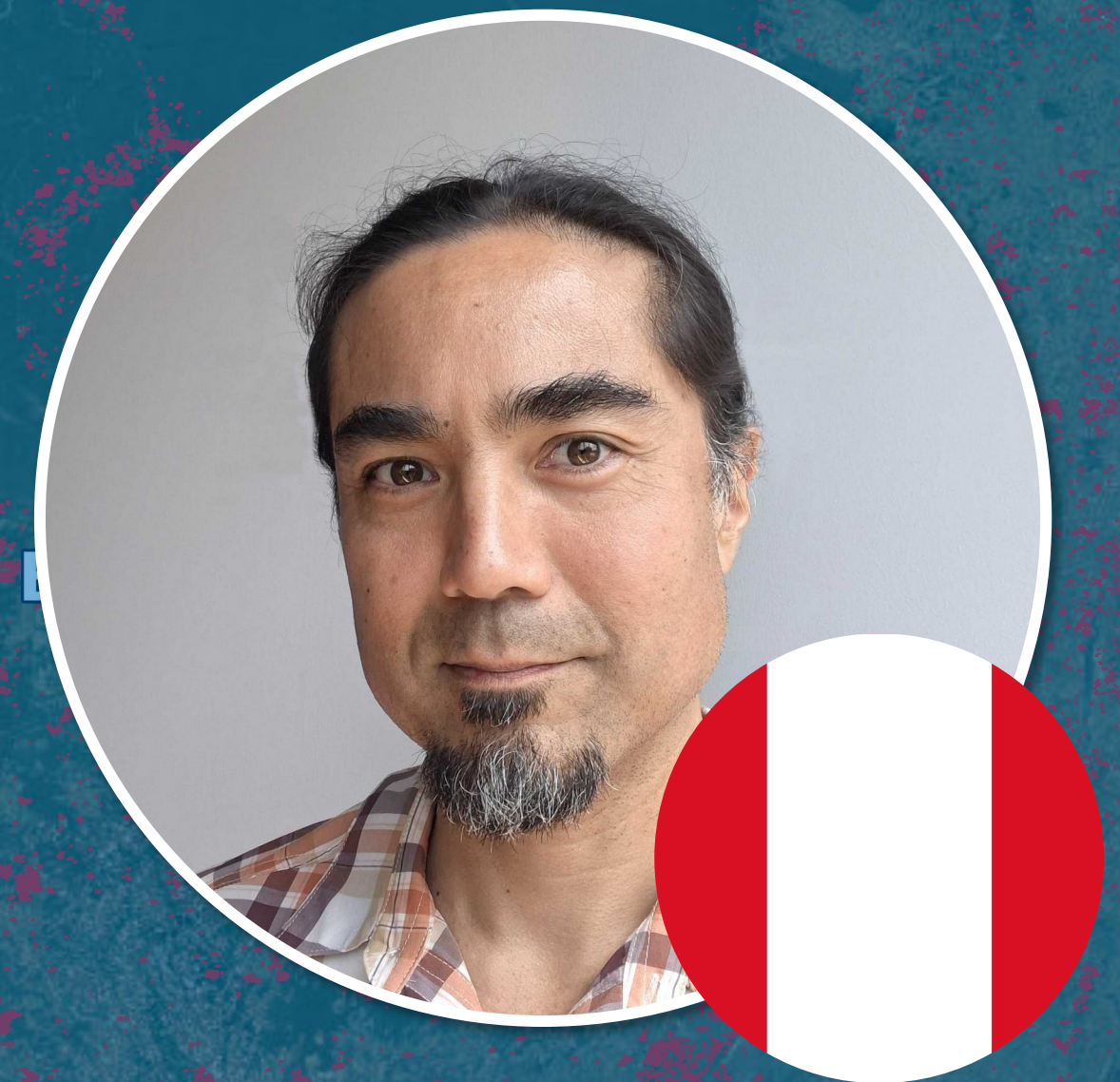


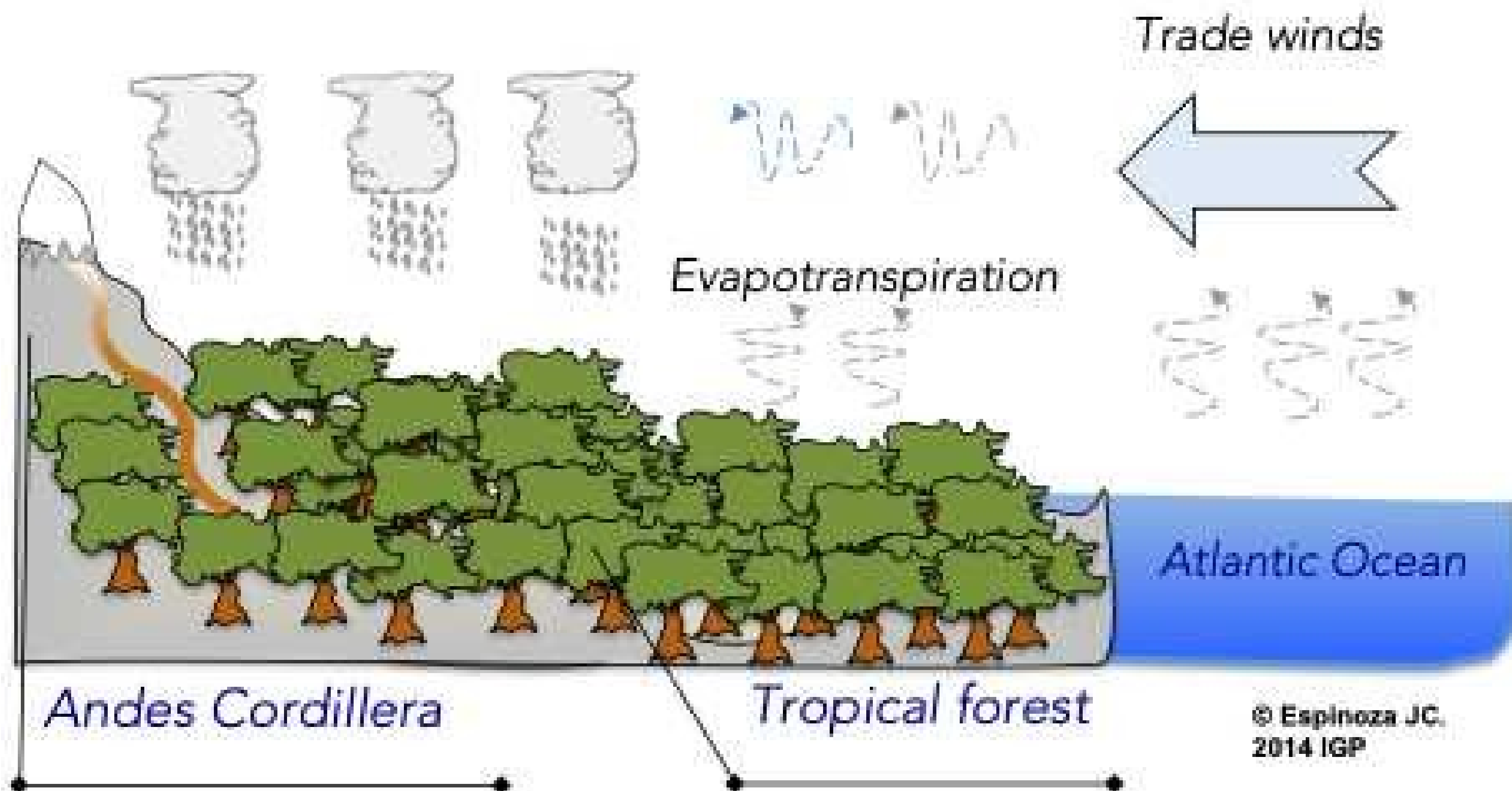
Cambio climático, deforestación, incendios e interacción bosque-atmósfera en la Amazonía

