

# DESEMPEÑO DE LAS SIMULACIONES DE PRECIPITACIÓN DE MODELOS CLIMÁTICOS REGIONALES SOBRE LA REGIÓN DE TRANSICIÓN ANDES-AMAZONÍA

Ricardo A. Gutiérrez<sup>1,2</sup>, Clémentine Junquas<sup>3,4</sup>,  
Elisa Armijos<sup>1,2</sup>, Anna A. Sörensson<sup>4,5,6</sup>,  
Jhan-Carlo Espinoza<sup>3,7</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Posgrado, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú

<sup>2</sup> Instituto Geofísico del Perú, Lima, Perú

<sup>3</sup> Univ. Grenoble Alpes, IRD, CNRS, INRAe, Grenoble-INP, Institut des Geosciences de l'Environnement (IGE, UMR 5001)

<sup>4</sup> Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina

<sup>5</sup> Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA), Universidad de Buenos Aires-CONICET, Buenos Aires, Argentina

<sup>6</sup> Instituto Franco-Argentino para el Estudio del Clima y sus Impactos (IRL 3351 IFAECI)

<sup>7</sup> Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, Lima, Perú



**Ricardo Gutiérrez** es bachiller en Ciencias-Meteorología y MSc en Recursos Hídricos, ambos por la Universidad Nacional Agraria La Molina. Fue tesista de maestría en el Instituto Geofísico del Perú (IGP) en el marco del proyecto CLIMPEZ y, actualmente, se desempeña como asistente de investigación en el proyecto AmazClim de la misma institución. Su área de investigación está orientada al entendimiento de los procesos físicos asociados a la variabilidad y cambio climático en la zona de transición Andes-Amazonía, para lo cual utiliza diversas técnicas estadísticas y numéricas de modelado climático.

**Palabras clave:** Precipitación, modelado climático regional, CORDEX, región de transición Andes-Amazonía

Citar como Gutiérrez, R., Junquas, C., Armijos, E., Sorensson, A., & Espinoza, J-C. (2024). Desempeño de las simulaciones de precipitación de Modelos Climáticos Regionales sobre la región de transición Andes-Amazonía. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.º 07, págs. 4-14.

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

Los modelos climáticos regionales pueden ser muy útiles para los estudios de impactos y vulnerabilidad asociados al cambio climático; sin embargo, una mayor resolución espacial no significa necesariamente un mejor desempeño y, entre los diferentes modelos evaluados, se encontró que el modelo Eta fue el más confiable para caracterizar las precipitaciones en la región Andes-Amazonía. Se recomienda a los tomadores de decisiones considerar estos resultados científicos para un mejor uso de los modelos climáticos para guiar políticas de adaptación al cambio climático y gestión del agua.

## Resumen

Los Modelos Climáticos Regionales (RCMs, por sus siglas en inglés) son ampliamente utilizados para evaluar los impactos futuros asociados al cambio climático a escalas locales y regionales; sin embargo, su capacidad para ser utilizados en estudios de impacto del cambio climático debe ser evaluada a partir de la representación de variables relevantes del clima, como la precipitación. En este estudio se evaluó la capacidad de 30 simulaciones regionales del clima (6 RCMs forzados por 10 Modelos Climáticos Globales) para reproducir las climatologías históricas (1981-2005) de la precipitación sobre la región de transición Andes-Amazonía, una zona de alta complejidad topográfica. Nos enfocamos en la distribución espacial de la precipitación, la precipitación orográfica sobre las áreas de *hotspots* de precipitación andino-amazónicas, y la variabilidad estacional. Encontramos que el RCM Eta exhibe la más alta correlación espacial (de hasta 0.6) con lo observado y reproduce los patrones de precipitación anual media y precipitación orográfica con mayor exactitud a lo largo de la región. La mayoría de los RCMs sobreestiman la precipitación sobre zonas altoandinas, particularmente en las cimas de la vertiente oriental de los Andes, con sobreestimaciones de la precipitación de hasta 2500 % en dicha región. Los ciclos anuales son bien representados por la mayoría de los RCMs, pero las temporadas lluviosas son sobreestimadas, especialmente en localizaciones ecuatoriales. En este conjunto de simulaciones, aquellas de resolución espacial más fina no fueron necesariamente las mejores, lo cual sugiere que otros aspectos de la configuración del modelo, como las parametrizaciones físicas, son determinantes.

## 1. Introducción

Los impactos ejercidos por presiones antropogénicas, como el cambio climático y la deforestación, suponen una problemática clave para los sistemas socioambientales del mundo y de la Amazonía (Castellanos et al., 2022). La zona de transición Andes-Amazonía, localizada en el oeste de la cuenca amazónica, podría ser particularmente vulnerable a dichos impactos debido a que es una de las regiones más lluviosas del mundo (Espinoza et al., 2015). Además, esta región ofrece servicios ecosistémicos

muy importantes, como ser un *hotspot* de biodiversidad mundial (Hoorn et al., 2010) y constituir la principal fuente de sedimentos (Armijos et al., 2020) y reciclado de precipitación por el bosque (Staal et al., 2018) en la cuenca amazónica. Así, existe la necesidad de contar con proyecciones climáticas futuras para el diseño de estrategias de adaptación y mitigación.

Una de las herramientas más importantes para esta labor son los Modelos Climáticos Globales (GCMs, por sus siglas en inglés); sin embargo, debido a su baja resolución espacial, tienen limitaciones en resolver la física del clima en zonas de topografía compleja, por lo que no son capaces de representar adecuadamente el clima local. Los GCMs poseen una fuerte variabilidad pluviométrica en el espacio y tiempo, producto de las interacciones de la circulación atmosférica local y regional con la fisiografía de la zona de transición Andes-Amazonía (Junquas et al., 2018; Segura et al., 2019). Es por ello que surge el uso de los Modelos Climáticos Regionales (RCMs, por sus siglas en inglés) como herramientas de *downscaling* dinámico para los GCMs, cuyo objetivo es el de proveer de información climática más detallada al capturar mejor las heterogeneidades topográficas y del suelo (Ambrizzi et al., 2019; Giorgi & Gutowski, 2015). Así, la iniciativa "Coordinated Regional Downscaling Experiment" (CORDEX, Giorgi & Gutowski, 2015) ha establecido un marco de trabajo unificado para realizar simulaciones regionales del clima en diversas regiones del mundo, incluyendo Sudamérica (CORDEX-SAM). En este sentido, una condición mínima para considerar un modelo adecuado para la evaluación de un impacto determinado es que reproduzca las variables climáticas relevantes para dicho impacto en el clima presente. En tal sentido, en la presente investigación se evalúan las simulaciones de CORDEX-SAM en la reproducción de la climatología histórica (1981-2005, en adelante denominada *historical*) de la precipitación en la zona de transición Andes-Amazonía.

