

## DIVULGACIÓN CIENTÍFICA

# LOS EFECTOS DEL BOSQUE EN LA COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DE LA LLUVIA DEL NOROESTE AMAZÓNICO

**Angela Ampuero<sup>1</sup>, Nicolás M. Strikis<sup>2</sup> y James Apaéstegui<sup>3</sup>**

## RESUMEN

En la Amazonía, intensos procesos de reciclaje de humedad afectan significativamente los regímenes pluviométricos, así como la composición isotópica de la precipitación ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ). En este trabajo se presenta un registro de cuatro años de la composición isotópica de la lluvia en el noroeste de la cuenca amazónica (región San Martín, Perú). Este registro es evaluado considerando la historia de las masas de aire que transportan humedad hasta el área de estudio. Para este objetivo se utiliza el análisis de retro-trayectorias de viento, observaciones satelitales de lluvia, índice de área foliar (LAI, por sus siglas en inglés) y reciclaje de humedad simulado en los caminos de los flujos de humedad atmosférica. Los resultados muestran que el reciclaje de humedad en el bosque ejerce un control significativo en la composición isotópica de la lluvia en el noroeste de la cuenca amazónica, especialmente sobre el exceso de deuterio (dxs), durante la estación seca ( $r = 0.71$ ).

Utilizando registros isotópicos de agua de lluvia fósil, atrapada en estalagmitas de la misma región, se reconstruyen los cambios en el dxs para el Holoceno (últimos 10 000 años). Se reconoce una compatibilidad entre el registro isotópico y las fases de expansión forestal en la Amazonía que se infieren de registros polínicos. Esto sugiere una retroalimentación entre la expansión del bosque y el reciclaje de humedad. La precipitación de invierno se incrementó después del Holoceno Medio como respuesta a los cambios en la insolación en el hemisferio sur y el incremento en el reciclaje de humedad asociado con la expansión del bosque. Por lo tanto, los efectos del bosque son significativos en el ciclo hidrológico actual y deben ser considerados al interpretar registros paleoclimáticos.

El artículo científico original se encuentra en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2019JD031445>

**Palabras clave:** *Composición isotópica de la lluvia, exceso de deuterio, Amazonía, interacción bosque-atmósfera, interpretación de proxies isotópicos, Holoceno.*

## AFILIACIÓN:

1. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brazil.
2. Universidade Federal Fluminense (UFF), Río de Janeiro, Brazil.
3. Instituto Geofísico del Perú (IGP), Lima, Perú.

Citar como: Ampuero, A., Stríkis, N. M., Apaéstegui, J. (2021). Los efectos del bosque en la composición isotópica de la lluvia del noroeste Amazónico. *Boletín científico El Niño, Instituto Geofísico del Perú, Vol. 8 n.º 04, págs. 5-15.*

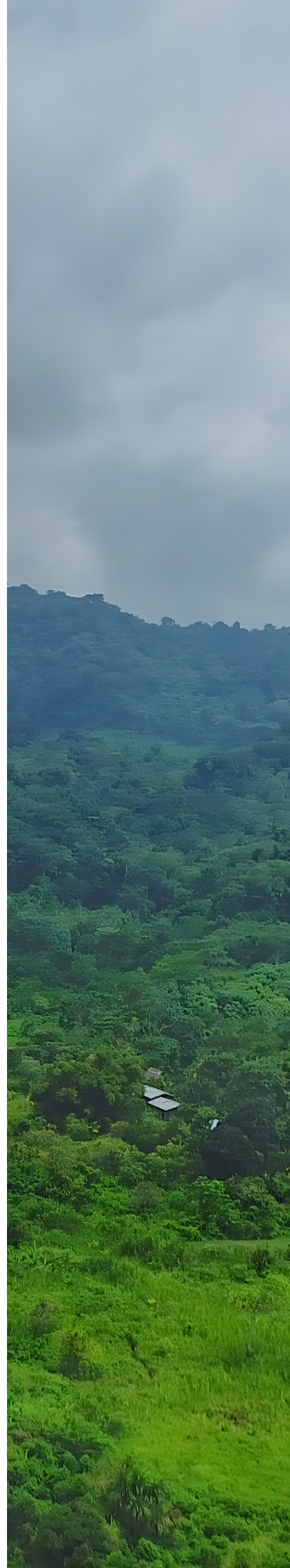
## INTRODUCCIÓN

Entender los efectos de la evapotranspiración en la composición isotópica de la lluvia ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) es fundamental para reconstruir la historia hidroclimática de Sudamérica y así entender el papel del bosque en el ciclo hidrológico regional. En general, la composición isotópica de una masa de aire, que se desplaza sobre el continente, resulta de una combinación de procesos conocidos como destilación de Rayleigh. En las masas de aire húmedo, la destilación de Rayleigh es el proceso donde las especies isotópicas pesadas son eliminadas progresivamente de la atmósfera a través de la precipitación, dejando el vapor remanente empobrecido en especies isotópicas pesadas (Vuille & Werner, 2005). Mientras la condensación progresiva de la humedad atmosférica conduce a la disminución gradual de las especies isotópicas pesadas remanentes en el vapor, el bosque puede reintroducirlas en la atmósfera a través de la evapotranspiración.