Ken Takahashi¹ y Jhan-Carlo Espinoza²

1. Instituto Geofísico del Perú
2. IRD, Francia / PUCP, Perú



El ciclo hidrológico en la cuenca Amazónica



- La circulación atmosférica y la transpiración de los bosques son elementos clave del ciclo del agua en la Amazonía.

Hasta la mitad de la precipitación andino-amazónica se debe a la transpiración de los árboles amazónicos (Staal et al., 2018).

Ríos aéreos y nubes simuladas

Modelado atmosférico de
alta resolución – WRF
(SAAG)



Existe una alta confianza en que la severidad e intensidad de la sequía aumentará en la cuenca del Amazonas, entre otras regiones



Regiones donde se espera que las sequías empeoren como resultado del cambio climático

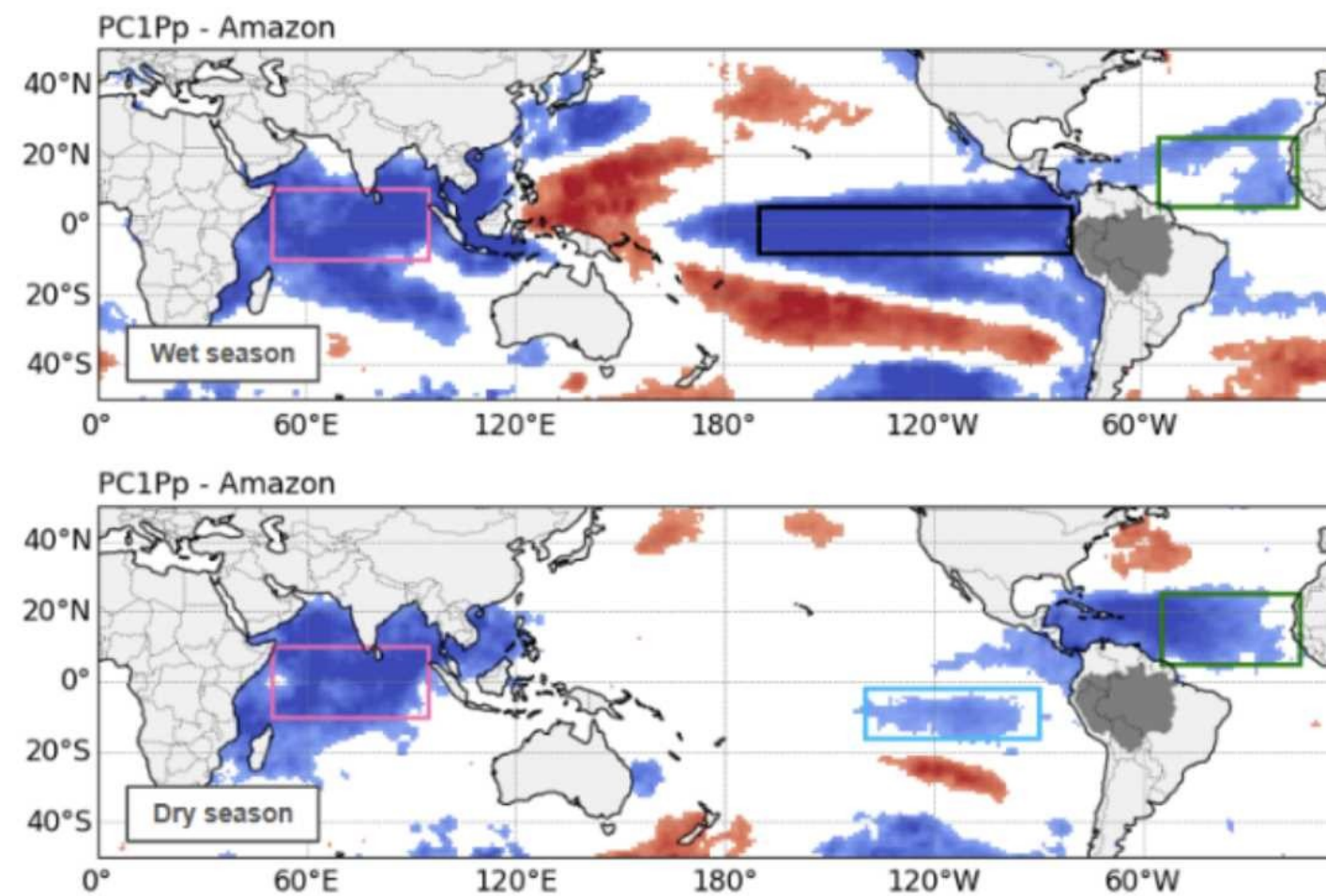


ipcc
INTERGOVERNMENTAL PANEL ON climate change

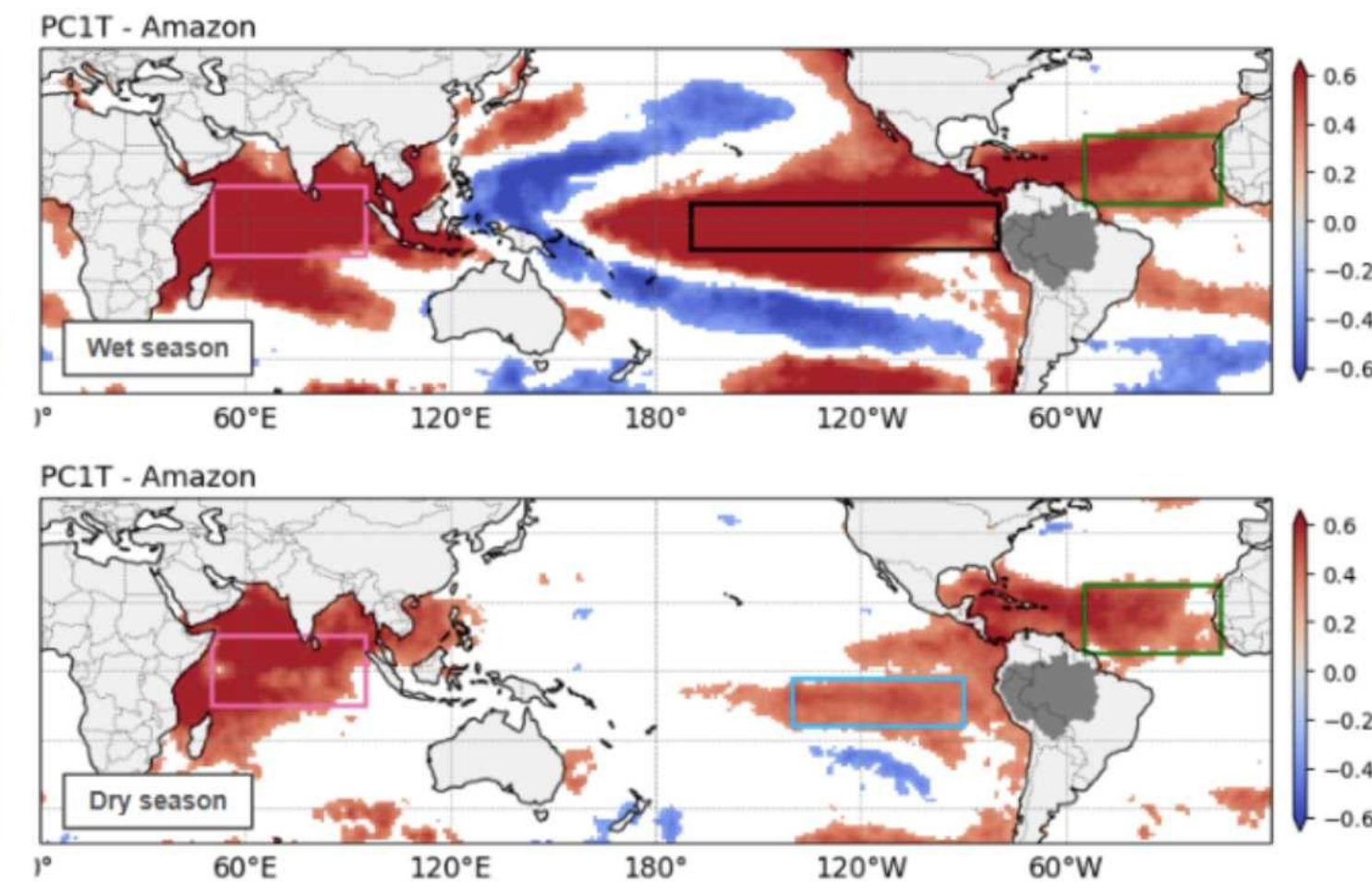
IPCC AR6 WG1 (2021)

Correlaciones entre la temperatura superficial del mar y ...