## 2. Metodología

### 2.1 Área de estudio

El área de estudio comprende la vertiente oriental de los Andes peruanos (Figura 1), uno de los sitios más lluviosos de la cuenca amazónica (conocidos como

hotspots de precipitación, Espinoza et al., 2015). El monitoreo de la precipitación sobre esta región está limitado por la escasez de registros de largo plazo debido a su complicada orografía, lo que conlleva a incertidumbres observacionales (Cazorla et al., 2022).

## 2.2 Datos

Como referencia, y para abordar las incertidumbres observacionales, se emplearon dos productos grillados de precipitación que se basan, principalmente, en combinaciones de registros pluviométricos *in situ* y de estimaciones satelitales. Esta información se derivó de los productos PISCO (Aybar et al., 2020) y RAIN4PE (Fernandez-Palomino et al., 2022). Para el presente estudio, se utilizaron las salidas de precipitación de 27 simulaciones climáticas del experimento *historical* de CORDEX-Sudamérica. Además, se incorporaron otras 3 simulaciones realizadas con el RCM Eta (Chou et al., 2014). En total, se emplearon 30

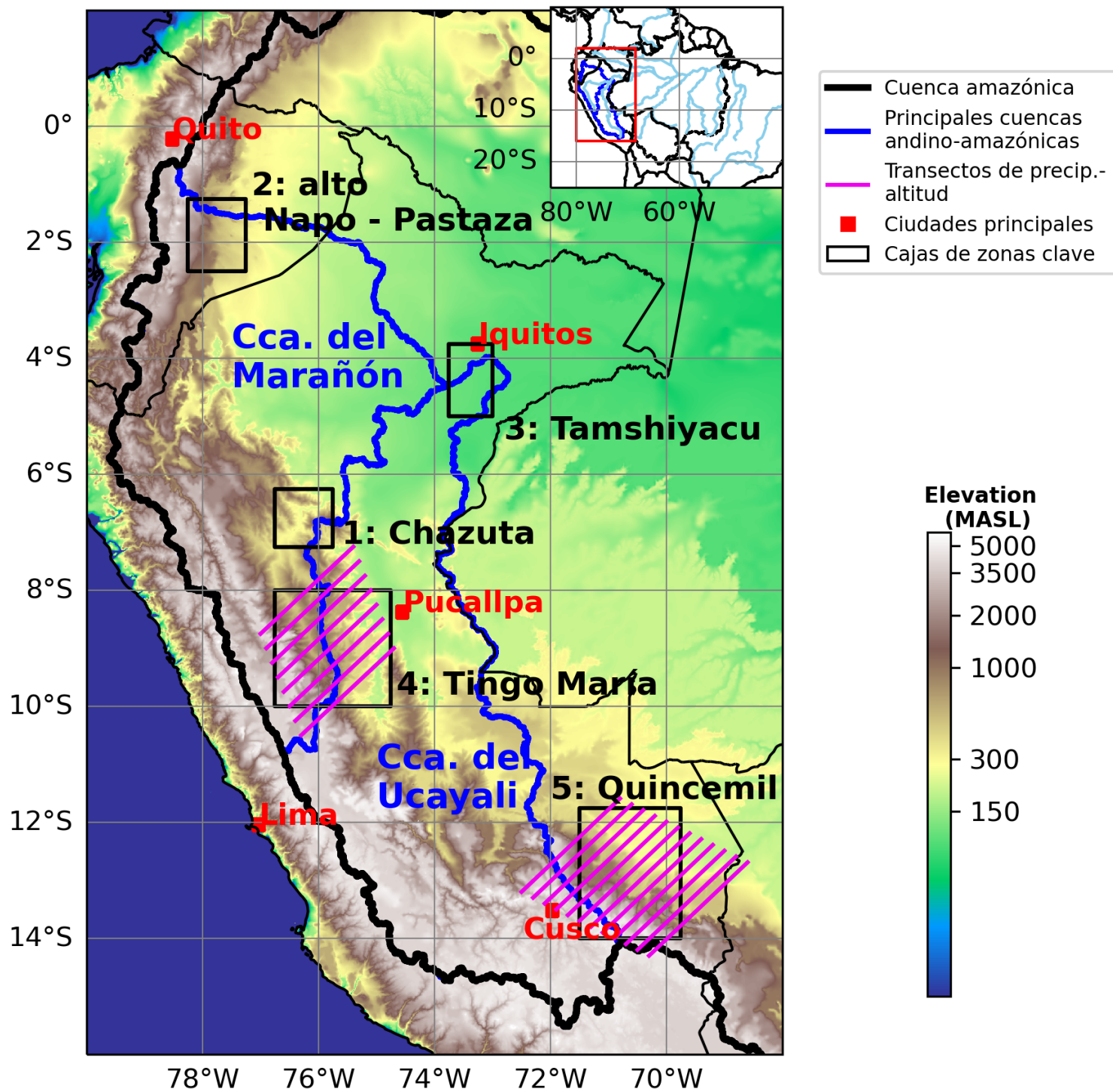
simulaciones climáticas, producto de la combinación de 6 RCMs y 10 GCMs, obtenidas a través de la plataforma descentralizada de datos climático Earth System Grid Federation (<https://esgf-data.dkrz.de/projects/esgf-dkrz/>). También se obtuvieron los campos de topografía de los RCMs. La resolución espacial de estas simulaciones, es decir, el espaciamiento de los puntos de grilla, está comprendida entre los 0.2° y 0.5° (Tabla 1), que equivalen aproximadamente a 20 km y 55 km, respectivamente. En adelante, las resoluciones espaciales de los RCMs usados en este estudio (0.2° x 0.2°, 0.22° x 0.22°, 0.44° x 0.44° y 0.5° x 0.5°) son representadas por S20, S22, S44 y S50, respectivamente. El periodo de evaluación abarca los años 1981-2005 (periodo *historical* de los GCMs).

