificaron desfases de 0 meses en la temporada húmeda y 1 mes en la temporada seca entre la precipitación y la respuesta vegetativa. Estos desfases se aplicaron para construir las composiciones de anomalías durante los eventos secos–cálidos identificados por el AB-CHEX. La significancia estadística de las composiciones se evaluó mediante la prueba t de Welch ($p < 0.05$).

3. Resultados y discusión

3.1. Variabilidad hidroclimática compuesta de la cuenca amazónica durante las últimas cuatro décadas (1982–2024)

Durante las últimas cuatro décadas, la cuenca amazónica ha experimentado una intensificación de las inundaciones y sequías, reflejada en el modo dominante de variabilidad interanual de la precipitación, la temperatura, el WL y la TWSA. La precipitación mostró heterogeneidad espacial, con condiciones más húmedas en el norte durante la temporada húmeda y déficits persistentes en el centro-sur durante la temporada seca, mientras que la temperatura presentó un calentamiento generalizado en ambas temporadas. A pesar de sus diferentes procesos y tiempos de respuesta, los componentes atmosféricos e hidrológicos mostraron una fuerte covariabilidad ($p < 0.01$; Figura 2a,b), evidenciando un modo hidroclimático coherente a escala de cuenca y motivando la construcción del AB-CHEX. Sus eventos húmedos-fríos y secos-cálidos se definieron por encima del percentil 85 y por debajo del percentil 15, respectivamente (Figura 2c,d). El AB-CHEX mostró una alta correlación con la TWSA durante 2003–2024 ($r = 0.93$ en la temporada húmeda; $r = 0.88$ en la temporada seca; Figura 2e,f), a pesar de que esta variable no forma parte de su construcción, lo que respalda su representatividad hidrológica. El índice reproduce los principales eventos históricos de inundación y sequía, y el 2024 destaca como el evento seco-cálido de mayor magnitud en ambas temporadas, incluso después de eliminar las tendencias de largo plazo.

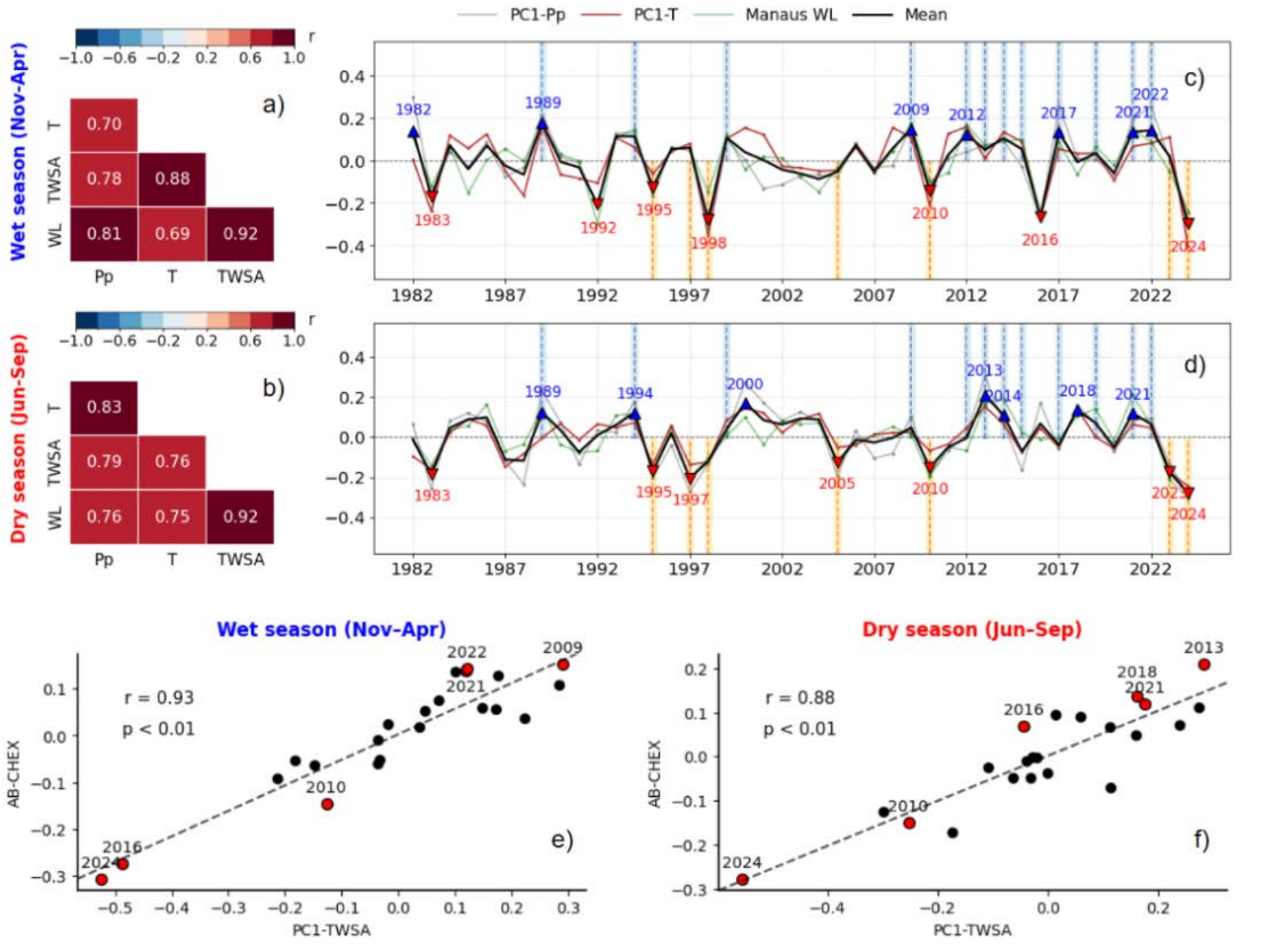


Figura 2. Construcción y validación del Índice de Extremos Hidroclimáticos Compuestos de la Cuenca Amazónica (AB-CHEX) (1982–2024) para las temporadas húmeda y seca. (a, b) Matrices de correlación de Pearson entre PC1 de la precipitación (PC1-Pp), la temperatura (PC1-T), TWSA (PC1-TWSA) y el WL de Manaos (todos $p < 0.01$). (c, d) Series temporales de PC1-Pp, PC1-T, WL y AB-CHEX. Los eventos secos-cálidos (≤ P15) y húmedos-fríos (≥ P85) se muestran en rojo y azul, respectivamente; las franjas verticales indican las principales sequías e inundaciones registradas en Manaos (Espinoza et al., 2024). (e, f) Relación entre AB-CHEX y PC1-TWSA para el período común 2003–2024.

Las regresiones espaciales mostraron que el estado compuesto se extiende sobre el 67.8 % de la cuenca durante la temporada húmeda y el 75.8 % durante la temporada seca (Figura 3). Su expresión fue más intensa en el norte-noreste amazónico durante la temporada húmeda, mientras que durante la temporada seca se desplazó hacia el centro-este, donde los eventos secos–cálidos presentaron déficits de precipitación de 5–20 %, aumentos de temperatura de 0.3–0.6 °C y reducciones de TWSA de 100–300 mm.

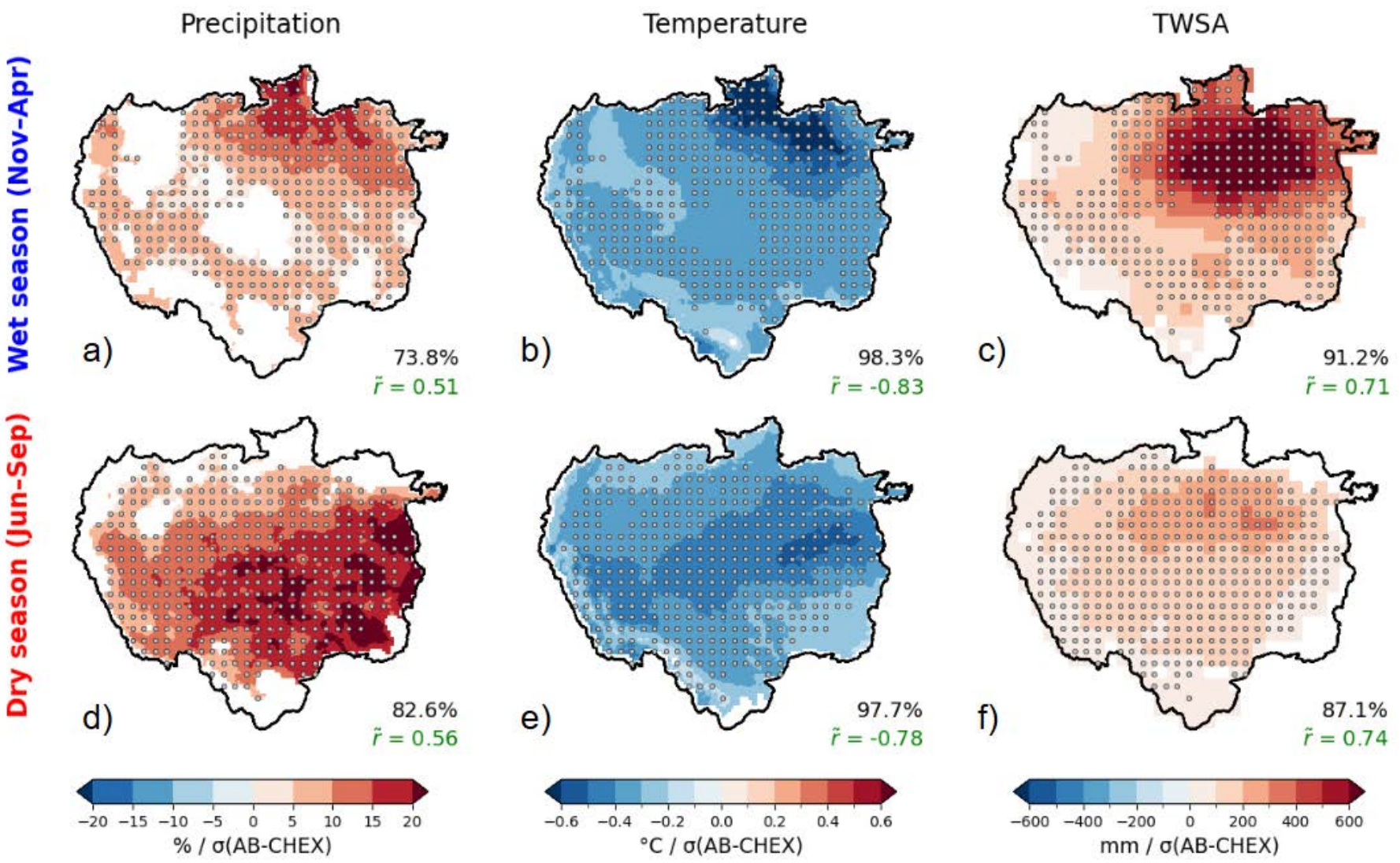


Figura 3. Patrones espaciales de regresión de: (a, d) la precipitación (%), (b, e) la temperatura del aire (°C) y (c, f) TWSA (mm) respecto a AB-CHEX estandarizado durante las temporadas húmeda (a–c) y seca (d–f), 1982–2024. Los colores representan la anomalía asociada a una desviación estándar de AB-CHEX. El punteado indica correlaciones de Pearson significativas ($p < 0.05$). En cada panel se muestran el porcentaje del área significativa y la correlación mediana (r).