... precipitación amazónica



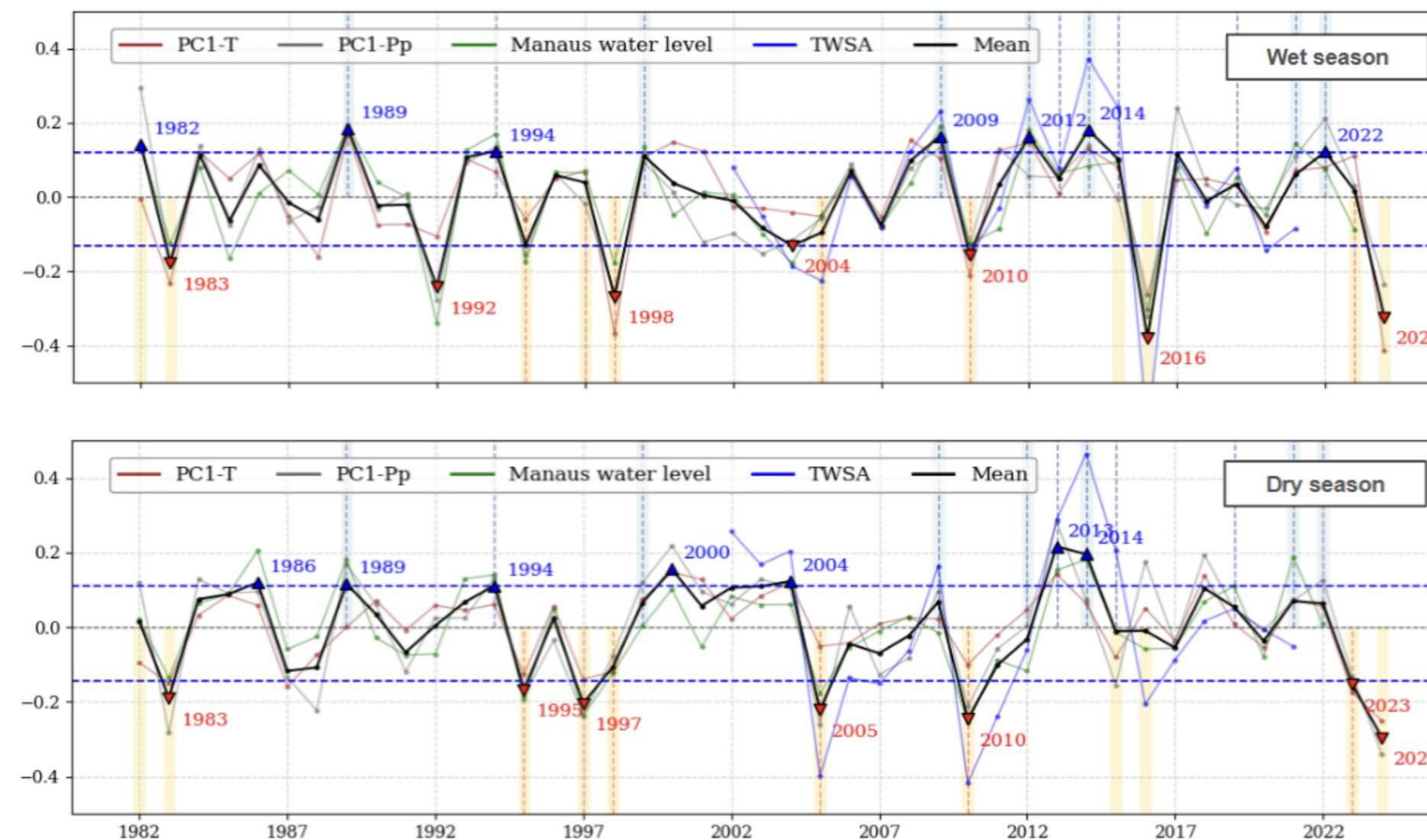
... temperatura amazónica



... en temporada lluviosa

... y temporada seca

Índice hidroclimático compuesto para la cuenca amazónica



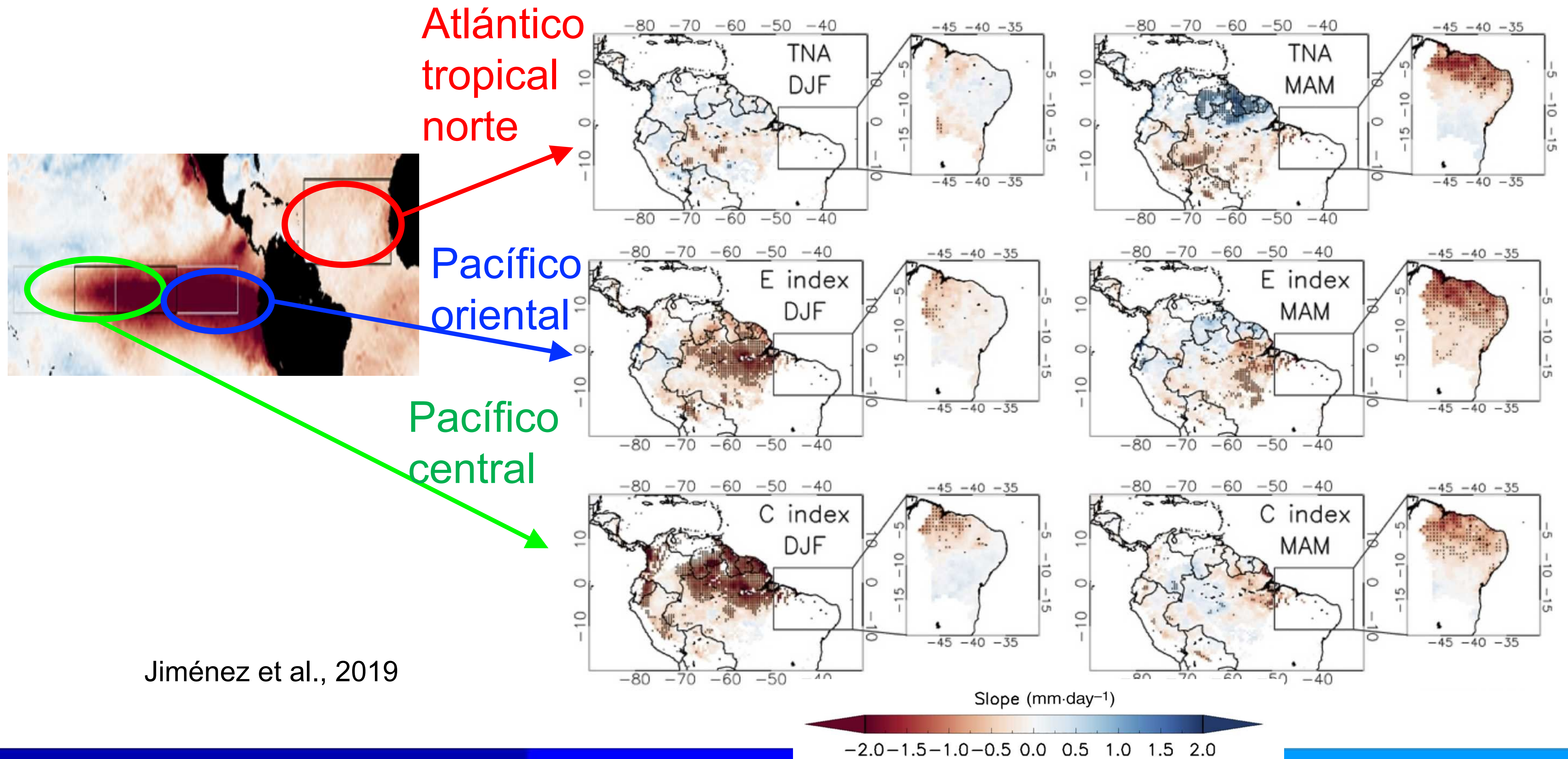
Temporada lluviosa

Temporada seca

Eventos secos y cálidos en la Amazonía están asociados a El Niño, Atlántico tropical norte e Índico cálidos