Varios estudios demuestran que la cuenca amazónica constituye una fuente de humedad regional que está modulada por el régimen hidrológico del bosque (Builes-Jaramillo & Poveda, 2018; Drumond et al., 2014; Molina et al., 2019; Salati et al., 1979). Se estima que un tercio de la lluvia amazónica se origina por evapotranspiración dentro de la misma cuenca y que dos tercios de esta lluvia se origina por transpiración a través de los árboles (Staal et al., 2018). La retroalimentación positiva entre el bosque y la lluvia promueven cascadas de humedad reciclada que pueden precipitar en áreas distantes, permitiendo la expansión del bosque y jugando un papel importante en la manutención del bosque en el noroeste de la Amazonía (Staal et al., 2018; Zemp et al., 2014).

Un proxy con potencial para describir el reciclaje de humedad es el exceso de deuterio ( $\text{dxs} = \delta\text{D} - 8 \times \delta^{18}\text{O}$ ) (Dansgaard, 1964). Particularmente en grandes áreas continentales, como la cuenca amazónica, el dxs puede servir como un indicador de reciclaje de humedad (Gat et al., 1994; Salati et al., 1979). Sin embargo, los efectos del clima sobre el dxs en áreas continentales tropicales aún son poco explorados (Landais et al., 2010; Risi et al., 2013; Vuille, 2018).

Este estudio analiza la influencia del bosque sobre la composición isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  y dxs de la lluvia. El análisis se basa en las observaciones de  $\delta^{18}\text{O}$  y dxs de la lluvia obtenida en una estación de monitoreo en el noroeste de la cuenca amazónica, datos climáticos y de superficie derivados de satélites y datos de *reanalysis* atmosférico. Se describe la historia de las masas de aire utilizando un modelo de retro-trayectorias de viento. Finalmente, se discuten las implicaciones de la variabilidad del exceso de deuterio en el contexto actual y del paleoclima del Holoceno.



## DATOS Y METODOS

### MONITOREO ISOTÓPICO DE LA LLUVIA

Se realizó un monitoreo de la composición isotópica de la lluvia en la estación Palestina (5.92°S, 77.35°W, 870 m s. n.), ubicada en el distrito de Nueva Cajamarca, provincia de Rioja, departamento de San Martín, específicamente en el flanco este de los Andes (Figura 1a). La temperatura promedio anual es ~22 °C y la precipitación promedio anual es ~1570 mm (Apaéstegui et al., 2014). La precipitación tiene un régimen tropical con un marcado pico de lluvia en marzo y una época de estiaje entre julio y agosto (precipitación < 100 mm mes<sup>-1</sup>, Figura 1c). En la estación Palestina, la precipitación de la época de estiaje representa el 22 % del acumulado anual (Figura 1b), por lo que es importante considerar su influencia en la señal promedio anual de  $\delta^{18}\text{O}$  y dxs.

Los datos isotópicos cubren tres periodos, desde junio del 2012 hasta septiembre del 2013 (Apaéstegui et al., 2014), desde octubre del 2013 hasta junio del 2014 y desde octubre del 2016 hasta junio del 2018. Las muestras se colectaron dos veces al mes, siguiendo las recomendaciones de la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA, 2012). Los análisis isotópicos se realizaron en el Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas de la Universidad de São Paulo (IGc-USP) usando un espectrómetro de absorción láser de la marca PICARRO L2130i. Los datos se procesaron con el programa LIMS for Lasers (Coplen, 2000; Coplen & Wassenaar, 2015). Los valores se reportaron con una precisión analítica de 0.09 ‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  y 0.9 ‰ para  $\delta\text{D}$  relativos al estándar Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW).

