

# REGIONALIZACIÓN DE LA LLUVIA EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO MADEIRA BASADA EN LA VARIABILIDAD INTERANUAL Y DECADAL

Jorge Molina-Carpio<sup>1</sup>, Irma Ayes Rivera<sup>2</sup>,  
Daniel Espinoza-Romero<sup>1</sup>, Wilmar Loaiza Cerón<sup>3</sup>,  
Jhan-Carlo Espinoza<sup>4</sup>, Josyane Ronchail<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

<sup>2</sup> Alliance Biodiversity-International Center of Tropical Agriculture, Tegucigalpa, Honduras

<sup>3</sup> Universidad del Valle, Calí, Colombia

<sup>4</sup> Université Grenoble Alpes, IRD, CNRS. Francia y Universidad Católica del Perú. Lima, Perú

<sup>5</sup> Sorbonne Université, IRD, CNRS, MNHN, Paris, France



Jorge Molina es investigador y profesor de la Universidad Mayor de San Andrés, Instituto de Hidráulica e Hidrología, La Paz, Bolivia. Su investigación se centra en los procesos hidroclimáticos en los Andes y la Amazonía, y el impacto del cambio climático y del uso del suelo en los recursos hídricos.

**Palabras clave:** Variabilidad interanual, regionalización de precipitaciones, Madeira, cuenca amazónica

Citar como Molina-Carpio, J., Ayes, I., Espinoza, D., Loaiza, C., Espinoza, J-C., Ronchail, (2024). Regionalización de la lluvia en la cuenca alta del río Madeira basada en la variabilidad interanual y decadal. *Boletín científico El Niño*, Instituto Geofísico del Perú, vol. 11 n.º 08, págs. 4-10.

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

Esta investigación representó las lluvias mensuales en la cuenca alta del río Madeira (Perú, Bolivia, Brasil) mediante la división de la misma en 10 regiones con comportamiento similar, así como la conexión entre estas y los patrones de lluvia y temperatura en los océanos Pacífico y Atlántico. Esto puede mejorar la capacidad de pronóstico y ayudar a los tomadores de decisiones para mejorar la gestión de los recursos hídricos y la planificación agrícola en dicha cuenca, y fortalecer las acciones de preparación ante sequías e inundaciones.

## Resumen

El estudio de Molina-Carpio et al. (2023) tuvo como objetivo identificar regiones de lluvia homogéneas dentro de la cuenca alta del río Madeira (Bolivia, Perú y Brasil), que abarca 975.000 km<sup>2</sup> y tiene un rango de

elevación de 50 a 6450 m s. n. m. Para ello, se usaron series mensuales de 146 estaciones terrestres de los 3 países. Sin imponer restricciones espaciales, el análisis de Agrupamiento Jerárquico (AJ) y el Análisis de Componentes Principales (ACP) agruparon de manera óptima 146 estaciones (1980-2016) en 10 regiones

homogéneas distribuidas a lo largo de los Andes y la llanura amazónica. Luego, al aplicar el ACP a las series de lluvias estacionales y vincular los componentes principales con la temperatura de la superficie del mar e índices oceánicos, se obtuvo una perspectiva de los principales moduladores a gran escala de la variabilidad espacio-temporal de las lluvias en esta cuenca, en particular del rol de los océanos Pacífico tropical y Atlántico según la estación del año.

## 1. Introducción

La cuenca del Alto Madeira hasta Porto Velho ocupa la porción suroeste de la cuenca amazónica, extendiéndose sobre 975.000 km<sup>2</sup> con un rango de elevación de 50 a 6450 m s. n. m. (Figura 1c). Esta se caracteriza por poseer una gran diversidad climática, geomorfológica y biológica. Muy influenciada por los Andes, la cuenca del Alto Madeira presenta una compleja variabilidad espacio-temporal, con un rango de lluvias que va desde los 300 mm/año, en valles al oeste de la cordillera oriental, hasta 6000 mm/año en la región Andes-Amazonía (Molina-Carpio et al. 2017). La lluvia en esta cuenca es altamente dependiente del reciclaje de la vegetación amazónica (Satyamurty et al., 2013, Sorí et al., 2018) y de la interacción con los Andes (Ronchail y Gallaire, 2006; Espinoza Villar et al., 2009). Más del 50 % de la lluvia anual ocurre durante el verano austral, entre diciembre y marzo.