## 2.3 Métodos

La evaluación de los RCMs se centró en la climatología de la precipitación y en los ciclos estacionales a lo largo de

**Tabla 1.** Resumen de las simulaciones de los RCMs utilizados en este estudio. Se muestran las combinaciones GCM-RCM disponibles, la resolución especial de la salida de los RCMs y las referencias de los RCMs y GCMs forzantes. Las líneas punteadas indican que esa combinación GCM-RCM no está disponible. Las resoluciones espaciales de los RCMs usados en este estudio (0.2° x 0.2°, 0.22° x 0.22°, 0.44° x 0.44° y 0.5° x 0.5°) son representadas por S20, S22, S44 y S50, respectivamente. Los caracteres rojos en los nombres de los GCMs y RCMs son usados como acrónimos en el texto (p. ej., HadG por HadGEM2-ES y RC47 por RegCM4.7).

GCM forzante	RCM y resolución disponible						Referencia GCM
	RCA4	RegCM4.3	RegCM4.7	WRF341v2	REMO2015	Eta v1	
CanESM2	S44 y S50	---	---	S44	---	S20	Von Salzen et al. (2013)
IPSL-CM5A-MR	solo S44	---	---	---	---	---	Dufresne et al. (2013)
CNRM-CM5	S44 y S50	---	---	---	---	---	Voltaire et al. (2013)
CSIRO Mk3.6	S44 y S50	---	---	---	---	---	Rotstayn et al. (2009)
EC-EARTH	S44 y S50	---	---	---	---	---	Hazeleger et al. (2010)
HadGEM2-ES	Solo S50	S44	S22	---	S22	S20	Collins et al. (2011)
MIROC5	S44 y S50	---	---	---	---	S20	Watanabe et al. (2010)
MPI-ESM-LR	S44 y S50	---	S22	---	S22	---	Zanchettin et al. (2013)
NorESM1-M	S44 y S50	---	S22	---	S22	---	Bentsen et al. (2013)
GFDL-ESM2M	S44 y S50	S44	---	---	---	---	Dunne et al. (2012)
Referencia RCM	Samuelsson et al. (2011,2015)	Giorgi et al. (2012)	Giorgi et al. (2012)	Skamarock et al. (2008)	Jacob et al. (2012)	Mesinger et al. (2012)	



**Figura 1.** Cuenca andino-amazónica con la altitud topográfica (GTOPO30) mostrada en sombras. Las cajas 1, 2, 3, 4 y 5 representan a las regiones de Chazuta, el alto Napo-Pastaza, Tamshiyacu, Tingo María y Quincemil. Las líneas oblicuas moradas representan los transectos seguidos para explorar perfiles de precipitación-topografía sobre los *hotspots* de Tingo María y Quincemil.

varias regiones y subregiones (Figura 1). Los conjuntos de datos fueron interpolados a un espaciamiento de grilla común de  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  mediante interpolación bilineal. Además, los análisis incluyeron la construcción de *ensembles* de RCMs, lo que permitió agrupar las simulaciones según el RCM correspondiente.

El patrón espacial de la precipitación anual media simulada por los RCMs, tomando como referencia a un producto grillado de precipitación, fue evaluado mediante el diagrama de Taylor (Taylor, 2001). Su visualización incluye tres métricas: el coeficiente de correlación de Pearson, la desviación estándar normalizada y el error cuadrático medio normalizado. La precipitación orográfica fue analizada mediante

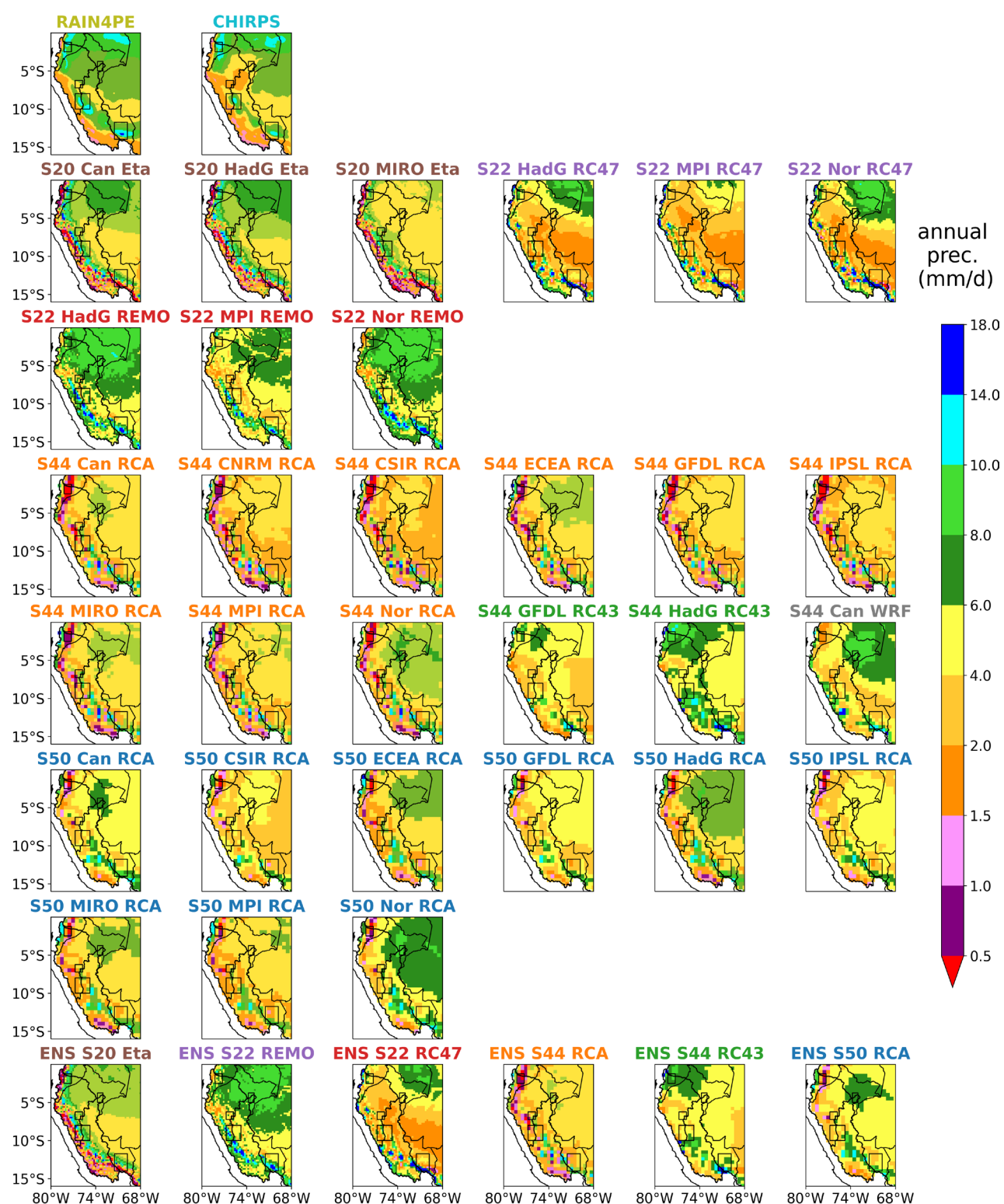
perfiles de precipitación y topografía en dos regiones de *hotspots* de precipitación (Figura 1). Por cada *hotspot*, se diseñó un mínimo de 8 transectos que siguen una trayectoria desde el lado de barlovento de las montañas hasta la cima de los Andes orientales. Se optó por seleccionar solamente a una combinación GCM-RCM de cada RCM de resolución  $0.2^\circ$  y  $0.22^\circ$  (S20 y S22), con el fin de no saturar la visualización. Esta selección se realizó considerando el rendimiento obtenido según el diagrama de Taylor. Finalmente, el análisis de los ciclos anuales de precipitación simulada se concentró en cinco regiones distintas en la zona de transición Andes-Amazonía. Estas regiones incluyen a Chazuta, el alto Napo-Pastaza, Tamshiyacu, Tingo María y Quincemil (ver cajas en la Figura 1).