Botetano, Espinoza, Takahashi et al., en preparación

Efectos de la temperatura superficial del mar sobre las precipitaciones



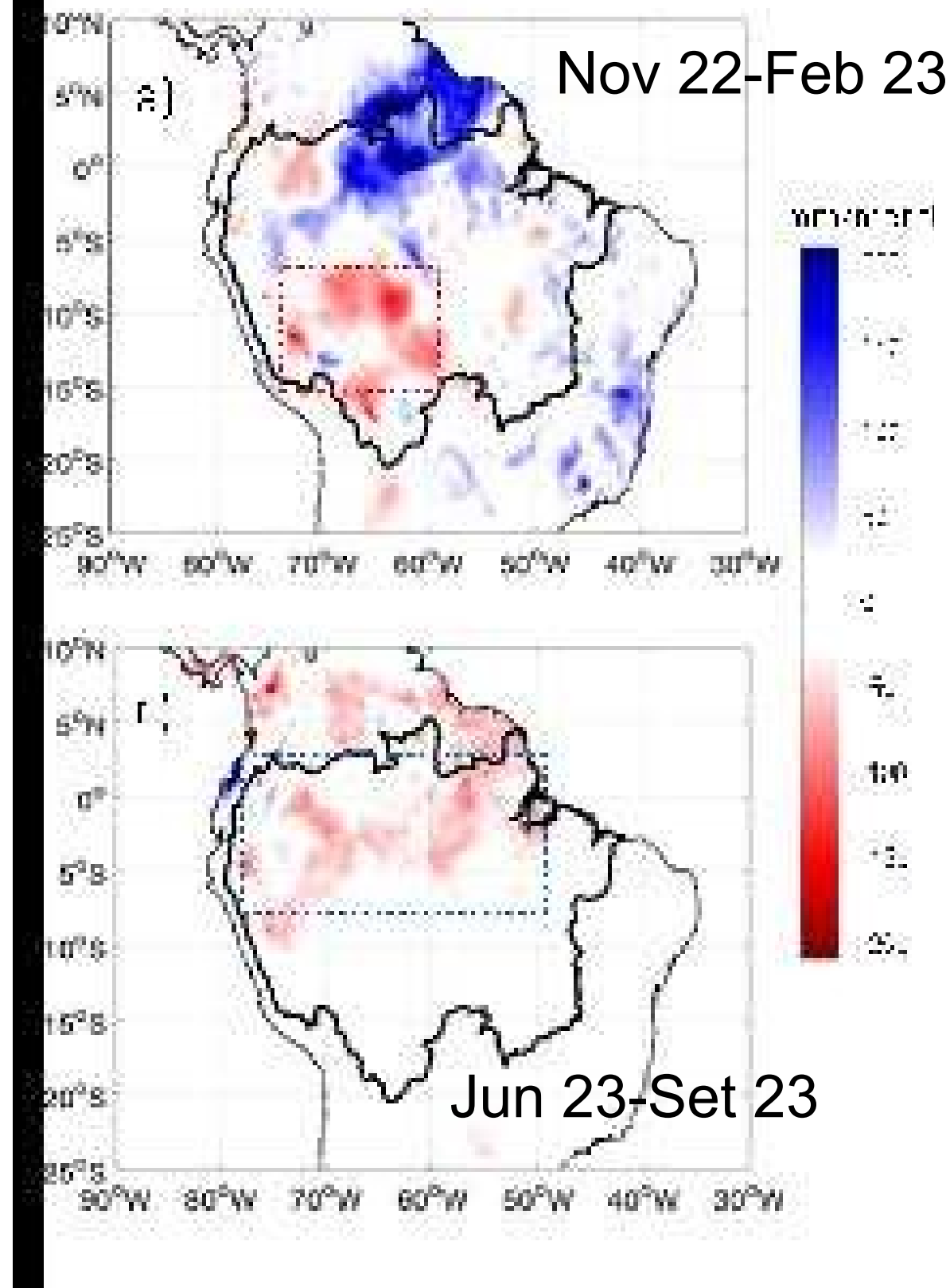
Jiménez et al., 2019

La sequía del 2023 y 2024 en la Amazonía



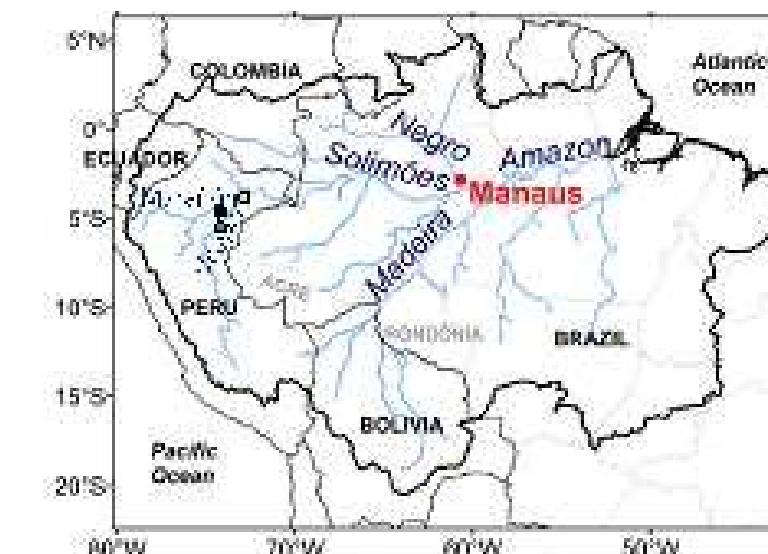
