

Gradu amaierako lana / Trabajo fin de grado
Fisikako gradua / Grado en Física

Estimaciones del reciclaje de humedad sobre continentes A partir del reanálisis ERA5

Egilea/ Autor/a:
Jon Recalde Feo
Zuzendariak/Directores/as:
Jon Saenz Aguirre

© 2022, Jon Recalde Feo

Leioa, 2022eko ekainaren 22a / Leioa, 22 de junio de 2022

Índice

1. Introducción y objetivos	3
2. Desarrollo	4
2.1. Principios básicos	4
2.1.1. El ciclo del agua	4
2.1.2. Definiciones	5
2.1.3. Ecuaciones: balance atmosférico del vapor de agua	6
2.1.4. Modelos de obtención	8
2.2. Eltahir and Brass 1994	9
2.2.1. Procedimiento de la estimación de ρ	11
2.2.2. Dependencia de la escala	12
2.2.3. Limitaciones del modelo Eltahir & Bras	12
2.3. Datos y regiones estudiadas	13
2.3.1. Datos del reanálisis ERA5	13
2.3.2. Regiones estudiadas	14
2.4. Reciclaje de precipitación regional	15
2.5. Reciclaje de precipitación continental	21
2.5.1. Variación del reciclaje de humedad por temporadas	24
3. Conclusiones	31
A. Apéndices	33
A.1. Obtención de datos de la Climate Data Store	33
A.2. Aplicación computacional del modelo Eltahir & Bras	33

1. Introducción y objetivos

El ciclo del agua regula y refleja la variabilidad natural del clima a escala regional y global. Las actividades humanas a gran escala que implican cambios en la cubierta terrestre, como la deforestación del Amazonas, la desecación de pantanos cerca del Nilo o el desvío de ríos en Rusia, suponen cambios importantes en la hidrología de la superficie terrestre. Sin embargo, no es obvio como se reflejarán en términos de las variables climáticas. Para comprender y tratar de predecir el alcance de estos posibles cambios regionales y globales, debe entenderse primero cómo funciona el reciclaje de precipitaciones [8].

El reciclaje de precipitaciones o de humedad es un proceso mediante el cual una parte del agua evapotranspirada de una superficie contribuye a la precipitación del mismo área. La contribución relativa de la precipitación reciclada a la precipitación total, definida como *índice de reciclaje de precipitaciones*, ρ , proporciona una de las posibles medidas de diagnóstico que describen las interacciones tierra-atmósfera. ρ es un indicador de la sensibilidad climática a los cambios en la hidrología superficial o en el uso de la tierra. La única variable del reciclaje en la que el ser humano tiene una influencia directa es a través de la evaporación continental. En general, la evapotranspiración se ve favorecida por la reducción de la escorrentía (por ejemplo, mediante la construcción de presas y embalses) o por la reconducción de la escorrentía a la misma tierra (por ejemplo, mediante el riego en suelo seco). Al contrario, la evaporación se reduce potenciando el drenaje (por ejemplo, mediante la tala de bosques y el sobre pastoreo). El cambio de esta variable, repercute directamente en la retroalimentación entre la evaporación y la precipitación de una región.

El objetivo del presente documento es poner de manifiesto la interacción tierra-atmósfera mediante el reciclaje de humedad en distintas regiones del mundo en escalas tanto regionales como continentales. Se pretende identificar las regiones en las que las precipitaciones dependen en gran medida del reciclaje de la humedad y mostrar las principales regiones proveedoras de precipitaciones continentales. Este trabajo de grado (TFG) se basa en el trabajo realizado por Eltahir & Bras (1994)[7] y (1996)[8], que desarrollaron los conceptos necesarios para comprender el reciclaje de precipitaciones y un modelo de obtención de ρ .

Este TFG se estructura en tres secciones. La sección 1, presenta una introducción y los objetivos del proyecto. La sección 2, se subdivide en la sección 2.1 en la que se exponen los principios básicos para entender el reciclaje de precipitaciones y se describen las herramientas matemáticas que son utilizadas posteriormente en este trabajo. La sección 2.2 presenta el modelo de Eltahir & Bras[7] por ser el utilizado en este trabajo para la obtención de la distribución de ρ en cualquier región. La sección 2.3 expone los datos de entrada utilizados y las regiones que serán estudiadas. La sección 2.4 presenta los resultados de los análisis regionales realizados en la cuenca del Amazonas y del Misisipi. Junto a regiones de tamaño de $4^\circ \times 4^\circ$ distribuidas a lo largo de la superficie continental. En la sección 2.5 se muestran resultados del análisis en un mapa global, mostrando las fuentes y sumideros de la precipitación continental. Se diferencia el ciclo de humedad en verano y en invierno para cada uno de los continentes. En la sección 3 se concluyen los aspectos importantes obtenidos de los resultados del trabajo. Analizando dónde y de qué

manera el reciclaje de la humedad juega un papel importante en el mantenimiento de las precipitaciones. Por último, se ofrece una perspectiva sobre las investigaciones futuras.

2. Desarrollo

2.1. Principios básicos

2.1.1. El ciclo del agua

Entender el funcionamiento del ciclo del agua, es decir, percibir qué sucede a las moléculas de vapor de agua tras evaporarse de la superficie y conocer dónde precipitarán, es primordial para el estudio del reciclaje de precipitaciones.

En el extremo de las grandes escalas, la imagen global del ciclo del agua es simple (Figura 1a): las moléculas se evaporan de la superficie de la Tierra, permanecen en la atmósfera durante alrededor de 10 días y finalmente vuelven a precipitar a la superficie. Es decir, la tasa de reciclaje de precipitación (ρ) se iguala a la unidad. En el extremo de las pequeñas escalas, el ciclo del agua para cualquier punto específico de la Tierra también es simple (Figura 1b): las moléculas precipitan de la atmósfera en un punto, algunas fluyen sobre o por debajo de la superficie como escorrentía y otras se evaporan de regreso a la atmósfera. Debido a la advección horizontal del viento, la probabilidad de que una molécula de agua se evapore en un punto y luego precipite en el mismo punto es cercana a cero. Debido a eso, ρ puede considerarse igual a cero.

Entre estas dos consideraciones extremas, el ciclo regional del agua para cualquier escala intermedia entre la global y la de un solo punto se esquematiza en la Figura 1c. En primer lugar, la probabilidad de que una molécula de agua se evapore dentro de una región y luego precipite dentro de la misma es distinta de cero, de hecho, aumenta con la escala de la región considerada. En segundo lugar, los mecanismos de transporte atmosférico transportan moléculas de vapor de agua hacia adentro (*inflow*) y hacia afuera (*outflow*) a través de los límites de la región. Ocurre lo mismo en la superficie terrestre por la escorrentía, es decir, los flujos de agua en los ríos y los depósitos de agua subterráneos conducen el agua fuera de la región.

El concepto de reciclaje de la precipitación tiene en cuenta el origen de las moléculas de vapor de agua que forman la precipitación. Para describir la partición basada en el origen de la precipitación, necesitamos clasificar las moléculas de vapor de agua atmosférico en los siguientes dos tipos: (a) moléculas que se encuentran en la atmósfera debido a un evento de evaporación desde la región considerada (Fig. 2a), y (b) moléculas que se encuentran en la atmósfera como resultado del transporte atmosférico a través del límite de la región (Fig. 2b). La primera clase forma un ciclo de agua interno y se define como precipitación reciclada. La segunda clase forma un ciclo hídrico externo y se define como precipitación externa.[8]

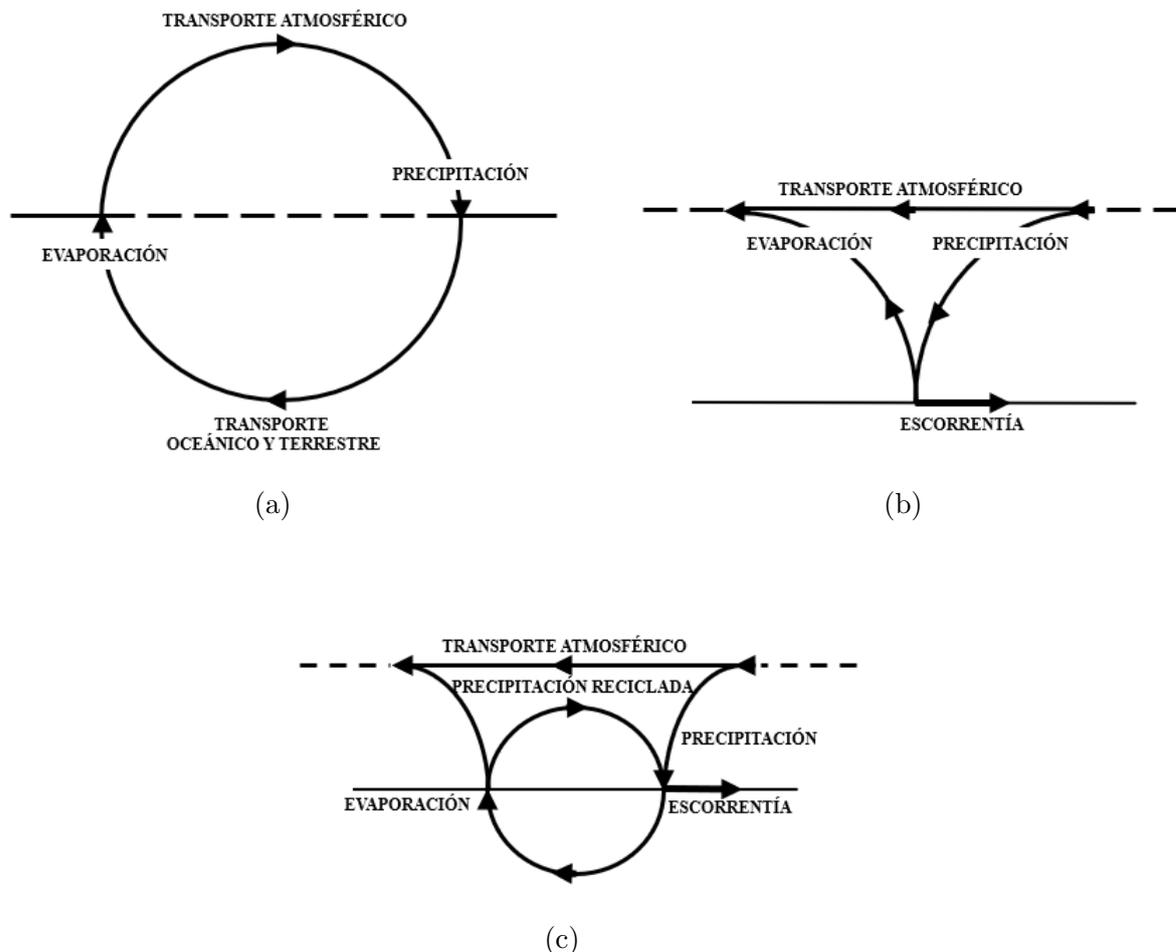


Figura 1: Ciclo hidrológico (a) global, (b) local y (c) regional [8]

2.1.2. Definiciones

El reciclaje de la precipitación se define como la contribución del agua evaporada localmente al agua precipitada en la misma región [2]; está representado por el índice de reciclaje de humedad, ρ . Puede ser local (ρ), regional (ρ_R) o continental (ρ_c). La precipitación sobre una región terrestre se compone de: el componente interno resultante del flujo de vapor de agua procedente de la evaporación local, P_i , y el componente advectado resultante del flujo de vapor de agua externo, P_e .

$$P = P_i + P_e \quad (1)$$

Se dice que el índice de reciclaje local, ρ , es específico para un punto (x, y) en una región, pero en realidad es el índice de reciclaje de una celda de una resolución dada que contiene ese punto específico (x, y) . El valor de ρ varía con la posición (x, y) , el tiempo (t) y la resolución del área estudiada. Se define como:

$$\rho(t, x, y) = \frac{P_i(t, x, y)}{P(t, x, y)} \quad (2)$$

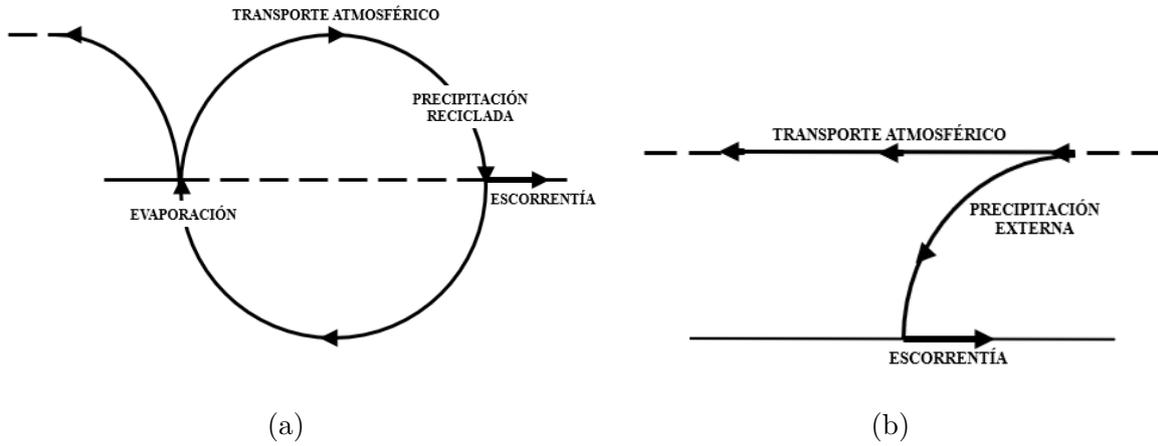


Figura 2: Ciclo hidrológico regional: (a) componente interno y (b) componente externo [8]

El índice de reciclaje de precipitaciones regional, ρ_R , se define para una región específica, y representa el valor de toda la región estudiada. Este coeficiente se consigue haciendo una distribución del índice local en toda el área, por lo que depende del tiempo t , del área de la región, A , y de su forma. Se puede definir como:

$$\rho_R(k) = \frac{\int P_i(t, x, y) dA}{\int P(t, x, y) dA} = \frac{\sum_{j=1}^n \rho_j P_j A_j}{\sum_{j=1}^n P_j A_j} \quad (3)$$

La tasa de reciclaje continental, ρ_c , distingue entre la precipitación de vapor de agua de origen continental P_c , que se entiende como vapor de agua evaporado localmente, y la precipitación de vapor de agua de origen oceánico P_o , que sería el vapor de agua advechado desde fuera del continente. [15]

$$P = P_c + P_o \quad (4)$$

$$\rho_c(t, x, y) = \frac{P_c(t, x, y)}{P(t, x, y)} \quad (5)$$

2.1.3. Ecuaciones: balance atmosférico del vapor de agua

El punto de partida para estudiar el reciclaje de precipitaciones es el balance atmosférico del vapor de agua en una región, también conocido como ecuación de balance de masa (6). Las variables involucradas en la ecuación se muestran esquematizadas en la figura 3.

