



**Transporte y reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del río Congo:  
comparaciones con la cuenca del río Amazonas**

Andrés Octavio Pérez Brand

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Magíster en Ingeniería  
Ambiental

Directoras

Sara Cristina Vieira Agudelo, Doctor (PhD) en Tierra y Ciencias de la Atmósfera  
Paola Andrea Arias Gómez, Doctor (PhD) en Ciencias Geológicas

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería Ambiental  
Medellín, Antioquia, Colombia  
2022

Cita	Pérez Brand [1]
<b>Referencia</b> Estilo IEEE (2020)	[1] A. O. Pérez Brand, “Transporte y reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del río Congo: comparaciones con la cuenca del río Amazonas”, Tesis de maestría, Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.



Maestría en Ingeniería Ambiental.

Grupo de Investigación Ingeniería y Gestión Ambiental (GIGA).



Centro de Documentación de Ingeniería (CENDOI)

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez Loaiza.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Agradecimientos**

Me gustaría agradecer especialmente a John Alejandro Martínez Agudelo por suministrarme la ayuda en todo lo relacionado con la implementación y puesta en marcha del modelo DRM, a María Lizeth Rendón Hurtado por estar presente para resolver las dudas que surgieron a medida que se utilizaba el modelo y por compartir los resultados de las simulaciones realizadas en la cuenca del Amazonas en el periodo 1980-2005 y a Diver Eduardo Marín Palacio por las discusiones que se generaban a medida que se desarrollaba el proyecto de investigación.

A mis directoras de tesis Sara Cristina Vieira Agudelo y Paola Andrea Arias Gómez les expreso mi inmensa gratitud por su acompañamiento a lo largo de este proceso; siempre han estado presentes durante las fases sencillas y también durante las complicadas. Finalmente, a mis padres, pues sin su presencia y constante apoyo nada de esto sería posible.

## Tabla de contenido

Agradecimientos .....	3
Tabla de contenido .....	4
Lista de Tablas .....	5
Lista de Figuras .....	6
Resumen .....	9
Objetivos .....	9
Objetivo general: .....	9
Objetivos específicos: .....	9
1. Introducción .....	10
2. Datos y metodología .....	14
2.1. Área de estudio .....	14
2.1.1. Cuenca del río Congo .....	14
2.1.2. Cuenca del río Amazonas .....	15
2.2. DRM .....	15
2.3. Datos .....	17
2.4. Celdas regionales de Hadley y Walker .....	19
2.5. Métodos estadísticos .....	19
3. Resultados .....	20
3.1. Climatología de la cuenca del río Congo .....	20
3.1.1. Agua precipitable .....	22
3.1.2. Precipitación .....	23
3.2. Tendencias de la humedad atmosférica en la cuenca del río Congo .....	31
3.3. Influencia del fenómeno ENOS en el transporte de humedad atmosférica hacia la cuenca del río Congo .....	36
3.4. Influencia del DOI en el transporte de humedad atmosférica hacia la cuenca del río Congo .....	42
3.5. Comparación del comportamiento de la humedad atmosférica en la cuenca del río Congo y en la cuenca del río Amazonas .....	49
4. Discusión y conclusiones .....	55
5. Bibliografía .....	61

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Variables de ERA5 utilizadas en el modelo DRM junto a su resolución espacial y temporal. ...	17
<b>Tabla 2.</b> Bases de datos de precipitación. ....	17
<b>Tabla 3.</b> Clasificación de las fases del ENOS según el ONI.....	18
<b>Tabla 4.</b> Clasificación de las fases del DOI de acuerdo al Bureau de Meteorología del Gobierno Australiano. ....	19
<b>Tabla 5.</b> Porcentaje promedio de agua precipitable y precipitación reciclada y transportada desde el océano Índico hacia ambas regiones de la cuenca del Congo. ....	21
<b>Tabla 6.</b> Precipitación mensual multianual promedio, mínima y máxima reciclada en la cuenca del Congo. También se indica su valor porcentual con respecto a la precipitación total. ....	21
<b>Tabla 7.</b> Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de precipitación en la región Congo Norte.....	26
<b>Tabla 8.</b> Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de precipitación en la región Congo Sur. ....	28
<b>Tabla 9.</b> Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de agua precipitable transportada desde y hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. ....	32
<b>Tabla 10.</b> Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de agua precipitable transportada desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. ....	33
<b>Tabla 11.</b> Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de precipitación transportada desde y hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. ....	34
<b>Tabla 12.</b> Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de precipitación transportada desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. ....	35
<b>Tabla 13.</b> Precipitación promedio, mínima y máxima reciclada en las cuencas de los ríos Congo y Amazonas. También se indica su valor porcentual con respecto a la precipitación total. ....	51
<b>Tabla 14.</b> Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de precipitación reciclada en la región norte y sur de las cuencas de los ríos Congo y Amazonas. ....	53
<b>Tabla 15.</b> Diferencia en el reciclaje de agua precipitable y precipitación promedio entre los periodos 1998-2015 (1998-2005) y 1980-1997 (1980-1997) en la cuenca del río Congo (Amazonas). ....	57

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.</b> Área de estudio y regiones fuente consideradas en el transporte de humedad atmosférica hacia la cuenca del río Congo. ....	14
<b>Figura 2.</b> Área de estudio y regiones fuente consideradas en el transporte de humedad atmosférica hacia la cuenca del río Amazonas. ....	15
<b>Figura 3.</b> Esquema con la representación básica del funcionamiento del modelo DRM. ....	16
<b>Figura 4.</b> Ciclo anual multianual de agua precipitable y precipitación para las regiones Congo Norte y Congo Sur. ....	21
<b>Figura 5.</b> Aporte de agua precipitable desde las regiones Congo Norte (izquierda) y Congo Sur (derecha) durante DJF y JJA. En púrpura se presenta la región Congo Norte. En rojo se presenta la región Congo Sur. ....	22
<b>Figura 6.</b> Aporte de agua precipitable desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur durante DJF y JJA. En púrpura se presenta la respectiva región fuente oceánica. En rojo se presenta la cuenca del río Congo. ....	23
<b>Figura 7.</b> Series de tiempo de anomalías de precipitación promedio sobre la región Congo Norte provenientes de las bases de datos ERA5, CHIRPS, CRU TS, GPCC y GPCP. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas. ....	25
<b>Figura 8.</b> Series de tiempo de anomalías de precipitación promedio sobre la región Congo Norte provenientes de las bases de datos MSWEP, NIC131, Terraclimate y TRMM. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas. ....	26
<b>Figura 9.</b> Series de tiempo de anomalías de precipitación promedio sobre la región Congo Sur provenientes de las bases de datos ERA5, CHIRPS, CRU TS, GPCC y GPCP. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas. ....	27
<b>Figura 10.</b> Series de tiempo de anomalías de precipitación promedio sobre la región Congo Norte provenientes de las bases de datos MSWEP, NIC131, Terraclimate y TRMM. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas. ....	28
<b>Figura 11.</b> Tendencias espaciales de anomalías de precipitación para la cuenca del Congo: coeficiente TAU (sombreado de color) y valor p menor o igual a 0.1 (puntos negros). Las regiones norte y sur de la cuenca están delimitadas en púrpura. ....	29
<b>Figura 12.</b> Aporte de precipitación desde las regiones Congo Norte (izquierda) y Congo Sur (derecha) durante DJF y JJA. En púrpura se presenta la región Congo Norte. En rojo se presenta la región Congo Sur. ....	30
<b>Figura 13.</b> Aporte de precipitación desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur durante DJF y JJA. En púrpura se presenta la respectiva región fuente oceánica. En rojo se presenta la cuenca del río Congo. ....	31
<b>Figura 14.</b> Series de tiempo de anomalías de agua precipitable transportada desde y hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. ....	32
<b>Figura 15.</b> Series de tiempo de anomalías de agua precipitable transportada desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas. ....	33

<b>Figura 16.</b> Series de tiempo de anomalías de precipitación transportada desde y hacia las regiones a) Congo Norte y b) Congo Sur. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas. ....	34
<b>Figura 17.</b> Series de tiempo de anomalías de precipitación transportada desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas. ....	35
<b>Figura 18.</b> Aporte de precipitación desde la región Índico Norte hacia la cuenca del Congo en las fases La Niña, Neutro y El Niño del ENOS durante la temporada MAM. ....	36
<b>Figura 19.</b> Aporte de agua precipitable desde la región Índico Norte hacia la cuenca del Congo en las fases La Niña, Neutro y El Niño del ENOS durante la temporada MAM. ....	37
<b>Figura 20.</b> Aporte de precipitación desde la región Índico Sur hacia la cuenca del Congo en las fases La Niña, Neutro y El Niño del ENOS durante la temporada SON. ....	38
<b>Figura 21.</b> Sección vertical de la función de corriente meridional de masa (contornos; en $\text{kg m}^{-1}$ ). Los vectores representan la componente meridional del viento irrotacional (en $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) para eventos El Niño y las diferencias El Niño - La Niña y El Niño - Neutro durante los trimestres MAM y SON. Las líneas rojas representan los límites sur y norte de la cuenca del río Congo. ....	39
<b>Figura 22.</b> Sección vertical de la componente zonal del viento irrotacional (en $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) en la región Congo Norte para eventos El Niño y las diferencias El Niño - La Niña y El Niño - Neutro durante las temporadas MAM y SON. Los vectores rojos indican movimiento ascendente. Las líneas rojas indican los límites oeste y este de la cuenca del río Congo. ....	40
<b>Figura 23.</b> Diagramas de cajas y bigotes de anomalías de agua precipitable y precipitación transportada hacia el norte de la cuenca del Congo desde el océano Índico durante eventos La Niña, Neutro, y El Niño. ....	41
<b>Figura 24.</b> Sección vertical de la componente zonal del viento irrotacional (en $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) en la región Congo Sur para eventos El Niño y las diferencias El Niño - La Niña y El Niño - Neutro durante las temporadas MAM y SON. Los vectores rojos indican movimiento ascendente. Las líneas rojas representan los límites oeste y este de la cuenca del río Congo. ....	42
<b>Figura 25.</b> Aporte de agua precipitable desde la región Índico Norte hacia la cuenca del Congo en las fases negativa, neutra y positiva del DOI durante el trimestre MAM. ....	43
<b>Figura 26.</b> Aporte de precipitación desde la región Índico Norte hacia la cuenca del Congo en las fases negativa, neutra y positiva del DOI durante el trimestre MAM. ....	43
<b>Figura 27.</b> Primera fila: sección vertical de la función de corriente meridional (contornos; en $\text{kg m}^{-1}$ ). Los vectores representan la componente meridional del viento irrotacional (en $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ). Las líneas rojas representan los límites sur y norte de la cuenca del río Congo. Segunda y tercera fila: sección vertical de la componente zonal del viento irrotacional (en $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) en las regiones Congo Norte y Congo Sur, respectivamente, durante la fase positiva del DOI, y las diferencias entre la fase positiva y las fases neutra y negativa durante el trimestre MAM. Los vectores rojos indican movimiento ascendente. Las líneas rojas representan los límites este y oeste de la cuenca del río Congo. ....	45
<b>Figura 28.</b> Aporte de agua precipitable desde la región Índico Sur hacia la cuenca del Congo en las fases negativa, neutra y positiva del DOI durante el trimestre SON. ....	46
<b>Figura 29.</b> Aporte de precipitación desde la región Índico Sur hacia la cuenca del Congo en las fases negativa, neutra y positiva del DOI durante el trimestre SON. ....	47

<b>Figura 30.</b> Primera fila: sección vertical de la función de corriente meridional (contornos; en $\text{kg m}^{-1}$ ). Los vectores representan la componente meridional del viento irrotacional (en $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ). Las líneas rojas representan los límites sur y norte de la cuenca del río Congo. Segunda y tercera fila: sección vertical de la componente zonal del viento irrotacional (en $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) en las regiones Congo Norte y Congo Sur, respectivamente, durante la fase positiva del DOI, y las diferencias entre la fase positiva y las fases neutra y negativa durante el trimestre SON. Los vectores rojos indican movimiento ascendente. Las líneas rojas representan los límites este y oeste de la cuenca del río Congo.....	48
<b>Figura 31.</b> Ciclo anual multianual de agua precipitable total, transportada y reciclada para las regiones Congo Norte, Congo Sur, Amazonas Norte y Amazonas Sur. ....	49
<b>Figura 32.</b> Ciclo anual multianual de precipitación total, transportada y reciclada para las regiones Congo Norte, Congo Sur, Amazonas Norte y Amazonas Sur. ....	50
<b>Figura 33.</b> Tendencias espaciales de anomalías de agua precipitable y precipitación para las cuencas de los ríos Congo (columna izquierda) y Amazonas (columna derecha) según el reanálisis ERA5: coeficiente TAU y valor p por pixel menor o igual a 0.1 (puntos negros). Las regiones norte y sur de las cuencas se encuentran delimitadas en púrpura. ....	52
<b>Figura 34.</b> Series de tiempo de anomalías de precipitación reciclada en la región norte y sur de las cuencas de los ríos Congo y Amazonas. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. ....	53
<b>Figura 35.</b> Evolución mensual de anomalías de la precipitación reciclada para las regiones norte y sur de las cuencas de los ríos Congo y Amazonas durante el correspondiente periodo de simulación (1980-2015 para el Congo; 1980-2005 para el Amazonas).....	54
<b>Figura 36.</b> Paisajes forestales intactos (sombreado verde) en la cuenca de los ríos Congo y Amazonas para el año 2016 (Potapov et al., 2017). ....	58
<b>Figura 37.</b> Pérdida de cobertura de árboles durante el periodo 2001-2015 en la cuenca de los ríos Congo y Amazonas (Fuente: Global Forest Watch, s.f.-a, s.f.-b; Hansen et al., 2013).....	59



## Resumen

Múltiples estudios evidencian que la cuenca del río Amazonas ha presentado cambios en su ciclo hidrológico durante las últimas décadas, en particular, la ocurrencia de temporadas secas de mayor duración en la región sur, asociadas a una reducción del reciclaje de humedad atmosférica y precipitación en la región. En contraste, poco se ha estudiado sobre el transporte de vapor de agua en la cuenca del río Congo, por lo que en este trabajo se analiza la variabilidad del transporte y el reciclaje de humedad atmosférica en esta cuenca. Para ello se utiliza el modelo DRM (Dynamic Recycling Model) con información del reanálisis ERA5 del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos de Mediano Plazo (ECMWF), durante el periodo 1980–2015. El modelo DRM se emplea bajo el supuesto de una atmósfera homogénea y bien mezclada en la vertical, haciendo posible la descomposición de humedad atmosférica reciclada y transportada en términos de precipitación y agua precipitable. Su implementación permitió evidenciar un cambio en el transporte de humedad atmosférica sobre la cuenca del Congo durante el periodo de estudio. Se identifica una tendencia hacia anomalías negativas de precipitación reciclada dentro de la cuenca durante el periodo de análisis, así como en la precipitación transportada desde el océano Índico hacia la región norte de la cuenca. Con el objeto de identificar la variabilidad interanual de este transporte, también se analizó la influencia del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) sobre la humedad atmosférica, observando un aumento en el transporte de humedad desde el océano Índico hacia la cuenca del río Congo durante la ocurrencia de eventos El Niño. De otro lado, este trabajo compara el comportamiento reciente del reciclaje de agua precipitable y precipitación en las cuencas de los ríos Congo y Amazonas, cuencas donde el reciclaje de precipitación en la región norte equivale al 28% y 17%, respectivamente, mientras que el reciclaje en la región sur es alrededor del 26% para el Congo y 24% para el Amazonas. Los resultados sugieren la existencia de alteraciones en el transporte y reciclaje de humedad atmosférica sobre ambas cuencas hidrográficas, con una mayor reducción en el reciclaje de precipitación en el sur de ambas regiones. En el sur de la cuenca del Congo (Amazonas) se observa en promedio una reducción aproximada del 14% (7%) en el reciclaje de precipitación entre los años 1998-2015 (1998-2005) con respecto al periodo 1980-1997, alteración que podría estar asociada a la fragmentación y pérdida de cobertura boscosa debido a la intervención antrópica sobre ambas regiones.

**Palabras clave:** Amazonas; Congo; DRM; humedad atmosférica; reciclaje; transporte.

## Objetivos

### Objetivo general:

- Analizar el transporte y reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del río Congo, realizando comparaciones con el reciclaje de humedad en la cuenca del río Amazonas.

### Objetivos específicos:

- Estudiar el ciclo anual del transporte y reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del río Congo.
- Estudiar la variación interanual de la humedad atmosférica en la cuenca del río Congo y la influencia del fenómeno ENOS sobre esta.
- Comparar el comportamiento del transporte y reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del río Congo con la cuenca del río Amazonas.

## 1. Introducción

Los bosques húmedos tropicales se encuentran distribuidos en tres grandes dominios a lo largo del globo: la Amazonia, la región tropical de África y el sudeste Asiático. Estos representan el bioma terrestre más grande del planeta y componen aproximadamente el 12% de la cobertura total de la Tierra. De este total, la cuenca del Amazonas cubre el 35% mientras que la cuenca del Congo cubre alrededor del 11% (Negrón Juárez et al., 2009), aportando aproximadamente un tercio de la evapotranspiración de la superficie terrestre (Malhi et al., 2014). Estos bosques tropicales son epicentros de biodiversidad, proveen alimento, combustible, medicina, así como contribuyen al control de enfermedades y a la mejora en la calidad del agua y aire (Wolosin et al., 2018). A la vez, los bosques tropicales son grandes reguladores del clima pues están fuertemente asociados al ciclo hidrológico, el cual afecta el comportamiento de la vegetación, en gran medida debido a los patrones de lluvia y a la influencia de la humedad atmosférica que, mediante diversos mecanismos, se transporta a través de la atmósfera hacia distintas áreas, generando que estos bosques actúen como fuentes y sumideros de vapor de agua. Estas regiones tropicales generalmente se encuentran categorizadas en tres grandes grupos según la clasificación climática de Köppen: clima ecuatorial lluvioso o tropical húmedo, clima tropical monzónico y clima tropical húmedo-seco (sabanas) (Köppen, 1884; Beck et al., 2018). Una de las principales características de los bosques de clima tropical húmedo es que su vegetación está más limitada por la cantidad de energía que recibe que por la precipitación y suministro de agua, mientras que en regiones de sabanas y climas semiáridos, el agua es el factor regulador de los flujos superficiales y las interacciones suelo-atmósfera y, por tanto, su vegetación se encuentra limitada por su disponibilidad (Gentine et al., 2019).

La deforestación y, en general, los cambios de cobertura en los bosques tropicales son uno de los fenómenos que se han acrecentado como consecuencia del desarrollo de la actividad antrópica, generando grandes impactos en ecosistemas terrestres. Por lo general, estas afectaciones están relacionadas con actividades productivas como minería, ganadería o monocultivos a gran escala. Para el año 2008, la deforestación y degradación de los bosques se había convertido en la segunda fuente antrópica de emisiones de gases de efecto invernadero, proceso que se da a través de la quema y descomposición de biomasa vegetal, sumando aproximadamente el 12% de estas emisiones a nivel global, siendo superada únicamente por la quema de combustibles fósiles (Van Der Werf et al., 2009), mientras que para el año 2019, cerca del 25% de las emisiones de gases de efecto invernadero se asociaron a cambios en usos del suelo (IPCC, 2019). En este sentido, se ha encontrado correlación entre las temperaturas en los trópicos y el crecimiento en las tasas de CO<sub>2</sub> atmosférico (Keppel-Aleks et al., 2014) con una mayor ocurrencia de sequías e incendios en los ecosistemas de bosque tropical y boreal. Simulaciones climáticas bajo diversos escenarios de deforestación han demostrado que estos procesos generan, además de una reducción de precipitación y evapotranspiración, un aumento en la temperatura superficial, principalmente durante las temporadas secas, a su vez incidiendo en el aumento en la duración de estas temporadas como consecuencia de las interacciones entre efectos de la deforestación y variabilidad natural del clima (Nobre et al., 1991; Costa & Pires, 2010; Bagley et al., 2014; Alves et al., 2017; Ruiz-Vásquez et al., 2020). Por su parte, la escorrentía superficial varía dependiendo de la escala de deforestación. Por ejemplo, la deforestación a gran escala genera una disminución en la escorrentía superficial debido a reducciones de precipitación y evapotranspiración, mientras que cuando se presenta deforestación a pequeña escala, la escorrentía puede suplir el déficit de precipitación, aumentando el nivel de los ríos (Davidson et al., 2012; de Oliveira et al., 2018). Asimismo, Posada-Marín & Salazar (2022) afirman que los efectos de la deforestación sobre el caudal de los ríos en grandes cuencas se encuentran altamente relacionados con el enfoque de la modelación, ya que cuando se considera deforestación localizada sobre la cuenca y que esta no afecta la precipitación, el caudal de los ríos aumenta, mientras que al considerar deforestación dentro y fuera de la

cuenca y que esta sí afecta la precipitación, los ejercicios de modelación tienden a presentar como resultado una disminución en el caudal de los ríos.

Este trabajo se enfoca en el estudio del transporte de humedad atmosférica en las cuencas hidrográficas que componen los dos principales bosques tropicales del planeta: el Amazonas y el Congo. La cuenca del río Amazonas se extiende a lo largo de 9 países, entre los que se encuentran Bolivia, Colombia, Ecuador, Guyana, Guyana Francesa, Surinam, Venezuela, Brasil y Perú, con una mayor extensión de bosque en estos dos últimos países. Esta cuenca hidrográfica hospeda cerca del 40% del bosque tropical del planeta y tiene un papel fundamental en la regulación de los ciclos de energía, carbono y agua a nivel regional y global. Investigaciones previas centradas en el estudio de la humedad atmosférica en el Amazonas han encontrado patrones en su comportamiento, caracterizados por la predominancia sobre toda la cuenca del transporte de humedad atmosférica proveniente de fuentes oceánicas, mientras que la humedad reciclada juega un papel más relevante en la región sur (Trenberth, 1998, 1999), existiendo tasas de reciclaje de precipitación al suroeste de la cuenca de hasta el 50%. Sobre toda la cuenca, autores como Eltahir & Bras (1994a) estiman un reciclaje de precipitación entre 25% y 35%, Staal et al. (2018) lo estiman en 32%, Yang & Domínguez (2019) en 28% (33%) durante la temporada lluviosa (seca), mientras que Domínguez et al. (2022), en su revisión utilizando el modelo WRF y trazadores de vapor de agua, lo estiman en 30%, existiendo un gradiente sobre la cuenca, con un aumento en el reciclaje de precipitación en dirección este-oeste. A su vez, el Amazonas desempeña un papel importante sobre el comportamiento del clima de diversas cuencas suramericanas, en particular en la cuenca del río de La Plata, la cual se extiende a través de Brasil, Argentina, Paraguay, Bolivia y Uruguay, y cuenta con el segundo río más largo de Suramérica, aproximadamente el 20% de la precipitación media anual está relacionada con el transporte de vapor de agua desde la región sur del Amazonas (Martínez & Domínguez, 2014).

Por su parte, la cuenca del río Congo (anteriormente río Zaire) abarca el segundo bosque tropical más grande del planeta, después del Amazonas. Este bosque se encuentra ubicado en África central y se extiende a lo largo de 9 países: República Democrática del Congo, República del Congo, Angola, Burundi, Camerún, República Centroafricana, Ruanda, Tanzania y Zambia. Pese a su gran extensión e importancia a nivel global, esta región cuenta con una menor cantidad de investigaciones sobre su hidroclimatología en comparación con el Amazonas, existiendo una relación aproximada de 9 artículos referentes al Amazonas por cada 1 para el Congo, en los que los temas enfocados a evapotranspiración y temperatura han sido menos investigados que los temas asociados a precipitación (Alsdorf et al., 2016). Esta cuenca es considerada uno de los puntos calientes (hotspots) de humedad atmosférica reciclada en el planeta. Por ejemplo: Cook et al. (2021) estiman la tasa de reciclaje de precipitación en 30%; Dyer et al. (2017) la estiman en 25% para las temporadas de lluvia y en 28% para la tasa anual, Sorí et al. (2017) la estiman en alrededor del 50%, mientras que en África Central Ecuatorial, Pokam et al. (2012) estiman la tasa de reciclaje de precipitación en 38%. La cuenca del Congo cuenta con un ciclo bimodal a lo largo del año, caracterizado por dos temporadas de lluvias y dos temporadas secas condicionadas principalmente por las dinámicas hidroclimáticas sobre el continente africano y el océano Índico (Cook et al., 2021), influenciando la agricultura en la región (Crowhurst et al., 2020). Aunque el transporte de humedad atmosférica en diferentes regiones del planeta ha recibido recientemente mayor atención, aún es necesario profundizar en regiones como el bosque húmedo tropical del Congo, dada su importancia en términos de contribución al ciclo hidrológico regional y su gran biodiversidad. Esta cuenca se compone de cinco tipos de bosque, distribuidos de la siguiente manera: (i) bosque pantanoso, ubicado en la región central, tiende a ser menos impactado debido a la dificultad de acceso; (ii) bosque seco tropical, alrededor de la región central y relativamente bien preservado; (iii) bosques más secos adaptados a climas más estacionarios, ubicados en el norte y sur de la cuenca; (iv) zonas de sabanas, más alejadas del centro de la región y se alternan con pastizales; y (v) sabanas boscosas, ubicadas al norte de Camerún y al sur de la República Democrática del

Congo. Estas coberturas juegan un papel realmente importante en el clima de la región, influenciando en gran medida la precipitación en las regiones del Sahara, Etiopía y otras zonas del continente (de Wasseige et al., 2015).

En la cuenca del Congo, la cantidad de agua precipitada tiene su origen en (i) la condensación de vapor de agua de las masas de aire que se cargan de humedad a medida que se desplazan sobre el océano Índico y (ii) en la evapotranspiración local y su interacción vegetación-atmósfera (de Wasseige et al., 2015; Dyer et al., 2017). A su vez, la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) se relaciona estrechamente con el comportamiento de la precipitación en estas regiones ecuatoriales (oceánicas y continentales) (Nicholson, 2018). La ZCIT se forma en la región de ascenso de vientos generada por la convergencia de las celdas de Hadley (norte y sur) sobre el ecuador y es afectada por los vientos alisios, generando su desplazamiento entre los hemisferios norte y sur a lo largo del año (Farnsworth et al., 2011). La ZCIT se ubica entre las latitudes 5°N y 5°S durante marzo y abril; a medida que el año avanza, se desplaza latitudinalmente aproximadamente hasta los 10°N durante el periodo mayo a septiembre, regresando en el mes de octubre a la región ecuatorial (latitud 0°) y se desplaza entre el ecuador y la latitud 10°S (incluso hasta los 20°S) durante los meses de noviembre a febrero (Lashkari & Jafari, 2021). Sin embargo, debido a que los vientos alisios tienen mayor influencia sobre las regiones oceánicas y costeras, diversos autores tienden a usar términos como cinturón de lluvia ecuatorial, banda de lluvia o cinturón de lluvia tropical para las regiones terrestres tropicales (especialmente en el continente africano) (Nicholson, 2018).

El estudio de la rama atmosférica del ciclo hidrológico, particularmente sobre bosques tropicales, es un tema muy relevante debido a que la humedad no es una cantidad estática si no que, por el contrario, se encuentra en continuo desplazamiento en la atmósfera, de una región a otra. En este sentido, los bosques tropicales son una fuente de vapor de agua fundamental en muchas regiones del planeta. El vapor de agua puede ser generado en un lugar específico (fuentes), como los bosques tropicales, pero debido a mecanismos de transporte atmosférico, puede contribuir a la precipitación en la misma región o en otra región remota (sumideros) (Drumond et al., 2014; Sorí et al., 2018). Las investigaciones sobre el transporte de humedad atmosférica se abordan típicamente mediante diversos enfoques: análisis de ríos aéreos (Weng et al., 2018, 2019), estudio de relaciones entre humedad y temporadas secas (Agudelo et al., 2019; Ruiz-Vásquez et al., 2020), análisis del transporte de humedad atmosférica desde y hacia diversas zonas del continente y/o planeta, e identificación de fuentes o sumideros de humedad en una determinada región (Gimeno et al., 2012; Knippertz et al., 2013; Satyamurty et al., 2013; Hoyos et al., 2018; Nieto & Gimeno, 2019). En este tipo de investigaciones se tiende a emplear un enfoque basado en observaciones como el implementado por Molina et al. (2019), quienes analizaron las corrientes de vientos a diversos niveles de presión (a través de su componente zonal y meridional) y humedad específica, buscando rastrear el comportamiento de la humedad atmosférica. Sin embargo, también es muy común el uso de modelos numéricos que permiten la simplificación de estos fenómenos caracterizados por interacciones entre suelo, océano y atmósfera, permitiendo su desarrollo en dos grandes categorías: los modelos eulerianos, los cuales son ampliamente usados por su simplicidad, y los modelos lagrangianos, que permiten un mejor seguimiento a parcelas de aire (Viste & Sorteberg, 2013; Drumond et al., 2014). A su vez, la implementación de estos modelos se encuentra ligada a las diferentes características que los componen, presentando variaciones en su parametrización y variables de entrada. Actualmente se cuenta con una diversidad de modelos numéricos de múltiples complejidades y requerimientos computacionales, por ejemplo: modelos simples de una (1D) o dos dimensiones (2D) (Budyko 1974, Eltahir & Bras, 1994b; Savenije, 1995), modelos para la simulación del transporte de vapor de agua en dos dimensiones (Domínguez et al., 2006; Van Der Ent et al., 2010; Martínez & Domínguez, 2014; Agudelo et al., 2019; Ruiz-Vásquez et al., 2020) o incluso modelos que utilizan tres dimensiones (3D) para representar el transporte de vapor de agua (Brubaker et al., 1993; Stohl & James, 2005; Sakamoto et al., 2011).

En este sentido, el modelo “Dynamic Recycling Model” (DRM) representa una alternativa adecuada para realizar investigaciones que involucran herramientas de simulación de transporte de humedad atmosférica, ya que es un modelo que no requiere demasiada capacidad computacional y es relativamente sencillo. Este modelo es derivado de la ecuación de conservación de masa de vapor de agua, considerando un término que hace referencia al almacenamiento de humedad sobre la integral en la vertical, término que a menudo es ignorado por otros modelos (Domínguez et al., 2006). Mediante esta herramienta se han desarrollado diversas investigaciones enfocadas en el transporte y reciclaje de humedad atmosférica en la región tropical de América (Arias et al., 2015; Hoyos et al., 2018; Agudelo et al., 2019; Ruiz-Vásquez et al., 2020; Morales et al., 2021; Rendón-Hurtado, 2021). Sin embargo, modelos más complejos como el FLEXPART también han sido empleados para estudiar el transporte de vapor de agua en Suramérica (Nieto et al., 2008; Durán-Quesada et al., 2010; Drumond et al., 2014; Hoyos et al., 2018; Braz et al., 2021) y, en general, sobre las regiones tropicales del planeta. Por su parte, el transporte de humedad atmosférica en la región tropical de África ha sido previamente analizado mediante modelos de transporte de mayor complejidad como WAM2 o FLEXPART (Keys et al., 2014; Sorí et al., 2017).

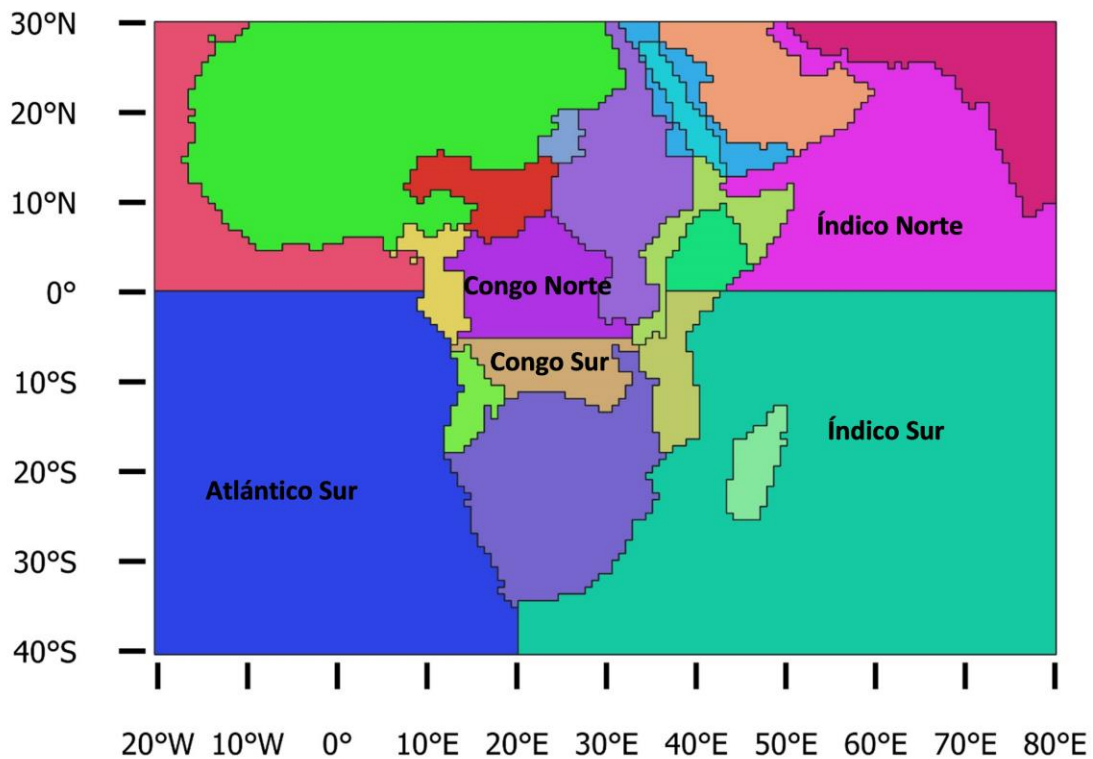
Así, este trabajo de investigación propone un análisis de la variación temporal en el transporte y el reciclaje de la humedad atmosférica en la cuenca del río Congo durante el periodo 1980-2015, analizando su climatología anual, su variación interanual y la influencia de los fenómenos El Niño - Oscilación del Sur (ENOS) y el Dipolo del Océano Índico (DOI). Para ello, se usa el modelo DRM e información del reanálisis atmosférico de última generación ERA5 del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos de Mediano Plazo (ECMWF). En particular, este trabajo busca enfocarse en el reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del río Congo y sus principales diferencias y similitudes con el reciclaje de humedad en la cuenca del río Amazonas, a través del análisis de los ciclos anuales de humedad atmosférica (agua precipitable y precipitación) reciclada y transportada para las regiones norte y sur de ambas cuencas, así como de las tendencias de humedad atmosférica promedio sobre ambas regiones y sus variaciones espaciales.