El AB-CHEXLT, que conserva la tendencia, mostró una evolución contrastante entre temporadas (Figura 4a,b). Durante la temporada húmeda, se observó un ligero desplazamiento hacia condiciones más húmedas–frías; sin embargo, la tendencia explica solo el 0.9 % de la varianza total, por lo que la variabilidad interanual continúa siendo dominante (99.1 %). Durante la temporada seca, se observó una transición sostenida hacia condiciones cada vez más secas–cálidas desde mediados de los 2000, periodo en el que la tendencia explica el 24 % de la varianza total y está dominada en un 87 % por el aumento de la temperatura (Marengo et al., 2024a).

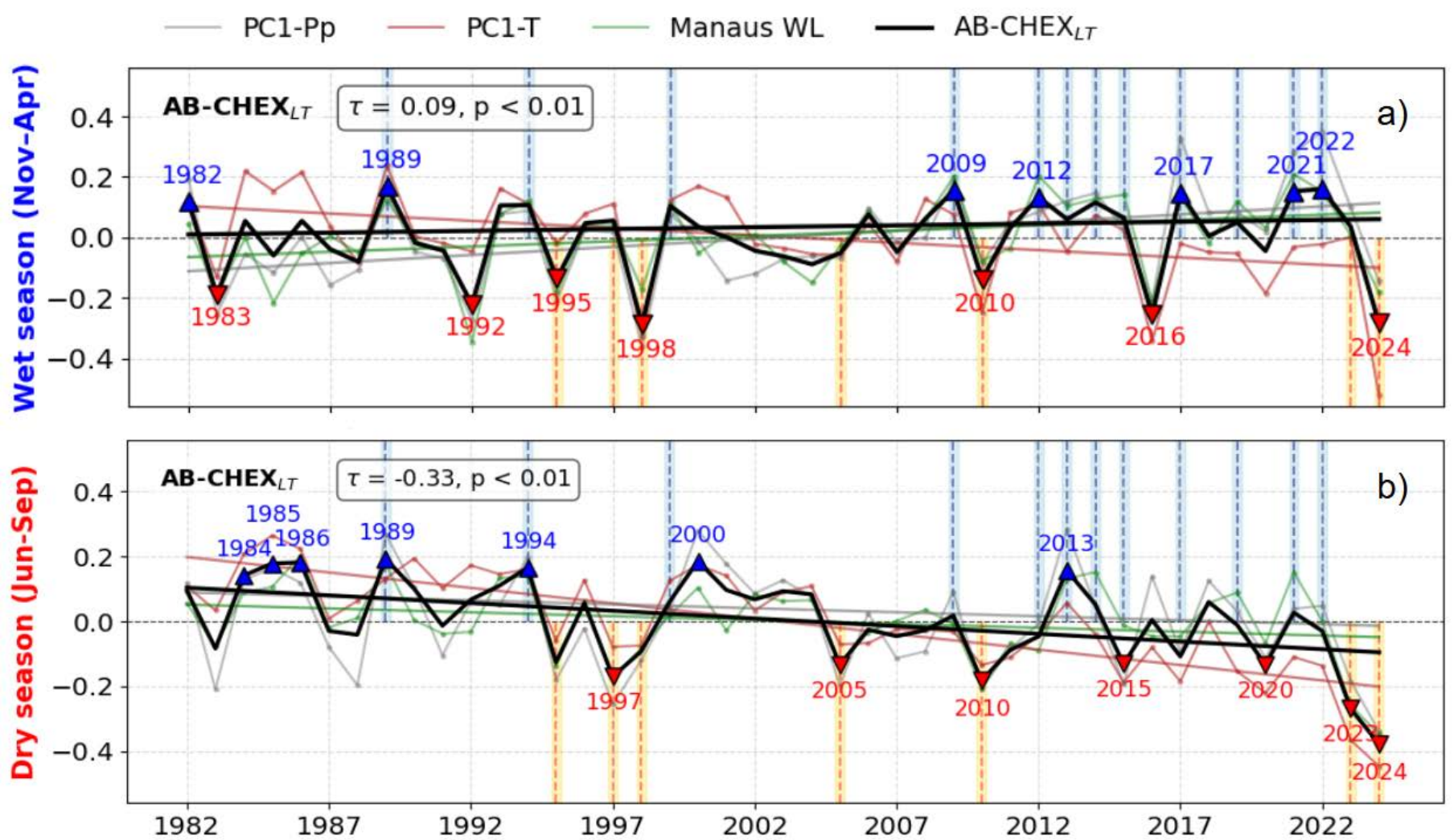


Figura 4. AB-CHEXLT (1982–2024) para la temporada (a) húmeda y (b) seca. Línea negra: AB-CHEXLT (media de PC1-Pp, PC1-T invertida y WL estandarizado); líneas gris, roja y verde: PC1-Pp, PC1-T y WL. Tendencias significativas (Mann–Kendall, $p < 0.01$) con τ de Kendall. Triángulos rojos/azules: eventos secos-cálidos (≤ P15) y húmedos-fríos (≥ P85). Franjas amarillas/azules: sequías e inundaciones en Manaos (Espinoza et al., 2024).

3.2. Condiciones océano–atmósfera de gran escala asociadas a eventos extremos compuestos

Las Figuras 5 y 6 muestran las composiciones de anomalías significativas ($p < 0.05$) de la circulación atmosférica y de la TSM asociadas a los extremos compuestos. Durante la temporada húmeda, los eventos secos–cálidos presentaron subsidencia entre 300 y 600 hPa sobre la Amazonía, debilitamiento de la circulación de Walker y anomalías cálidas de TSM en el Pacífico ecuatorial, consistentes con El Niño (Figura 5a–c). Los eventos húmedos–fríos mostraron el patrón opuesto, con ascenso, fortalecimiento de la circulación de Walker y enfriamiento del Pacífico, consistentes con La Niña (Figura 5d–f). Estas anomalías reflejan una respuesta atmosférica de gran escala que modula la convección y el transporte de humedad hacia la cuenca (Barichivich et al., 2018; Espinoza et al., 2024). Durante la temporada seca, en cambio, la respuesta fue predominantemente regional: los eventos secos–cálidos presentaron subsidencia sobre la Amazonía central y anomalías cálidas de TSM sobre el Caribe–TNA (Figura 6a–c), cuyo calentamiento debilita el gradiente meridional de presión y los alisios, reduciendo el transporte de humedad desde el Atlántico hacia la Amazonía (Builes-Jaramillo et al., 2018; Marengo et al., 2024b). Los eventos húmedos–fríos mostraron el patrón opuesto, con ascenso y anomalías frías sobre el Caribe–TNA (Figura 6d–f).

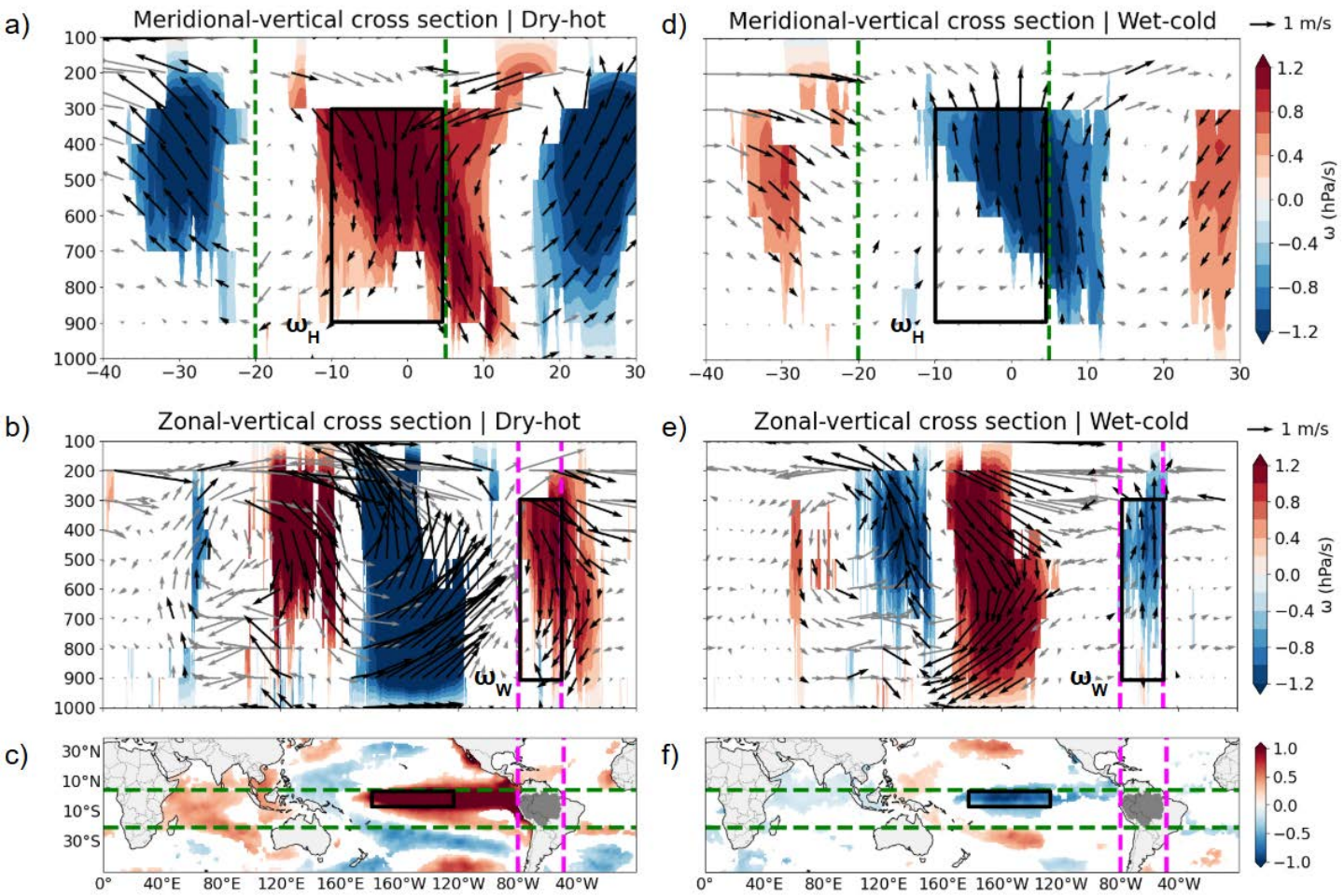


Figura 5. Composiciones de la temporada húmeda para eventos secos–cálidos (a–c) y húmedos–fríos (d–f) del AB-CHEX (1982–2024). (a, d) Secciones meridionales (79°–50°O) de anomalías de viento (vectores; negro: $p < 0.05$) y ω (sombreado); rectángulos: región de ωH (10°S–5°N; 900–300 hPa). (b, e) Secciones zonales (20°S–5°N); rectángulos: región de ωW (79°–50°O; 900–300 hPa). (c, f) Anomalías de TSM sin tendencia ($p < 0.05$); rectángulos: región Niño-3.4. Líneas discontinuas magenta y verde: extensión de la cuenca amazónica. Secos–cálidos: 1983, 1992, 1995, 1998, 2010, 2016, 2024; húmedos–fríos: 1982, 1989, 2009, 2012, 2017, 2021, 2022.