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uN)}{\partial x} + \frac{\partial(vN)}{\partial y} = E - P \quad \text{o} \quad \frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{Q} = E - P \quad (6)$$

donde,

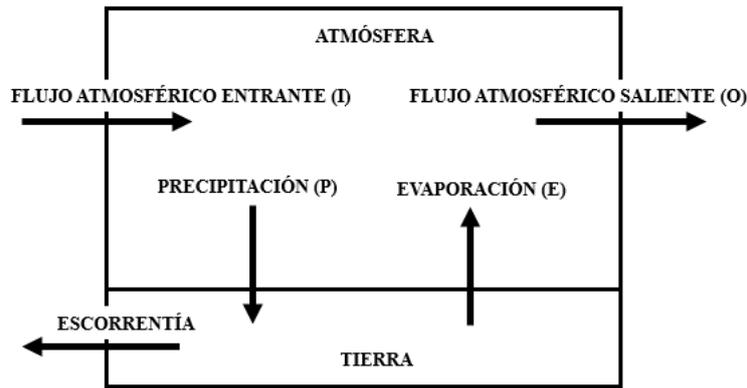


Figura 3: Ciclo hidrológico en un sistema cerrado. [7]

N =agua precipitable [L^3]

u = velocidad del vapor de agua verticalmente integrado en la dirección x [LT^{-1}]

v = velocidad del vapor de agua verticalmente integrado en la dirección y [LT^{-1}]

P = Precipitación [L^3T^{-1}]

E = Evaporación [L^3T^{-1}]

$\vec{Q} = Q_x \vec{i} + Q_y \vec{j}$ vector de flujo de vapor de agua verticalmente integrado [L^4T^{-1}]

Las velocidades u y v , también llamadas velocidades efectivas, se definen de la siguiente manera:

$$u = \frac{Q_x}{N}; v = \frac{Q_y}{N} \quad (7)$$

El primer término a la izquierda de la ecuación (6) representa el cambio del agua precipitable o del almacenamiento atmosférico en el tiempo de un sistema cerrado; el segundo y tercer términos representan respectivamente el cambio del flujo de humedad integrado verticalmente en las direcciones x e y o, dicho de otra forma, la divergencia del flujo de humedad.

La divergencia del flujo de vapor de agua de una zona puede calcularse mediante el teorema de Gauss:

$$\nabla \cdot \vec{Q} = \frac{\partial uN}{\partial x} + \frac{\partial vN}{\partial y} = \frac{1}{A} \oint_S \vec{Q} \cdot \vec{n} ds = O - I \quad (8)$$

donde,

A =Área de la región [L^2]

\vec{n} =vector unitario perpendicular al borde del área

ds =diferencial de la longitud del borde [L]

O =flujo saliente ('Outflux') [L^3T^{-1}]

I =flujo entrante ('Influx') [L^3T^{-1}]

Físicamente, la divergencia de un flujo vectorial se interpreta como la cantidad de flujo que entra o sale de un volumen cerrado, una divergencia positiva significa que sale más flujo del volumen, por lo que actúa como una fuente. Mientras que una divergencia negativa, significa que el volumen está actuando como un sumidero del flujo. Es importante señalar que la entrada I y la salida O son escalares, mientras que \vec{Q} es un vector. [15]

$$I = -\frac{1}{A} \oint_{\lambda_{in}} \vec{Q} \cdot \vec{n}_{\lambda} ds \quad (9)$$

$$O = -\frac{1}{A} \oint_{\lambda_{out}} \vec{Q} \cdot \vec{n}_{\lambda} ds \quad (10)$$

donde:

n_{λ} = vector unitario perpendicular a la dirección del flujo

λ = dirección para la integración. Puede ser hacia dentro o hacia fuera

2.1.4. Modelos de obtención

Como se plantea en [15], el índice de reciclaje de humedad se puede estudiar con a) modelos analíticos de caja, b) modelos numéricos y c) modelos isotópicos. Cada uno tiene sus ventajas y sus inconvenientes. Los modelos de caja analítica son simples y requieren de pocos datos, representan soluciones basadas en fórmulas matemáticas, desarrolladas generalmente de forma manual, en las que se definen variables de entrada para el cálculo de una o más variables de salida. Sin embargo, generalmente hacen uso de suposiciones y no incorporan procesos de límites. Los modelos numéricos permiten una representación más realista en un marco de referencia lagrangiano o euleriano, pero también dependen en gran medida del modelo conceptual utilizado en su formulación. Los modelos isotópicos se utilizan principalmente para validar los resultados de los modelos mencionados anteriormente, sin embargo, los modelos isotópicos pueden ser sensibles a la señal isotópica y al tiempo de cálculo.

La mayor parte de estudios realizados sobre el reciclaje de las precipitaciones se han centrado en el desarrollo de modelos analíticos y numéricos capaces de mostrar la posible retroalimentación, a pesar de ser dependientes de la escala de la región estudiada. El primer modelo analítico de caja para estudiar el reciclaje de la precipitación fue desarrollado por Budyko y Drozdov en 1953 [6]. Este modelo es el más sencillo de todos y sentó los cimientos para siguientes estudios de modelos analíticos como fueron los de Brubaker et al. en 1993 [2], Eltahir & Bras en 1994[7] y Domínguez et al. en 2006 [5].

Este tipo de modelos se han vuelto más realistas y han evolucionado a lo largo de los años, obteniendo resultados para aplicaciones más específicas. Como lo son, investigar las fuentes de humedad durante las inundaciones o las sequías [4][5] e inquirir en los impactos del riego en el ciclo regional del agua [10].

2.2. Eltahir and Brass 1994

Eltahir & Bras [7][8] introdujeron un modelo que estima la relación de reciclaje local, ρ , de cada una de las celdas de una malla espacialmente distribuida que conforman la región, para escalas de tiempo de meses o mayores. Al ser un modelo analítico representa una solución basada en ecuaciones matemáticas. Estas ecuaciones se desarrollan con el uso de varias suposiciones, que simplifican el cálculo de la distribución de ρ para toda la región estudiada. Este modelo necesita como valores de entrada, el flujo entrante de vapor de agua (I) y la evaporación (E) de la atmósfera en cada celda de la región analizada.

Se comienza el desarrollo del modelo, aplicando la ecuación de conservación de la masa (6), descrita en el apartado 2.1.3, para dos tipos de moléculas de vapor de agua: las que se encuentran en la atmósfera porque han sido evaporadas dentro de la región y las que han sido advectadas mediante el transporte atmosférico a través de la frontera de la región. Se obtiene mediante las siguientes relaciones:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_i}{\partial t} &= I_i + E - O_i - P_i \\ \frac{\partial N_e}{\partial t} &= I_e - O_e - P_e \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

donde el subíndice i indica las moléculas que se evaporan dentro de la región (moléculas internas) y e las moléculas que se evaporan fuera de la región (moléculas externas). Las variables que aparecen en la ecuación (11) se definen de la siguiente manera: N es proporcional al número de moléculas de vapor de agua, I y O son el flujo de entrada y salida, P es la precipitación y E es la evaporación (véase la figura 4). Todas las variables, N , I , O , P y E , son funciones del espacio y del tiempo definidas en una malla horizontal. La figura 4 describe la distribución de los flujos para cualquiera de las celdas de la malla. El volumen de agua por unidad de tiempo (L^3T^{-1}) es la unidad que corresponde a cada uno de los flujos. Para obtener los valores escalares de I y O , se suman los componentes horizontales del vector del flujo de vapor de agua que entran o que salen de la celda.

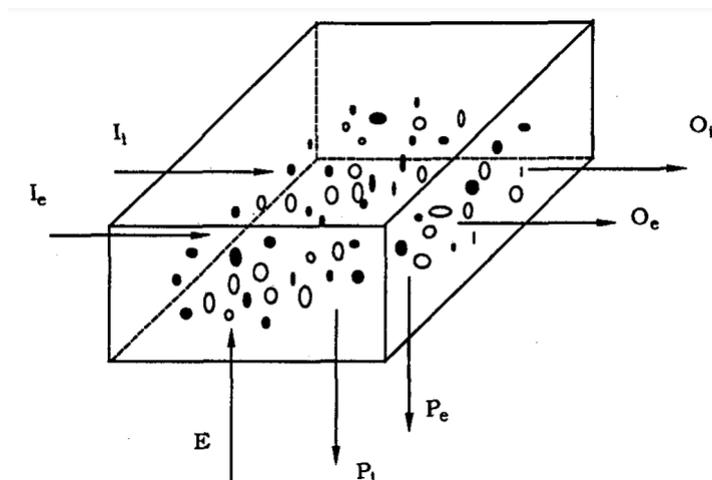


Figura 4: Esquema de la distribución del vapor de agua en un volumen cerrado [7].

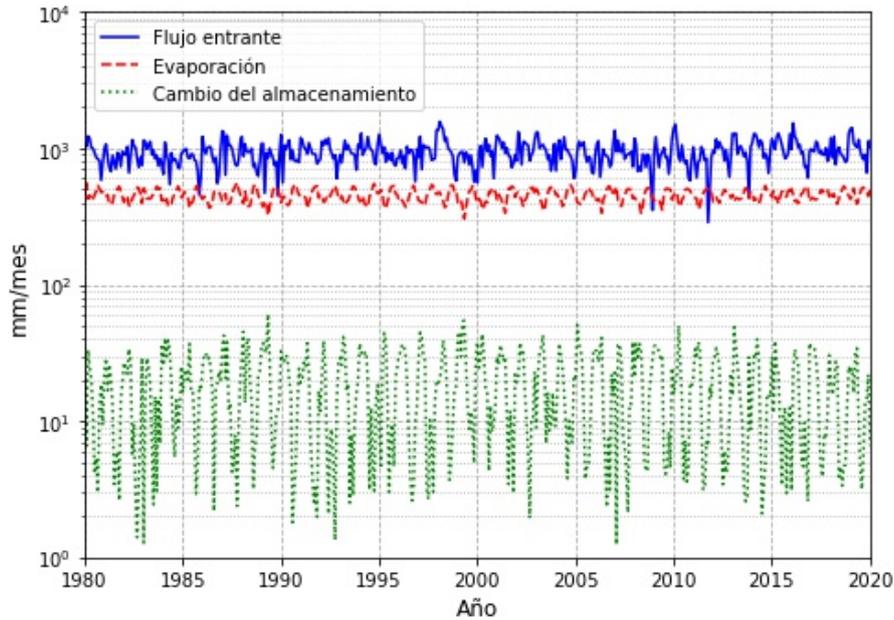


Figura 5: Comparación entre los flujos atmosféricos de vapor de agua y la tasa de cambio en el almacenamiento de vapor de agua en un punto de la cuadrícula de la cuenca del Amazonas.

Para obtener la fórmula general de reciclaje simplificada, planteamos dos suposiciones:

El primer supuesto, es que el vapor de agua está bien mezclado en la capa límite planetaria (CLP) de la atmósfera. Esto implica que las partículas de vapor de agua advectadas y evaporadas en esta zona de la atmósfera, tienen la misma probabilidad de precipitar. Esto quiere decir que la proporción de partículas evaporadas localmente y advectadas es igual en todas las variables atmosféricas: en la precipitación, en el agua precipitable y en el flujo saliente. Esto conlleva:

$$\rho = \frac{P_i}{P_i + P_e} = \frac{N_i}{N_i + N_e} = \frac{O_i}{O_i + O_e} \quad (12)$$

La CLP es la capa mas baja de la atmósfera, llega desde la superficie hasta los 1500 metros de altura y contiene la mayor parte del vapor de agua de la atmósfera. Las observaciones de la distribución vertical del vapor de agua muestran una distribución prácticamente uniforme hasta la capa superior de la atmósfera. La mezcla de vapor de agua es principalmente obtenida por procesos de convección, es decir, se generan corrientes aire verticales, dada la diferencia de temperatura entre la superficie y la parte superior de la capa límite planetaria. El proceso desde que las moléculas de agua se evaporan hasta que se mezclan con los elementos de la CLP tarda entre 10-15 minutos.

La segunda hipótesis establece que, a escalas de tiempo suficientemente largas, el cambio en el almacenamiento atmosférico del vapor de agua es insignificante comparándolo con el flujo de vapor de agua atmosférico y la evaporación. Esta observación se demuestra

en la figura 5. Por lo que aplicando la suposición sobre la ecuación (11), se pueden tomar las derivadas respecto al tiempo equivalentes a cero.

$$\left. \begin{aligned} I_i + E &= O_i + P_i \\ I_e &= O_e + P_e \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Aplicando la primera suposición (12) sobre la ecuación (11), se obtienen:

$$I_i + E = \rho(O_i + O_e) + \rho(P_i + P_e) \quad (14)$$

$$I_e = (1 - \rho)(O_i + O_e) + (1 - \rho)(P_i + P_e) \quad (15)$$

Finalmente, dividiendo y reordenando las ecuaciones (14) y (15). Se obtiene el índice de reciclaje de precipitaciones para una celda (16).

$$\rho = \frac{(I_i + E)}{(I_i + I_e + E)} \quad (16)$$

2.2.1. Procedimiento de la estimación de ρ

El procedimiento a seguir para conseguir el valor de ρ en todas las celdas de la malla es el siguiente, en el Apéndice A.2 se muestra el procedimiento del cálculo computacional:

1. Los datos de los vectores horizontales del flujo \vec{Q} , la evaporación E y precipitación P se interpolan en una malla rectangular que cubre el área total de la región estudiada. Así, estableciendo estos valores fijos en cada celda.

2. El procedimiento de estimación es una técnica iterativa, en la que se le da un valor inicial a ρ en todos los puntos de la malla. A continuación, se utiliza la ecuación (12) para dividir el flujo de cada celda dependiendo del origen de las moléculas, es decir, se consiguen valores de O_i y O_e para el ρ estimado. Es importante señalar que O_i y O_e para un punto de la cuadrícula son I_i e I_e para el punto adyacente, de esta manera, se obtienen los flujos entrantes. Estas estimaciones de I_i e I_e junto con la E , que es un valor fijo, se utilizan en la ecuación (16) para llegar a estimaciones mejoradas de la distribución de ρ de cada celda.

Siguiendo este procedimiento, las nuevas estimaciones de ρ se comparan con las anteriormente realizadas. El procedimiento se repite hasta que la nueva estimación y las anterior converjan. El procedimiento de estimación converge rápidamente y no depende de la estimación inicial de ρ .