## 2. Datos y metodología

### 2.1. Área de estudio

#### 2.1.1. Cuenca del río Congo

La Figura 1 muestra el área de estudio considerada en este trabajo, la cual se encuentra comprendida entre las latitudes 30°N a 40°S y las longitudes 80°E a 20°W, abarcando la mayor parte del continente africano, especialmente el centro y sur, así como los océanos Atlántico e Índico. Para efectos de implementar el modelo DRM, esta región se dividió en 21 subregiones, a partir de las regiones fuente continentales y oceánicas de humedad identificadas por Sorí et al. (2017). Para esto, se empleó el producto HydroBASINS (Lehner & Grill, 2013), el cual cuenta con capas de polígonos con diversas cuencas y subcuencas a diferentes resoluciones espaciales a nivel global. La cuenca del río Congo se encuentra en la región central de África, en la que los mayores aportes de humedad se dan mediante procesos de reciclaje (humedad generada dentro de la misma cuenca) y por el transporte desde los océanos (Sorí et al., 2017).

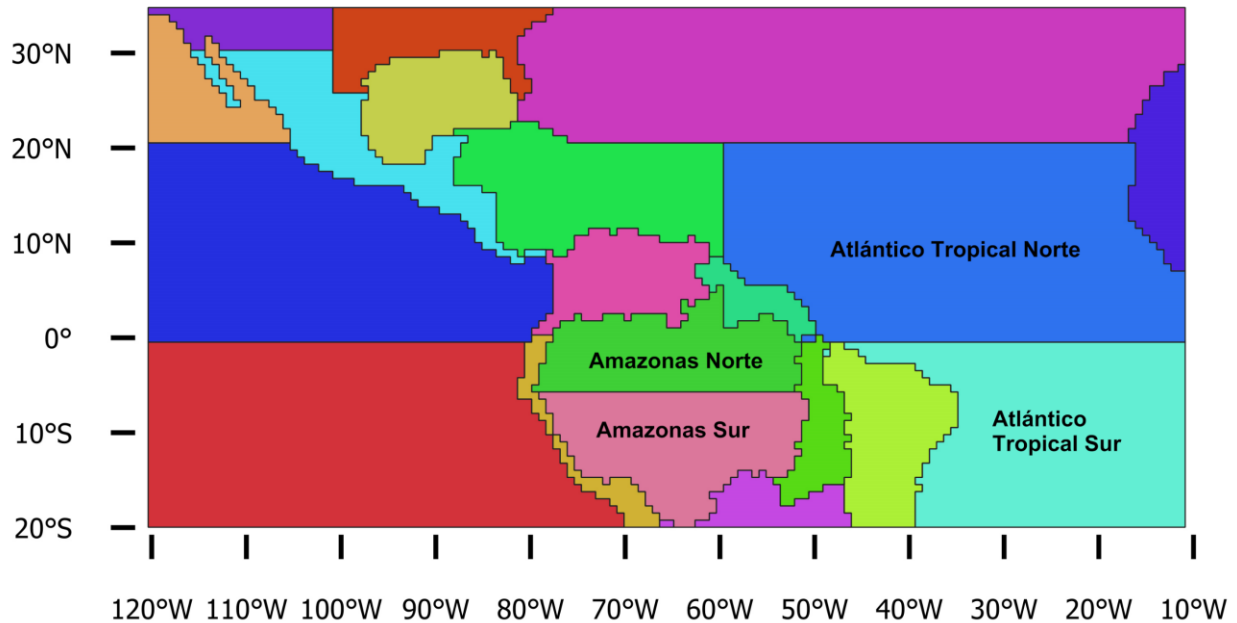


**Figura 1.** Área de estudio y regiones fuente consideradas en el transporte de humedad atmosférica hacia la cuenca del río Congo.

La cuenca del río Congo se dividió en dos regiones (Congo Norte y Congo Sur) debido a la diferencia en la cobertura vegetal (de Wasseige et al., 2015) y a los patrones de lluvia que predominan en ambas partes de la cuenca (Farnsworth et al., 2011; Lashkari & Jafari, 2021). La región norte presenta un régimen bimodal a lo largo del año, con los periodos de lluvia durante los meses Marzo-Abril-Mayo (MAM) y Septiembre-Octubre-Noviembre (SON), siendo este último el periodo de mayor precipitación. Por su parte, la región sur tiene un comportamiento unimodal con su pico alrededor de los meses Diciembre-Enero-Febrero (DJF) (Sorí et al., 2017), comportamiento similar al presentado para el agua precipitable. En cuanto a cobertura vegetal, la región Congo Norte exhibe una predominancia del bosque húmedo tropical ubicado

alrededor de regiones boscosas pantanosas y cuenta con presencia de sabanas en su extremo más al norte, mientras que la región Congo Sur es dominada por la presencia de sabanas, praderas, tierras de cultivo y bosques más secos adaptados a la estacionalidad (de Wasseige et al., 2015).

### 2.1.2. Cuenca del río Amazonas



**Figura 2.** Área de estudio y regiones fuente consideradas en el transporte de humedad atmosférica hacia la cuenca del río Amazonas.

Con el fin de comparar el comportamiento del transporte de humedad atmosférica en las cuencas de los ríos Congo y Amazonas, para esta última se consideró la región comprendida entre las latitudes 30°N a 20°S y las longitudes 10°W a 120°W. Para la estimación del transporte de humedad atmosférica en esta región, se consideró una división de dicho dominio en 20 subregiones, con base en el trabajo desarrollado por Agudelo et al. (2019), quienes consideraron una subdivisión de la cuenca del río Amazonas en dos regiones (norte y sur), debido a la diferencia en los ciclos hidroclimatológicos que se presentan en la cuenca (Marengo, 2004) (Figura 2).

### 2.2. DRM

El modelo DRM es un modelo dinámico de reciclaje de precipitación en el que se incorpora el término de almacenamiento de humedad, utilizando como entradas variables provenientes de información de reanálisis (por ejemplo, los productos ERA del ECMWF), siendo utilizado con éxito en diversas regiones del planeta: Estados Unidos (Domínguez et al., 2006, 2020), Centro y Sur América (Martínez & Domínguez, 2014; Arias et al., 2015; Hoyos et al., 2018; Agudelo et al., 2019; Herrera-Estrada et al., 2019; Ruiz-Vásquez et al., 2020; Morales et al., 2021) o India (Pathak et al., 2014). Las principales fuentes de error e incertidumbre de este modelo se relacionan con la cizalladura del viento en la vertical (corte vertical del viento) (Morales et al., 2021) y su uso para épocas de invierno (Goessling & Reick, 2013), debido a que este modelo se fundamenta en la consideración de una atmósfera bien mezclada. Sin embargo, esta última consideración puede llevar a la subestimación del reciclaje de precipitación, ya que una atmósfera bien mezclada puede no ser válida en el dominio considerado (Domínguez et al., 2022).

El modelo se deriva de la ecuación de conservación de masa de vapor de agua atmosférico, en la cual la ecuación de equilibrio integrado en la vertical para el vapor de agua está dada por la ecuación (1), donde el primer término se refiere al almacenamiento de vapor de agua, el segundo término representa la advección zonal y el tercer término representa la advección meridional (Domínguez et al., 2006).

$$\frac{\partial(w)}{\partial t} + \frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} = E - P ; \quad (1)$$

$$w = \int_0^{p_0} \bar{q} \frac{dp}{g} ; \quad (2)$$

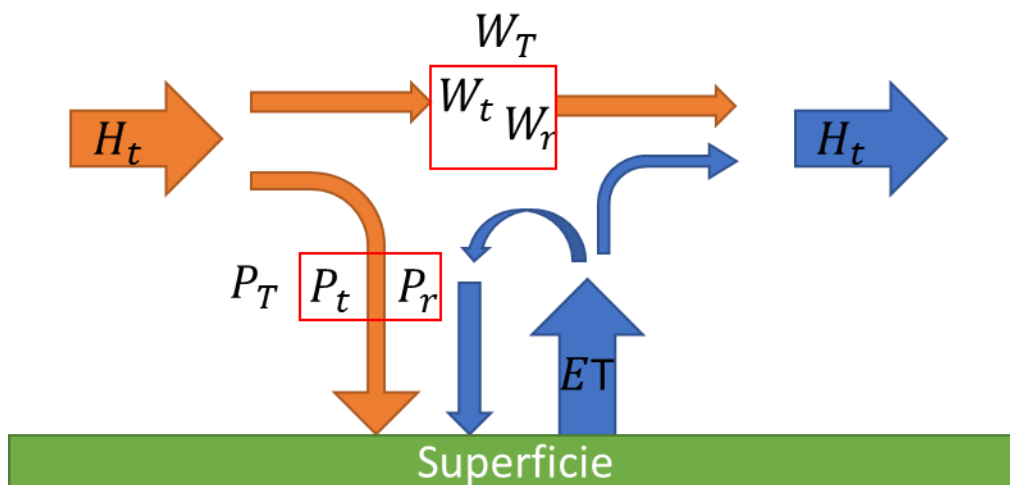
$$u = \frac{1}{w} \left( \int_0^{p_0} \bar{q} \bar{u} \frac{dp}{g} + \int_0^{p_0} \bar{q}' \bar{u}' \frac{dp}{g} \right) ; \quad (3)$$

$$v = \frac{1}{w} \left( \int_0^{p_0} \bar{q} \bar{v} \frac{dp}{g} + \int_0^{p_0} \bar{q}' \bar{v}' \frac{dp}{g} \right) ; \quad (4)$$

En las anteriores ecuaciones,  $w$  es la columna total de vapor de agua (agua precipitable),  $u$  es la componente zonal del viento,  $v$  es la componente meridional del viento,  $E$  es evapotranspiración,  $P$  es precipitación, y  $\bar{q}, \bar{q}', \bar{u}, \bar{u}', \bar{v}, \bar{v}'$  los valores medios y las fluctuaciones de la humedad específica ( $q$ ) y las componentes zonal y meridional del viento, respectivamente (Domínguez et al., 2006).

La Figura 3 presenta un esquema gráfico del funcionamiento de este modelo, donde  $H_t$  es humedad trasportada,  $W_T$  es agua precipitable total,  $P_T$  es precipitación total,  $W_t$  es agua precipitable trasportada,  $W_r$  es agua precipitable reciclada,  $P_t$  es precipitación trasportada,  $P_r$  es precipitación reciclada, y ET es evapotranspiración.

Es posible definir  $W_T$  como la suma de  $W_t$  y  $W_r$ , y  $P_T$  de igual manera como la suma de  $P_t$  y  $P_r$ . El agua precipitable reciclada y la precipitación reciclada son aquellas que han tenido su origen en la evapotranspiración desde una región fuente y permanecen u ocurren sobre esta misma región, mientras que el agua precipitable trasportada y la precipitación trasportada son aquellas que tienen su origen en una región fuente y debido a diversos mecanismos son transportadas hacia regiones sumidero. En estas regiones, la porción de humedad trasportada ( $H_t$ ) se combina a su vez con la humedad reciclada de la región sumidero, resultando en  $W_T$  y  $P_T$  sobre la nueva región donde se repetirá de nuevo el ciclo, presentándose una porción de humedad reciclada y otra porción que será transportada hacia nuevas regiones sumideros.



**Figura 3.** Esquema con la representación básica del funcionamiento del modelo DRM.



### 2.3. Datos

Los datos de entrada para las simulaciones con DRM provienen del reanálisis de última generación ERA5 del ECMWF (<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>). Esta base de datos cuenta con escalas de tiempo que varían desde resolución horaria hasta mensual en diversos niveles de presión e integraciones en la vertical, con una extensión temporal desde el año 1979 hasta la actualidad y una resolución espacial original de 0.25° (Hersbach et al., 2020).

La Tabla 1 presenta las variables utilizadas por el modelo DRM, las cuales fueron descargadas con una resolución temporal horaria y resolución espacial de 0.75° para el área descrita en la sección 2.1.1 (Figura 1) durante el periodo comprendido entre 1980 y 2015. Sin embargo, para usar el modelo DRM fue necesario realizar un preprocesamiento con el fin de llevar estos datos a una resolución temporal diaria.

**Tabla 1.** Variables de ERA5 utilizadas en el modelo DRM junto a su resolución espacial y temporal.

Variable	Resolución espacial	Resolución temporal original	Resolución temporal DRM
Precipitación	0.75°	Horaria	Diaria
Evapotranspiración	0.75°	Horaria	Diaria
Columna total de vapor de agua (agua precipitable)	0.75°	Horaria	Diaria
Flujo de vapor de agua integrado en la vertical (zonal)	0.75°	Horaria	Diaria
Flujo de vapor de agua integrado en la vertical (meridional)	0.75°	Horaria	Diaria

A pesar que históricamente varios conjuntos de datos se han utilizado para mejorar el entendimiento de la hidroclimatología de la cuenca del Congo, estos han sido difíciles de validar debido a la falta de mediciones en campo (De Benedetti et al., 2022), por lo que como parte del proceso de validación y verificación del producto de reanálisis en su representación adecuada de las variables de interés sobre la región de estudio, se analizaron otras bases de datos de precipitación, debido a que, a pesar de que la climatología y la variabilidad interanual de esta variable tienden a presentar bajos errores en productos de reanálisis, su tendencia a largo plazo puede no verse representada adecuadamente (Gleixner et al., 2020). Adicionalmente, se hace necesario recurrir a este tipo de productos debido a que en la cuenca del Congo ha existido un gran declive en el número de estaciones sobre el terreno, lo que, sumado a la poca probabilidad de la implementación de estrategias de monitoreo a largo plazo (Washington et al., 2013), resulta en grandes limitaciones sobre el conocimiento de la magnitud, estacionalidad y variabilidad interanual de las variables de interés en esta región (Burnett et al., 2020). La Tabla 2 presenta las bases de datos utilizadas para este fin y su respectivo periodo de análisis.

**Tabla 2.** Bases de datos de precipitación.

Base de datos	Periodo
CHIRPS	1981-2015
CRU TS	1981-2015
GPCP	1981-2015
MSWEP	1981-2015
NIC131	1981-2015
Terraclimate	1981-2015
TRMM	1998-2015

Para el análisis del transporte y reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del río Amazonas se utilizó la simulación realizada por Rendón-Hurtado (2021), utilizando el modelo DRM sobre la región presentada en la sección 2.1.2. Esta simulación comprende el periodo 1980-2005, empleando las variables presentadas en la Tabla 1 provenientes del reanálisis ERA5 para el dominio presentado en la Figura 2.

Este trabajo también analiza la influencia del fenómeno ENOS sobre el transporte de humedad atmosférica en la cuenca del Congo, ya que tanto su fase positiva (El Niño) como negativa (La Niña) tienen una gran influencia en la ocurrencia de precipitación continental en esta región (Sorí et al., 2021), que se refleja en impactos a nivel ecosistémico y social (Ropelewski & Halpert, 1987).

La identificación de eventos El Niño y La Niña se realizó mediante la clasificación de eventos positivos y negativos por temporada suministrada por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOOA), a partir de un umbral de valores superiores a 0.5°C (El Niño) o inferiores a -0.5°C (La Niña) para el Índice del Niño Oceánico (ONI) en la región Niño 3.4 ([https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)). La Tabla 3 presenta la clasificación de los eventos El Niño y La Niña identificados durante el periodo de estudio, con 11 eventos El Niño y 12 eventos La Niña.

**Tabla 3.** Clasificación de las fases del ENOS según el ONI.

<b>El Niño</b>	<b>La Niña</b>
1982-83	1983-84
1986-87	1984-85
1987-88	1988-89
1991-92	1995-96
1994-95	1998-99
1997-98	1999-00
2002-03	2000-01
2004-05	2005-06
2006-07	2007-08
2009-10	2008-09
2014-15	2010-11
	2011-12

De igual manera, se analizó la influencia del Dipolo del Océano Índico (DOI) sobre la cuenca del río Congo, debido al gran impacto que este fenómeno tiene sobre el océano Índico. Este fenómeno se compone de una fase positiva, asociada al aumento de la temperatura en el oeste del océano Índico y una disminución en el este de dicho océano, generando un aumento en la precipitación sobre el este de África; además, presenta una fase negativa, en la que este comportamiento se invierte, es decir, disminuye la temperatura en el oeste del océano Índico mientras que aumenta en la región este (Marchant et al., 2007). La Tabla 4 presenta la clasificación de los eventos positivos y negativos del DOI ocurridos durante el periodo de estudio, obtenidos del Bureau de Meteorología del Gobierno Australiano (<http://www.bom.gov.au/climate/iod/>). En total, se identificaron 7 eventos positivos y 7 eventos negativos del DOI durante el periodo de análisis.

**Tabla 4.** Clasificación de las fases del DOI de acuerdo al Bureau de Meteorología del Gobierno Australiano.

<b>Fase positiva</b>	<b>Fase negativa</b>
1982	1981
1983	1989
1994	1992
1997	1996
2006	1998
2012	2010
2015	2014

#### **2.4. Celdas regionales de Hadley y Walker**

Como complemento en el estudio de la influencia de los fenómenos ENOS y DOI en el transporte de humedad atmosférica hacia la cuenca del río Congo, se analizaron las alteraciones en las celdas regionales de Hadley y de Walker para la región Congo Norte y Congo Sur durante las fases positivas, neutrales y negativas de estos fenómenos. Para ello, se empleó la metodología propuesta por Zhang & Wang (2013) y replicada por Agudelo et al. (2019) y Ruiz-Vásquez et al. (2020). En este método, la componente meridional del viento irrotacional puede considerarse como parte de la circulación norte-sur (celda de Hadley) y la componente zonal del viento irrotacional como parte de la circulación este-oeste (celda de Walker), lo que permite derivar una función de flujo meridional ( $\Psi$ ) a partir de la componente meridional del flujo irrotacional del viento, la cual puede ser calculada como se muestra en la ecuación (5).

$$\Psi = \frac{2\pi a \cos(\phi)}{g} \int_0^p [v_{IR}] dP \quad (5)$$

donde  $\Psi$  es la función de flujo meridional,  $\phi$  es latitud,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $a$  es el radio de la Tierra y  $v_{IR}$  es la componente meridional del viento irrotacional.

#### **2.5. Métodos estadísticos**

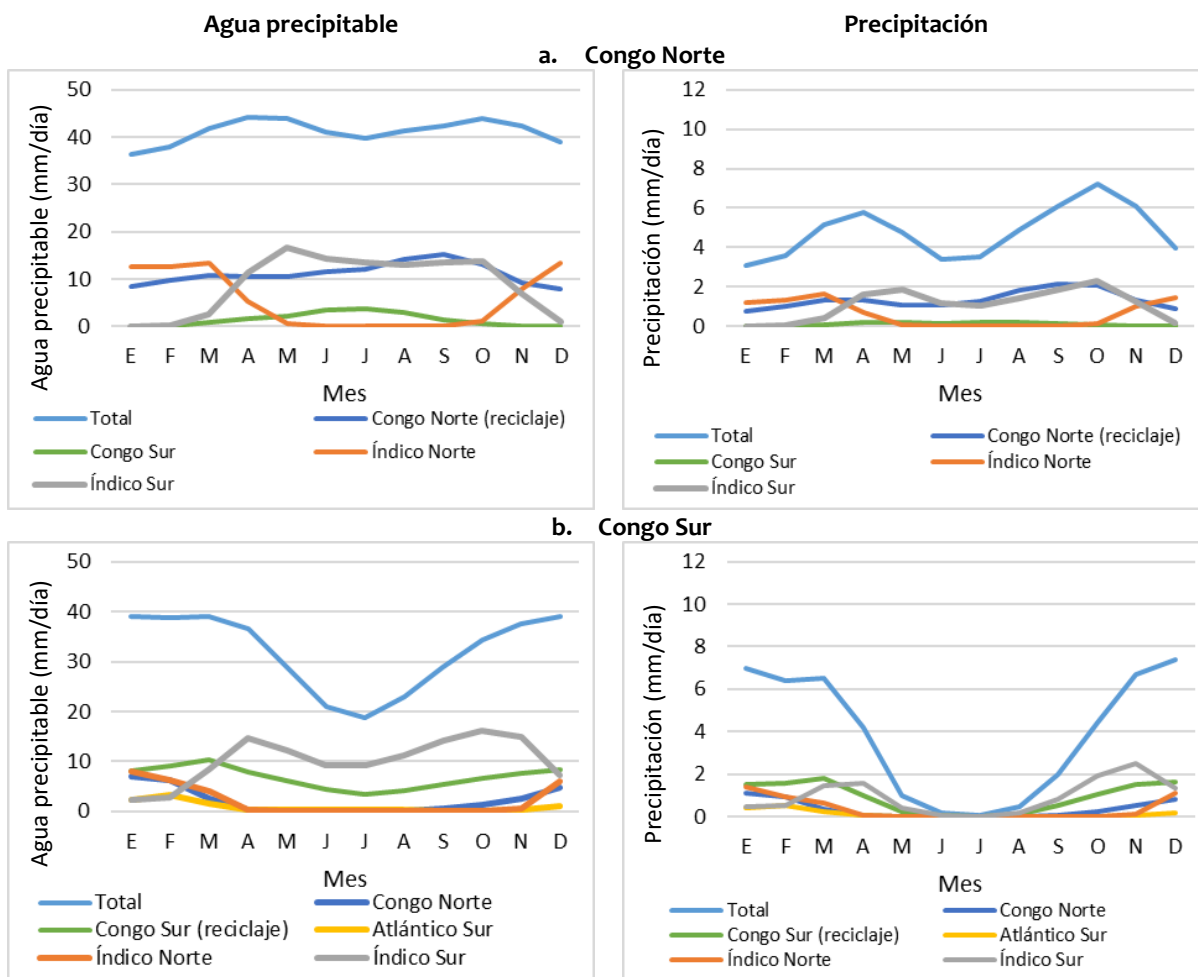
Con el fin de analizar la variabilidad interanual del transporte de humedad atmosférica para la cuenca del río Congo (Amazonas) durante el periodo 1980-2015 (1980-2005), se utilizó la prueba no paramétrica Mann-Kendall (Kendall, 1975) cuya hipótesis nula corresponde a la no existencia de tendencias en los datos analizados sobre las series de tiempo de precipitación promedio mensual en las regiones norte y sur de cada cuenca, y sobre las series de tiempo de anomalías de agua precipitable y precipitación transportada y reciclada desde las principales regiones fuente. Estas anomalías fueron calculadas como la diferencia entre la serie de tiempo y el ciclo anual multianual, buscando remover la estacionalidad de los datos y permitir evidenciar su variación con respecto a la climatología. Valores positivos indican que la magnitud de la variable observada fue mayor a la línea base (ciclo anual multianual), mientras que valores negativos indican que esta variable estuvo por debajo. Por otro lado, buscando identificar la existencia de diferencias de medias estadísticamente significativas en el transporte y reciclaje de humedad atmosférica debido a la influencia de las fases positivas, negativas y neutras del fenómeno ENOS y del DOI en el transporte de humedad atmosférica a la cuenca del río Congo, se utilizó la prueba de análisis de varianza (ANOVA), bajo la hipótesis nula de no existencia de diferencia de las medias de las variables de los grupos analizados, seguido de la aplicación de la prueba Post Hoc de Tukey (Tukey, 1949), buscando identificar cuándo en el tiempo emerge dicha diferencia.

### 3. Resultados

#### 3.1. Climatología de la cuenca del río Congo

La Figura 4 muestra el ciclo anual multianual de agua precipitable y precipitación total y transportada desde las principales fuentes terrestres y oceánicas hacia la región Congo Norte y Congo Sur (ver Figura 1). Inicialmente, se observa que la cantidad de agua precipitable y precipitación total es mayor en la región Congo Norte que en el sur de la cuenca. Esta primera región tiene un comportamiento bimodal tanto en precipitación total como agua precipitable total, donde las mayores magnitudes se presentan durante MAM y SON, mientras que en DJF y Junio-Julio-Agosto (JJA) se presentan los valores mínimos (Washington et al., 2013, Sorí et al., 2017). En la región Congo Sur se presenta un comportamiento similar en ambas variables, con los valores mínimos de precipitación y agua precipitable total en JJA. En la Figura 4 es posible evidenciar que el reciclaje de agua precipitable y precipitación tiene un aporte similar a los aportes desde las regiones norte y sur del océano Índico, lo que demuestra que la misma cuenca del río Congo tiene una contribución a la humedad atmosférica similar a la de las grandes regiones oceánicas. Según Sorí et al. (2017), aproximadamente el 50% de la contribución de humedad atmosférica a la precipitación sobre esta cuenca es proveniente de ella misma (precipitación reciclada) y puede presentar variaciones dependiendo de las tasas de precipitación anuales, donde la contribución de la cuenca a la precipitación local aumenta en los años más húmedos, mientras que esta contribución decrece en los años secos (Sorí et al., 2017). Este comportamiento se evidencia con mayor claridad en la Tabla 5, donde es posible observar que el porcentaje promedio de reciclaje de agua precipitable y precipitación en la región norte de la cuenca es mayor al porcentaje promedio de agua precipitable y precipitación transportada desde las regiones norte y sur del océano Índico, mientras que en la región Congo Sur, el reciclaje de humedad atmosférica es mayor que la humedad transportada desde la región Índico Norte y menor que desde el Índico Sur. Sin embargo, a pesar de que las tasas de reciclaje de precipitación reportadas son menores que la presentada por Sorí et al. (2017), al observar en la Tabla 6 los valores promedio, mínimo y máximo de precipitación mensual multianual reciclada en las regiones norte y sur de la cuenca, se evidencia la existencia de periodos que presentaron valores de reciclaje de precipitación alrededor del 45% y 41% con respecto a la precipitación total para cada región de la cuenca.

En la región Congo Sur se observa una disminución en el reciclaje de precipitación durante JJA, así como en el aporte desde las regiones oceánicas en este periodo, lo que ocasiona los mínimos de precipitación observados en la Figura 4.b. Sin embargo, el ciclo anual multianual de agua precipitable muestra la existencia de un reciclaje continuo y un aporte desde la región Índico Sur que igualmente se mantiene a lo largo de este periodo seco, evidenciando que mientras la precipitación sobre la región sur del Congo alcanza sus mínimos, continúa la presencia de agua precipitable y a pesar de que se pueden generar eventos de lluvia, esta no ocurre en gran magnitud debido al desplazamiento hacia el hemisferio norte de los sistemas de convergencia que influyen en la precipitación sobre el sur de la cuenca del Congo (Lashkari & Jafari, 2021).



**Figura 4.** Ciclo anual multianual de agua precipitable y precipitación para las regiones Congo Norte y Congo Sur.

**Tabla 5.** Porcentaje promedio de agua precipitable y precipitación reciclada y transportada desde el océano Índico hacia ambas regiones de la cuenca del Congo.

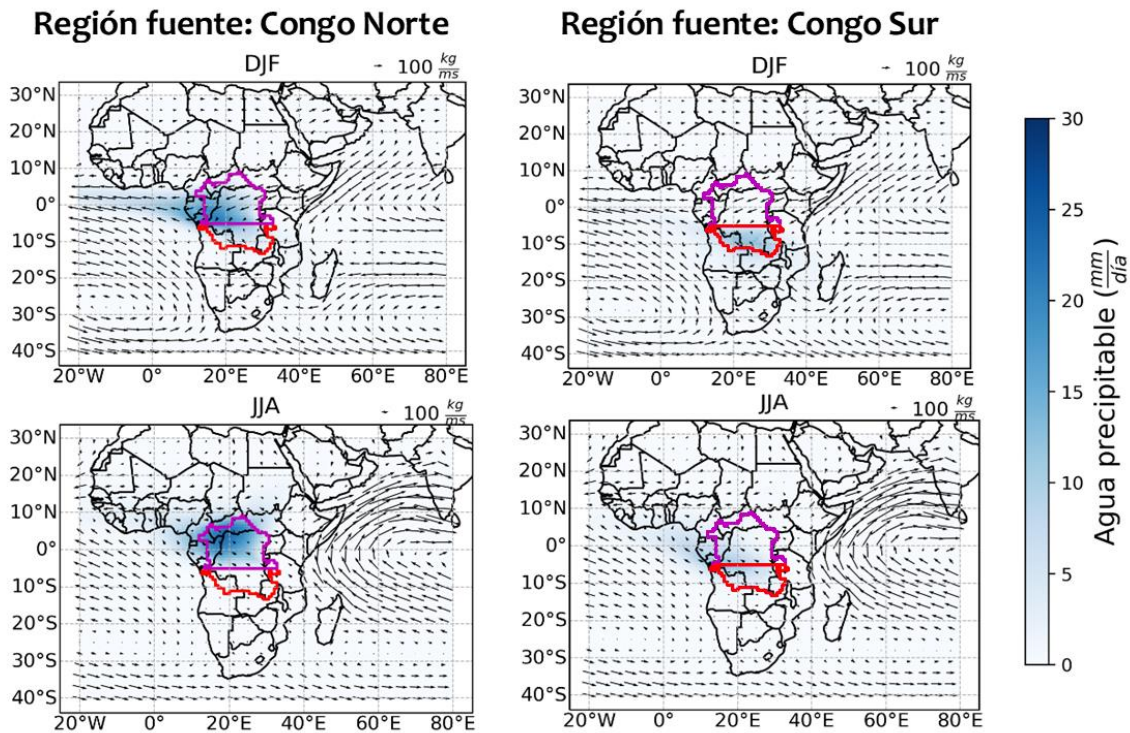
	Agua precipitable (% promedio)	Precipitación (% promedio)
<b>Hacia Congo Norte</b>		
<b>Congo Norte (Reciclaje)</b>	26.94	28.22
<b>Índico Norte</b>	14.12	14.83
<b>Índico Sur</b>	21.06	21.51
<b>Hacia Congo Sur</b>		
<b>Congo Sur (Reciclaje)</b>	20.77	25.97
<b>Índico Norte</b>	5.36	5.17
<b>Índico Sur</b>	34.38	31.42

**Tabla 6.** Precipitación mensual multianual promedio, mínima y máxima reciclada en la cuenca del Congo. También se indica su valor porcentual con respecto a la precipitación total.

Región	Precipitación (mm/día)					
	Promedio	% Promedio	Mínimo	% Mínimo	Máximo	% Máximo
<b>Congo Norte</b>	1.36	28.22	0.35	17.41	2.82	44.98
<b>Congo Sur</b>	0.92	25.97	0.00	16.87	2.16	41.41

### 3.1.1. Agua precipitable

Como se discutió en la sección anterior, se evidencia un mínimo tanto en términos de agua precipitable como de precipitación total durante JJA para la cuenca del río Congo; sin embargo, el reciclaje tiende a presentar las variaciones más importantes durante SON y DEF, trimestres donde se presenta un aumento y disminución, respectivamente, en el reciclaje de humedad atmosférica, asociado a la variación en el ciclo de anual de agua precipitable y precipitación total sobre la región norte de la cuenca. Por su parte, el transporte desde la región norte del océano Índico experimenta una variación significativa a lo largo del año, presentando una reducción durante JJA debido a la ocurrencia del monzón de la India, el cual ocasiona una alteración en el flujo de humedad que se ve reflejada en el cambio de dirección de los vientos y su advección de vapor de agua hacia el oriente. Esto se traduce en un mayor transporte de humedad atmosférica desde el océano Índico hacia la región del Indostán, ya que normalmente el flujo de humedad tiende a fluir de oriente a occidente como consecuencia de la influencia de los vientos alisios (Figura 5 y Figura 6). Mientras la región Índico Norte presenta este mínimo alrededor de mediados de año y su reciclaje de humedad no presenta variaciones muy drásticas, la región Índico Sur toma un papel más relevante, entrando a suplir parte de la humedad que ha sido desviada debido al monzón. Esto genera que el transporte de humedad atmosférica desde las regiones norte y sur del océano Índico presenten un comportamiento inverso, pues se observa que se reduce ostensiblemente el aporte de humedad desde la región Índico Norte hacia la cuenca, mientras que el aporte desde la región Índico Sur se activa.