### 3. Resultados

#### 3.1 Patrón espacial de la precipitación simulada por los RCMs

Los RCMs son validados en función de los patrones representados por RAIN4PE y CHIRPS. Ambos productos de referencia exhiben un gradiente de norte a sur en la Amazonía baja, con una máxima ecuatorial por encima de los 6 mm/d (milímetros por

día) y máximos de hasta 10-14 mm/d en la vertiente oriental ecuatoriana (primera fila de la Figura 2). Además, ambos productos representan una banda continua de *hotspots* de precipitación a lo largo de la vertiente oriental de los Andes, con dos máximas por encima de los 10 mm/d sobre Quincemil (12.5°S, 70.5°W) y Tingo María (9°S, 75.5°W). Además, en los altos Andes, por encima de los 4000 m s. n. m. (ver Figura 1), ambos productos indican tasas bajas de precipitación, típicamente por debajo de los 4 mm/d.



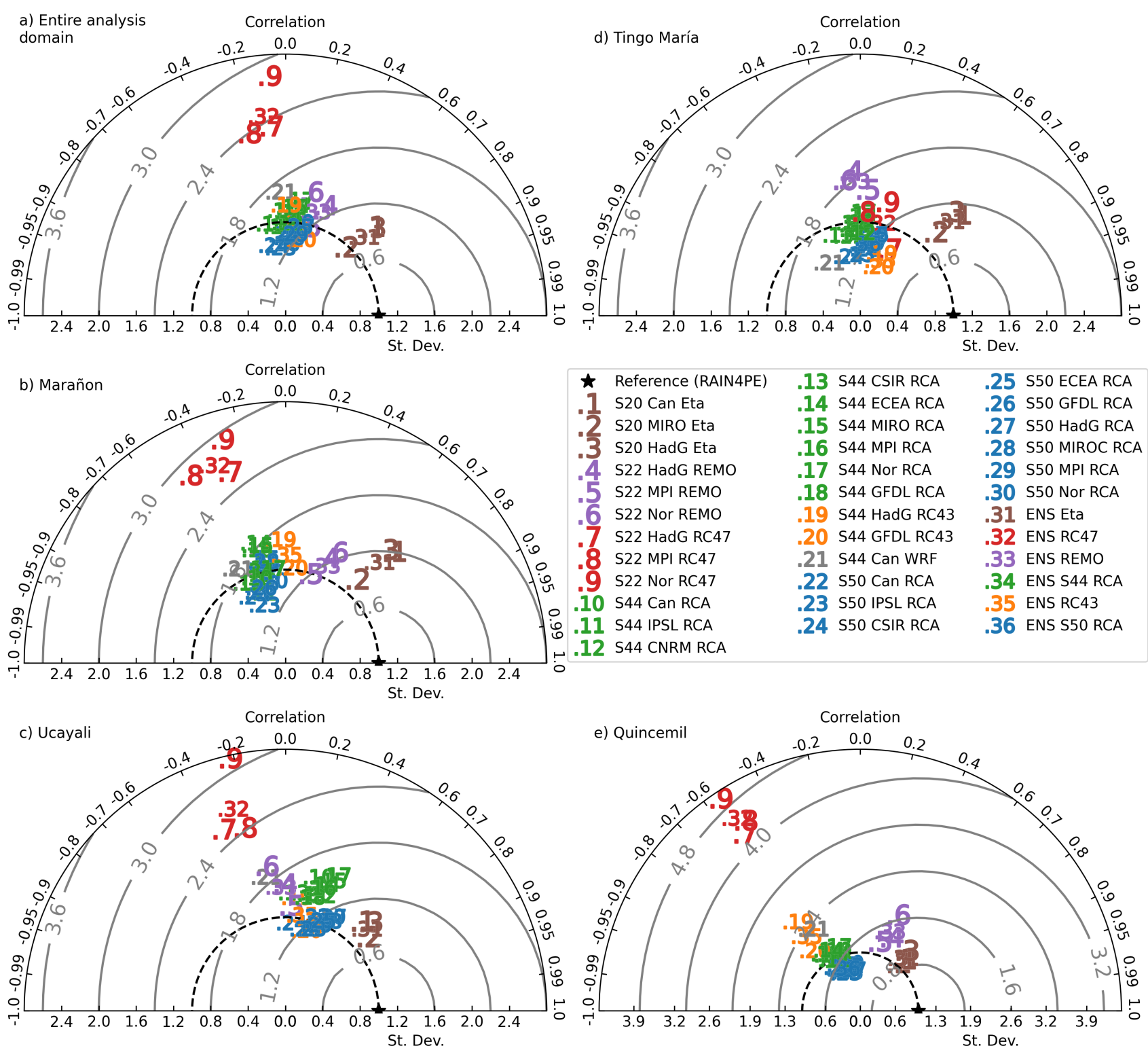
**Figura 2.** Precipitación diaria promedio entre 1981 y 2005 en la cuenca Amazónica occidental para (primera fila) productos grillados observacionales, (segunda y tercera fila) salidas de modelos climáticos regionales (RCM) de resolución S20 y S22, (cuarta y quinta fila) salidas de RCMs de resolución S44, (sexta y séptima fila) salidas de RCMs de resolución S50, y (octava fila) promedios del *ensemble* de RCMs. Los mismos colores sobre los nombres representan simulaciones pertenecientes al mismo RCM, y el mismo código de colores será utilizado a lo largo del manuscrito. Las resoluciones espaciales de los RCMs usados en este estudio (0.2° x 0.2°, 0.22° x 0.22°, 0.44° x 0.44° y 0.5° x 0.5°) son representadas por S20, S22, S44 y S50, respectivamente.