A diferencia de la mayor parte de la Amazonía, estudios previos no hallaron una relación significativa entre la lluvia sobre esta cuenca y la variabilidad de la temperatura del mar en el Pacífico ecuatorial (El Niño-Oscilación Sur, ENOS) durante el verano austral y a escala interanual. En cambio, sí se observaron relaciones negativas de la lluvia y el escurrimiento durante el invierno austral (junio-julio-agosto, JJA), con la temperatura del océano Atlántico norte tropical (TNA, por sus siglas en inglés). Existen muy pocos estudios sobre la variabilidad decadal o de escala mayor en la cuenca del Madeira (p. ej., Zanin & Satyamurthy, 2020), los cuales, en su mayor parte, la asocian con las variabilidades de baja frecuencia de los océanos Atlántico y Pacífico.

En nuestro conocimiento, ningún estudio previo ha intentado una regionalización en la cuenca del Alto Madeira que se haya basado en la variabilidad interanual y decenal de las lluvias, y con un enfoque

multiestacional. Por ello, y utilizando registros mensuales de 146 estaciones terrestres durante el período 1980-2016, se resumen en este artículo los resultados más resaltantes del estudio de Molina-Carpio et al. (2023, <https://doi.org/10.1002/joc.8211>), el cual tuvo como objetivos (1) definir regiones pluviométricas homogéneas mediante el uso de agrupamiento jerárquico y análisis de componentes principales (ACP) de series temporales mensuales, (2) investigar el valor de la regionalización para interpretar la variabilidad de las lluvias e (3) identificar los principales moduladores de la variabilidad espacio-temporal de las lluvias en esta cuenca.

## 2. Datos y métodos

Se recopiló una base de datos de 146 estaciones de los Servicios Nacionales de Meteorología e Hidrología de Perú y Bolivia, y de la Agencia Nacional de Aguas de Brasil, ubicadas dentro de la cuenca alta del río Madeira y en un radio de 50 km alrededor de la misma. Se estableció como criterio de selección que las estaciones tuvieran menos del 20 % de información faltante, con excepciones en regiones de baja densidad de estaciones (p. ej., Quincemil en Perú). La mayoría de las estaciones de los países andinos provienen del estudio DECADE (Data on Climate and Extreme Weather for the Central Andes, Hunziker et al., 2018), cuyos datos han pasado el respectivo control de calidad. Previo al análisis de agrupamiento, y con el propósito de remover la estacionalidad anual, cada serie fue transformada en anomalías estandarizadas mensuales.

La temperatura superficial del mar (SST, por sus siglas en inglés) provino de los datos de la versión 5 del Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST, por sus siglas en inglés), con una resolución de 2° x 2°. Adicionalmente, se usaron los siguientes índices oceánicos: (1) N4 índice del Pacífico tropical central; (2) índices C y E de ENOS (Takahashi et al., 2011); (3) oscilación decadal del Pacífico; (4) oscilación multidecadal del Atlántico; (5) Atlántico tropical del sur; y (6) Atlántico tropical del norte.

Metodológicamente, se empleó el análisis de componentes principales (ACP) para eliminar el ruido antes del agrupamiento. El análisis de ACP fue aplicado a las series de anomalías mensuales, previamente evaluadas con la prueba de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) para determinar si el análisis factorial puede ser usado