3. El índice de reciclaje de precipitación regional (ρ_R) para el área, A, y para el mes o año, k, se obtiene aplicando el ρ de cada celda en la ecuación (3):

$$\rho_R(k) = \frac{\sum_{i,j} \rho(i, j, k) p(i, j, k) A(i, j)}{\sum_{i,j} p(i, j, k) A(i, j)} \quad (17)$$

dónde $\rho(i, j, k)$ es el reciclaje local de la celda (i, j) de la malla, y están normalizados en el mes o año k . [7]

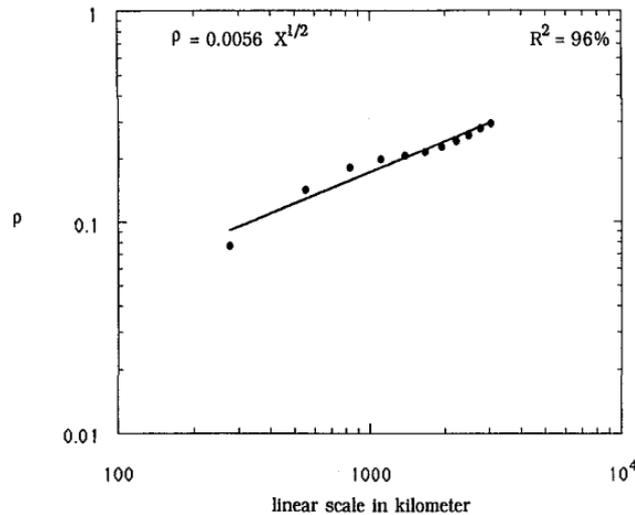


Figura 6: Relación entre ρ anual y la escala de la superficie considerada en el Amazonas. [8]

2.2.2. Dependencia de la escala

Cómo indica el artículo Eltahir & Bras [8], el índice de reciclaje de las precipitaciones depende de la ubicación geográfica, la escala temporal y la escala espacial considerada. A escala global, el coeficiente de reciclaje es 1, mientras que para cualquier punto de la Tierra el mismo coeficiente se aproxima a 0. La cuestión es entender la variación de ρ_R en cualquier región entre estos dos límites.

La dependencia de la escala espacial puede estudiarse utilizando el modelo que Eltahir & Bras utilizaron para estimar el coeficiente de reciclado para áreas de diferentes tamaños situadas dentro de la cuenca del Amazonas. Los resultados se muestran en la Figura 6 para el rango de escalas entre 250 km y la escala de la cuenca del Amazonas, $\sim 2500km$.

Esto remarca la importancia de hacer uso de la misma escala para estudiar una región en el tiempo, o comparar los resultados de dos regiones diferentes. Para evitar el uso de escalas y describir el ciclo hidrológico continental completo, se estudia el reciclaje de precipitación continental, ρ_c (véase apartado 2.1.2).

2.2.3. Limitaciones del modelo Eltahir & Bras

Dadas las suposiciones que se aplican en el modelo analítico de Eltahir & Bras, ésta tiene varias limitaciones.[15]

Por un lado, al suponer que el almacenamiento de vapor de agua atmosférico es pequeño en comparación con los flujos de vapor de agua atmosférico, solo podemos hacer uso de escalas de tiempo grandes, es decir, mensuales, que descuiden la variación diaria de los cambios de almacenamiento de humedad, lo que puede influir en los resultados de la tasa de reciclaje.

En cuanto a el supuesto de que la atmósfera está bien mezclada, también establece la limitación para la escala de tiempo del análisis. Tiene que ser más largo que el tiempo de mezcla de la capa límite [5]. En los primeros años de la investigación del reciclaje de precipitaciones fue aceptada y ampliamente utilizada, sin embargo, Bosilovich en 2002 [1] contradujo a Eltahir & Bras demostrando que la mezcla en la atmósfera no ocurre rápidamente después de la evaporación. Bosilovich concluyó que el índice de reciclaje puede variar sustancialmente dependiendo de la distribución vertical del transporte de humedad y la presencia de procesos convectivos.

En lugares como el Amazonas, donde la mayor parte del vapor evaporado permanece en la troposfera inferior y cae directamente a la superficie, el uso del supuesto bien mezclado puede llevar a subestimar los valores de la tasa de reciclaje como afirman Lettau et. al. [11], quien argumentó que en la región amazónica el reciclaje rápido puede representar al menos el 30 % de la precipitación total.

2.3. Datos y regiones estudiadas

2.3.1. Datos del reanálisis ERA5

Los datos utilizados para calcular el reciclaje de precipitaciones han sido descargados desde la web de 'Climate Data Store' (CDS) (véase Apéndice A.1) donde hemos utilizado los reanálisis ERA5, exactamente, el conjunto de datos '*ERA5 monthly averaged data on single levels from 1979 to present*'. De la cual hemos obtenido el reanálisis mensual de las variables que aparecen en la tabla 1 con una resolución espacial de 1,0° de latitud por 1,0° de longitud.

El ERA5 es la quinta generación de reanálisis del ECMWF (Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio) para el clima global de las últimas 7 décadas. Los datos de reanálisis meteorológico se producen a partir de la combinación de datos de medición, observación, simulación y aplicando técnicas de asimilación de datos que utilizan las leyes de la física, para obtener la descripción más realista de la evolución climática. Estos conjuntos de datos están disponibles para los períodos con un retraso sustancial de varias semanas o meses. De esta manera, se consiguen versiones mejoradas de las observaciones originales, todo lo cual beneficia a la calidad de los datos del reanálisis.[9]

Variable	Unidades
Integral vertical del flujo de vapor de agua hacia el este ($\overrightarrow{Q_x}$)	kg/(ms)
Integral vertical del flujo de vapor de agua hacia el norte ($\overrightarrow{Q_y}$)	kg/(ms)
Evaporación acumulada	m/día
Precipitación acumulada	m/día
Mascara tierra-océano	-
Geopotencial	-

Cuadro 1: Variables utilizadas en la obtención del índice de reciclaje de precipitaciones con el modelo de Eltahir & Bras.

En el caso de la evaporación y la precipitación se utiliza el método acumulado, que se recogen en las unidades: m/día. Equivale a la altura que el agua alcanzaría sobre una superficie plana e impermeable con paredes verticales.

Por otro lado, también se utilizan las variables estacionarias, la máscara tierra-océano y la variable del geopotencial, para distinguir entre las celdas que pertenecen al continente o al océano.

2.3.2. Regiones estudiadas

Los resultados se dividen en dos apartados. En primer lugar, se realizará un estudio regional donde se analizará la cuenca del Amazonas y la cuenca del Misisipi, demostrando cómo afectan los cambios antropogénicos al clima regional. También, se estudiará el reciclaje de precipitaciones local en celdas de tamaño $4^\circ \times 4^\circ$ que se encuentren por encima del nivel del mar. En segundo lugar, se realizará un análisis continental para examinar cuales son las regiones con mayor dependencia del reciclaje de humedad. Asimismo, se mostrarán la variabilidad de ρ dependiendo de la estación anual en los continentes donde domina el mecanismo de retroalimentación de la humedad. En la tabla 2 aparecen las regiones estudiadas y sus coordenadas correspondientes.

Región	Coordenadas	
Amazonas	$(8^\circ N - 17^\circ S, 72^\circ O - 47^\circ O)$	
Misisipi	$(48^\circ N - 27^\circ N, 100^\circ O - 80^\circ O)$	
Celdas de $4^\circ \times 4^\circ$	$(90^\circ N - 90^\circ S, 180^\circ O - 180^\circ E)$	
Sudamérica	$(12^\circ N - 60^\circ S, 84^\circ O - 35^\circ O)$	
África	$(40^\circ N - 37^\circ S, 19^\circ O - 62^\circ E)$	
Eurasia	$(85^\circ N - 0^\circ N, 10^\circ O - 180^\circ E)$	

Cuadro 2: Regiones estudiadas y sus coordenadas correspondientes. Estas regiones se muestran en la figura 7.

Cómo se observa en la figura 7, en la capa límite planetaria, desde la superficie hasta los 1500 metros sobre el mar, la dirección del vapor de agua tiene una predisposición dependiendo de la latitud en la Tierra. En el hemisferio norte desde $30^\circ N$ hasta latitudes superiores y en el hemisferio Sur en latitudes inferiores a $30^\circ S$, el flujo de humedad se mueve principalmente hacia el este. En las regiones intertropicales, entre $30^\circ S - 30^\circ N$, actúan los denominados vientos alisios que principalmente soplan hacia el oeste. Asimismo, estas direcciones son alteradas por la presencia de elevaciones orográficas o cadenas montañosas. Por ejemplo, se observa que las Montañas Rocosas en América del Norte y el Gran Valle del Rift en África bloquean la entrada del flujo de humedad oceánica hacia el resto del continente. Lo contrario ocurre en Sudamérica, donde los Andes impiden que la humedad salga del continente, creando así condiciones favorables para el reciclaje de la humedad.

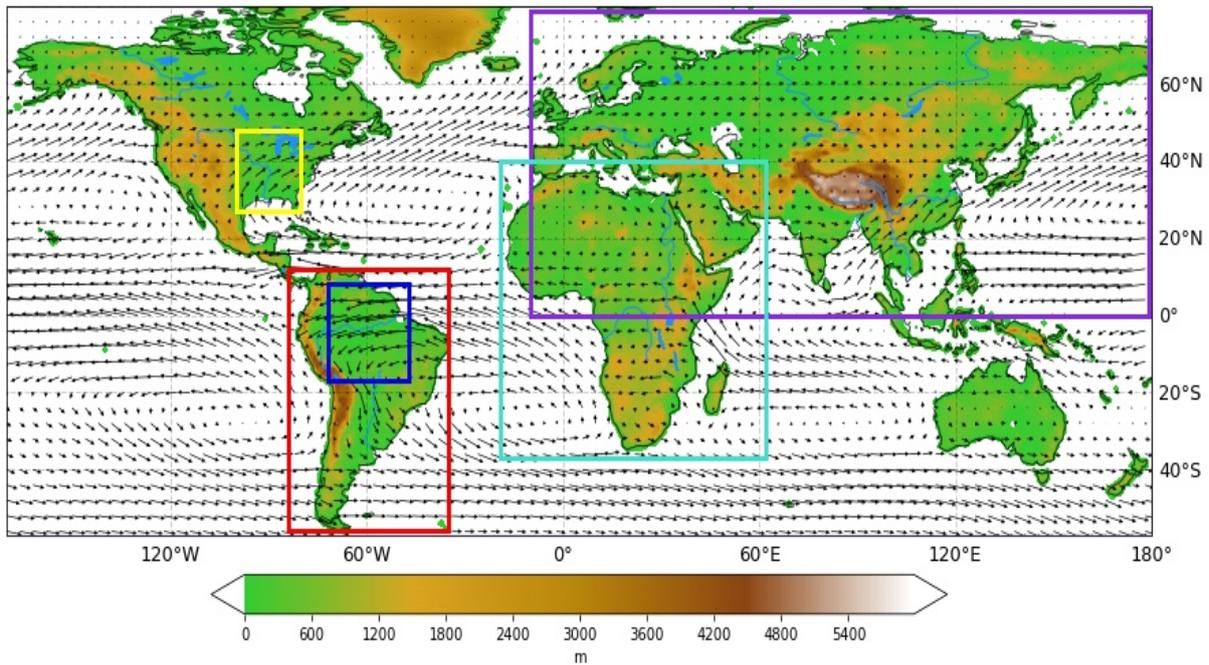


Figura 7: Topografía de la superficie terrestre sobre el nivel del mar en ERA5. Media anual de la dirección del flujo de vapor de agua en la capa límite planetaria (CLP) entre 2015-2019.

Las figuras 8 y 9 muestran el promedio anual de precipitaciones y evaporación calculadas a partir del conjunto de datos ERA-5 sobre los continentes. La variabilidad esperada de la precipitación y la evaporación entre los climas tropicales, desérticos y moderados es claramente discernible, así como el impacto de las cadenas montañosas en la precipitación.

2.4. Reciclaje de precipitación regional

La cuenca del Amazonas es una región que a menudo genera interés en los estudios de reciclaje debido a sus cualidades topográficas y atmosféricas. Es un hecho que durante todo el año debido a las corrientes atlánticas entran grandes cantidades de flujo de vapor de agua por el Este del Amazonas, sumándosele la humedad que es generada en el propio continente, la mayoría por su gran vegetación ya que es la selva más grande del mundo con una superficie de 7 413 827 km²[18]. Estos flujos de vapor de agua se distribuyen mayormente a lo largo del continente como se muestra en la figura 7.

El clima de la cuenca del Amazonas se constituye por dos temporadas: la húmeda, desde Noviembre a Abril, y la temporada seca, desde Mayo a Octubre. Dependiendo del periodo, la precipitación, evaporación y reciclaje de precipitaciones tiene más influencia en la región. En las figuras 21 y 22, se muestran estos valores del continente sudamericano en los meses de junio y diciembre entre los años 2015 y 2019.

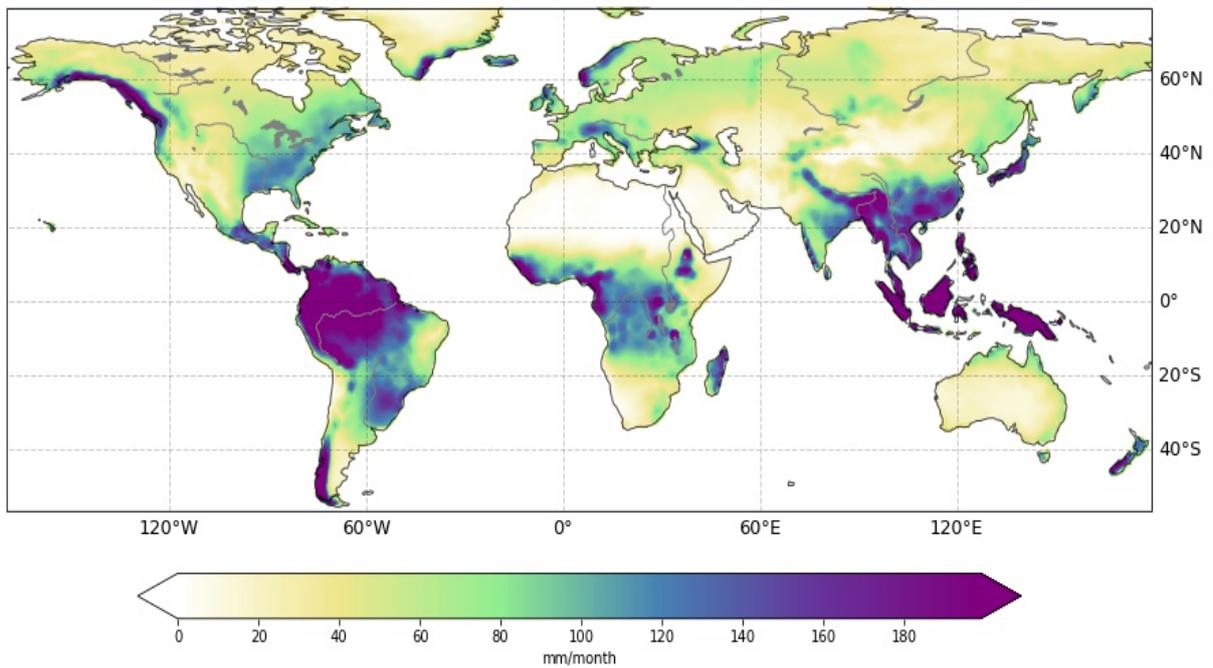


Figura 8: Promedio anual de la precipitación sobre áreas continentales durante los años 2015-2019.