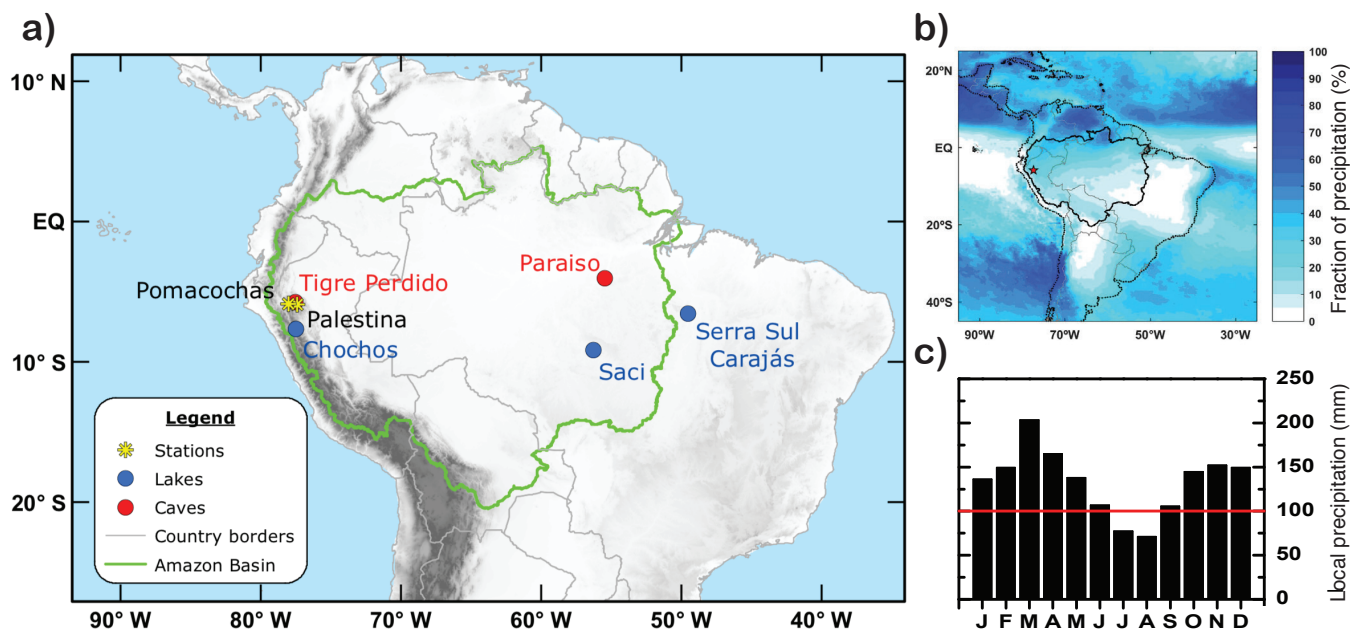


Figura 1. (a) Ubicación geográfica de la estación de monitoreo (estrella amarilla), cavernas (círculo rojo), y lagos con registros polínicos (círculo azul) referenciados en el presente estudio. Las sombras grises oscuras representan los Andes y la línea verde, los límites de la cuenca amazónica tomados de la base de datos de HyBAM. (b) Fracción de lluvia anual que corresponde al periodo de junio a septiembre. (c) Precipitación local en la zona de la estación Palestina. Los paneles (b) y (c) se calcularon para el periodo de 1998 a 2013 con datos de TRMM 3B43.

## EXCESO DE DEUTERIO EN INCLUSIONES FLUIDAS

Las inclusiones fluidas son cavidades microscópicas llenas de agua que están encerradas en los cristales de varios minerales. En los espeleotemas, las inclusiones fluidas retienen agua durante el proceso de formación mineral, registrando así las variaciones del goteo fósil al interior de la caverna (Schwarcz et al., 1976; Van Breukelen et al., 2008). En climas tropicales húmedos, la composición isotópica del agua de goteo de las cavernas está en equilibrio con la lluvia local (Lachniet, 2009; Wackerbarth et al., 2012). Para el cálculo del  $\delta x_s$ , durante el Holoceno, se utilizaron datos de inclusiones fluidas en espeleotemas de la caverna Tigre Perdido (Van Breukelen et al., 2008). Esta caverna está ubicada a ~10 km de la estación Palestina y registra información para los últimos 13 000 años (Van Breukelen et al., 2008).

## METODOLOGÍA

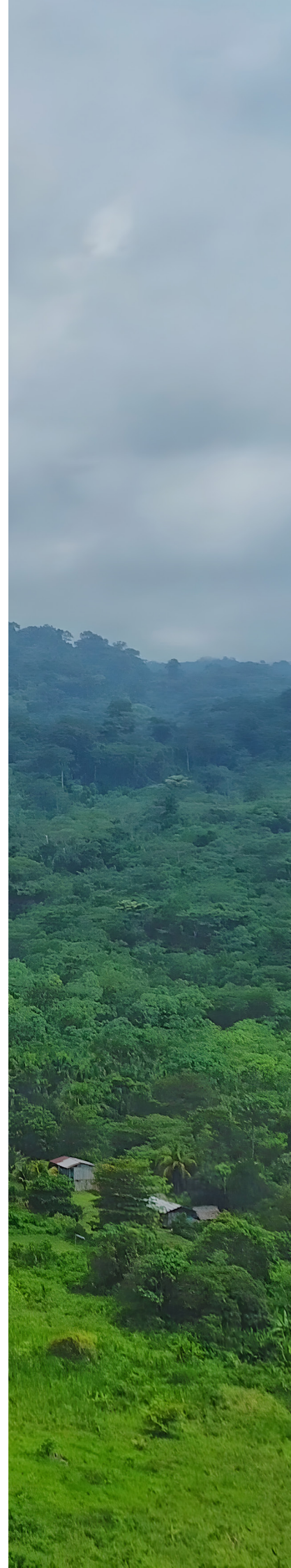
Las retro-trayectorias de vientos se calcularon con el modelo HYbrid Single-Parcel Lagrangian Integrated Trajectory 4 (HySPLIT 4) (Stein et al., 2015; Rolph et al., 2017), utilizando datos del *reanalysis* ERA Interim (Dee et al., 2011). Dado que el tiempo promedio de residencia del vapor de agua en la atmósfera es diez días (Numaguti, 1999), consideramos que las retro-trayectorias de siete días cubren el camino de las masas de aire hasta el último punto de saturación. De esta manera se abordaron los procesos de fraccionamiento isotópico más relevantes en el camino del transporte de humedad atmosférica (Hurley et al., 2012).