Las simulaciones del RCM Eta captaron bien el gradiente latitudinal de precipitación y una zona continua de *hotspots*, aunque sin máximas claras (Figura 2, segunda fila). El diagrama de Taylor muestra que Eta es el mejor en replicar patrones espaciales de precipitación, con correlaciones espaciales entre 0.3 y 0.6, comparado con RAIN4PE (Figura 3).

Las simulaciones del RCM REMO tienden a sobrestimar la precipitación en la vertiente oriental de los Andes, especialmente en zonas altoandinas al sur de los 10° S, con tasas de 4-8 mm/d frente a los 1-3.5 mm/d

observados, lo que conlleva a sobreestimaciones de hasta 800 %.

El RCM RC47 también sobrestima la precipitación en las cimas de los Andes, particularmente cerca del *hotspot* de Quincemil, con hasta 50 mm/d, una sobreestimación de hasta 2500 %. Además, simula cantidades más secas en la Amazonía baja al sur de 5° S y en la vertiente oriental. Estas simulaciones tienen el desempeño más bajo según el diagrama de Taylor (Figura 3), con varianzas espaciales altas y correlaciones entre -0.6 y 0.1.



**Figura 3.** Diagrama de Taylor en el que se muestran las 30 combinaciones de modelos climáticos globales y regionales (GCM-RCM), así como los 6 *ensembles* de RCMs sobre (a) el dominio de estudio (ver Figura 1), (b) cuenca del Marañón, (c) cuenca del Ucayali, y zona de *hotspots* de precipitación de (d) Tingo María y (e) Quincemil. Los mismos colores representan a las simulaciones pertenecientes al mismo RCM. RAIN4PE fue seleccionado como el producto de referencia. Las resoluciones espaciales de los RCMs usados en este estudio (0.2° x 0.2°, 0.22° x 0.22°, 0.44° x 0.44° y 0.5° x 0.5°), son representadas por S20, S22, S44 y S50, respectivamente.

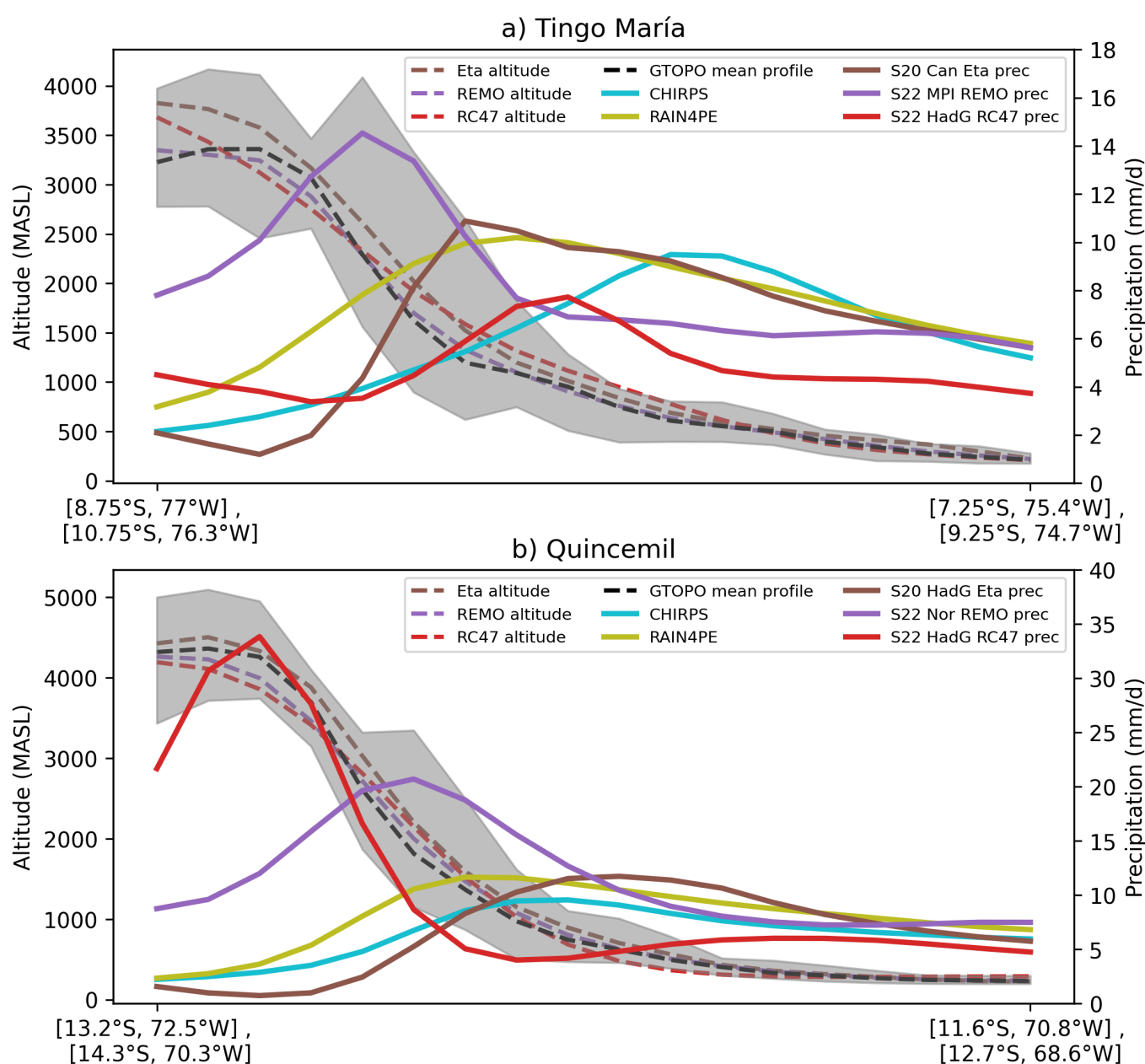
Las simulaciones de resolución S44 y S50 del RCA subestiman la precipitación en los Andes orientales entre 0° a 6° S, especialmente en Ecuador (0.5-1.5 mm/d frente a 6-11 mm/d observados). En contraste, en dicha región, las simulaciones RC43 representan mejor la precipitación. Las simulaciones RCA, forzadas por ECEA, MIRO, Nor y HadG, representan bien el gradiente latitudinal de precipitación y, de forma parcial, el patrón orográfico al sur de 10° S, aunque con sesgos positivos en las montañas.

