



**UNIVERSIDAD  
DE ANTIOQUIA**

**EFECTOS DE LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL DE  
LA CUENCA DEL AMAZONAS EN LA EVAPOTRANSPIRACIÓN  
REGIONAL: ANÁLISIS DE SIMULACIONES CON EL MODELO DE  
SUPERFICIE NOAH-MP.**

Autora

Yeniffer Andrea Córdoba González

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021



Efectos de los cambios en la cobertura vegetal de la cuenca del Amazonas en la evapotranspiración regional: Análisis de simulaciones con el modelo de superficie Noah-MP

**Yeniffer Andrea Córdoba González**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniera Ambiental**

Asesores:

Paola Andrea Arias Gómez, PhD. Ciencias Geológicas  
John Alejandro Martínez Agudelo, PhD. Hidrometeorología

Línea de Investigación:

Cambio Ambiental

Grupo de Investigación:

Grupo de Investigación en Ingeniería y Gestión Ambiental - GIGA

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2021

## Agradecimientos

Este trabajo de grado fue apoyado por la Universidad de Antioquia, mediante el proyecto CODI PRG2017-16264. Agradezco infinitamente a mis padres Nancy González y Hernan Antonio Córdoba por su amor tangible, profundo e incondicional, por su incansable esfuerzo, por su constancia y por enseñarme que la educación es la herencia más preciada; por confiar profundamente en mí y llenarme de fortaleza en los momentos en que llegué a perder mi horizonte, porque por ellos vivo, existo, lucho y resisto; y por ellos y por todos aquellos que mantienen viva la llama de la esperanza y la firme convicción de que a través del ejercicio de la educación lograremos la transformación cultural y social que necesitamos para direccionar nuestros esfuerzos conjuntos en búsqueda de la libertad, justicia y equidad social. Agradezco a mis amigos y amigas porque me han enseñado el valor de la lealtad y del poder inconmensurable de la unión en la lucha por un objetivo común. Agradezco a la invicta y fecunda Universidad de Antioquia, mi alma máter, que me acogió aun cuando mis metas no fueron claras y mis objetivos inciertos, pero en el arduo camino me orientó a descubrir y encaminar mi vocación; gracias UdeA porque me forjaste en pensamiento crítico y me enseñaste que la victoria implica tenacidad y persistencia. Agradezco a mis asesores, guías y orientadores Paola Andrea Arias Gómez y John Alejandro Martínez Agudelo, que más que profesionales íntegros y eminentes, son seres humanos con vocación por la educación, por la construcción de conocimiento y por promover el diálogo de saberes; a ustedes, mi más profundo respeto, admiración y gratitud por el tiempo invertido aun cuando los procesos fueron lentos y el camino intrincado, porque siempre han sido mi referente y motivación. Agradezco también a mi Team B de Girl Power, por sacar fuerzas y ánimos para sobrellevar el agotamiento en las noches efímeras que de repente se hacían días, por transformar el agobio en mecanismo de fuerza, porque para ustedes perder la esperanza nunca fue una opción. Para todos y todas, amor eterno e insondable gratitud.

# Efectos de los cambios en la cobertura vegetal de la cuenca del Amazonas en la evapotranspiración regional: Análisis de simulaciones con el modelo de superficie Noah-MP

## Resumen

La evapotranspiración en la cuenca del Río Amazonas representa un papel fundamental en el ciclo hidrológico debido a su influencia en los procesos que involucran la interacción suelo-atmósfera. Estos procesos dependen en gran medida de las características asociadas a la dinámica de la vegetación, que está determinada por los diferentes usos del suelo que tienen lugar en esta región, donde una parte importante del agua disponible en la atmósfera, y que alimenta los procesos convectivos, proviene del reciclaje de humedad. Considerando esto, se realiza el estudio de la relación existente entre la variabilidad espacio-temporal de la evapotranspiración y el cambio de cobertura terrestre en seis regiones de la Amazonía, de acuerdo con un escenario de deforestación previamente definido en otros estudios y usando el modelo de superficie terrestre Noah-MP. En primer lugar se hace una comparación entre los resultados de una simulación de control con Noah-MP y los estimados de evapotranspiración del reanálisis ERA5. Encontramos que NoahMP simula considerablemente bien el patrón de distribución espacial y temporal de la estacionalidad pero con importantes diferencias estadísticamente significativas en su magnitud. En este estudio también se lleva a cabo el análisis de sensibilidad del modelo NoahMP ante el reemplazo de una fracción de bosque por pastizales (sabanas). Los resultados indican que los mayores impactos de la remoción de la vegetación natural tipo bosque se localizan principalmente en la región del Arco de la Deforestación y la costa oriental del Norte y Centro de la Amazonia, evaluando la eficiencia del modelo con respecto a los datos observacionales de reanálisis. Las diferencias de evapotranspiración bajo el escenario de deforestación fueron calculadas con respecto al escenario representativo de las condiciones actuales, encontrando que el cambio en la evapotranspiración simulada presenta una reducción significativa, así como disminuciones considerables principalmente durante la transición y el establecimiento de la época seca en la región del Arco de Deforestación. Por consiguiente, los hallazgos obtenidos a partir de este Trabajo de Grado dan cuenta de la importancia fundamental de considerar los efectos que pueden tener las perturbaciones en el ecosistema de bosque amazónico sobre la dinámica atmosférica regional.

**Palabras clave**— Evapotranspiración, deforestación Amazonas, simulación de flujos en superficie, Modelo de Superficie Terrestre, reanálisis climático

---

## Tabla de contenido

<b>Capítulo 1. Introducción, objetivos y marco teórico</b>	<b>4</b>
1.1 Introducción .....	4
1.2 Objetivos .....	6
1.3 Marco teórico .....	7
<b>Capítulo 2. Datos y metodología</b>	<b>9</b>
2.1 Selección del área de estudio y extracción de datos .....	9
2.1.1 Descripción de los datos .....	9
2.2 Caracterización climatológica .....	9
2.3 Modelo de superficie Noah-MP .....	10
2.4 Tratamiento de datos .....	10
<b>Capítulo 3. Resultados y análisis</b>	<b>11</b>
3.1 Climatología según ERA5-Land .....	11
3.2 Sesgos de la simulación de control.....	14
3.2.1 Ciclo anual de evapotranspiración total y precipitación .....	15
3.2.2 Ciclo diurno de evapotranspiración .....	18
3.3 Efectos de la deforestación en las componentes de la evapotranspiración .....	20
3.4 Evapotranspiración total bajo el escenario de deforestación .....	29
<b>Capítulo 4. Conclusiones</b>	<b>31</b>
<b>Referencias bibliográficas</b>	<b>33</b>
<b>Anexos</b>	<b>38</b>
A. Medidas estadísticas y pruebas de significancia	38
B. Correlaciones y significancia estadística	44

## Índice de figuras

1. Dominio considerado para analizar el cambio de la evapotranspiración en la cuenca amazónica. AD: Arco de Deforestación, CA: Centro de la Amazonia, NA: Norte de la Amazonia, NO: Norte de la Orinoquía, PM: Piedemonte amazónico, SO: Sur de la Orinoquía..... 8
2. Mapa de cobertura y usos del suelo para las simulaciones de CTRL (arriba) y DEFO (abajo) ..... 12
3. Distribución espacial de evapotranspiración (izquierda) y precipitación (derecha) en mm/día, durante las temporadas de DEF, MAM, JJA y SON, de acuerdo al reanálisis de ERA5-Land para el período de 1998-2007 ..... 13
4. Ciclo anual climatológico de a) evapotranspiración y b) precipitación para las seis regiones de la cuenca amazónica, según los datos del reanálisis ERA5-Land..... 14
5. Evapotranspiración (en mm/día) para las temporadas de a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON según las simulaciones para el escenario CTRL propuesto por Alves et al. (2017) (primera columna), el reanálisis de ERA5-Land (segunda columna) y las diferencias entre CTRL y ERA5-Land (tercera columna) ..... 16
6. Diferencias de la evapotranspiración media anual simulada bajo el escenario CTRL con respecto al reanálisis ERA5-Land para a) Norte de Amazonía, b) Centro de Amazonía, c) Norte de Orinoquía, d) Sur de Orinoquía, e) Arco de deforestación y f) Piedemonte Amazónico ..... 17
7. Ciclo diurno promedio de evapotranspiración total según ERA5 (línea verde) y el escenario CTRL (línea roja), para las regiones de a) Arco de deforestación, b) Norte de Amazonía, c) Centro de Amazonía, d) Piedemonte Amazónico, e) Norte de Orinoquía y f) Sur de Orinoquía. Las horas corresponden a hora local de Colombia (UTC-5) ..... 19
8. Evaporación promedio (en mm/día) de a) ECAN, b) ETRAN, c) EDIR y d) Evapotranspiración Total, con datos provenientes del escenario DEFO (primera columna) durante DEF para el período 1998-2007. La tercera columna muestra las diferencias entre DEFO y el escenario CTRL..... 21
9. Evaporación promedio (en mm/día) de a) ECAN, b) ETRAN, c) EDIR y d) Evapotranspiración Total, con datos provenientes del escenario DEFO (primera columna) durante MAM para el período 1998-2007. La tercera columna muestra las diferencias entre DEFO y el escenario CTRL..... 22
10. Evaporación promedio (en mm/día) de a) ECAN, b) ETRAN, c) EDIR y d) Evapotranspiración Total, con datos provenientes del escenario DEFO (primera columna) durante JJA para el período 1998-2007. La tercera columna muestra las diferencias entre DEFO y el escenario CTRL..... 23

11. Anomalías de las componentes de la evapotranspiración en el escenario DEFO calculadas con respecto al escenario de CTRL para el período de 1998-2007.....	25
12. Diagrama de cajas y bigotes de la evapotranspiración media mensual para las simulaciones CTRL (azul) y DEFO (naranja) en a) Arco de Deforestación y b) Centro de Amazonía .....	26
13. Ciclo diurno promedio de a) EDIR, b) ECAN, c) ETRAN y d) ETOTAL, para el escenario CTRL (línea punteada) y DEFO (línea roja), en la región del Arco de Deforestación .....	28
14. Anomalías respecto al ciclo medio anual y regresión lineal para la determinación de tendencias en a) Arco de Deforestación, b) Norte de Orinoquía y c) Sur de Orinoquía, para los escenarios CTRL (primera columna) y DEFO (segunda columna) .....	14
B1. Correlaciones de anomalías DEFO vs CTRL para la región del A. de Deforestación .....	44
B2. Correlaciones de anomalías DEFO vs CTRL para la región del N. de Orinoquía ...	46
B3. Correlaciones de anomalías DEFO vs CTRL para la región del S. de Orinoquía ....	48

## Índice de tablas

Tabla 1. Evapotranspiración media anual y error relativo porcentual de la simulación de CTRL respecto a ERA5 .....	15
Tabla 2. Medidas estadísticas de las diferencias entre DEFO y CTRL.....	24
A1. Medidas estadísticas para la región del Arco de Deforestación .....	38
A2. Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del A. Deforestación ..	38
A3. Prueba de significancia para tendencias en la región del Arco de Deforestación.....	38
A4. Medidas estadísticas para la región del Centro de Amazonía.....	39
A5. Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del C. de Amazonía...	39
A6. Prueba de significancia para tendencias en la región del Centro de Amazonía .....	39
A7. Medidas estadísticas para la región del Norte de Amazonía .....	40
A8. Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del N. de Amazonía ..	40
A9. Prueba de significancia para tendencias en la región del Norte de Amazonía .....	40
A10. Medidas estadísticas para la región del Norte de Orinoquía .....	41
A11. Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del N. de Orinoquía ..	41
A12. Prueba de significancia para tendencias en la región del Norte de Orinoquía.....	41
A13. Medidas estadísticas para la región del Piedemonte Amazónico.....	42
A14. Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del P. Amazónico .....	42
A15. Prueba de significancia para tendencias en la región del Piedemonte Amazónico .....	42
A16. Medidas estadísticas para la región del Sur de Orinoquía.....	43
A17. Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del Sur de Orinoquía ..	43
A18. Prueba de significancia para tendencias en la región del Sur de Orinoquía .....	43
B1. Prueba de significancia para correlaciones de anomalías DEFO y CTRL en la región del Arco de Deforestación .....	45
B2. Prueba de significancia para correlaciones de anomalías DEFO y CTRL en la región del Norte de Orinoquía .....	47
B3. Prueba de significancia para correlaciones de anomalías DEFO y CTRL en la región del Sur de Orinoquía.....	49

# Capítulo 1. Introducción, objetivos y marco teórico

## 1.1 Introducción

Durante los últimos años, la deforestación ha constituido uno de los problemas de mayor relevancia en el contexto de la crisis climática y ambiental que vive el planeta, generando afectaciones a nivel regional y global como consecuencia de las alteraciones que modifican la interacción entre las componentes del sistema climático. Lo anterior debido a que las modificaciones en los balances de masa y energía, a través del intercambio de los flujos radiativos y no radiativos entre la superficie terrestre y la atmósfera (Davin & De Noblet 2010), están supeditados a los ciclos biológicos de las plantas y a su fenología.

Se ha evidenciado que la transformación de los ecosistemas tropicales, principalmente como consecuencia de los procesos de deforestación y expansión de la frontera agrícola, ha provocado presiones e impactos significativos en la biodiversidad, el clima y diversos servicios ecosistémicos (Upadhyay et al. 2006). Como consecuencia de estas implicaciones, este tipo de cambios han generado perturbaciones climáticas, socioeconómicas y políticas, que, a su vez, han afectado la calidad de vida de la población en todo el mundo (Turner et al. 2007).

Los países ubicados sobre las regiones tropicales exhiben una mayor vulnerabilidad ante las posibles consecuencias y afectaciones asociadas a la falta de atención y regulación de la deforestación, que se evidencian principalmente en los ecosistemas de bosque tropical, dado que la energía disponible que alimenta los ciclos biológicos de los seres vivos que se albergan en estas regiones favorece la abundancia y riqueza de especies (Leigh et al. 2004). Lo anterior se traduce en una vasta biodiversidad que proporciona las condiciones óptimas para el desarrollo de múltiples actividades que hacen parte de las dinámicas socio-económicas de estos países, como es el caso de países amazónicos como Bolivia, Brasil, Colombia, Ecuador, Perú y Venezuela. En estos países, uno de los elementos principales de desarrollo económico involucra la explotación de sus recursos naturales debido a múltiples actividades que implican cambios físico-bióticos en las zonas donde persisten los cambios de usos del suelo y la transición de ecosistemas naturales a áreas parcial o completamente intervenidas, con el objetivo de satisfacer la demanda de los diferentes servicios ecosistémicos en función de su expansión demográfica (Perz et al. 2005). Sin embargo, la disponibilidad de los recursos se ha visto constantemente amenazada por prácticas extractivistas desmesuradas como la minería extensiva, el aprovechamiento de especies maderables, la praderización para la plantación de cultivos ilícitos, el uso del suelo para ganadería, entre otras, donde la sobreexplotación excede la capacidad de carga de los ecosistemas y esto, a su vez, conlleva a una escasez de los diferentes servicios ecosistémicos.

En Brasil, la ganadería y la agricultura, en conjunto con la expansión de las tierras de cultivo de soja, se han convertido en grandes amenazas para la permanencia de áreas boscosas durante los últimos años (Costa et al. 2007). Esto ha constituido un factor detonante para reclamar la atención de los investigadores y académicos cuyos estudios realizados en esta región han permitido comprobar que la vegetación es un factor fundamental y de gran influencia sobre el clima (Betts et al. 2004, Bagley et al. 2014, Zemp et al. 2017, Agudelo et al. 2019, Arias et al. 2020) y que la selva amazónica, al generar aproximadamente la mitad de su propia lluvia a través del reciclaje de humedad (Swann et al. 2015, Lovejoy & Nobre 2018), y una contribución directa del 70% de la evaporación advectada hacia la cuenca del Río de la Plata (Van der Ent et al. 2010) e incidiendo en un ~20 - 24% de la precipitación media

sobre esta región (Martínez & Domínguez, 2014; Zemp et al. 2014) reúne todas las características biogeofísicas para ser considerada como un macro ecosistema de especial importancia para su protección. Lo anterior se sustenta, por ejemplo, considerando un escenario devastador, en el que se mantengan las tendencias actuales de deforestación, que conllevaría a la posibilidad de que para el año 2050, alrededor del 40% de los bosques amazónicos haya desaparecido (Soares-Filho et al. 2006).

Por consiguiente, teniendo en cuenta que la evapotranspiración que se origina en zonas boscosas representa un alto porcentaje de la precipitación en las mismas regiones donde se produce (Katul et al. 2012; Zemp et al. 2014), se infiere que la deforestación intensiva podría provocar modificaciones en el ciclo hidrológico (Correia et al. 2008). En concordancia con diversos estudios que se han venido realizando sobre los efectos de la deforestación en variables hidroclimatológicas, se sugiere que si continúan las tendencias de extracción de los bosques tropicales y su conversión a otro tipo de cobertura, podría desencadenarse la ocurrencia de unas condiciones climáticas más cálidas y secas como una posible consecuencia de la disminución de la tasa de evapotranspiración (Sampaio et al. 2007, Costa & Pires, 2010; Von Randow et al. 2012, Swann et al. 2015, Alves et al. 2017, Ruiz-Vásquez et al. 2020). Esta tasa está condicionada por las interacciones biosfera-atmósfera representadas por los procesos de interceptación de la precipitación y evaporación. Estos procesos se llevan a cabo a través de la estructura del dosel en áreas boscosas y exhiben una relación directamente proporcional, puesto que una disminución en la interceptación causada por la ausencia de la biomasa que favorece el intercambio gaseoso entre las plantas y la atmósfera, implica la reducción de los niveles de evapotranspiración (Dickinson & Henderson 1988, Katul et al. 2012).