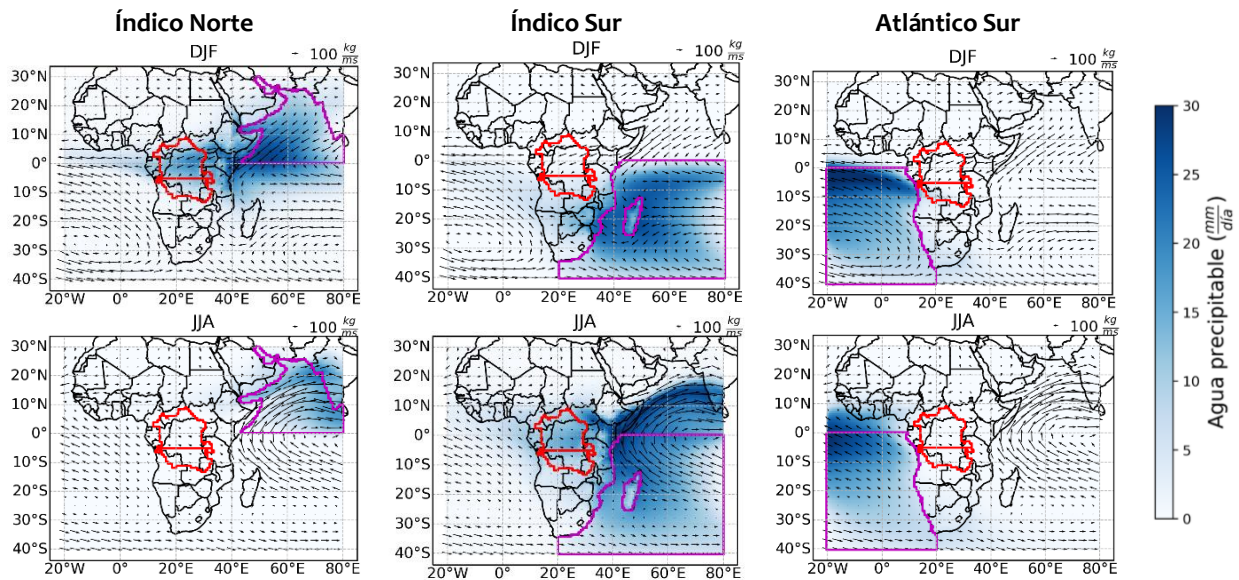


**Figura 5.** Aporte de agua precipitable desde las regiones Congo Norte (izquierda) y Congo Sur (derecha) durante DJF y JJA. En púrpura se presenta la región Congo Norte. En rojo se presenta la región Congo Sur.

La Figura 5 presenta el aporte climatológico de agua precipitable desde las regiones Congo Norte (contorno púrpura) y Congo Sur (contorno rojo) durante DJF y JJA. Es posible observar una predominancia en el transporte de humedad proveniente de la región Congo Norte en dirección oeste, así como un aporte hacia el sur de la cuenca durante DJF, mientras que en JJA se observa que el agua precipitable tiende a distribuirse

con mayor magnitud en la región norte. Por el contrario, el reciclaje en la región Congo Sur presenta una mayor magnitud durante DJF, con poco transporte hacia otras regiones, mientras que en JJA se observa una disminución en la cantidad de agua precipitable sobre esta región y un aumento en el transporte hacia el norte de la cuenca y oeste del continente africano.

La Figura 6 muestra las contribuciones desde tres regiones oceánicas (contorno púrpura) hacia la cuenca del río Congo (contorno rojo). Durante DJF, la región Índico Norte se comporta como la principal fuente oceánica de agua precipitable hacia ambas regiones de la cuenca, mientras que la región Índico Sur presenta los valores más bajos en su contribución de humedad atmosférica hacia el sur de la cuenca y a su vez aumenta el aporte de agua precipitable desde el sur del océano Atlántico hacia la región Congo Sur, ocurriendo su máximo durante el mes de febrero Figura 4. En este trimestre se puede identificar la ocurrencia de las magnitudes mínimas de agua precipitable total sobre el norte de la cuenca del Congo, como consecuencia principalmente de la disminución en el aporte de agua precipitable desde la región sur del océano Índico. Por el contrario, el comportamiento del transporte de humedad desde el océano Índico se invierte en el periodo JJA, ocasionando una disminución en el transporte de humedad desde la región norte de este océano y un aumento en el transporte desde la región sur, mientras que en este periodo la advección de agua precipitable desde el Atlántico Sur hacia el Congo Sur alcanza sus mínimos, como se evidencia en la Figura 4. Este comportamiento de la humedad atmosférica reciclada y transportada ocurre de manera similar en términos de precipitación, existiendo esta relación inversa entre los aportes de humedad desde las regiones norte y sur del océano Índico, especialmente hacia la región Congo Norte.



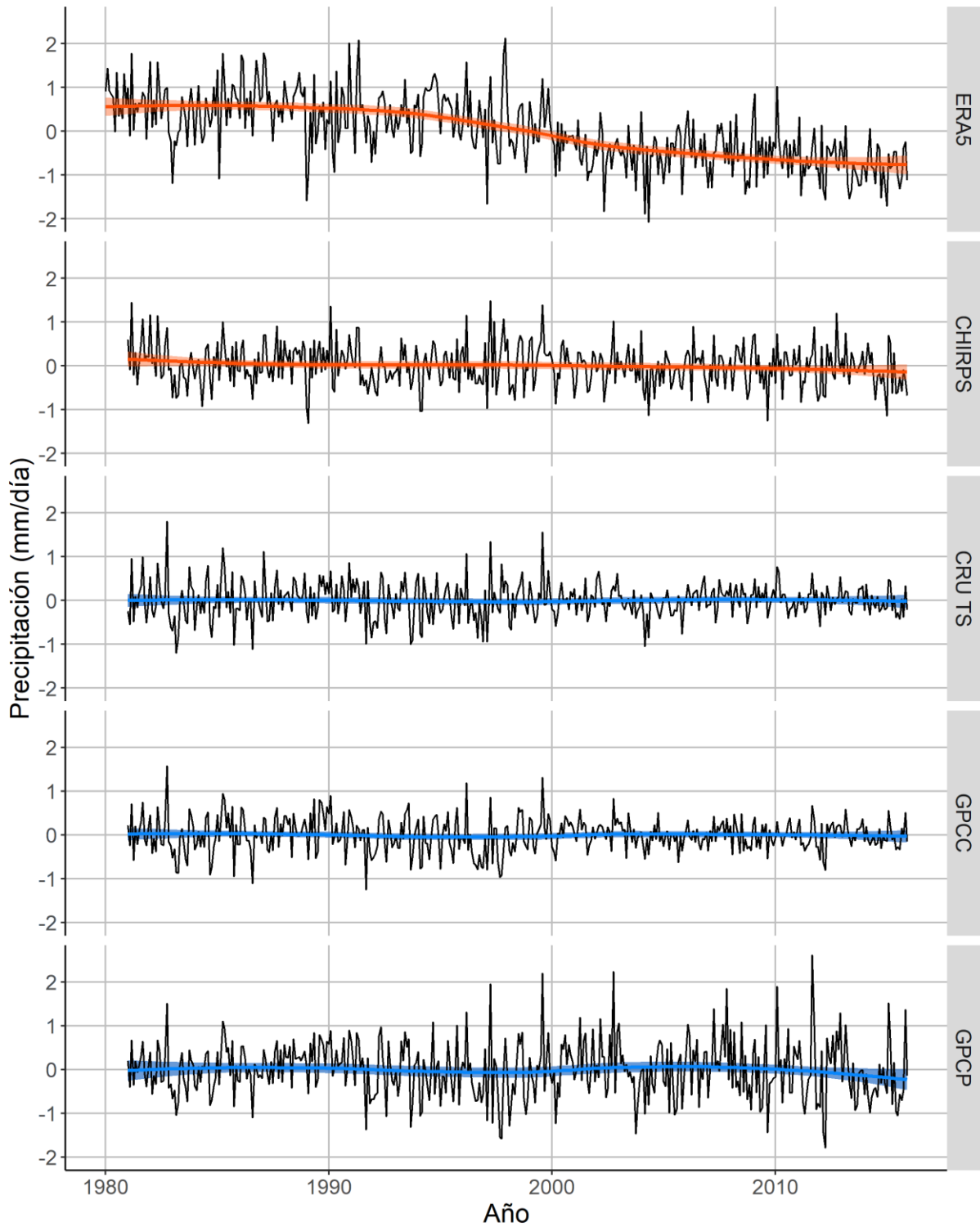
**Figura 6.** Aporte de agua precipitable desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur durante DJF y JJA. En púrpura se presenta la respectiva región fuente oceánica. En rojo se presenta la cuenca del río Congo.

### 3.1.2. Precipitación

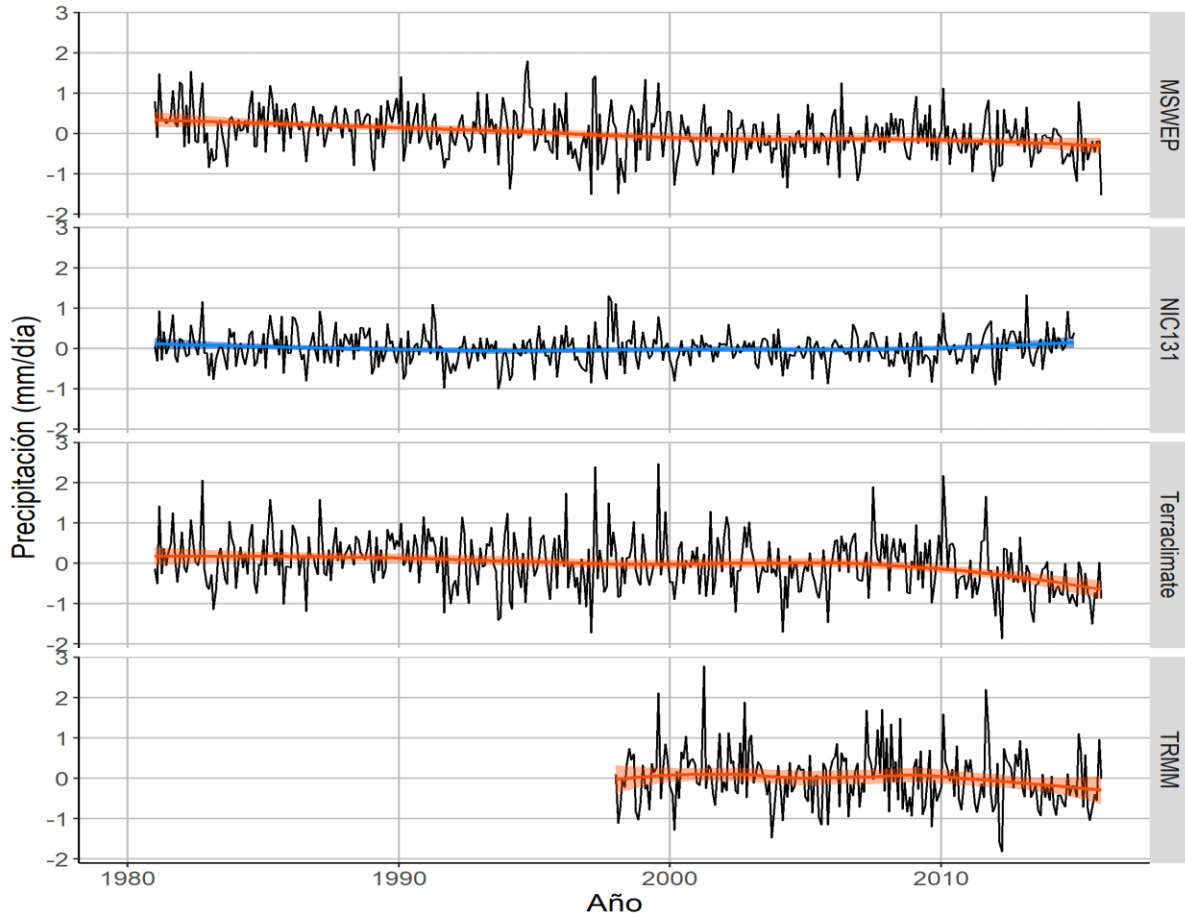
La Figura 7 hasta la Figura 10 presentan las series de tiempo de anomalías de precipitación promedio para las regiones Congo Norte (Figura 7 y Figura 8) y Congo Sur (Figura 9 y Figura 10), provenientes de las bases de datos ERA5 (Hersbach et al., 2020) durante el periodo 1980-2015, CHIRPS (Funk et al., 2015), CRU TS (Harris et al., 2020), GPCP (Schneider et al., 2011), GPCP (Adler et al., 2003), MSWEP (Beck et al., 2017), NIC131 (Nicholson et al., 2018) y Terraclimate (Abatzoglou et al., 2018) durante el periodo 1981-2015, y TRMM (TMPA/3B43) (Huffman et al., 2010) para el periodo 1998-2015.

En estas figuras se evidencia una tendencia negativa en la precipitación para la región norte de la cuenca del Congo de acuerdo con la base de datos ERA5, mientras que las demás bases de datos presentan una tendencia menos marcada, como lo sugiere la línea de ajuste presentada. Dado que ERA5 corresponde a un reanálisis climático que presenta altas incertidumbres en su simulación de la precipitación (Gleixner et al., 2020), se verificó la existencia de dicha tendencia en diversas bases de datos observacionales, estimando su significancia estadística, para lo que se aplicó la prueba no paramétrica Mann-Kendall, cuyo coeficiente TAU y valor p se presentan en la Tabla 7. Estas estimaciones permiten confirmar la existencia de una tendencia decreciente en las anomalías de precipitación sobre la región norte de la cuenca en todas las bases de datos; sin embargo, esta es estadísticamente significativa a un nivel alfa de 0.05 sólo en cinco de las nueve bases de datos utilizadas (ERA5, CHIRPS, MSWEP, Terraclimate y TRMM). Las líneas de ajuste rojas indican una tendencia estadísticamente significativa, mientras que las líneas de ajuste azul representan tendencias no estadísticamente significativas.





**Figura 7.** Series de tiempo de anomalías de precipitación promedio sobre la región Congo Norte provenientes de las bases de datos ERA5, CHIRPS, CRU TS, GPCC y GPCP. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas.



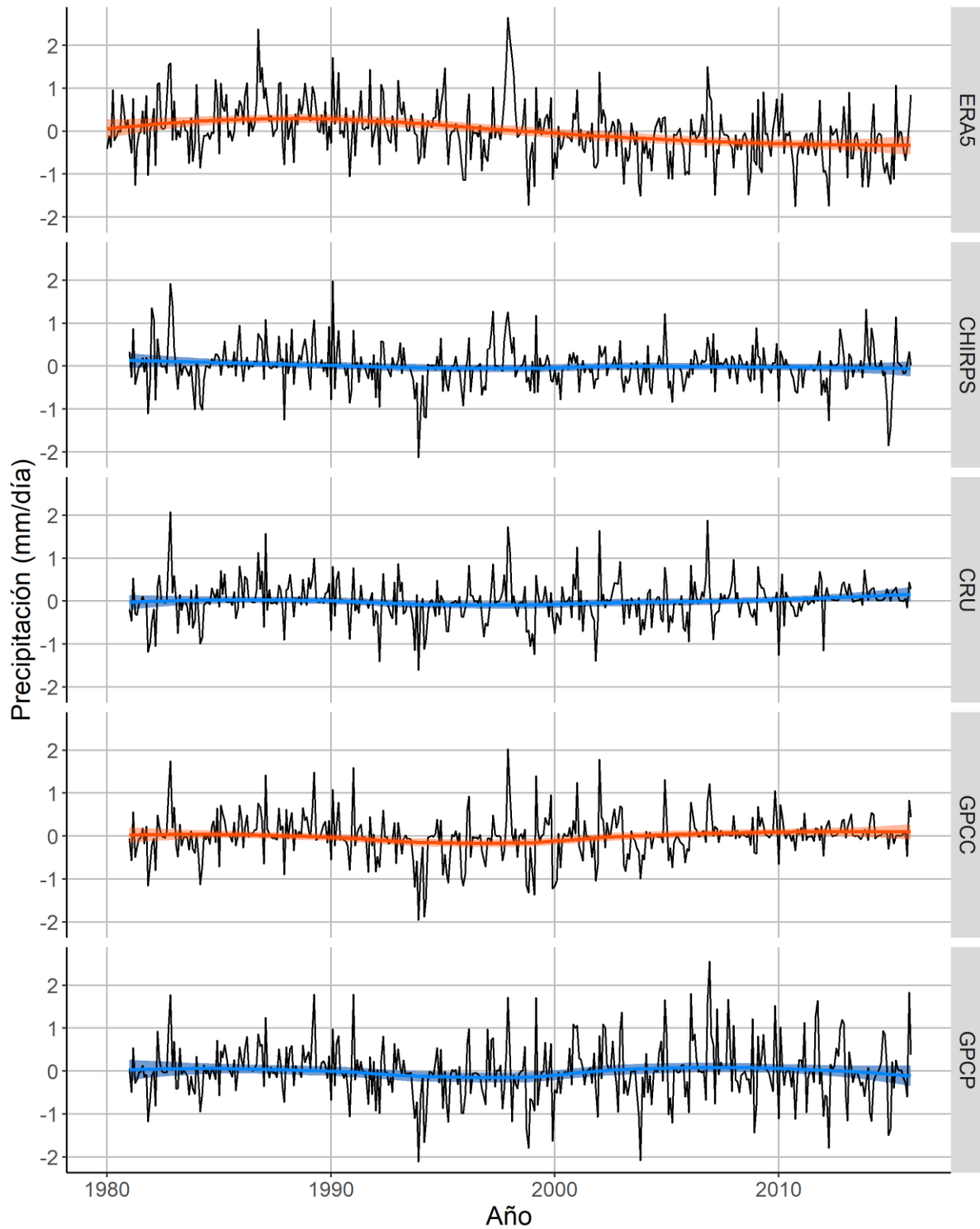
**Figura 8.** Series de tiempo de anomalías de precipitación promedio sobre la región Congo Norte provenientes de las bases de datos MSWEP, NIC131, Terraclimate y TRMM. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas.

**Tabla 7.** Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de precipitación en la región Congo Norte.

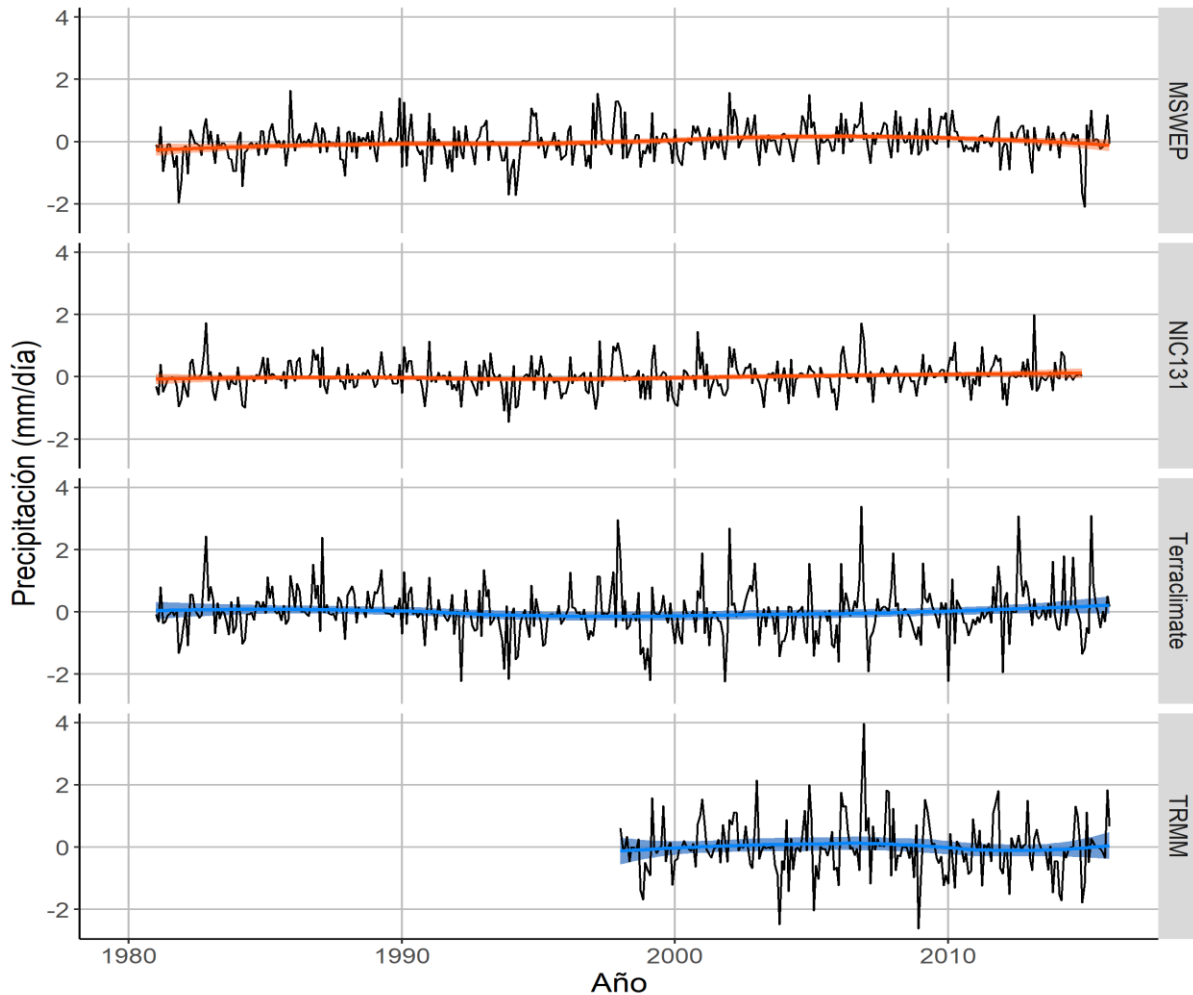
Base de datos	Coeficiente TAU	Valor p
ERA5	-0.456	$\leq 2.22e-16$
CHIRPS	-0.0734	0.024583
CRU TS	0.00884	0.7869
GPCC	-0.0228	0.48501
GPCP	-0.0464	0.15525
MSWEP	-0.206	$3.0628e-10$
NIC131	-0.000506	0.98811
Terraclimate	-0.172	$1.3342e-07$
TRMM	-0.0946	0.038715

La Figura 9 y Figura 10 presentan las series de tiempo de anomalías de precipitación para la región Congo Sur. Se observa que la base de datos ERA5 presenta una tendencia negativa al igual que en la región norte de la cuenca, siendo esta tendencia no evidenciada de manera visual en las demás fuentes de información. Al verificar la información de la Tabla 8, en la que se presenta el coeficiente TAU y valor p resultado de aplicar la prueba no paramétrica Mann-Kendall, se observa que a pesar de que varios conjuntos de datos presentan una tendencia decreciente para esta región (valores TAU negativos), sólo ERA5 exhibe una

significancia (alfa) menor o igual a 0.05, mientras que GPCC, MSWEP y NIC131 evidencian una tendencia creciente estadísticamente significativa en las anomalías de precipitación en el sur de la cuenca.



**Figura 9.** Series de tiempo de anomalías de precipitación promedio sobre la región Congo Sur provenientes de las bases de datos ERA5, CHIRPS, CRU TS, GPCC y GPCP. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas.



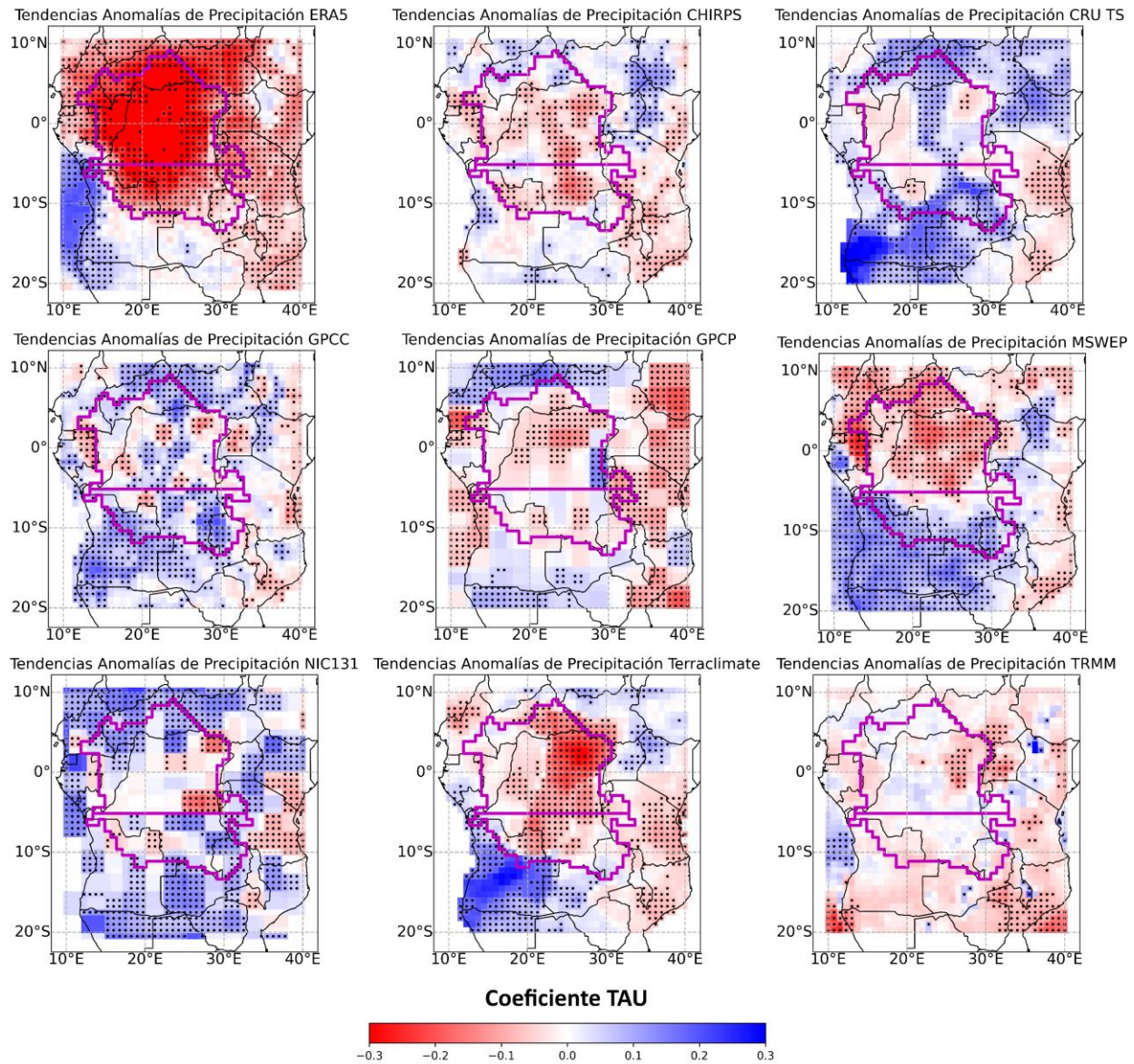
**Figura 10.** Series de tiempo de anomalías de precipitación promedio sobre la región Congo Norte provenientes de las bases de datos MSWEP, NIC131, Terraclimate y TRMM. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas.

**Tabla 8.** Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de precipitación en la región Congo Sur.

Base de datos	Coeficiente TAU	Valor p
ERA5	-0.245	6.413e-14
CHIRPS	-0.037	0.25802
CRU TS	0.0592	0.070155
GPCC	0.0626	0.055279
GPCP	-0.0169	0.60442
MSWEP	0.125	0.00012302
NIC131	0.0822	0.013141
Terraclimate	-0.0217	0.50702
TRMM	-0.0227	0.621

Buscando profundizar en la tendencia observada en las series de tiempo de precipitación sobre la región, se aplicó la prueba no paramétrica Mann-Kendall al campo espacial de tendencias, debido a que las series de tiempo representan un promedio sobre una región (norte y sur de la cuenca) en el que se pueden estar compensando cambios opuestos en el dominio que se usa para calcular el promedio, por lo que este tipo de

análisis espacial permite observar la tendencia (coeficiente TAU) y su significancia estadística espacialmente sobre la cuenca del río Congo. La Figura 11 presenta las tendencias espaciales calculadas para cada conjunto de datos durante su respectivo periodo. Es posible observar que las anomalías de precipitación de ERA5 presentan valores negativos de mayor magnitud en su coeficiente TAU (colores más rojos, asociados a un coeficiente TAU más negativo) y se presenta una significancia estadística en gran parte de la cuenca; sin embargo, se resalta la existencia de una tendencia decreciente en las anomalías de precipitación, principalmente en la región norte de la cuenca, en todos los conjuntos de datos. Por otra parte, la región Congo Sur presenta una tendencia decreciente importante en las bases de datos de ERA5, CHIRPS, GPCP, Terraclimate y TRMM, a pesar de que en este último conjunto de datos no se observa una significancia estadística y, a su vez, cuenta con el periodo de registro más corto.

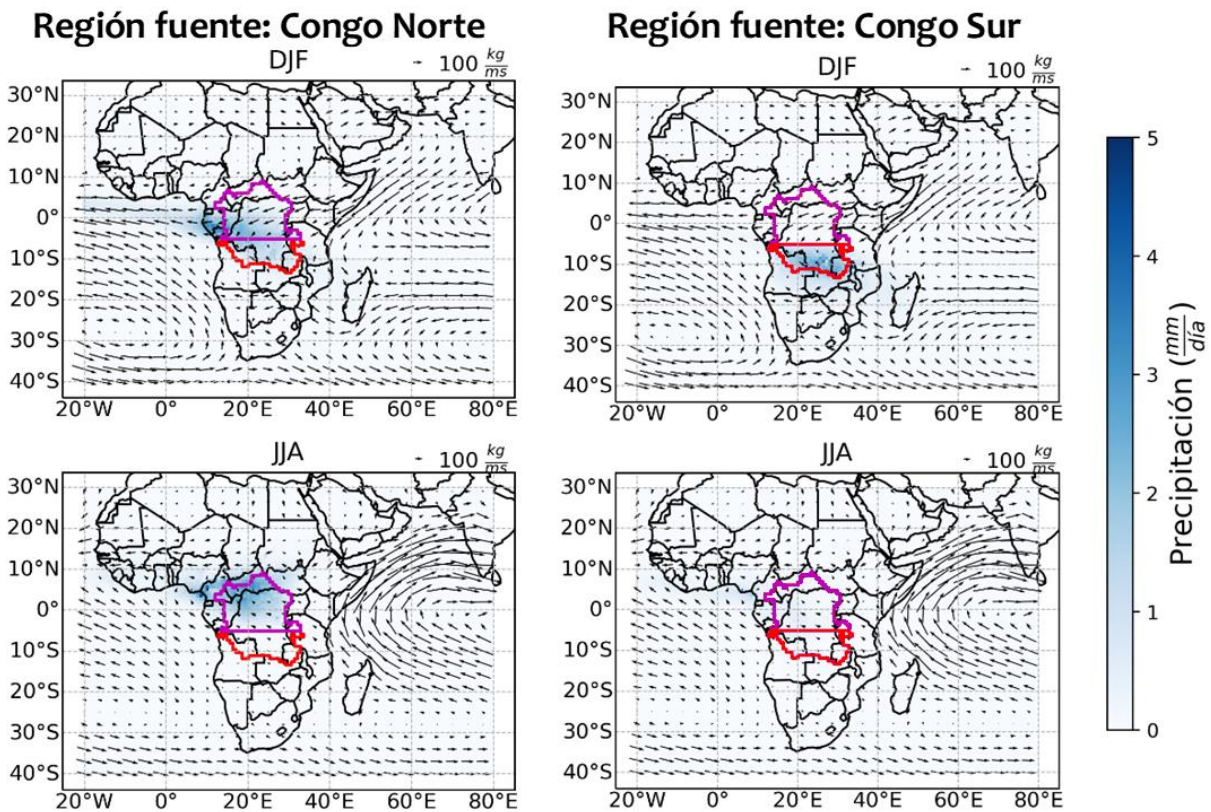


**Figura 11.** Tendencias espaciales de anomalías de precipitación para la cuenca del Congo: coeficiente TAU (sombreado de color) y valor p menor o igual a 0.1 (puntos negros). Las regiones norte y sur de la cuenca están delimitadas en púrpura.