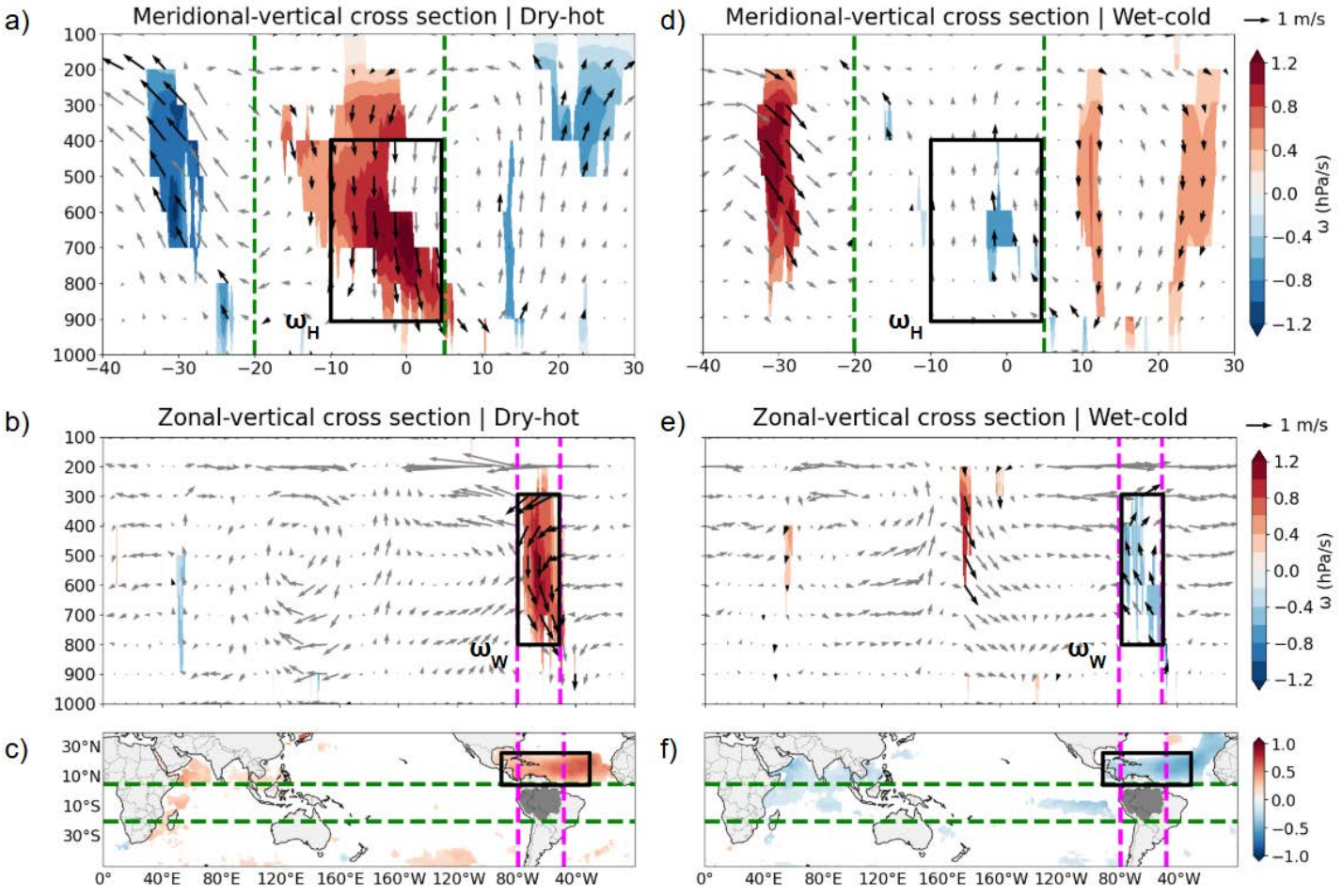


Figura 6. Composiciones de la temporada seca para eventos secos–cálidos (a–c) y húmedos–fríos (d–f) del AB-CHEX (1982–2024). (a, d) Secciones meridionales (79°–50°O) de anomalías de viento (vectores; negro: $p < 0.05$) y ω (sombreado); rectángulos: región de ωH (10°S–5°N; 900–400 hPa). (b, e) Secciones zonales (20°S–5°N); rectángulos: región de ωW (79°–50°O; 800–300 hPa). (c, f) Anomalías de TSM sin tendencia ($p < 0.05$); rectángulos: región Caribe–TNA. Líneas discontinuas magenta y verde: extensión de la cuenca amazónica. Secos–cálidos: 1983, 1995, 1997, 2005, 2010, 2023, 2024; húmedos–fríos: 1989, 1994, 2000, 2013, 2014, 2018, 2021.

Las Figuras 7 y 8 muestran la evolución temporal de los índices de circulación de Hadley (ωH), Walker (ωW) y TSM. Durante la temporada húmeda, ωH, ωW y la TSM del Pacífico estuvieron fuertemente asociados con el AB-CHEX (r = 0.85, 0.83 y 0.78; p < 0.01), explicando ~72 %, ~69 % y ~61 % de su variabilidad, respectivamente. Estas asociaciones muestran el predominio de ENSO en esta temporada a través de las circulaciones de Hadley y Walker. Durante la temporada seca, en cambio, ωH y la TSM del Caribe–TNA mostraron las asociaciones más fuertes con el AB-CHEX (r = 0.79; p < 0.01; Figura 8a,c), explicando ~62 % de su variabilidad, mientras que ωW presentó una asociación más débil (r = 0.48; p < 0.01; Figura 8b). En la temporada seca, el Caribe–TNA predomina como forzante oceánico y su señal está vinculada principalmente a la circulación regional de Hadley. Asimismo, el fortalecimiento de la subsidencia regional y la intensificación del calentamiento del Caribe–TNA desde inicios de los 2000 son consistentes con el desplazamiento progresivo del AB-CHEXLT hacia condiciones secas–cálidas.

Pese a este contraste estacional, ambos océanos pueden actuar conjuntamente. Durante la temporada húmeda, la relación del Pacífico con el AB-CHEX se mantiene robusta al remover la varianza compartida con el Caribe–TNA (r = 0.62; p < 0.01), mientras que este último conserva una contribución independiente menor pero significativa (r = 0.28; p < 0.05). Cuando ambos océanos coinciden en fase, los extremos se intensifican: los eventos secos–cálidos más severos ocurrieron bajo El Niño y un Caribe–TNA cálido (1983, 1998, 2010, 2016 y 2024), mientras que los húmedos–fríos fueron más frecuentes bajo La Niña y un Caribe–TNA frío (Builes-Jaramillo et al., 2018; Jiménez et al., 2021). Durante la temporada seca, la contribución independiente del Pacífico no es significativa y las fases concurrentes Pacífico–Atlántico son menos frecuentes; aun así, los eventos secos–cálidos más severos de 1983, 1997 y 2023 coincidieron con El Niño y un Caribe–TNA cálido. ENSO también puede influir entre temporadas: un El Niño intenso puede favorecer meses después el calentamiento del Caribe–TNA mediante teleconexiones retardadas, aun después de debilitarse las anomalías del Pacífico (Enfield & Mayer, 1997; Alexander et al., 2002). Si dicho evento El Niño deja déficits de humedad en la cuenca, el Caribe–TNA cálido puede reforzar posteriormente las condiciones secas–cálidas al actuar sobre un sistema ya precondicionado.

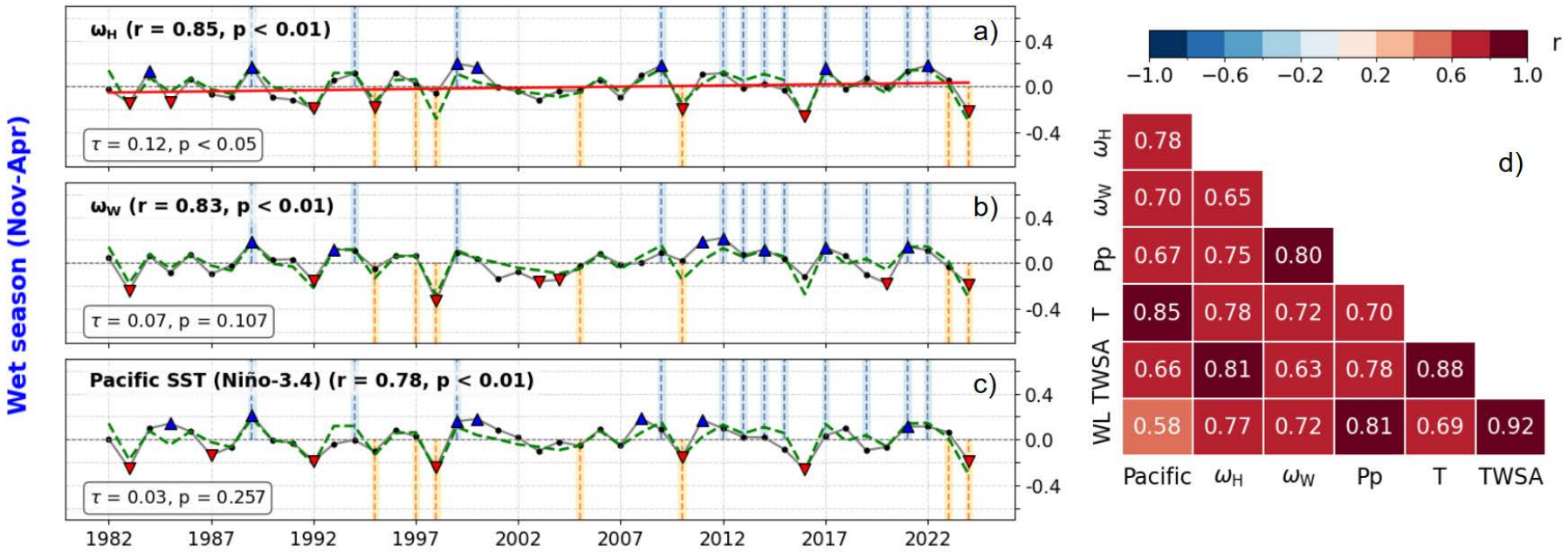


Figura 7. Variabilidad oceánica y atmosférica durante la temporada húmeda (1982–2024). (a–c) Índices estandarizados a la varianza del AB-CHEX: (a) Hadley regional (ωH), (b) Walker zonal (ωW) y (c) TSM Niño-3.4 (signo invertido). Líneas rojas: tendencias significativas (p < 0.05) con τ de Kendall y pendiente de Sen; línea verde: AB-CHEX; rojo/azul: eventos secos–cálidos (≤ P15) y húmedos–fríos (≥ P85); franjas amarillas/azules: sequías e inundaciones en Manaos (Espinoza et al., 2024). (d) Correlaciones de Pearson (p < 0.01) entre PC1-Pp, PC1-T, PC1-TWSA, TSM Niño-3.4, ωH, ωW y WL.