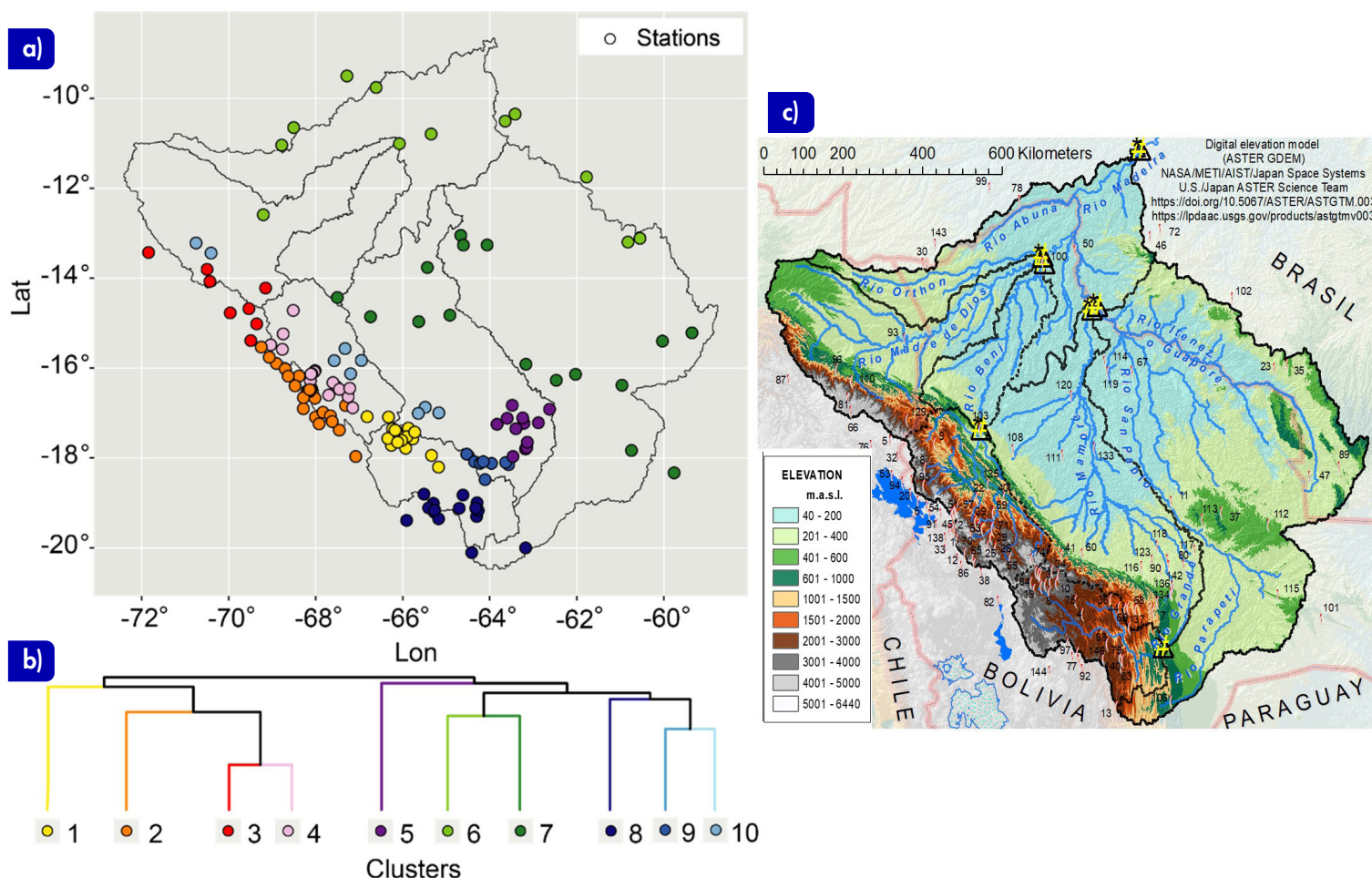
en el conjunto de datos (Kaiser, 1970; Sheskin, 2007). Se utilizó el criterio de North (North et al., 1982) para determinar la separación apropiada entre componentes (CPs). Además, se calculó la distancia euclidiana para estimar la semejanza entre las observaciones, y se utilizó el método de varianza mínima de Ward para identificar la separación entre grupos. Finalmente, se utilizó el número de Silhouette (S) (Rousseeuw, 1987) para determinar el número óptimo de grupos homogéneos.

El análisis interanual de las lluvias se realizó para el año hidrológico (de septiembre a agosto) y a escala trimestral. Las series temporales de las regiones se calcularon promediando las anomalías estacionales estandarizadas de las estaciones que componen cada grupo, y luego se correlacionaron con índices oceánicos seleccionados para identificar algunos de los moduladores de esa variabilidad. Por ser un análisis exploratorio, únicamente se evaluaron las primeras 4 componentes de cada trimestre (aquí solamente mostramos la primera), las cuales fueron correlacionadas con las SST del Pacífico y Atlántico para identificar regiones de posible influencia. Por último, descompusimos las series de tiempo en el espacio tiempo-frecuencia a través del uso de ondeletas de Morlet (1983).