Los resultados anteriores muestran la existencia de tendencias negativas en las anomalías de precipitación sobre la cuenca del río Congo a partir de múltiples bases de datos. Para profundizar en este análisis y

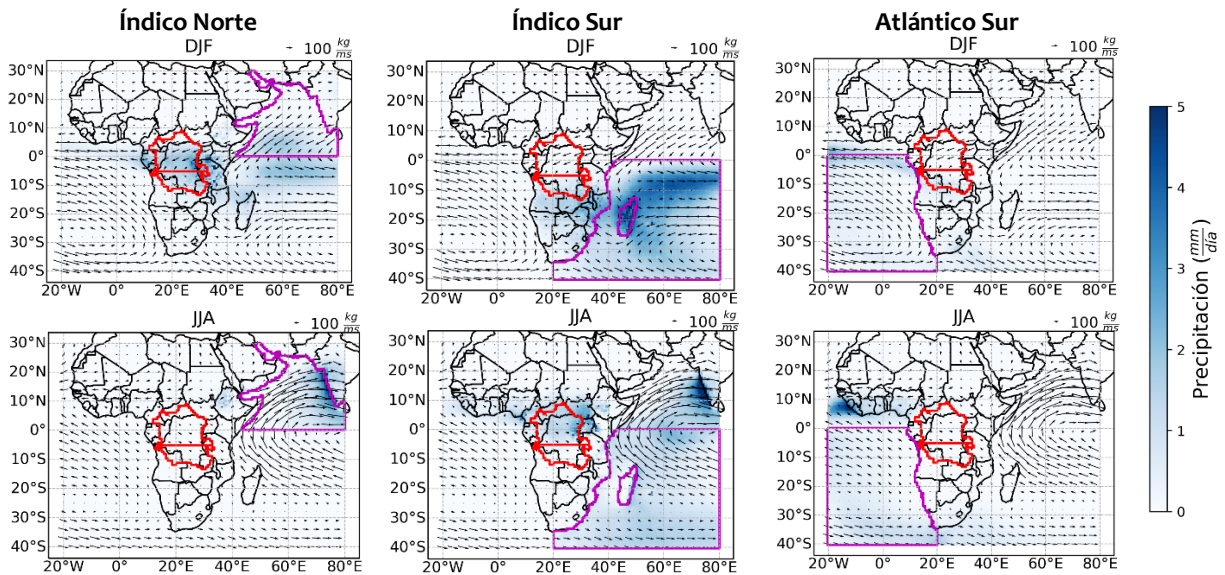
comprender la relación entre estos cambios de precipitación y el transporte de humedad atmosférica sobre esta región, se analiza la evolución temporal y la variabilidad interanual del transporte y el reciclaje de humedad atmosférica en esta cuenca, utilizando el producto de reanálisis ERA5. Si bien este producto tiene incertidumbres en sus estimaciones de precipitación (Gleixner et al., 2020), las tendencias estimadas mediante este reanálisis para la región de estudio son comparables con las tendencias estimadas para bases de datos observacionales, lo que sugiere que las tendencias detectadas en el reanálisis no son espúreas. Este trabajo usa la información de este reanálisis pues cuenta con las variables necesarias para implementar el modelo DRM (ver Tabla 1), lo que no ocurre con las demás bases de datos consideradas.

En la Figura 12 y Figura 13 se presenta el aporte de humedad atmosférica en términos de precipitación desde ambas regiones de la cuenca y desde las principales regiones oceánicas en el área de estudio durante los trimestres DJF y JJA. Se observa una distribución de la precipitación predominante sobre la región Congo Norte y un transporte hacia el noroeste en ambos trimestres, lo cual se relaciona directamente con un mayor reciclaje de precipitación en esta subregión y con un transporte de precipitación hacia la región Congo Sur de mayor magnitud durante DJF, lo cual, como se puede observar en la Figura 12, es consecuencia de un flujo de humedad en dirección suroeste que atraviesa la región Congo Norte, mientras que al observar los aportes de precipitación provenientes de la región Congo Sur se hace evidente un comportamiento local con contribución hacia el sur del continente. Durante DJF se presenta un aporte de precipitación desde el sur de la cuenca de mayor magnitud en comparación con lo que se observa durante JJA, trimestre en el cual se presentan los mínimos de precipitación total y de reciclaje de precipitación en esta región, como se observa en la Figura 4.



**Figura 12.** Aporte de precipitación desde las regiones Congo Norte (izquierda) y Congo Sur (derecha) durante DJF y JJA. En púrpura se presenta la región Congo Norte. En rojo se presenta la región Congo Sur.

Como se ha mencionado, el aporte de humedad desde las principales regiones oceánicas hacia la cuenca del río Congo presenta un comportamiento inverso en la humedad atmosférica proveniente desde ambas regiones del océano Índico. En la Figura 13 es posible observar el comportamiento inverso que presentan los aportes de precipitación desde las regiones Índico Norte e Índico Sur durante DJF y JJA. Desde el norte del océano Índico, se observa que predomina el transporte de precipitación en dirección suroeste, supliendo de agua atmosférica la región central y oriental del continente durante DJF, mientras en este mismo trimestre predomina el transporte desde la región Índico Sur hacia el oeste, supliendo con precipitación principalmente el sur del continente africano. En JJA, se observa la reducción en el transporte de precipitación desde el Índico Norte hacia la cuenca (influenciada por el monzón de la India), mientras que desde el sur del océano Índico, a pesar de que aumenta la precipitación transportada hacia las costas de India, también aumenta el transporte hacia la región central del continente como consecuencia de la aparición del flujo de humedad en dirección noroeste. Al igual que ocurre con la variable agua precipitable, el aporte de precipitación desde ambas regiones del océano Índico presenta un comportamiento inverso mientras que la precipitación proveniente del sur del océano Atlántico (la cual presenta un ciclo anual multimodal unimodal) exhibe su mayor contribución hacia el sur de la cuenca del Congo en el periodo DJF (Figura 4). Durante JJA, la precipitación proveniente de esta región alcanza sus mínimos, a la vez que aumenta el aporte desde esta región hacia el occidente del continente africano.



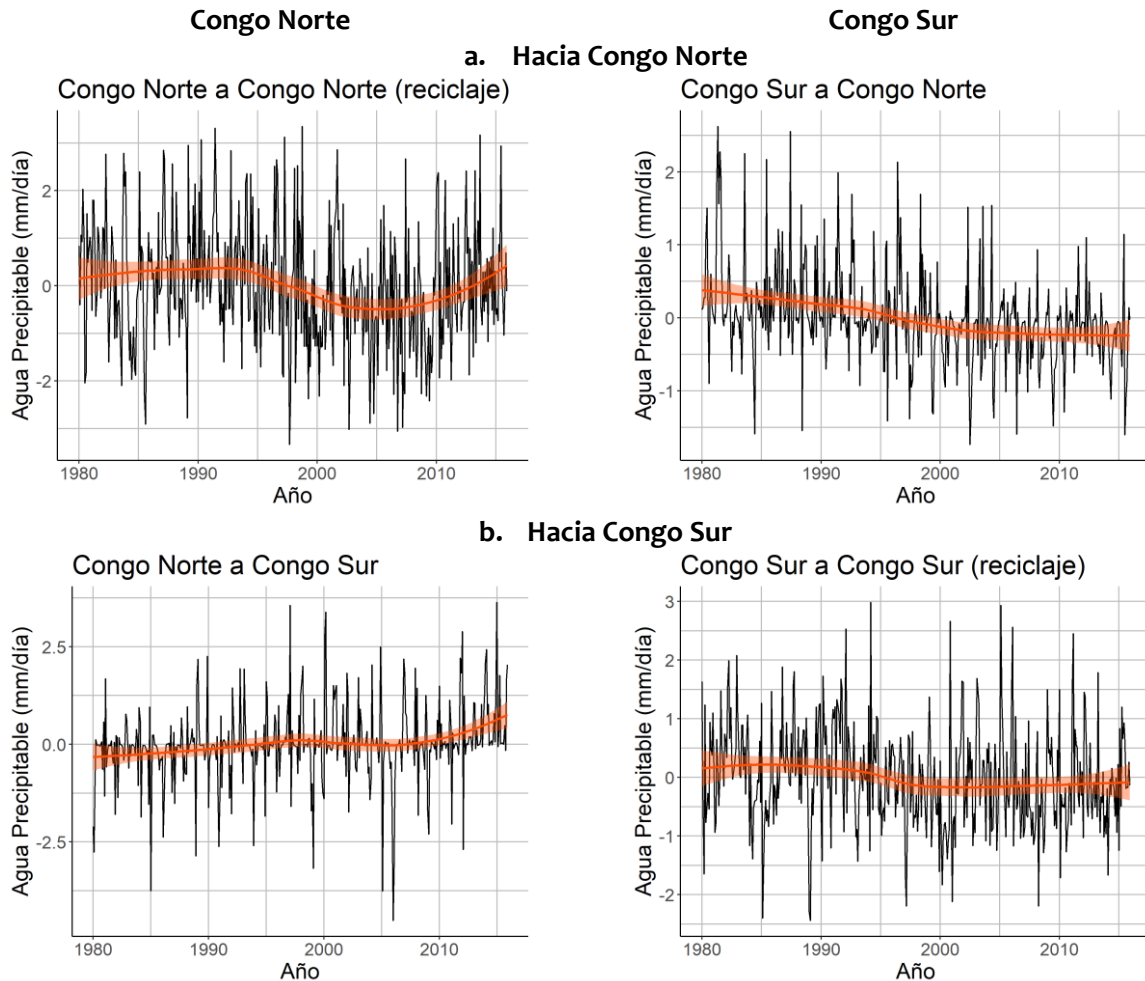
**Figura 13.** Aporte de precipitación desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur durante DJF y JJA. En púrpura se presenta la respectiva región fuente oceánica. En rojo se presenta la cuenca del río Congo.

En general, los aportes de precipitación desde ambas regiones de la cuenca y desde las principales fuentes oceánicas presentan comportamientos bastante similares a los descritos anteriormente para el aporte de humedad en términos de agua precipitable. Este transporte de humedad es fuertemente influenciado por las interacciones con los vientos de la región, particularmente el inicio y terminación del monzón de India, factor determinante en la regulación del agua precipitable y la precipitación en la región.

### 3.2. Tendencias de la humedad atmosférica en la cuenca del río Congo

La Figura 14 muestra las series de tiempo de agua precipitable reciclada y transportada desde las regiones norte y sur de la cuenca del Congo, indicando un comportamiento decreciente en el reciclaje de esta variable en ambas regiones de la cuenca y en el transporte desde Congo Sur hacia Congo Norte, que es estadísticamente significativo según la prueba de tendencias no paramétrica de Mann-Kendall. Por su parte,

el transporte de agua precipitable desde el norte de la cuenca hacia el sur de la misma presenta una tendencia positiva estadísticamente significativa (Tabla 9). Sin embargo, se debe resaltar que a pesar de la existencia de una significancia estadística, el coeficiente TAU es relativamente cercano a cero, lo cual puede ser interpretado como la existencia de una tendencia leve, a excepción de la serie de tiempo de reciclaje de agua precipitable en la región Congo Norte.



**Figura 14.** Series de tiempo de anomalías de agua precipitable transportada desde y hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas.

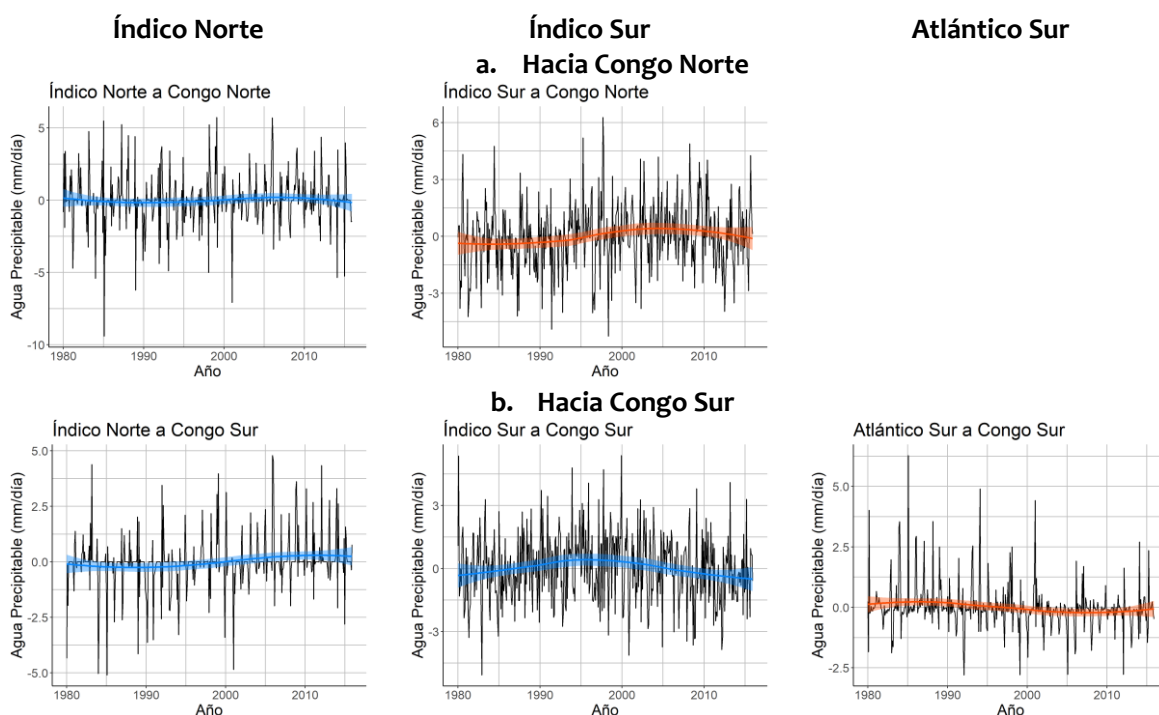
**Tabla 9.** Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de agua precipitable transportada desde y hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur.

Región fuente	Coeficiente TAU	Valor p
<b>Hacia Congo Norte</b>		
<b>Congo Norte (reciclaje)</b>	-0.998	0.0022527
<b>Congo Sur</b>	-0.226	4.6602e-12
<b>Hacia Congo Sur</b>		
<b>Congo Norte</b>	0.148	5.9605e-06
<b>Congo Sur (reciclaje)</b>	-0.124	0.00015609

Al analizar el aporte de humedad atmosférica proveniente desde las principales regiones oceánicas, se observa que el agua precipitable presenta una tendencia positiva en la advección desde ambas regiones del



océano Índico hacia Congo Norte y desde la región Índico Norte hacia Congo Sur, mientras que desde el sur del océano Índico se presenta una tendencia negativa en el transporte de agua precipitable hacia Congo Sur. A pesar de esto, esta tendencia es estadísticamente significativa únicamente en el transporte desde el sur del océano Índico hacia la región Congo Norte (Figura 15 y Tabla 10). Por su parte, la región Atlántico Sur presenta una tendencia decreciente estadísticamente significativa en la advección de agua precipitable hacia la región Congo Sur, comportamiento similar al presentado en el transporte de precipitación desde esta región oceánica hacia el sur de la cuenca. En general, se observa un aumento en el transporte de agua precipitable hacia la cuenca del río Congo, sin embargo, esta tendencia, como se observa en la Tabla 10, presenta un coeficiente TAU cercano a cero, por lo que este aumento en el transporte de agua precipitable desde la región Índico Norte no necesariamente implica un aumento en la precipitación total sobre la cuenca, como lo muestran las marcadas tendencias de reducción de precipitación total sobre esta región (Figura 7 a Figura 11).

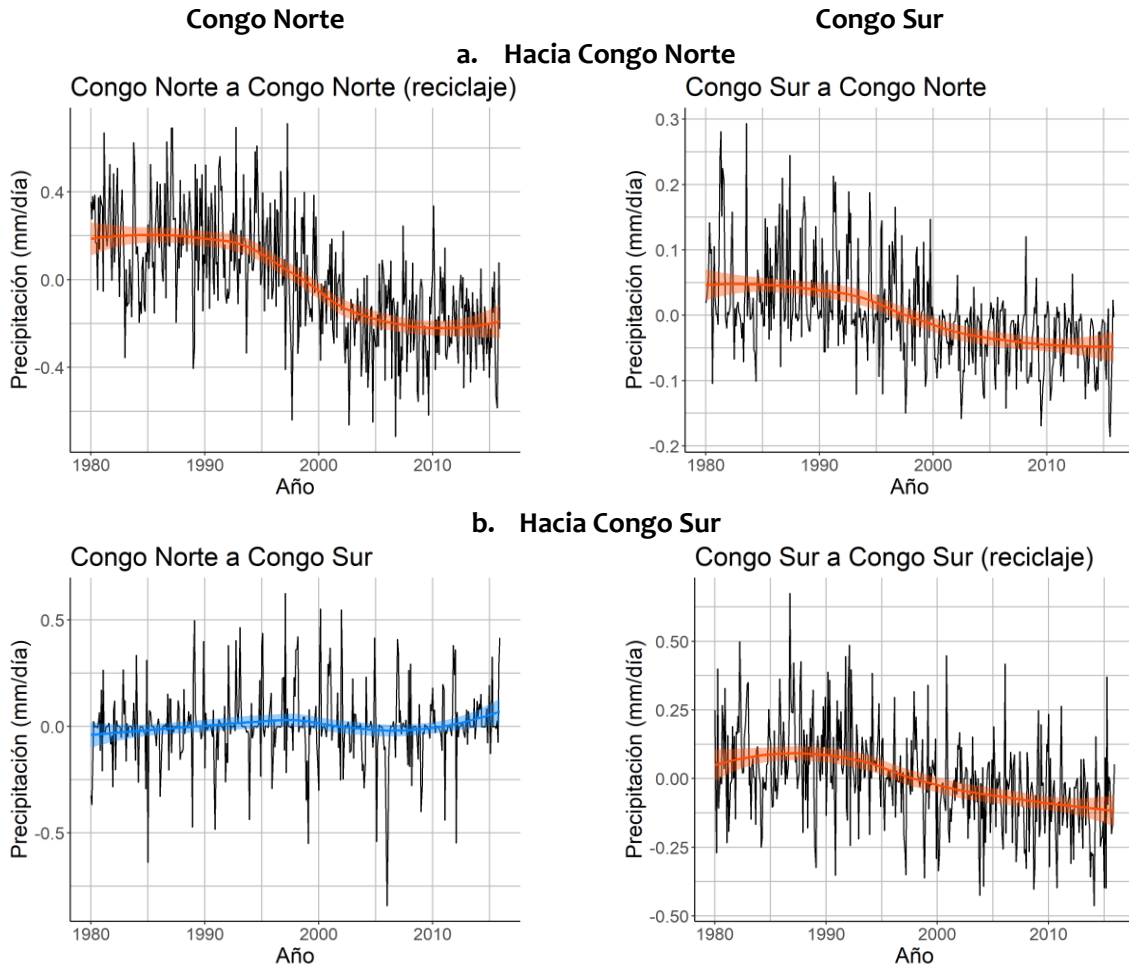


**Figura 15.** Series de tiempo de anomalías de agua precipitable transportada desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas.

**Tabla 10.** Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de agua precipitable transportada desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur.

Región fuente	Coeficiente TAU	Valor p
<b>Hacia Congo Norte</b>		
Índico Norte	0.027	0.40998
Índico Sur	0.091	0.0053343
<b>Hacia Congo Sur</b>		
Índico Norte	0.0531	0.10971
Índico Sur	-0.0342	0.29531
Atlántico Sur	-0.114	0.000501

En la Figura 16 se presentan las series de tiempo de anomalías de precipitación promedio transportada desde las principales fuentes continentales hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. Se evidencia una tendencia decreciente en el reciclaje de precipitación en la región Congo Norte (precipitación transportada desde Congo Norte hacia Congo Norte) y en el reciclaje de precipitación en Congo Sur (precipitación transportada desde Congo Sur hacia Congo Sur). El análisis de tendencia con la prueba no paramétrica Mann-Kendal, confirma este comportamiento, al obtener un coeficiente TAU negativo y una significancia estadística (alfa) menor o igual a 0.05 (Tabla 11).

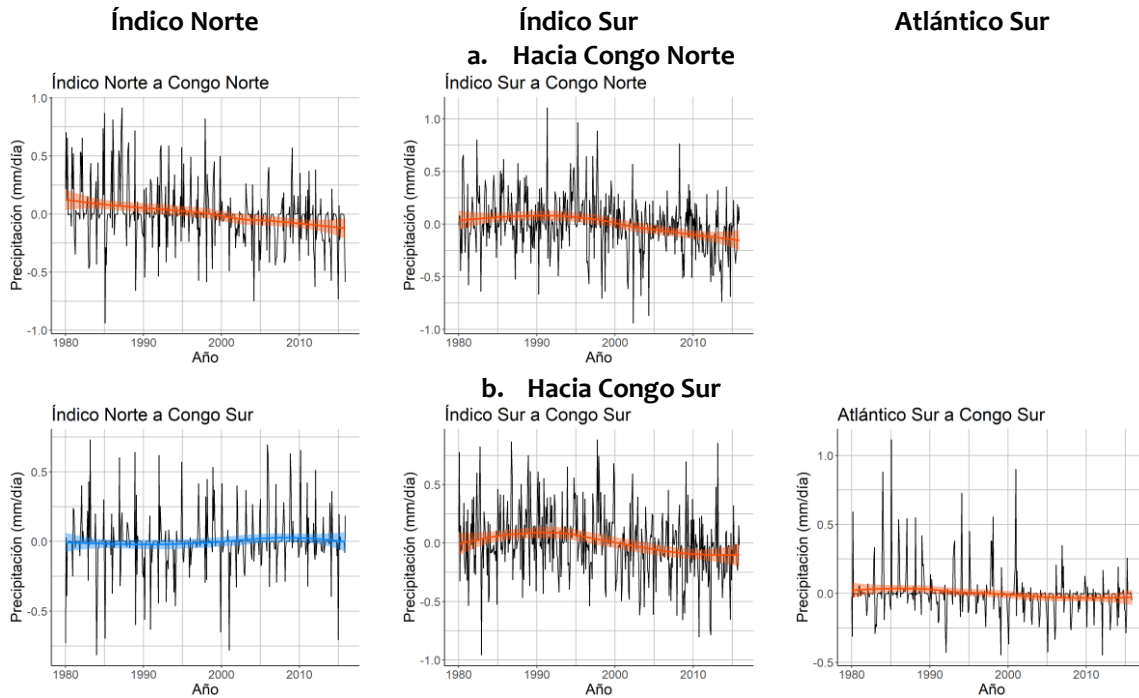


**Figura 16.** Series de tiempo de anomalías de precipitación transportada desde y hacia las regiones a) Congo Norte y b) Congo Sur. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas.

**Tabla 11.** Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de precipitación transportada desde y hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur.

Región fuente	Coeficiente TAU	Valor p
<b>Hacia Congo Norte</b>		
Congo Norte (reciclaje)	-0.427	$\leq 2.22e-16$
Congo Sur	-0.333	$\leq 2.22e-16$
<b>Hacia Congo Sur</b>		
Congo Norte	0.0454	0.16617
Congo Sur (reciclaje)	-0.299	$\leq 2.22e-16$

Las fuentes oceánicas presentan un comportamiento similar, con una tendencia a la disminución en el transporte de precipitación desde el océano Índico hacia Congo Norte. De igual manera, el transporte desde las regiones Atlántico Sur e Índico Sur presenta una tendencia decreciente estadísticamente significativa (Figura 17 y Tabla 12), lo que, en conjunto con las tendencias negativas en el reciclaje de precipitación sobre ambas regiones de la cuenca del río Congo, contribuye a la disminución en la precipitación total sobre la cuenca del Congo discutida en la sección 3.1.2 (Figura 7 a Figura 11).



**Figura 17.** Series de tiempo de anomalías de precipitación transportada desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas. Las líneas de ajuste azules representan tendencias no estadísticamente significativas.

**Tabla 12.** Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de precipitación transportada desde las regiones Índico Norte, Índico Sur y Atlántico Sur hacia las regiones Congo Norte y Congo Sur.

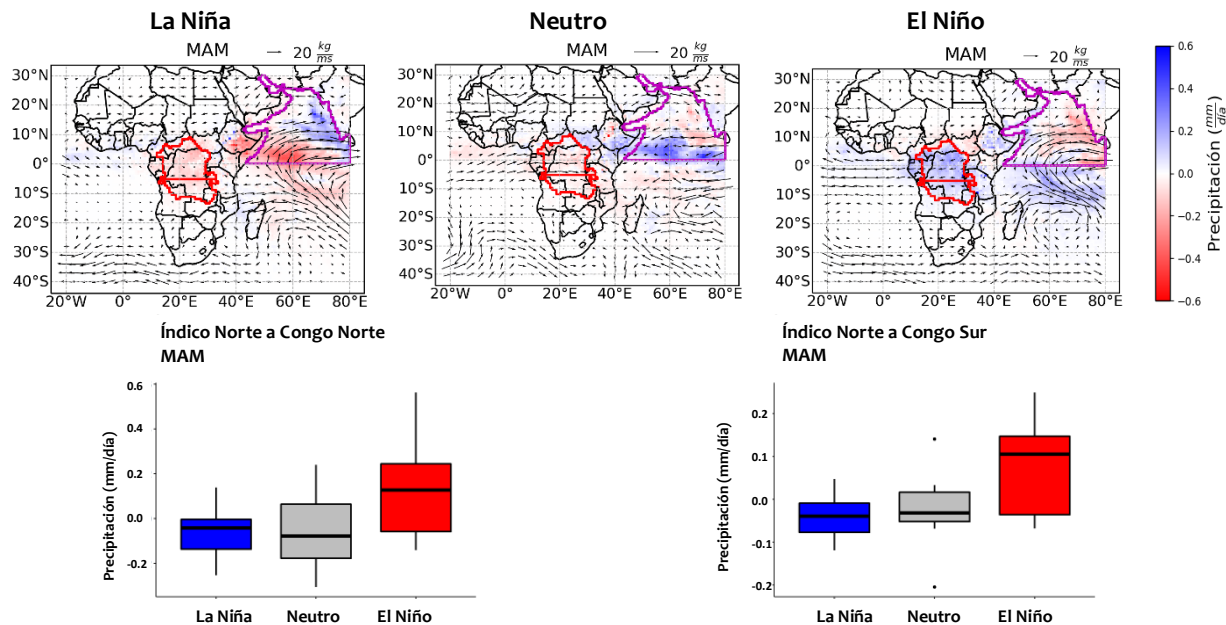
Región fuente	Coficiente TAU	Valor p
<b>Hacia Congo Norte</b>		
Índico Norte	-0.177	6.7306e-08
Índico Sur	-0.178	4.9546e-08
<b>Hacia Congo Sur</b>		
Índico Norte	0.000909	0.97906
Índico Sur	-0.162	7.4543e-07
Atlántico Sur	-0.129	8.4433e-05

Así, el agua precipitable sobre la cuenca presenta una marcada tendencia negativa en su reciclaje y una leve tendencia positiva en el transporte desde las principales regiones oceánicas. A su vez, el reciclaje de precipitación presenta una reducción importante durante el periodo analizado mientras que el transporte de precipitación desde el océano Índico, a pesar de tener una tendencia negativa, es más leve que la observada para el reciclaje.

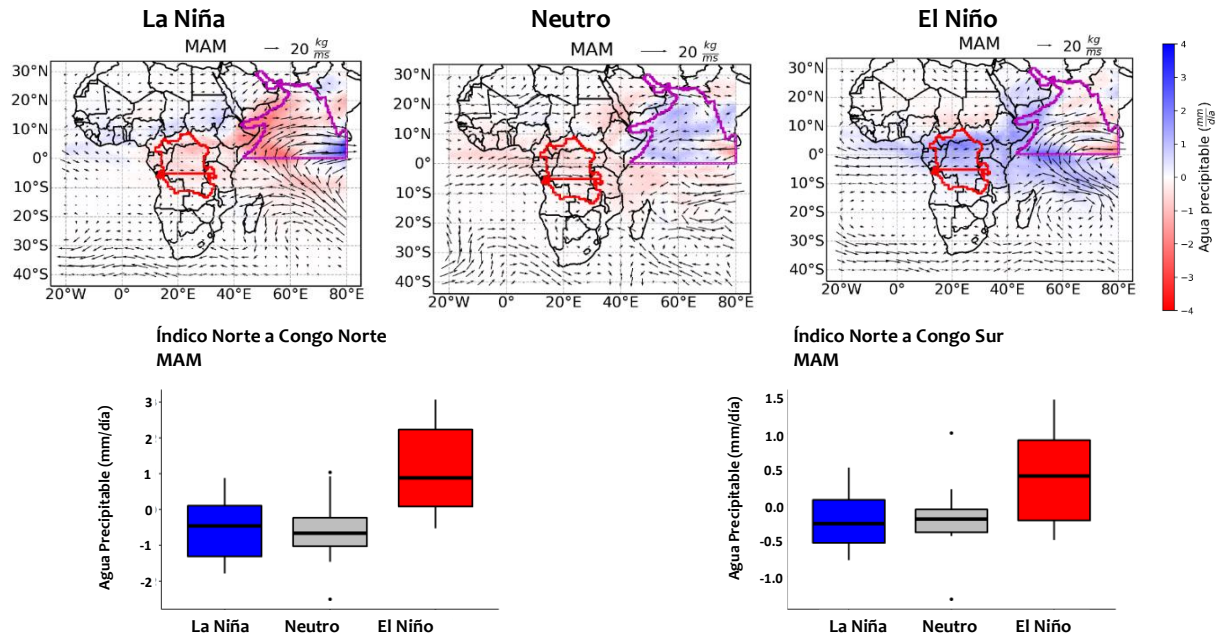
### 3.3. Influencia del fenómeno ENOS en el transporte de humedad atmosférica hacia la cuenca del río Congo

Para explorar la influencia del fenómeno ENOS en el transporte y reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del Congo, se realizó una prueba de análisis de varianza (ANOVA) con el fin de identificar la existencia de una diferencia de medias estadísticamente significativas bajo la hipótesis nula de que no existe diferencia entre los grupos analizados. Las series de tiempo de transporte y reciclaje de precipitación y agua precipitable se clasificaron utilizando la ocurrencia o no ocurrencia de los eventos El Niño y La Niña presentados en la sección 2.3 (Tabla 3). Los resultados obtenidos indican diferencias importantes en las series de tiempo de anomalías de precipitación durante los trimestres MAM y SON, mientras que se observaron diferencias para las anomalías de agua precipitable durante MAM, en asociación con ambas fases del ENOS.

Durante MAM se observa, en promedio, una reducción en el transporte de precipitación desde el norte del océano Índico hacia la cuenca durante la ocurrencia de eventos La Niña, mientras que durante eventos El Niño se presenta un aumento en el transporte de precipitación hacia ambas regiones de la cuenca. Durante El Niño se observa una diferencia estadísticamente significativa, a un nivel alfa menor o igual a 0.05, lo que puede observarse en los gráficos de cajas y bigotes en la Figura 18. Durante este trimestre se evidencia un comportamiento similar en el transporte de agua precipitable, pues durante la ocurrencia de eventos El Niño se observa un aumento en el agua precipitable proveniente desde el norte del océano Índico hacia ambas regiones de la cuenca, el cual es estadísticamente significativo, mientras que los eventos La Niña y la fase neutra del ENOS presentan comportamientos similares, como se observa en la Figura 19. Estos resultados son consistentes con lo discutido por Sorí et al. (2021), quienes identifican que la precipitación de origen oceánico es dominante en el trimestre MAM durante la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña.



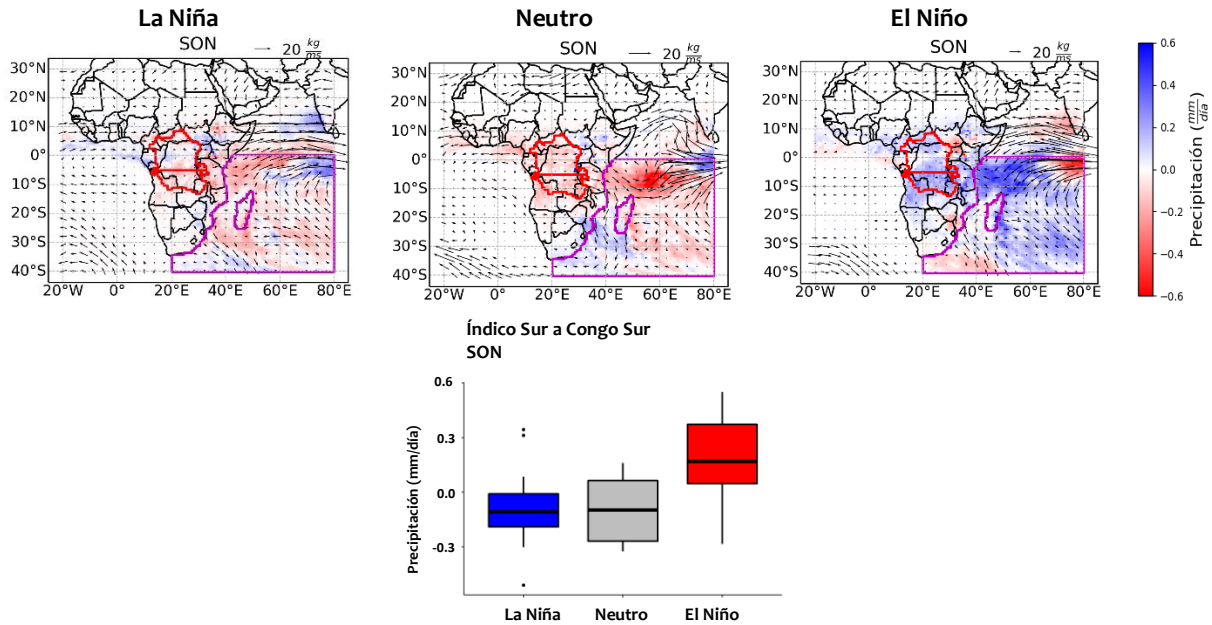
**Figura 18.** Aporte de precipitación desde la región Índico Norte hacia la cuenca del Congo en las fases La Niña, Neutro y El Niño del ENOS durante la temporada MAM.