La media espacial de los *ensembles* de RCMs (Figura 2, última fila) muestra que, aunque Eta (S20) obtiene mejores resultados, incrementar la resolución de S50 a S22 no mejora consistentemente los patrones de precipitación en la región Andes-Amazonía. Esto es notable con la baja eficiencia del modelo RC47 (S22) en diferentes cuencas y *hotspots* (Figura 3).

### 3.2 Precipitación orográfica

RAIN4PE y CHIRPS muestran representaciones heterogéneas de la precipitación a lo largo de ambos *hotspots*, tal como se visualizan en la Figura 4. Específicamente, sobre Tingo María, RAIN4PE (CHIRPS) localiza una máxima pluviométrica en 1150 (600) m s. n. m. Similarmente, en Quincemil, RAIN4PE (CHIRPS) localiza la máxima a 1300 (1000) m s. n. m. Además, vale la pena mencionar que RAIN4PE y CHIRPS también exhiben cantidades variables de precipitación en regiones entre 1500 y 3000 m s. n. m., con RAIN4PE mostrando aproximadamente el doble de las tasas de precipitación en comparación a CHIRPS en este rango altitudinal.

De acuerdo con las simulaciones S20 y S22 seleccionadas, el RCM Eta se acerca más a las cantidades



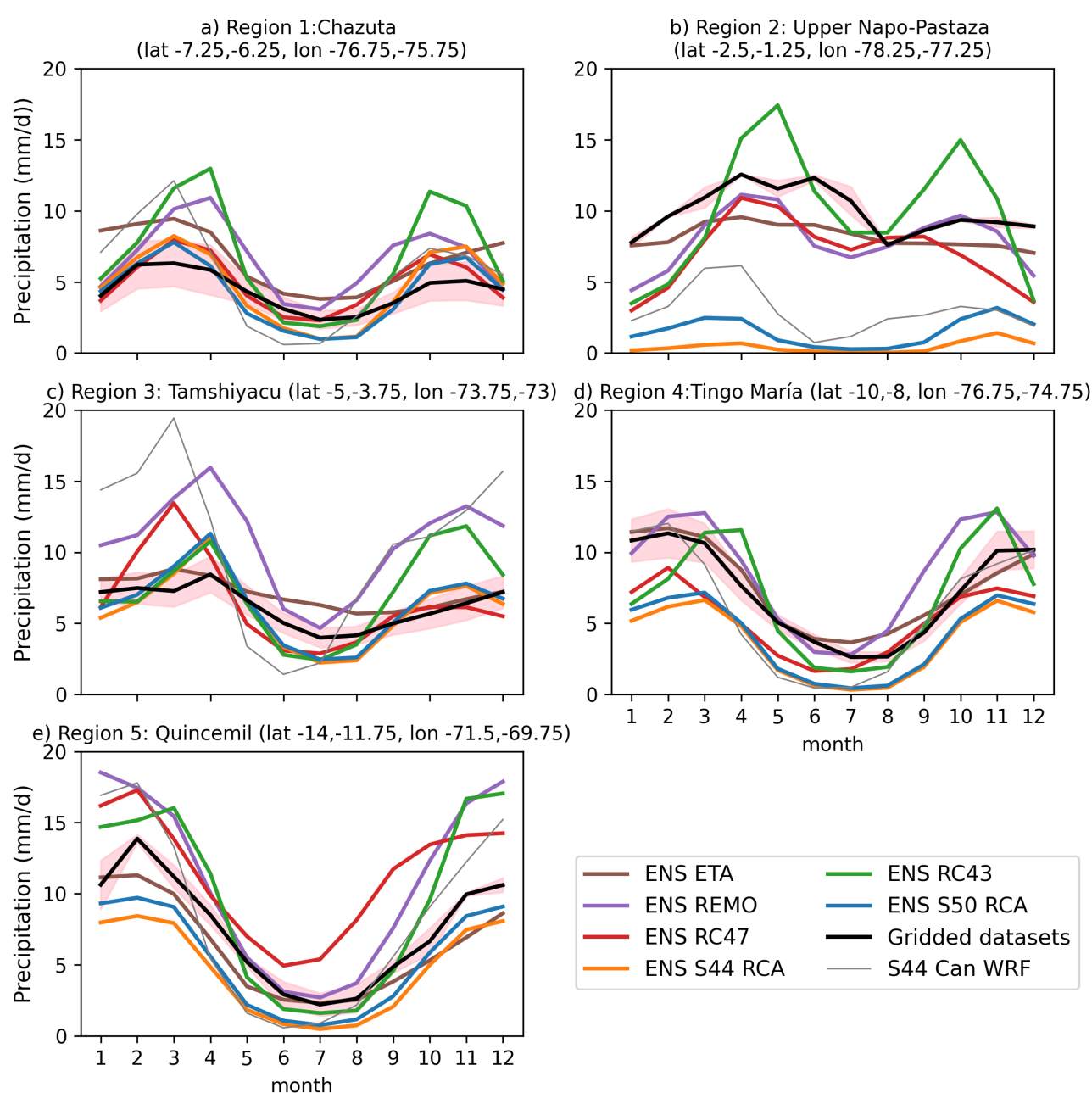
**Figura 4.** Perfiles medios de altitud topográfica (líneas punteadas) y precipitación diaria promedio (líneas sólidas) de CHIRPS, RAIN4PE y combinaciones seleccionadas de combinaciones GCM-RCM de resolución espacial S20 (0.2°) y S22 (0.22°) a lo largo de los transectos de (a) Tingo María y (b) Quincemil. La sombra gris representa la altitud máxima y mínima a lo largo de los transectos en GTOPO30. Los transectos siguen una orientación de barlovento hacia la cima (de derecha a izquierda en esta figura).