Los datos grillados de precipitación de TRMM<sup>1</sup> 3b42 y GPM<sup>2</sup>, LAI (siglas en inglés para índice de área foliar) de MODIS<sup>3</sup> y el reciclaje de humedad (PR), calculado con el modelo WAM-2layers versión 2.4.8 (van der Ent, 2014), se acumularon a lo largo de las retro-trayectorias, excluyendo las grillas sobre el océano. De este modo se calcularon los índices de lluvia en el camino del flujo de humedad (DRU), LAI acumulado y PR acumulado. Estos índices representan el estado del bosque y los procesos atmosféricos en el camino de las masas de aire hacia el punto de monitoreo (estación Palestina). Estos índices se compararon con los datos isotópicos.

<sup>1</sup> Tropical Rainfall Measurement Mission (TRMM)

<sup>2</sup> The Global Precipitation Measurement (GPM)

<sup>3</sup> Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)



## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### MONITOREO ISOTÓPICO

La composición isotópica de la precipitación monitoreada se aproxima a la Línea Meteorica de Agua Global ( $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$ ; Dansgaard, 1964), con una pendiente de 8.40 y un intercepto (dxs) de 16.74. Los valores de  $\delta^{18}O$  varían entre  $-18\text{‰}$  y  $0\text{‰}$ . Los valores mínimos ocurren en marzo-abril-mayo (Figura 2a), lo que es consistente con la contribución de humedad proveniente de la región de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés). El dxs varía de  $8.4\text{‰}$  a  $20.4\text{‰}$ , con los mayores valores en julio-agosto-septiembre (Figura 2b), siendo contemporáneo al periodo de mayor evaporación en la cuenca amazónica.

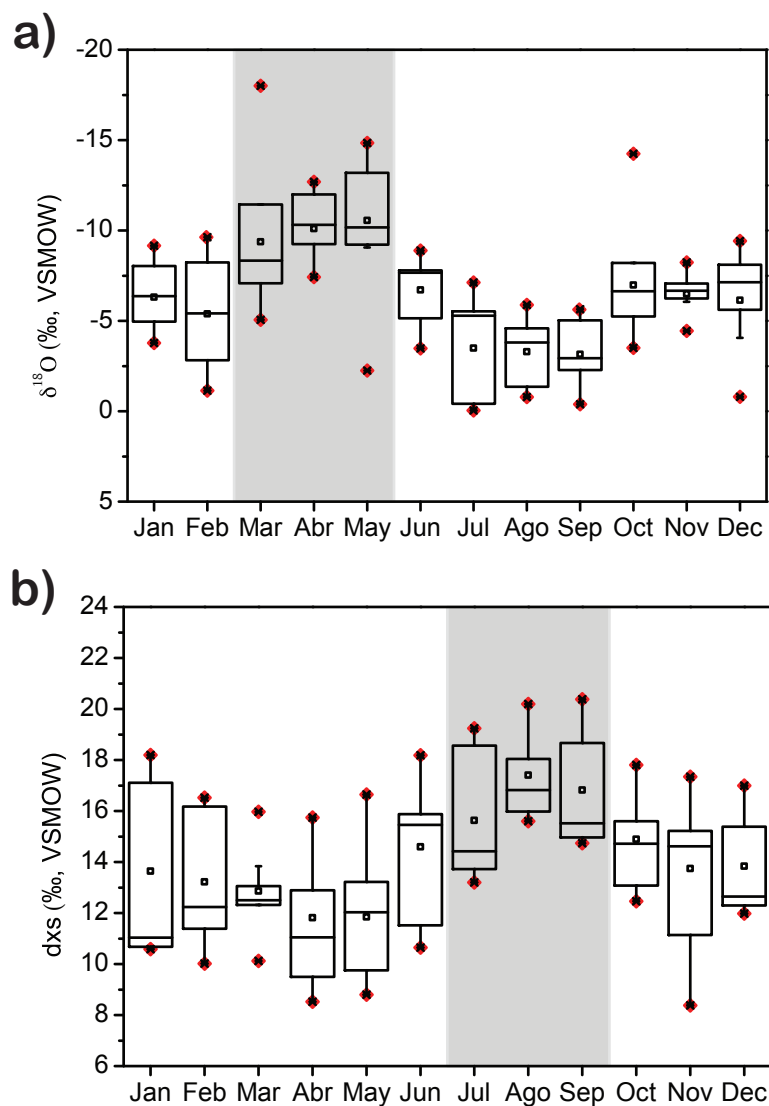


Figura 2. (a) Diagrama de cajas de (a)  $\delta^{18}O$  y (b) dxs de la precipitación en la estación Palestina basada en muestras colectadas cada 15 días durante el periodo descrito.

## PRECIPITACIÓN Y FLUJOS DE HUMEDAD DEL BOSQUE

En general, DRU y la precipitación local presentan ciclos anuales similares, aunque con un desfase entre mayo y julio (Figura 3a). Estas diferencias se deben a que DRU integra áreas con diferente régimen de precipitación a lo largo del continente, mientras que la precipitación local refleja solo el régimen local.

PR y LAI muestran comportamientos similares durante la época de estiaje y el inicio de la época de lluvia (Figura 3b). Aunque PR depende de la precipitación y evapotranspiración durante la época de estiaje, la evapotranspiración gana protagonismo. Tiene sentido encontrar valores bajos de PR durante la época del monzón cuando los flujos de humedad desde el Atlántico tropical norte están al máximo; y valores altos al final de la época de estiaje cuando la evapotranspiración en la Amazonía es máxima (Sörensson & Ruscica 2018).