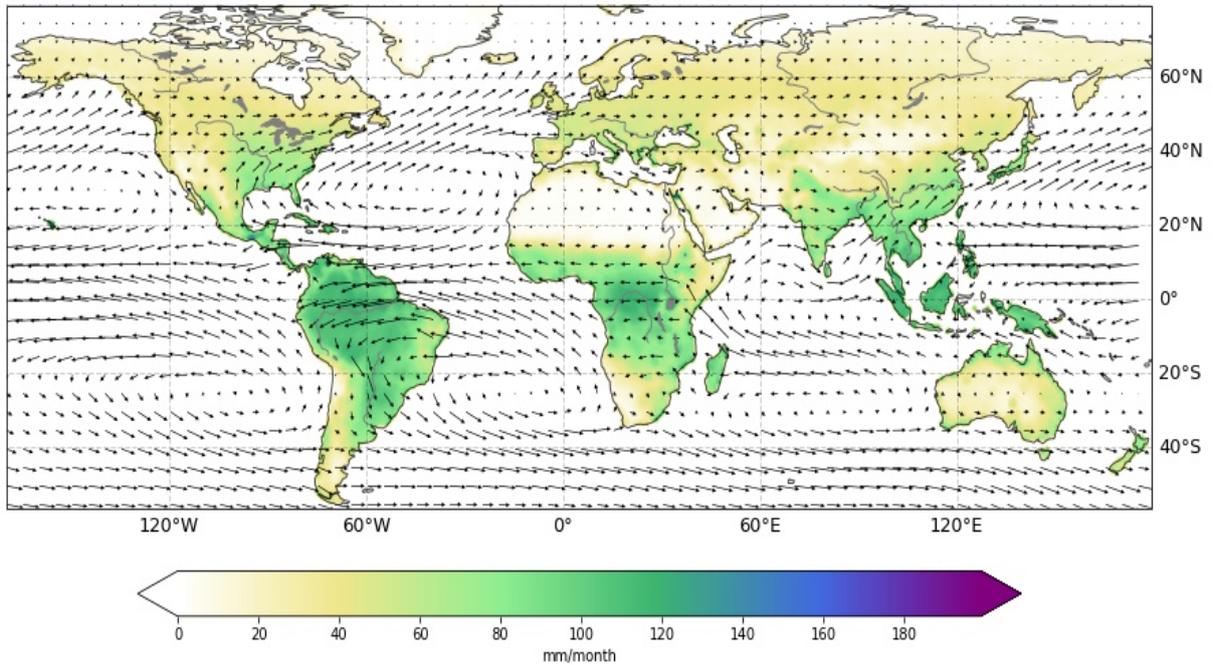


Figura 9: Promedio anual de la evaporación sobre áreas continentales durante los años 2015-2019. Las flechas indican la dirección del flujo de humedad integrado verticalmente.

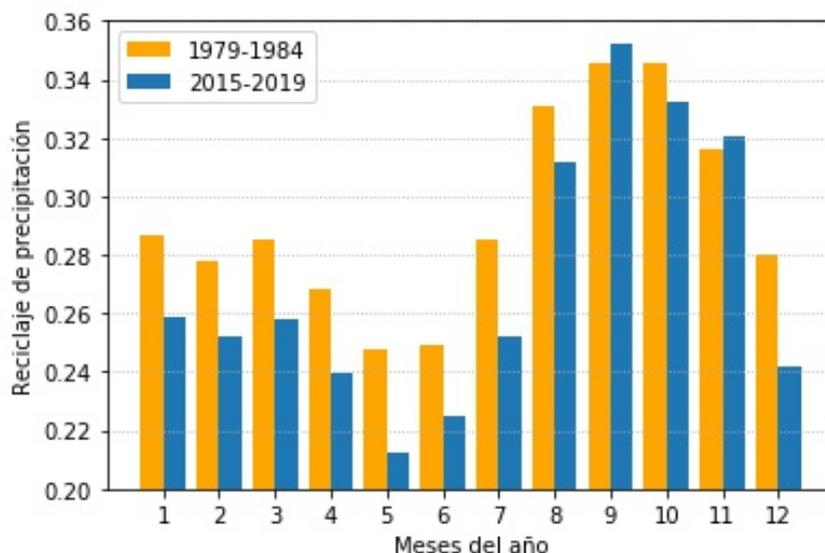


Figura 10: Promedio de ρ_R en la cuenca del Amazonas por meses entre 1979-1984 y entre 2015-2019.

Al final de la estación seca, las nubes que se forman sobre el sur de la Amazonia se generan a partir de la humedad que se eleva desde el bosque, creando suficiente inestabilidad y proporcionando suficiente agua para desarrollar los patrones persistentes de lluvia de la región. Esta humedad que se evapotranspira de la vegetación vuelve a caer sobre la región y se convierte en un ciclo que se autoregenera, amplificando el coeficiente de reciclaje de humedad no solo en la cuenca del Amazonas, sino también en toda la región Sudamericana, sobre todo en la región de la Plata. Dadas las condiciones y utilizando los datos del reanálisis de ERA-5, durante 2015-2019 el 27 % del agua evaporada localmente se precipitó en el mismo Amazonas.

Como se muestra en la figura 10, el reciclaje de precipitaciones regional varía dependiendo de la temporada. Esto es debido a la zona de convergencia intertropical que cambia la dirección de los vientos. En los meses de septiembre y octubre destaca la retroalimentación tierra-atmósfera, llegando ρ_R a el 35 %. En cambio, en mayo y junio la aportación desde fuera de la región tiene una mayor influencia en las precipitaciones. Esto se observa en la figura 11, que compara la distribución de ρ en los meses de mayo y septiembre en la cuenca del Amazonas.

Asimismo, comparándose el índice de reciclaje por meses durante los años 1979-1984 y 2015-2019 (véase Fig.10), se percibe que en los años recientes ha habido una significativa disminución en el índice de retroalimentación. Mientras que entre los años 1979-1984, ρ_R apenas descendía del 25 %, entre 2015-2019 el reciclaje ha bajado hasta el 21 % en el mes de mayo.

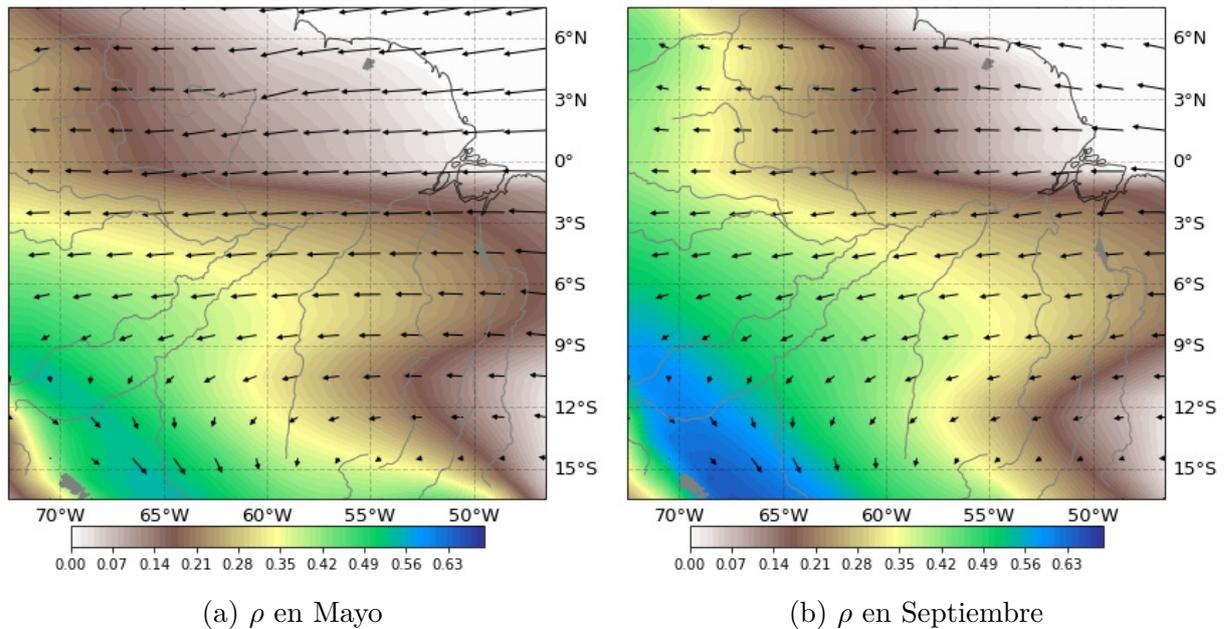


Figura 11: Distribución de ρ en la cuenca del Amazonas para los meses de Mayo y Septiembre entre 2015-2019.

Esta reducción es debida a la deforestación intensificada de las ultimas décadas (véase Fig. 12), la humedad generada por la vegetación Amazónica se ha reducido en grandes cantidades y esta generando cambios en la interacción tierra-atmósfera. Esto se aprecia claramente en la figura 13, donde existe una tendencia descendente del 0.55 % por década en el índice de reciclaje regional. Durante los años 1979 y 1984, el reciclaje de precipitaciones era del 29 %.

De hecho, los periodos de temporada han cambiado debido a los efectos de la deforestación. En la actualidad la estación húmeda se ha reducido un mes comparándola con la década de los 70. Aumentando así, el riesgo de incendios y deterioro de los bosques por no disponer de suficiente agua. [14] demuestra la influencia que tiene la deforestación en el alargamiento de la temporada seca.

Por otro lado, es interesante comparar los ciclos regionales de la cuenca del Amazonas y la cuenca del Misisipi (véase Fig.14b y 14c). Aunque la evaporación constituye el 65 % de la precipitación en el Misisipi, comparado con el 57 % en el Amazonas, el índice de reciclaje para la cuenca del Misisipi es bastante menor (18 %) que el de la cuenca del Amazonas (27 %). Otra diferencia interesante es que la relación entre las precipitaciones y la entrada de vapor de agua en la atmósfera es mucho mayor en el Amazonas (0,71 frente a 0,33). Estas comparaciones reflejan no sólo la diferencia en la dinámica atmosférica y los mecanismos de entre los trópicos y las latitudes medias, sino también las diferencias de las condiciones topográficas y la cubierta vegetal apuntando a un mayor potencial de interacciones tierra-atmósfera en la cuenca del Amazonas que en el Misisipi.

Como se ha demostrado, el reciclaje de precipitación regional sirve para conseguir valores cualitativos de regiones concretas, se puede utilizar para comparar regiones pare-

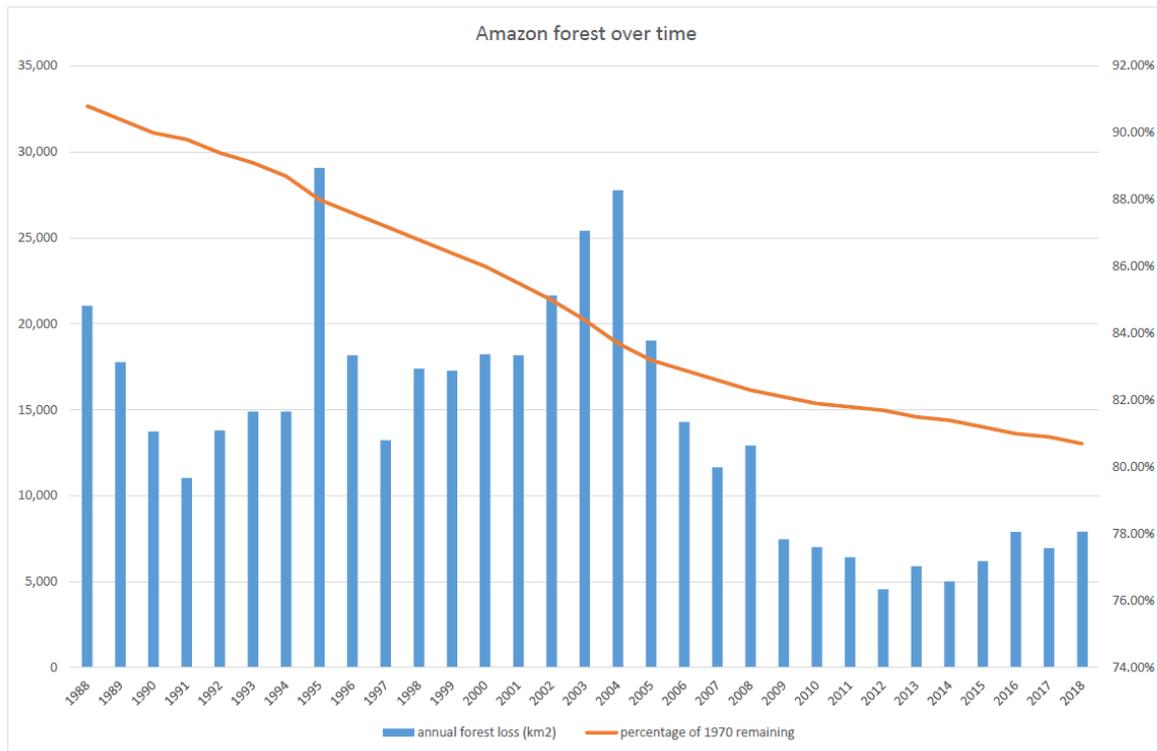


Figura 12: Progresión de la deforestación de la cuenca del Amazonas. [3]

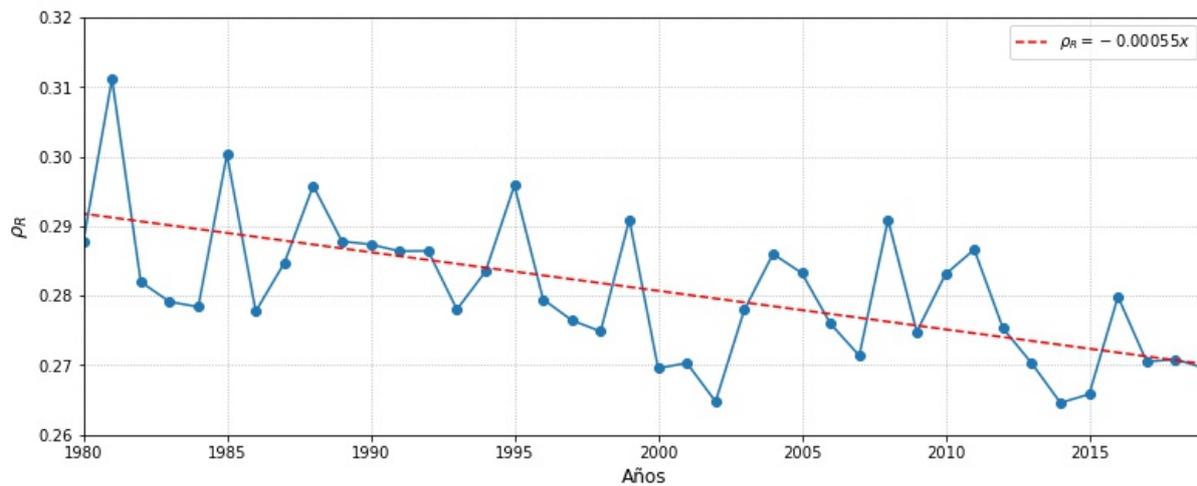


Figura 13: Progresión del índice de reciclaje de precipitaciones regional de la cuenca del Amazonas entre los años 1980-2020.