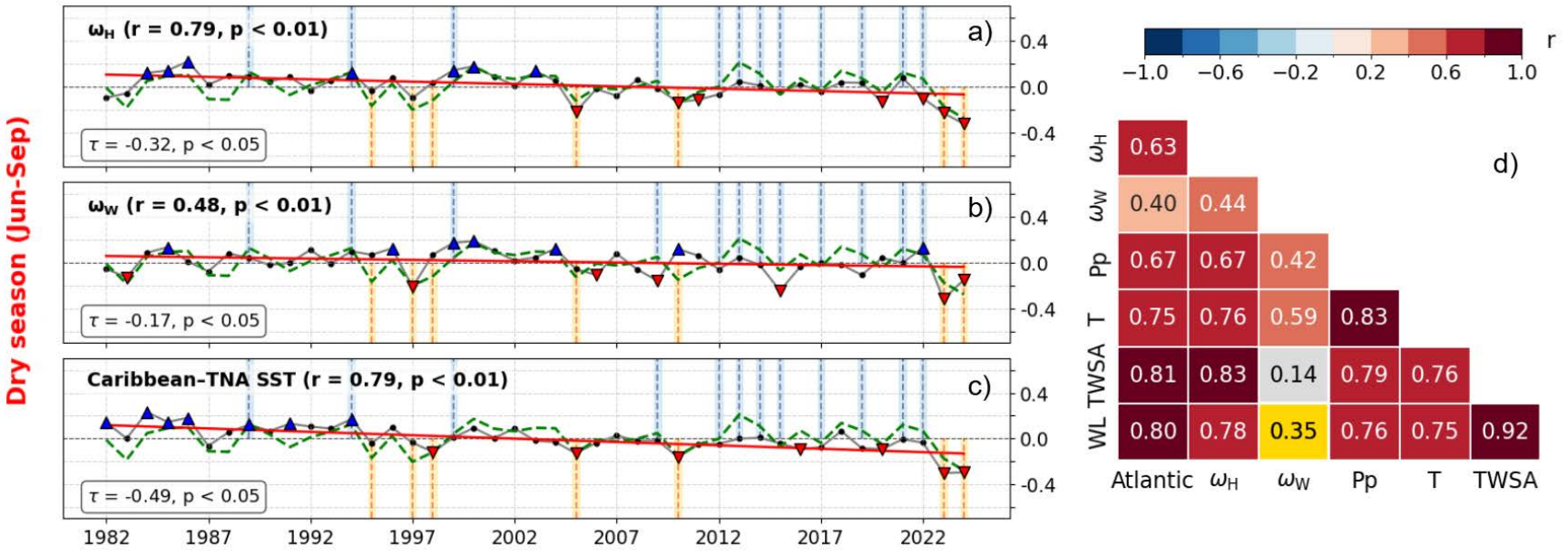


Figura 8. Variabilidad oceánica y atmosférica durante la temporada seca (1982–2024). (a–c) Índices estandarizados a la varianza del AB-CHEX: (a) Hadley regional (ωH), (b) Walker zonal (ωW) y (c) TSM Caribe–TNA (signo invertido). Líneas rojas: tendencias significativas ($p < 0.05$) con τ de Kendall y pendiente de Sen; línea verde: AB-CHEX; rojo/azul: eventos secos–cálidos (≤ P15) y húmedos–fríos (≥ P85); franjas amarillas/azules: sequías e inundaciones en Manaos (Espinoza et al., 2024). (d) Correlaciones de Pearson entre PC1-Pp, PC1-T, PC1-TWSA, TSM Caribe–TNA, ωH, ωW y WL. Significancia: $p < 0.01$ y $p < 0.05$ en colores; correlaciones no significativas en gris.

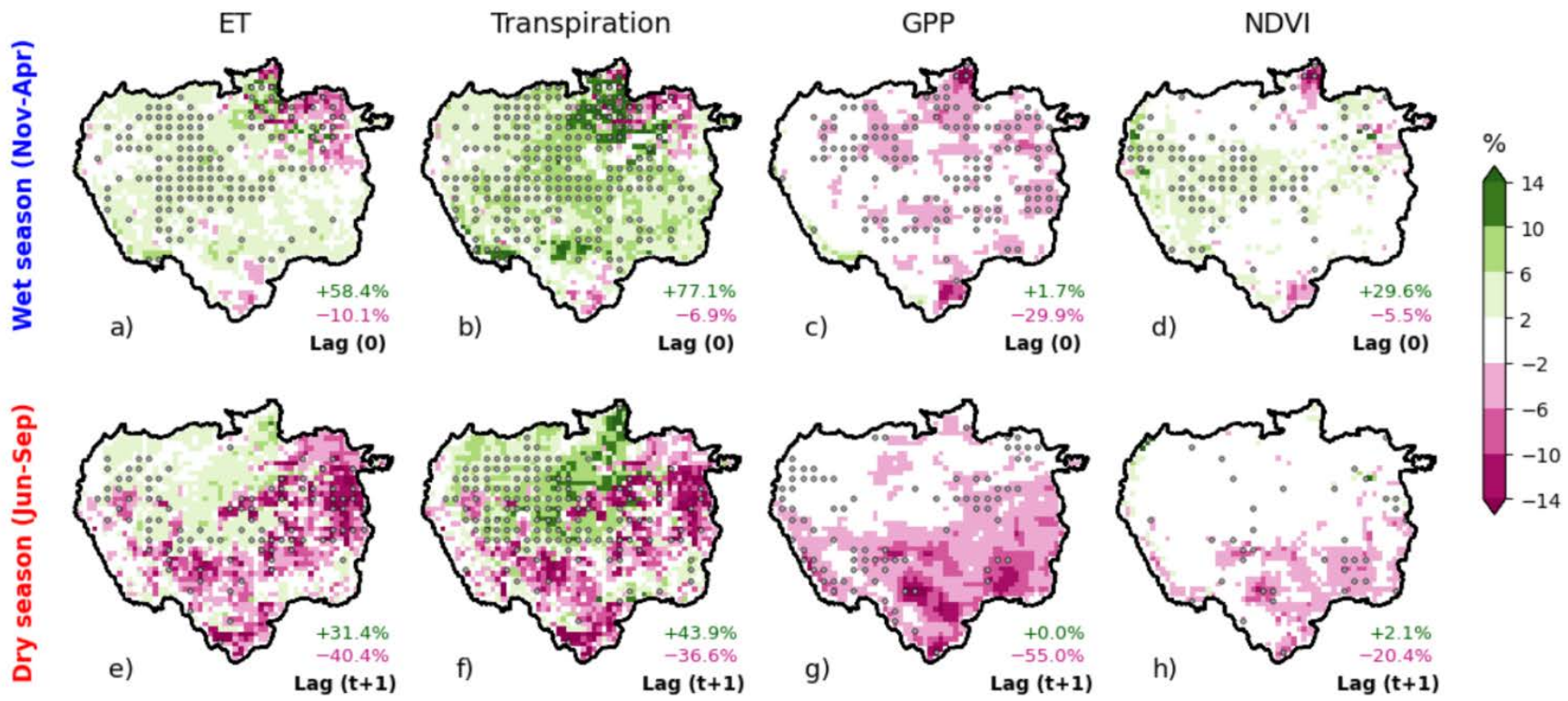


Figura 9. Composiciones de anomalías (%) de ET, transpiración, GPP y NDVI durante eventos secos–cálidos identificados mediante el AB-CHEX: (a–d) temporada húmeda y (e–h) temporada seca. Los puntos grises indican anomalías significativas ($p < 0.05$; prueba t de Welch). Eventos secos–cálidos durante la temporada húmeda: 1983, 1992, 1995, 1998, 2010, 2016 y 2024; durante la temporada seca: 1983, 1995, 1997, 2005, 2010, 2023 y 2024.

3.3. Respuesta de la vegetación a los extremos hidroclimáticos compuestos

Las composiciones de anomalías durante los eventos secos–cálidos mostraron un marcado contraste en la respuesta de la vegetación entre temporadas (Figura 9). Durante la temporada húmeda (Figura 9a–d), la ET y la transpiración aumentaron entre 2 y 10 % en más del 50 % de la cuenca, principalmente en el norte-centro, mientras que la GPP disminuyó en el 29.9 % del área y el NDVI aumentó en el 29.6 %. Este desacople sugiere un régimen limitado por energía, en el que el incremento de la radiación favorece los flujos evaporativos y el recambio foliar, pero no la productividad fotosintética (Baker et al., 2021). Durante la temporada seca (Figura 9e–h), la ET y la transpiración disminuyeron en el centro y sur-sureste, mientras que en el norte no mostraron reducciones, debido a la mayor resiliencia hidráulica de los bosques (Chen et al., 2024). La GPP mostró la respuesta más severa, con reducciones superiores al 14 % en el 55 % de la Amazonía, seguida por el NDVI (20.4 %). Estos resultados sugieren que la pérdida de productividad precede a los cambios detectables en el dosel.

4. Conclusiones

La variabilidad hidroclimática de la Amazonía está dominada por un modo compuesto coherente, sintetizado por el AB-CHEX. Este modo reproduce los principales eventos secos–cálidos y húmedos–fríos entre 1982 y 2024, y se extiende sobre más de dos tercios de la cuenca en ambas temporadas. Su evolución de largo plazo es contrastante: la temporada húmeda tiende débilmente hacia condiciones más húmedas–frías, mientras que la temporada seca muestra un desplazamiento progresivo hacia condiciones secas–cálidas, impulsado por el calentamiento atmosférico.