El panorama en Colombia no es muy optimista, puesto que, a pesar de que en el país existe una legislación ambiental erigida en función de velar por la protección del medio ambiente, constantemente se identifican ambigüedades en el accionar de las instituciones y entidades gubernamentales encargadas de hacer efectivo el cumplimiento de la norma. No obstante, a pesar de la delimitación de áreas protegidas en Colombia, que funciona como un instrumento para salvaguardar el patrimonio natural que se alberga en estas zonas de importancia hídrica y ecológica, se sigue evidenciando un porcentaje significativo de detecciones tempranas de deforestación localizadas en áreas del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), siendo los parques nacionales naturales Serranía de Chiribiquete y La Macarena, dos de los parques nacionales que continúan presentando mayores afectaciones (IDEAM, 2019).

Mediante los últimos boletines de detecciones tempranas de deforestación publicados por el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMByC), se identifica un número importante de núcleos de deforestación concentrados principalmente sobre el arco de deforestación de la Amazonia colombiana, que abarca parte de los departamentos de Caquetá, Putumayo, Meta y Guaviare (MinAmbiente - IDEAM 2016), donde las tendencias de deforestación persisten y exhiben un aumento con relación a los períodos analizados previamente (IDEAM 2019).

Ante esta problemática de interés global, los avances que están siendo desarrollados a través de la modelación del sistema climático se han ido convirtiendo en una herramienta cada vez más importante para el análisis de estos impactos (Upadhyay et al. 2006). Lo anterior debido a que la posibilidad de modelar la influencia de los cambios en el uso y cobertura del suelo en el sistema climático es un elemento clave para contribuir a la formulación de políticas ambientales y estrategias de manejo, adaptación y mitigación más efectivas (Agarwal et al.

2001). Es por esta razón que en el presente Trabajo de Grado hemos utilizado los resultados obtenidos en el experimento de modelación realizado por Alves et al. (2017) para ejecutar simulaciones utilizando el modelo de superficie Noah-MP y así poder analizar el cambio en la evapotranspiración en seis regiones de la cuenca amazónica bajo un escenario de deforestación (DEFO), y un escenario de línea base (CTRL), con la finalidad de contrastar los cambios simulados con los registros de reanálisis. Para esta finalidad, nos hemos basado en el análisis estadístico de conjuntos de datos, el cual constituye una de las metodologías más aplicadas en múltiples áreas de estudio, y que es ampliamente usada con el objetivo de obtener resultados que ayuden a identificar y comprender los factores que determinan tendencias, comportamientos y patrones identificados en las variables que son objeto de estudio. Particularmente, en estudios hidroclimatológicos y meteorológicos, es pertinente el uso de estas herramientas para establecer posibles causas y analizar los distintos cambios en las componentes del sistema climático, y cómo éstos contribuyen a la modificación de variables interrelacionadas. Por consiguiente, en este trabajo se lleva a cabo el análisis de conjuntos de datos para la escala temporal horaria y mensual, con el fin de identificar cambios asociados a la estacionalidad y a la variación del ciclo diurno de la evapotranspiración en las regiones de interés. Esto se lleva a cabo mediante el análisis de series de tiempo y las diferencias en las fluctuaciones que éstas presentan, así como su relación con otros procesos físicos que condicionan su comportamiento y que explican una parte de los hallazgos presentados.

## 1.2 Objetivos

### Objetivo general

Identificar posibles cambios en la evapotranspiración sobre la región Amazónica bajo diferentes escenarios de cobertura vegetal mediante un modelo de superficie (Noah-MP).

### Objetivos específicos

1. Cuantificar el cambio en la evapotranspiración bajo escenarios de cambio de cobertura vegetal y usos del suelo en Suramérica tropical bajo condiciones atmosféricas representativas del período 1998-2007, con el fin de establecer comparaciones entre simulaciones de cambio de cobertura y la simulación de las condiciones actuales.
2. Identificar cambios en los ciclos diurnos y anuales de la evapotranspiración asociados al cambio de la cobertura vegetal en la cuenca del río Amazonas.
3. Establecer comparaciones entre las salidas del modelo de superficie Noah-MP, identificando los sesgos con respecto a los registros provenientes del reanálisis de ERA5-Land.
4. Discutir posibles consecuencias de la deforestación en la cuenca amazónica y sus efectos en el aporte de humedad atmosférica y modificación del balance hídrico en la escala regional.

### 1.3 Marco teórico

Los procesos de transporte de humedad en la atmósfera constituyen un factor de vital importancia en el estudio de las interacciones de las diferentes componentes del ciclo hidrológico. Estas interacciones tienen la capacidad de regular los ciclos de vida de todas las especies presentes en la Tierra, y garantizar la preservación de los servicios ecosistémicos (Jackson et al. 2001, Wagener et al. 2010), ejerciendo un control importante sobre la biodiversidad, la disponibilidad de agua y la planificación y gestión de los recursos naturales.

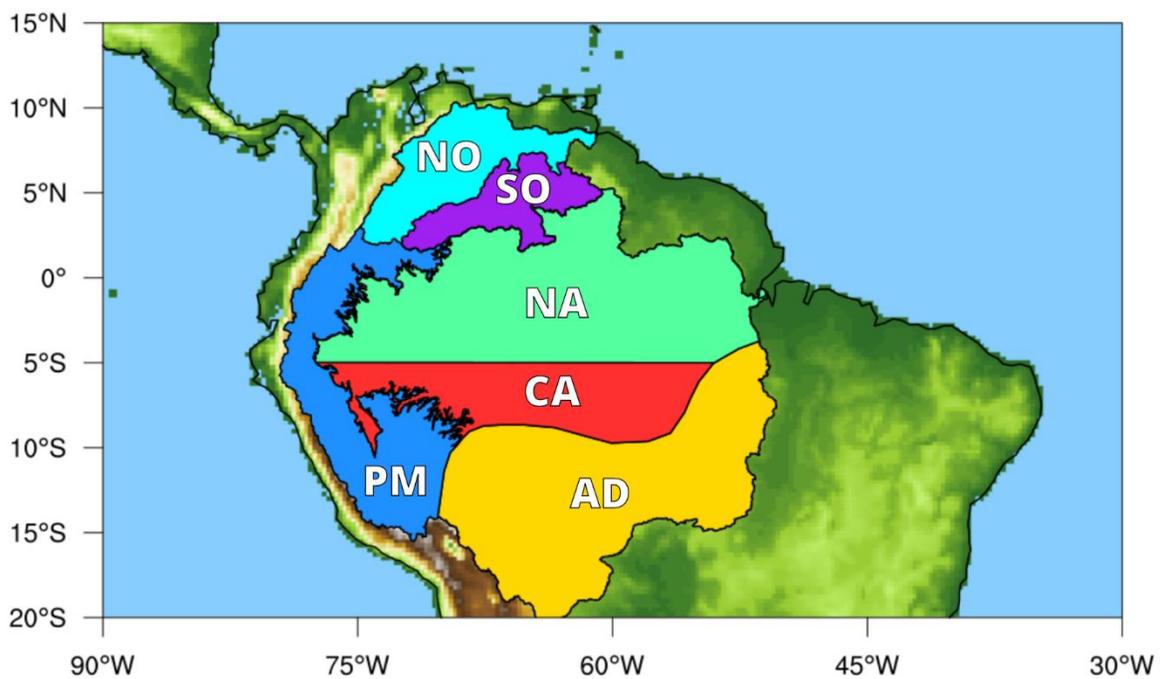
Estudios sobre los efectos de cambios en la cobertura vegetal en el ciclo hidrológico han implementado Modelos de Superficie Terrestre (LSM por sus iniciales en inglés). En este Trabajo de Grado, se propone el uso del modelo Noah with Multi-Parameterizations (Noah-MP), que permite la cuantificación del aporte de la evapotranspiración a la humedad local, así como los flujos de superficie que involucran el intercambio entre la atmósfera, la vegetación y el suelo, simulando el intercambio de agua, energía y momentum entre la atmósfera, la capa vegetal y los niveles más superficiales del suelo (Yang et al. 2011; Gao et al. 2015). El modelo Noah-MP ha sido implementado en estudios anteriores con el objeto de cuantificar la contribución de la evapotranspiración a la precipitación en Suramérica y el Caribe para diferentes escenarios de cobertura vegetal en el Amazonas (Yang & Domínguez, 2019) y escenarios de cambio climático (Chow et al. 2018), así como identificar los posibles cambios en el patrón de transporte de humedad atmosférica en esta región y la sensibilidad asociada a la simulación de los cambios en el almacenamiento y flujos de humedad propuestos por diferentes esquemas de agua subterránea (Martínez et al. 2016). Este modelo tiene una larga historia de desarrollo a través de la cooperación interinstitucional (Niu et al. 2011) y ha sido ampliamente utilizado por el Centro Nacional de Predicción Ambiental (NCEP) de la Administración Nacional para el Océano y la Atmósfera (NOAA) de Estados Unidos, en pronósticos operativos mediante el modelo comunitario Weather Research and Forecasting (WRF). Los esfuerzos desarrollados han mejorado el rendimiento del modelo tanto en simulaciones tipo “fuera de línea” (Mitchell et al. 2004) como en modos acoplados a la atmósfera (Ek et al. 2003; Barlage et al. 2015).

Este modelo también ha sido implementado en el estudio realizado por Yang et al. (2011) para evaluar su desempeño con respecto a diversas observaciones satelitales y terrestres sobre diferentes cuencas hidrográficas en el mundo, a través de seis experimentos desarrollados en la versión original del modelo inicial Noah. Estos resultados muestran mejoras transitorias en la simulación de la escorrentía, la humedad del suelo, la nieve y la temperatura superficial, a pesar de mostrar un aumento considerable en el tiempo de cálculo con relación a la versión actual Noah-MP.

El estudio de Cai et al. (2014), quienes realizan simulaciones de diferentes variables hidrológicas como la escorrentía, el agua subterránea, la evapotranspiración, humedad del suelo, entre otras, sugiere que el modelo Noah-MP presenta un desempeño diferente de acuerdo a los tipos de cobertura vegetal presentes en el área de estudio. En particular, se identifica que para tipos de cobertura considerados más naturales como pastizales, bosques y matorrales, se tiene una mejor simulación; mientras que para la cobertura donde se realizan actividades relacionadas con usos agrícolas, el modelo no funciona bien. Esto probablemente se debe a la parametrización que el modelo integra para representar la dinámica de la vegetación, puesto que puede detectar procesos naturales pero no se desempeña de manera

eficiente en la identificación de áreas donde hay crecimiento de cultivos intervenidos antrópicamente.

Este Trabajo de Grado plantea el análisis de simulaciones mediante el modelo NoahMP considerando una cobertura vegetal similar a la actual (CTRL) y un escenario de deforestación en el Amazonas (DEFO) planteado por Alves et al. (2017). Para ello, se consideran las regiones presentadas en la Figura 1.



**Figura 1.** Dominio considerado para analizar el cambio de la evapotranspiración en la cuenca amazónica. AD: Arco de Deforestación, CA: Centro de la Amazonia, NA: Norte de la Amazonia, NO: Norte de la Orinoquía, PM: Piedemonte amazónico, SO: Sur de la Orinoquía.

## Capítulo 2. Datos y metodología

### 2.1 Selección del área de estudio y extracción de datos

Con el objetivo de analizar los cambios en la evapotranspiración asociados a la deforestación en la cuenca amazónica, se define el dominio espacial con base en el estudio de Arias et al. (2020), el cual fue subdividido en 6 regiones: AD: Arco de la Deforestación, CA: Centro de la Amazonia, NA: Norte de la Amazonia, NO: Norte de la Orinoquía, PM: Piedemonte amazónico, SO: Sur de la Orinoquía (Figura 1). Nuestro criterio para la selección de estas regiones se fundamenta en la diferencia entre los usos del suelo y las estrategias de conservación asociadas a la importancia que representan estas zonas con altos índices de vegetación, para la regulación hídrica y su aporte a la disponibilidad de humedad atmosférica. En consecuencia, para analizar la variabilidad de la evapotranspiración (ET) en estas regiones, basamos nuestro estudio en dos escalas temporales relacionadas con el ciclo diurno y el ciclo anual; así, utilizamos datos del reanálisis ERA5-Land correspondientes al promedio mensual por hora del día de para tener acumulados de evapotranspiración cada tres horas de todos los meses del año durante el período 1998-2007. Los datos fueron extraídos para el dominio ubicado entre 90°W–30°W y 20°S–15°N, y promediados espacialmente para las seis regiones. Los datos de ERA5-Land tienen una resolución horizontal de 0.1° X 0.1° (~9 km) y una cobertura vertical que abarca la columna de suelo desde 2 metros sobre el nivel de la superficie hasta una profundidad de 2,89 m (ECMWF & Muños-Sabater et al, 2021).

#### 2.1.1 Descripción de los datos

Los datos de evapotranspiración empleados para describir la climatología de las regiones consideradas en este estudio fueron extraídos del Climate Data Store de Copernicus, para promedios mensuales por hora del día, seleccionando datos con un intervalo de muestreo de 3 horas que abarca las 3:00, 6:00, 9:00, 12:00, 15:00, 18:00, 21:00 y 00:00 horas, en unidades de tiempo UTC, que posteriormente fueron convertidas a la hora local para facilitar la interpretación de los resultados. Estos datos fueron desacumulados y promediados según el objetivo de este estudio para obtener la caracterización climatológica en las escalas anual y diurna.

### 2.2 Caracterización climatológica

Para analizar las diferencias en la evapotranspiración de las seis regiones durante el período considerado, es pertinente identificar cómo se distribuye espacial y temporalmente esta variable, y para ello se grafica la climatología obtenida como el promedio estacional de todos los años (Figura 3), mediante el uso de las herramientas y comandos de visualización de datos climáticos, proporcionados por el lenguaje NCL del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR). La Figura 2 muestra los patrones espaciales de evapotranspiración y precipitación a lo largo del año para todo el período de estudio (1998-2007).

## 2.3 Modelo de superficie Noah-MP

Para analizar la influencia del cambio de la cobertura terrestre sobre la cuenca del Amazonas en las seis regiones consideradas, se realizan un experimento correspondiente a la simulación que representa la cobertura terrestre actual (CTRL), tomado de Wilson y Henderson-Sellers (1985), y un experimento de la simulación representativa del 28% de área deforestada en la cuenca del Amazonas (DEFO), propuesto por Aguiar et al. (2016) e implementado por Alves et al. (2017) (Figura 2). Estos escenarios se basan en la situación más pesimista con respecto al retroceso en los esfuerzos por la preservación del bosque amazónico, implicando exacerbación de procesos de expansión urbana e incumplimiento de la normatividad ambiental constituida en función de proteger dicho ecosistema.

Este estudio analizamos la capacidad que tiene Noah-MP para reproducir la variabilidad espacial y temporal de la evapotranspiración en la cuenca amazónica; las simulaciones se llevaron a cabo para el dominio  $82^{\circ}\text{W}$ – $42^{\circ}\text{W}$  y  $12^{\circ}\text{S}$ – $12^{\circ}\text{N}$ , a una resolución horizontal de 50 km y haciendo uso de un conjunto de datos meteorológicos procesados por el Sistema Global de Asimilación de Datos Terrestres (GLDAS) para el forzamiento atmosférico que impulsa al modelo. Las dos simulaciones fueron ejecutadas durante el período de 1996-2007, usando los dos primeros años para el spin-up, que permite que el modelo se acerque a un estado de equilibrio; por lo tanto, hemos considerado un período de 10 años (1998-2007) para el análisis de las simulaciones.

## 2.4 Tratamiento de datos

Para llevar a cabo el análisis de los conjuntos de datos utilizados, se realizan promedios espaciales y temporales en la escala mensual y diaria para el dominio que comprende la cuenca del Amazonas y parte de la cuenca del Río Orinoco, el cual fue subdividido en 6 regiones con el objetivo de esclarecer algunas de las diferencias dominantes en su régimen de evapotranspiración.

Para ello se construyen series temporales en representación de sus patrones hidroclimatológicos y se evalúan las diferencias mediante pruebas de significancia estadística entre los conjuntos de datos, que fueron verificadas mediante la aplicación de la prueba *t*-student, la cual ha sido ampliamente usada para análisis en ciencias ambientales debido a que proporciona robustez a los resultados. Esta prueba tiene en cuenta la diferencia entre las medias de cada muestra, la varianza ( $S$ ) y el número de grados de libertad ( $n-1$ ), que depende del tamaño de la muestra ( $n$ ), y se aplicó bajo el criterio de un nivel de confianza del 95% para establecer si los resultados son estadísticamente significativos. También se realizó un análisis exploratorio de las series temporales al remover su estacionalidad con el fin de identificar variaciones importantes con respecto al ciclo anual climatológico. Las tendencias fueron estimadas mediante el método de ajuste lineal y sometidas a un análisis bajo el mismo criterio de la significancia.