y altitudes de la máxima pluviométrica observadas en ambos perfiles, al compararse con RAIN4PE y CHIRPS. Sin embargo, es importante mencionar que las tasas de precipitación al oeste de la máxima disminuyen rápidamente con la altura a lo largo de los perfiles de Tingo María y Quincemil. En Quincemil, RC47 tiende a subestimar significativamente las tasas de precipitación en las pendientes (500-1500 m s. n. m.), con valores de 3.5 mm/d, mientras que las máximas observadas (10-12 mm/d) se localizan entre 1000 y 1500 m s. n. m. Esta combinación también produjo una máxima sobreestimada (media de 35 mm/d) en una altitud de 4100 m s. n. m., mientras que los productos grillados indican tasas de precipitación por debajo de los 5 mm/d a esta altura.

### 3.3 Variabilidad estacional

Las simulaciones RCMs, a lo largo de la región de transición Andes-Amazonía, representan satisfactoriamente, en general, las fluctuaciones estacionales. Sin embargo, algunos RCMs tienden a sobreestimar la precipitación, especialmente durante las temporadas lluviosas en las zonas más ecuatoriales (Figura 5a-5c). No obstante, la mayor parte de los RCMs pueden representar adecuadamente el ciclo bimodal de la precipitación observado en estas regiones.

Para el alto Napo-Pastaza y Tamshiyacu, el *ensemble* de Eta muestra un patrón relativamente uniforme a



**Figura 5.** Regímenes anuales de precipitación media entre 1981 y 2005 para las cinco cajas definidas en la Figura 1. La línea negra gruesa y la sombra rosa alrededor de ella representa el ciclo anual medio y la dispersión (máximo/mínimo) entre RAIN4PE y CHIRPS, respectivamente. Las resoluciones espaciales de los RCMs usados en este estudio ( $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ ,  $0.22^\circ \times 0.22^\circ$ ,  $0.44^\circ \times 0.44^\circ$  y  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ) son representadas por S20, S22, S44 y S50, respectivamente.

lo largo del año. Sin embargo, es importante notar que las simulaciones individuales dentro de este *ensemble* exhiben una variabilidad significativa en sus ciclos estacionales (no mostrado). En contraste, RC43 y REMO producen sobreestimaciones de aproximadamente 100 % durante las temporadas más lluviosas (febrero-abril y octubre-noviembre).

En las regiones más sureñas (Tingo María y Quincemil, Figuras 5d y 5e), los RCMs generalmente exhiben un mayor nivel en términos de las formas y cantidades del ciclo estacional que en las localizaciones más ecuatoriales, aunque algunos sesgos están presentes en *ensembles* específicos. Por ejemplo, en Tingo María, el *ensemble* RC43 y los RCA de S44 y S50 tienden a simular erróneamente un ciclo bimodal. Específicamente, RC43 (REMO) sobreestima la precipitación durante abril y septiembre-noviembre (agosto-noviembre) en comparación con RAIN4PE y CHIRPS.

En Quincemil, todos los ciclos estacionales observados y simulados muestran un régimen unimodal, aunque RC43 y REMO sobreestiman la precipitación de la temporada lluviosa. Además, RC47 sobreestima la precipitación durante agosto-marzo, debido, principalmente, a las excesivas cantidades simuladas en altitudes por encima de los 2000 m s. n. m. Los *ensembles* de RCA también tienden a subestimar la precipitación a lo largo del año.

## 4. Discusiones

Mientras que el modelo de mayor resolución presentó el mejor desempeño (Eta, S20), el impacto de disminuir la resolución espacial de S44-S50 a S20-S22 no parece mejorar la simulación de la precipitación sobre los hotspots de precipitación para todos los RCMs. De hecho, modelos de resolución S22, como RC47, poseen una eficiencia muy limitada en comparación con otras simulaciones de resolución S44-S50. Por lo tanto, además de la resolución horizontal, otras características de la configuración del modelo deben afectar el rendimiento de los modelos (p. ej., las parametrizaciones físicas, las forzantes, el tratamiento de niveles verticales). Se debe tener cuidado en el modelado de alta resolución para configurar adecuadamente a los modelos en relación con las características climáticas de la región en estudio.

En la actualidad, los RCMs de última generación

involucran simulaciones a escalas de convección permitida, caracterizadas por resoluciones espaciales más finas que 4 km. Esto permite, en teoría, el desarrollo numérico explícito de los procesos de convección sin necesidad de esquemas de convección parametrizada. Ese tipo de simulaciones se encuentra a una escala espacial mucho más fina que la de los modelos estudiados aquí (0.2°-0.5°), por lo que es probable que el valor agregado en estas simulaciones sea poco significativo.

A escalas de convección permitida, los RCMs en los Andes tropicales consiguen mejorar significativamente características de la precipitación, como el patrón espacial, los procesos de mesoescala asociados al ciclo diurno de la convección y la estructura interna de sistemas convectivos de mesoescala (p. ej., Flores-Rojas et al., 2021; Junquas et al., 2022; Rosales et al., 2022). Sin embargo, ya que estas resoluciones espaciales se encuentran en la llamada "zona gris" de la convección, algunos procesos convectivos locales pueden ser resueltos explícitamente, mientras que otros todavía requieren el uso de parametrizaciones de convección. Estas incertidumbres pueden ser particularmente notables en cuanto a la interacción entre regímenes de circulación atmosférica tropical y las características fisiogeográficas locales, incluso a resoluciones espaciales muy altas (1 km), lo que sigue siendo un desafío para la comunidad de modelado climático (Junquas et al., 2022). Esto debe tomarse en cuenta en futuros estudios.