ENSO domina la variabilidad de los eventos compuestos durante la temporada húmeda a través de las circulaciones de Hadley y Walker, con una expresión de escala global. El Caribe–TNA aporta una contribución secundaria que intensifica los extremos cuando ambos océanos coinciden en fase. En la temporada seca, el Caribe–TNA proporciona el control de fondo a través de la circulación regional de Hadley, con una expresión confinada sobre la Amazonía. Aun así, los eventos más severos ocurren con ambos océanos en la misma fase. La influencia de ENSO en esta temporada sería en parte diferida, mediante el calentamiento posterior del Caribe–TNA y el precondicionamiento del sistema desde la temporada húmeda. El calentamiento del Caribe–TNA y el fortalecimiento de la subsidencia de Hadley sugieren una contribución a condiciones secas–cálidas más extensas y severas. Sin embargo, la variabilidad oceánica por sí sola probablemente no basta para explicar esta intensificación. Los procesos regionales tierra–atmósfera asociados al cambio de uso del suelo y a las retroalimentaciones superficiales también contribuirían a intensificar estos extremos y a desplazar el sistema amazónico hacia un estado cada vez más inestable.

Estos extremos secos–cálidos impactan la vegetación de forma distinta según la temporada, reflejando una transición desde un régimen limitado por energía durante la temporada húmeda hacia uno controlado por limitación hídrica durante la temporada seca, donde la GPP muestra las reducciones más severas.

Referencias

Alexander, M. A., Bladé, I., Newman, M., Lanzante, J. R., Lau, N.-C., & Scott, J. D. (2002). The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air–sea interaction over the global oceans. Journal of Climate, 15(16), 2205–2231. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<2205:TABTIO>2.0.CO;2

Arias, P. A., Fernández-Berrío, A., Bedoya-Pineda, V., et al. (2025). Compound dry and hot extremes and their implications for fire activity over the Orinoco River Basin in northern South America. Climate Dynamics, 63, 175. https://doi.org/10.1007/s00382-025-07660-5

Baker, J. C. A., Garcia-Carreras, L., Buermann, W., de Castilho Souza, D., Marsham, J. H., Kubota, P. Y., Gloor, M., Coelho, C. A. S., & Spracklen, D. V. (2021). Robust Amazon precipitation projections in climate models that capture realistic land–atmosphere interactions. Environmental Research Letters, 16(7), 074002. https://doi.org/10.1088/1748-9326/abfb2e

Barichivich, J., Gloor, E., Peylin, P., Brienen, R. J. W., Schöngart, J., Espinoza, J. C., & Pattnayak, K. C. (2018). Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. Science Advances, 4(9), eaat8785. https://doi.org/10.1126/sciadv.aat8785

Botetano, G., Espinoza, J. C., Takahashi, K., Gutiérrez, D., Marengo, J. A., & Wongchuig, S. (2026). Large-scale climate drivers of extreme compound events in the Amazon from interannual to long-term timescales (1982–2024). Climate Dynamics, 64, Article 427. https://doi.org/10.1007/s00382-026-08382-y

Builes-Jaramillo, A., Marwan, N., Poveda, G., & Kurths, J. (2018). Nonlinear interactions between the Amazon River basin and the Tropical North Atlantic at interannual timescales. Climate Dynamics, 50(7–8), 2951–2969. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3785-8

Chen, S., Stark, S. C., Nobre, A. D., Cuartas, L. A., de Jesus Amore, D., Restrepo-Coupe, N., Smith, M. N., Chitra-Tarak, R., Ko, H., Nelson, B. W., & Saleska, S. R. (2024). Amazon forest biogeography predicts resilience and vulnerability to drought. Nature, 631(8019), 111–117. https://doi.org/10.1038/s41586-024-07568-w

Enfield, D. B., & Mayer, D. A. (1997). Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño–Southern Oscillation. Journal of Geophysical Research: Oceans, 102(C1), 929–945. https://doi.org/10.1029/96JC03296

Espinoza, J. C., Jimenez, J. C., Marengo, J. A., Schongart, J., Ronchail, J., Lavado-Casimiro, W., & Ribeiro, J. V. M. (2024). The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. Scientific Reports, 14, 8107. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5

Ferreira, V., Buras, A., Zscheischler, J., Mahecha, M. D., & Rammig, A. (2025). Evaluating the 2023–2024 record dry-hot conditions in the Amazon in the context of

historical compound extremes. Environmental Research Letters, 20(8), 084055. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ade550

Jiménez, J. C., Marengo, J. A., Alves, L. M., Sulca, J. C., Takahashi, K., Ferrett, S., & Collins, M. (2021). The role of ENSO flavours and TNA on recent droughts over Amazon forests and the Northeast Brazil region. International Journal of Climatology, 41(7), 3761–3780. https://doi.org/10.1002/joc.6453

Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: Causes, trends and impacts. International Journal of Climatology, 36(3), 1033–1050. https://doi.org/10.1002/joc.4420

Marengo, J. A., Espinoza, J. C., Fu, R., Jimenez Muñoz, J. C., Alves, L. M., Da Rocha, H. R., & Schöngart, J. (2024a). 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

Marengo, J. A., Cunha, A. P., Espinoza, J. C., Fu, R., Schöngart, J., Jimenez, J. C., Costa, M. C., Ribeiro, J. M., Wongchuig, S., & Zhao, S. (2024b). The drought of Amazonia in 2023-2024. American Journal of Climate Change, 13(3), 567–597. https://doi.org/10.4236/ajcc.2024.133026

Marengo, J. A., Calim Costa, M., Cunha, A. P., Espinoza, J. C., Jimenez, J. C., Libonati, R., Geirinhas, J. L., Miranda, V., Trigo, I. F., Sierra, J. P., Orozco Maia, T., Medeiros, O., et al. (2026). Characterisation of the exceptional heatwave conditions observed in Brazil during the record-hot years of 2024 and 2025. International Journal of Climatology. https://doi.org/10.1002/joc.70219

Miranda, V. F. V. V., Albuquerque, R., Geirinhas, J., Peres, L. F., Libonati, R., Jimenez, J. C., & Trigo, I. F. (2026). Satellite-based land surface temperature and soil moisture observed during the 2023–2024 drought–heatwave events in the Amazon Basin. Environmental Research: Climate, 5(1), 015012. https://doi.org/10.1088/2752-5295/ae2d89

Schwendike, J., Govekar, P., Reeder, M. J., Wardle, R., Berry, G. J., & Jakob, C. (2014). Local partitioning of the overturning circulation in the tropics and the connection to the Hadley and Walker circulations. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 119(3), 1322–1339. https://doi.org/10.1002/2013JD020742

CARACTERIZACIÓN TEMPORAL DEL MATERIAL PARTICULADO ($PM_{2.5}$) DURANTE EL PERÍODO DE INCREMENTO DE ACTIVIDAD DEL FUEGO EN CUSCO, 2022

Katherine Cervantes[1], Ricardo Zubieta[1], Janeet Sanabria[2]

[1] Dirección de Ciencias de la Atmósfera, Hidrósfera y Cambio Climático, Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú.
[2] Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), Lima, Perú.



Katherine Cervantes es bachiller en Ingeniería Ambiental por la Universidad Nacional Agraria La Molina. Actualmente, se desempeña como asistente de investigación en el Instituto Geofísico del Perú (IGP), donde investiga la posible afectación de la calidad del aire asociada a la actividad del fuego. Sus intereses de investigación se centran en la calidad del aire, el transporte y dispersión de contaminantes atmosféricos mediante modelado atmosférico, y el análisis integrado de observaciones in situ y datos satelitales.

Palabras clave: Focos de calor, incendios forestales, calidad del aire, material particulado.

Citar como: Cervantes, K., Zubieta, R., Sanabria, J.,] (2026). Caracterización temporal del material particulado ($PM_{2.5}$) durante el período de incremento de actividad del fuego en Cusco, 2022. Boletín Científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, vol. 13 n.°07, págs. 15-19.

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

Esta investigación caracteriza los episodios de alta concentración de material particulado fino ($PM_{2.5}$) en Cusco. Los resultados preliminares aportan evidencia sobre los posibles efectos que las prácticas de quema y los incendios forestales, en regiones altoandinas, pueden tener sobre la calidad del aire. Esta información es útil para los tomadores de decisiones; puesto que, permite considerar con menor incertidumbre el grado de afectación de la calidad del aire en las zonas donde el uso del fuego forma parte tradicional del inicio de la campaña agrícola, antes de la nueva temporada de lluvias.

Resumen

La quema agrícola y los incendios forestales son eventos recurrentes durante la época seca en los Andes peruanos. Cusco es una de las regiones más afectadas por los incendios forestales, por lo que presentaría altos niveles de emisiones de contaminantes atmosféricos. Sin embargo, es necesario contar con una caracterización cuantitativa de la contaminación asociada a dichas fuentes a lo largo de la época seca. Este artículo presenta una discusión preliminar sobre las posibles fuentes de material particulado fino (PM2.5) en Cusco, a partir de mediciones in situ, y de la exploración de la posible influencia de actividades del fuego, como las quemas e incendios forestales. Para ello, se recopiló el registro diario de focos de calor (sensores MODIS y VIIRS) durante el período de junio a septiembre de 2022, con la finalidad de contrastar la actividad del fuego a nivel provincial con los episodios de alta concentración de PM2.5 registrados. Los resultados permitieron identificar 30 episodios de concentración elevada en Ccapacmarca - Chumbivilcas y

23 en Espinar, empleando como umbral el percentil 75. En Ccapacmarca, los episodios se presentaron principalmente en septiembre y coincidieron con la mayor actividad del fuego detectada en toda la provincia. En Espinar, esta coincidencia fue menos evidente, lo que sugiere la posible influencia de otras fuentes de emisión contaminantes. Estos resultados constituyen la primera parte de un análisis integral orientado a evaluar la actividad del fuego como posible fuente de contaminación atmosférica en la región Cusco.

1. Introducción

El fenómeno de El Niño, en su magnitud severa, se manifiesta usualmente por lluvias extremas en la región norte del Perú. No obstante, en la región sur pueden registrarse precipitaciones por debajo de lo normal, lo que puede desencadenar eventos de sequía (Lavado-Casimiro & Espinoza, 2014). Las sequías severas provocan una disminución de la humedad en la vegetación, lo que condiciona la vulnerabilidad del combustible vegetal ante incendios forestales (Sinticala, 2025). Durante períodos de sequía extrema, los incendios forestales en los Andes peruanos se han incrementado hasta un 400% (Zubieta et al., 2023), ocasionando la pérdida de vidas humanas y la afectación de miles de hectáreas de ecosistemas andinos y amazónicos (Cáceres et al., 2024).