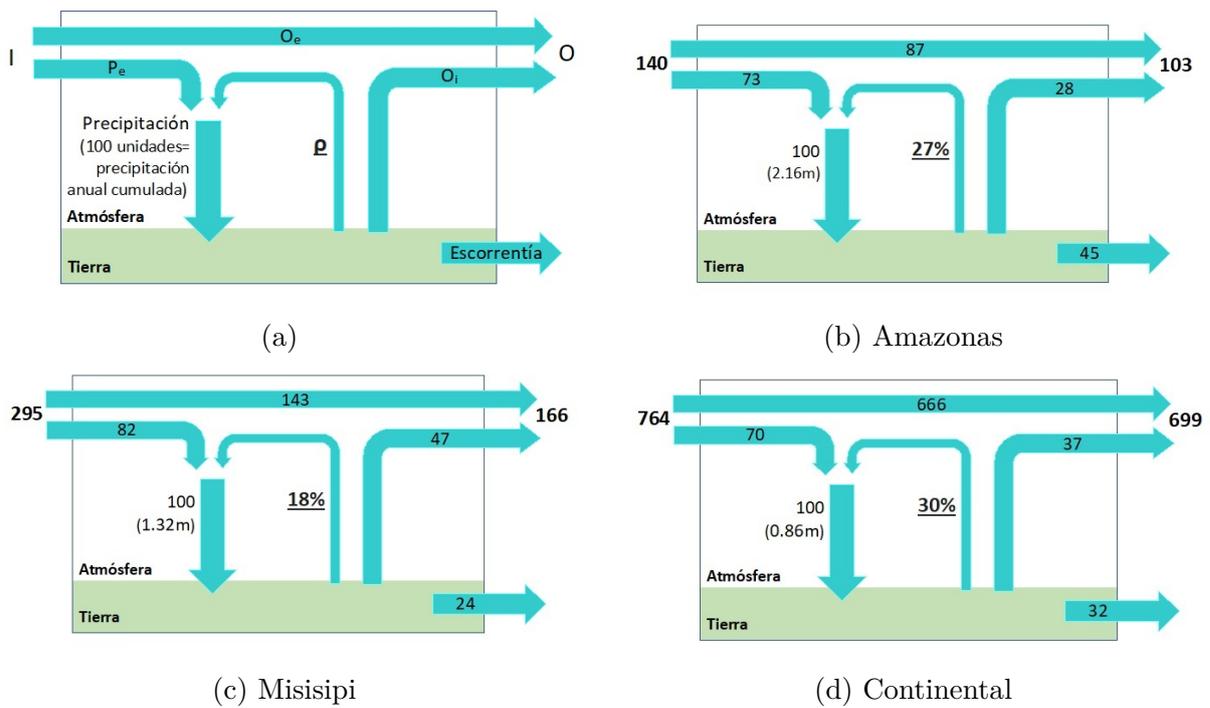


Figura 14: Esquemas del ciclo hidrológico anual del agua en tres regiones. (a) es un esquema para entender los próximos gráficos. Donde I es el flujo horizontal de humedad hacia la región; P_e es el componente de la precipitación que surge de la humedad advectada; O es el flujo horizontal de humedad advectada hacia fuera de la región; ρ es la precipitación reciclada; O_i es el flujo horizontal de humedad evaporada localmente advectada hacia fuera de la región. Todas las variables se calculan utilizando el reanálisis ERA-5 durante 2015-2019. Todas las variables se normalizan dividiéndolas por la precipitación anual integrada en el área (indicada en los paréntesis de de cada panel) y multiplicándolas por 100.

cidas o una misma región a lo largo de un tiempo. Sin embargo, los valores exactos del reciclaje regional son de poca utilidad, ya que no describen el ciclo hidrológico completo ni el mecanismo de retroalimentación de la humedad sobre el continente. En realidad, la atmósfera no está limitada por celdas de cuadrícula con una determinada dimensión, ni está limitada política o hidrológicamente. Por consiguiente, es mejor examinar los coeficientes de reciclaje regionales de forma cualitativa en lugar de cuantitativamente. Además, no es prudente sacar conclusiones sobre la importancia de la retroalimentación de la humedad continental y de la sensibilidad climática a los cambios de uso de la tierra basándose únicamente en los coeficientes de reciclaje regionales debido a la elección arbitraria del tamaño y la forma del área. En la sección 4.4 describimos los patrones de reciclaje de la humedad continental en detalle, pero antes echaremos un vistazo cualitativo al reciclaje de la humedad local en todo el globo.

La figura 15 muestra el promedio anual del reciclaje de precipitaciones local de cada celda de una malla de 4° de latitud \times 4° de longitud. Como ya se ha mencionado, los coeficientes de reciclaje regionales dependen de la escala, por lo tanto, los valores exactos no tienen importancia en este caso. Los resultados se interpretan como una indicación de dónde es significativo el mecanismo de retroalimentación de la humedad regional, es decir, indica dónde existe una retroalimentación inmediata. Se observan altos índices de reciclaje regional en zonas muy húmedas, como los bosques húmedos tropicales de América del Sur, África y el sudeste asiático. Además, el reciclaje regional es especialmente alto en las zonas montañosas. Este efecto es muy evidente cerca de los Andes, los Alpes, la meseta tibetana, las cadenas montañosas del sur de África y el Gran Valle del Rift en el este de África. Se deduce que la humedad evaporada es repetidamente advectada hacia esas regiones y ocurre lo denominado lluvia orográfica. El ascenso del aire húmedo por encontrarse con una elevación orográfica, como lo es una montaña, se enfría hasta alcanzar el punto de saturación del vapor de agua, y una humedad relativa del 100 %, que origina la lluvia [19].

2.5. Reciclaje de precipitación continental

Para evaluar la importancia de la retroalimentación de la humedad continental, necesitamos conocer la dependencia de la evaporación para mantener la precipitación sobre los continentes. La figura 16 representa el índice de reciclaje continental de la precipitación, ρ_c , que se obtiene analizando como región el conjunto de los continentes, es decir, sin tener en cuenta la evaporación ni la precipitación de los océanos. Sin embargo, para conocer el origen de la precipitación, también se necesita la distribución de la evaporación en los continentes junto con los flujos de vapor de agua (Fig. 9).

Las principales regiones que son la fuente de las precipitaciones continentales se pueden observar en la Fig.9: el sudeste del continente norteamericano, toda la región amazónica, el centro y el este de África, el sudeste asiático y toda la región europea. Las áreas con precipitación originaria de la evaporación continental (Fig. 16) están situadas al noreste de América del Norte, la región de Perú-Bolivia-Paraguay-Uruguay, el centro y el oeste de África y grandes zonas de China, Mongolia y Siberia. Las zonas al este de los Andes,

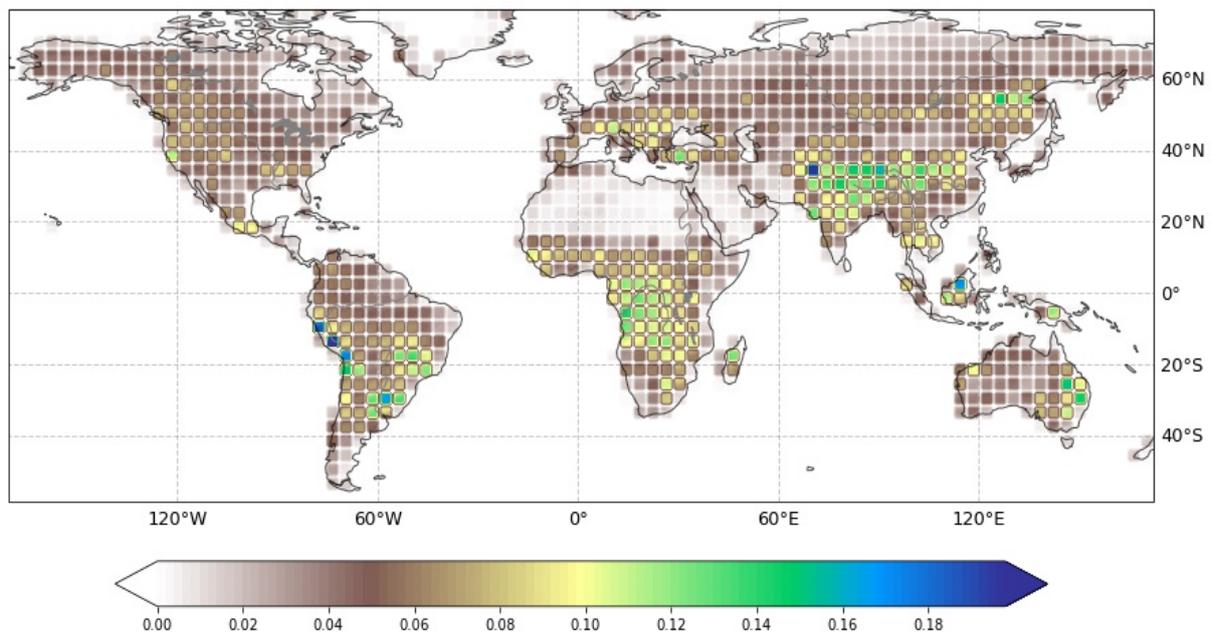


Figura 15: Reciclaje de Humedad Regional sobre celdas de $4.0^{\circ} \times 4.0^{\circ}$ en el año 2015.

el Congo y la meseta tibetana son regiones en los que los coeficientes de reciclaje de la humedad continental son más elevados debido a la retroalimentación inmediata que ocurre cerca de elevaciones orográficas.

En América del Norte, la figura 16 indica que las fuentes oceánicas dominan sobre el reciclaje de la humedad continental. Aunque la mayor parte de la evaporación se dirige hacia el continente debido a las corrientes del viento (Fig. 9), la evaporación es reducida comparada con la cantidad de precipitación (véase la Fig. 8). No obstante, el reciclaje no es insignificante; en la mayor parte del continente, la precipitación media anual depende en un 30 % de la humedad reciclada, llegando hasta el 50 % cerca de los Grandes Lagos.

Sudamérica muestra tres patrones distintos en el reciclaje de la humedad. El primer patrón que se puede observar es la evaporación de la región amazónica que es transportada a favor del viento hacia la cuenca del Río de la Plata donde se precipita. El segundo patrón es el reciclaje local al este de los Andes debido a la lluvia orográfica. El tercer patrón se observa en la Patagonia, donde el reciclaje de la humedad es casi nulo.

De la figura 16 se desprende que el océano Índico es una fuente importante de precipitaciones en África oriental. Desde África central hacia el sur, casi toda la evaporación se recicla a nivel regional o se transporta a África occidental, donde, el reciclaje de la precipitación continental desempeña un papel importante, entre el 55-70 %. Lo que fue confirmado por Njitchoua et al. (1999) [12], que estudiaron las composiciones isotópicas de las precipitaciones en la selva de Camerún. El Sahel, que a menudo ha sido un área de investigación en el contexto del reciclaje de la humedad, recibe su humedad de tres grandes masas de agua, el Mar Mediterráneo, el Océano Atlántico Sur y el Océano Índico. Por lo que solo entre el 20 y el 30 % de las precipitaciones proceden de la evaporación continental.

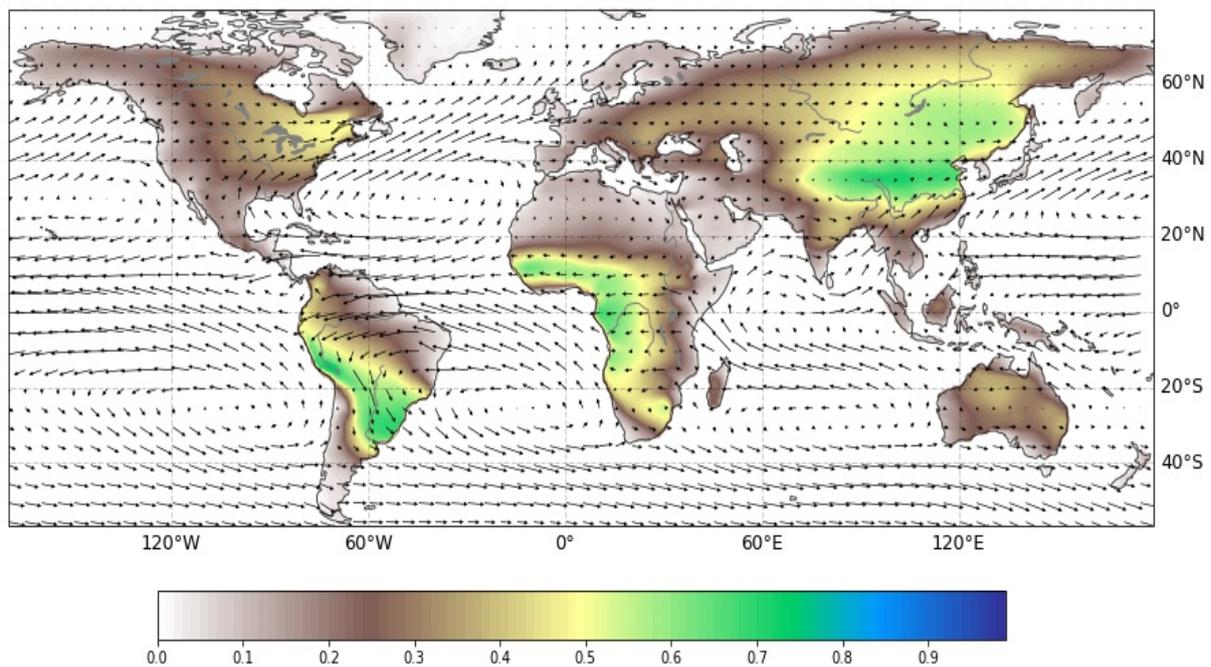


Figura 16: Reciclaje de Humedad Continental 2015-2019. Las flechas indican la dirección del flujo de humedad integrado verticalmente.

Entre Europa y Asia, el flujo de humedad se dirige principalmente hacia el este. Esto se refleja en el aumento del índice de reciclaje de las precipitaciones en esta dirección. Cuando el flujo de vapor de agua llega al oeste de China, la humedad oceánica sólo representa alrededor del 20% de la precipitación. Esto coincide con las conclusiones de Numaguti (1999)[13] y Stohl y James (2005)[16], que también indicaron que el reciclaje es un factor importante en las precipitaciones sobre Siberia, Mongolia y China. Otro punto en el que destaca el reciclaje de humedad regional es la zona de la meseta tibetana. Tian et al. (2001) [17] y Yu et al. (2007) [20] que estudiaron las composiciones isotópicas de las precipitaciones en esta zona, indican que el reciclaje regional desempeña un papel importante. El flujo de vapor de agua se dirige hacia la meseta desde el norte, sur y oeste, y debido a la altitud se enfría, precipitándose. Por lo tanto, esto crea condiciones favorables para la posterior retroalimentación de la humedad.