## 5. Conclusiones

Se realizó una comparación y evaluación de la eficiencia de 30 simulaciones GCM-RCM en el marco de trabajo de CORDEX-SAM y el RCM Eta en la representación de las climatologías espacio-temporales de la precipitación en la región de transición Andes-Amazonía durante el periodo "histórico" (1981-2005). Estas simulaciones resultan de la combinación de 6 RCMs y 10 GCMs a resoluciones espaciales comprendidas entre 0.2° y 0.5°. La estacionalidad suele estar bien representada, lo que es particularmente notable en zonas complejas como la Amazonía ecuatorial, con dos periodos húmedos al año. Sin embargo, varias simulaciones de RCMs tienen dificultades para replicar los patrones espaciales de precipitación orográfica, generalmente

sobreestimándolos durante los periodos lluviosos.

En este conjunto de simulaciones, cuando se trata de reproducir la precipitación orográfica sobre la región de transición Andes-Amazonía (específicamente, el RCM Eta a resolución de  $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ ), la mejor eficiencia se observa en aquellas con la mayor resolución espacial. Sin embargo, al simular varias características de la precipitación orográfica, esta relación no se mantiene con las simulaciones de resolución  $0.22^\circ$ , en comparación con las simulaciones de resolución más gruesa ( $0.44^\circ$ - $0.5^\circ$ ). Por ejemplo, en el modelo RC47 de resolución  $0.22^\circ$  se pueden alcanzar sobreestimaciones de hasta 2500 % en algunas localizaciones de la zona de transición Andes-Amazonía. Al abordar estos sesgos en futuros esfuerzos de *downscaling* dinámico en esta región, se debe considerar las escalas de convección permitida y la selección de conjuntos de parametrizaciones físicas adaptadas para altas resoluciones y la complejidad topográfica.

Finalmente, los resultados de este estudio ofrecen perspectivas valiosas que pueden mejorar la aplicación de este conjunto de simulaciones climáticas regionales para científicos climatólogos y otros involucrados en estudios de impactos y vulnerabilidad a escalas locales bajo escenarios del clima futuro.

## Referencias

- Ambrizzi, T., Reboita, M. S., Da Rocha, R. P., & Llopart, M. (2019). The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1), 98-120. <https://doi.org/10.1111/nyas.13932>
- Armijos, E., Crave, A., Espinoza, J. C., Filizola, N., Espinoza-Villar, R., Ayes, I., Fonseca, P., Fraizy, P., Gutierrez, O., Vauchel, P., Camenen, B., Martinez, J. M., Dos Santos, A., Santini, W., Cochonneau, G., & Guyot, J. L. (2020). Rainfall control on Amazon sediment flux: synthesis from 20 years of monitoring. *Environmental Research Communications*, 2(5), 051008. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab9003>
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770-785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Cazorla, M., Gallardo, L., & Jimenez, R. (2022). The complex Andes region needs improved efforts to face climate extremes. *Elementa Science of the Anthropocene*, 10(1), 00092. <https://doi.org/10.1525/elementa.2022.00092>
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., Nobre, P., & Marengo, J. (2014). Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 3(5), 438-454. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>
- Espinoza, J. C., Chavez, S., Ronchail, J., Junquas, C., Takahashi, K., & Lavado, W. (2015). Rainfall hotspots over the southern tropical Andes: Spatial distribution, rainfall intensity, and relations with large-scale atmospheric circulation. *Water Resources Research*, 51(5), 3459-3475. <https://doi.org/10.1002/2014WR016273>
- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2022). A Novel High-Resolution Gridded Precipitation Dataset for Peruvian and Ecuadorian Watersheds: Development and Hydrological Evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23(3), 309-336. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0285.1>
- Flores-Rojas, J. L., Moya-Álvarez, A. S., Valdivia-Prado, J. M., Piñas-Laura, M., Kumar, S., Karam, H. A., Villalobos-Puma, E., Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2021). On the dynamic mechanisms of intense rainfall events in the central Andes of Peru, Mantaro valley. *Atmospheric Research*, 248(105188). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105188>
- Giorgi, F., & Gutowski, W. J. (2015). Regional Dynamical Downscaling and the CORDEX Initiative. En *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 467-490. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021217>
- Hoorn, C., Wesselingh, F. P., ter Steege, H., Bermudez, M. A., Mora, A., Sevink, J., Sanmartín, I., Sanchez-Meseguer, A., Anderson, C. L., Figueiredo, J. P., Jaramillo, C., Riff, D., Negri, F. R., Hooghiemstra, H., Lundberg, J., Stadler, T., Särkinen, T., & Antonelli, A. (2010). *Amazonia Through Time: Andean Uplift, Climate Change, Landscape Evolution, and Biodiversity*. *Science*, 330(6006), 927-931. <https://doi.org/10.1126/science.1194585>
- Junquas, C., Heredia, M. B., Condom, T., Ruiz-Hernández, J. C., Campozano, L., Dudhia, J., Espinoza, J. C., Menegoz, M., Rabatel, A., & Sicart, J. E. (2022). Regional climate modeling of the diurnal cycle of precipitation and associated atmospheric circulation patterns over an Andean glacier region (Antisana, Ecuador). *Climate Dynamics*, 58(11-12), 3075-3104. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06079-y>
- Junquas, C., Takahashi, K., Condom, T., Espinoza, J.-C., Chavez, S., Sicart, J.-E., & Lebel, T. (2018). Understanding the influence of orography on the precipitation diurnal cycle and the associated atmospheric processes in the central Andes. *Climate Dynamics*, 50(11-12), 3995-4017. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3858-8>
- Rosales, A. G., Junquas, C., da Rocha, R. P., Condom, T., & Espinoza, J. C. (2022). Valley-Mountain Circulation Associated with the Diurnal Cycle of Precipitation in the Tropical Andes (Santa River Basin, Peru). *Atmosphere*, 13(2), 344. <https://doi.org/10.3390/atmos13020344>

Segura, H., Junquas, C., Espinoza, J. C., Vuille, M., Jauregui, Y. R., Rabatel, A., Condom, T., & Lebel, T. (2019). New insights into the rainfall variability in the tropical Andes on seasonal and interannual time scales. *Climate Dynamics*, 53(1), 405-426. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4590-8>

Staal, A., Tuinenburg, O. A., Bosmans, J. H. C., Holmgren, M., Van Nes, E. H., Scheffer, M., Zemp, D. C., & Dekker, S. C. (2018). Forest-rainfall cascades buffer against drought across the Amazon. *Nature Climate Change*, 8(6), 539-543. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0177-y>

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>