Asimismo, los incendios forestales son también una fuente potencial de contaminantes atmosféricos ($PM_{2.5}$, CO, NO_2, CO_2, entre otros), cuyos efectos pueden traducirse en enfermedades respiratorias, cardiovasculares y desórdenes neurológicos (Barjeste Vaezi et al., 2024; Hartnett et al., 2025; Sangkham et al., 2024).

El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) realiza la vigilancia atmosférica a nivel nacional, con el fin de caracterizar los peligros asociados a la contaminación ambiental proveniente de incendios urbanos y forestales. Sin embargo, la caracterización detallada de los contaminantes atmosféricos asociados a la actividad del fuego en regiones del Perú es limitada. La región Cusco, ubicada al sur del Perú, registra anualmente una intensa actividad de incendios forestales (MINAM, 2021). En particular, las provincias de Espinar y Chumbivilcas calificadas como áreas en riesgo muy alto (CENEPRED, 2021). En este contexto, el objetivo de este estudio es presentar una caracterización preliminar de las concentraciones de material particulado ($PM_{2.5}$) y explorar su posible relación con la actividad del fuego durante el período seco de 2022 en Cusco.

2. Metodología

Se emplearon registros diarios de PM2.5 de dos estaciones de monitoreo de la calidad del aire del Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) ubicadas en la región Cusco: Ccapacmarca (CA-CP-01) y Espinar (CA-ESP-01), como se observa en la Figura 1. Los registros de ambas estaciones se limitaron al período comprendido entre junio y septiembre de 2022, en el que se obtuvieron 121 días válidos en Ccapacmarca y 92 en Espinar.

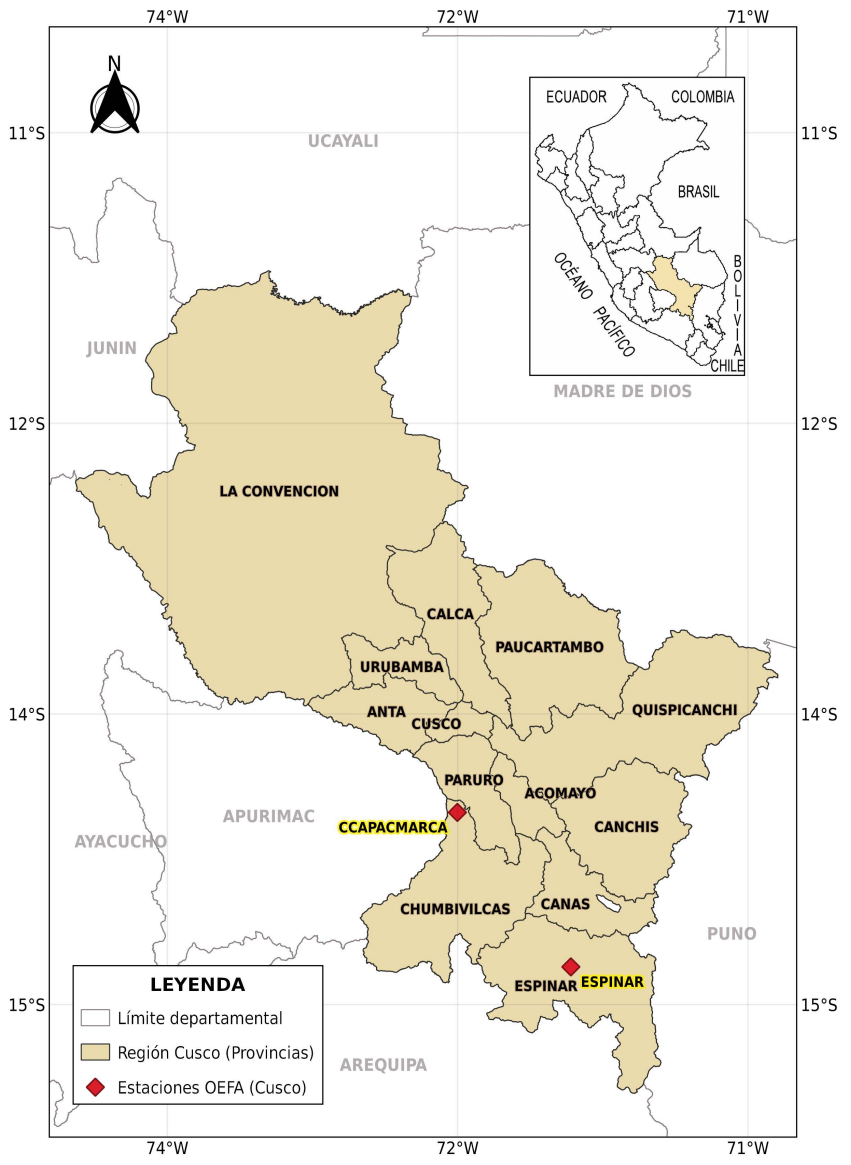


Figura 1. Área de estudio (región Cusco) y estaciones de monitoreo de la calidad del aire del OEFA disponibles.

Para caracterizar la actividad del fuego, se recopilaron datos de focos de calor de los productos MODIS (MCD14DL, Colección 6.1) y VIIRS (Suomi-NPP y NOAA-20, Colección 2). Los datos se delimitaron espacialmente en la región Cusco y temporalmente de junio a septiembre de 2022. Estos productos incluyen un nivel de confianza de detección, que indica la certeza de que el píxel detectado corresponde a una anomalía térmica y no un falso positivo. En ese sentido, se aplicó como filtro un nivel de confianza ≥70% para MODIS (Khadgi et al., 2024; Kuikel et al., 2024; Mendez-Espinosa et al., 2019), mientras que, para VIIRS, se seleccionaron las categorías «nominal» y «alta» (Schroeder et al., 2014, 2025). Además, ambos sensores proporcionan información sobre el tipo de anomalía térmica, por lo que el análisis se restringió a las quemas de vegetación. La aplicación del filtro de nivel de confianza definió el número de detecciones consideradas, por lo que es de gran relevancia para la estimación cuantitativa de la actividad del fuego (Giglio et al., 2016; Schroeder et al., 2014, 2025). Adicionalmente, se empleó el registro histórico de incendios forestales del MINAM, para contrastar los episodios de incendios forestales identificados mediante el procesamiento particular de los productos de los sensores MODIS y VIIRS.

Para identificar episodios de alta concentración de PM2.5 se empleó también el percentil 75 (P75) de la serie temporal de cada estación (Karaca et al., 2009). Es decir, aquel día en el que se superó el percentil 75, es considerado un día de alta concentración de contaminantes. Las detecciones de actividad de fuego se contabilizaron diariamente a nivel provincial (Chumbivilcas para la estación Ccapacmarca, Espinar para la estación Espinar), al igual que los registros validados de incendios forestales del MINAM y, se compararon visualmente con las series diarias de $PM_{2.5}$.

3. Resultados y discusión

Aunque el registro de incendios forestales dispuesto por el MINAM no evidencia un aumento paulatino, la Figura 2 sí permite visualizar un incremento sostenido de detecciones de actividad del fuego según los satélites entre junio y septiembre de 2022. Este último presenta el mayor número de detecciones relacionadas a la actividad del fuego.

Por otro lado, las detecciones obtenidas mediante MODIS y VIIRS son consistentes entre sí. En el período analizado, el registro del MINAM validó 148 incendios forestales, equivalentes a aproximadamente el 7% de los focos de calor detectados por VIIRS (~2200 por cada satélite) y al 59% de los detectados por MODIS (252). Estas diferencias observadas entre las fuentes satelitales y los eventos registrados por el MINAM pueden estar relacionadas con las características de cada sistema de observación (algoritmos de detección, resolución espacial, resolución temporal) y con los filtros de confianza aplicados. Además, ambas fuentes cuantifican fenómenos distintos: eventos validados de incendio forestal frente a anomalías térmicas satelitales, que pueden incluir quemas agrícolas y representar múltiples focos de un mismo evento. Por ello, ambas fuentes de datos se utilizaron de forma complementaria.

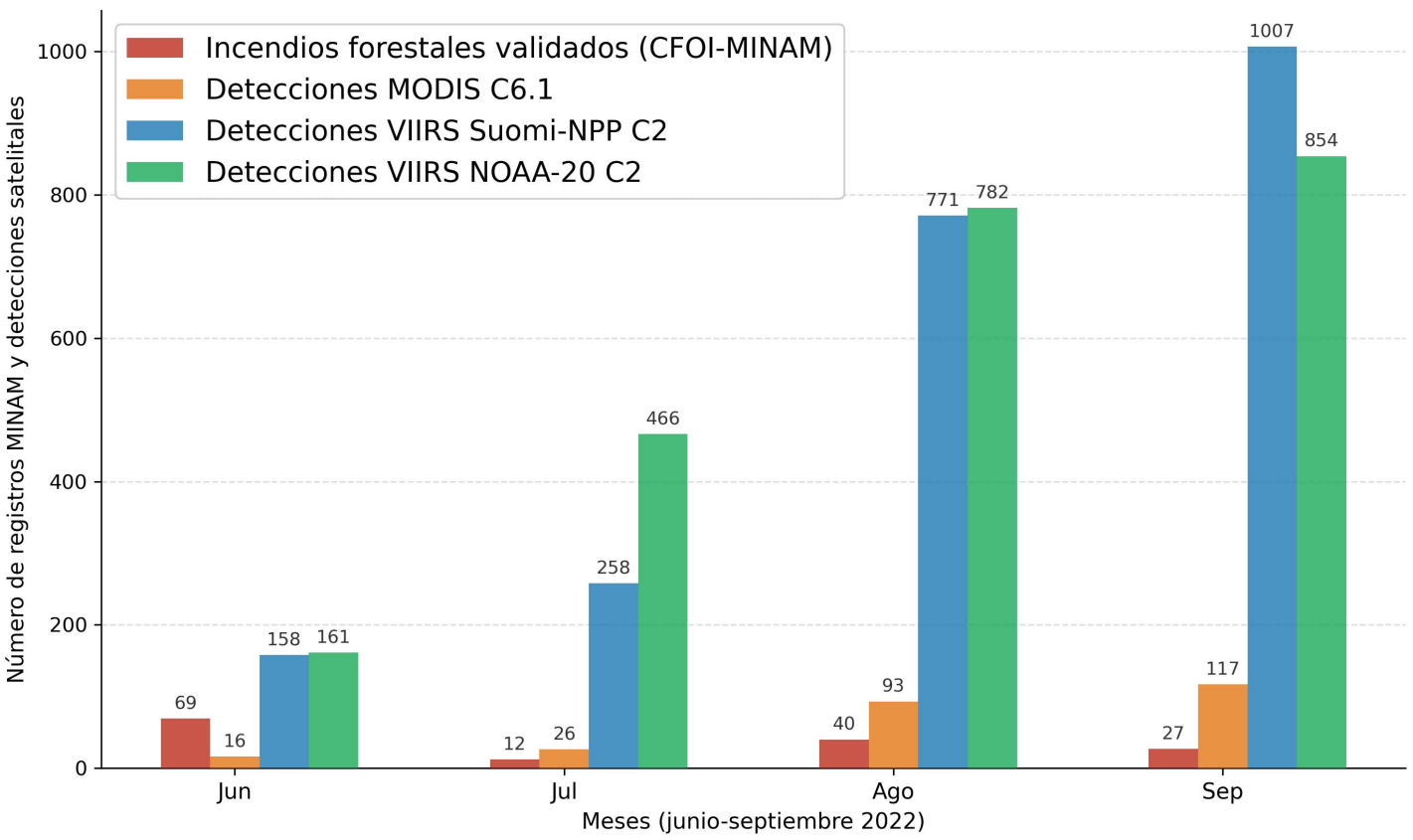


Figura 2. Comparación mensual entre el registro histórico de incendios forestales del MINAM y cantidad de focos de calor (MODIS y VIIRS) en la región Cusco para el periodo junio-septiembre 2022 (Filtros focos de calor: nivel de confianza de detección MODIS ≥ 70%, VIIRS nominal y alta).