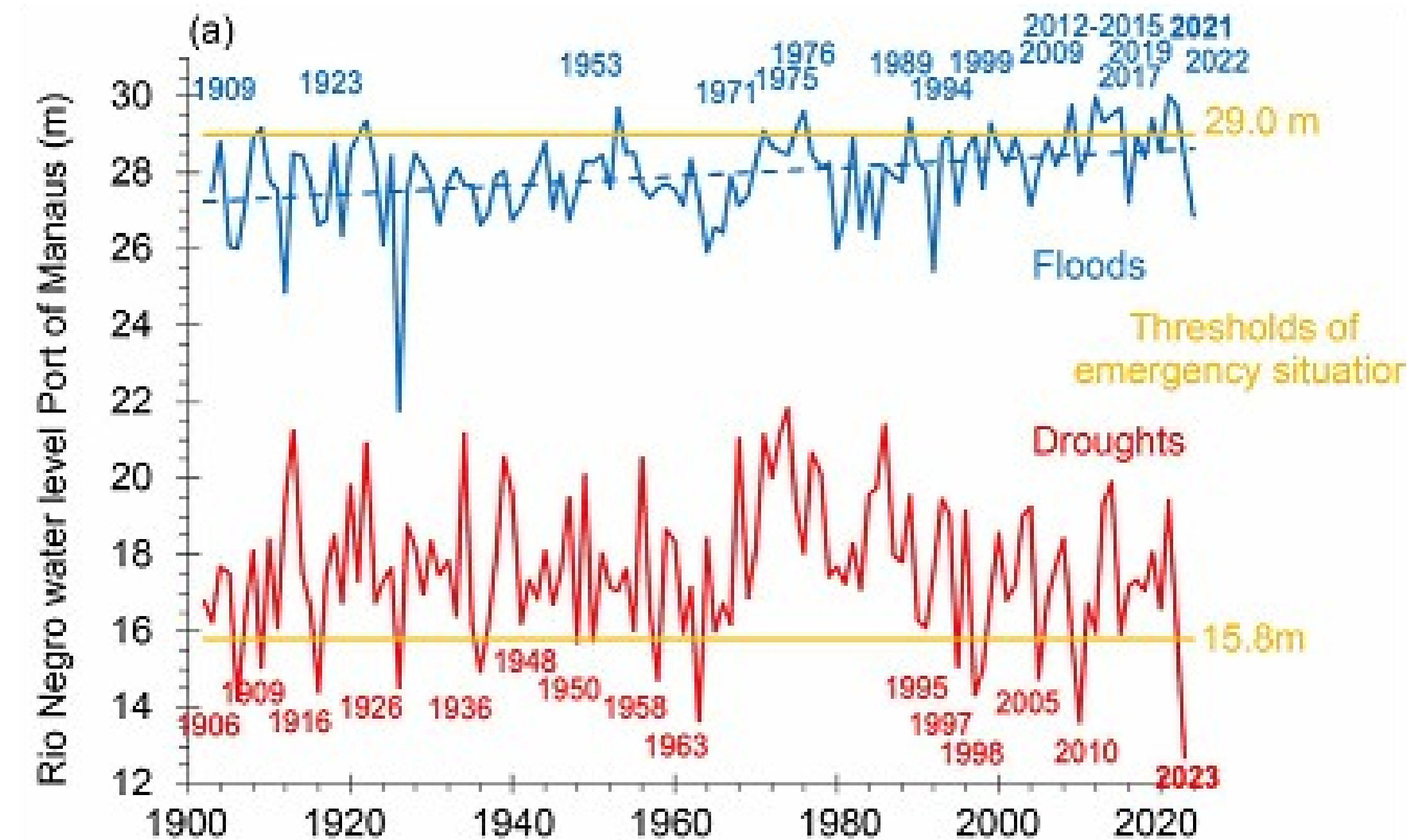
- Nivel mínimo récord del río Negro en Manaus
- Anomalía de temperatura del aire de 3°C (octubre 2023)
- Factores clave: La transición de La Niña a El Niño en 2023 y el calentamiento anómalo generalizado de los océanos a nivel global