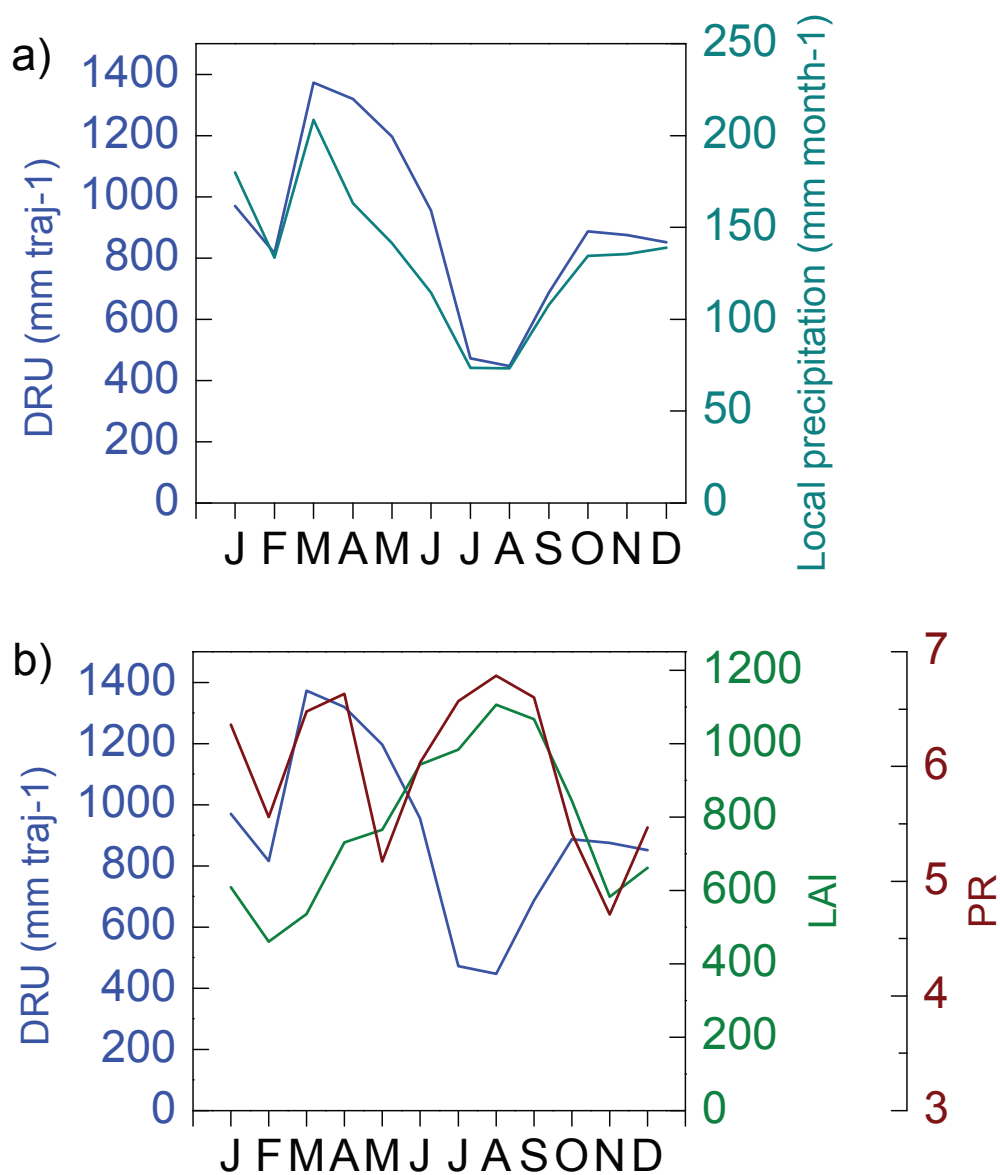


Figura 3. Ciclo anual entre el 2012 y 2018 de (a) DRU y precipitación local. DRU es la precipitación acumulada en las retro-trayectorias iniciadas en los días precipitantes en la estación Palestina. (b) DRU, índice de área foliar (LAI) y reciclaje de humedad (PR) acumulado en las retro-trayectorias.

## CONTROLES CLIMÁTICOS SOBRE LA SEÑAL DE $\delta^{18}\text{O}$ Y $d_{xs}$ DE LA PRECIPITACIÓN

Al analizar las series completas se observa una correlación negativa entre  $\delta^{18}\text{O}$  y DRU ( $r = -0.21$ ), acorde con el modelo de destilación Rayleigh, que refleja la remoción en especies isotópicas pesadas a través de la precipitación durante el transporte de las masas de aire. La correlación de  $\delta^{18}\text{O}$  con DRU, más significativa que con la lluvia local, indica mayor influencia de la precipitación regional y del transporte atmosférico de gran escala sobre la señal isotópica.

El análisis en periodos representativos de la estacionalidad de las lluvias (Tabla 1) muestra las mejores correlaciones de  $d_{xs}$  con PR ( $r = 0.71$ ) y LAI ( $r = 0.49$ ) entre los meses de junio y septiembre (JJAS). Se puede inferir que los altos valores de  $d_{xs}$  implican un incremento en la contribución de humedad reciclada del bosque a la precipitación en el sitio de monitoreo.