Para una comparación preliminar, los episodios de PM2.5 se identificaron a nivel diario, mientras que las detecciones satelitales se analizaron a nivel provincial empleando datos diarios de Chumbivilcas y Espinar (Figura 3).

La Figura 3 muestra el registro de concentraciones de material particulado fino durante el período de estiaje de 2022. Se identificaron 30 episodios de alta concentración de PM2.5 en Ccapacmarca (P75=17.6 µg/m3) y 23 en Espinar (P75=28.3 µg/m3). La distribución mensual de estos episodios difirió entre ambas estaciones. En Ccapacmarca (Figura 3a) se concentraron en septiembre (18 de 30 episodios), incluyendo diez días de excedencia (5-14 de septiembre) y el valor máximo del período (36.3 µg/m3, el 9 de septiembre). Por su parte, los episodios en Espinar se distribuyeron de forma más homogénea entre junio y septiembre (Figura 3b).

La distribución mensual de los episodios sugiere el incremento progresivo de la actividad del fuego en la región de estudio debido a la actividad de quema agrícola estacional. En Ccapacmarca, los episodios de mayor concentración de PM2.5 (5-14 de septiembre) coinciden con una mayor actividad del fuego a nivel provincial identificada por VIIRS. Esto es corroborado con uno de los días que presentó uno de los mayores registros de incendios por el MINAM (Figura 3a). Por el contrario, varios episodios en Espinar no coinciden con las detecciones de fuego en la provincia, lo que sugiere que pueda ser ocasionado por otras fuentes locales de emisión (Figura 3b).

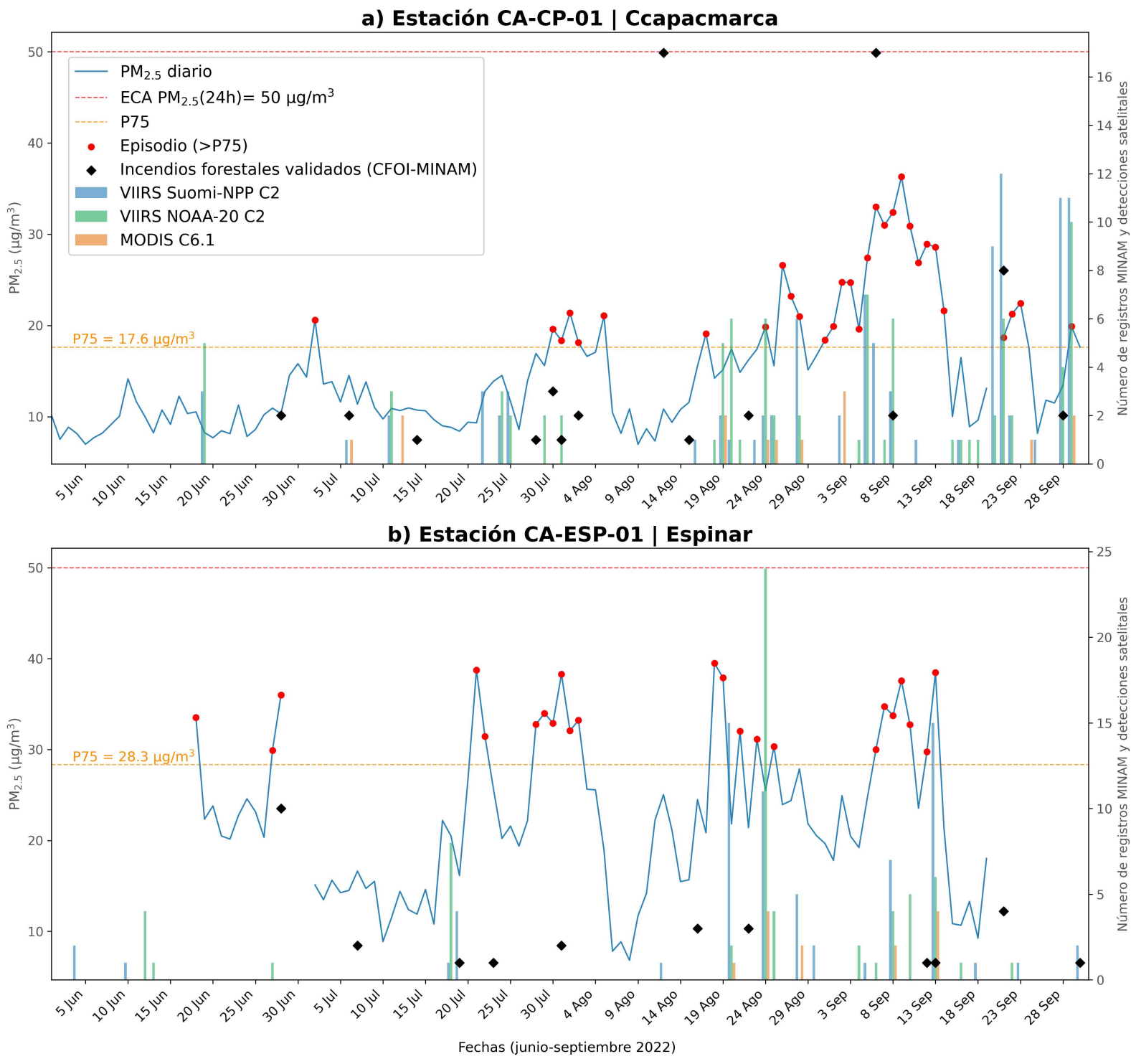


Figura 3. Concentraciones diarias de PM2.5, registro histórico del MINAM y cantidad de detecciones por focos de calor MODIS y VIIRS (Filtros focos de calor: nivel de confianza de detección MODIS ≥70%, VIIRS nominal y alta). a) Estación Ccapacmarca (provincia Chumbivilcas) y b) Estación Espinar (provincia Espinar) para el periodo junio-septiembre 2022.

4. Conclusiones

Los resultados preliminares muestran una posible coincidencia temporal en Ccapacmarca entre los episodios de PM2.5 registrados en septiembre y el incremento de la actividad del fuego a escala provincial durante el período de estudio. Por el contrario, en Espinar no se visualiza una clara coincidencia, lo que podría relacionarse a la posible influencia de otras fuentes de emisión. Para reducir la incertidumbre del estudio y profundizar en la identificación de las posibles fuentes de contaminantes, se recomienda incorporar información satelital de contaminantes atmosféricos y el modelado de retrotrayectorias atmosféricas.

Referencias

Barjeste Vaezi, R., Martin, M., & Hosseinpour, F. (2024). Impacts of Wildfire Smoke Aerosols on Radiation, Clouds, Precipitation, Climate, and Air Quality. Atmospheric Environment: X, 26, 100322. https://doi.org/10.2139/ssrn.5051411

Cáceres, Z., Shimbo, J., Ríos Cáceres, S., Vieira da Silva, W., Arruda, V., & Alencar, A. (2024). Nota Técnica: Incendios forestales en Perú entre 2002 al 2024 (MAPBIOMAS). Instituto del Bien Común. https://peru.mapbiomas.org/wp-content/uploads/sites/14/2024/11/Nota-tecnica_-Incendios-forestales-en-el-Peru-2002-2024-1.pdf

CENEPRED. (2021). Escenario de riesgo por incendios forestales de la región Cusco. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/documento/10472

Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. Remote Sensing of Environment, 178, 31–41. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.054

Hartnett, N., Jing, P., Zhang, B., Stuart, M., & Wang, J. (2025). Wildfire smoke and PM2.5 pollution in Chicago: Evidence from 2019 to 2023. Urban Climate, 61, 102472. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102472
Karaca, F., Anil, I., & Alagha, O. (2009). Long-range potential source contributions of episodic aerosol events to PM10 profile of a megacity. Atmospheric Environment, 43(36), 5713–5722. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.005

Khadgi, J., Kafle, K., Thapa, G., Khaitu, S., Sarangi, C., Cohen, D., & Kafle, H. (2024). Concentration of particulate matter and atmospheric pollutants in the residential area of Kathmandu Valley: A case study of March–April 2021 forest fire events. Environmental Pollution, 363, 125280. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.125280

Kuikel, S., Pokharel, B., & Bhattarai, N. (2024). The effect of wildfires on air quality in Kathmandu, Nepal. Environmental Advances, 15, 100493. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100493

Lavado-Casimiro, W., & Espinoza, J. C. (2014). Impactos de El Niño y La Niña en las lluvias del Perú (1965-2007). Revista Brasileira de Meteorologia, 29(2), 171–182. https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000200003

Mendez-Espinosa, J. F., Belalcazar, L. C., & Morales Betancourt, R. (2019). Regional air quality impact of northern South America biomass burning emissions. Atmospheric Environment, 203, 131–140. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.042
MINAM. (2021). Informe nacional sobre el estado del ambiente 2014-2019 (No. 1).

Sangkham, S., Phairuang, W., Sherchan, S. P., Pansakun, N., Munkong, N., Sarndhong, K., Islam, Md. A., & Sakunkoo, P. (2024). An update on adverse health effects from exposure to PM2.5. Environmental Advances, 18, 100603. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100603

Schroeder, W., Giglio, L., & Hall, J. (2025). Collection 2 Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) 375-m Active Fire Product User's Guide. https://www.earthdata.nasa.gov/s3fs-public/2025-06/VIIRS_C2_AF-375m_User_Guide_1.2.pdf

Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., & Csiszar, I. A. (2014). The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. Remote Sensing of Environment, 143, 85–96. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008

Sinticala Aycaya, J. M. (2025). Estimación del contenido de humedad en pastizales como potencial de material de combustible vivo en incendios forestales en la cuenca Illpa utilizando sensores remotos [Tesis para optar el Titulo Profesional de Ingeniería Agrícola, Universidad Nacional del Altiplano]. https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/26833

Zubieta, R., Ccanchi, Y., Martínez, A., Saavedra, M., Norabuena, E., Alvarez, S., & Ilbay, M. (2023). Retraso en el inicio de la temporada de lluvias e incremento de la ocurrencia de incendios. Boletín Científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, 10(7), 4–9.