**Figura 19.** Aporte de agua precipitable desde la región Índice Norte hacia la cuenca del Congo en las fases La Niña, Neutro y El Niño del ENOS durante la temporada MAM.

Durante MAM, la humedad atmosférica proveniente del norte del océano Índico presenta alteraciones bajo la influencia del ENOS mientras que en la región Índice Sur no observa un cambio claro asociado a la ocurrencia de este fenómeno; sin embargo, este comportamiento se invierte durante SON pues la precipitación proveniente del sur del océano Índico presenta una variación durante eventos El Niño, comportamiento que se observa en el transporte de agua precipitable desde esta región.

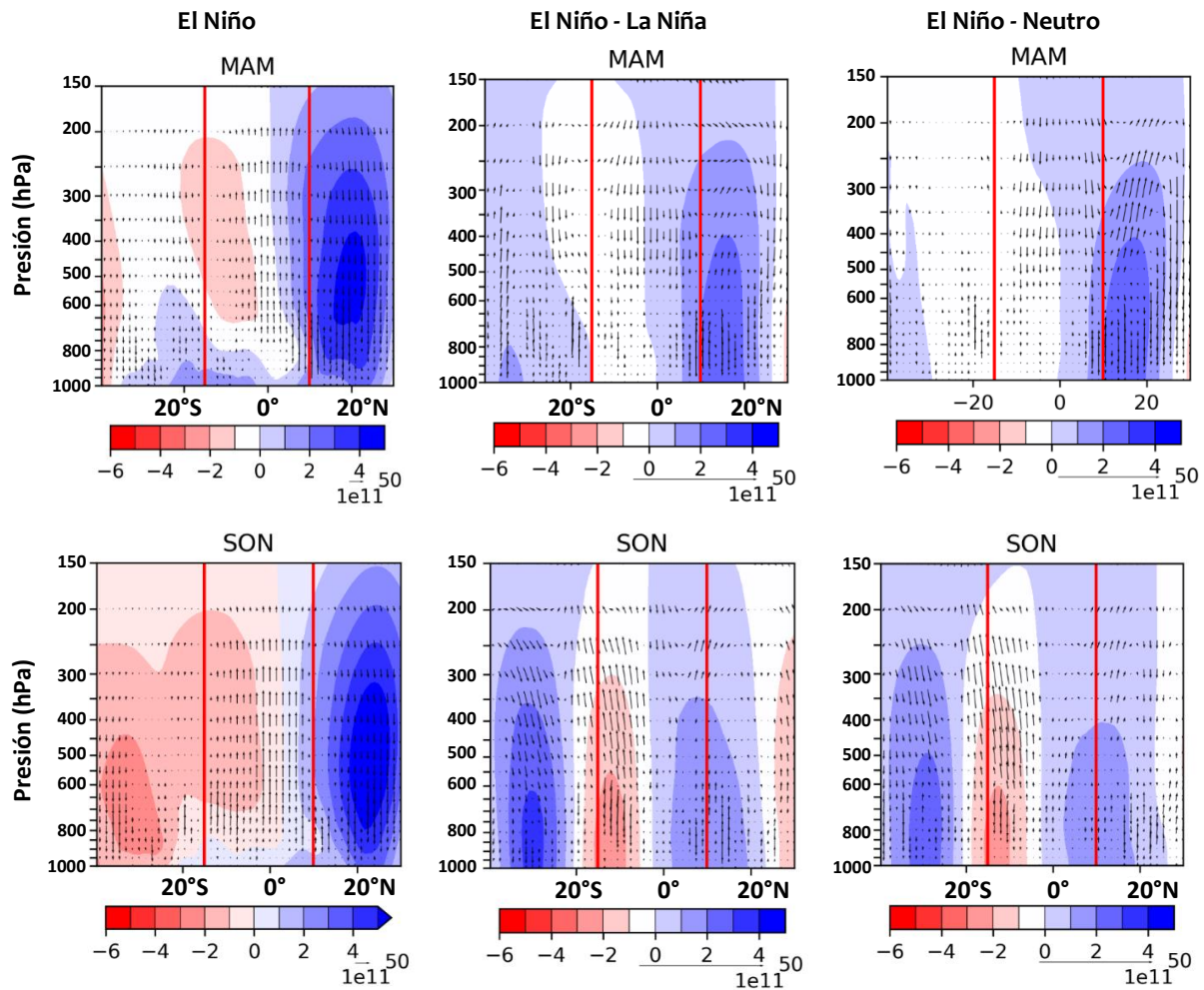
La Figura 20 presenta el transporte de precipitación desde el sur del océano Índico hacia la cuenca durante SON para eventos La Niña, Neutro y El Niño. Se evidencia una leve disminución en las anomalías de precipitación provenientes desde el sur del océano Índico durante La Niña y la fase neutra del ENOS, mientras que se presenta un aumento en la precipitación transportada sobre toda la cuenca durante eventos El Niño. Sin embargo, la prueba de diferencia de medias muestra significancia estadística sólo para la advección hacia la región Congo Sur. También se observa un aumento en la precipitación en el este de África y en la región del Gran Cuerno de África durante eventos El Niño, lugares donde el efecto del fenómeno ENOS tiene una influencia más directa (Obasi, 2005).



**Figura 20.** Aporte de precipitación desde la región Índico Sur hacia la cuenca del Congo en las fases La Niña, Neutro y El Niño del ENOS durante la temporada SON.

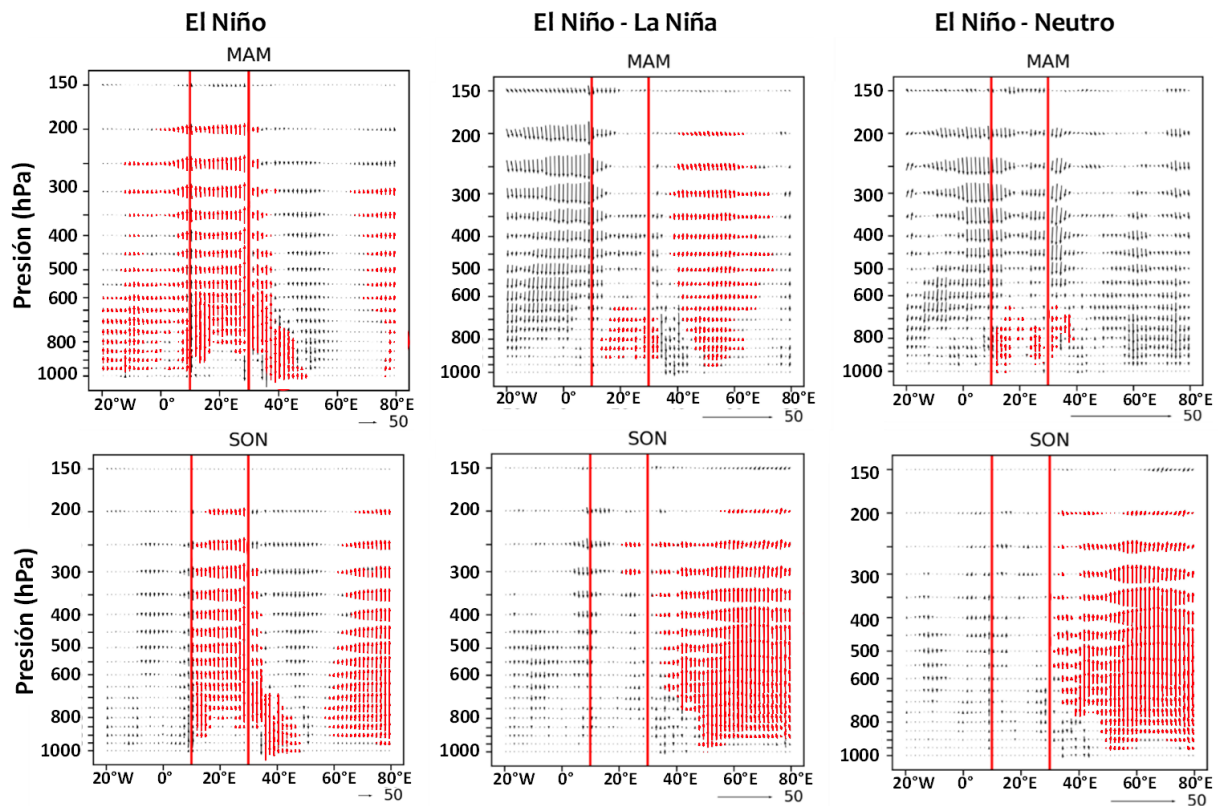
Es importante recalcar que la precipitación es la variable que presenta mayor alteración bajo la influencia del fenómeno ENOS, ya que no se observan cambios significativos en la contribución de agua precipitable desde las principales regiones fuente hacia la cuenca, aparte del aumento en el transporte de agua precipitable desde la región Índico Norte durante eventos El Niño en la temporada MAM (Figura 19).

Para identificar de forma más detallada la influencia del fenómeno ENOS en el transporte de precipitación y agua precipitable en la cuenca del río Congo, se analizaron las celdas regionales de Walker y Hadley. En la Figura 21 es posible observar la celda regional de Hadley entre las latitudes 40°S y 30°N, calculada a partir del promedio zonal de la componente meridional irrotacional del viento entre la longitud 10°E a 30°E durante eventos El Niño, y su respectiva diferencia con respecto a la celda promedio durante eventos La Niña y Neutros, para los trimestres MAM y SON. Inicialmente, en ambos trimestres se observa la presencia de movimiento ascendente del viento dentro de la cuenca (latitud delimitada por las líneas rojas) para los diferentes niveles de presión, la cual se intensifica en la región de convergencia de la rama norte (delimitada por las diferentes tonalidades de color azul) con la rama sur (colores blancos y rojos) de esta celda, comportamiento asociado a la ocurrencia de precipitación en la cuenca. Durante SON se observa un fortalecimiento de ambas ramas (indicado por colores más intensos), lo que implica un mayor movimiento vertical de masa que durante MAM, mientras que alrededor de la línea ecuatorial (latitud 0°) y los 10°N se presenta un mayor movimiento vertical, asociado al fortalecimiento en la velocidad vertical del viento. Por su parte, en MAM se encuentran los vectores en su máxima magnitud en la región central de la cuenca, con una disminución a medida que se desplaza hacia latitudes más al norte o al sur.



**Figura 21.** Sección vertical de la función de corriente meridional de masa (contornos; en  $\text{kg m}^{-1}$ ). Los vectores representan la componente meridional del viento irrotacional (en  $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en  $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) para eventos El Niño y las diferencias El Niño - La Niña y El Niño - Neutro durante los trimestres MAM y SON. Las líneas rojas representan los límites sur y norte de la cuenca del río Congo.

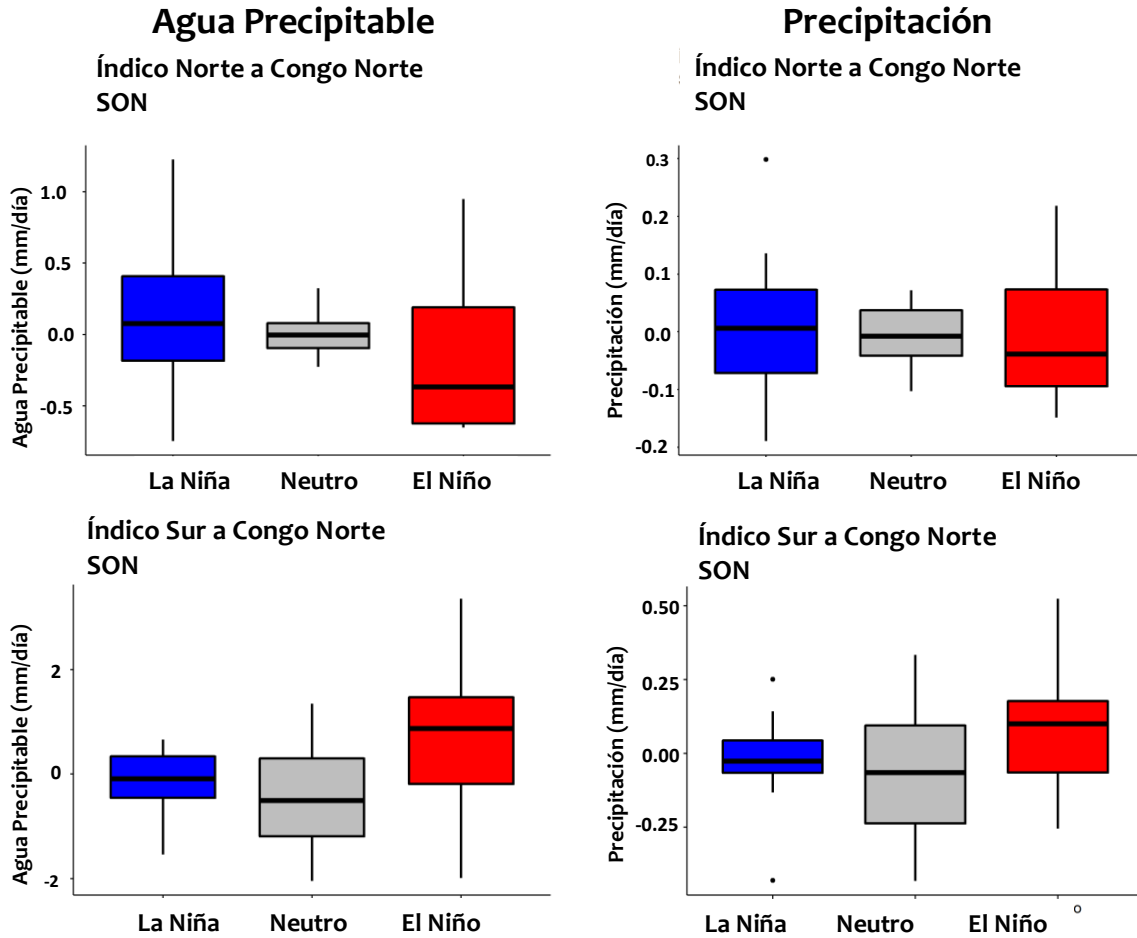
Observando las diferencias El Niño-La Niña y El Niño-Neutro durante MAM, se evidencia el fortalecimiento de la rama norte de la celda de Hadley y el debilitamiento de la rama sur durante eventos El Niño; sin embargo, aproximadamente desde la latitud  $15^\circ\text{S}$  hasta los  $0^\circ$  se observa el fortalecimiento de la rama sur durante El Niño en comparación con lo que ocurre durante los eventos La Niña y Neutro. Al observar la diferencia entre los vectores durante esta temporada, es evidente una menor magnitud en el ascenso del viento durante eventos El Niño, entre los 500 hPa y 200 hPa, mientras que la ausencia de vectores en la región más cercana a la superficie indica velocidades verticales similares durante estos eventos. De igual manera, se observa un fortalecimiento de ambas ramas dentro de la cuenca, así como un fortalecimiento de la velocidad vertical del viento entre los 550 hPa y 200 hPa en la región sur del Congo durante SON bajo la ocurrencia de eventos El Niño, lo que podría estar asociado al aumento del transporte de precipitación desde el sur del océano Índico hacia el sur de la cuenca, como se presentó en la Figura 20.



**Figura 22.** Sección vertical de la componente zonal del viento irrotacional (en  $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en  $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) en la región Congo Norte para eventos El Niño y las diferencias El Niño - La Niña y El Niño - Neutro durante las temporadas MAM y SON. Los vectores rojos indican movimiento ascendente. Las líneas rojas indican los límites oeste y este de la cuenca del río Congo.

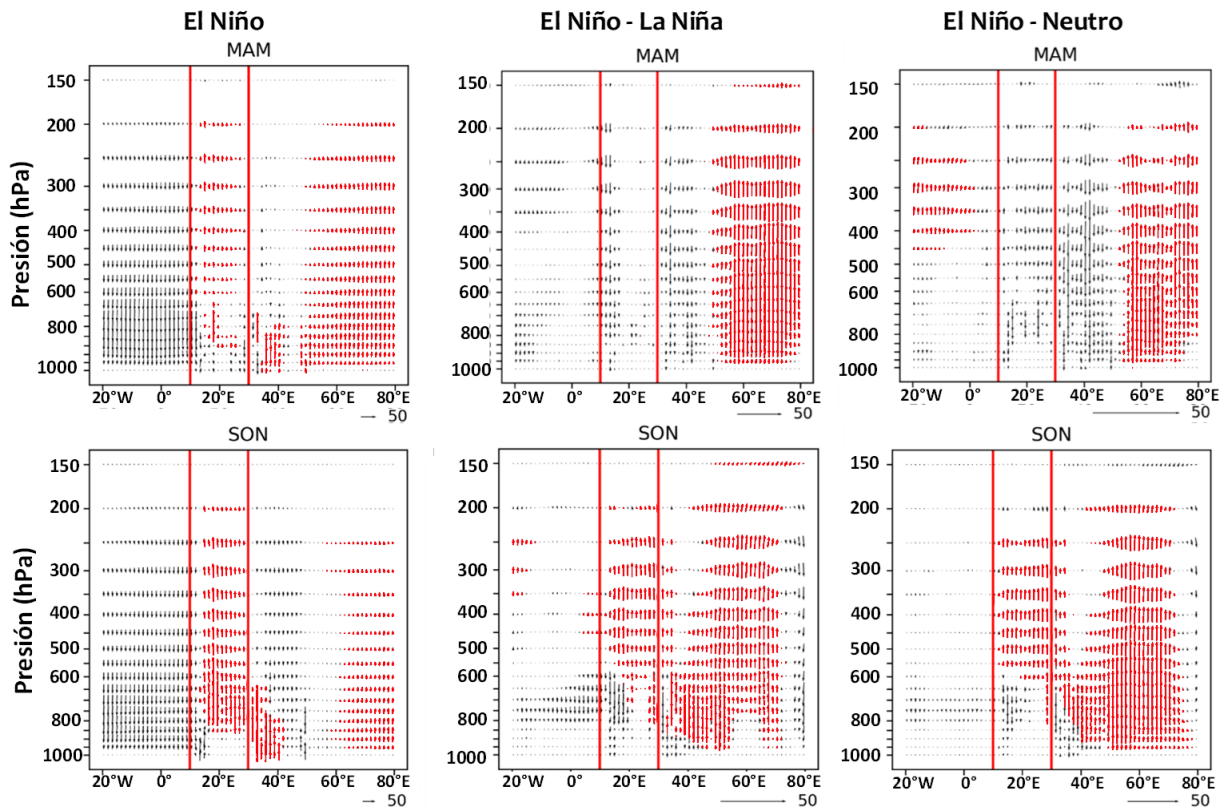
La celda de Walker sobre las regiones Congo Norte y Congo Sur se estimó utilizando el promedio meridional de la componente zonal del flujo irrotacional del viento desde la latitud  $5^\circ\text{S}$  hasta  $10^\circ\text{N}$  para la región Congo Norte, y entre la latitud  $15^\circ\text{S}$  a  $5^\circ\text{S}$  para la región Congo Sur (Figura 22 y Figura 24, respectivamente). Dentro de la región norte de la cuenca (delimitada por líneas rojas), se evidencia un claro ascenso en la velocidad vertical del viento entre los 900 hPa y los 200 hPa durante el fenómeno El Niño, extendiéndose hasta la región este del continente (donde se presentan los mayores impactos en el continente durante el ENOS). Este ascenso se evidencia con mayor intensidad durante SON. Los cambios de esta celda entre eventos El Niño y eventos La Niña, así como entre eventos El Niño y eventos Neutros, evidencian una mayor intensidad en la velocidad vertical entre los 900 hPa y 650 hPa durante MAM cuando ocurren eventos El Niño. Por su parte, durante eventos La Niña y Neutros se observan un fortalecimiento en la velocidad vertical del viento dentro de la cuenca entre los 550 hPa y 200 hPa, lo que asociado con el aumento en el transporte de precipitación desde el norte del océano Índico hacia el norte de la cuenca (como se observa en la Figura 18) contribuye al aumento de precipitación durante esta temporada a pesar que no se evidencia una alteración considerable en la porción de la celda de Walker sobre el océano Índico. Por el contrario, durante SON se observa una diferencia prácticamente nula dentro de la cuenca durante eventos La Niña y Neutros respecto a eventos El Niño, y a pesar que en la porción oceánica de esta celda (entre los  $45^\circ\text{E}$  y  $80^\circ\text{E}$ ) se evidencia un leve debilitamiento de la velocidad vertical del viento, no ocurre una alteración significativa en el transporte de humedad atmosférica desde el océano Índico hacia el norte de la cuenca durante esta temporada (Figura 23).





**Figura 23.** Diagramas de cajas y bigotes de anomalías de agua precipitable y precipitación transportada hacia el norte de la cuenca del Congo desde el océano Índico durante eventos La Niña, Neutro, y El Niño.

En la región sur (Figura 24), se presenta de igual manera una franja ascendente de la velocidad vertical del viento dentro de la cuenca durante eventos El Niño para el trimestre MAM; sin embargo, existe un debilitamiento de esta velocidad vertical en comparación con lo que ocurre durante eventos La Niña y Neutros, lo que se refleja en una mayor presencia de vectores descendentes en la Figura 24. Durante SON se observa una mayor magnitud en la velocidad vertical del viento, así como la predominancia de un flujo ascendente dentro de la cuenca en las diferencias presentadas en la Figura 24, lo que implica un fortalecimiento de estos vientos durante la ocurrencia de eventos El Niño, especialmente entre los 550 hPa y los 200 hPa.

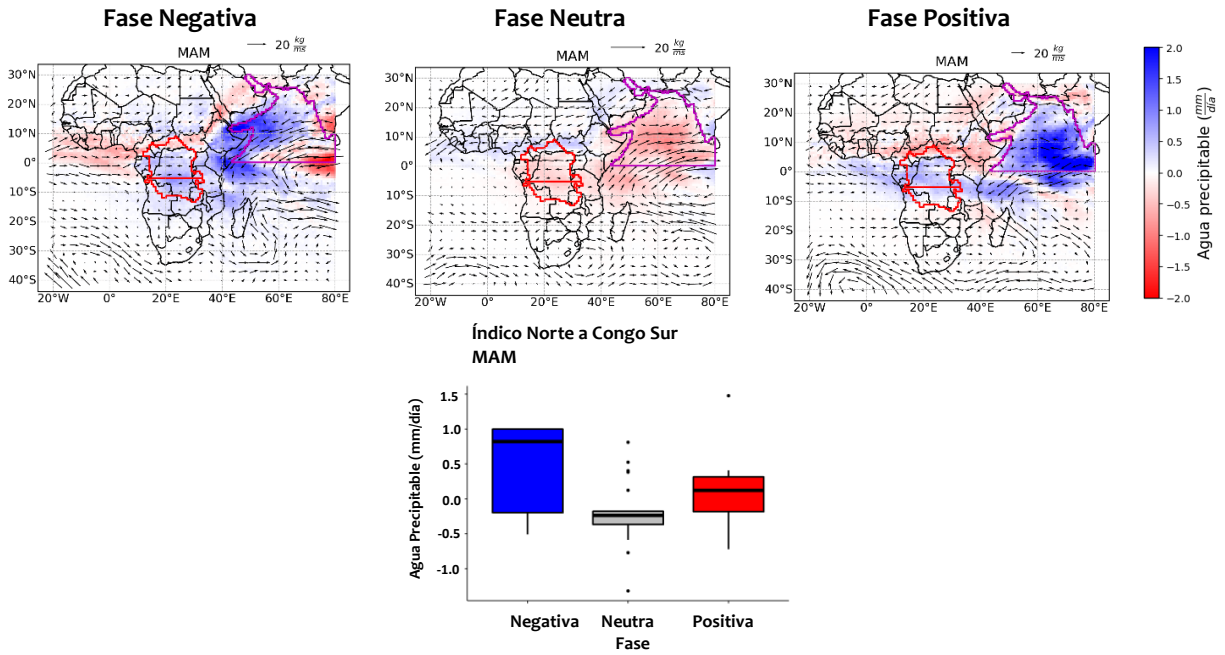


**Figura 24.** Sección vertical de la componente zonal del viento irrotacional (en  $m\ s^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en  $10^3\ Pa\ s^{-1}$ ) en la región Congo Sur para eventos El Niño y las diferencias El Niño - La Niña y El Niño - Neutro durante las temporadas MAM y SON. Los vectores rojos indican movimiento ascendente. Las líneas rojas representan los límites oeste y este de la cuenca del río Congo.

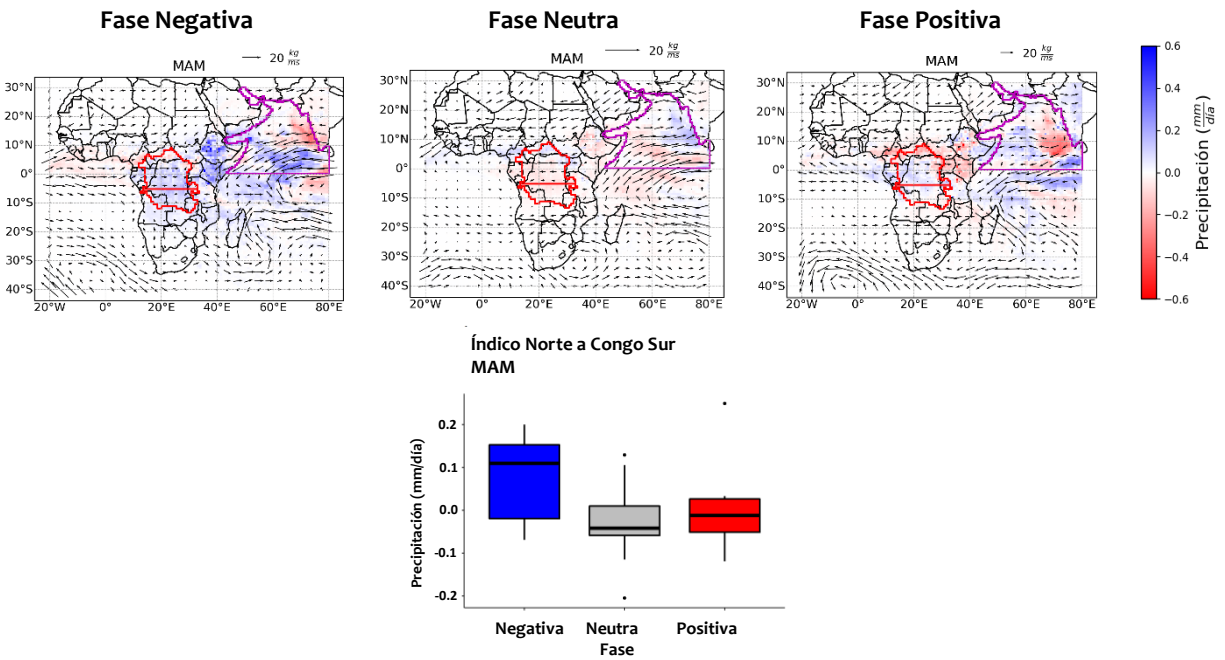
### 3.4. Influencia del DOI en el transporte de humedad atmosférica hacia la cuenca del río Congo

Debido al gran impacto que genera el DOI sobre el océano Índico (gran fuente de humedad para la cuenca del río Congo; Figura 4 y Tabla 5), este trabajo analiza la influencia de las fases Positiva, Negativa y Neutra de este fenómeno (definidas en la sección 2.3) sobre el transporte de humedad atmosférica hacia la cuenca del río Congo.

A pesar de que la fase positiva de este fenómeno se relaciona fuertemente con un aumento en la precipitación en el este de África (Vinayachandran et al., 2009), nuestro análisis no evidencia una influencia determinante en el transporte de humedad atmosférica sobre la cuenca. Sin embargo, durante el periodo MAM se observa, en general, un aumento en el transporte de humedad en ambas fases del DOI (positiva y negativa) comparado con la fase Neutra, tanto en términos de agua precipitable (Figura 25) como de precipitación (Figura 26). En especial, este aumento en el transporte de humedad atmosférica desde la región Índico Norte hacia la región Congo Sur es estadísticamente significativo durante la fase negativa del DOI. Esto se observa con mayor claridad en los diagramas de caja y bigotes en la Figura 25 y la Figura 26.



**Figura 25.** Aporte de agua precipitable desde la región Índico Norte hacia la cuenca del Congo en las fases negativa, neutra y positiva del DOI durante el trimestre MAM.

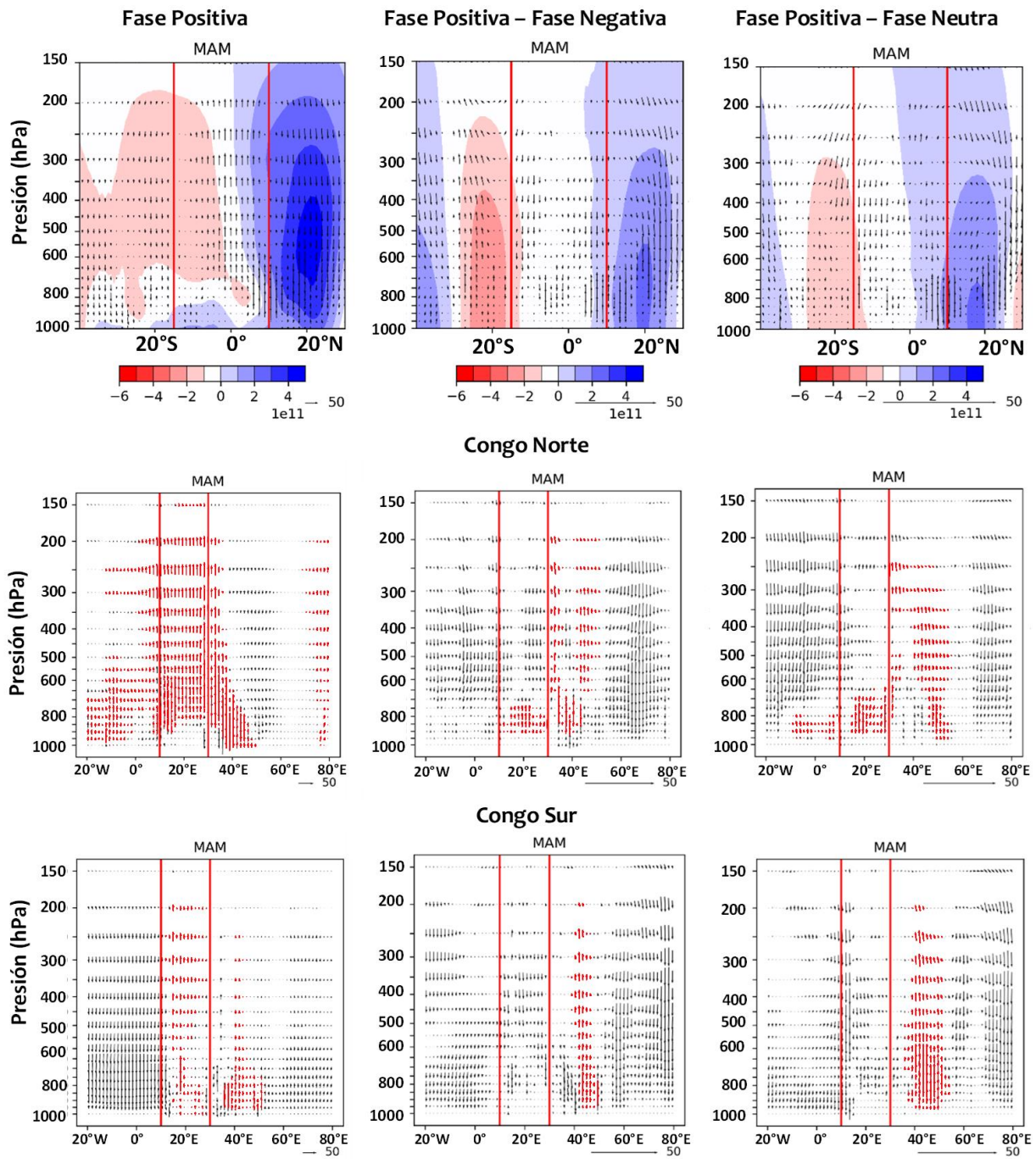


**Figura 26.** Aporte de precipitación desde la región Índico Norte hacia la cuenca del Congo en las fases negativa, neutra y positiva del DOI durante el trimestre MAM.