## Capítulo 3. Resultados y análisis

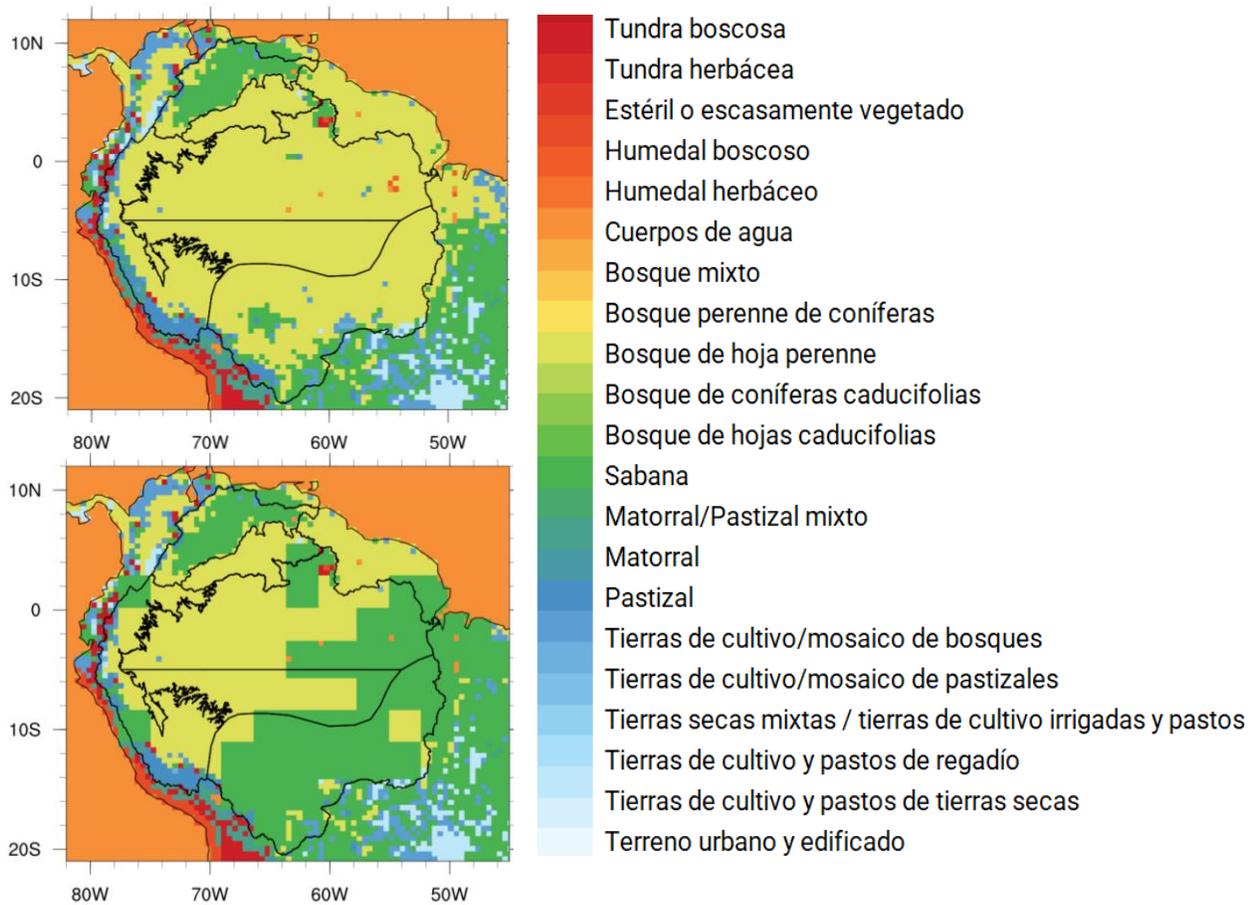
### 3.1 Climatología según ERA5-Land

La climatología estacional (Figura 3) nos muestra los patrones de la evapotranspiración y la precipitación a lo largo del año para todo el período de estudio. Se observa que para la temporada de Diciembre a Febrero (DEF; Figuras 3a, 3b, 4a y 4b), la región del Norte de Orinoquía presenta los niveles más bajos tanto en evapotranspiración como en precipitación, con relación a las demás regiones; durante este trimestre también se observa que los valores más altos de ambas variables se distribuyen sobre la región central de la cuenca amazónica, abarcando parte del Norte de Amazonía y Arco de Deforestación. Para el período que comprende los meses de Marzo a Mayo (MAM; Figuras 3c y 3d) se tiene una leve reducción generalizada en la evapotranspiración con relación al patrón observado en la temporada anterior; no obstante, las zonas de mayor precipitación muestran un desplazamiento hacia el norte, concentrando los valores más altos en la región del Sur de Orinoquía, Norte de Amazonía y parte norte del Piedemonte Amazónico, como se constata a partir de la distribución temporal de la precipitación (Figura 4b). Este comportamiento es explicado por la influencia de la migración estacional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) que durante esta temporada migra hacia el norte, favoreciendo la convergencia de humedad atmosférica que alimenta los procesos convectivos que tienen lugar sobre esta región. Por su parte, la precipitación en el Arco de Deforestación comienza a presentar una importante reducción que se extiende de forma intensificada hacia la temporada de Junio a Agosto (JJA; Figura 3e y 3f), siendo agosto el mes donde dicha condición se acentúa con más fuerza (Figuras 4a y 4b) y la evapotranspiración alcanza los niveles más bajos, constituyendo el factor determinante para indicar el establecimiento de la época seca en esta región.

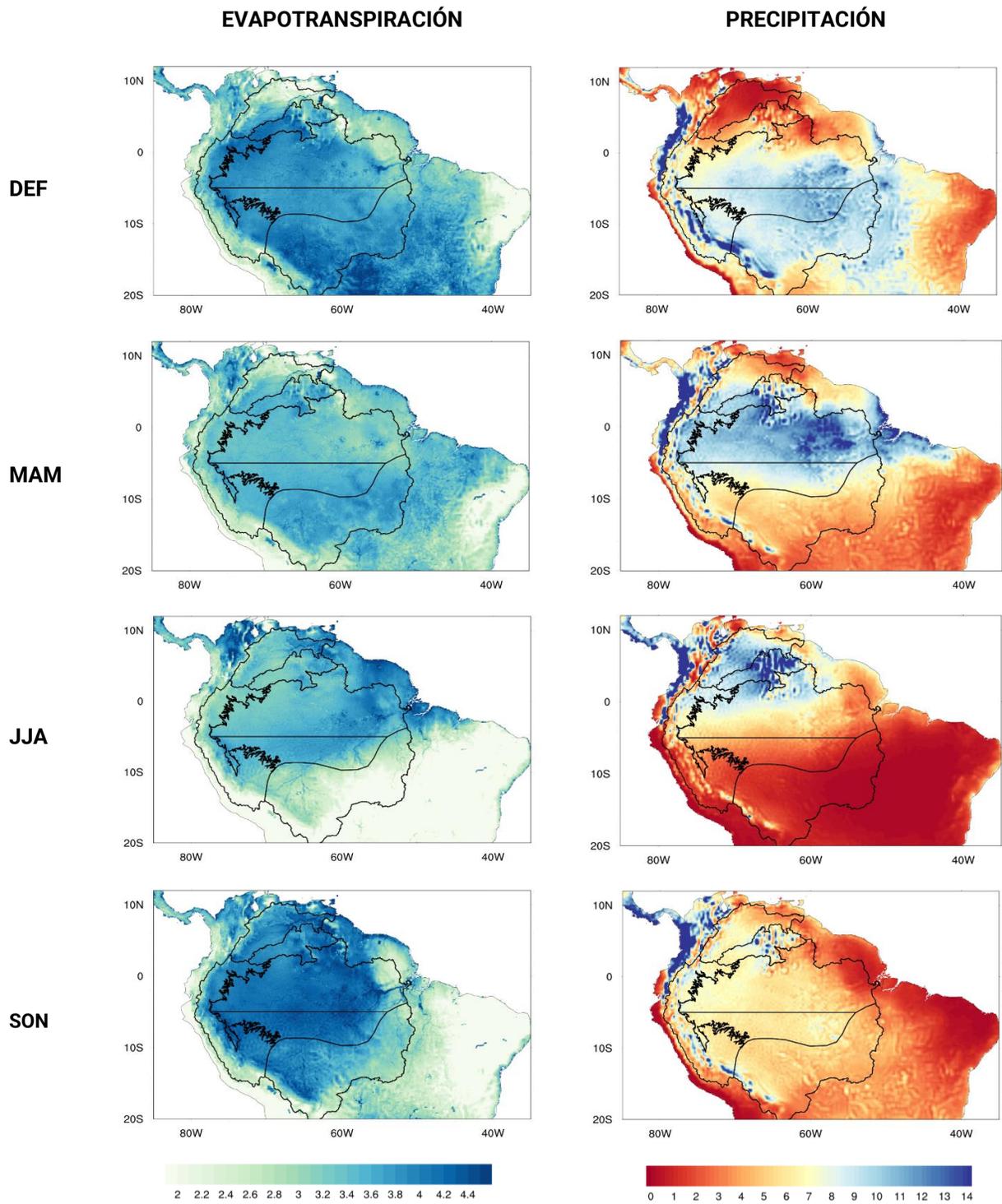
En general, los bosques amazónicos presentan altos niveles de precipitación que se extienden desde diciembre hasta marzo; sin embargo, estos ecosistemas tienen una alta sensibilidad a los cambios en el balance hídrico y energético en la escala regional, que conlleva a disminuciones en los regímenes de humedad durante el invierno austral. Esta condición es representativa de la estación seca, que es definida en diversos estudios (Sombroek 2011; Marengo et al. 2011; Costa & Pires 2010) como los meses consecutivos en los cuales la precipitación se encuentran por debajo del umbral de 100 mm/mes ( $\sim 3,3 - 3,5$  mm/día), tal como se observa en las Figuras 3f y 4b para el trimestre JJA, particularmente en las regiones del Arco de Deforestación y Centro de Amazonía.

En toda la extensión de la cuenca amazónica se presenta una fuerte variabilidad espacio-temporal de la evapotranspiración y la precipitación debida a la confluencia de humedad proveniente de fuentes continentales y oceánicas que son transportadas por los diferentes sistemas de circulación atmosférica regional, tal como sucede durante la transición de la temporada seca a la húmeda en la región que abarca el Norte y Centro de Amazonía y parte del Arco de Deforestación, que está condicionada en gran medida a la activación del Sistema Monzónico de Sur América que ocurre durante la primavera austral (Marengo et al. 2001, Mendonça, 2017). Esto se evidencia en el comportamiento observado en las dos variables durante la temporada de Septiembre a Noviembre (SON; Figuras 3g y 3h), que da cuenta del incremento de la evapotranspiración establecido en la mayor parte del dominio considerado; no obstante, la precipitación muestra valores espacialmente distribuidos de forma

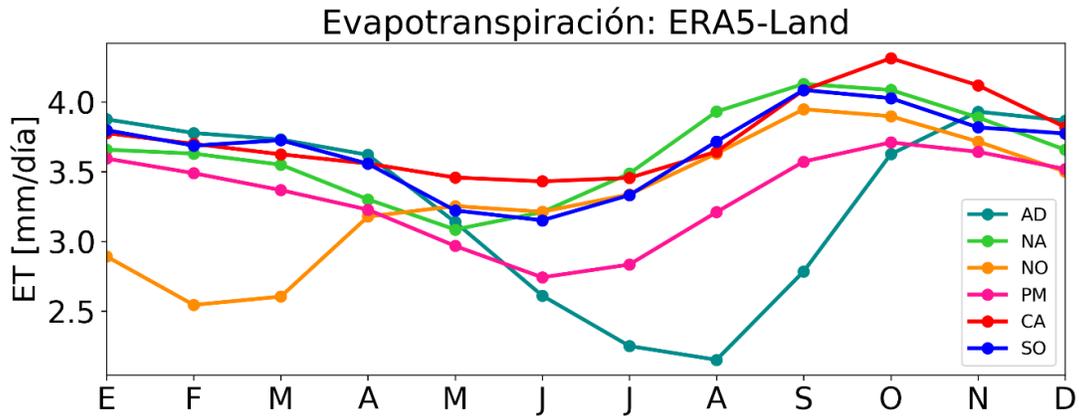
generalizada que varían entre 3 y 8 mm/día, como se muestra en la distribución temporal para el ciclo anual climatológico (Figura 4b).



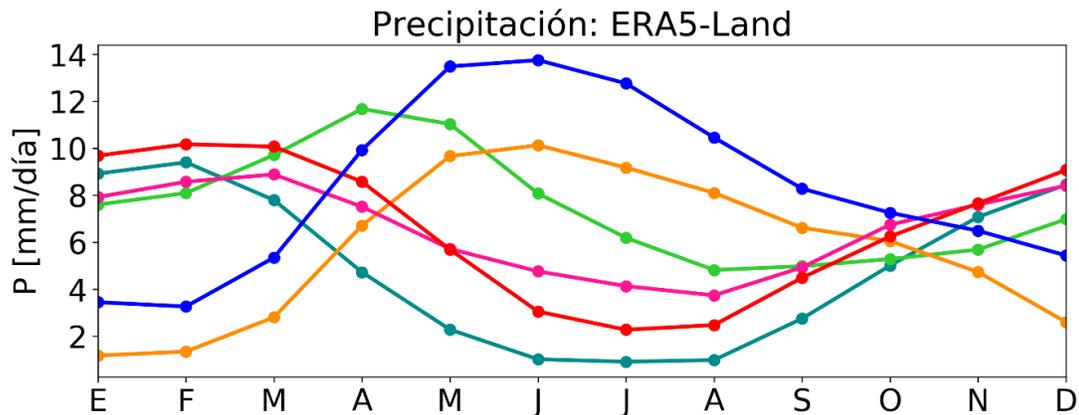
**Figura 2.** Mapa de cobertura y usos del suelo para las simulaciones CTRL (arriba) y DEFO (abajo)



**Figura 3.** Distribución espacial de evapotranspiración (izquierda) y precipitación (derecha) en mm/día, durante las temporadas de DEF, MAM, JJA y SON, de acuerdo al reanálisis de ERA5-Land para el período de 1998-2007



a)



b)

**Figura 4.** Ciclo anual climatológico de a) evapotranspiración y b) precipitación para las seis regiones de la cuenca amazónica, según los datos del reanálisis ERA5-Land

### 3.2 Sesgos de la simulación de control

Con el fin de analizar cómo es simulada la evapotranspiración al considerar el escenario CTRL, con respecto a los registros de ERA5-Land, se realiza una interpolación para llevar ambos conjuntos de datos a una cuadrícula gaussiana reducida N160 (~ 60 km de resolución horizontal), con el objetivo de homogeneizar la resolución horizontal de los dos conjuntos de datos, para poder efectuar el álgebra de mapas. Es pertinente mencionar que al hacer uso de este método de interpolación es posible obtener datos en una resolución más gruesa y, por consiguiente, se corre el riesgo de perder información más detallada y representativa de las condiciones locales; sin embargo, se realiza un análisis de significancia estadística al nivel de confianza del 95%, obteniendo diferencias no significativas entre los datos en el grid original y los datos interpolados.

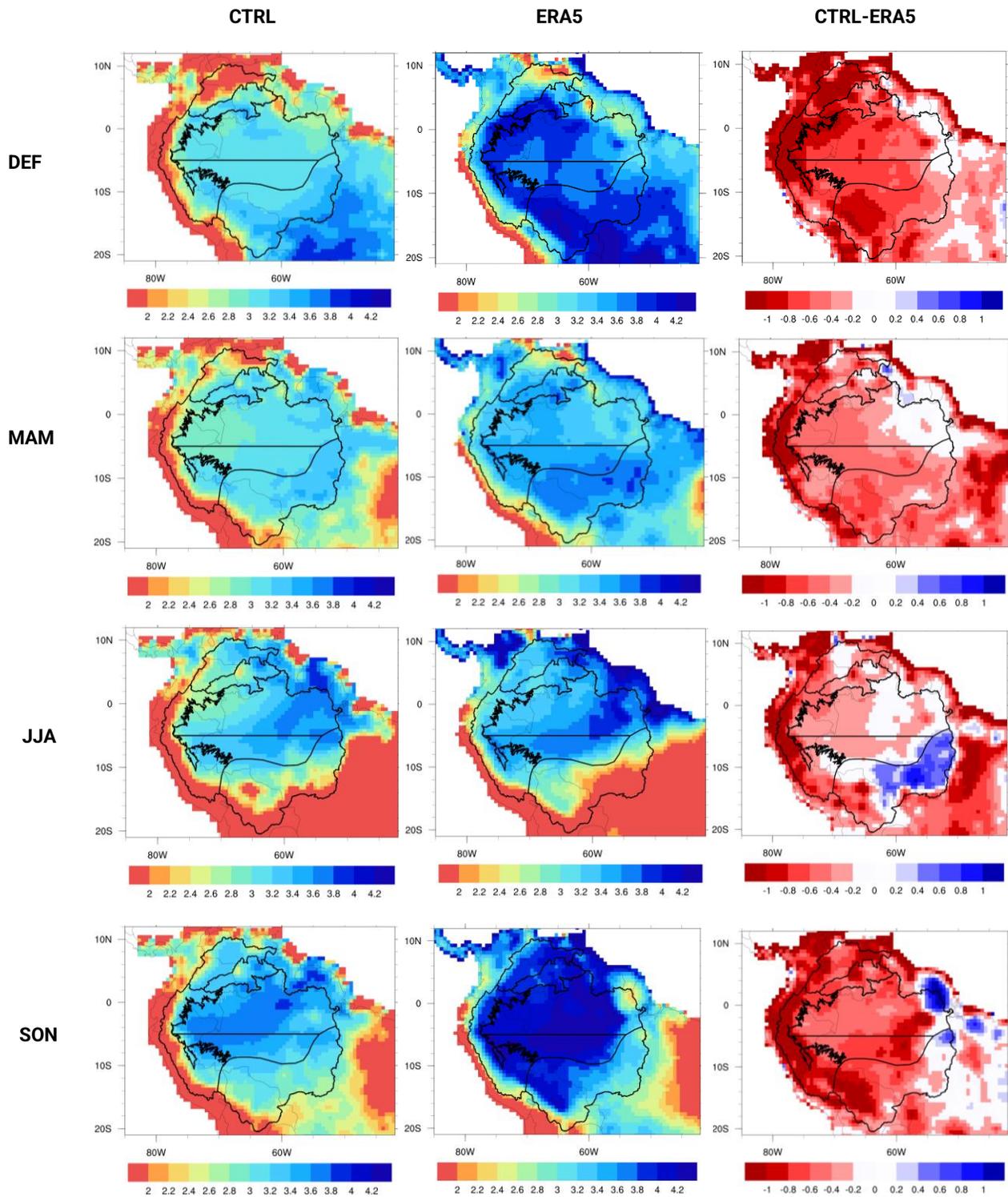
### 3.2.1 Ciclo anual de evapotranspiración total y precipitación

La Figura 5 muestra la climatología estacional de la simulación mediante el escenario CTRL (primera columna), la climatología según ERA5-Land (segunda columna) y las diferencias entre los dos conjuntos de datos (tercera columna), para la evapotranspiración total. Esta variable es calculada como la suma de las componentes de evaporación en el tope del dosel, la evaporación directa de cuerpos de agua y suelo desnudo, y la evaporación de la transpiración. En general, se observan subestimaciones entre el 11.3% y el 25.2% en la evapotranspiración simulada bajo el escenario CTRL con respecto a las observaciones (Tabla 1), con diferencias notablemente establecidas en las regiones del Norte de Orinoquía (20%) y Piedemonte Amazónico (25.23%). No obstante, se identifican similitudes en el patrón de la distribución espacial durante las temporadas de MAM y JJA, principalmente en la región oriental del Norte de Amazonía. Por su parte, la evapotranspiración simulada en el Arco de Deforestación exhibe una sobreestimación de 4.7% durante la ocurrencia del invierno austral, es decir, cuando se establece la época seca en esta región, tal como lo constata la distribución temporal de la precipitación (Figura 6e), y a su vez se observa que el ciclo anual simulado por Noah-MP se mantiene con valores superiores a los presentados por los registros de reanálisis, únicamente durante este trimestre (JJA).