### 3. Resultados y discusión

Con un KMO de 0.90 se determinó la multicolinealidad entre las estaciones. El criterio de North indicó que existían 7 CPs independientes. Luego de probar entre conjuntos de CPs, observamos que las primeras 10 CPs proveen una buena solución en términos de regiones geográficas contiguas y homogéneas (Figura 1). Dado que la cuenca del Madeira se caracteriza por una gran variabilidad climática (Molina-Carpio et al., 2017), se probó el uso de más CPs, pero con resultados menos coherentes. La Figura 1a muestra las regiones identificadas y la Figura 1b el dendrograma correspondiente. Únicamente, se identificaron 3 regiones en la llanura amazónica: el grupo 5 alrededor de la ciudad de Santa Cruz, el grupo 6 en el norte y el grupo 7 en el centro-sur de la cuenca. Dos grupos (9 y 10) se identificaron como subandinos y 5 grupos (1-4 y 8) en los Andes.

El número de estaciones por cada región, con su respectivo número Silhouette (S) y lluvia promedio anual, se muestra en la Tabla 1. El número S refleja que las regiones 1, 3, 5 y 9 están mejor agrupadas que las regiones 7, 8 y 10. En la llanura solamente se identificaron 3 regiones, a pesar de que cubren un 77 % del área de estudio. Es posible que en la llanura



**Figura 1.** a) Mapa que muestra la distribución de las estaciones y su agrupamiento por colores, (b) dendrograma resultado del Análisis Jerárquico y (c) área de estudio (adaptada de <https://doi.org/10.1002/joc.8211>).

podieran existir más regiones; sin embargo, la baja densidad de estaciones no permitió identificarlas. Por otro lado, debido a su alta variabilidad y complejidad, la región 10, correspondiente al *hotspot* lluvioso del subandino, muestra un número S bajo. Estudios previos (Espinoza-Villar et al., 2009) identificaron para la cuenca alta del río Madeira 4 regiones en los Andes y 2 en la llanura, usando el Método del Vector Regional (MVR) en las series anuales de toda la cuenca del Amazonas. En cambio, 8 regiones fueron identificadas empleando el MVR en las estaciones de Bolivia (Molina-Carpio et al., 2017), en su mayor parte similares a las regiones en el presente estudio. Sin embargo el estudio de Molina-Carpio et al. (2017) no identificó la región 6 ni tampoco pudo diferenciar regiones a ambos lados de la cordillera, en las subcuencas de los ríos Beni y Madre de Dios.