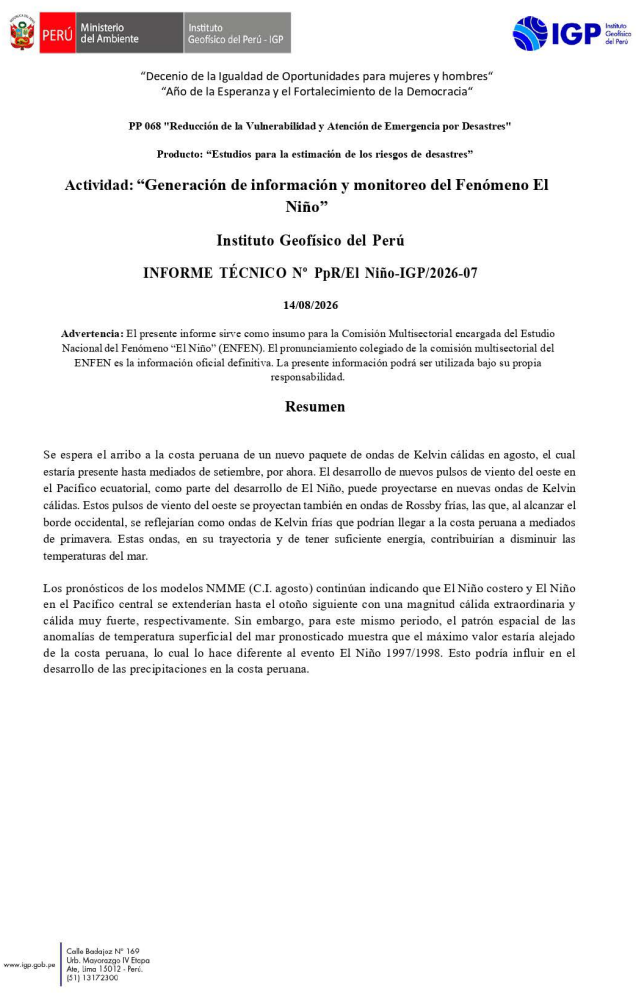
RESUMEN INFORME TÉCNICO n.° PPR/EL NIÑO-IGP/2026-07

Publicado el 14 de agosto de 2026

Se espera el arribo a la costa peruana de un nuevo paquete de ondas de Kelvin cálidas en agosto, el cual estaría presente hasta mediados de setiembre, por ahora. El desarrollo de nuevos pulsos de viento del oeste en el Pacífico ecuatorial, como parte del desarrollo de El Niño, puede proyectarse en nuevas ondas de Kelvin cálidas. Estos pulsos de viento del oeste se proyectan también en ondas de Rossby frías, las que, al alcanzar el borde occidental, se reflejarían como ondas de Kelvin frías que podrían llegar a la costa peruana a mediados de primavera. Estas ondas, en su trayectoria y de tener suficiente energía, contribuirían a disminuir las temperaturas del mar.

Los pronósticos de los modelos NMME (C.I. agosto) continúan indicando que El Niño costero y El Niño en el Pacífico central se extenderían hasta el otoño siguiente con una magnitud cálida extraordinaria y cálida muy fuerte, respectivamente. Sin embargo, para este mismo periodo, el patrón espacial de las anomalías de temperatura superficial del mar pronosticado muestra que el máximo valor estaría alejado de la costa peruana, lo cual lo hace diferente al evento El Niño 1997/1998. Esto podría influir en el desarrollo de las precipitaciones en la costa peruana.

El informe técnico completo se encuentra disponible en:
https://bit.ly/3WQS1eR



PERÚ Ministerio del Ambiente | Instituto Geofísico del Perú - IGP

IGP Instituto Geofísico del Perú

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para mujeres y hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

PP 068 "Reducción de la Vulnerabilidad y Atención de Emergencia por Desastres"

Producto: "Estudios para la estimación de los riesgos de desastres"

Actividad: "Generación de información y monitoreo del Fenómeno El Niño"

Instituto Geofísico del Perú

INFORME TÉCNICO N° PpR/El Niño-IGP/2026-07

14/08/2026

Advertencia: El presente informe sirve como insumo para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN). El pronunciamiento colegiado de la comisión multisectorial del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

Resumen

Se espera el arribo a la costa peruana de un nuevo paquete de ondas de Kelvin cálidas en agosto, el cual estaría presente hasta mediados de setiembre, por ahora. El desarrollo de nuevos pulsos de viento del oeste en el Pacífico ecuatorial, como parte del desarrollo de El Niño, puede proyectarse en nuevas ondas de Kelvin cálidas. Estos pulsos de viento del oeste se proyectan también en ondas de Rossby frías, las que, al alcanzar el borde occidental, se reflejarían como ondas de Kelvin frías que podrían llegar a la costa peruana a mediados de primavera. Estas ondas, en su trayectoria y de tener suficiente energía, contribuirían a disminuir las temperaturas del mar.

Los pronósticos de los modelos NMME (C.I. agosto) continúan indicando que El Niño costero y El Niño en el Pacífico central se extenderían hasta el otoño siguiente con una magnitud cálida extraordinaria y cálida muy fuerte, respectivamente. Sin embargo, para este mismo periodo, el patrón espacial de las anomalías de temperatura superficial del mar pronosticado muestra que el máximo valor estaría alejado de la costa peruana, lo cual lo hace diferente al evento El Niño 1997/1998. Esto podría influir en el desarrollo de las precipitaciones en la costa peruana.

www.igp.gob.pe | Calle Badajoz N° 169 Urb. Mayorazgo IV Etapa Ate, Lima 15012 - Perú. (51) 1317 2300

Advertencia: El presente informe sirve como insumo para la Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN). El pronunciamiento colegiado de la comisión multisectorial del ENFEN es la información oficial definitiva. La presente información podrá ser utilizada bajo su propia responsabilidad.

COMUNICADO OFICIAL ENFEN n.° 13 - 2026

ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO "EL NIÑO"

COMISIÓN MULTISECTORIAL ENCARGADA
DEL ESTUDIO NACIONAL DEL FENÓMENO "EL NIÑO" – ENFEN
Decreto Supremo n.° 007-2017-PRODUCE

Estado del sistema de alerta: Alerta de El Niño Costero[1]

Publicado el 17 de julio de 2026

La Comisión Multisectorial encargada del Estudio Nacional del Fenómeno "El Niño" (ENFEN), luego de analizar la evolución reciente del acoplamiento entre las condiciones oceánicas y atmosféricas en el Pacífico Tropical (Figura 1), así como los últimos pronósticos climáticos nacionales e internacionales, mantiene el estado de "Alerta de El Niño Costero" y concluye, que:

• En la región Niño 1+2, es probable la continuación de El Niño Costero hasta abril de 2027, por lo pronto. Asimismo, es más probable que el evento continúe de magnitud fuerte2; sin embargo, no se descarta la magnitud extraordinaria, hacia finales de 2026 (Figura 2a).

• Para la región Niño 3.4 (Pacífico ecuatorial central), El Niño podría extenderse hasta abril de 2027 y alcanzaría la magnitud muy fuerte en noviembre y diciembre de 2026. Para el próximo verano (diciembre 2026 – marzo 2027) es más probable que el evento alcance una magnitud fuerte (Figura 2b).

Para el trimestre julio–septiembre3 las temperaturas del aire se mantendrían muy por encima de sus valores habituales en toda la costa. La costa norte presentaría lluvias de normales a por encima de lo normal, con episodios localizados; por otro lado, los ríos de la vertiente del Pacífico mantendrían caudales dentro de sus rangos normales. Para el verano 2026–2027, el escenario de lluvias más probable es superior a lo normal en la costa norte y central; mientras que, en la región andina central y sur se presentarían condiciones normales a inferiores.

En relación a los recursos pesqueros, de mantenerse las condiciones cálidas anómalas, para las próximas

[1] Las Alerta de El Niño Costero: la Comisión ENFEN considera que El Niño Costero es inminente, ya se ha iniciado o continuará en los siguientes meses (Nota Técnica ENFEN 02-2026 https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-02-2026-sistemade-alerta-ante-el-nino-costero-y-la-nina-costera/?wpdmdl=1988&refresh=698e1316b93ee1770918678).

[2] https://enfen.imarpe.gob.pe/download/nota-tecnica-enfen-01-2024-definicion-operacional-de-los-eventos-el-nino-costero-y-la-ninacostera-en-el-peru/?wpdmdl=1905&refresh=6a2eedc00eb9917814)

semanas se espera que la anchoveta siga replegada hacia el litoral y más profunda que lo normal, con un mayor gasto de sus reservas energéticas. Asimismo, se prevé que continúen ingresando especies indicadoras de aguas ecuatoriales, como pez sierra, ayamarca, samasa, así como de aguas oceánicas como barrilete, atún aleta amarilla, melva, picudos y tiburones.

Se recomienda a los tomadores de decisiones considerar los escenarios de riesgo basados en los avisos meteorológicos4 y pronósticos estacionales5 vigentes, a fin de adoptar las medidas correspondientes para la reducción del riesgo de desastres, así como acciones de preparación para la respuesta ante los peligros inminentes, debido a la continuidad de El Niño Costero y El Niño (Pacífico ecuatorial central) y ante la próxima temporada de lluvias (setiembre 2026 - abril 2027). Asimismo, se exhorta a las autoridades y ciudadanía a seguir la información oficial emitida por el ENFEN y el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (SINAGERD).

La Comisión Multisectorial del ENFEN continuará monitoreando la evolución de las condiciones oceánicas, atmosféricas, hidrológicas y biológicas-pesqueras, y actualizando las perspectivas. La emisión del próximo Comunicado Oficial ENFEN será el viernes 14 de agosto de 2026.

- Puede acceder a leer en comunicado en su totalidad a través del siguiente enlace: https://bit.ly/4jsxvtD

INSTITUCIONES MIEMBROS DEL ENFEN

IMARPE INSTITUTO DEL MAR DEL PERÚ · Senamhi · DIHIDRONAV DIRECCIÓN DE HIDROGRAFÍA Y NAVEGACIÓN MARINA DE GUERRA DEL PERÚ · INDECI INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL · ANA Autoridad Nacional del Agua · CENEPRED · IGP Instituto Geofísico del Perú

[3] https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-73.pdf

[4] https://www.senamhi.gob.pe/?p=aviso-meteorologico

[5] https://www.senamhi.gob.pe/load/file/02262SENA-73.pdf

IGP
Instituto
Geofísico
del Perú

www.gob.pe/igp