La Figura 27 presenta la celda regional de Hadley durante la fase positiva del DOI para el trimestre MAM (primera fila), así como la celda de Walker para la región Congo Norte y Congo Sur en esta temporada (segunda y tercera fila). Observando la celda regional de Hadley es posible identificar una predominancia en el ascenso del viento dentro de la cuenca (delimitada por líneas rojas en las latitudes 15°S y 10°N), con

una mayor intensidad en la zona de convergencia de la rama norte y la rama sur. El cambio en esta celda entre la fase positiva y las fases negativa y neutra del DOI indica que mientras la fase positiva presenta un fortalecimiento de las ramas norte y sur, en las otras fases se presenta una reducción en la magnitud de la velocidad vertical del viento (denotado por la predominancia de vectores descendentes) entre las latitudes 15°S a 5°S (Congo Sur), región para la que se evidencia un aumento en el transporte de agua precipitable y precipitación desde el norte del océano Índico (Figura 25 y Figura 26).

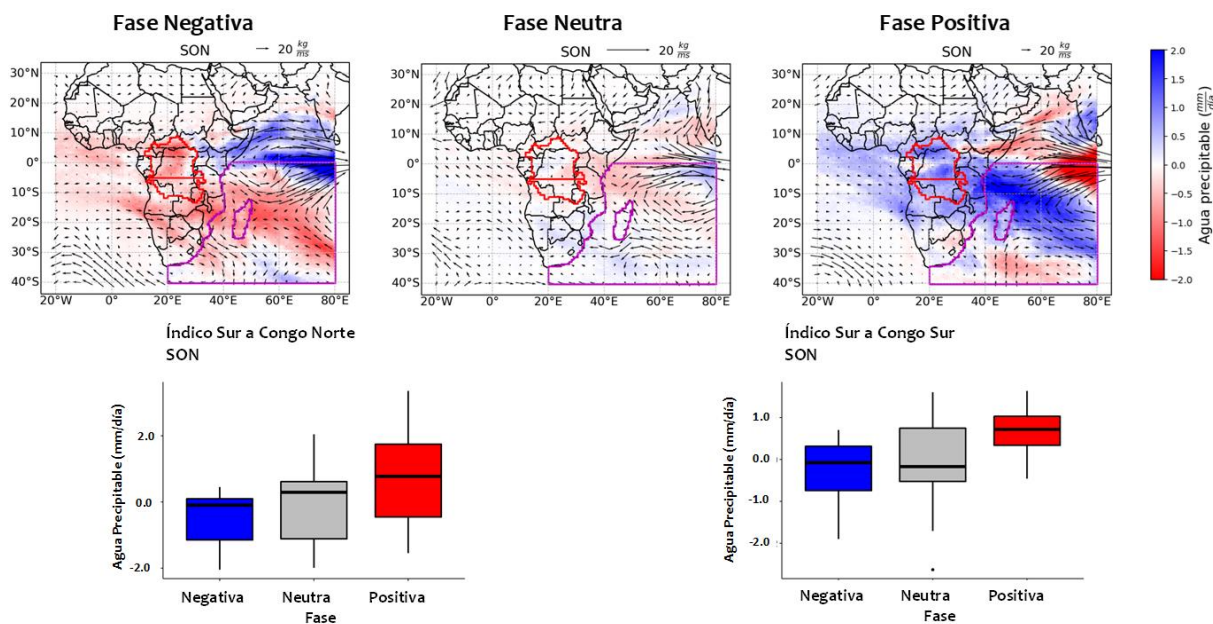
Por otro lado, al analizar la celda de Walker para la cuenca del Congo (enmarcada entre la longitud 10°E hasta la longitud 30°E), se identifica la presencia de una franja donde la velocidad vertical del viento tiene dirección ascendente a lo largo de la extensión zonal de la región Congo Norte, mientras que en la región sur de la cuenca se presenta una reducción en su magnitud respecto al comportamiento de esta variable en el norte de la cuenca. La diferencia entre la fase positiva y negativa, y positiva y neutra sugiere un fortalecimiento en la velocidad vertical del viento entre los 900 hPa y los 750 hPa para el norte de la cuenca durante la fase positiva, y un debilitamiento de esta entre los 600 hPa y los 200 hPa. En la región sur, la diferencia entre la fase positiva y negativa, y fase positiva y neutra presenta igualmente el debilitamiento en la velocidad vertical del viento durante la fase positiva del DOI sobre todos los niveles de presión dentro de la cuenca. Asimismo, al observar la región correspondiente al océano Índico (alrededor de la longitud 45°E a 80°E), se presenta un leve fortalecimiento en la velocidad vertical del viento durante la fase positiva de este fenómeno.



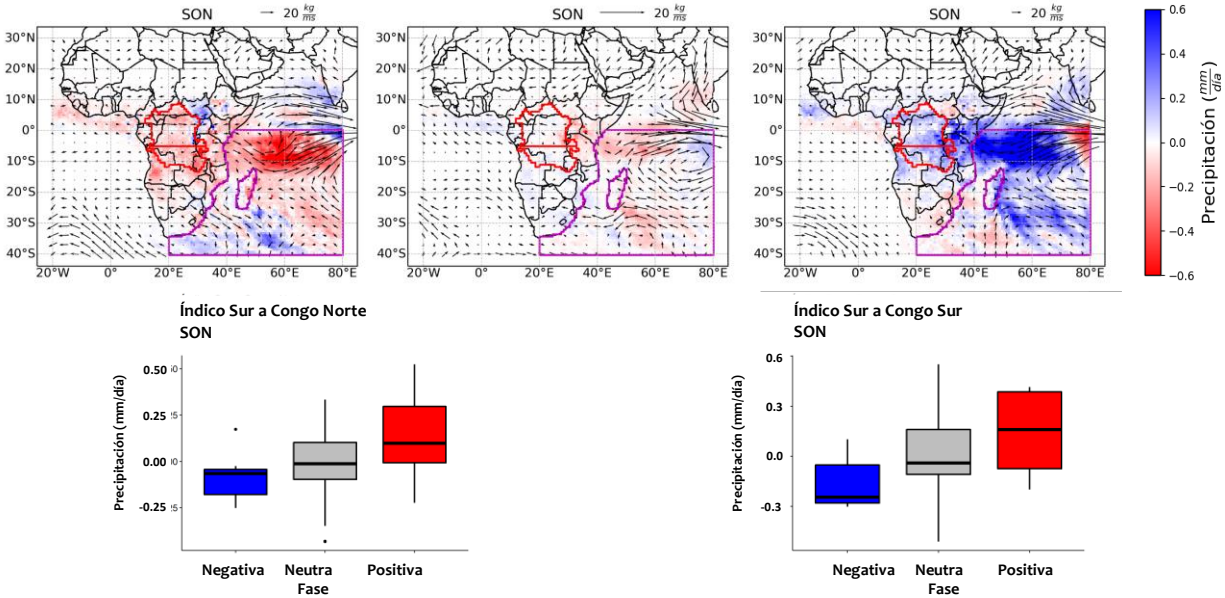
**Figura 27.** Primera fila: sección vertical de la función de corriente meridional (contornos; en  $\text{kg m}^{-1}$ ). Los vectores representan la componente meridional del viento irrotacional (en  $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en  $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ). Las líneas rojas representan los límites sur y norte de la cuenca del río Congo. Segunda y tercera fila: sección vertical de la componente zonal del viento irrotacional (en  $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en  $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) en las regiones Congo Norte y Congo Sur, respectivamente, durante la fase positiva del DOI, y las diferencias entre la fase positiva y las fases neutra y negativa durante el trimestre MAM. Los vectores rojos indican movimiento ascendente. Las líneas rojas representan los límites este y oeste de la cuenca del río Congo.

Contrario a lo que ocurre durante MAM, durante SON la advección de humedad atmosférica desde la región sur del océano Índico hacia la cuenca del Congo presenta alteración en su comportamiento bajo la influencia

del DOI. En la Figura 28 se observa el comportamiento del transporte de agua precipitable el Índico Sur hacia ambas regiones de la cuenca, donde es posible evidenciar una disminución en la fracción de anomalía de agua precipitable transportada durante la fase negativa del DOI, mientras que durante la fase positiva ocurre un aumento en las anomalías de agua precipitable transportada hacia la cuenca; asimismo, en los diagramas de cajas y bigotes se refleja este comportamiento. Por otro lado, la fracción de precipitación transportada desde esta región oceánica hacia la cuenca refleja un comportamiento similar, como se observa en la Figura 29, en la que se identifica un aumento en el transporte de precipitación durante la fase positiva del DOI y una disminución de su advección durante la fase negativa. Sin embargo, a pesar de que estas figuras evidencian una alteración en la advección de humedad atmosférica durante la ocurrencia de este fenómeno, la prueba de diferencia de medias aplicada no indica la existencia de un cambio estadísticamente significativo.

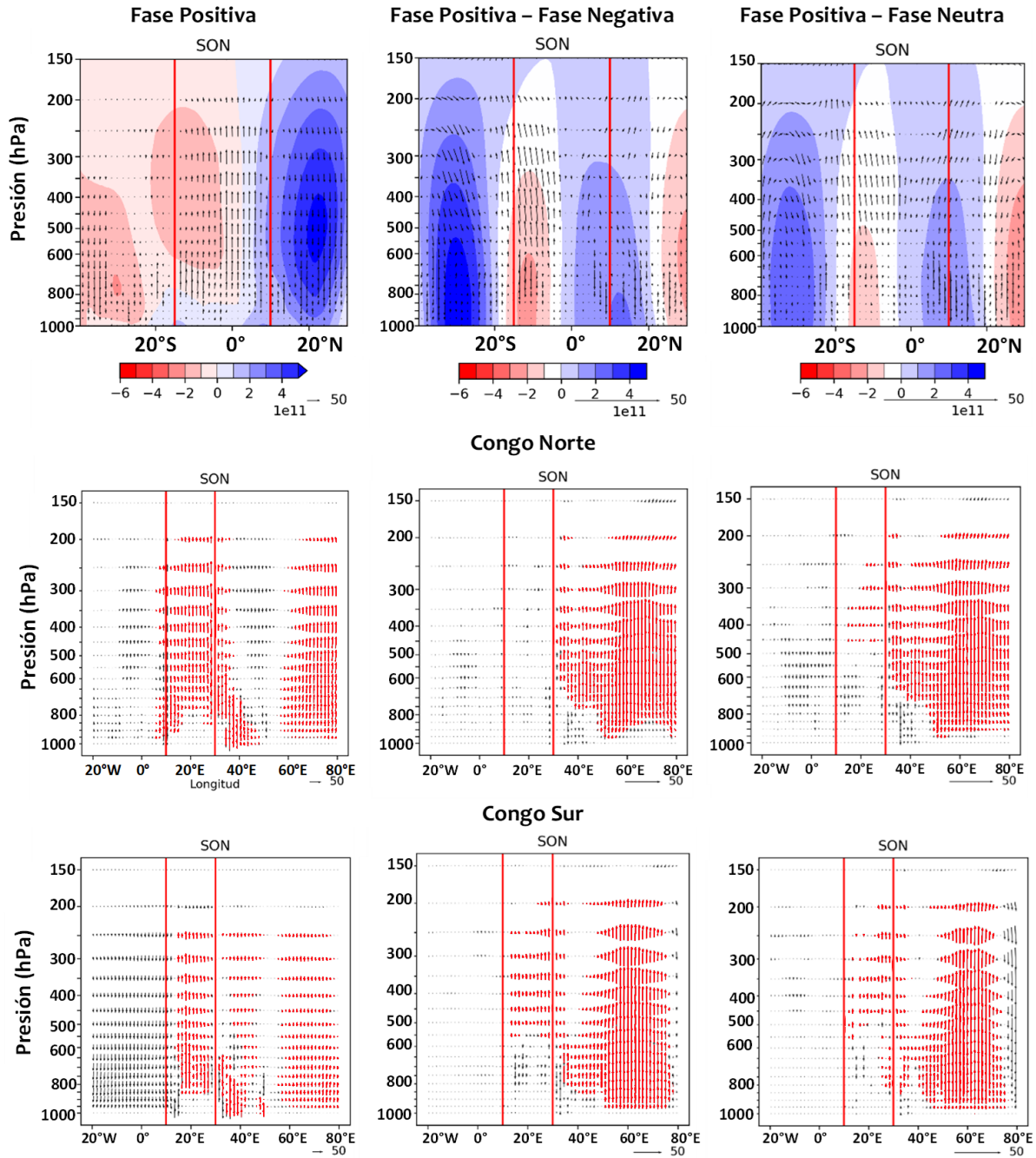


**Figura 28.** Aporte de agua precipitable desde la región Índico Sur hacia la cuenca del Congo en las fases negativa, neutra y positiva del DOI durante el trimestre SON.



**Figura 29.** Aporte de precipitación desde la región Índico Sur hacia la cuenca del Congo en las fases negativa, neutra y positiva del DOI durante el trimestre SON.

Al analizar la celda regional de Hadley en las diversas fases del DOI (Figura 30), es posible observar un fortalecimiento en la velocidad vertical del viento durante la fase positiva en comparación con las fase negativa y neutra, con mayor intensidad en el sur de la cuenca y a partir aproximadamente del nivel de presión 550 hPa. En esta misma figura se observan los cambios en la celda de Walker para ambas regiones de la cuenca, indicando que en la región Congo Norte se presenta una zona de ascenso del viento más intensa y constante a lo ancho de la cuenca comparado con lo que sucede en la región Congo Sur durante la fase positiva del DOI; sin embargo, al comparar con lo que ocurre durante las otras fases de este fenómeno, se evidencia un leve fortalecimiento de la velocidad vertical del viento sobre Congo Sur en la fase positiva del DOI respecto a la fase negativa, lo que no ocurre en Congo Norte. Con respecto al comportamiento de esta celda sobre el océano Índico, se observa un fortalecimiento en la velocidad vertical del viento durante la fase positiva, entre los 45°E y 75°E, lo cual se encuentra en concordancia con Jiang et al. (2021), indicando un debilitamiento en la celda de Walker que está relacionado con un aumento en la humedad atmosférica sobre el centro y occidente del océano Índico, incidiendo en la advección de humedad hacia la región ecuatorial africana.

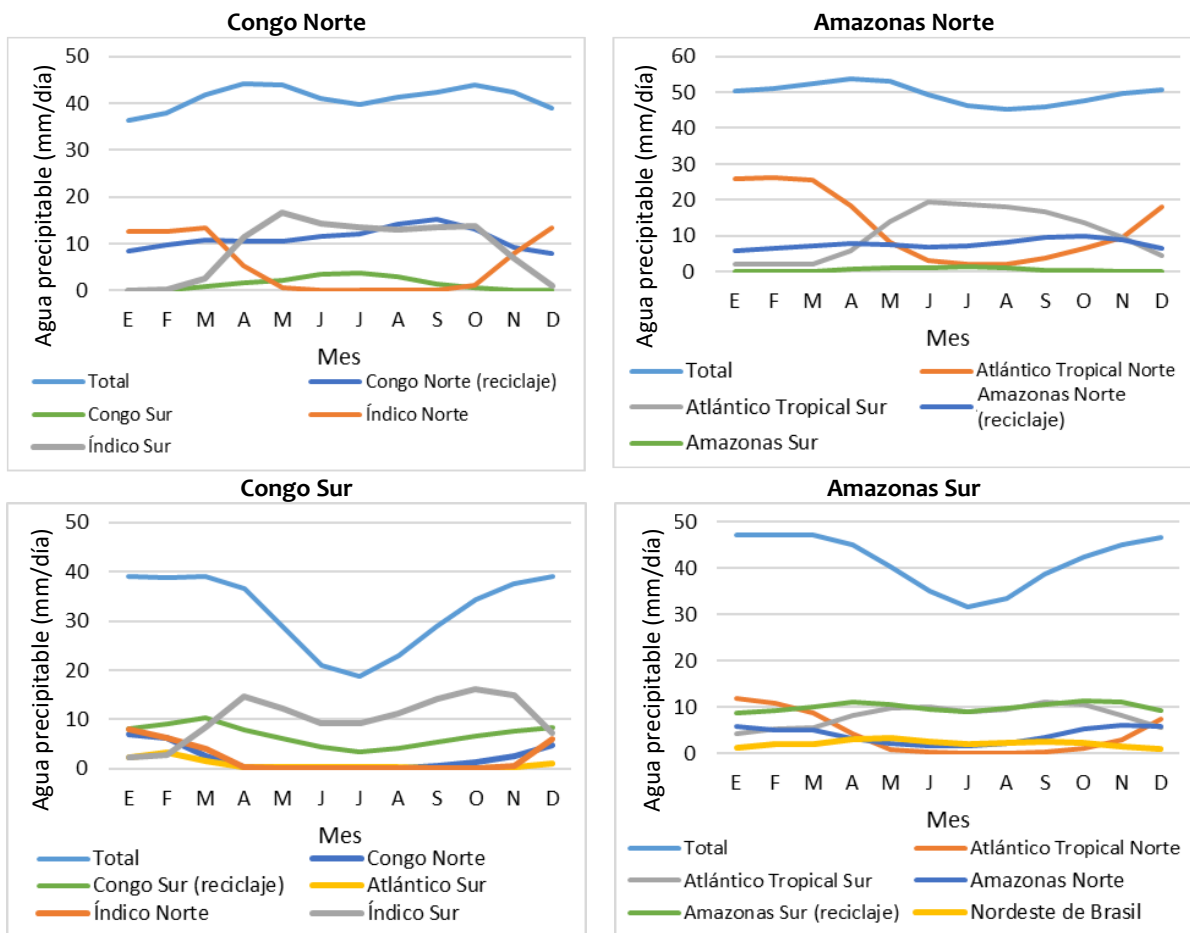


**Figura 30.** Primera fila: sección vertical de la función de corriente meridional (contornos; en  $\text{kg m}^{-1}$ ). Los vectores representan la componente meridional del viento irrotacional (en  $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en  $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ). Las líneas rojas representan los límites sur y norte de la cuenca del río Congo. Segunda y tercera fila: sección vertical de la componente zonal del viento irrotacional (en  $\text{m s}^{-1}$ ) y la velocidad vertical del viento (en  $10^3 \text{ Pa s}^{-1}$ ) en las regiones Congo Norte y Congo Sur, respectivamente, durante la fase positiva del DOI, y las diferencias entre la fase positiva y las fases neutra y negativa durante el trimestre SON. Los vectores rojos indican movimiento ascendente. Las líneas rojas representan los límites este y oeste de la cuenca del río Congo.



### 3.5. Comparación del comportamiento de la humedad atmosférica en la cuenca del río Congo y en la cuenca del río Amazonas

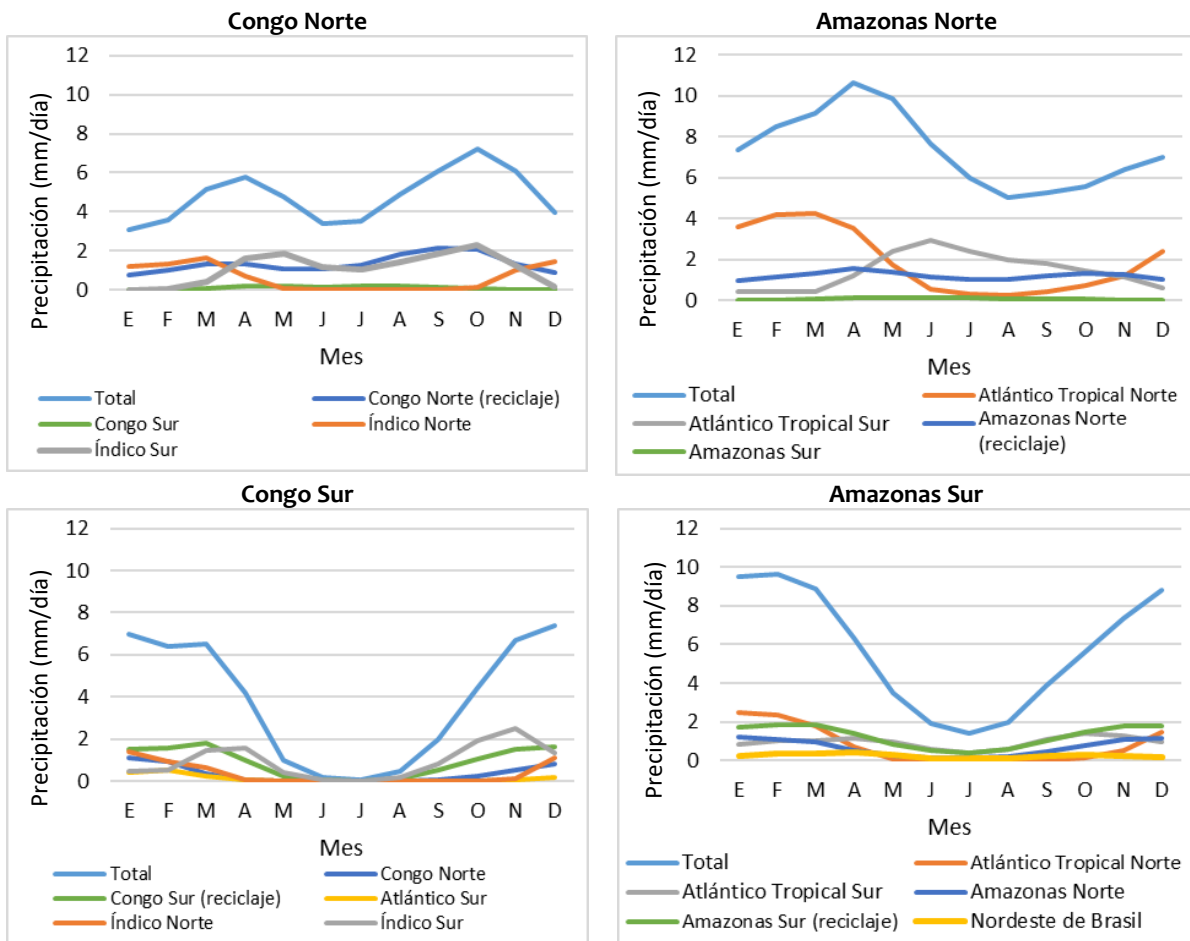
Uno de los objetivos de este trabajo es comparar el comportamiento del transporte y reciclaje de humedad atmosférica para las cuencas de los ríos Congo y Amazonas. Este análisis se enfocó principalmente en el reciclaje de humedad en las regiones norte y sur de cada cuenca. Para la cuenca del río Congo se consideró la simulación realizada en este trabajo para el periodo 1980-2015 (ver secciones 3.1 y 3.2), mientras que para la cuenca del río Amazonas se utilizó la simulación realizada por Rendón-Hurtado (2021) para el periodo 1980-2005. La Figura 31 y Figura 32 presentan los ciclos anuales multianuales de agua precipitable y precipitación para las cuencas de los ríos Congo y Amazonas, así como su transporte desde las principales regiones fuente hacia cada cuenca. En estas figuras se evidencia un comportamiento bimodal para la región norte de la cuenca del Congo y un comportamiento unimodal para la región sur, siendo el comportamiento bimodal más marcado para la variable precipitación que para el agua precipitable. Para la cuenca del río Amazonas se observa un ciclo anual unimodal tanto en la región norte como en la región sur.



**Figura 31.** Ciclo anual multianual de agua precipitable total, transportada y reciclada para las regiones Congo Norte, Congo Sur, Amazonas Norte y Amazonas Sur.

La región Congo Norte presenta dos picos de precipitación durante MAM y SON (Figura 32), siendo este último trimestre cuando se presentan los eventos de mayor magnitud, mientras la región Amazonas Norte presenta un único pico de precipitación durante MAM, que coincide con la primera temporada de lluvias en la región Congo Norte. En ambas cuencas, el reciclaje de precipitación tiende a no presentar gran

variación a lo largo del año, contrario a lo que ocurre con la precipitación transportada desde el océano, ya que durante JJA (cuando se presentan los mínimos de precipitación en ambas cuencas) se invierte el aporte de las regiones norte y sur del océano Índico hacia el Congo y de las regiones norte y sur del océano Atlántico Tropical hacia el Amazonas. Los aportes desde la región norte de ambos océanos tienden a imitar el comportamiento que se refleja en el ciclo anual multianual de precipitación total: durante MAM se evidencia un aumento en el aporte desde estas regiones, las cuales reducen su transporte durante JJA, mientras que los aportes desde la región sur de ambos océanos hacia su respectiva cuenca aumentan durante JJA. Con base en lo anterior se resalta que mientras una región (norte o sur) del océano (Índico o Atlántico) aporta poca humedad hacia la respectiva cuenca (Congo o Amazonas), la otra región tiende a suplir su déficit de humedad proveniente del océano, lo que es consistente con lo discutido por Drumond et al. (2014) y Sorí et al. (2018). En la región sur de ambas cuencas se presenta un comportamiento similar: un ciclo anual multianual con valores mínimos de precipitación durante JJA y máximos durante DJF (Domínguez et al., 2022); de igual manera, durante JJA se presenta el mínimo de transporte de precipitación desde las regiones oceánicas hacia el sur de ambas cuencas. Este comportamiento en la región norte y sur se observa de forma similar en el ciclo anual multianual de agua precipitable para ambas cuencas (Figura 31).



**Figura 32.** Ciclo anual multianual de precipitación total, transportada y reciclada para las regiones Congo Norte, Congo Sur, Amazonas Norte y Amazonas Sur.

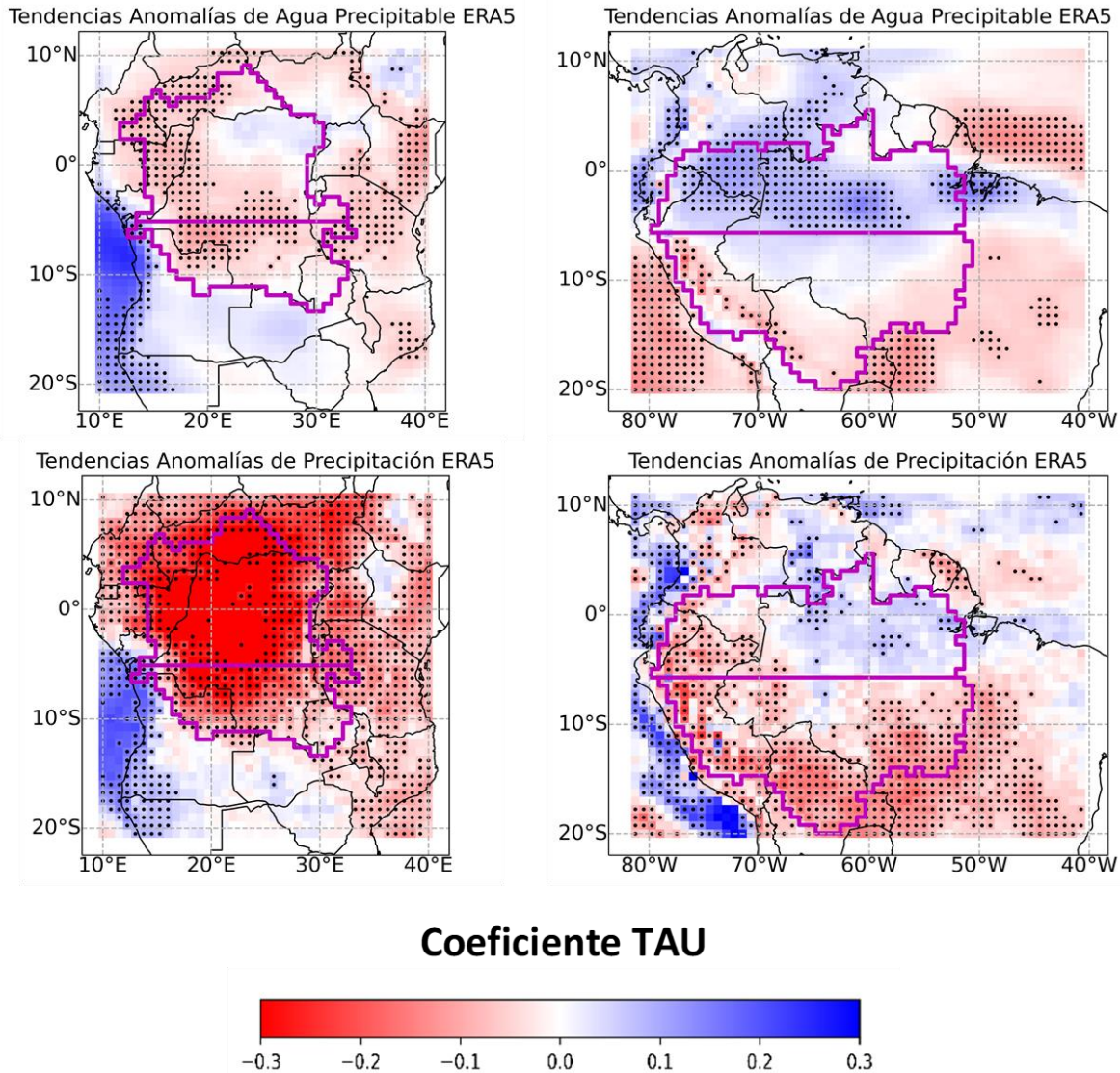
La Tabla 13 presenta los valores de precipitación reciclada y sus respectivos porcentajes con respecto a la precipitación total en las regiones norte y sur de las cuencas del río Congo y del río Amazonas. En el sur

de ambas cuencas el reciclaje de precipitación en términos de porcentaje promedio presenta magnitud similar a pesar de la diferencia entre el área de ambas regiones. Esto podría estar asociado a las características con las que cuenta el sur de estas cuencas, ya que presentan una menor porción de bosque húmedo tropical, predominan los ecosistemas tipo sabana, son zonas más permeadas por procesos de deforestación y, en general actividades antrópicas. Por otra parte, en la región norte de la cuenca del Amazonas se observa un menor reciclaje de precipitación que en el norte de la cuenca del Congo; sin embargo, esto es compensado con un mayor transporte de humedad atmosférica desde el Atlántico Tropical Norte hacia el norte del Amazonas comparado con la advección de humedad desde la región Índico Norte hacia la región Congo Norte, lo que puede contribuir a la ocurrencia de eventos de precipitación con mayor magnitud sobre la cuenca del Amazonas.

**Tabla 13.** Precipitación promedio, mínima y máxima reciclada en las cuencas de los ríos Congo y Amazonas. También se indica su valor porcentual con respecto a la precipitación total.

Región	Precipitación (mm/día)					
	Promedio	% Promedio	Mínimo	% Mínimo	Máximo	% Máximo
<b>Congo Norte</b>	1.36	28.22	0.35	17.41	2.82	44.98
<b>Congo Sur</b>	0.92	25.97	0.00	16.87	2.16	41.41
<b>Amazonas Norte</b>	1.20	17.17	0.47	11.25	1.98	28.27
<b>Amazonas Sur</b>	1.26	24.04	0.25	15.95	2.34	45.05

En la Figura 33 se presentan las tendencias espaciales de precipitación y agua precipitable para cada cuenca durante su respectivo periodo de análisis según el reanálisis ERA5. Inicialmente, se identifica una tendencia negativa muy marcada en la totalidad de la cuenca del río Congo, la cual puede estar influenciada por la naturaleza del producto de reanálisis utilizado. No obstante, como se evidenció en la sección 3.1, diversos conjuntos de datos muestran una reducción en la precipitación sobre esta cuenca (Figura 11). Por su parte, la cuenca del Amazonas presenta una disminución en la precipitación sobre su región sur, lo que se ha evidenciado como resultado de un aumento en la duración de las temporadas secas (Boisier et al., 2015; Agudelo et al., 2019; Espinoza et al., 2019b), debido a la influencia del ENOS y a los cambios de la temperatura superficial del mar en el este de los océanos Pacífico este y Atlántico Tropical norte (Marengo et al., 2011; Wang et al., 2018). Este cambio en la precipitación se asocia con la reducción en la evapotranspiración local y el reciclaje de precipitación (Agudelo et al., 2019), lo que a su vez se relaciona con el retraso en el inicio del monzón de Suramérica (Correa et al., 2021) y la reducción en la duración de la temporada lluviosa debido a una terminación anticipada de esta (Debortoli et al., 2015) y, por consiguiente, con el aumento de la duración de la temporada seca en el sur del Amazonas (Fu et al., 2013; Debortoli et al., 2015; Correa et al., 2021) y el incremento en la frecuencia de días secos, en especial durante SON (Espinoza et al., 2019a, 2019b). En términos de agua precipitable, se observa una tendencia decreciente sobre el oeste de las regiones Congo Norte y Congo Sur. Por su parte, el Amazonas presenta una tendencia positiva en el norte de la cuenca y aunque la región Amazonas Sur presenta una tendencia negativa similar a la observada en la región Congo Sur, presenta significancia estadística sólo en el oeste de esta región.