Anomalías de precipitación



Espinoza et al., 2023

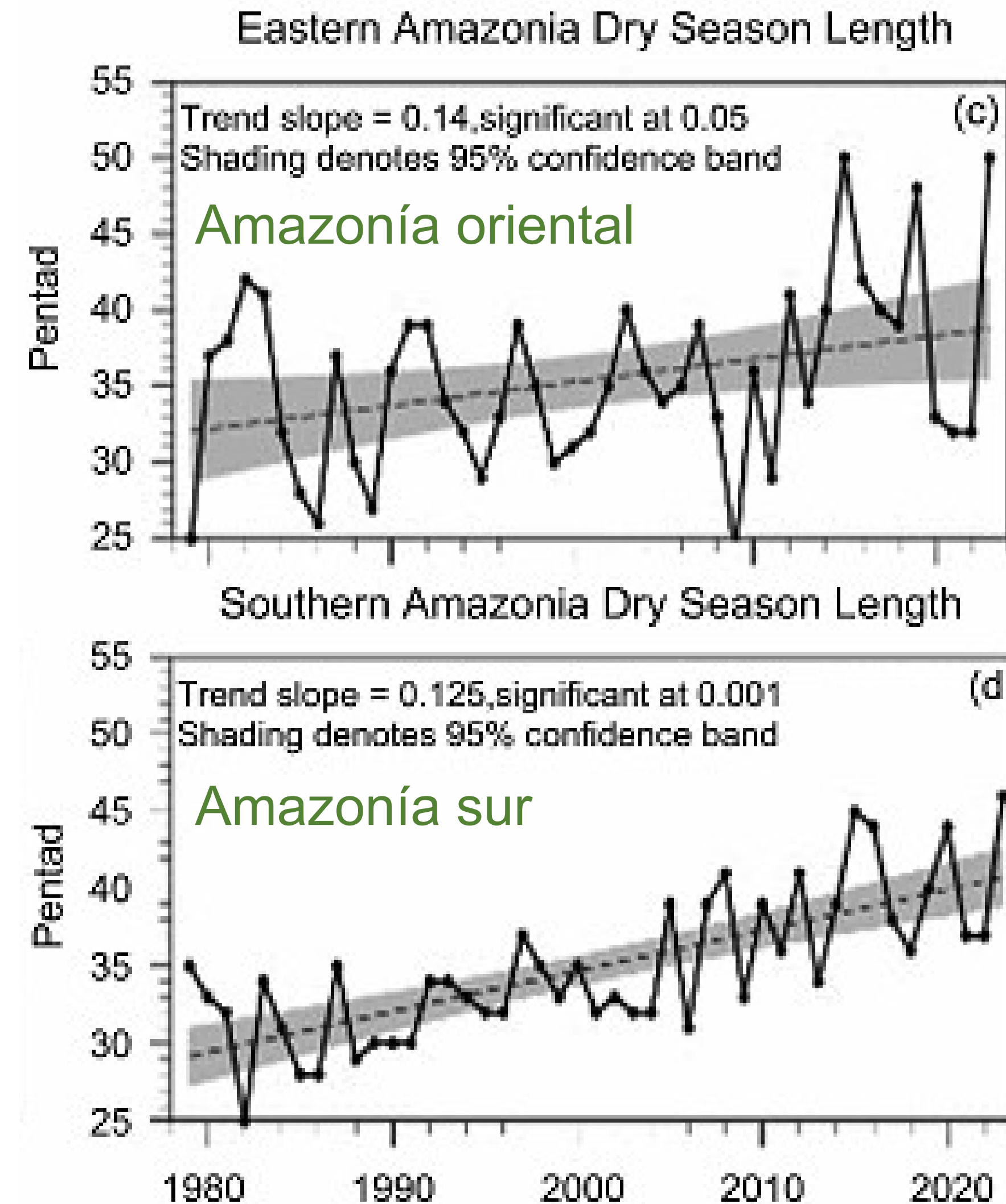
Nivel del río Negro en Manaus



Marengo et al., 2024



Duración de la temporada seca



La temporada seca se está extendiendo, sobre todo en la Amazonía sur



En la Amazonía, se proyecta que tanto la deforestación como la reducción de humedad aumentarán para 2100, lo que resultará en el peor de los casos de hasta un 50% de pérdida de cobertura forestal para 2050.

La deforestación continua del Amazonas, combinada con un clima más cálido, aumenta la probabilidad de que este ecosistema cruce un punto de inflexión hacia un estado seco durante el siglo XXI (confianza baja).

Un posible colapso abrupto de la selva amazónica podría deberse

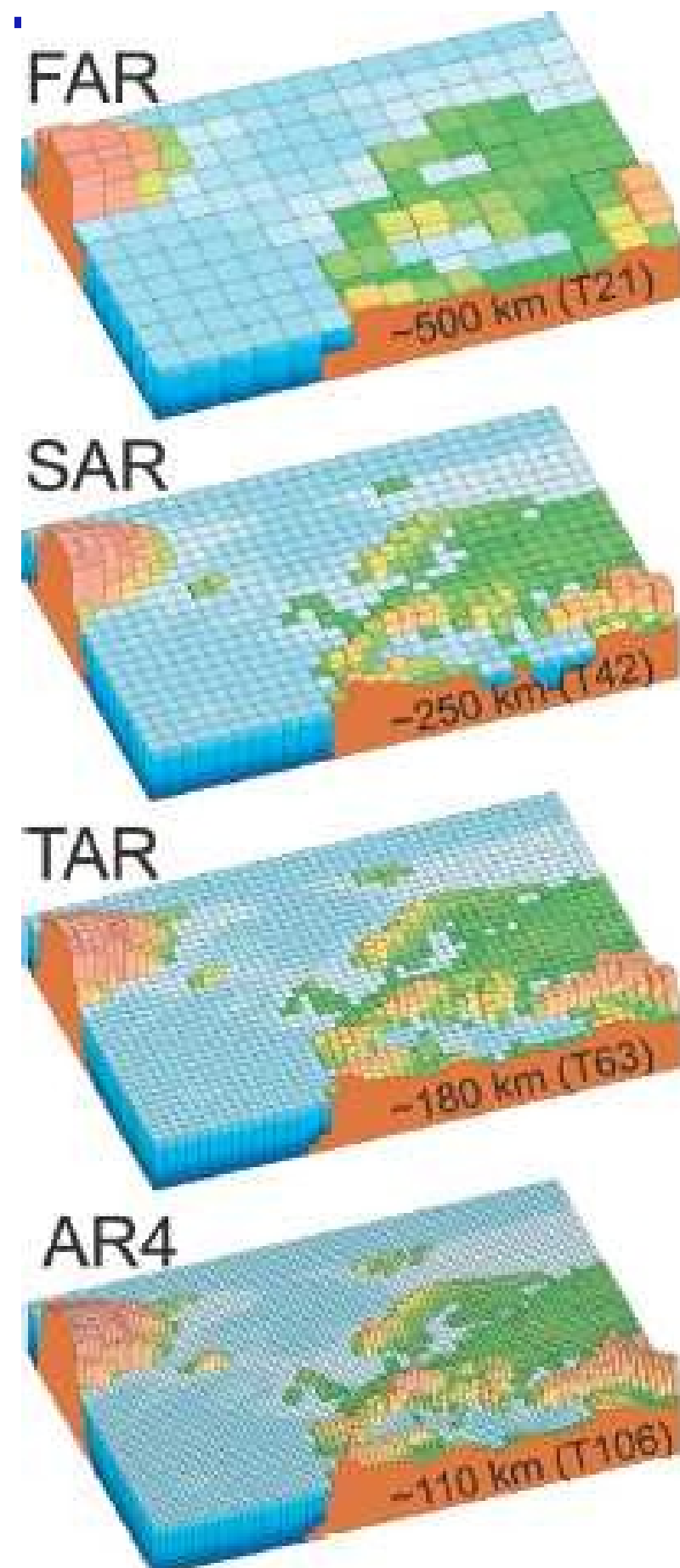
- (i) cambios a gran escala en las condiciones climáticas medias cruzan umbrales climáticos determinados,
- (ii) temperaturas y precipitaciones extremas, o
- (iii) **posible aumento e intermitencia de la actividad de incendios forestales**