Tabla 1. Coeficiente de correlación lineal ( $r$ ) entre los registros isotópicos y los controles climáticos en periodos representativos de la estacionalidad de las lluvias: para los meses de junio-julio-agosto-septiembre (JJAS), octubre-noviembre-diciembre-enero-febrero (ONDEF) y marzo-abril-mayo (MAM). Nota: La estacionalidad fue removida de todas las series temporales. Los valores de  $r$  se muestran en negrita (si  $p < 0.05$ ) y en cursiva (si  $p < 0.10$ ).

Estación	Parámetros	$\delta^{18}\text{O}$	$d_{xs}$
JJAS	Precipitación local	-0.39	-0.33
	DRU	<b>-0.67</b>	-0.34
	LAI	-0.14	<b>0.49</b>
	PR	0.07	<b>0.71</b>
ONDEF	Precipitación local	-0.25	-0.12
	DRU	-0.25	-0.25
	LAI	0.25	0.18
	PR	0.03	<b>0.36</b>
MAM	Precipitación local	0.23	<b>0.45</b>
	DRU	0.01	-0.07
	LAI	-0.15	-0.28
	PR	0.06	-0.12

La fuerte correlación negativa entre DRU y  $\delta^{18}\text{O}$  (Tabla 1) durante la época de estiaje sugiere que el reciclaje de humedad no necesariamente suprime el fraccionamiento isotópico derivado del proceso de destilación de Rayleigh. Además, los resultados muestran que la advección a lo largo del bosque permite la interacción superficie-atmósfera, como el reciclaje de humedad y el transporte atmosférico de gran escala.

## IMPLICACIONES PALEOCLIMÁTICAS

El análisis de las inclusiones fluidas en espeleotemas de la caverna Tigre Perdido (Van Breukelen et al., 2008) permite entender la variación de los valores de dxs del noroeste de la cuenca amazónica para el Holoceno. Este indica que el dxs se incrementa durante el Holoceno, lo que conlleva a pensar en el incremento del reciclaje de humedad asociado con la expansión del bosque Amazónico. De los resultados obtenidos, se observa que la mayor contribución del vapor evapotranspirado del bosque ocurre durante los meses de invierno. Por lo tanto, el incremento en los valores de dxs estaría asociado no solo a la expansión del bosque sino al incremento del reciclaje de humedad reflejado en las lluvias de invierno en el noroeste de la cuenca amazónica.

La tendencia del incremento de dxs durante el Holoceno es consistente con el incremento en la frecuencia de polen correspondiente a especímenes representativos de bosque húmedo, registrados en testigos lacustres colectados al centro-sur y este de la Amazonía, apoyando la noción de expansión forestal durante el Holoceno Medio y Tardío (Fontes et al., 2017; Absy et al., 1991; Sifeddine et al., 2001) (Figura 4). Este escenario también es coherente con modelos numéricos de vegetación (Maksic et al., 2018), que muestran una clara expansión de la vegetación perenne en la cuenca amazónica entre 6000 y 2000 años antes del presente.