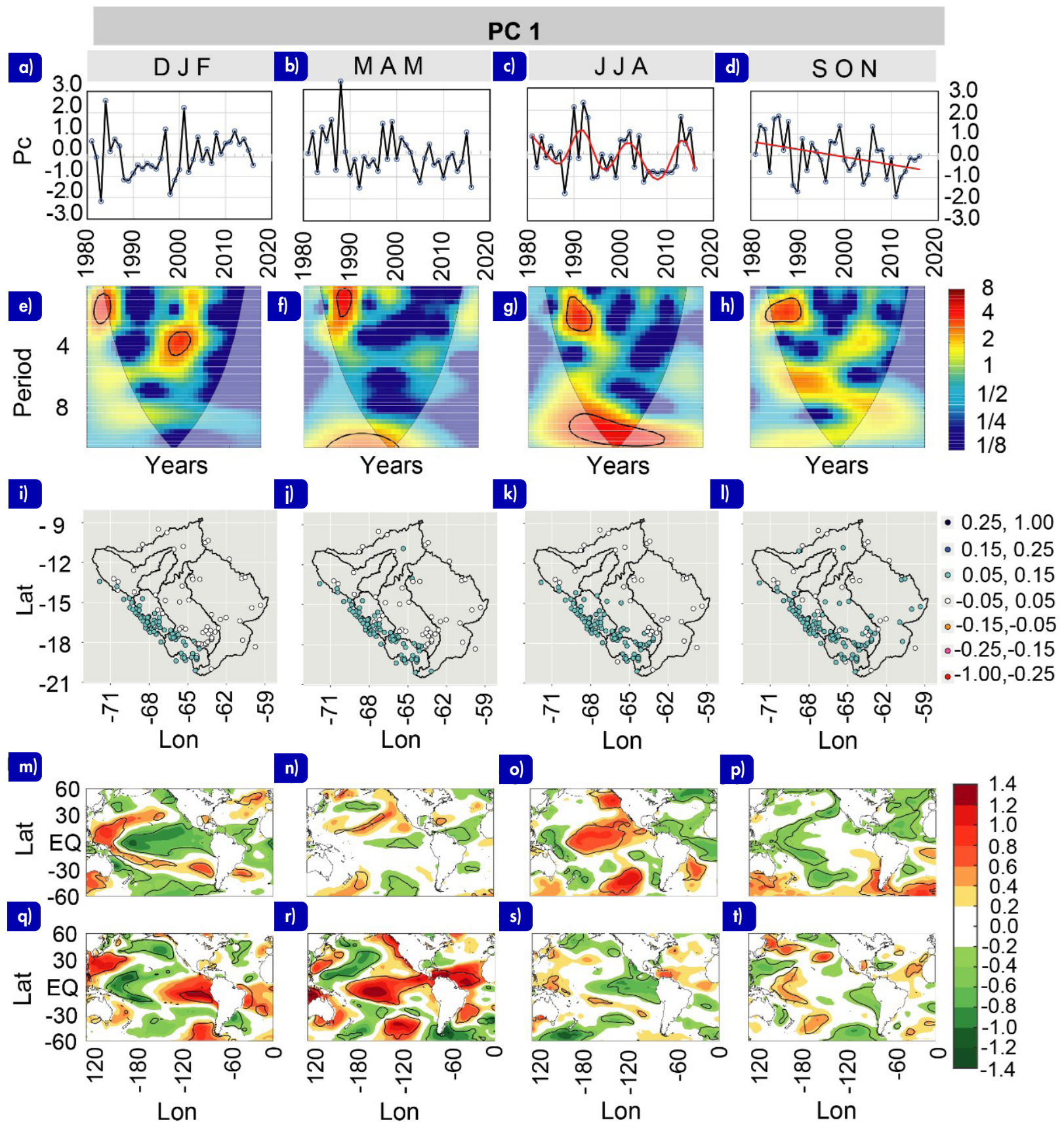
Con relación al análisis exploratorio de las relaciones con los índices oceánicos, se identificaron relaciones interanuales negativas significativas con el Pacífico tropical (índices E y C) para las 5 regiones andinas durante la temporada húmeda (diciembre-enero-febrero; DJF, por sus siglas en inglés) y, en menor medida, en marzo-abril-mayo (MAM, Tabla 1). En la llanura, la variabilidad interanual está relacionada negativamente con el Atlántico tropical (norte y sur) en MAM, junio-julio-agosto (JJA) y septiembre-octubre-

noviembre (SON). Además, se encontraron relaciones positivas, relativamente nuevas, entre la variabilidad de las lluvias durante DJF en las regiones de Santa Cruz y las tierras bajas del norte con los índices del Pacífico tropical central y del Atlántico norte tropical, respectivamente.

El análisis de componentes principales (CPs) a escala trimestral (Figura 2) mostró que la primera componente (CP1) de DJF representa el 28 % de la varianza, con una disminución de la variabilidad interanual posterior después de 2003 (Figura 2a). La CP1 DJF muestra una correlación positiva pero débil con las estaciones andinas, siendo nula la correlación con estaciones de la llanura. El análisis de composiciones muestra que los valores positivos de CP1 durante DJF se relacionan con condiciones La Niña (Figura 2m), mientras que los valores negativos se relacionan con un calentamiento en la región Niño 1+2 y Niño 3. La CP1 MAM (32 % de la varianza) presenta una correspondencia espacial con las estaciones muy similar a la de DJF. Su variabilidad temporal está asociada con el enfriamiento del océano Pacífico y el océano Atlántico tropical norte para los valores positivos, y con el calentamiento de las mismas regiones oceánicas para los años con valores negativos. La CP1 JJA (31 % de la varianza) presenta una variabilidad decadal significativa en la

**Tabla 1.** Regiones homogéneas en la cuenca alta del río Madeira, así como sus valores anuales promedio de lluvia y la relación con índices oceánicos para los trimestres. El valor en paréntesis refleja una relación positiva (+) o negativa (-) (adaptada de <https://doi.org/10.1002/joc.8211>).