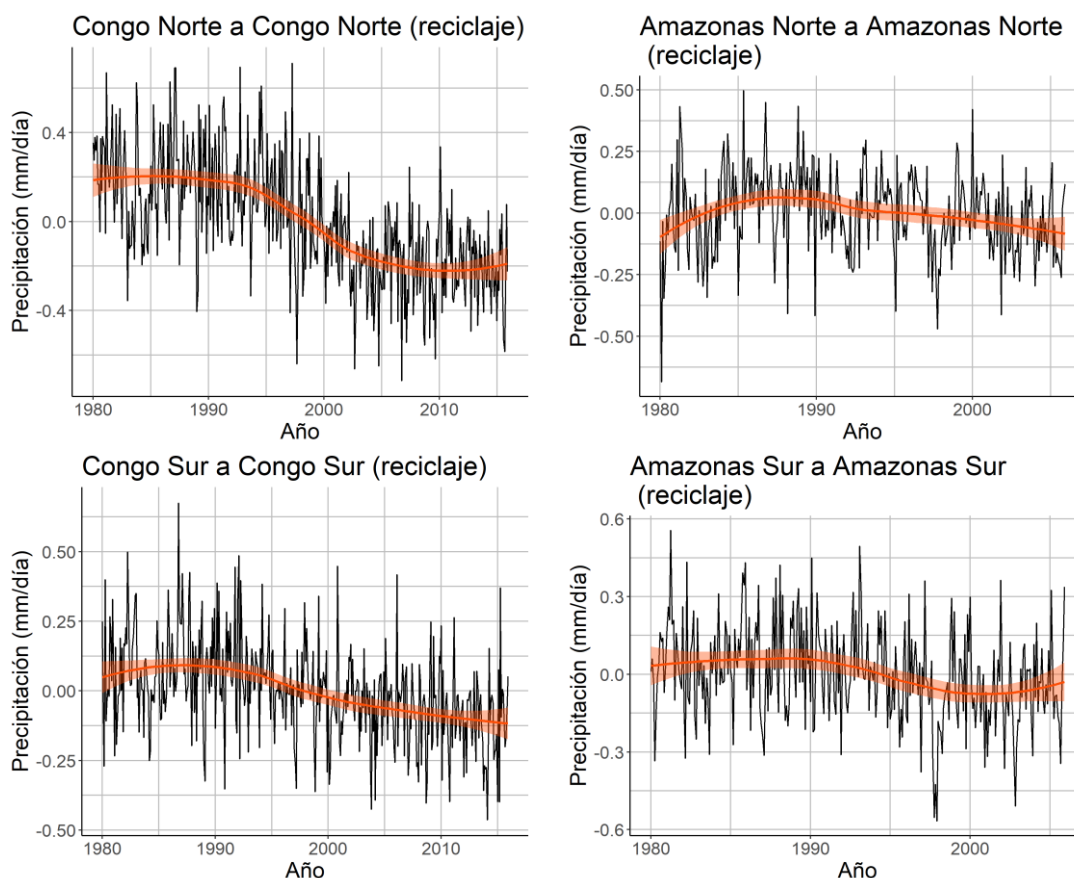


**Figura 33.** Tendencias espaciales de anomalías de agua precipitable y precipitación para las cuencas de los ríos Congo (columna izquierda) y Amazonas (columna derecha) según el reanálisis ERA5: coeficiente TAU y valor p por pixel menor o igual a 0.1 (puntos negros). Las regiones norte y sur de las cuencas se encuentran delimitadas en púrpura.

Un análisis de tendencias con la prueba no paramétrica Mann-Kendall evidencia una disminución estadísticamente significativa a un nivel de significancia menor o igual a 0.05 en las anomalías de reciclaje de precipitación en ambas regiones de la cuenca del Congo y de la cuenca del Amazonas (Tabla 14). En la Figura 34 se presentan las series de tiempo correspondientes al reciclaje de precipitación en la región norte y sur de ambas cuencas, confirmando este comportamiento, el cual se presenta con mayor notoriedad en la cuenca del río Congo. De igual manera, el reciclaje de agua precipitable presenta una tendencia decreciente, siendo estadísticamente significativa en ambas regiones de la cuenca del Congo y en el sur de la cuenca del Amazonas.

**Tabla 14.** Coeficiente TAU y valor p del análisis de tendencia para las anomalías de precipitación reciclada en la región norte y sur de las cuencas de los ríos Congo y Amazonas.

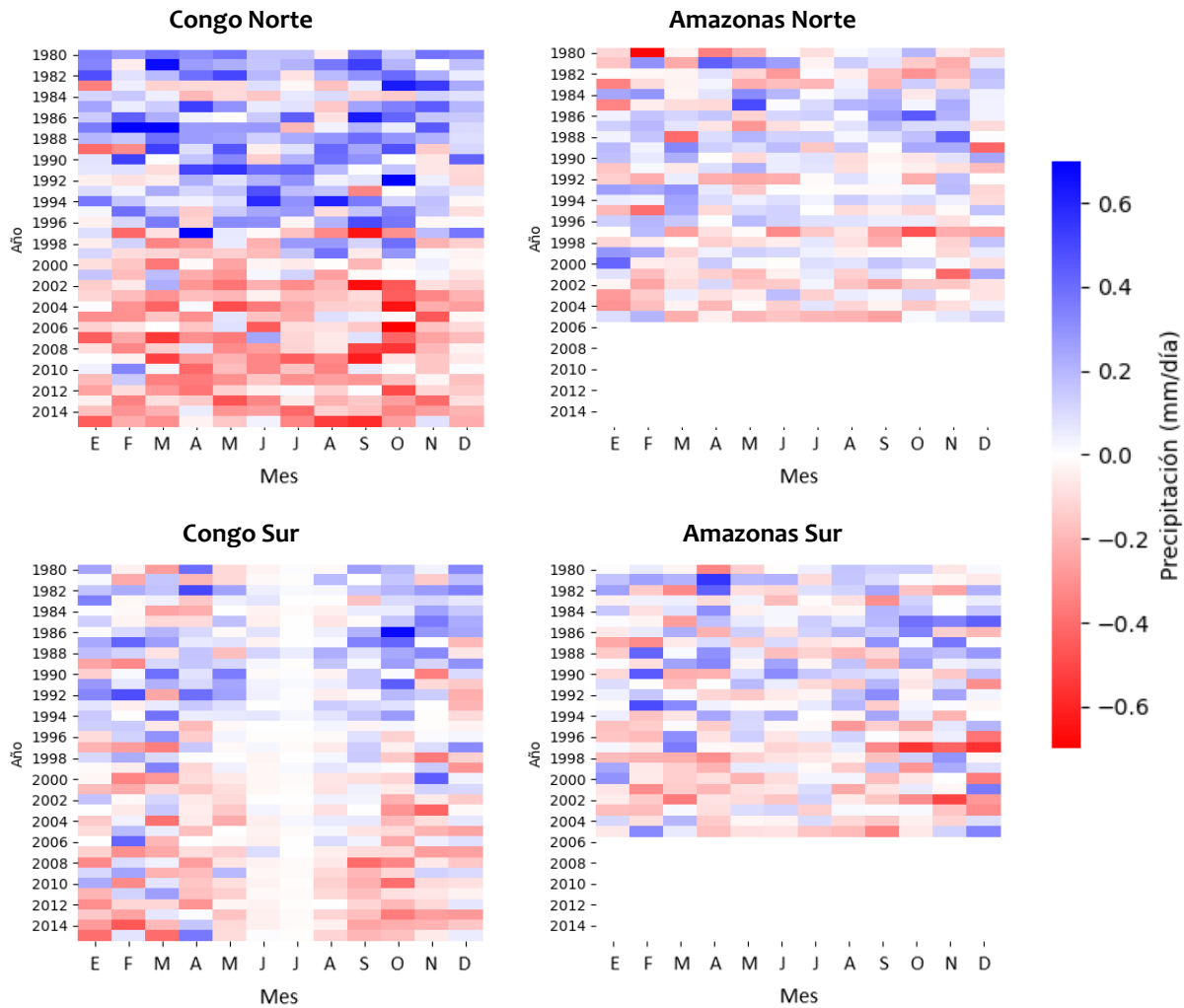
Región fuente	Coeficiente TAU	Valor p
Congo Norte	-0.427	$\leq 2.22e-16$
Congo Sur	-0.333	$\leq 2.22e-16$
Amazonas Norte	-0.112	0.0030629
Amazonas Sur	-0.175	4.2293e-06



**Figura 34.** Series de tiempo de anomalías de precipitación reciclada en la región norte y sur de las cuencas de los ríos Congo y Amazonas. Las líneas de ajuste rojas indican tendencias estadísticamente significativas.

Finalmente, la Figura 35 presenta la evolución mensual de las anomalías de precipitación para las dos regiones de las cuencas del Congo y del Amazonas. Se evidencia un decrecimiento en el reciclaje de precipitación en ambas regiones de la cuenca del Congo a lo largo del periodo de estudio, sumado a la presencia en la región sur de valores mucho más cercanos a cero durante los meses de junio y julio, meses en los cuales ocurren los mínimos de precipitación (Figura 32). En la cuenca del Amazonas ocurre un fenómeno similar, principalmente a partir de los años 1996-1997, aunque con menor claridad que en la cuenca del Congo. Este mínimo en la precipitación sobre la cuenca del Amazonas a su vez coincide con reportes del incremento de la temperatura superficial de la cuenca, la cual a pesar de que varía entre diversas bases de datos se ha hecho más evidente a partir de 1980 y se ha magnificado a partir del año 2000, presentándose una mayor tasa de calentamiento durante JJA y SON (Armenteras et al., 2021). Sumado a esto, en la región sur del Amazonas se observan valores negativos de mayor magnitud durante los meses

de octubre, noviembre y diciembre, los cuales corresponden al inicio del monzón de Suramérica, evidenciando un mayor impacto en el reciclaje de precipitación, lo cual coincide con resultados de simulaciones para el Amazonas que evidencian la disminución en el reciclaje de humedad atmosférica en el sur de la cuenca durante este periodo, consecuencia de la deforestación (Ruiz-Vásquez et al., 2020) y del aumento de la duración de las temporadas secas en esta región (Agudelo et al., 2019), afectando a su vez el transporte de humedad atmosférica desde esta cuenca hacia latitudes más al norte.



**Figura 35.** Evolución mensual de anomalías de la precipitación reciclada para las regiones norte y sur de las cuencas de los ríos Congo y Amazonas durante el correspondiente periodo de simulación (1980-2015 para el Congo; 1980-2005 para el Amazonas).

#### 4. Discusión y conclusiones

El transporte y reciclaje de humedad atmosférica hacen parte de los principales mecanismos de distribución de agua en el planeta, desplazando la humedad desde regiones fuente hacia regiones sumidero de vapor de agua, por lo que el agua que se precipita en una determinada área puede ser originada por evapotranspiración local o transportada desde otras regiones terrestres y oceánicas (Sorí et al., 2017). Los bosques húmedos tropicales son uno de los principales ecosistemas del planeta debido a sus funciones ecosistémicas, al gran impacto que tienen sobre la regulación del clima a nivel local y global, así como a su gran influencia sobre la evapotranspiración, siendo este tipo de bosque una de las principales fuentes de evapotranspiración de origen terrestre (Malhi et al., 2014). De esta manera, contribuyen al vapor de agua presente en la atmósfera.

Esta investigación se enfocó en el análisis del transporte y reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del río Congo utilizando el modelo DRM e información del reanálisis ERA5 durante el periodo 1980-2015. Además, en este trabajo se analizó la variación de este transporte durante la ocurrencia de los fenómenos de variabilidad interanual ENOS y DOI. En particular, el ENOS es un fenómeno con un impacto a nivel global relacionado con el calentamiento de la región ecuatorial del océano Pacífico, que se manifiesta en afectaciones a la cantidad de precipitación observada en diferentes regiones del planeta. Por su parte, el DOI tiene un impacto directo sobre el océano Índico, siendo este una de las principales regiones fuente de humedad atmosférica transportada hacia la cuenca del río Congo. Finalmente, este trabajo realizó una comparación del comportamiento del transporte y el reciclaje de la humedad atmosférica para las cuencas de los ríos Congo y Amazonas, las cuales corresponden a los dos bosques húmedos tropicales más importantes del planeta.

Este trabajo evidencia una disminución en las anomalías de agua precipitable en la región norte de la cuenca del Congo durante el periodo de estudio, mientras que la región sur no muestra un cambio significativo en esta variable (Figura 33). Esto es contrario a lo observado para la variable precipitación, pues sobre ambas regiones de la cuenca se detectó una tendencia de reducción de precipitación, identificada a partir de múltiples bases de datos observacionales, satelitales y de reanálisis. Esta tendencia está asociada al aumento en la frecuencia e intensidad de sequías en el continente africano (Masih et al., 2014) y a la reducción en el reciclaje y transporte de humedad atmosférica desde regiones continentales y oceánicas (Sorí et al., 2022), lo que junto al aumento en la duración de las temporadas secas puede inducir cambios en la composición del bosque, favoreciendo la vegetación más resiliente a climas cada vez más secos (Zhou et al., 2014). Lo anterior se encuentra atribuido a un inicio atípico de las temporadas secas debido a la disminución en la precipitación durante el periodo de transición de temporada lluviosa a temporada seca (Jiang et al., 2019), el cual inicia en el mes de abril (Figura 32), alcanzando el pico de la temporada seca en JJA.

La literatura existente sugiere que la cuenca del río Congo es poco afectada por el fenómeno ENOS, cuya mayor influencia se presenta en el este y sur del continente africano (Obasi, 2005; Farnsworth et al., 2011; Endris et al., 2019). Sin embargo, este trabajo muestra que las principales variaciones en transporte y reciclaje de humedad sobre esta cuenca (asociadas al ENOS) se presentan durante la temporada MAM. En particular, se detecta la existencia de un aumento en el transporte de agua precipitable y precipitación desde el norte del océano Índico hacia la cuenca del Congo durante su fase positiva (El Niño), que ocurre paralelo a una correlación negativa entre la precipitación en África Central y la temperatura superficial del mar en la región Niño 3 durante MAM (Farnsworth et al., 2011). Este comportamiento también se observa durante SON, con un aumento de precipitación transportada desde el sur del océano Índico hacia la región sur de la cuenca. Asimismo, se observa un fortalecimiento en la celda de Hadley sobre la región norte y sur del Congo y un aumento en la velocidad vertical del viento en la región de convergencia de ambas ramas de esta celda para MAM bajo la ocurrencia de eventos El Niño. Por su parte, la influencia del DOI se refleja en un aumento en la precipitación transportada desde la región Índico Norte hacia la región Congo Sur

durante MAM, tanto en su fase positiva como negativa, con mayores cambios durante esta última fase. Es importante resaltar que este no es un resultado completamente concluyente, ya que el DOI tiende a iniciar su desarrollo entre los meses de mayo y junio, por lo que este aumento en la precipitación transportada puede estar asociado a variaciones influenciadas por el ENOS, pues la ocurrencia del DOI puede superponerse con algunas fases positivas o negativas del ENOS durante el periodo MAM (ver Tabla 3 y Tabla 4). Por otra parte, durante SON se evidenció una alteración en la advección de humedad desde la región Índico Sur hacia la cuenca del Congo, dado el aumento del transporte de agua precipitable y precipitación hacia ambas regiones de la cuenca durante la fase positiva del DOI, mientras que durante la fase negativa este aporte disminuye. Este resultado se relaciona con el debilitamiento (fortalecimiento) de la celda de Walker durante la fase positiva (negativa) del DOI, generando un aumento (disminución) en la humedad atmosférica sobre el centro y occidente del océano Índico (Jiang et al., 2021). Sin embargo, al aplicar la prueba de diferencia de medias no se obtuvo un resultado estadísticamente significativo.

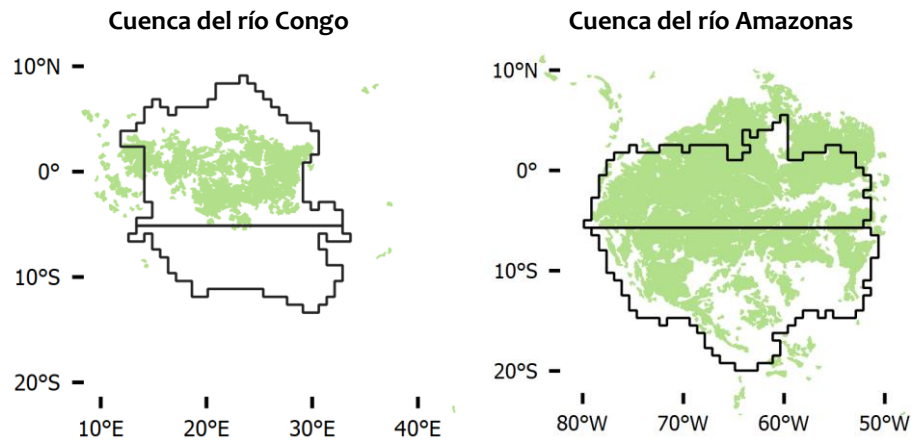
Nuestro análisis de reciclaje y transporte de humedad atmosférica para las cuencas de los ríos Congo y Amazonas muestra comportamientos muy similares en el transporte de humedad, particularmente para la región sur de ambas cuencas en las que se presenta un ciclo anual multianual unimodal tanto para el agua precipitable como para la precipitación (Figura 31 y Figura 32), con mínimos durante JJA y máximos durante DJF. Estos periodos secos se relacionan con una reducción en el reciclaje de precipitación y advección de humedad desde diversas regiones terrestres y oceánicas. En particular, se presenta una mayor magnitud en las anomalías negativas de contribución de humedad hacia la cuenca del río Congo durante condiciones secas extremas que durante condiciones secas severas, por lo que esta cuenca es más eficiente en el reciclaje de humedad durante periodos húmedos que durante periodos secos (Sorí et al., 2017). En ambas cuencas, la región sur presenta una disminución en el reciclaje de precipitación, particularmente a partir de 1997 (Figura 35). La Tabla 15 muestra el cambio de agua precipitable y precipitación total en la cuenca del río Congo (Amazonas) entre el periodo 1998-2015 (1998-2005) con respecto al periodo 1980-1997. Se observa una disminución en el reciclaje de agua precipitable para ambas regiones de la cuenca del río Congo, con una reducción aproximada de 4.46% en la región norte durante el periodo 1998-2015, mientras que en el Amazonas la región norte presenta una disminución, en la región sur ocurre un aumento en el reciclaje de agua precipitable, sin embargo, este cambio es menor al 1% en ambas regiones de la cuenca del Amazonas. En términos de reciclaje de precipitación, la cuenca del río Congo presenta la mayor reducción, con una disminución de precipitación de 21.77% (13.71%) en la región Congo Norte (Congo Sur) durante el periodo 1998-2015 con respecto al periodo 1980-1997, la cual se presenta con mayor intensidad durante eventos de sequía (Sorí et al., 2022). Por su parte, pese a que la precipitación reciclada en la cuenca del río Amazonas presenta una disminución menor en comparación con el reciclaje de agua precipitable, el reciclaje de precipitación en la región sur muestra una reducción mayor que en la región norte, disminuyendo en promedio 6.91% con respecto a lo observado durante 1980-1997, lo cual es consistente con lo reportado por Armenteras et al. (2021), quienes afirman que la región sur del Amazonas ha presentado una disminución en la precipitación local y en el reciclaje y advección de humedad durante las últimas cuatro décadas, fenómeno que ocurre con mayor intensidad durante el periodo SON (Agudelo et al., 2019) cuando se transita de condiciones secas a lluviosas debido a la influencia del monzón de Suramérica (Figura 35). Estos mayores cambios en el reciclaje de agua precipitable y precipitación en el sur de ambas cuencas podrían estar asociados a la intensidad de las actividades antrópicas que se desarrollan en estas regiones, en las cuales se presenta una menor porción de bosque húmedo tropical y predominan los ecosistemas de sabana.



**Tabla 15.** Diferencia en el reciclaje de agua precipitable y precipitación promedio entre los periodos 1998-2015 (1998-2005) y 1980-1997 (1980-1997) en la cuenca del río Congo (Amazonas).

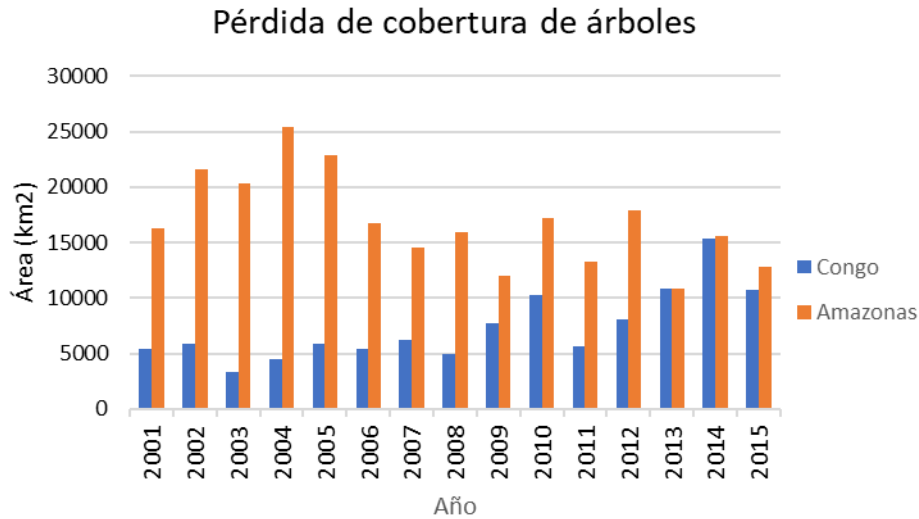
<b>Agua Precipitable</b>				
	<b>Congo Norte</b>	<b>Congo Sur</b>	<b>Amazonas Norte</b>	<b>Amazonas Sur</b>
<b>1998-2015 menos 1980-1997 (mm/día)</b>	-0.51	-0.28	-0.07	0.03
<b>Porcentaje (%)</b>	-4.46	-3.99	-0.08	0.31
<b>Precipitación</b>				
	<b>Congo Norte</b>	<b>Congo Sur</b>	<b>Amazonas Norte</b>	<b>Amazonas Sur</b>
<b>1998-2015 menos 1980-1997 (mm/día)</b>	-0.33	-0.14	-0.05	-0.09
<b>Porcentaje (%)</b>	-21.77	-13.71	-4.36	-6.91

Lo mencionado anteriormente puede observarse en la Figura 36, la cual presenta un mapa de Paisajes Forestales Intactos (PFI) para el año 2016 en las cuencas de los ríos Congo y Amazonas. Potapov et al. (2017) define los PFI como “un mosaico continuo de bosques y ecosistemas naturalmente sin árboles, sin signos de actividad humana detectados remotamente y un área mínima de 500 km<sup>2</sup>, los cuales son fundamentales para almacenar carbono, albergar biodiversidad, regular regímenes hidrológicos y otras funciones ecosistémicas”. Es posible observar que la región norte de ambas cuencas es dominada por este tipo de ecosistema. Por su parte, la región sur de la cuenca del Congo no muestra la presencia de PFIs mientras que para el sur de la cuenca del Amazonas se detecta una fragmentación de estos PFIs, principalmente en el sur y oriente de la región, siendo la extracción industrial de madera y la expansión agrícola la primera y segunda causa de reducción de los PFIs en estas regiones (Potapov et al., 2017), donde es una práctica común el uso del fuego para la eliminación del bosque, liberando CO<sub>2</sub> a la atmósfera junto a otros gases de efecto invernadero, a la vez que se interrumpen los patrones de lluvia a múltiples escalas (Wolosin et al., 2018). Esto ocasiona que los pastos y cultivos que tienden a reemplazar el bosque alteren el ciclo hidrológico al generar menor evapotranspiración, lo que puede ocasionar un aumento en la escorrentía superficial y, por tanto, en el arrastre de sedimentos (D’Almeida et al., 2007; Lima et al., 2014; Marengo et al., 2021). Este tipo de alteraciones se evidencian con mayor claridad en la región sur y oriental de la cuenca del Amazonas. En especial, en la región del Cerrado se han documentado estos cambios, dado que entre 1955 y 1995 aumentó el área de pastizales y tierras de cultivo de un 30% a un 50% en las cuencas de los ríos Tocantins y Araguaia, ocasionando un aumento aproximadamente de 25% en la descarga de los ríos y de 28% en su carga de sedimentos durante la temporada lluviosa (Costa et al., 2003; Coe et al., 2011; Davidson et al., 2012). Así, la deforestación a escala local se asocia con disminución en evapotranspiración y aumento en el caudal de los ríos, como consecuencia de una menor infiltración en el suelo (Saeed et al., 2013), mientras que a escalas más grandes puede tener efectos sobre el clima a nivel regional (Coe et al., 2009; Lima et al., 2014), no obstante, en algunas cuencas la precipitación puede verse influenciada por cambios de cobertura y usos del suelo fuera de la cuenca (Wang-Erlandsson et al., 2018). Sin embargo, los resultados de este tipo de simulaciones, donde se consideran los efectos de la deforestación en el balance hídrico de las cuencas, están fuertemente ligados al diseño del experimento y los supuestos de los modelos empleados (Coe et al., 2009; De Benedetti et al., 2022; Posada-Marín & Salazar, 2022), para lo que es necesaria una adecuada representación de los procesos que ocurren en el suelo, ya que estos modulan en gran medida las interacciones vegetación-atmósfera (Saeed et al., 2013).



**Figura 36.** Paisajes forestales intactos (sombreado verde) en la cuenca de los ríos Congo y Amazonas para el año 2016 (Potapov et al., 2017).

A pesar que grandes tasas de pérdida de área boscosa se han presentado en África, siendo el Congo una de las regiones más afectadas (Ewane et al., 2022), los cambios de cobertura en la cuenca del río Congo se encuentran entre los menores observados en los bosques húmedos tropicales, con una tasa neta de deforestación dos veces mayor en Suramérica y cuatro veces mayor en el Sudeste Asiático. Estos cambios tienden a estar asociados a la variación en la densidad poblacional y actividades de expansión, buscando suplir sus necesidades alimenticias y energéticas a costas del bosque (Megevand et al., 2013; Ewane et al., 2022). Existe evidencia de que la principal causa de alteración de los bosques a nivel global durante el periodo 2001-2015 se asoció a la deforestación impulsada para la obtención de materias primas, la cual, a su vez, fue la causa principal de deforestación en la cuenca del río Amazonas (especialmente en la región sur), mientras que, en general, la causa principal de deforestación sobre la cuenca del Congo se asoció a la agricultura migratoria (Curtis et al., 2018). En la Figura 37 se presenta el área de cobertura de árboles perdida en las cuencas de los ríos Congo y Amazonas durante el periodo 2001-2015. Se evidencia un aumento en la pérdida de cobertura en la cuenca del Congo durante este periodo mientras que en el Amazonas se presenta una reducción de esta pérdida durante el final del periodo respecto a los años iniciales, llegando a presentarse magnitudes similares en ambas cuencas durante los años 2013, 2014 y 2015. La cuenca del Congo perdió alrededor de 110000km<sup>2</sup> de cobertura arbórea durante el periodo 2001-2015, equivalente a una disminución del 3.7% respecto al año 2000, mientras que la cuenca del Amazonas perdió aproximadamente 253000km<sup>2</sup> de cobertura, lo que equivale a un 4.9% respecto al año 2000 (Global Forest Watch, s.f.-a, s.f.-b; Hansen et al., 2013).



**Figura 37.** Pérdida de cobertura de árboles durante el periodo 2001-2015 en la cuenca de los ríos Congo y Amazonas (Fuente: Global Forest Watch, s.f.-a, s.f.-b; Hansen et al., 2013).

Estos procesos de deforestación vienen acompañados de diversos tipos de cambios ya que los bosques tropicales tienen menor albedo, generan más evapotranspiración y tienen mayor rugosidad superficial que pastos y cultivos (Marengo et al., 2021). Los modelos utilizados para simular estos cambios de cobertura y uso del suelo tienden a presentar una serie de características en común: presentan un aumento en el albedo de la superficie y como consecuencia de este aumento disminuye la energía disponible, a la vez que existe una menor eficiencia en la transmisión de energía a la atmósfera debido a la transición hacia pastos y cultivos (De Noblet-Ducoudré et al., 2012). Al considerar deforestación a gran escala, se evidencia una disminución en la precipitación sobre las cuencas, la cual está relacionada con la disminución en evapotranspiración y en los flujos de energía (Davidson et al., 2012). Así, cuando ocurren estos cambios en la cobertura y uso del suelo se generan perturbaciones en el balance de energía, aumenta la radiación incidente y disminuye la radiación absorbida debido a la generación de menos nubes y al incremento del albedo (von Randow et al., 2004; Bala et al., 2007), lo que en conjunto con la disminución en la rugosidad superficial y evapotranspiración resulta en la reducción de la radiación superficial neta (Sierra et al., 2021).

En la Cuenca del río Amazonas al considerar tasas de deforestación anteriores al año 2004, lo cual es equivalente a una pérdida del 47% del área boscosa original para el año 2050, podría resultar en una reducción del 8% en la precipitación anual aproximadamente, donde los más grandes cambios ocurrirían directamente en las regiones deforestadas y en la periferia de la cuenca (Spracklen & Garcia-Carreras, 2015). Bajo escenarios parciales de deforestación, Sierra et al. (2021) estiman una reducción en la precipitación sobre la cuenca del Amazonas alrededor de 20%, mientras que escenarios donde se simula deforestación en toda la extensión del bosque Amazónico se relacionan con un declive en la precipitación entre 10% y 20%, asociado con un aumento en la velocidad del viento que inhibe la convergencia de humedad, además de la disminución en el reciclaje de precipitación (Moore et al., 2007). Sobre la cuenca del Congo, la deforestación completa puede conducir a un aumento en el albedo de aproximadamente 0.05, teniendo como consecuencia condiciones climáticas más frías y secas, las cuales junto con la reducción en los flujos superficiales de calor latente asociados con los cambios en la radiación superficial neta se traduce en la reducción de la actividad convectiva sobre la cuenca, pudiendo generar un dipolo en el comportamiento de la precipitación, con una reducción aproximada del 42% sobre el occidente de la cuenca y un aumento alrededor del 10% sobre el oriente de esta (Bell et al., 2015). Akkermans et al. (2014) realizan

simulaciones en las que se reemplaza el bosque por una vegetación sucesional realística (cuyas propiedades están entre las del bosque original y pastos o suelo desnudo), evidenciando una disminución promedio en la precipitación de 2.6% por cuadrícula deforestada y un calentamiento promedio de la superficie de 0.7°C. Por su parte, simulaciones realizadas por Nogherotto et al. (2013) evidencian efectos tanto a nivel remoto como local, con una reducción en las tasas de evapotranspiración resultando en un calentamiento de hasta 4°C y una reducción en la precipitación de hasta el 50%.

Así, los resultados de este trabajo, en concordancia con otras investigaciones, sugieren la ocurrencia de una reducción en el reciclaje de humedad atmosférica en las cuencas de los ríos Congo y Amazonas durante las últimas décadas, reflejado en la reducción de la precipitación sobre estas cuencas, lo que es consistente con el fortalecimiento y el aumento en la duración de las temporadas secas en estas regiones (Agudelo et al., 2019; Jiang et al., 2019), siendo la cuenca del río Congo más sensible a estas alteraciones (Zhou et al., 2014), mientras que el bosque de la cuenca del Amazonas tiende a ser más resiliente a los efectos del alargamiento de las temporadas secas y la ocurrencia de eventos extremos más recurrentes (Davidson et al., 2012). En particular, estudios anteriores muestran que la reducción en la evapotranspiración local en el sur de la cuenca del río Amazonas puede asociarse con la disminución en la precipitación y la reducción de extensión de este bosque tropical (Espinoza et al., 2019b; Ruiz-Vásquez et al., 2020), ya que en general las masas de aire que han pasado sobre extensas regiones con vegetación tienden a producir al menos dos veces más precipitación que aquellas masas de aire que han transitado sobre pequeñas áreas con vegetación (Ewane et al., 2022).

Finalmente, a pesar de que es posible evidenciar que en el sur de ambas cuencas predomina la fragmentación de PFIs (Figura 36), también existe una predominancia de alteración antrópica que impacta la cobertura vegetal debido a cambios en usos del suelo en estas regiones (Curtis et al., 2018). En particular, nuestros resultados indican un mayor cambio en el reciclaje de humedad atmosférica en la cuenca del río Congo (Tabla 15), el cual podría estar influenciado por la pérdida de cobertura arbórea, la cual, a pesar de tener magnitud similar en ambas cuencas durante los últimos años del periodo de estudio (Figura 37), representa un mayor porcentaje de extensión para la cuenca del río Congo, lo que sumado a una mayor recurrencia y duración de eventos meteorológicos extremos como consecuencia de la retroalimentación entre los cambios de cobertura y cambios en el transporte y reciclaje de humedad atmosférica, puede generar alteraciones a nivel ecosistémico tanto en individuos como a nivel poblacional de plantas y animales (Marengo et al., 2021). Sin embargo, es necesario desarrollar un análisis más detallado sobre el reciclaje de humedad atmosférica en estas cuencas, que permita entender cómo se ve influenciado por alteraciones en la cobertura y extensión de estos bosques tropicales, particularmente en la cuenca del Congo, la cual, a pesar de su importancia, continúa siendo poco estudiada (Burnett et al., 2020; De Benedetti et al., 2022) y donde estos cambios de cobertura, al afectar los procesos de transporte y reciclaje de humedad atmosférica, no solo resultan en efectos negativos sobre la hidroclimatología de la cuenca sino que pueden afectar ecosistemas locales y actividades agrícolas dependientes de la precipitación (Armenteras et al., 2021). Por consiguiente, el bienestar humano también es afectado, ya que a medida que las sequías se hacen más severas y la precipitación más escasa e impredecible, se tiende a implementar prácticas de agricultura buscando disponibilidad hídrica en humedales, lechos de arroyos temporales o mediante la canalización del suministro de agua doméstica hacia granjas y plantaciones (Ewane et al., 2022). Esto es particularmente relevante en el contexto de cambio climático, dada la alta vulnerabilidad de los bosques tropicales (IPCC, 2022).