IPCC AR6 WG1 (2021)

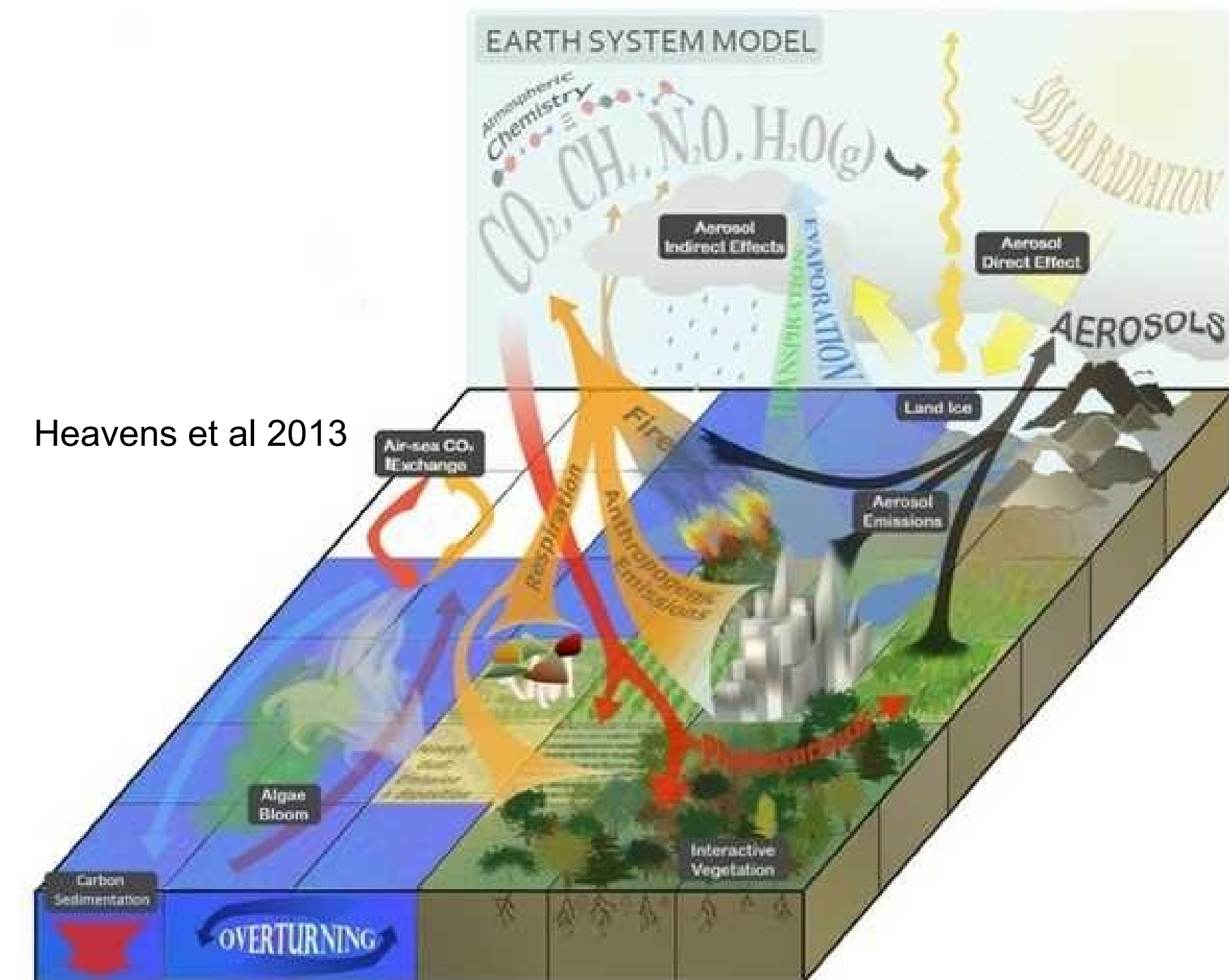
Imagen: © IRD - Marie-Pierre Ledru



Modelos del Sistema Tierra



The World in Global Climate Models



Heavens et al 2013

Simulan el comportamiento e interacción de las componentes del Sistema Tierra, como la atmósfera, el océano, incluso procesos biológicos como los efectos de la dinámica de la vegetación en el clima

Cambios proyectados a largo plazo (2081-2100 vs 1995-2014)



Déficit de presión de vapor

Humedad del suelo
(10 cm superiores)