Región	Fisiografía	Número de estaciones	Silhouette S	Lluvia promedio (mm/año)	Desviación estándar (mm/año)	DJF	MAM	JJA	SON
1	Valle de Cochabamba	18	0.52	549	131	E(-)	C(-)	PDO	TNA(-)
2	Altiplano (este)	28	0.43	558	111	E(-)			
3	Andes (norte)	8	0.54	839	151	E(-)	AMO(-)	TNA(-) / AMO(-)	C(+)
4	Yungas de La Paz	19	0.38	1393	233	E(-)/C(-)	C(-)		
5	Planicie de Santa Cruz	13	0.60	1520	310	C(+)	TSA(-)	AMO(-) / TSA(-)	
6	Planicie (norte)	12	0.48	1892	316	TNA(+)/AMO(+)		C(+)/TNA(-)	AMO(-)
7	Planicie (centro-sur)	16	0.27	1513	300		AMO(-)	TSA(-)	TSA(-)
8	Andes (sur)	15	0.29	646	149	E(-)			E(+)
9	Valles mesotermiales SC	8	0.63	789	146		C(-)		
10	Hotspot y subandino	9	0.31	3480	627			TSA(-)	TSA(-)

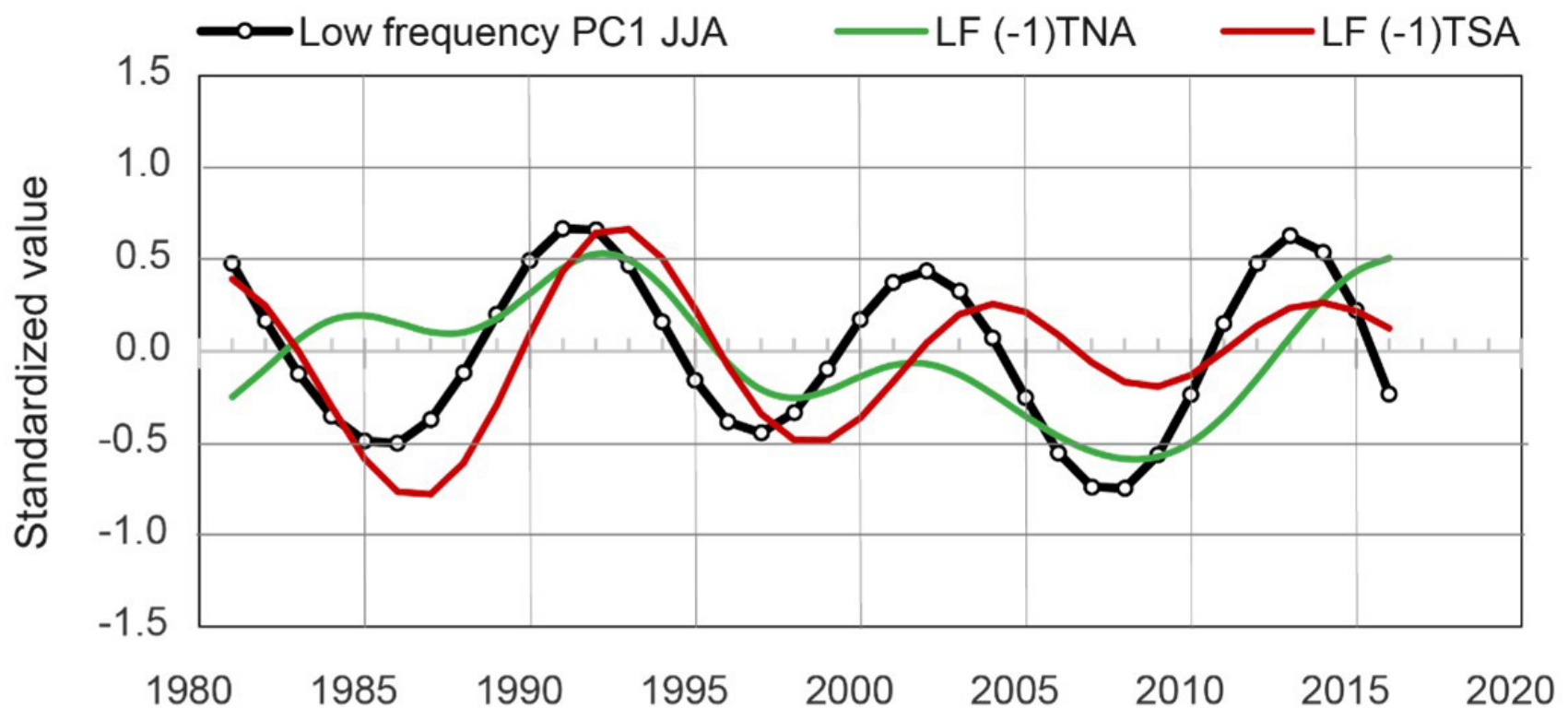


**Figura 2.** Series temporales trimestrales (a-d), transformada de ondeletas continua (CWT, por sus siglas en inglés) (e-h), relaciones espaciales de CP1 (i-l), análisis de composiciones de SST (en °C) por encima de 1 desviación (m-p) y por debajo de 1 desviación (q-t). Los contornos indican las regiones estadísticamente significativas en un 95 % de intervalo de confianza (<https://doi.org/10.1002/joc.8211>).

banda de 8-10 años (Figura 2g). En JJA, no solo las estaciones andinas muestran correlaciones positivas con la CP1, sino también estaciones subandinas y de llanura cercanas a los Andes (Figura 2k). Durante este trimestre, los años con anomalías positivas están asociados con condiciones cálidas en el Pacífico y enfriamiento del Atlántico tropical (Figuras 2o y 2s).

La CP1 SON (29 % de varianza) tiene como característica principal una tendencia negativa (Figura 2d; MK < 0.05). Debido a estos resultados