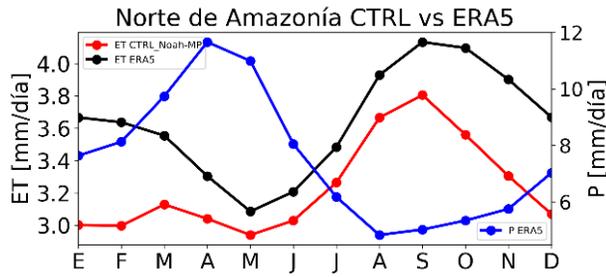
Particularmente, las regiones del Norte de Amazonía y Sur de Orinoquía presentan un desacoplamiento en la ocurrencia de los valores máximos de precipitación con los de evapotranspiración en ambos conjuntos de datos (Figuras 6a y 6d), puesto que, a pesar de diferir en magnitud, mantienen similitudes en su patrón de distribución espacio-temporal. Esto indica que la ocurrencia de la época lluviosa en estas regiones está condicionada en mayor medida por el aporte de humedad atmosférica proveniente de fuentes oceánicas, puesto que la estacionalidad de la Temperatura Superficial del Mar en los océanos tropicales, así como la circulación térmica de la ZCIT en su desplazamiento hacia el hemisferio Norte, tienen un aporte considerable en la precipitación de la Amazonía durante el otoño austral y la transición a la estación seca (Fu et al. 2001; Li & Fu, 2004; Arias et al. 2015). Tanto el ciclo anual climatológico simulado como el obtenido a partir del reanálisis en el Arco de Deforestación (Figura 6e), exhiben un acoplamiento entre los mínimos de evapotranspiración y los niveles más bajos de precipitación, lo que da cuenta de la influencia que tiene la retroalimentación entre los flujos en superficie y el aporte de la lluvia a la humedad local en esta región.

**Tabla 1.** Evapotranspiración media anual y error relativo porcentual de la simulación de CTRL respecto a ERA5

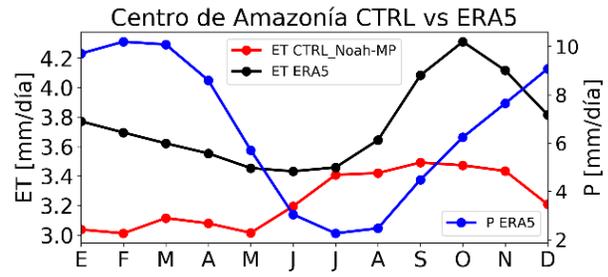
Conjunto de datos	Evapotranspiración (mm/día)	e (%)	Conjunto de datos	Evapotranspiración (mm/día)	e (%)
<i>Región del Arco de Deforestación</i>			<i>Región del Norte de la Orinoquía</i>		
ERA5-Land	3.28	-11.3	ERA5-Land	3.30	-20.0
CTRL Noah-MP	2.91	-	CTRL Noah-MP	2.64	-
<i>Región del Norte de la Amazonía</i>			<i>Región del Sur de la Orinoquía</i>		
ERA5-Land	3.64	-11.3	ERA5-Land	3.66	-14.8
CTRL Noah-MP	3.23	-	CTRL Noah-MP	3.12	-
<i>Región del Centro de la Amazonía</i>			<i>Región del Piedemonte Amazónico</i>		
ERA5-Land	3.75	-13.6	ERA5-Land	3.33	-25.2
CTRL Noah-MP	3.24	-	CTRL Noah-MP	2.49	-



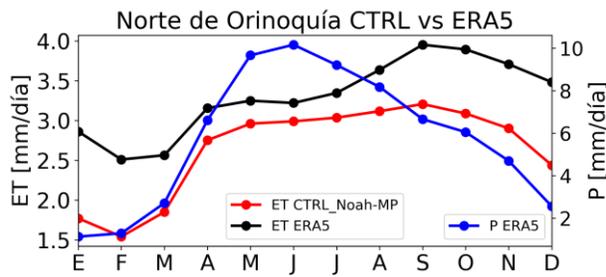
**Figura 5.** Evapotranspiración (en mm/día) para las temporadas de a) DEF, b) MAM, c) JJA y d) SON según las simulaciones para el escenario CTRL propuesto por Alves et al. (2017) (primera columna), el reanálisis de ERA5-Land (segunda columna) y las diferencias entre CTRL y ERA5-Land (tercera columna)



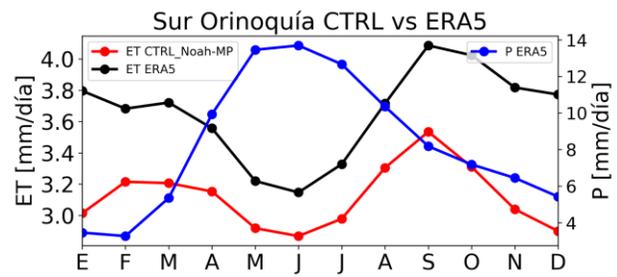
a)



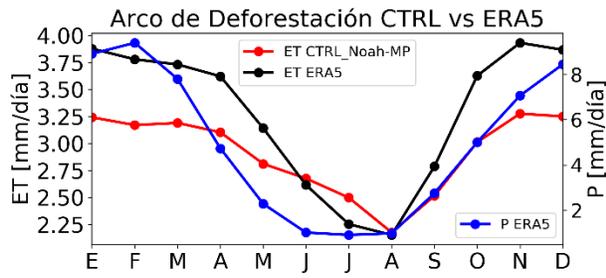
b)



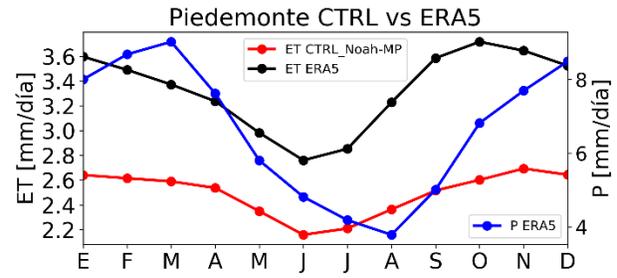
c)



d)



e)



f)

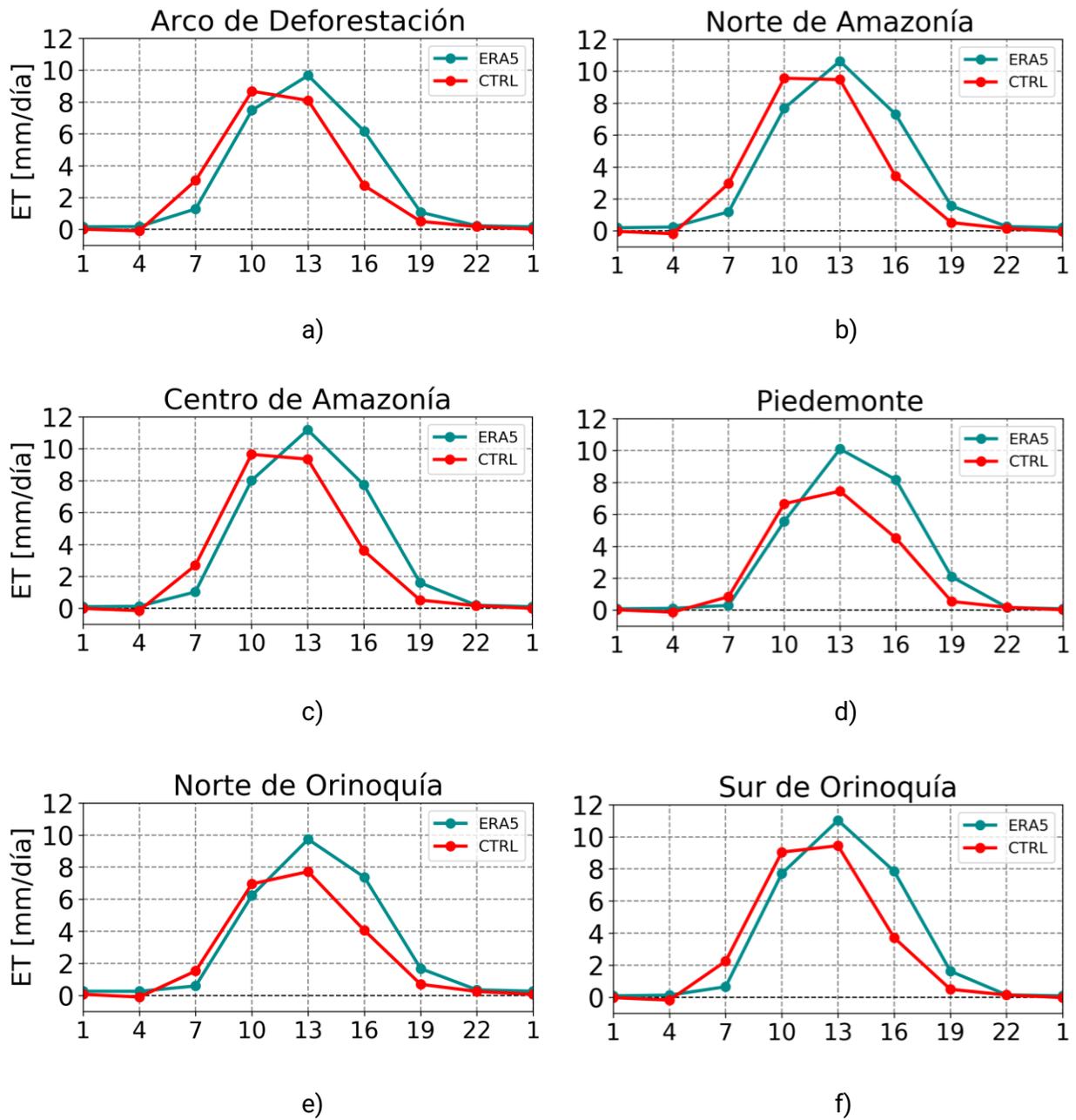
**Figura 6.** Diferencias de la evapotranspiración media anual simulada bajo el escenario CTRL con respecto al reanálisis ERA5-Land para a) Norte de Amazonía, b) Centro de Amazonía, c) Norte de Orinoquía, d) Sur de Orinoquía, e) Arco de deforestación y f) Piedemonte Amazónico

### 3.2.2 Ciclo diurno de evapotranspiración

La variación de la evapotranspiración en la escala diurna exhibe importantes diferencias que son evidentes principalmente durante las horas de mayor incidencia de la radiación solar, cuando la disponibilidad de energía radiativa aumenta fortaleciendo la interacción entre la superficie y la atmósfera, y alimentando los procesos de liberación de vapor de agua, como se ilustra en la figura 7 para el ciclo diurno según ERA5 (línea verde), que muestra un máximo de evapotranspiración al mediodía (13:00 hora local de Colombia) en todas las regiones. El ciclo diurno medio simulado para el escenario CTRL presenta su valor máximo entre las 10:00 y las 13:00, y una sobreestimación notable con respecto a ERA5, a partir de las 4:00 y que se extiende hasta las 10:00, en las regiones del Arco de Deforestación, Norte y Centro de Amazonía, y en menor medida en el Sur de Orinoquía; por su parte, las regiones del Piedemonte Amazónico y Norte de Orinoquía muestran un buen ajuste entre los dos conjuntos de datos durante el mismo intervalo de tiempo.

En general, es claramente evidente la subestimación de la evapotranspiración simulada con respecto a los registros de reanálisis, que ocurre entre las 13:00 y las 22:00, sin embargo, entre la 1:00 y las 4:00 se observa una diferencia importante donde la simulación CTRL presenta valores negativos, lo que sugiere una buena representación del proceso de la condensación del vapor de agua que sucede en respuesta a la baja disponibilidad de energía incidente en la superficie, principalmente en horas de la noche y la madrugada.

En consecuencia, existe la posibilidad de atribuir estas diferencias a la sensibilidad que, en general, presentan los modelos de superficie terrestre en respuesta a las variaciones en los procesos físicos, que están supeditados a los cambios del tipo de cobertura y usos del suelo, cuya influencia se manifiesta directamente en las variaciones de los flujos superficiales de agua y energía.



**Figura 7.** Ciclo diario promedio de evapotranspiración total según ERA5 (línea verde) y el escenario CTRL (línea roja), para las regiones de a) Arco de deforestación, b) Norte de Amazonía, c) Centro de Amazonía, d) Piedemonte Amazónico, e) Norte de Orinoquía y f) Sur de Orinoquía. Las horas corresponden a hora local de Colombia (UTC-5)

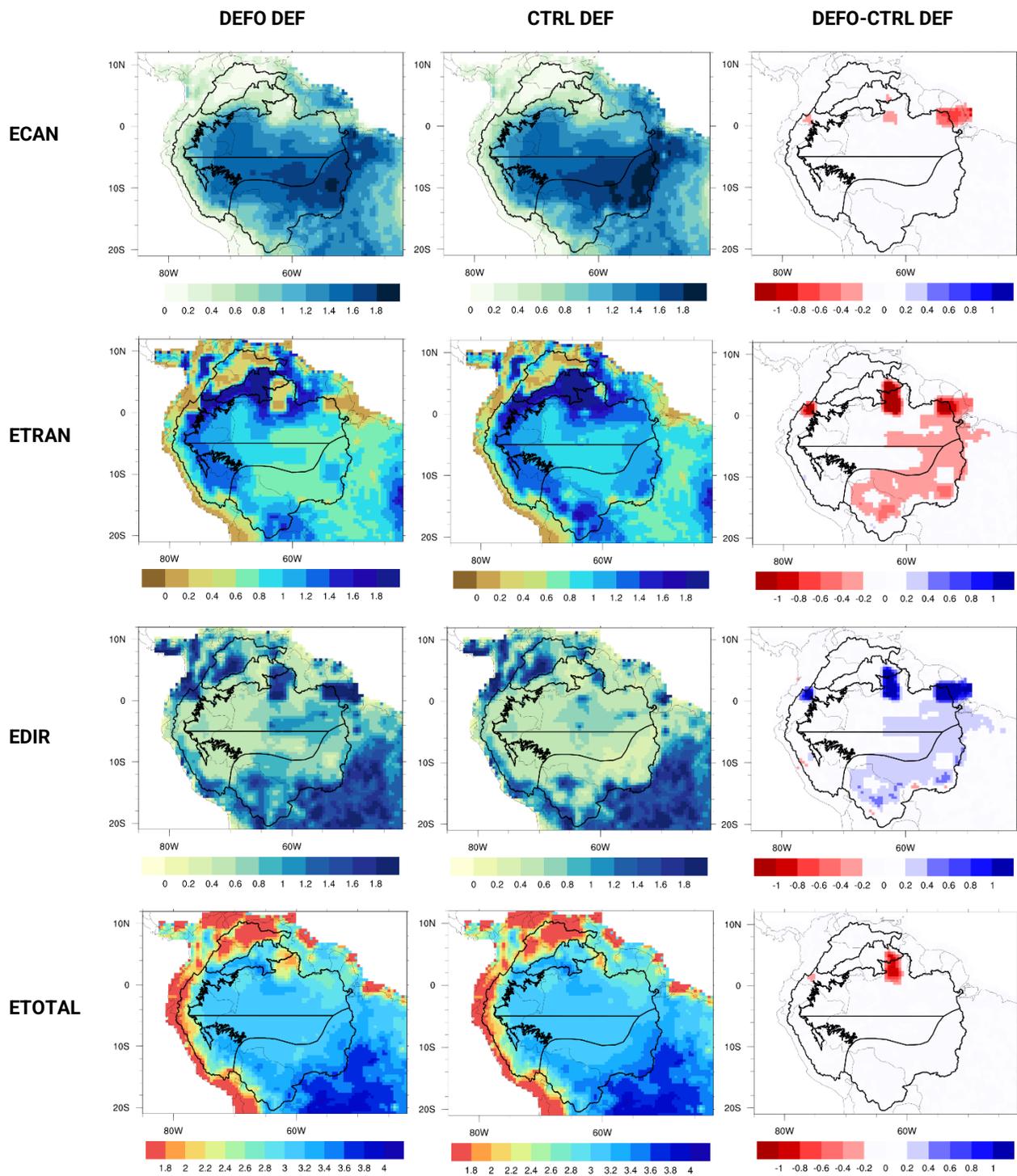
### 3.3 Efectos de la deforestación en las componentes de la evapotranspiración

El papel de la vegetación en los ecosistemas característicos de la cuenca amazónica, donde la mayor parte de la precipitación es originada localmente a partir de los procesos físico-bióticos, es fundamental para el sostenimiento del régimen de humedad a lo largo del año (Sampaio, 2007). Es por esta razón que una reducción en el vapor de agua proveniente de la transpiración de la vegetación, combinada con el efecto de la pérdida de humedad por evaporación que no logra ingresar al sistema subsuperficial, se traduce en un desbalance hídrico a nivel local, como se ilustra a partir de las diferencias entre las simulaciones DEFO y CTRL (Figuras 8, 9 y 10). Este desbalance surge como una consecuencia de la amplificación de los impactos producidos por los cambios en el uso del suelo, que están directamente asociados con la degradación del bosque natural, pérdida de especies arbóreas cuyas raíces alcanzan profundidades que les permite aprovechar las reservas de humedad disponible en el suelo, y la consecuente sustitución por vegetación corta con una pobre capacidad de enraizamiento (Costa & Foley 2000), que le impide sostener el requerimiento hídrico que alimenta los procesos convectivos a escala local.