Por último, en el sur de la India, el sudeste asiático y Oceanía, las precipitaciones originadas por evaporación continental no son destacables. A pesar de que, el norte de Australia, Indonesia y Papúa Nueva Guinea, sean zonas muy húmedas y con abundante evapotranspiración, llegando hasta los 140 mm/mes (véase Fig. 9). A priori, se pensaría que esto indica un rápido proceso de reciclaje regional, pero como también hay mucha humedad oceánica, la contribución del reciclaje a la precipitación continental total sigue siendo pequeña.

2.5.1. Variación del reciclaje de humedad por temporadas

Esta sección presenta el reciclaje de la humedad continental en diciembre y junio sobre los continentes de América del Sur, África y Eurasia. Estos son los continentes donde el mecanismo de retroalimentación de la humedad continental juega un papel clave en el clima. A partir de las variaciones estacionales se observa que el reciclaje es más dominante en verano, cuando la evaporación continental es elevada.

África

En África, el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es el principal responsable del cambio de las estaciones lluviosas. Las implicaciones para los patrones de reciclaje de la humedad se muestran en las Figs. 17 y 18. En diciembre, el reciclaje de la humedad tiene lugar principalmente en el conjunto de regiones que bordean el Golfo de Guinea, donde la evaporación proviene del sureste de África y de los bosques húmedos de Congo. Estas fuentes evapotranspiran alrededor de 120 mm/mes. Siguiendo la dirección el flujo horizontal de humedad, el agua se recicla desde el este de África hacia el oeste del continente, donde el reciclaje continental es responsable del 60 al 70 % de las precipitaciones.

En junio se puede observar que la selva africana es la que más contribuye a la precipitación total en las zonas húmedas. Casi toda agua que se evapora del centro del continente vuelve como precipitación continental. Los ríos de África Occidental, así como los ríos que nacen en el centro del continente, incluido el Nilo, obtienen entre el 50 y el 80 % de su agua de las precipitaciones recicladas a nivel continental. Esta dependencia de la humedad de origen continental pone de manifiesto la vulnerabilidad del clima africano a los cambios de la tierra en su selva tropical.

Eurasia

En las Figs. 19 y 20 se puede observar que el reciclaje de la humedad en Eurasia varía considerablemente a lo largo de las estaciones. En diciembre (Fig. 19) la retroalimentación de la humedad continental es un proceso mucho menos dominante que en junio. Sin embargo, es sorprendente ver que incluso en enero hasta el 70 % de las precipitaciones en China proceden del reciclaje sobre el continente euroasiático. Asimismo, los principales ríos de China (el río Amarillo, el Yangtze y el río Perla) se alimentan de fuentes de evaporación continental provenientes de Europa, Asia occidental y de las regiones que abarcan Tailandia y Myanmar.

En junio (Fig. 20) el reciclaje de la humedad continental es un proceso extremadamente significativo sobre el continente euroasiático. Obsérvese que el flujo medio de humedad sigue siendo principalmente hacia el este. En Europa occidental, las precipitaciones dependen en gran medida de la evaporación del Atlántico. En el resto del continente la subida de temperaturas en verano, genera una evaporación de entorno a 120mm/mes en la gran superficie que forman Europa y Asia. Que junto al flujo de humedad hacia el este, casi toda la evaporación continental vuelve al continente. En consecuencia, la retroalimentación de la humedad continental representa entre el 70 y el 95 % de las precipitaciones que

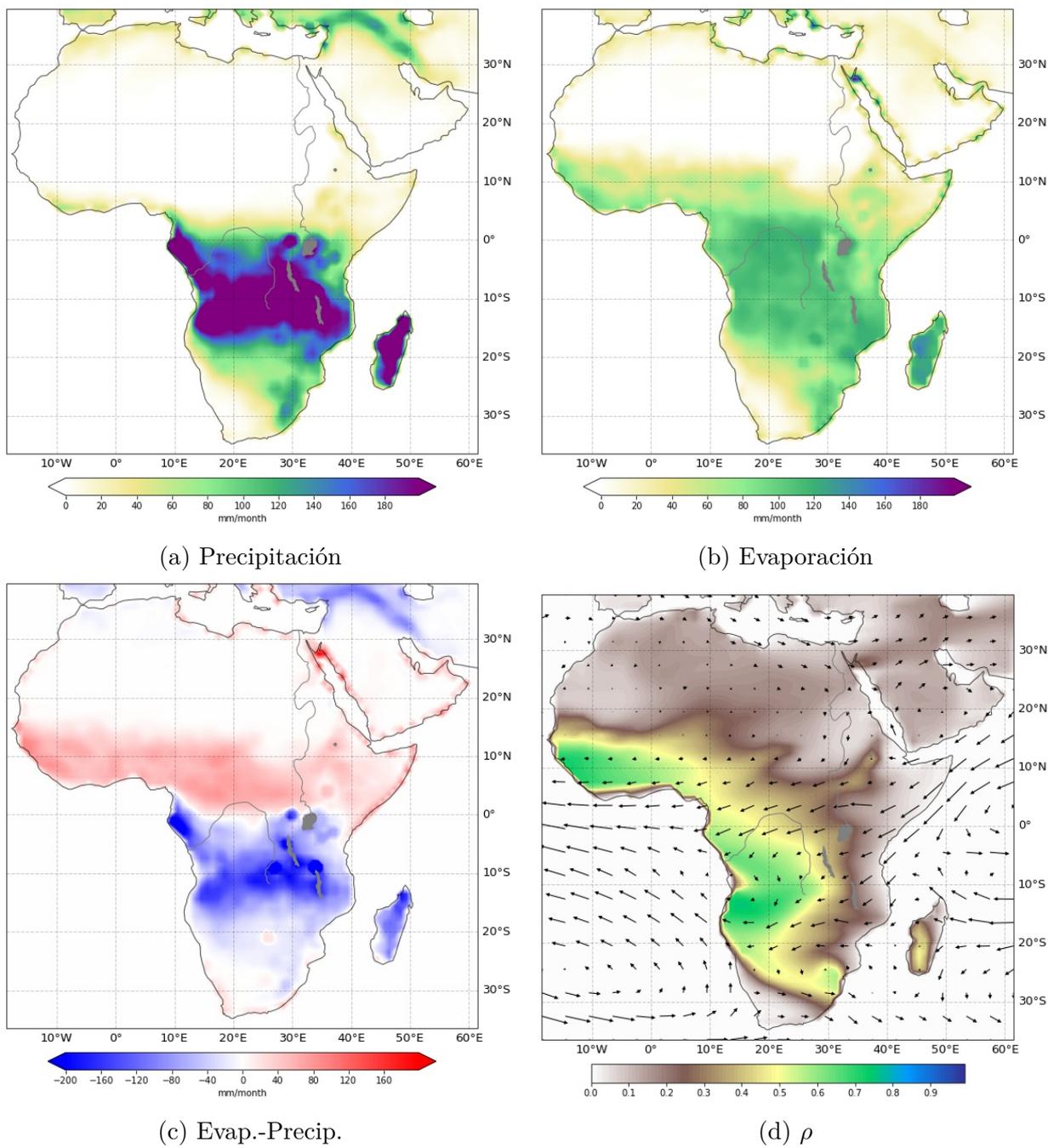


Figura 17: África en diciembre durante 2015-2019: Promedio de la precipitación, evaporación, Evap.-Precip. y distribución de ρ .

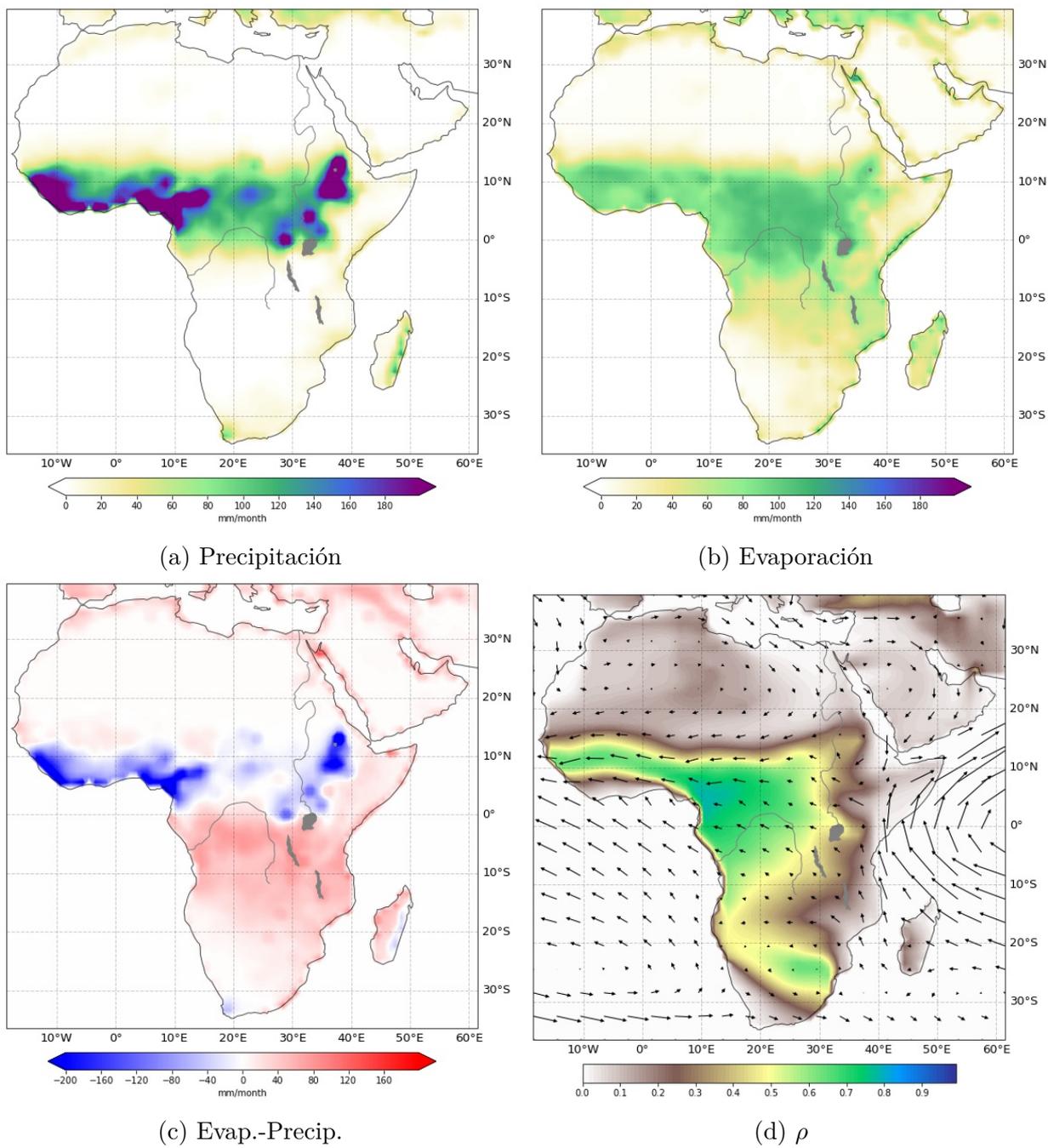


Figura 18: África en junio durante 2015-2019: Promedio de la precipitación, evaporación, Evap.-Precip. y distribución de ρ .

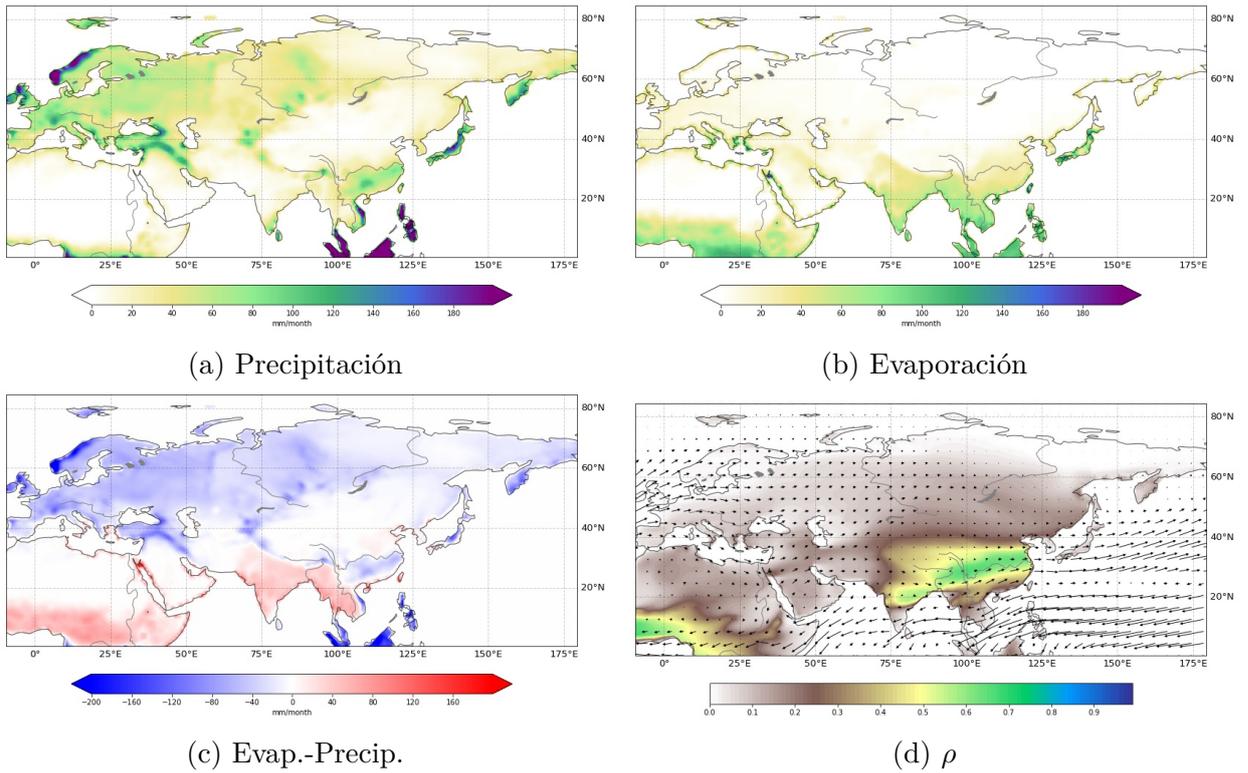


Figura 19: Eurasia en diciembre durante 2015-2019: Promedio de la precipitación, evaporación, Evap.-Precip. y distribución de ρ .