## 5. Bibliografía

- Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015. *Scientific Data*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.191>
- Adam, O., Grise, K., Staten, P., Simpson, I., Davis, S., Davis, N., Waugh, D., & Birner, T. (2018). The TropD software package: Standardized methods for calculating Tropical Width Diagnostics. *Geoscientific Model Development*, 1–35. <https://doi.org/10.5194/gmd-2018-124>
- Adler, R.F., G.J. Huffman, A. Chang, R. Ferraro, P. Xie, J. Janowiak, B. Rudolf, U. Schneider, S. Curtis, D. Bolvin, A. Gruber, J. Susskind, and P. Arkin, (2003). The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present). *J. Hydrometeor.*, 4,1147-1167.
- Agudelo, J., Arias, P. A., Vieira, S. C., & Martínez, J. A. (2019). Influence of longer dry seasons in the Southern Amazon on patterns of water vapor transport over northern South America and the Caribbean. *Climate Dynamics*, 52(5–6), 2647–2665. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4285-1>
- Akkermans, T., Thiery, W., & Van Lipzig, N. P. M. (2014). The regional climate impact of a realistic future deforestation scenario in the congo basin. *Journal of Climate*, 27(7), 2714–2734. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00361.1>
- Als Dorf, D., Beighley, E., Laraque, A., Lee, H., Tshimanga, R., O’Loughlin, F., Mahé, G., Dinga, B., Moukandi, G., & Spencer, R. G. M. (2016). Opportunities for hydrologic research in the Congo Basin. *Reviews of Geophysics*, 54(2), 378–409. <https://doi.org/10.1002/2016RG000517>
- Alves, L. M., Marengo, J. A., Fu, R., & Bombardi, R. J. (2017). Sensitivity of Amazon Regional Climate to Deforestation. *American Journal of Climate Change*, 06(01), 75–98. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.61005>
- Arias, P. A., Martínez, J. A., & Vieira, S. C. (2015). Moisture sources to the 2010–2012 anomalous wet season in northern South America. *Climate Dynamics*, 45(9–10), 2861–2884. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2511-7>
- Armenteras D., Berenguer E., Andreatzy C., Dávalos L. M., Duponchelle F., Hacon S., Lescano A. G., Macedo M., Nascimento N. (2021). Capítulo 21: Human Well-being and Health Impacts of the Degradation of Terrestrial and Aquatic Ecosystems. En: Nobre C., Encalada A., Anderson E., Roca Alcazar F.H., Bustamante M., Mena C., Peña-Claros M., Poveda G., Rodriguez J. P., Saleska S., Trumbore S., Val A. L., Villa Nova L., Abramovay R., Alencar A., Rodríguez Alzza C., Armenteras D., Artaxo P., Athayde S., Barretto Filho H. T., Barlow J., Berenguer E., Bortolotto F., Costa F. A., Costa M. H., Cuvi N., Fearnside P. M., Ferreira J., Flores B. M., Frieri S., Gatti L. V., Guayasamin J. M., Hecht S., Hirota M., Hoorn C., Josse C., Lapola D. M., Larrea C., Larrea-Alcazar D. M., Lehm Ardaya Z., Malhi Y., Marengo J. A., Melack J., Moraes R. M., Moutinho P., Murmis M. R., Neves E. G., Paez B., Painter L., Ramos A., Rosero-Peña M. C., Schmink M., Sist P., ter Steege H., Val P., van der Voort H., Varese M., Zapata-Ríos G. (Eds). *Amazon Assessment Report 2021*. United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA. Disponible en: <https://www.theamazonwewant.org/spa-reports/>

- Bagley, J. E., Desai, A. R., Harding, K. J., Snyder, P. K., & Foley, J. A. (2014). Drought and deforestation: Has land cover change influenced recent precipitation extremes in the Amazon? *Journal of Climate*, 27(1), 345–361. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00369.1>
- Bala, G., Caldeira, K., Wickett, M., Phillips, T. J., Lobell, D. B., Delire, C., & Mirin, A. (2007). Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(16), 6550–6555. <https://doi.org/10.1073/pnas.0608998104>
- Beck, H. E., Van Dijk, A. I. J. M., Levizzani, V., Schellekens, J., Miralles, D. G., Martens, B., & De Roo, A. (2017). MSWEP: 3-hourly 0.25° global gridded precipitation (1979-2015) by merging gauge, satellite, and reanalysis data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(1), 589–615. <https://doi.org/10.5194/hess-21-589-2017>
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Bell, J. P., Tompkins, A. M., Bouka-Biona, C., & Sanda, I. S. (2015). A process-based investigation into the impact of the Congo basin deforestation on surface climate. *Journal of Geophysical Research*, 120(12), 5721–5739. <https://doi.org/10.1002/2014JD022586>
- Boisier, J. P., Ciais, P., Ducharne, A., & Guimberteau, M. (2015). Projected strengthening of Amazonian dry season by constrained climate model simulations. 1. <https://doi.org/10.1038/NCLIMATE2658>
- Braz, D. F., Ambrizzi, T., da Rocha, R. P., Algarra, I., Nieto, R., & Gimeno, L. (2021). Assessing the Moisture Transports Associated With Nocturnal Low-Level Jets in Continental South America. *Frontiers in Environmental Science*, 9(April). <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.657764>
- Brubaker, K. L., Entekhabi, D., & Eagleson, P. S. (1993). Estimation of continental precipitation recycling. In *Journal of Climate* (Vol. 6, Issue 6, pp. 1077–1089). [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006<1077:EOCPR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006<1077:EOCPR>2.0.CO;2)
- Budyko, M. I. (1974). *Climate and life*. Academic press.
- Burnett, M. W., Quetin, G. R., & Konings, A. G. (2020). Data-driven estimates of evapotranspiration and its controls in the Congo Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(8), 4189–4211. <https://doi.org/10.5194/hess-24-4189-2020>
- Coe, M. T., Latrubesse, E. M., Ferreira, M. E., & Amsler, M. L. (2011). The effects of deforestation and climate variability on the streamflow of the Araguaia River, Brazil. *Biogeochemistry*, 105(1), 119–131. <https://doi.org/10.1007/s10533-011-9582-2>
- Coe, M. T., Costa, M. H., & Soares-Filho, B. S. (2009). The influence of historical and potential future deforestation on the stream flow of the Amazon River - Land surface processes and atmospheric feedbacks. *Journal of Hydrology*, 369(1–2), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.043>
- Cook, K. H., & Vizy, E. K. (2021). Hydrodynamics of regional and seasonal variations in Congo Basin precipitation. *Climate Dynamics*, 0–50. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06066-3>

- Correa, I. C., Arias, P. A., & Rojas, M. (2021). Evaluation of multiple indices of the South American monsoon. *International Journal of Climatology*, 41(S1), E2801–E2819. <https://doi.org/10.1002/joc.6880>
- Costa, M. H., Botta, A., & Cardille, J. A. (2003). Effects of large-scale changes in land cover on the discharge of the Tocantins River, Southeastern Amazonia. *Journal of Hydrology*, 283(1–4), 206–217. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00267-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00267-1)
- Costa, M. H., & Pires, G. F. (2010). Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *International Journal of Climatology*, 30(13), 1970–1979. <https://doi.org/10.1002/joc.2048>
- Crowhurst, D. M., Dadson, S. J., & Washington, R. (2020). Evaluation of Evaporation Climatology for the Congo Basin Wet Seasons in 11 Global Climate Models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(6). <https://doi.org/10.1029/2019jd030619>
- Curtis, P. G., Slay, C. M., Harris, N. L., Tyukavina, A., & Hansen, M. C. (2018). Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 361(6407), 1108–1111. <https://doi.org/10.1126/science.aau3445>
- D’Almeida, C., Vörösmarty, C. J., Hurtt, G. C., Marengo, J. A., Dingman, S. L., & Keim, B. D. (2007). The effects of deforestation on the hydrological cycle in Amazonia: a review on scale and resolution. *International Journal of Climatology*, 27(5), 633–647. <https://doi.org/10.1002/joc.1475>
- Davidson, E. A., De Araújo, A. C., Artaxo, P., Balch, J. K., Brown, I. F., Mercedes, M. M., Coe, M. T., Defries, R. S., Keller, M., Longo, M., Munger, J. W., Schroeder, W., Soares-Filho, B. S., Souza, C. M., & Wofsy, S. C. (2012). The Amazon basin in transition. *Nature*, 481(7381), 321–328. <https://doi.org/10.1038/nature10717>
- De Benedetti, M., Moore, G. W. K., & Xu, X. (2022). Representation of spatial variability of the water fluxes over the Congo basin region. *Sensors*, 22(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/s22010084>
- De Noblet-Ducoudré, N., Boisier, J. P., Pitman, A., Bonan, G. B., Brovkin, V., Cruz, F., Delire, C., Gayler, V., Van Den Hurk, B. J. J. M., Lawrence, P. J., Van Der Molen, M. K., Müller, C., Reick, C. H., Strengers, B. J., & Voldoire, A. (2012). Determining robust impacts of land-use-induced land cover changes on surface climate over North America and Eurasia: Results from the first set of LUCID experiments. *Journal of Climate*, 25(9), 3261–3281. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00338.1>
- de Oliveira, J. V., Ferreira, D. B. da S., Sahoo, P. K., Sodr e, G. R. C., de Souza, E. B., & Queiroz, J. C. B. (2018). Differences in precipitation and evapotranspiration between forested and deforested areas in the Amazon rainforest using remote sensing data. *Environmental Earth Sciences*, 77(6). <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7411-9>
- de Wasseige, C., Tadoum, M., Eba’a Atyi, R., & Doumenge, C. (2015). The Forests of the Congo Basin - Forests and climate change. <http://www.observatoire-comifac.net/>
- Debortoli, N., Dubreuil, V., Funatsu, B., Delahaye, F., de Oliveira, C. H., Rodrigues-Filho, S., Saito, C. H., & Fetter, R. (2015). Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). *Climatic Change*, 132(2), 251–264. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1415-1>

- Domínguez, F., Eiras-Barca, J., Yang, Z., Bock, D., Nieto, R., & Gimeno, L. (2022). Amazonian Moisture Recycling Revisited Using WRF With Water Vapor Tracers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(4). <https://doi.org/10.1029/2021jd035259>
- Domínguez, F., Hu, H., & Martínez, J. A. (2020). Two-layer dynamic recycling model (2L-DRM): Learning from moisture tracking models of different complexity. *Journal of Hydrometeorology*, 21(1), 3–16. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-19-0101.1>
- Domínguez, F., Kumar, P., Liang, X.-Z., & Ting, M. (2006). Impact of Atmospheric Moisture Storage on Precipitation Recycling. *Journal of Climate*, 19(8), 1513–1530. <https://doi.org/10.1175/JCLI3691.1>
- Drumond, A., Marengo, J., Ambrizzi, T., Nieto, R., Moreira, L., & Gimeno, L. (2014). The role of Amazon Basin moisture on the atmospheric branch of the hydrological cycle: a Lagrangian analysis. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(1), 1023–1046. <https://doi.org/10.5194/hessd-11-1023-2014>
- Durán-Quesada, A. M., Reboita, M., Ramos, A. M., Da Rocha, R., Nieto, R., & Gimeno, L. (2010). Moisture Variations during the life cycle of cyclones in the east coast of South America. EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Dyer, E. L. E., Jones, D. B. A., Nusbaumer, J., Li, H., Collins, O., Vettoretti, G., & Noone, D. (2017). Congo Basin precipitation: Assessing seasonality, regional interactions, and sources of moisture. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(13), 6882–6898. <https://doi.org/10.1002/2016JD026240>
- Eltahir, E. A. B., & Bras, R. L. (1994a). Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120(518), 861–880. <https://doi.org/10.1002/qj.49712051806>
- Eltahir, E. A. B., & Bras, R. L. (1994b). Sensitivity of regional climate to deforestation in the Amazon basin. *Advances in Water Resources*, 17(1–2), 101–115. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(94\)90027-2](https://doi.org/10.1016/0309-1708(94)90027-2)
- Endris, H. S., Lennard, C., Hewitson, B., Dosio, A., Nikulin, G., & Artan, G. A. (2019). Future changes in rainfall associated with ENSO, IOD and changes in the mean state over Eastern Africa. *Climate Dynamics*, 52(3–4), 2029–2053. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4239-7>
- Espinoza, J. C., Ronchail, J., Marengo, J. A., & Segura, H. (2019a). Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Climate Dynamics*, 52(9–10), 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
- Espinoza, J. C., Sörensson, A. A., Ronchail, J., Molina-Carpio, J., Segura, H., Gutierrez-Cori, O., Ruscica, R., Condom, T., & Wongchuig-Correa, S. (2019b). Regional hydro-climatic changes in the Southern Amazon Basin (Upper Madeira Basin) during the 1982–2017 period. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 26(June), 100637. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2019.100637>
- Ewane, B. E. (2022). How much deforestation in the Congo Basin can cause the hydrological cycle to degrade to a tipping point? *Academia Letters*, April. <https://doi.org/10.20935/al5040>



- Farnsworth, A., White, E., Williams, C.J., Black, E., Kniveton, D.R. (2011). Understanding the Large Scale Driving Mechanisms of Rainfall Variability over Central Africa. En: Williams, C., Kniveton, D. (eds) African Climate and Climate Change. Advances in Global Change Research, vol 43. Springer, Dordrecht. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-3842-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-90-481-3842-5_5)
- Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P. A., Dickinson, R. E., Huang, L., Chakraborty, S., Fernandes, K., Liebmann, B., Fisher, R., & Myneni, R. B. (2013). Increased dry-season length over southern Amazonia in recent decades and its implication for future climate projection. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110(45), 18110–18115. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302584110>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations - A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2, 1–21. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gentine, P., Massmann, A., Lintner, B. R., Hamed Alemohammad, S., Fu, R., Green, J. K., Kennedy, D., & Vilà-Guerau De Arellano, J. (2019). Land-atmosphere interactions in the tropics - A review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4171–4197. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4171-2019>
- Gimeno, L., Stohl, A., Trigo, R. M., Domínguez, F., Yoshimura, K., Yu, L., Drumond, A., Durn-Quesada, A. M., & Nieto, R. (2012). Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation. *Reviews of Geophysics*, 50(4), 1–41. <https://doi.org/10.1029/2012RG000389>
- Gleixner, S., Demissie, T., & Diro, G. T. (2020). Did ERA5 improve temperature and precipitation reanalysis over East Africa? *Atmosphere*, 11(9), 1–19. <https://doi.org/10.3390/atmos11090996>
- Global Forest Watch. (s.f.-a). “Tree cover loss in Amazon Basin”.
- Global Forest Watch. (s.f.-b) “Tree cover loss in Congo Basin”.
- Goessling, H. F., & Reick, C. H. (2013). On the “well-mixed” assumption and numerical 2-D tracing of atmospheric moisture. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(11), 5567–5585. <https://doi.org/10.5194/acp-13-5567-2013>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, 7(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

- Herrera-Estrada, J. E., Martínez, J. A., Domínguez, F., Findell, K. L., Wood, E. F., & Sheffield, J. (2019). Reduced Moisture Transport Linked to Drought Propagation Across North America. *Geophysical Research Letters*, 46(10), 5243–5253. <https://doi.org/10.1029/2019GL082475>
- Hoyos, I., Domínguez, F., Cañón-Barriga, J., Martínez, J. A., Nieto, R., Gimeno, L., & Dirmeyer, P. A. (2018). Moisture origin and transport processes in Colombia, northern South America. *Climate Dynamics*, 50(3–4), 971–990. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3653-6>
- Huffman, G. J., Adler, R. F., Bolvin, D. T., & Nelkin, E. J. (2010). The TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis (TMPA). In *Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology* (pp. 3–22). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7_1)
- IPCC. (2019). Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].
- IPCC. (2022). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press.
- Jiang, Y., Zhou, L., Tucker, C. J., Raghavendra, A., Hua, W., Liu, Y. Y., & Joiner, J. (2019). Widespread increase of boreal summer dry season length over the Congo rainforest. *Nature Climate Change*, 9(8), 617–622. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0512-y>
- Jiang, Y., Zhou, L., Roundy, P. E., Hua, W., & Raghavendra, A. (2021). Increasing Influence of Indian Ocean Dipole on Precipitation Over Central Equatorial Africa. *Geophysical Research Letters*, 48(8), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2020GL092370>
- Kendall, M. (1975). *Rank Correlation Methods*.
- Keppel-Aleks, G., Wolf, A. S., Mu, M., Doney, S. C., Morton, D. C., Kasibhatla, P. S., Miller, J. B., Dlugokencky, E. J., & Randerson, J. T. (2014). Separating the influence of temperature, drought, and fire on interannual variability in atmospheric CO<sub>2</sub>. *Global Biogeochemical Cycles*, 28(11), 1295–1310. <https://doi.org/10.1002/2014GB004890>
- Keys, P. W., Barnes, E. A., Van Der Ent, R. J., & Gordon, L. J. (2014). Variability of moisture recycling using a precipitationshed framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 3937–3950. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3937-2014>
- Knippertz, P., Wernli, H., & Gläser, G. (2013). A global climatology of tropical moisture exports. *Journal of Climate*, 26(10), 3031–3045. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00401.1>

- Köppen, W. (1884). Die Wärmezonen der Erde, nach der Dauer der heissen, gemässigten und kalten Zeit und nach der Wirkung der Wärme auf die organische Welt betrachtet (The thermal zones of the earth according to the duration of hot, moderate and cold periods and to the impact of heat on the organic world). *Meteorologische Zeitschrift*, 1, 215–226. (traducido y editado por Volken E. y S. Brönnimann. *Meteorologische Zeitschrift*, 20 (2011), 351–360), <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2011/105>
- Lashkari, H., & Jafari, M. (2021). Annual displacement and appropriate index to determine ITCZ position in East Africa and the Indian Ocean regions. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133(4), 1111–1126. <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00797-y>
- Lehner, B., & Grill, G. (2013). Global river hydrography and network routing: Baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, 27(15), 2171–2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
- Lima, L. S., Coe, M. T., Soares Filho, B. S., Cuadra, S. V., Dias, L. C. P., Costa, M. H., Lima, L. S., & Rodrigues, H. O. (2014). Feedbacks between deforestation, climate, and hydrology in the Southwestern Amazon: Implications for the provision of ecosystem services. *Landscape Ecology*, 29(2), 261–274. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9962-1>
- Malhi, Y., Gardner, T. A., Goldsmith, G. R., Silman, M. R., & Zelazowski, P. (2014). Tropical forests in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, 39, 125–159. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-030713-155141>
- Marchant, R., Mumbi, C., Behera, S., & Yamagata, T. (2007). The Indian Ocean dipole - The unsung driver of climatic variability in East Africa. *African Journal of Ecology*, 45(1), 4–16. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2028.2006.00707.x>
- Marengo, J. A. (2004). Interdecadal variability and trends of rainfall across the Amazon basin. *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1–3), 79–96. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0045-8>
- Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L. M., Soares, W. R., & Rodriguez, D. A. (2011). The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, 38(12), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>
- Marengo J. A., Espinoza J. C., Fu R., Muñoz J. C. J., Alves L. M., Rocha H. R., Schöngart J. (2021). Capítulo 22: Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydro meteorology in the Amazon region. En: Nobre C., Encalada A., Anderson E., Roca Alcazar F.H., Bustamante M., Mena C., Peña-Claros M., Poveda G., Rodriguez J. P., Saleska S., Trumbore S., Val A. L., Villa Nova L., Abramovay R., Alencar A., Rodríguez Alza C., Armenteras D., Artaxo P., Athayde S., Barretto Filho H. T., Barlow J., Berenguer E., Bortolotto F., Costa F. A., Costa M. H., Cuvi N., Fearnside P. M., Ferreira J., Flores B. M., Frieri S., Gatti L. V., Guayasamin J. M., Hecht S., Hirota M., Hoorn C., Josse C., Lapola D. M., Larrea C., Larrea-Alcazar D. M., Lehm Ardaya Z., Malhi Y., Marengo J. A., Melack J., Moraes R. M., Moutinho P., Murmis M. R., Neves E. G., Paez B., Painter L., Ramos A., Rosero-Peña M. C., Schmink M., Sist P., ter Steege H., Val P., van der Voort H., Varese M., Zapata-Ríos G. (Eds). Amazon Assessment Report 2021. United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA. Disponible en: <https://www.theamazonwewant.org/spa-reports/>
- Martínez, J. A., & Domínguez, F. (2014). Sources of Atmospheric Moisture for the La Plata River Basin. *Journal of Climate*, 27(17), 6737–6753. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00022.1>

- Masih, I., Maskey, S., Mussá, F. E. F., & Trambauer, P. (2014). A review of droughts on the African continent: A geospatial and long-term perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), 3635–3649. <https://doi.org/10.5194/hess-18-3635-2014>
- Megevand, C., Mosnier, A., Hourticq, J., Sanders, K., Doetinchem, N., & Streck, C. (2013). Deforestation Trends in the Congo Basin. *Reconciling Economic Growth and Forest Protection*. <https://doi.org/10.1596/978-0-8213-9742-8>
- 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(5), 2589–2599. <https://doi.org/10.1029/2018JD029534>
- Morales, J. S., Arias, P. A., Martínez, J. A., & Durán-Quesada, A. M. (2021). The role of low-level circulation on water vapor transport to Central and northern South America: insights from a 2D lagrangian approach. *International Journal of Climatology*, 41, E2662-E2682. <https://doi.org/10.1002/joc.6873>
- Moore, N., Arima, E., Walker, R., & Ramos da Silva, R. (2007). Uncertainty and the changing hydroclimatology of the Amazon. *Geophysical Research Letters*, 34(14), 1–5. <https://doi.org/10.1029/2007GL030157>
- Negrón Juárez, R. I., Li, W., Fernandes, K., & de Oliveira Cardoso, A. (2009). Comparison of precipitation data sets over the tropical South American and African continents. *Journal of Hydrometeorology*, 10(1), 289–299. <https://doi.org/10.1175/2008JHM1023.1>
- Nicholson, S. E. (2018). The ITCZ and the seasonal cycle over equatorial Africa. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(2), 337–348. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0287.1>
- Nicholson, S. E., Klotter, D., Dezfuli, A. K., & Zhou, L. (2018). New rainfall datasets for the Congo basin and surrounding regions. *Journal of Hydrometeorology*, 19(8), 1379–1396. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0015.1>
- Nieto, R., Gallego, D., Trigo, R., Ribera, P., & Gimeno, L. (2008). Dynamic identification of moisture sources in the Orinoco basin in equatorial South America. *Hydrological Sciences Journal*, 53(3), 602–617. <https://doi.org/10.1623/hysj.53.3.602>
- Nobre, C. A., Sellers, P. J., & Shukla, J. (1991). Amazonian Deforestation and Regional Climate Change. *Journal of Climate*, 4(10), 957–988. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2)
- Nogherotto, R., Coppola, E., Giorgi, F., & Mariotti, L. (2013). Impact of Congo Basin deforestation on the African monsoon. *Atmospheric Science Letters*, 14(1), 45–51. <https://doi.org/10.1002/asl2.416>
- Obasi, G. O. P. (2005). The impacts of ENSO in Africa. In *Climate Change and Africa*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535864.030>

- Pathak, A., Ghosh, S., & Kumar, P. (2014). Precipitation recycling in the Indian subcontinent during summer monsoon. *Journal of Hydrometeorology*, 15(5), 2050–2066. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0172.1>
- Pokam, W. M., Djotang, L. A. T., & Mkankam, F. K. (2012). Atmospheric water vapor transport and recycling in Equatorial Central Africa through NCEP/NCAR reanalysis data. *Climate Dynamics*, 38(9–10), 1715–1729. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1242-7>
- Posada-Marín, J. A., & Salazar, J. F. (2022). River flow response to deforestation: Contrasting results from different models. *Water Security*, October 2021, 100115. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2022.100115>
- Potapov, P., Hansen, M. C., Laestadius, L., Turubanova, S., Yaroshenko, A., Thies, C., Smith, W., Zhuravleva, I., Komarova, A., Minnemeyer, S., & Esipova, E. (2017). The last frontiers of wilderness: Tracking loss of intact forest landscapes from 2000 to 2013. *Science Advances*, 3(1), 1–14. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1600821>
- Rendón-Hurtado M. L. (2021). Transporte de humedad atmosférica hacia el norte de Suramérica y la cuenca del Amazonas bajo escenarios de cambio climático [Tesis de Maestría, Universidad de Antioquia]. Repositorio Institucional Universidad de Antioquia. <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/21544>
- Ropelewski, C. F., & Halpert, M. S. (1987). Global and Regional Scale Precipitation Patterns Associated with the El Niño/Southern Oscillation. In *Monthly Weather Review* (Vol. 115, Issue 8, pp. 1606–1626). [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<1606:garspp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<1606:garspp>2.0.co;2)
- Ruiz-Vásquez, M., Arias, P. A., Martínez, J. A., & Espinoza, J. C. (2020). Effects of Amazon basin deforestation on regional atmospheric circulation and water vapor transport towards tropical South America. *Climate Dynamics*, 54(9–10), 4169–4189. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05223-4>
- Saeed, F., Haensler, A., Weber, T., Hagemann, S., & Jacob, D. (2013). Representation of extreme precipitation events leading to opposite climate change signals over the Congo basin. *Atmosphere*, 4(3), 254–271. <https://doi.org/10.3390/atmos4030254>
- Sakamoto, M. S., Ambrizzi, T., & Poveda, G. (2011). Moisture Sources and Life Cycle of Convective Systems over Western Colombia. *Advances in Meteorology*, 2011, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2011/890759>
- 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(1–2), 195–209. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0637-7>
- Savenije, H. H. G. (1995). New definitions for moisture recycling and the relationship with land-use changes in the Sahel. *Journal of Hydrology*, 167(1–4), 57–78. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02632-L](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02632-L)
- Schneider, Udo; Becker, Andreas; Finger, Peter; Meyer-Christoffer, Anja; Rudolf, Bruno; Ziese, Markus (2011): GPCP Full Data Reanalysis Version 6.0 at 2.5°: Monthly Land-Surface Precipitation from Rain-Gauges built on GTS-based and Historic Data. DOI: 10.5676/DWD\_GPCP/FD\_M\_V7\_250

- Sierra, J. P., Junquas, C., Espinoza, J. C., Segura, H., Condom, T., Andrade, M., Molina-Carpio, J., Ticona, L., Mardoñez, V., Blacutt, L., Polcher, J., Rabatel, A., & Sicart, J. E. (2021). Deforestation impacts on Amazon-Andes hydroclimatic connectivity. *Climate Dynamics*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-06025-y>
- Sorí, R., Stojanovic, M., Nieto, R., Liberato, M. L., & Gimeno, L. (2022). Spatiotemporal variability of droughts in the Congo River Basin: The role of atmospheric moisture transport. *Congo Basin Hydrology, Climate, and Biogeochemistry: A Foundation for the Future*, 187-203. <https://doi.org/10.1002/9781119657002.ch11>
- Sorí, R., Marengo, J. A., 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 (Switzerland)*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/w10060738>
- Sorí, R., Nieto, R., Liberato, M. L. R., & Gimeno, L. (2021). Oceanic versus terrestrial origin of El Niño Southern Oscillation-associated continental precipitation anomalies. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1, 1–13. <https://doi.org/10.1111/nyas.14665>
- Sorí, R., Nieto, R., Vicente-Serrano, S. M., Drumond, A., & Gimeno, L. (2017). A Lagrangian perspective of the hydrological cycle in the Congo River basin. *Earth System Dynamics*, 8(3), 653–675. <https://doi.org/10.5194/esd-8-653-2017>
- Spracklen, D. V., & Garcia-Carreras, L. (2015). The impact of Amazonian deforestation on Amazon basin rainfall. *Geophysical Research Letters*, 42(21), 9546–9552. <https://doi.org/10.1002/2015GL066063>
- 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>
- Stohl, A., & James, P. (2005). A Lagrangian analysis of the atmospheric branch of the global water cycle. Part II: Moisture transports between earth's ocean basins and river catchments. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6), 961–984. <https://doi.org/10.1175/JHM470.1>
- Trenberth, K. E. (1998). Atmospheric moisture residence times and cycling: Implications for rainfall rates and climate change. *Climatic Change*, 39(4), 667–694. <https://doi.org/10.1023/A:1005319109110>
- Trenberth, K. E. (1999). Atmospheric moisture recycling: Role of advection and local evaporation. *Journal of Climate*, 12(5 II), 1368–1381. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1368:amrroa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1368:amrroa>2.0.co;2)
- Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (2011), TRMM (TMPA/3B43) Rainfall Estimate L3 1 month 0.25 degree x 0.25 degree V7, Greenbelt, MD, Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 10.5067/TRMM/TMPA/MONTH/7
- Tukey, J. W. (1949). Comparing Individual Means in the Analysis of Variance. *Biometrics*, 5(2), 99–114. <https://doi.org/10.2307/3001913>

- Van Der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., Schaeffli, B., & Steele-Dunne, S. C. (2010). Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 46(9), 1–12. <https://doi.org/10.1029/2010WR009127>
- Van Der Werf, G. R., Morton, D. C., Defries, R. S., Olivier, J. G. J., Kasibhatla, P. S., Jackson, R. B., Collatz, G. J., & Randerson, J. T. (2009). CO<sub>2</sub> emissions from forest loss. *Nature Geoscience*, 2(11), 737–738. <https://doi.org/10.1038/ngeo671>
- Vinayachandran, P. N., Francis, P. A., & Rao, S. A. (2009). Indian Ocean Dipole: Processes and impacts. *Current Trends in Science*, 569–589. <http://moeseprints.incois.gov.in/97/>
- Viste, E., & Sorteberg, A. (2013). Moisture transport into the Ethiopian highlands. *International Journal of Climatology*, 33(1), 249–263. <https://doi.org/10.1002/joc.3409>
- von Randow, C., Manzi, A. O., Kruijt, B., de Oliveira, P. J., Zanchi, F. B., Silva, R. L., Hodnett, M. G., Gash, J. H. C., Elbers, J. A., Waterloo, M. J., Cardoso, F. L., & Kabat, P. (2004). Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, 78(1–3), 5–26. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0041-z>
- Wang-Erlandsson, L., Fetzer, I., Keys, P. W., Van Der Ent, R. J., Savenije, H. H. G., & Gordon, L. J. (2018). Remote land use impacts on river flows through atmospheric teleconnections. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(8), 4311–4328. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4311-2018>
- Wang, X. Y., Li, X., Zhu, J., & Tanajura, C. A. S. (2018). The strengthening of Amazonian precipitation during the wet season driven by tropical sea surface temperature forcing. *Environmental Research Letters*, 13(9). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aadbb9>
- Washington, R., James, R., Pearce, H., Pokam, W. M., & Moufouma-Okia, W. (2013). Congo basin rainfall climatology: Can we believe the climate models? *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 368(1625). <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0296>
- Weng, W., Costa, L., Lüdeke, M. K. B., & Zemp, D. C. (2019). Aerial river management by smart cross-border reforestation. *Land Use Policy*, 84(October 2018), 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.03.010>
- Weng, W., Luedeke, M., Zemp, D., Lakes, T., & Kropp, J. (2018). Aerial and surface rivers: Downwind impacts on water availability from land use changes in Amazonia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 911–927. <https://doi.org/10.5194/hess-22-911-2018>
- Wolosin, M., & Harris, N. (2018). Tropical forests and climate change: the latest science. *Ending Tropical Deforestation*, June, 1–14. <https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/ending-tropical-deforestation-tropical-forests-climate-change.pdf>
- Yang, Z., & Domínguez, F. (2019). Investigating land surface effects on the moisture transport over South America with a moisture tagging model. *Journal of Climate*, 32(19), 6627–6644. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0700.1>

Zhang, G., & Wang, Z. (2013). Interannual variability of the Atlantic Hadley circulation in boreal summer and its impacts on tropical cyclone activity. *Journal of Climate*, 26(21), 8529–8544. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00802.1>

Zhou, L., Tian, Y., Myneni, R. B., Ciais, P., Saatchi, S., Liu, Y. Y., Piao, S., Chen, H., Vermote, E. F., Song, C., & Hwang, T. (2014). Widespread decline of Congo rainforest greenness in the past decade. *Nature*, 508(7498), 86–90. <https://doi.org/10.1038/nature13265>