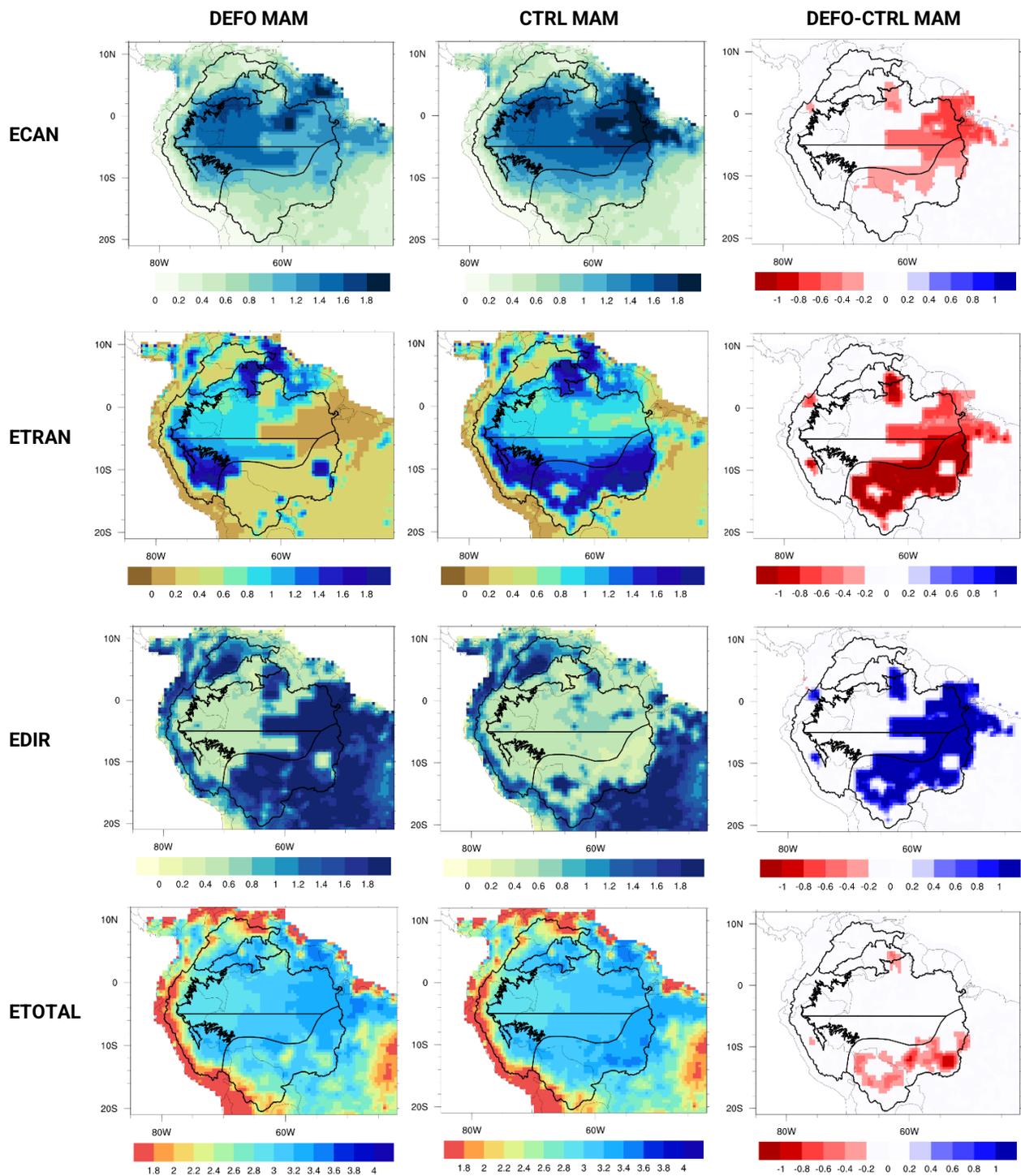
En ese orden de ideas, en las Figuras 8, 9 y 10 se observa que los núcleos que concentran los mayores cambios en las tres componentes de la evapotranspiración total se encuentran localizados sobre Putumayo en el norte del Piedemonte Amazónico, el límite entre el Sur de Orinoquía y Norte de Amazonía, y el costado oriental del Norte y Centro de Amazonía, incluyendo una gran extensión del Arco de Deforestación. Durante el verano austral, los resultados muestran que el aporte del incremento en la evaporación del suelo desnudo (Figura 8c) se ve fuertemente contrarrestado por las reducciones en la transpiración de la vegetación (Figura 8b), lo que sugiere que los efectos del cambio de cobertura en la evapotranspiración total no son significativos durante la temporada húmeda (Figura 8d); no obstante, las diferencias en la evaporación del suelo desnudo y cuerpos de agua explican que uno de los mayores impactos del aumento en la extensión del área deforestada consiste en una mayor tasa de vapor de agua que es devuelto a la atmósfera.

En resumen, los efectos más drásticos de la deforestación en las componentes de la evapotranspiración total de la cuenca del Amazonas se concentran en la región del Arco de Deforestación y el costado oriental del Norte y Centro de Amazonía, principalmente durante la transición de la época húmeda a la seca (Figura 9), y en mayor magnitud durante el invierno austral, cuando ya se ha establecido el período con mayor déficit hídrico en estas regiones (Figura 10). Este resultado indica que, bajo el escenario de deforestación, la evapotranspiración comenzaría a reducirse entre el trimestre de MAM, provocando una época de transición menos húmeda, lo que constituye un factor fundamental en la anticipación y alargamiento de la época seca.

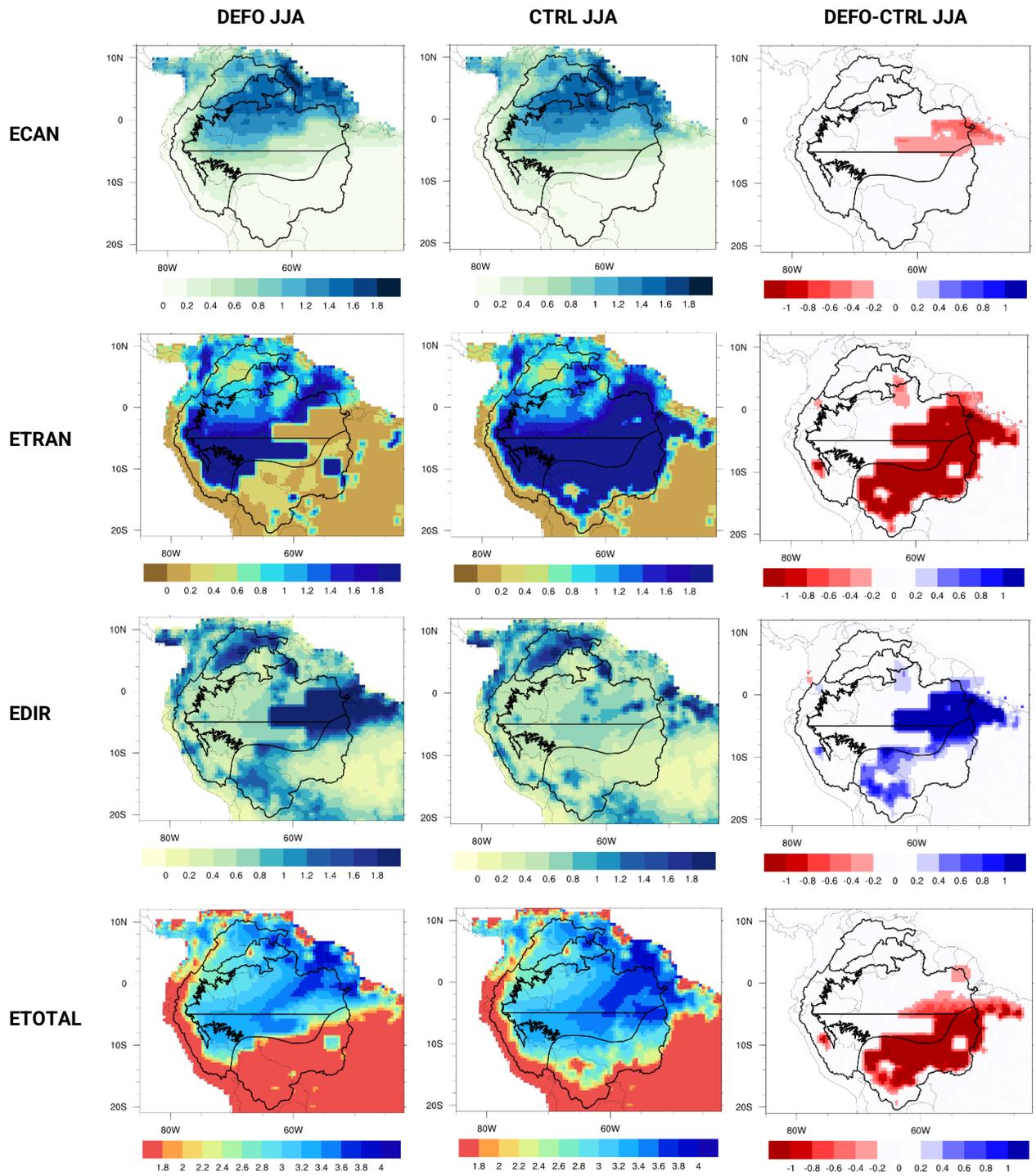
Por otro lado, se observa que la evaporación del dosel también se ve afectada por la deforestación, aunque en menor magnitud que las demás componentes; sin embargo, la anomalía calculada con respecto al escenario de CTRL (Figura 10a) explica que durante la época seca en la región del Arco de Deforestación, esta componente muestra una leve señal de recuperación, es decir, cambios menos considerables con relación al patrón de distribución del cambio en el trimestre anterior (MAM).



**Figura 8.** Evaporación promedio (en mm/día) de a) ECAN, b) ETRAN, c) EDIR y d) Evapotranspiración Total, con datos provenientes del escenario DEFO (primera columna) durante DEF para el período 1998-2007. La tercera columna muestra las diferencias entre DEFO y el escenario CTRL



**Figura 9.** Evaporación promedio (en mm/día) de a) ECAN, b) ETRAN, c) EDIR y d) Evapotranspiración Total, con datos provenientes del escenario DEFO (primera columna) durante MAM para el período 1998-2007. La tercera columna muestra las diferencias entre DEFO y el escenario CTRL

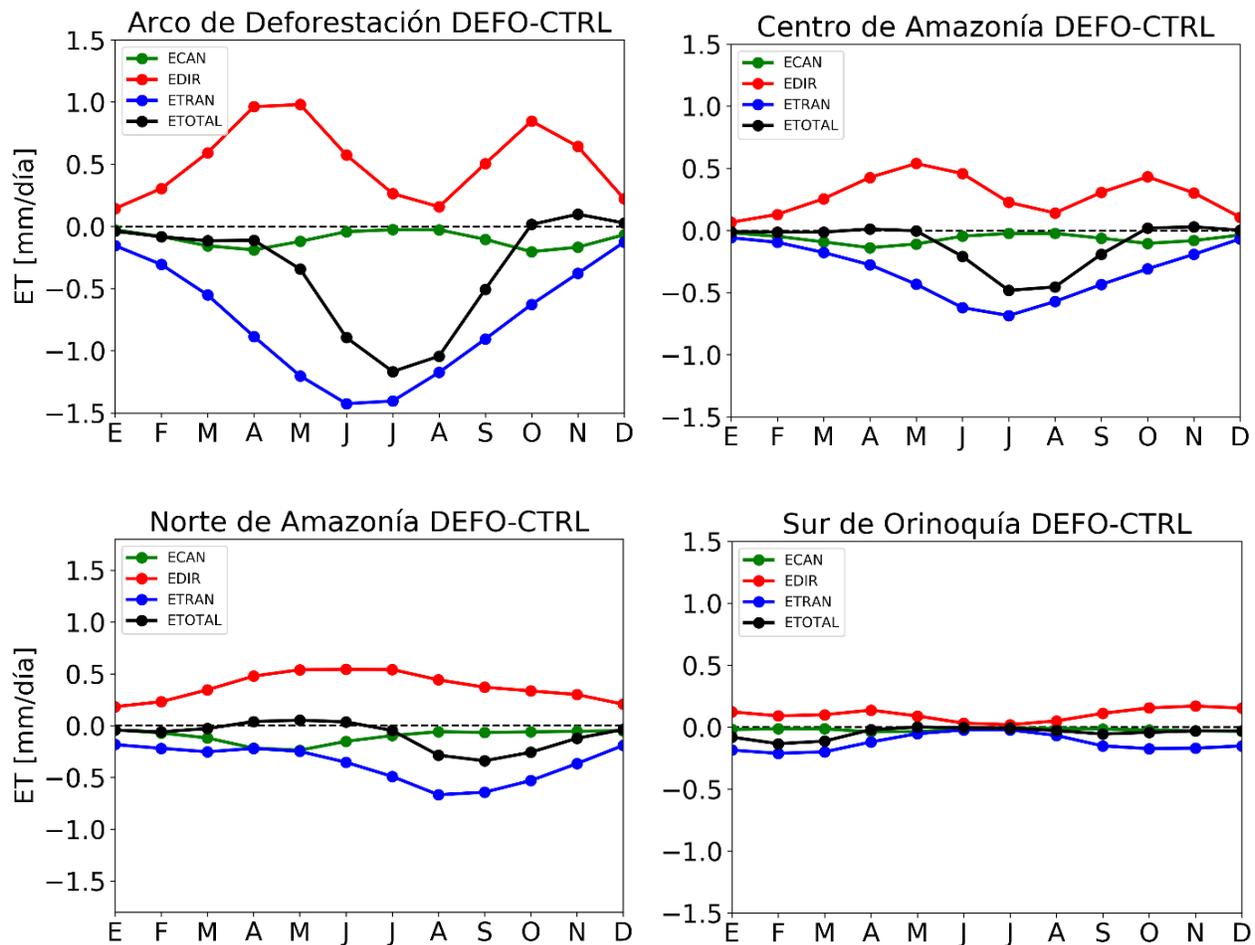


**Figura 10.** Evaporación promedio (en mm/día) de a) ECAN, b) ETRAN, c) EDIR y d) Evapotranspiración Total, con datos provenientes del escenario DEFO (primera columna) durante JJA para el período 1998-2007. La tercera columna muestra las diferencias entre DEFO y el escenario CTRL

En concordancia con la distribución espacial del cambio estacional de la evapotranspiración bajo el escenario DEFO, con respecto a las condiciones simuladas en el escenario CTRL, se calculan las anomalías mensuales mediante la diferencia entre los dos conjuntos de datos, obteniendo variaciones estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95% para todas las regiones, exceptuando el Norte de Orinoquía, lo que responde al patrón observado en los mapas de sesgos (Figuras 8, 9 y 10), donde no se evidencia ningún cambio importante en la evapotranspiración total en esta región. Pese a que la región del Piedemonte Amazónico también presenta diferencias significativas, no se incluye en este análisis porque sus variaciones no son suficientemente representativas ya que exhibe pequeños cambios muy cercanos a cero (ver por ejemplo Figuras 8d, 9d y 10d). Por lo tanto, en la Figura 11 se presentan las anomalías mensuales de las tres componentes y su aporte a la evapotranspiración total en las regiones del Arco de Deforestación, Centro y Norte de Amazonía, y Sur de Orinoquía. Se encuentra un comportamiento generalizado en la componente de la evaporación directa del suelo desnudo (EDIR), que indica su predominancia en el incremento del aporte a la evapotranspiración total, siendo considerablemente mayor en las regiones del Arco de Deforestación y Centro de Amazonía, respectivamente. Como se mencionó anteriormente, el efecto de sustituir los bosques amazónicos por vegetación corta de raíces poco profundas como pastizales y otros tipos de cultivos, conlleva a una reducción de la evapotranspiración y a un aumento del flujo de calor sensible en superficie, provocando condiciones locales más secas (Alves et al. 2017). Esto se explica a partir del comportamiento observado en la evaporación proveniente de la transpiración de la vegetación (ETRAN), puesto que es la componente que exhibe las reducciones más importantes y a su vez, modula la variabilidad de la evapotranspiración total, principalmente durante la época seca. Este resultado permite inferir que un aumento considerable y significativo en la evaporación directa del suelo desnudo no representa un aporte a la humedad local sino más bien, implica una pérdida y una disminución en el flujo de calor latente; sin embargo es notable que los mayores cambios presentados en EDIR ocurren durante los períodos de transición de la época húmeda a la seca (MAM) y en la transición de la temporada seca a la húmeda (SON). Esto sugiere que bajo el escenario de deforestación, durante el trimestre MAM, esta componente no es representativa de una compensación en el balance hídrico a nivel local sino que impulsaría el comienzo anticipado de la época seca en la región del Arco de Deforestación, como se sugiere en diversos estudios realizados en el mismo dominio considerado (Costa & Pires 2010; Butt et al. 2011; Soares-Filho et al. 2006; Fu et al 2013), coincidiendo en un aumento en la duración e intensidad de la época seca como consecuencia de la deforestación en la cuenca amazónica.