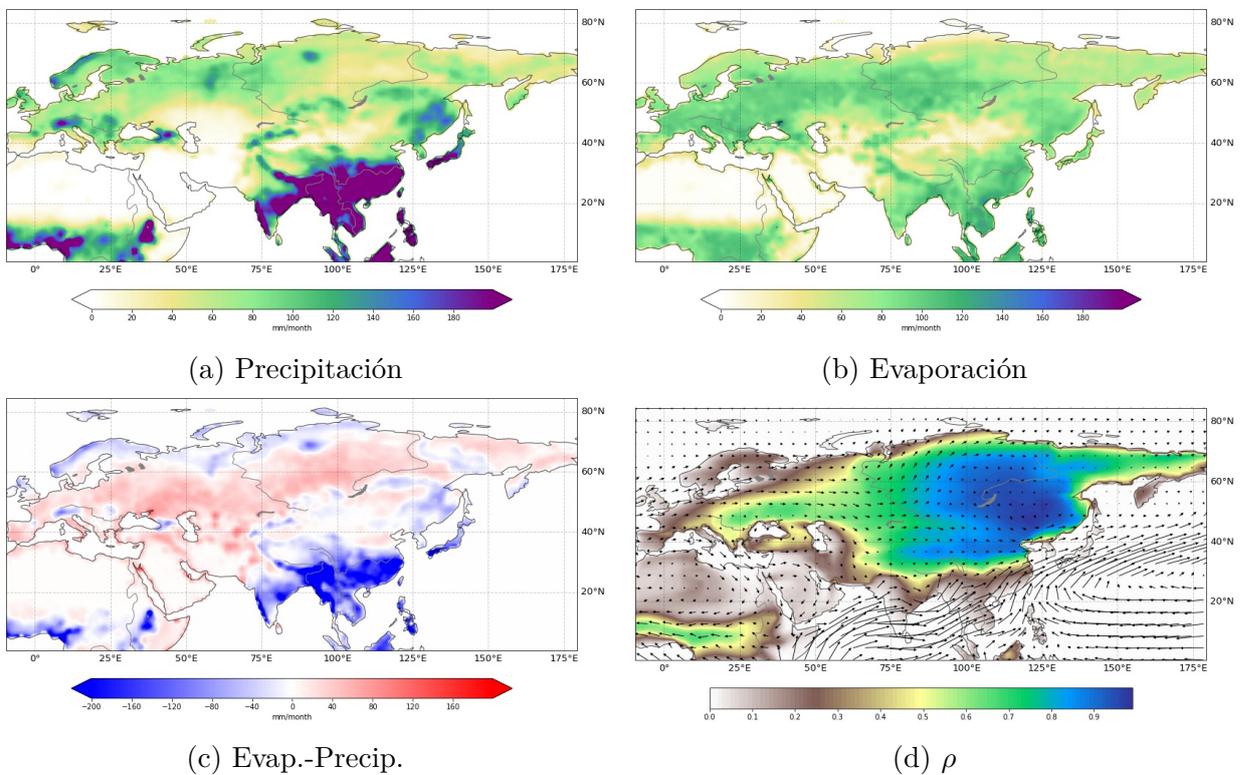


Figura 20: Eurasia en junio durante 2015-2019: Promedio de la precipitación, evaporación, Evap.-Precip. y distribución de ρ .

caen en la zona que va desde el este de Europa hasta el océano Pacífico y desde el océano Ártico hasta el norte de la India.

Sudamérica

Las figuras 21 y 22 representan los patrones de reciclaje de la humedad en Sudamérica en diciembre y junio. En diciembre las precipitaciones son muy altas en casi todo el continente, destacando la cuenca del Amazonas donde no descienden de 200 mm/mes. Siguiendo los flujos horizontales de humedad, y dado que los Andes ejercen de muro, alrededor del 60 al 80 % de las precipitaciones que caen en la cuenca del Río de la Plata se originan de fuentes continentales y no oceánicas. Se puede observar que esta precipitación reciclada es suministrada por la cuenca del Amazonas.

Durante el invierno del hemisferio sur, el patrón de reciclaje de la humedad es similar, llegando al 75 %, pero desplazado hacia el norte. Tanto en diciembre como en junio, el agua evaporada en las Guayanas y en el norte de la Amazonia es la que más repercute para mantener las precipitaciones en el centro del continente. La reducción de la evaporación, por razones como la deforestación, o el aumento de la escorrentía en esta zona podría ser potencialmente desastroso para los recursos de agua dulce de Bolivia-Paraguay-Uruguay, como se ha demostrado en el apartado 2.4.

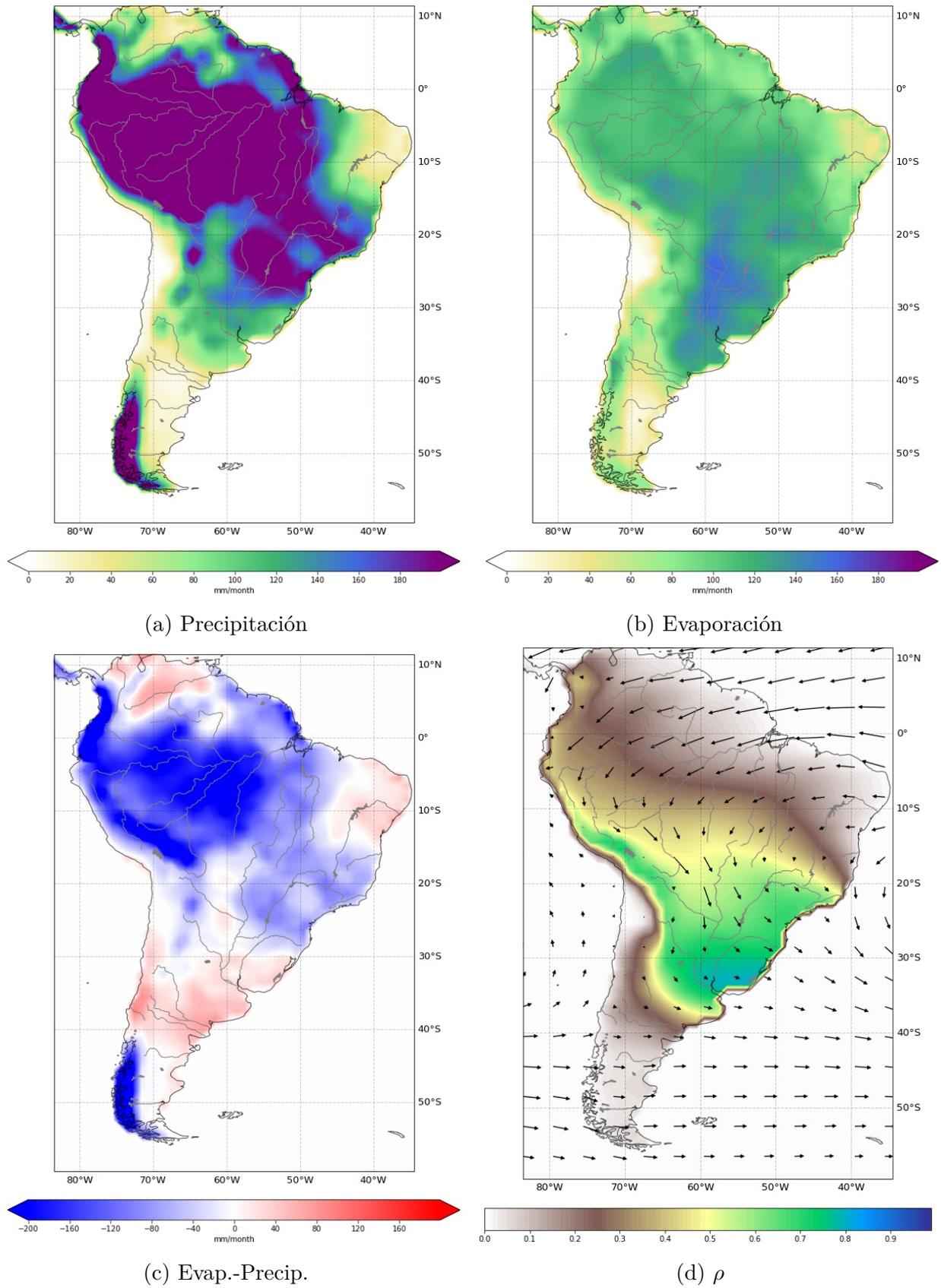


Figura 21: Sudamérica en diciembre durante 2015-2019: Promedio de la precipitación, evaporación, Evap.-Precip. y distribución de ρ .

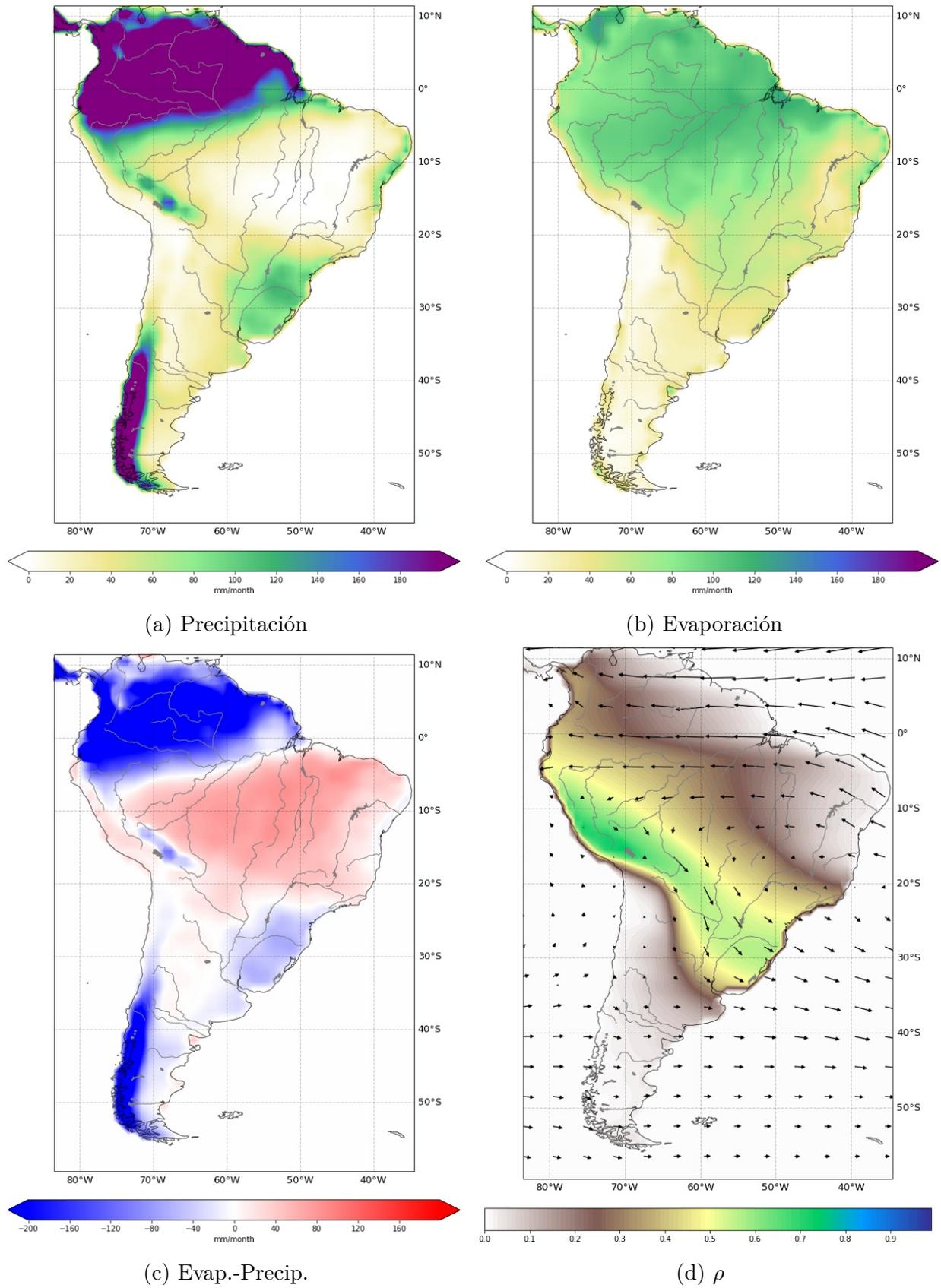


Figura 22: Sudamérica en junio durante 2015-2019: Promedio de la precipitación, evaporación, Evap.-Precip. y distribución de ρ .

3. Conclusiones

El objetivo de este estudio es comprender cómo interactúan la evaporación y la precipitación sobre los continentes. Para esto, hemos realizado un análisis detallado de la topografía y el clima global (Figs. 7, 8 y 9), que junto a la distribución del índice de reciclaje de la precipitación continental, presentado en la figura 16, ofrecen una nueva visión de la importancia del mecanismo de retroalimentación de la humedad en los continentes. El ciclo hidrológico (Fig. 14d) indica que el 30 % de las precipitaciones sobre los continentes se originan de la evaporación continental y el 44 % de la humedad evaporada de los continentes vuelve como precipitación continental.

Podemos concluir que el reciclaje de la humedad continental juega un papel importante en el clima global. En este estudio hemos identificado puntos calientes, en los que cualquier cambio en la hidrología superficial de la región tendría un gran impacto en el clima regional. En general, el reciclaje regional es más importante en las zonas más húmedas, sin embargo, puede verse muy potenciado por la topografía. Las cadenas montañosas pueden desempeñar un papel importante en el reciclaje de la humedad, ya sea 'bloqueando' la entrada de humedad en el continente (por ejemplo, las Montañas Rocosas y el Gran Valle del Rift) o 'capturando' la humedad de la atmósfera para mejorar el reciclaje continental (por ejemplo los Andes y la meseta tibetana).

Además, hemos identificado las regiones que dependen en gran medida de la evaporación continental para la aparición de precipitaciones, así como las principales fuentes de humedad para estas regiones. En América del Norte, la humedad se recicla desde el Sur hacia el noroeste, donde, por término medio, hasta la mitad de las precipitaciones pueden proceder de la evaporación continental. En América del Sur la evaporación de las Guayanas y del Amazonas parece ser el factor clave para mantener las precipitaciones a favor del viento en la cuenca del Plata. En África, hemos visto que el Congo es un importante proveedor de los recursos de agua dulce en África. Concluimos que la deforestación de estos bosques tropicales puede conducir potencialmente a la desertificación en otras partes del continente. Por último, hemos observado un fuerte aumento del índice de reciclaje de las precipitaciones continentales hacia el este sobre el continente euroasiático. Esto indica la importancia de la evaporación en occidente para mantener las precipitaciones en Siberia, Mongolia y China. A partir de los diferentes patrones de reciclaje en diciembre y junio podemos concluir que existe un mecanismo de retroalimentación positiva en el verano, donde el incremento de temperatura favorece la evaporación continental que conduce a la posterior precipitación. Esto puede observarse de forma más evidente en las diferencias de reciclaje en Eurasia (Figs. 19d y 20d).

Basándonos en nuestros resultados del apartado 2.4, concluimos que la disminución del flujo de evaporación, por ejemplo mediante la deforestación en una región donde el reciclaje de la evaporación continental es elevado, podría provocar sequías en las zonas situadas a sotavento, donde las cantidades totales de precipitación son bajas. Sugerimos que se lleven a cabo más investigaciones sobre los efectos climáticos de los cambios en el uso de la tierra en regiones, como el Amazonas y la cuenca del Río de la Plata. Donde las tendencias negativas en la precipitación, debido a la disminución del reciclaje (Fig. 13),

pueden ser ya identificables.