en JJA y SON, realizamos análisis adicionales. La Figura 3 muestra que existen relaciones negativas significativas entre los índices CP1-JJA, TNA-JJA ( $r = -0,51$ ,  $p < 0,05$ ) y TSA-JJA ( $r = -0,61$ ,  $p < 0,05$ ), de baja frecuencia y sin tendencia. CP1 JJA también tiene una correlación positiva significativa (no mostrada) con las periodicidades decenales de SST del Pacífico central. La serie CP1-SON tiene una correlación negativa significativa con el TNA suavizado ( $r = -0,75$ ,  $p < 0,05$ ) y una correlación positiva ( $r = 0,80$ ,  $p < 0,05$ ) con el índice PDO suavizado.



**Figura 3.** Valores estandarizados de periodicidades de baja frecuencia (>8 años) para la CP1-JJA (línea negra), (-1) TNA (línea verde) y (-1) TSA (línea roja) (adaptada de <https://doi.org/10.1002/joc.8211>).

## 4. Consideraciones finales y perspectivas

El uso de series de anomalías mensuales estandarizadas permitió identificar 10 regiones pluviométricas en la cuenca alta del río Madeira, con un nivel de consistencia espacial alto. A pesar de que un análisis más profundo de los mecanismos dinámicos asociados a la variabilidad pluviométrica en esta cuenca y los moduladores a distintas escalas estuvo fuera del alcance de este estudio, la regionalización aquí presentada, además de aportar al entendimiento de las relaciones océano-atmósfera con las lluvias en esta cuenca, puede también apoyar múltiples aplicaciones, por ejemplo, en el pronóstico estacional, una necesidad urgente para la región, donde las sequías e inundaciones parecen ser cada vez más frecuentes (Maillard et al., 2020). En un futuro próximo, también sería valiosa para proyectos de infraestructura, gestión de ecosistemas y recursos hídricos, y estudios sobre los impactos de los cambios globales y regionales. Las proyecciones hidrológicas y cambios de la relación atmósfera-biosfera, basadas en escenarios de cambio climático, podrían emplear esta regionalización para sus evaluaciones.

Se invita a los lectores a ver los resultados del análisis de la variabilidad decadal y las tendencias en el artículo publicado en Molina-Carpio et al. (2023).