**Tabla 2.** Medidas estadísticas de las diferencias entre DEFO y CTRL

Conjunto de datos	Media (mm/día)	$\sigma$ (mm/día)	Conjunto de datos	Media (mm/día)	$\sigma$ (mm/día)
<i>Región del Arco de Deforestación</i>			<i>Región del Norte de la Orinoquía</i>		
CTRL	2.90	0.45	CTRL	2.65	0.65
DEFO	2.55	0.81	DEFO	2.65	0.65
<i>Región del Norte de la Amazonía</i>			<i>Región del Sur de la Orinoquía</i>		
CTRL	3.24	0.38	CTRL	3.12	0.43
DEFO	3.14	0.30	DEFO	3.07	0.41
<i>Región del Centro de la Amazonía</i>			<i>Región del Piedemonte Amazónico</i>		
CTRL	3.23	0.35	CTRL	0.27	0.18
DEFO	3.12	0.33	DEFO	0.28	0.15

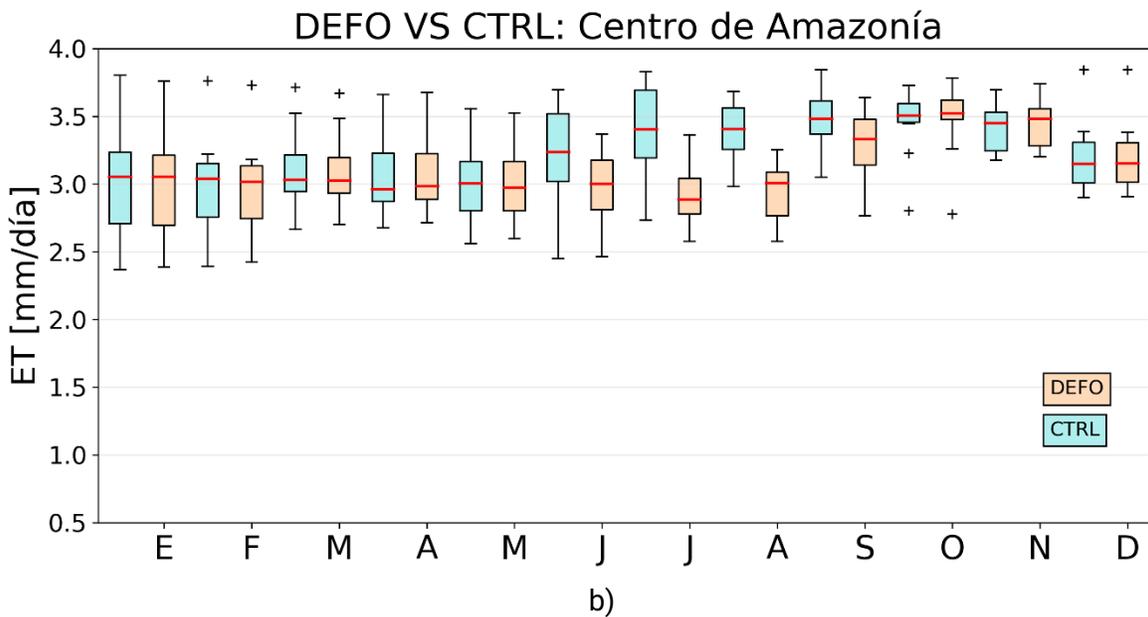
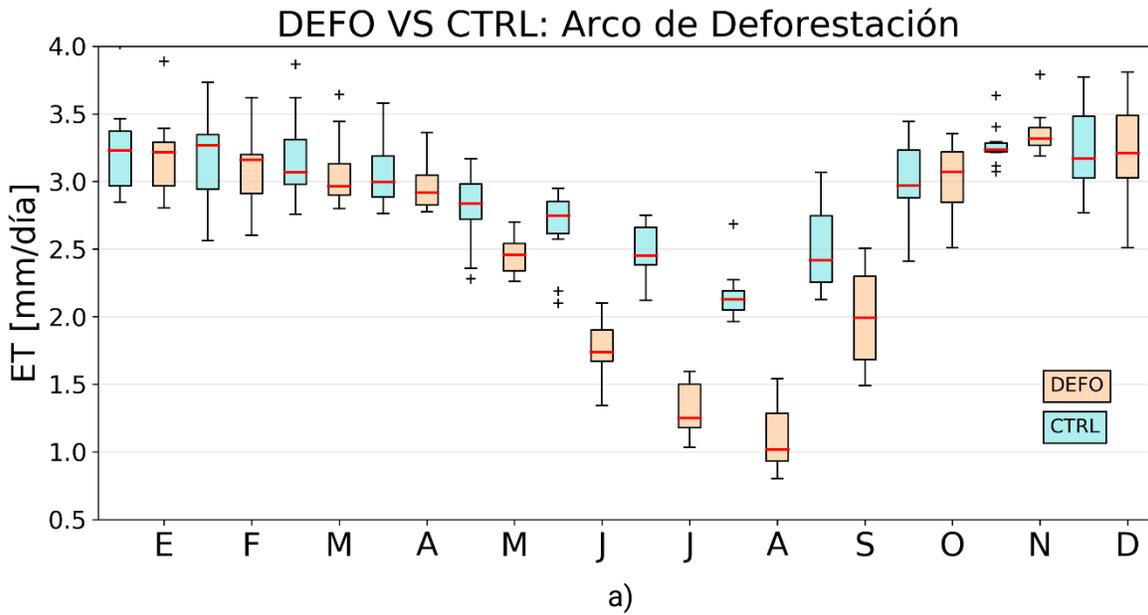


**Figura 11.** Anomalías de las componentes de la evapotranspiración en el escenario DEFO calculadas con respecto al escenario de CTRL para el período de 1998-2007

En el diagrama de cajas y bigotes (Figura 12) se analiza la variabilidad mensual de la evapotranspiración total en las dos simulaciones para las regiones del Arco de Deforestación (Figura 12a) y el Centro de Amazonía (Figura 12b), que fueron las que presentaron los cambios más drásticos en el balance de evapotranspiración bajo el escenario de deforestación, encontrando que las reducciones en el Arco de Deforestación son evidentemente más críticas a finales del período de transición de la época húmeda a la seca (0.34 mm/día para el mes de mayo), durante la temporada JJA (1.04 mm/día), y extendiéndose hasta septiembre (0.51 mm/día), cuando comienza la transición hacia la época lluviosa.

La disminución de la evapotranspiración total en el Arco de Deforestación es estadísticamente significativa. En la Figura 12a se observa que desde enero hasta septiembre, las medianas señalan una reducción en el escenario deforestado con respecto a la simulación CTRL. En relación con la media, es evidente la reducción de 0.35 mm/día y una mayor variabilidad de los datos, representada por un aumento de la desviación estándar a 0.36 mm/día (Tabla 2), que

se hacen más notables a finales del período de transición y durante la época seca, pues para el mes de julio se alcanza una disminución significativa de 1.17 mm/día.



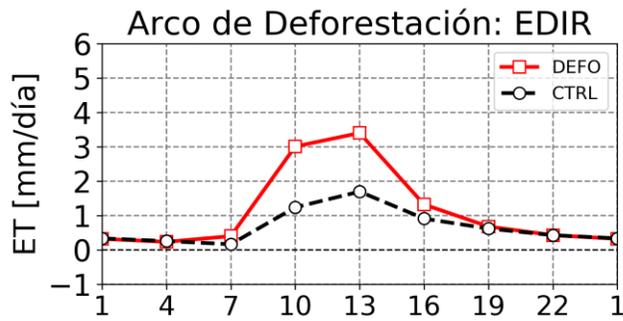
**Figura 12.** Diagrama de cajas y bigotes de la evapotranspiración media mensual para las simulaciones CTRL (azul) y DEFO (naranja) en a) Arco de Deforestación y b) Centro de Amazonía

También se observa que durante los meses de octubre y noviembre, los valores medios de la evapotranspiración total en el escenario deforestado superan los valores de la simulación CTRL, con diferencias de 0.02, 0.10 y 0.03 mm/día, respectivamente, que aunque poco sustanciales, son estadísticamente significativas.

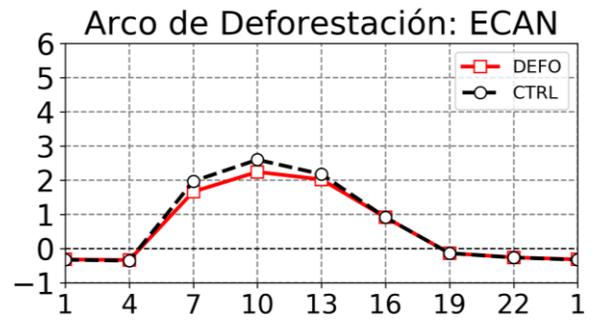
Por su parte, las diferencias más notables en la región del Centro de Amazonía (Figura 12b) ocurren entre los meses de junio a septiembre con una disminución significativa en la media de 0.11 mm/día, alcanzando la mayor reducción en el mes más seco correspondiente a julio, para el cual se tiene una diferencia de 0.48 mm/día. No obstante, en términos de la desviación estándar promedio, no se tiene una variación destacable. Por otro lado, durante la época húmeda no hay cambios significativos entre las dos simulaciones para esta región.

Los efectos de la deforestación en el ciclo diario de la evapotranspiración total constituyen patrones de cambio significativos en la escala horaria, aunque se perciben similitudes que fueron previamente determinadas en la escala mensual, como lo evidencia el aumento en EDIR, la reducción de ETRAN y variaciones de menor magnitud en ECAN (Figura 13). Las diferencias entre los ciclos diarios para la ET en DEFO y CTRL fueron estadísticamente significativas y también de forma cualitativa se puede determinar que el modelo presenta una considerable sensibilidad al cambio de cobertura, que tiene efectos importantes en la reducción de la humedad atmosférica local, principalmente durante las horas del mediodía, aunque presenta un buen ajuste en las horas donde hay menor disponibilidad de energía radiativa (i.e. durante la noche y primeras horas de la madrugada). Sin embargo, cabe resaltar que en la evaporación del dosel (ECAN) se tienen valores negativos entre las 19:00 y las 4:00, que podrían relacionarse con la condensación que ocurre como resultado de los flujos de humedad entre la vegetación y el medio circundante, condicionados fundamentalmente por la baja disponibilidad de energía en ausencia de radiación durante la noche.

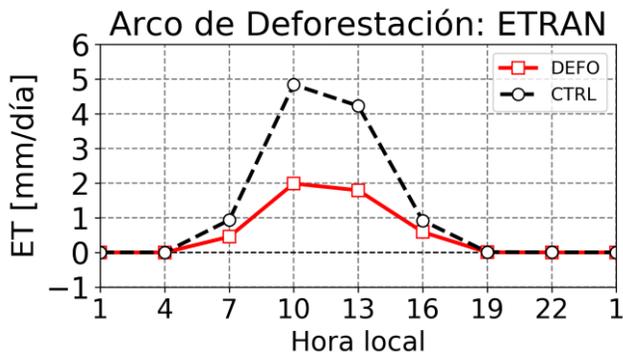
Otra observación importante que se deriva de la variación diaria de la evaporación directa de cuerpos de agua y suelo desnudo, radica en que esta componente es la única que presenta un ascenso tardío, marcando su máximo tres horas después con relación a ECAN y ETRAN (Figuras 13b y 13c); esto se explica considerando la inercia térmica que posee el agua y que repercute en un incremento paulatino de la humedad que es evaporada como consecuencia de la energía almacenada en las superficies de agua abiertas; este comportamiento se evidencia en las dos simulaciones pero se destaca su predominancia bajo el escenario DEFO, pues indica un aumento consistente con la extensión de suelo que queda expuesto ante la ausencia de vegetación, que bajo el escenario no deforestado, cumpliría su función de amortiguar la pérdida directa de humedad presente en las capas superiores del suelo.



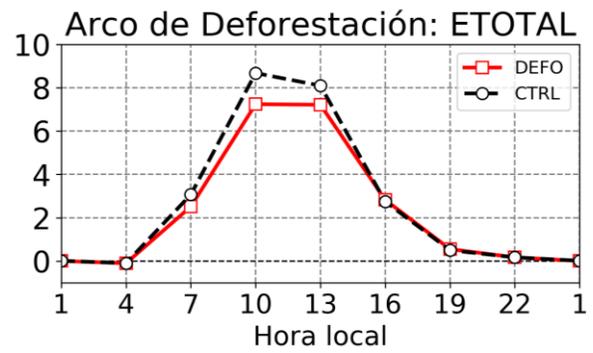
a)



b)



c)



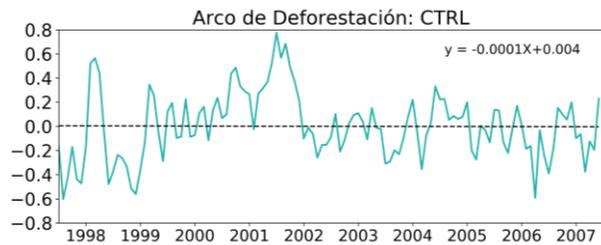
d)

**Figura 13.** Ciclo diario promedio de a) EDIR, b) ECAN, c) ETRAN y d) ETOTAL, para el escenario CTRL (línea punteada) y DEFO (línea roja), en la región del Arco de Deforestación

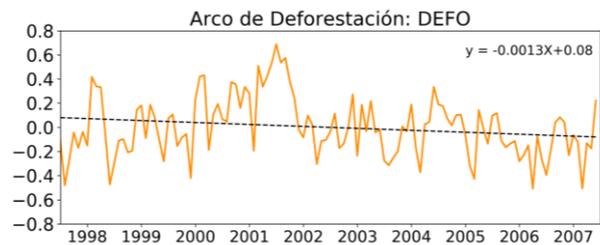
### 3.4 Evapotranspiración total bajo el escenario de deforestación

Para la determinación de las tendencias en las series de datos mensuales (Figura 14) se hizo uso del método paramétrico de regresión lineal para remover la señal asociada a la estacionalidad que impide detectar otras señales generalmente relacionadas con la ocurrencia de eventos extremos. Este proceso se realiza sustrayendo el ciclo medio anual de los datos originales, con el fin de identificar comportamientos anómalos representados por oscilaciones erráticas y a su vez, calcular la pendiente asociada a esta tendencia. En este sentido, se analizan las anomalías que presentaron una tendencia estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 95% y 120 grados de libertad. La región del Arco de Deforestación muestra anomalías que fluctúan entre -0.4 y 0.6 mm/día para el escenario DEFO (Figura 14b), mientras que en el Norte y Sur de Orinoquía se tienen fluctuaciones erráticas que van desde -0.8 a 0.8 mm/día (Figuras 14d y 14f); cabe mencionar que estas dos regiones presentan ciertas similitudes en la temporalidad de las fluctuaciones que a la luz de la significancia estadística, se traduce en una correlación sustancial, considerablemente alta ( $r = 0.769$ ) y estadísticamente significativa.

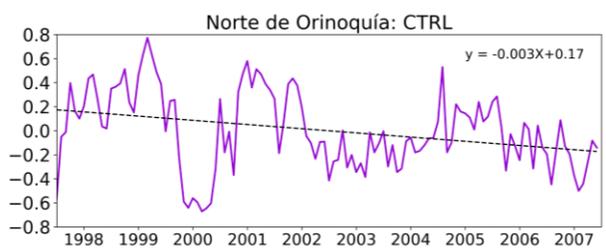
Por otra parte, las tendencias identificadas en las tres regiones para el escenario DEFO son negativas, pero es de notable importancia mencionar que, si bien, la región del Norte de Orinoquía no presentó ningún cambio considerable en el análisis de sesgos (Figuras 8, 9 y 10), sí exhibe una tendencia notablemente negativa que fue posible evidenciar luego de remover la fuerte estacionalidad de la serie, que impedía determinar con precisión la influencia de otras señales. También se calcula la autocorrelación simultánea para precisar la dependencia secuencial de estos datos, así como la correlación cruzada de los mismos, encontrando correlaciones altas del orden de 0.742 y 0.655, respectivamente. En síntesis, estos resultados apuntan a la posible existencia de patrones tendenciales que resultan en una reducción gradual y persistente de la evapotranspiración regional a lo largo del tiempo; sin embargo, esta tendencia no constituye una alta representatividad de la proyección futura debido al número de registros por año que fueron tomados en consideración, ya que, como bien es sabido en el estudio de variables hidroclimatológicas, se requiere un amplio dominio temporal para realizar un análisis predictivo con suma rigurosidad. Por tal motivo, se establece la comparación de las tendencias estadísticamente significativas, que fueron identificadas en ambos escenarios, encontrando que si se mantienen las condiciones actuales en el Arco de deforestación, la evapotranspiración no presenta tendencia para el escenario de CTRL, como se ilustra en la figura 14a; por su parte, las regiones del Norte y Sur de Orinoquía no exhiben variaciones entre los dos escenarios, es decir, en ambos presentan tendencias negativas, lo que indica que a raíz de la tasa de deforestación actual, la evapotranspiración total ya se encuentra disminuyendo con posibilidad de intensificar su reducción.



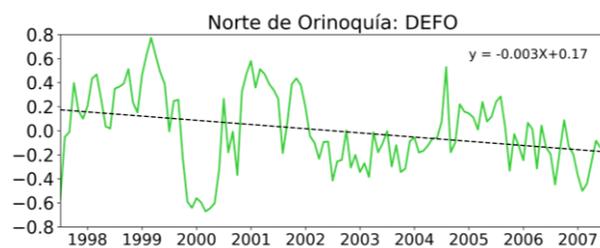
a)



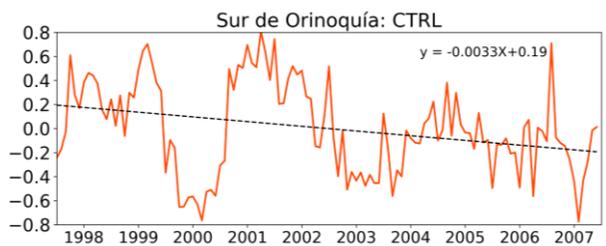
b)



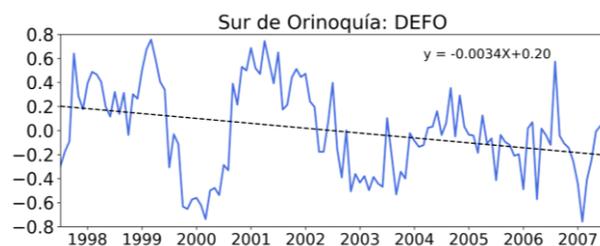
c)



d)



e)



f)

**Figura 14.** Anomalías respecto al ciclo medio anual y regresión lineal para la determinación de tendencias en a) Arco de Deforestación, b) Norte de Orinoquía y c) Sur de Orinoquía, para los escenarios CTRL (primera columna) y DEFO (segunda columna)

## Capítulo 4. Conclusiones

En este Trabajo de Grado se analizaron los impactos potenciales que tiene la pérdida de la vegetación natural de la selva amazónica sobre las componentes de la evapotranspiración, al generar cambios que podrían tener efectos en la alteración del ciclo hidrológico y del balance de energía a nivel regional. En primera instancia y en orden a los objetivos de esta investigación, consideramos evaluar el desempeño del modelo de superficie Noah-MP para representar la evapotranspiración en Suramérica tropical mediante la comparación con datos de reanálisis, encontrando diferencias significativas en la distribución y subestimaciones de la tasa de evapotranspiración total desde el 11.3% (0.37 mm/día) hasta el 25.2% (0.84 mm/día), en todo el dominio para las escalas diurna y mensual. También estudiamos la sensibilidad de este tipo de ecosistemas al reemplazo de cobertura tipo bosque por sabana, y su respuesta ante esta perturbación mediante el análisis de los cambios en la evapotranspiración, el cual fue llevado a cabo a partir del cálculo de las diferencias entre el escenario representativo de las condiciones actuales y un escenario que considera una tasa de deforestación del 28% del bosque tropical de la Amazonía.