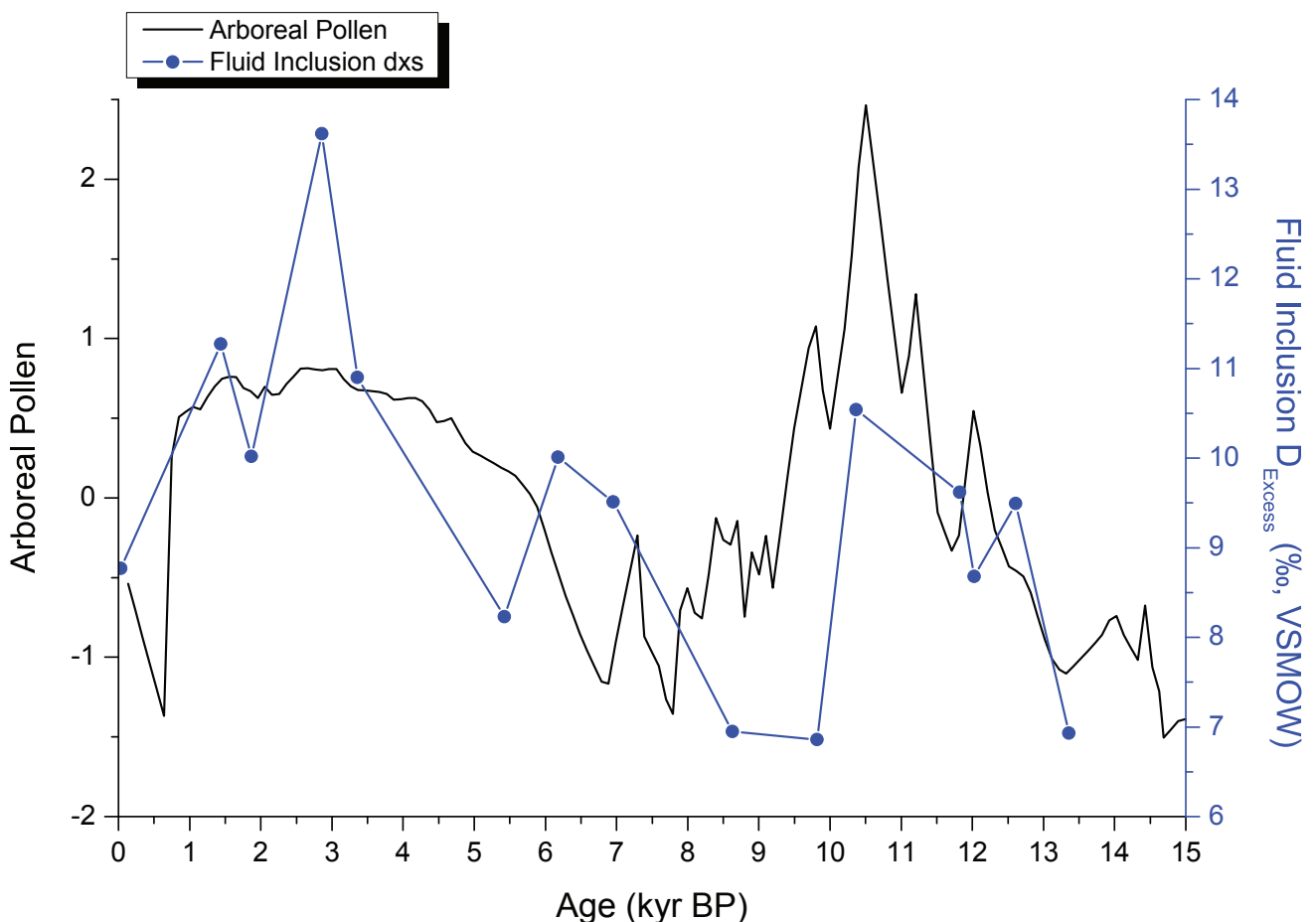


Figura 4. Comparación entre el dxs calculado de estalagmitas de la caverna Tigre Perdido (van Breukelen et al., 2008) con la serie integrada de polen de bosque húmedo de tres lagunas: Laguna Chochos, Perú (Bush et al., 2005); Saci, Amazonía centro-sur (Fontes et al., 2017); y Serra Sul Carajás, CSS2 (Absy et al., 1991; Sifeddine et al., 2001).

## CONCLUSIONES

Esclarecer los efectos de las interacciones superficie-atmósfera en la composición isotópica de la precipitación a fin de interpretar con un mayor nivel de confianza los registros paleoclimáticos es fundamental. En el sitio de monitoreo, el  $\delta^{18}\text{O}$  responde principalmente a la precipitación a nivel regional y el  $\delta\text{x}$  es un buen indicador de la contribución remota de la evapotranspiración del bosque a la precipitación local entre los meses de junio y septiembre.

Los registros paleoclimáticos muestran que, durante el Holoceno Temprano, la principal fuente de humedad al sitio de monitoreo fue el Atlántico tropical norte, con poca humedad de origen continental debido a la reducida cobertura forestal, lo que probablemente limitó el abastecimiento de agua durante el invierno. Después del Holoceno Medio, la contribución de la precipitación de invierno gana importancia gracias a que la expansión del bosque permite más reciclaje de humedad.

## REFERENCIAS

Absy, M. L., Cleef, A. M., Fournier, M., Martin, L., Servant, M., Sifeddine, A., et al. (1991). Mise en évidence de quatre phases d'ouverture de la forêt dense dans le sud-est de l'Amazonie au cours de 60,000 dernières années. Première comparaison avec d'autres régions tropicales. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 312, 673–678.

Apaéstegui, J., Cruz, F. W., Sifeddine, A., Vuille, M., Espinoza, J. C., Guyot, J. L., et al. (2014). Hydroclimate variability of the northwestern Amazon Basin near the Andean foothills of Peru related to the South American Monsoon System during the last 1600 years. *Climate of the Past*, 10(6), 1967–1981. <https://doi.org/10.5194/cp-10-1967-2014>

Builes-Jaramillo, A., & Poveda, G. (2018). Conjoint analysis of surface and atmospheric water balances in the Andes-Amazon system. *Water Resources Research*, 54, 3472–3489. <https://doi.org/10.1029/2017WR021338>

Coplen, T. B. (2000). *Laboratory information management system (LIMS) for light stable isotopes*. U.S. Geological Survey Open-File Report, 00–345, 121. <http://water.usgs.gov/software/code/geochemical/lims/doc/ofr00345.pdf>

Coplen, T. B., & Wassenaar, L. I. (2015). LIMS for Lasers 2015 for achieving long-term accuracy and precision of  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{17}\text{O}$ , and  $\delta^{18}\text{O}$  of waters using laser absorption spectrometry. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 29(22), 2122–2130. <https://doi.org/10.1002/rcm.7372>

Dansgaard, W. (1964). *Stable isotopes in precipitation*. *Tellus*, 16, 436–468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