## Agradecimientos

J. M.-C. y D. E.-R. contaron con el apoyo de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA; La Paz, Bolivia) en el marco del programa Hydrogéochimie du Bassin Amazonien (HYBAM). WLC contó con el apoyo de la Universidad del Valle (Cali, Colombia) y beca "CAPES/BRASIL" 88887.701371/2022-00 para el desarrollo de una investigación posdoctoral en el Programa de Posgrado en Clima y Medio Ambiente (CLIAMB, INPA/UEA). J-C E. ha contado con el apoyo del proyecto francés AMANECER-MOPGA financiado por ANR e IRD (ANR-18-MPGA-0008). Agradecemos al SENAMHI de Bolivia y Perú y a la ANA de Brasil por los datos meteorológicos.

## Referencias

- Espinoza Villar, J. C., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F., Lavado, W., De Oliveira, E., Pombosa, R., & Vauchel, P. (2009) Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). *International Journal of Climatology*, 29(11), 1574–1594. <https://doi.org/10.1002/joc.1791>
- Hunziker, S., Brönnimann, S., Calle, J., Moreno, I., Andrade, M., Ticona L., Huerta, A., & Lavado-Casimiro, W. (2018). Effects of undetected data quality issues on climatological analyses. *Climate of the Past*, 14(1): 1–20. <https://doi.org/10.5194/cp-14-1-2018>
- Kaiser, H. F. (1970). A second generation little jiffy. *Psychometrika*, 35(4): 401–415. <https://doi.org/10.1007/BF02291817>

Maillard, O., Vides-Almonacid, R., Flores-Valencia, M., Coronado, R., Vogt, P., Vicente-Serrano, S. M., Azurduy, H., Anívarro, R., & Cuellar, R. L. (2020). Relationship of Forest Cover Fragmentation and Drought with the Occurrence of Forest Fires in the Department of Santa Cruz, Bolivia. *Forests*, 11(9), 910. <https://doi.org/10.3390/f11090910>

Molina-Carpio, J., Espinoza, J. C., Vauchel, P., Ronchail, J., Gutierrez, Caloir, B., Guyot, J. L., & Noriega, L. (2017). Hydroclimatology of the Upper Madeira River basin: spatio-temporal variability and trends. *Hydrological Sciences Journal*, 62(6): 911–927. <https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1267861>

Molina-Carpio, J., Rivera, I. A., Espinoza-Romero, D., Cerón, W. L., Espinoza, J. C., & Ronchail, J. (2023). Regionalization of rainfall in the upper Madeira basin based on interannual and decadal variability: A multi-seasonal approach. *International Journal of Climatology*, 43(14), 6402–6419.

Morlet, J. (1983). *Sampling Theory and Wave Propagation*. In: Chen, C.H. (eds). *Issues in Acoustic Signal – Image Processing and Recognition*. NATO ASI Series, vol 1. Springer, 233–261. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-82002-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-642-82002-1_12)

North, G. R., Bell, T. L., Cahalan, R. F., & Moeng, F. J. (1982). Sampling Errors in the Estimation of Empirical Orthogonal Functions. *Monthly Weather Review*, 110(7), 699–706. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2)

Ronchail, J., & Gallaire R. (2006). ENSO and rainfall along the Zongo valley (Bolivia) from the Altiplano to the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, 26(9): 1223–1236. <https://doi.org/10.1002/joc.1296>

Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)

Satyamurty, P., da Costa, C. P. W. & Manzi, A. O. (2013). Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(1): 195–209. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0637-7>

Sheskin D. (2007). *Handbook of Parametric and Nonparametric Statistical Procedures* (Fourth Edition). Taylor & Francis.

Sorí, R., Marengo, J., Nieto, R., Drumond, A., & Gimeno, L. (2018). The atmospheric branch of the hydrological cycle over the Negro and Madeira River basins in the Amazon region. *Water*, 10(6), 738. <https://doi.org/10.3390/w10060738>

Takahashi, K., Montecinos, A., Goubanova, K., & Dewitte, B. (2011). ENSO regimes: Reinterpreting the canonical and Modoki El Niño. *Geophysical Research Letters*, 38(10). <https://doi.org/10.1029/2011GL047364>

Zanin P.R. & Satyamurty P. (2020). Hydrological processes interconnecting the two largest watersheds of South America from multi-decadal to inter-annual time scales: A critical review. *International Journal of Climatology*, 40(9): 4006–4038. <https://doi.org/10.1002/joc.6442>