Las diferencias identificadas entre las dos simulaciones indican que los cambios en la evapotranspiración total durante la época húmeda no son significativos, salvo en el núcleo entre el Sur de Orinoquía y Norte de Amazonía, donde se concentra la máxima reducción para esta temporada. También se identifica que los efectos más drásticos de la degradación de la cobertura boscosa y su reemplazo por pastizales, se concentran en la región del Arco de Deforestación y el costado oriental del Norte y Centro de Amazonía, principalmente durante la transición de la época húmeda a la seca (MAM) y cobrando mayor intensidad en el invierno austral (JJA), lo que sugiere que bajo el escenario DEFO la ET comenzaría a reducirse entre el trimestre MAM provocando una época de transición menos húmeda y constituyendo un factor fundamental en la anticipación y alargamiento de la época seca.

También se determina que el patrón de aumento significativo de la evaporación directa del suelo desnudo (EDIR), en confluencia con la reducción de la transpiración de la vegetación (ETAN) no sugiere un aporte al presupuesto de humedad local sino una disminución en el flujo de calor latente, lo que surge como consecuencia del efecto de la sustitución de especies del bosque amazónico por vegetación corta de raíces poco profundas que no logran amortiguar largos períodos en déficit hídrico, repercutiendo en el incremento del flujo de calor sensible y provocando condiciones locales más secas.

Los cambios más significativos fueron determinantes en la región del Arco de Deforestación, pues se encontraron reducciones de hasta 1.17 mm/día para el mes más seco y la posible existencia de un patrón tendencial que indica una disminución persistente de la ET regional a lo largo del tiempo. Por su parte las regiones del Norte y Sur de Orinoquía presentan tendencias negativas incluso bajo el escenario representativo de las condiciones actuales, señalando que aún si se mantuviera la cobertura vegetal sin introducir más perturbaciones, el contenido de humedad local ya se ve reducido, pero si se incurre en el aumento de la tasa de deforestación se podría exacerbar la potencial disminución de la evapotranspiración a futuro.

Los resultados obtenidos sugieren que el modelo presenta sesgos importantes en la variabilidad diurna con respecto a las estimaciones de reanálisis, aunque reproduce de forma razonable los patrones espaciales y temporales de la componente ECAN, ya que muestra una buena representación de la condensación de humedad que ocurre en las horas de baja disponibilidad de energía radiativa; también se identifica la simulación consistente de las componentes de la

evapotranspiración en la escala mensual. En síntesis, estos hallazgos indican que es posible que se altere el desempeño del modelo debido a su sensibilidad a los diferentes tipos de cobertura vegetal presentes en el área de estudio, determinando que para tipos de cobertura considerados más naturales, se tiene una mejor simulación, mientras que para la cobertura donde se realizan actividades relacionadas con usos agrícolas, el modelo no logra detectar áreas donde hay crecimiento de cultivos intervenidos antrópicamente.

Si bien la dinámica de la vegetación juega un papel de vital importancia en la regulación hídrica de la cuenca del Amazonas, también es importante considerar en los ejercicios de modelación del sistema terrestre, el efecto combinado de diferentes esquemas de parametrización que sean compatibles y representen de forma eficiente las retroalimentaciones entre la biosfera y la atmósfera, considerando puntualmente la inclusión de otras fuentes de humedad como la que es advectada desde los océanos tropicales; esto con el fin de reducir las incertidumbres que puedan resultar en una pobre respuesta de los modelos de superficie, debida principalmente a los datos de forzamiento que usualmente presentan diferencias en los perfiles verticales de la temperatura en la atmósfera y en los patrones horizontales del transporte de humedad.

Los resultados obtenidos apuntan a la necesidad de enfocar la atención en la variabilidad estacional de la evapotranspiración, en conjunto con las demás componentes interrelacionadas del ciclo hidrológico, y de qué manera estos cambios contribuyen al comienzo prematuro y a la prolongación de la estación seca, representando un incremento del índice de vulnerabilidad de los ecosistemas amazónicos a la ocurrencia de eventos de sequía extrema, principalmente durante el invierno austral, cuando los niveles de humedad atmosférica son relativamente bajos, trayendo como consecuencia la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales y pérdida exacerbada de especies arbóreas, que en conjunto con su biodiversidad asociada, sostienen el equilibrio frágil de este ecosistema. Por tal razón es fundamental apelar a los entes gubernamentales y a la sociedad en general, por la urgente necesidad de tomar medidas equiparables a la criticidad del riesgo que representa la posible extinción del ecosistema que produce aproximadamente la mitad de su propia lluvia y que a su vez alberga un vasto porcentaje de la biodiversidad mundial.

## Referencias bibliográficas

Agarwal, C. (2002). A review and assessment of land-use change models: dynamics of space, time, and human choice.

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), 2647-2665.

Alves, L. M., Marengo, J. A., Fu, R., & Bombardi, R. J. (2017). Sensitivity of Amazon regional climate to deforestation. *American Journal of Climate Change*, *6*(1), 75-98.

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), 2861-2884

Arias, P. A., Martínez, J. A., Mejía, J. D., Pazos, M. J., Espinoza, J. C., & Wongchuig-Correa, S. (2020). Changes in Normalized Difference Vegetation Index in the Orinoco and Amazon River basins: links to tropical Atlantic surface temperatures. *Journal of Climate*, *33*(19), 8537-8559.

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.

Barlage, M., Tewari, M., Chen, F., Miguez-Macho, G., Yang, Z. L., & Niu, G. Y. (2015). The effect of groundwater interaction in North American regional climate simulations with WRF/Noah-MP. *Climatic Change*, *129*(3), 485-498.

Betts, R. A., Cox, P. M., Collins, M., Harris, P. P., Huntingford, C., & Jones, C. D. (2004). The role of ecosystem-atmosphere interactions in simulated Amazonian precipitation decrease and forest dieback under global climate warming. *Theoretical and applied climatology*, *78*(1), 157-175.

Butt, N., De Oliveira, P. A., & Costa, M. H. (2011). Evidence that deforestation affects the onset of the rainy season in Rondonia, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *116*(D11).

Cai, X., Yang, Z. L., David, C. H., Niu, G. Y., & Rodell, M. (2014). Hydrological evaluation of the Noah-MP land surface model for the Mississippi River Basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *119*(1), 23-38.

- Chou, S. C., Lyra, A., Chagas, D., Dereczynski, C., Gomes, J., & Tavares, P. (2018, April). Downscaling projections of climate change over South America and Central America under RCP4. 5 and RCP8. 5 emission scenarios. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 8866).
- Correia, F. W. S., Alvalá, R. C. D. S., & Manzi, A. O. (2008). Modeling the impacts of land cover change in Amazonia: a regional climate model (RCM) simulation study. *Theoretical and Applied Climatology*, *93*(3), 225-244.
- Costa, M. H., & Foley, J. A. (2000). Combined effects of deforestation and doubled atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations on the climate of Amazonia. *Journal of Climate*, *13*(1), 18-34.
- 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.
- Davin, E. L., & de Noblet-Ducoudré, N. (2010). Climatic impact of global-scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes. *Journal of Climate*, *23*(1), 97-112.
- Dickinson, R. E., & Henderson-Sellers, A. (1988). Modelling tropical deforestation: A study of GCM land-surface parametrizations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, *114*(480), 439-462.
- Ek, M. B., Mitchell, K. E., Lin, Y., Rogers, E., Grunmann, P., Koren, V., ... & Tarpley, J. D. (2003). Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *108*(D22).
- Fu, R., Dickinson, R. E., Chen, M., & Wang, H. (2001). How do tropical sea surface temperatures influence the seasonal distribution of precipitation in the equatorial Amazon?. *Journal of Climate*, *14*(20), 4003-4026.
- Fu, R., Yin, L., Li, W., Arias, P. A., Dickinson, R. E., Huang, L., ... & 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*, *110*(45), 18110-18115.
- Gao, Y., Li, K., Chen, F., Jiang, Y., & Lu, C. (2015). Assessing and improving Noah-MP land model simulations for the central Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *120*(18), 9258-9278.
- IDEAM - UNAL, Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia, Bogotá, D.C., 2018.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2019, 16 marzo). Décimo séptimo Boletín de Detecciones Tempranas de Deforestación [Comunicado de prensa].

Jackson, R. B., Carpenter, S. R., Dahm, C. N., McKnight, D. M., Naiman, R. J., Postel, S. L., & Running, S. W. (2001). Water in a changing world. *Ecological applications*, 11(4), 1027-1045.

Katul, G. G., Oren, R., Manzoni, S., Higgins, C., & Parlange, M. B. (2012). Evapotranspiration: a process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system. *Reviews of Geophysics*, 50(3).

Leigh Jr, E. G., Davidar, P., Dick, C. W., Terborgh, J., Puyravaud, J. P., ter Steege, H., & Wright, S. J. (2004). Why do some tropical forests have so many species of trees?. *Biotropica*, 36(4), 447-473.

Li, W., & Fu, R. (2004). Transition of the large-scale atmospheric and land surface conditions from the dry to the wet season over Amazonia as diagnosed by the ECMWF re-analysis. *Journal of Climate*, 17(13), 2637-2651.

Lovejoy, T. E., & Nobre, C. (2018). Amazon tipping point.

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).

Martinez, J. A., & Dominguez, F. (2014). Sources of atmospheric moisture for the La Plata River basin. *Journal of Climate*, 27(17), 6737-6753.

Martinez, J. A., Dominguez, F., & Miguez-Macho, G. (2016). Effects of a groundwater scheme on the simulation of soil moisture and evapotranspiration over southern South America. *Journal of Hydrometeorology*, 17(11), 2941-2957.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible, & Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. (2016). Estrategia Integral de Control a la Deforestación - Actualización de cifras de monitoreo de bosques 2016 [Comunicado de prensa ].

Mendonça, M. (2017). Monzón sudamericano: la integración de la circulación amazónica y altiplánica y las variabilidades climáticas del altiplano andino chileno. *Diálogo andino*, (54), 21-30.

Mitchell, K. E., Lohmann, D., Houser, P. R., Wood, E. F., Schaake, J. C., Robock, A., ... & Bailey, A. A. (2004). The multi-institution North American Land Data Assimilation System

(NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D7).

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data Discussions*, 1-50.

Niu, G. Y., Yang, Z. L., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., ... & Xia, Y. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).

Perz, S. G., Aramburú, C., & Bremner, J. (2005). Population, land use and deforestation in the Pan Amazon Basin: a comparison of Brazil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Perú and Venezuela. *Environment, development and sustainability*, 7(1), 23-49.

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), 4169-4189.

Sampaio, G., Nobre, C., Costa, M. H., Satyamurty, P., Soares-Filho, B. S., & Cardoso, M. (2007). Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, 34(17).

Soares-Filho, B. S., Nepstad, D. C., Curran, L. M., Cerqueira, G. C., Garcia, R. A., Ramos, C. A., ... & Schlesinger, P. (2006). Modelling conservation in the Amazon basin. *Nature*, 440(7083), 520-523.

Sombroek, W. (2001). Spatial and temporal patterns of Amazon rainfall. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 30(7), 388-396.

Swann, A. L., Longo, M., Knox, R. G., Lee, E., & Moorcroft, P. R. (2015). Future deforestation in the Amazon and consequences for South American climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 214, 12-24.

Turner, B. L., Lambin, E. F., & Reenberg, A. (2007). The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(52), 20666-20671.

Upadhyay, T. P., Solberg, B., & Sankhayan, P. L. (2006). Use of models to analyse land-use changes, forest/soil degradation and carbon sequestration with special reference to Himalayan region: A review and analysis. *Forest Policy and Economics*, 9(4), 349-371.

- Van der Ent, R. J., Savenije, H. H., Schaeffli, B., & Steele-Dunne, S. C. (2010). Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research*, 46(9).
- von Randow, R. C., von Randow, C., Hutjes, R. W., Tomasella, J., & Kruijt, B. (2012). Evapotranspiration of deforested areas in central and southwestern Amazonia. *Theoretical and Applied Climatology*, 109(1), 205-220.
- Wagener, T., Sivapalan, M., & Troch, P. a., McGlynn, BL, Harman, CJ, Gupta, HV,... Wilson, JS (2010). The future of hydrology: An evolving science for a changing world. *Water Resources Research*, 46(5).
- Yang, Z. L., Niu, G. Y., Mitchell, K. E., Chen, F., Ek, M. B., Barlage, M., ... & Xia, Y. (2011). The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 2. Evaluation over global river basins. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D12).
- Yang, Z., & Dominguez, 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.
- Zemp, D. C., Schleussner, C. F., Barbosa, H. M. J., Van der Ent, R. J., Donges, J. F., Heinke, J., ... & Rammig, A. (2014). On the importance of cascading moisture recycling in South America. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14(23), 13337-13359
- Zemp, D. C., Schleussner, C. F., Barbosa, H. M., Hirota, M., Montade, V., Sampaio, G., ... & Rammig, A. (2017). Self-amplified Amazon forest loss due to vegetation-atmosphere feedbacks. *Nature communications*, 8(1), 1-10.

## Anexos

### Anexo A. Medidas estadísticas y pruebas de significancia

**Tabla A1.** Medidas estadísticas para la región del Arco de Deforestación

#### MEDIDAS ESTADISTICAS

Datos	Media	Desv. est.	C. asimetria	Mediana	q25	q75
ET CTRL	2.90	0.45	-0.15	2.93	2.68	3.23
ET DEFO	2.55	0.81	-0.59	2.82	1.87	3.19

**Tabla A2.** Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del Arco de Deforestación

#### PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA DIFERENCIAS DE MEDIAS alpha = 0.05 - H0: Media ET CTRL = Media ET DEFO

Muestras apareadas	n efectiva	z	zc	Resultado
ET CTRL vs ET DEFO	18.91	3.29	1.74	La diferencia entre los valores medios es significativa

**Tabla A3.** Prueba de significancia para tendencias en la región del Arco de Deforestación

#### PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA TENDENCIAS t criticos para un nivel de significancia de 0,05 y 120 grados de libertad t0.05 = -1.6577592849346416 t0.95 = 1.657759284934641

Muestra	Pendiente	t	Resultado
ET CTRL	-0.0001	-0.0845	La serie no presenta una tendencia significativa
ET DEFO	-0.0013	-2.0928	La serie presenta una tendencia significativa

#### Regresion lineal:

ET\_CTRL' = -6.122494158148518e-05 T 0.0037041089656799572  
ET\_DEFO' = -0.0013463749550418859 T 0.08145568478003404

**Tabla A4.** Medidas estadísticas para la región del Centro de Amazonía

MEDIDAS ESTADISTICAS

Datos	Media	Desv. est.	C. asimetria	Mediana	q25	q75
ET CTRL	3.23	0.35	-0.28	3.23	2.99	3.50
ET DEFO	3.12	0.33	0.10	3.10	2.90	3.37

**Tabla A5.** Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del Centro de Amazonía

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA DIFERENCIAS DE MEDIAS

alpha = 0.05 - H0: Media ET CTRL = Media ET DEFO

Muestras apareadas	n efectiva	z	zc	Resultado
ET CTRL vs ET DEFO	25.30	2.85	1.71	La diferencia entre los valores medios es significativa

**Tabla A6.** Prueba de significancia para tendencias en la región del Centro de Amazonía

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA TENDENCIAS

t criticos para un nivel de significancia de 0,05 y 120 grados de libertad

t0.05 = -1.6577592849346416

t0.95 = 1.657759284934641

Muestra	Pendiente	t	Resultado
ET CTRL	0.0010	1.2693	La serie no presenta una tendencia significativa
ET DEFO	0.0002	0.2710	La serie no presenta una tendencia significativa

Regresion lineal:

ET\_CTRL' = 0.0009966610874278248 T -0.06029799578938339

ET\_DEFO' = 0.00019956112127047522 T -0.012073447836863736

**Tabla A7.** Prueba de significancia para tendencias en la región del Norte de Amazonía

MEDIDAS ESTADISTICAS

Datos	Media	Desv. est.	C. asimetria	Mediana	q25	q75
ET CTRL	3.24	0.38	0.10	3.19	2.92	3.53
ET DEFO	3.14	0.30	-0.06	3.14	2.91	3.37

**Tabla A8.** Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del Norte de Amazonía

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA DIFERENCIAS DE MEDIAS

alpha = 0.05 - H0: Media ET CTRL = Media ET DEFO

Muestras apareadas	n efectiva	z	zc	Resultado
ET CTRL vs ET DEFO	22.36	2.74	1.72	La diferencia entre los valores medios es significativa

**Tabla A9.** Prueba de significancia para tendencias en la región del Norte de Amazonía

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA TENDENCIAS

t criticos para un nivel de significancia de 0,05 y 120 grados de libertad

t0.05 = -1.6577592849346416

t0.95 = 1.657759284934641

Muestra	Pendiente	t	Resultado
ET CTRL	0.0011	1.6295	La serie no presenta una tendencia significativa
ET DEFO	0.0002	0.2855	La serie no presenta una tendencia significativa

Regresion lineal:

ET\_CTRL' = 0.0010823547687549319 T -0.06548246350967328

ET\_DEFO' = 0.00018924003499932058 T -0.011449022117458895

**Tabla A10.** Prueba de significancia para tendencias en la región del Norte de Orinoquía

MEDIDAS ESTADISTICAS

Datos	Media	Desv. est.	C. asimetria	Mediana	q25	q75
ET CTRL	2.65	0.65	-0.42	2.79	2.23	3.15
ET DEFO	2.65	0.65	-0.42	2.79	2.23	3.15

**Tabla A11.** Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del Norte de Orinoquía

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA DIFERENCIAS DE MEDIAS

alpha = 0.05 - H0: Media ET CTRL = Media ET DEFO

Muestras apareadas	n efectiva	z	zc	Resultado
ET CTRL vs ET DEFO	184.39	1.61	1.65	La diferencia entre los valores medios no es significativa

**Tabla A12.** Prueba de significancia para tendencias en la región del Norte de Orinoquía

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA TENDENCIAS

t criticos para un nivel de significancia de 0,05 y 120 grados de libertad

t0.05 = -1.6577592849346416

t0.95 = 1.657759284934641

Muestra	Pendiente	t	Resultado
ET CTRL	0.0011	1.6295	La serie no presenta una tendencia significativa
ET DEFO	0.0002	0.2855	La serie no presenta una tendencia significativa

Regresion lineal:

ET\_CTRL' = 0.0010823547687549319 T -0.06548246350967328

ET\_DEFO' = 0.00018924003499932058 T -0.011449022117458895

**Tabla A13.** Prueba de significancia para tendencias en la región del Piedemonte Amazónico

MEDIDAS ESTADISTICAS

Datos	Media	Desv. est.	C. asimetria	Mediana	q25	q75
ET CTRL	2.51	0.27	0.18	2.49	2.30	2.70
ET DEFO	2.50	0.28	0.15	2.49	2.29	2.70

**Tabla A14.** Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del Piedemonte Amazónico

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA DIFERENCIAS DE MEDIAS

alpha = 0.05 - H0: Media ET CTRL = Media ET DEFO

Muestras apareadas	n efectiva	z	zc	Resultado
ET CTRL vs ET DEFO	24.87	3.10	1.71	La diferencia entre los valores medios es significativa

**Tabla A15.** Prueba de significancia para tendencias en la región del Piedemonte Amazónico

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA TENDENCIAS

t criticos para un nivel de significancia de 0,05 y 120 grados de libertad

t0.05 = -1.6577592849346416

t0.95 = 1.657759284934641

Muestra	Pendiente	t	Resultado
ET CTRL	0.0002	0.4095	La serie no presenta una tendencia significativa
ET DEFO	0.0001	0.2326	La serie no presenta una tendencia significativa

Regresion lineal:

ET\_CTRL' = 0.0002244178639176341 T -0.013577280767016751

ET\_DEFO' = 0.0001252019813968604 T -0.007574719874510031

**Tabla A16.** Prueba de significancia para tendencias en la región del Sur de Orinoquía

MEDIDAS ESTADISTICAS

Datos	Media	Desv. est.	C. asimetria	Mediana	q25	q75
ET CTRL	3.12	0.43	0.25	3.09	2.81	3.41
ET DEFO	3.07	0.41	0.32	3.03	2.78	3.34

**Tabla A17.** Prueba de significancia para diferencia de medias en la región del Sur de Orinoquía

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA DIFERENCIAS DE MEDIAS  
 alpha = 0.05 - H0: Media ET CTRL = Media ET DEFO

Muestras apareadas	n efectiva	z	zc	Resultado
ET CTRL vs ET DEFO	32.72	4.51	1.70	La diferencia entre los valores medios es significativa

**Tabla A18.** Prueba de significancia para tendencias en la región del Sur de Orinoquía

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA TENDENCIAS  
 t criticos para un nivel de significancia de 0,05 y 120 grados de libertad  
 t0.05 = -1.6577592849346416  
 t0.95 = 1.657759284934641

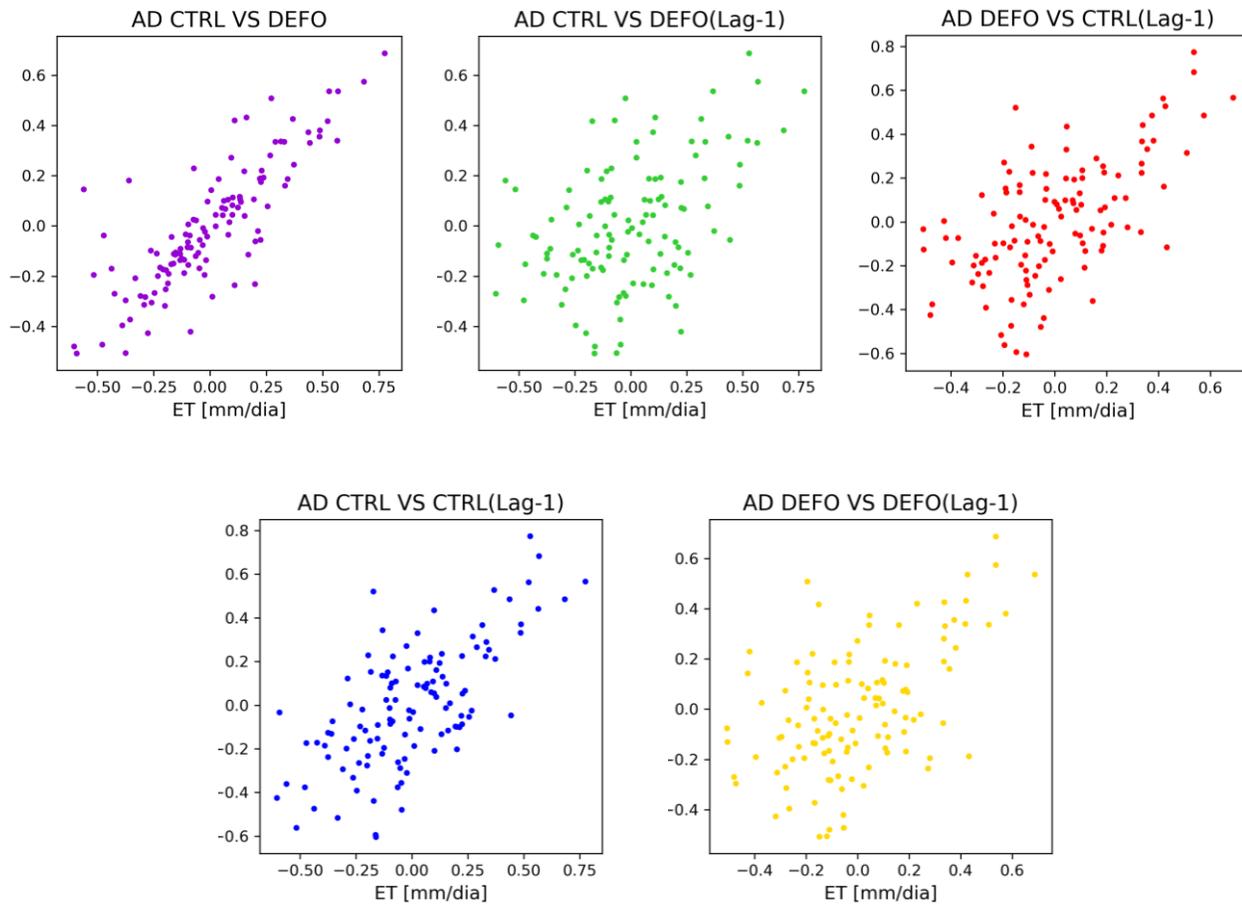
Muestra	Pendiente	t	Resultado
ET CTRL	-0.0033	-3.4056	La serie presenta una tendencia significativa
ET DEFO	-0.0034	-3.6386	La serie presenta una tendencia significativa

Regresion lineal:

ET\_CTRL' = -0.003262842296379832 T 0.19740195893097987

ET\_DEFO' = -0.003387133107949505 T 0.20492155303094514

## Anexo B. Correlaciones y significancia estadística



**Figura B1.** Correlaciones de anomalías DEFO vs CTRL para la región del Arco de Deforestación

**Tabla B1.** Prueba de significancia para correlaciones de anomalías DEFO y CTRL en la región del Arco de Deforestación

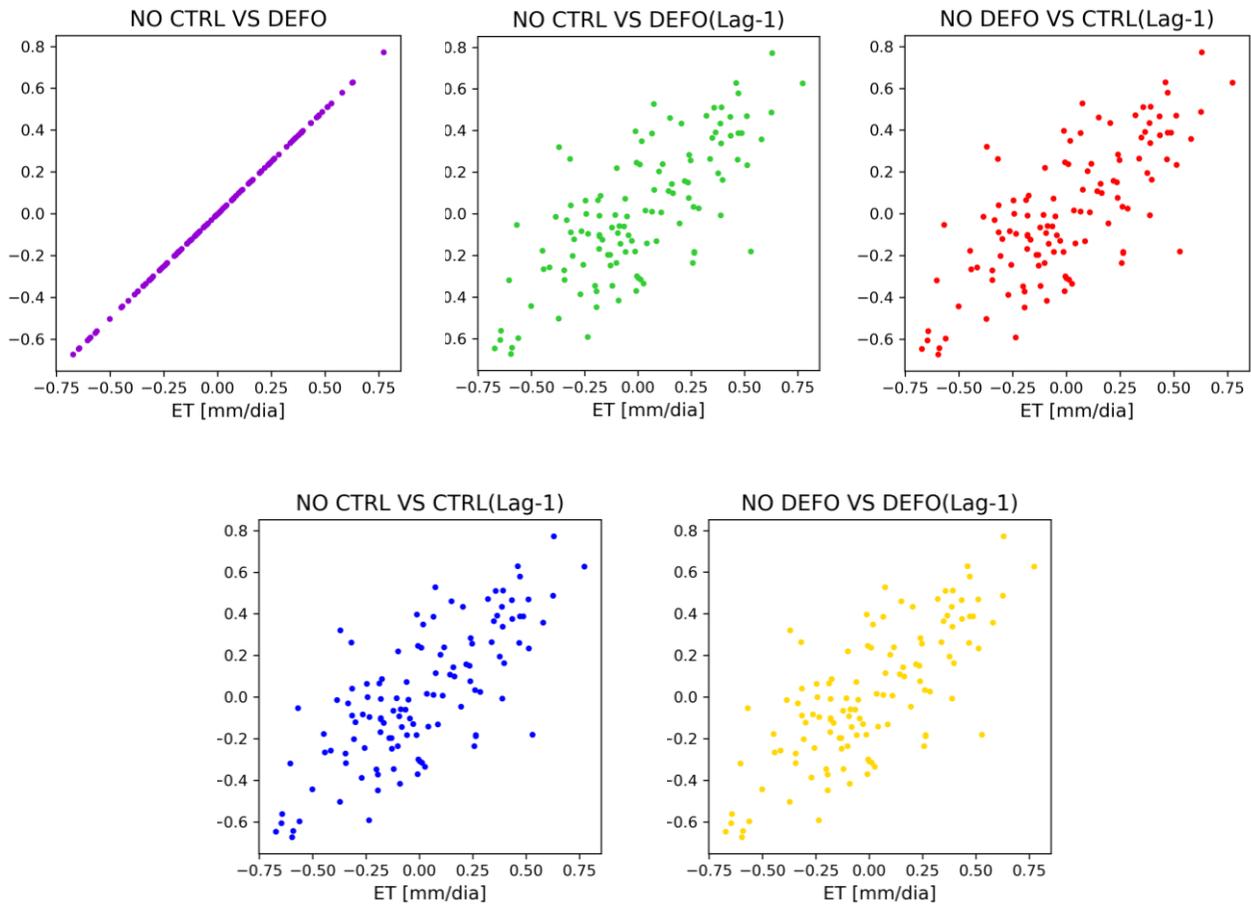
PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA CORRELACIONES

t críticos para un nivel de significancia de 0,05 y 120 grados de libertad

t0.025 = -1.9800998764260065

t0.975 = 1.980099876426006

Par muestras	Correlacion	t	Resultado
CTRL vs DEFO	0.8867	20.8290	Las muestras presentan una correlacion significativa
CTRL vs DEFO(lag-1)	0.5881	7.8980	Las muestras presentan una correlacion significativa
DEFO vs CTRL(lag-1)	0.7700	13.1079	Las muestras presentan una correlacion significativa
CTRL vs CTRL(lag-1)	0.7342	11.7464	Las muestras presentan una correlacion significativa
DEFO vs DEFO(lag-1)	0.7640	12.8620	Las muestras presentan una correlacion significativa



**Figura B2.** Correlaciones de anomalías DEFO vs CTRL para la región del Norte de Orinoquía

**Tabla B2.** Prueba de significancia para correlaciones de anomalías DEFO y CTRL en la región del Norte de Orinoquía

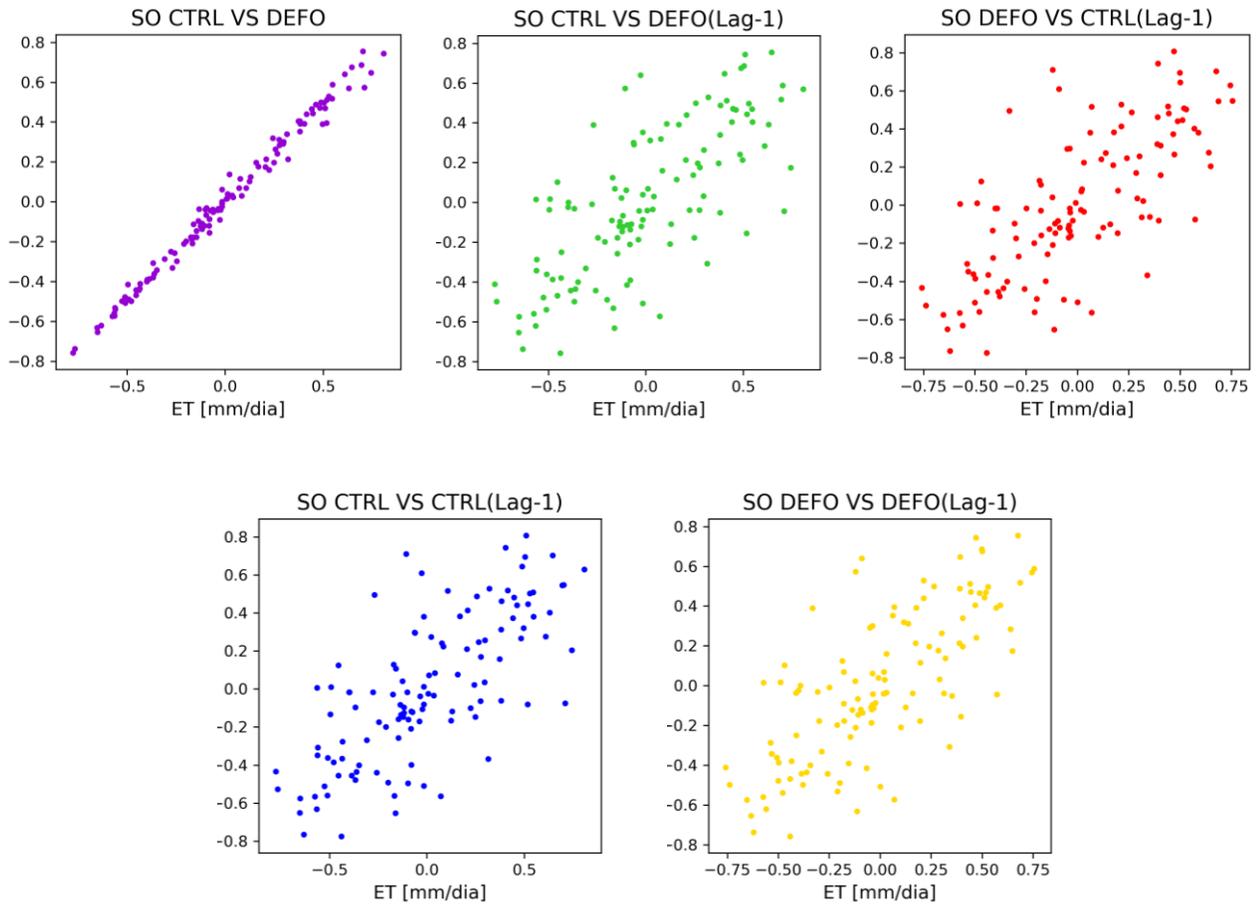
PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA CORRELACIONES

t criticos para un nivel de significancia de 0,05 y 120 grados de libertad

t0.025 = -1.9800998764260065

t0.975 = 1.980099876426006

Par muestras	Correlacion	t	Resultado
CTRL vs DEFO	1.0000	37728.5890	Las muestras presentan una correlacion significativa
CTRL vs DEFO(lag-1)	0.7707	13.1403	Las muestras presentan una correlacion significativa
DEFO vs CTRL(lag-1)	0.7708	13.1418	Las muestras presentan una correlacion significativa
CTRL vs CTRL(lag-1)	0.7708	13.1413	Las muestras presentan una correlacion significativa
DEFO vs DEFO(lag-1)	0.7708	13.1408	Las muestras presentan una correlacion significativa



**Figura B3.** Correlaciones de anomalías DEFO vs CTRL para la región del Sur de Orinoquía

**Tabla B3.** Prueba de significancia para correlaciones de anomalías DEFO y CTRL en la región del Sur de Orinoquía

PRUEBA DE SIGNIFICANCIA PARA CORRELACIONES

t críticos para un nivel de significancia de 0,05 y 120 grados de libertad

t<sub>0.025</sub> = -1.9800998764260065

t<sub>0.975</sub> = 1.980099876426006

Par muestras	Correlacion	t	Resultado
CTRL vs DEFO	0.9911	81.0076	Las muestras presentan una correlacion significativa
CTRL vs DEFO(lag-1)	0.6916	10.4008	Las muestras presentan una correlacion significativa
DEFO vs CTRL(lag-1)	0.6791	10.0485	Las muestras presentan una correlacion significativa
CTRL vs CTRL(lag-1)	0.6812	10.1072	Las muestras presentan una correlacion significativa
DEFO vs DEFO(lag-1)	0.7000	10.6467	Las muestras presentan una correlacion significativa