Este estudio ha identificado las regiones en las que el reciclaje de la humedad continental desempeña un papel importante aportando humedad o recibéndola. Una adición interesante a esta investigación sería mostrar mapas globales de las distancias de viaje y tiempos de viaje de las partículas de agua precipitadas y evaporadas. De este modo, se conocería el origen de cada partícula agua y se describiría el ciclo hidrológico más precisamente.

Por último, sería interesante generar un modelo atmosférico que defina las variables necesarias ante nuevas condiciones topográficas. Así, se podrían simular embalses o presas en regiones secas, reduciendo la escorrentía. O incluso, simular muros que detengan la advección del vapor de agua a regiones limítrofes. Por lo que, no solo se podría predecir la retroalimentación de la evaporación y la precipitación en estas regiones modificadas, sino también comprobar si son beneficiosas para la hidrología regional y sus alrededores.

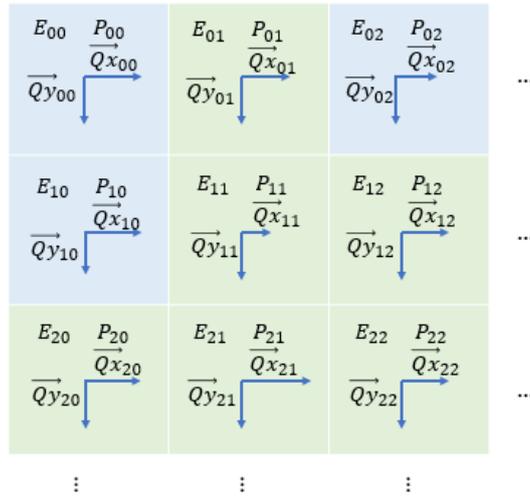


Figura 23: Datos de flujo y evaporación interpolados en una malla rectangular (Malla 1).

A. Apéndices

Este apéndice es un complemento de los métodos descritos en la sección 2.2.1 y ofrece una visión general del procedimiento computacional. Los programas utilizados, junto con los resultados, están disponibles en <https://github.com/jonrecalde>.

A.1. Obtención de datos de la Climate Data Store

De la base de datos CDS se obtienen las variables del reanálisis ERA5 de la región, mediante el Programa 1. En este, se indican las coordenadas, la temporada (meses, años), el tamaño de las celdas y las variables que sean necesarias para llevar a cabo el análisis correspondiente. Como se indica en el apartado 2.3.1, las variables necesarias para el estudio de ρ son: la evaporación (E), la precipitación (P) y el flujo de vapor de agua hacia el este (Q_x) y hacia el norte (Q_y). Junto con las que no varían en el tiempo o estacionarias, la máscara tierra-mar y el geopotencial.

A.2. Aplicación computacional del modelo Eltahir & Bras

Lo primero, se produce una matriz con el número correspondiente de celdas dependiendo de las coordenadas y el tamaño de celda. Es decir, se genera la malla 1 de tamaño (latitud x longitud), donde cada celda se indica por los subíndices $i=0,1,2,3\dots$ y $j=0,1,2,3\dots$. Se establece la máscara tierra-mar, la que nos indica que celda pertenece al continente o al océano, y se adjudican las variables que cambian en el tiempo en cada celda. De esta manera estaría completada la Malla 1, que se muestra en la figura 23.

Para poder aplicar el modelo de Eltahir & Bras hay que conseguir que cada variable encaje en su posición correcta de la malla rectangular. El Programa 2, recoloca las variables como se muestra en la figura 24a, el objetivo es que los flujos se coloquen en los bordes y la acumulación de la evaporación, precipitación en el

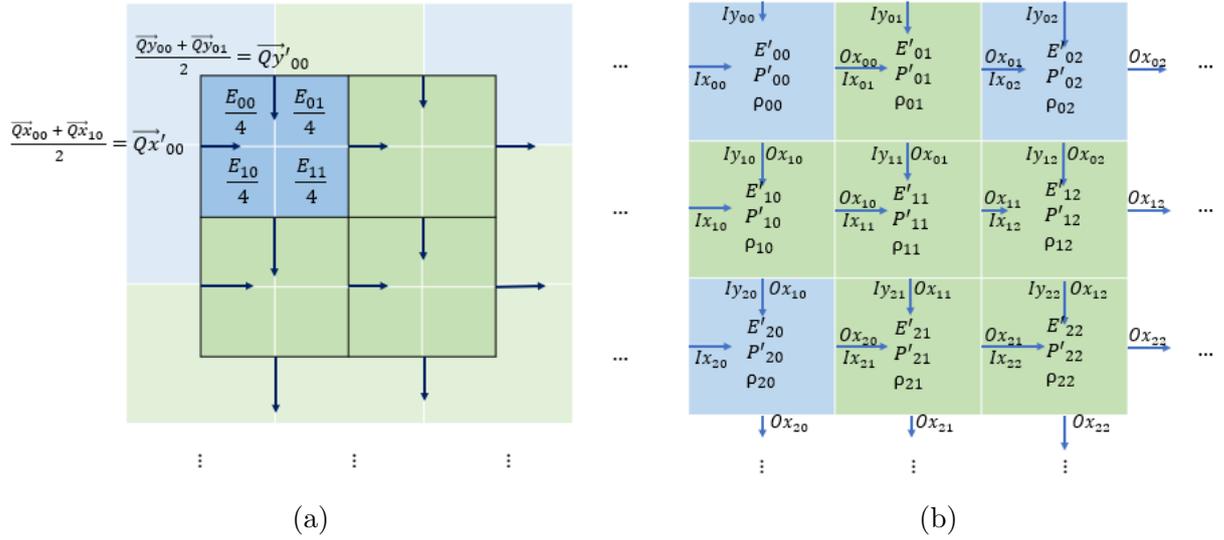


Figura 24: Generación de la Malla 2 con la redistribución de las variables para la aplicación del modelo Eltahir & Bras.

centro de la celda, para que la distribución de ρ nos devuelva valores en el centro de cada cuadrícula. Una forma de conseguir esto, es creando la Malla 2, dentro de la Malla 1, donde el punto medio de cada celda coincide con el extremo de la celda correspondiente de la segunda malla. Para la obtención de E''_{ij} y P''_{ij} en la nueva malla, se hace el promedio de las cuatro celdas que rodean a esta nueva celda. Lo mismo ocurre en el caso de la máscara tierra-mar, este promedio nos dice es mayormente tierra o mar. Asimismo, se hace el promedio de los vectores del flujo, teniendo en cuenta solo los vectores perpendiculares a el límite de la celda. Así, se tendría conseguida la Malla 2 (véase Fig. 24a).

Finalmente, en el Programa 3 se aplica el modelo de Eltahir & Bras. Donde es necesario hacer una partición de el flujo entrante I y el saliente O en cada una de las celdas, dependiendo si el vapor de agua se ha evaporado dentro de la región, I_i y O_i , o si ha sido advechado desde fuera de la región, I_e y O_e . Estas variables se utilizan en la ecuación (16) para obtener el valor de ρ .

El modelo, que está esquematizado en al figura 25, comienza generando un ρ_0 inicial a cada celda de la malla. Mediante una técnica iterativa, la función *update-rho* en el programa 3, utilizando a ecuación (14) genera una estimación de O_i y O_o a partir de Q_x, Q_y y la estimación existente de ρ . Esta función, convierte los flujos de salida en flujos de entrada, puesto que O_i y O_e para un punto de la cuadrícula son I_i e I_e para el punto adyacente (véase Fig. 24b), y considera los flujos de entrada en las frontera como flujos externos. A partir de la estimación de I_i e I_e , se obtiene una nueva estimación para ρ . El valor de ρ de cada celda se vuelve a introducir como ρ_0 . Esta iteración se repite hasta que converge ρ de cada celda de la malla, obteniendo así una distribución como se muestra en los resultados.

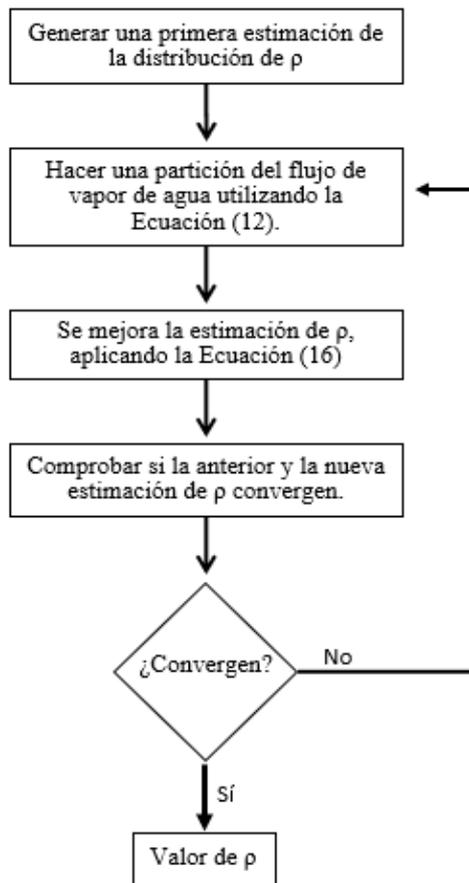


Figura 25: Esquematización del procedimiento de obtención de ρ .

Referencias

- [1] M. Bosilovich y col. “Precipitation Recycling and the Vertical Distribution of Local and Remote Sources of Water for Precipitation”. En: *AGU Spring Meeting Abstracts* (mayo de 2002), págs. 03-.
- [2] Kaye L. Brubaker, Dara Entekhabi y P. S. Eagleson. “Estimation of Continental Precipitation Recycling”. En: *Journal of Climate* 6.6 (1993), págs. 1077-1089. ISSN: 08948755, 15200442. URL: <http://www.jstor.org/stable/26197252> (visitado 26-04-2022).
- [3] Wikimedia Commons. *File:Amazon over time.png* — *Wikimedia Commons, the free media repository*. [Online; accessed 17-May-2022]. 2020. URL: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Amazon_over_time.png&oldid=480703004.
- [4] Paul A. Dirmeyer y Kaye L. Brubaker. “Contrasting evaporative moisture sources during the drought of 1988 and the flood of 1993”. En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 104.D16 (1999), págs. 19383-19397. DOI: <https://doi.org/10.1029/1999JD900222>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/1999JD900222>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1999JD900222>.
- [5] Francina Dominguez y col. “Impact of Atmospheric Moisture Storage on Precipitation Recycling”. En: *Journal of Climate* 19.8 (2006), págs. 1513-1530. DOI: 10.1175/JCLI3691.1. URL: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/19/8/jcli3691.1.xml>.
- [6] Oleg Alekseevich Drozdov. “The Hydrological cycle in the atmosphere”. En: *WMO Phys. and Dyn. Climatol. p 199-204(SEE N 75-23004 14-47)* (1974).
- [7] E. A. B. Eltahir y R. L. Bras. “Precipitation recycling in the Amazon basin”. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120.518 (1994), págs. 861-880. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49712051806>. eprint: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/qj.49712051806>. URL: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/qj.49712051806>.
- [8] Elfatih A. B. Eltahir y Rafael L. Bras. “Precipitation recycling”. En: *Reviews of Geophysics* 34.3 (1996), págs. 367-378. DOI: <https://doi.org/10.1029/96RG01927>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/96RG01927>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/96RG01927>.
- [9] *ERA5 monthly averaged data on single levels from 1959 to present*. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.49712051806>.
- [10] Keith J. Harding y Peter K. Snyder. “Modeling the Atmospheric Response to Irrigation in the Great Plains. Part II: The Precipitation of Irrigated Water and Changes in Precipitation Recycling”. En: *Journal of Hydrometeorology* 13.6 (2012), págs. 1687-1703. DOI: 10.1175/JHM-D-11-099.1. URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/13/6/jhm-d-11-099_1.xml.

- [11] Heinz Lettau, Katharina Lettau y Luiz Carlos B. Molion. “Amazonia’s Hydrologic Cycle and the Role of Atmospheric Recycling in Assessing Deforestation Effects”. En: *Monthly Weather Review* 107.3 (1979), págs. 227-238. DOI: 10.1175/1520-0493(1979)107<0227:AHCATR>2.0.CO;2. URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/107/3/1520-0493_1979_107_0227_ahcatr_2_0_co_2.xml.
- [12] R. Njitchoua y col. “Variations of the stable isotopic compositions of rainfall events from the Cameroon rain forest, Central Africa”. En: *Journal of Hydrology* 223.1 (1999), págs. 17-26. ISSN: 0022-1694. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00087-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00087-6). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169499000876>.
- [13] Atusi Numaguti. “Origin and recycling processes of precipitating water over the Eurasian continent: Experiments using an atmospheric general circulation model”. En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 104.D2 (1999), págs. 1957-1972. DOI: <https://doi.org/10.1029/1998JD200026>. eprint: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/1998JD200026>. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/1998JD200026>.
- [14] Jhoana Rendón y col. “INFLUENCIA DEL ALARGAMIENTO EN LA DURACIÓN DE LA TEMPORADA SECA DEL AMAZONAS EN EL TRANSPORTE DE HUMEDAD HACIA COLOMBIA Y EL NORTE DE SURAMÉRICA”. En: ago. de 2016.
- [15] Carlos Andrés Sánchez Altamirano. “Estimation of the precipitation recycling ratio”. En: (2016).
- [16] Andreas Stohl y Paul James. “A Lagrangian Analysis of the Atmospheric Branch of the Global Water Cycle. Part II: Moisture Transports between Earth’s Ocean Basins and River Catchments”. En: *Journal of Hydrometeorology* 6.6 (2005), págs. 961-984. DOI: 10.1175/JHM470.1. URL: https://journals.ametsoc.org/view/journals/hydr/6/6/jhm470_1.xml.
- [17] Lide Tian y col. “Relationship between D and 18O in precipitation on north and south of the Tibetan Plateau and moisture recycling”. En: *Science in China Series D: Earth Sciences* 44 (sep. de 2001), págs. 789-796. DOI: 10.1007/BF02907091.
- [18] Wikipedia. *Cuenca del Amazonas — Wikipedia, La enciclopedia libre*. [Internet; descargado 17-mayo-2022]. 2022. URL: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Cuenca_del_Amazonas&oldid=143240648.
- [19] Wikipedia. *Lluvia orográfica — Wikipedia, La enciclopedia libre*. [Internet; descargado 20-mayo-2022]. 2021. URL: https://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Lluvia_orogr%C3%A1fica&oldid=139839100.
- [20] Wusheng Yu y col. “Stable Isotope Variations in Precipitation and Moisture Trajectories on the Western Tibetan Plateau, China”. En: *Arctic Antarctic and Alpine Research - ARCT ANTARCT ALP RES* 39 (nov. de 2007), págs. 688-693. DOI: 10.1657/1523-0430(07-511)[YU]2.0.CO;2.