- Drumond, A., Marengo, J., Ambrizzi, T., Nieto, R., Moreira, L., & Gimeno, L. (2014). The role of the Amazon Basin moisture in the atmospheric branch of the hydrological cycle: A Lagrangian analysis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2577–2598), 2014. <https://doi.org/10.5194/hess-18-2577-2014>
- Fontes, D., Cordeiro, R. C., Martins, G. S., Behling, H., Turcq, B., Sifeddine, A., et al. (2017). Paleoenvironmental dynamics in South Amazonia, Brazil, during the last 35,000 years inferred from pollen and geochemical records of Lago do Saci. *Quaternary Science Reviews*, 173, 161–180. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.08.021>
- Gat, J. R., Bowser, C. J., & Kendall, C. (1994). The contribution of evaporation from the Great Lakes to the continental atmosphere: Estimate based on stable isotope data. *Geophysical Research Letters*, 21, 557–560. <https://doi.org/10.1029/94gl00069>
- Hurley, J. V., Galewsky, J., Worden, J., & Noone, D. (2012). A test of the advection-condensation model for subtropical water vapor using stable isotopologue observations from Mauna Loa Observatory, Hawaii. *Journal of Geophysical Research*, 117, D19118. <https://doi.org/10.1029/2012JD018029>
- Lachniet, M. S. (2009). Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. *Quaternary Science Review*, 28, 412–432. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2008.10.021>
- Landais, A., Risi, C., Bony, S., Vimeux, F., Descroix, L., Falourd, S., & Bouygues, A. (2010). Combined measurements of  $^{17}\text{O}$ -excess and d-excess in African monsoon precipitation: Implications for evaluating convective parameterizations. *Earth and Planetary Science Letters*, 298, 104–112
- Maksic, J., Shimizu, M. H., De Oliveira, G. S., Venancio, I. M., Cardoso, M., & Ferreira, F. A. (2018). Simulation of the Holocene climate over South America and impacts on the vegetation. *The Holocene*, 29(2), 287–299. <https://doi.org/10.1177/0959683618810406>
- Molina, R. D., Salazar, J. F., Martínez, J. A., Villegas, J. C., & Arias, P. A. (2019). Forest-induced exponential growth of precipitation along climatological wind streamlines over the Amazon. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 2589–2599. <https://doi.org/10.1029/2018JD029534>
- Numaguti, A. (1999). Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 104(D2), 1957–1972. <https://doi.org/10.1029/1998jd200026>
- Risi, C., Landais, A., Winkler, R., & Vimeux, F. (2013). Can we determine what controls the spatio-temporal distribution of d-excess and  $^{17}\text{O}$ -excess in precipitation using the LMDZ general circulation model?. *Climate of the Past*, 9, 2173–2193
- Salati, E., Dall'Olio, A., Matsui, E., & Gat, J. R. (1979). Recycling of water in the Amazon Basin: An isotopic study. *Water Resources Research*, 15, 1250–1258. <https://doi.org/10.1029/WR015i005p01250>
- Schwarcz, H. P., Harmon, R. S., Thompson, P., & Ford, D. C. (1976). Stable isotope studies of fluid inclusions in speleothems and their paleoclimatic significance. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 40, 657–665
- Sifeddine, A., Martin, L., Turcq, B., Ribeiro, C. V., Soubies, F., Cordeiro, R. C., & Suguio, K. (2001). Variations of the Amazonian rainforest environment: A sedimentological record covering 30,000 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 168, 221–235
- Sörensson, A. A., & Ruscica, R. C. (2018). Intercomparison and Uncertainty Assessment of Nine Evapotranspiration Estimates Over South America. *Water Resources Research*, 54(4), 2891–2908. <https://doi.org/10.1002/2017wr021682>
- Staal, A., Tuinenburg, O. A., Bosmans, J. H. C., Holmgren, M., van Nes, E. H., Scheffer, M., et al. (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>

Van Breukelen, M. R., Vonhof, H. B., Hellstrom, J. C., Wester, W. C. G., & Kroon, D. (2008). Fossil dripwater in stalagmites reveals Holocene temperature and rainfall variation in Amazonia. *Earth and Planetary Science Letters*, 275(1-2), 54–60. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.060>

Van der Ent, R. J. (2014). *A new view on the hydrological cycle over continents*, Ph.D. thesis, 96 pp, Delft University of Technology, Delft. <https://doi.org/10.4233/uuid:0ab824ee-6956-4cc3-b530-3245ab4f32be>

Vuille, M. (2018). Current state and future challenges in stable isotope applications of the tropical hydrologic cycle (Invited Commentary). *Hydrological Processes*, 32, 1313–1317. <https://doi.org/10.1002/hyp.11490>

Vuille, M., & Werner, M. (2005). Stable isotopes in precipitation recording South American summer monsoon and ENSO variability— Observations and model results. *Climate Dynamics*, 25, 401–413. <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0049-9>.

Wackerbarth, A., Langebroek, P. M., Werner, M., Lohmann, G., Riechelmann, G., Borsato, A., & Mangini, A. (2012). Simulated oxygen isotopes in cave drip water and speleothem calcite in European caves. *Climate of the Past*, 8, 1781–1799. <https://doi.org/10.5194/cp-8-1781-2012>

Zemp, D. C., Schleussner, C.-F., Barbosa, H. M. J., van der Ent, R. J., Donges, J. F., Heinke, J., et al. (2014). On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23), 13337–13359. <https://doi.org/10.5194/acp-14-13337-2014>