Humedad del suelo

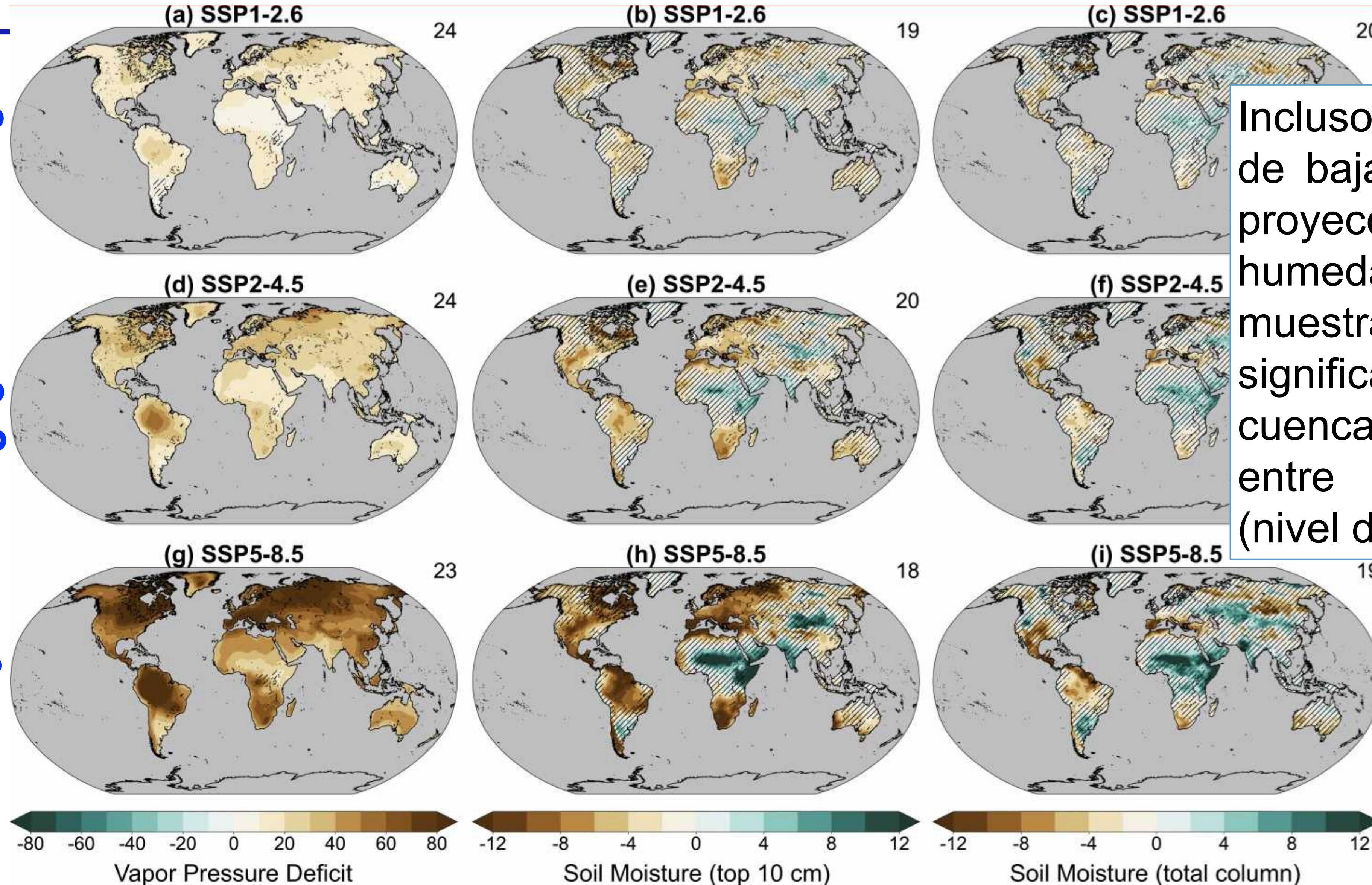
Escenario optimista

Escenario moderado

Escenario pesimista

Incluso en un escenario de bajas emisiones, las proyecciones de la humedad del suelo muestran disminuciones significativas en la cuenca del Amazonas, entre otras regiones (nivel de confianza alto).

IPCC AR6
WG1 (2021)

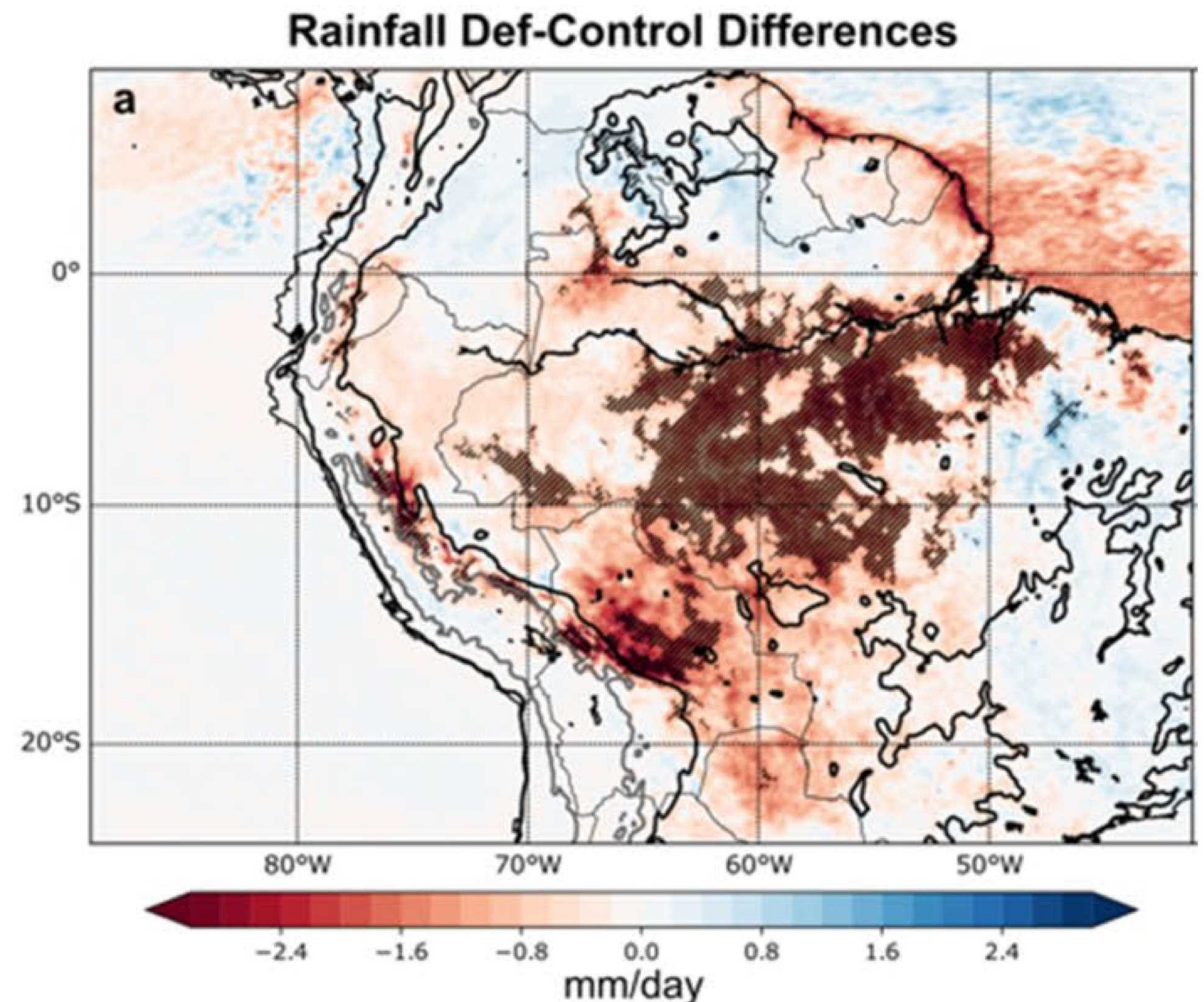
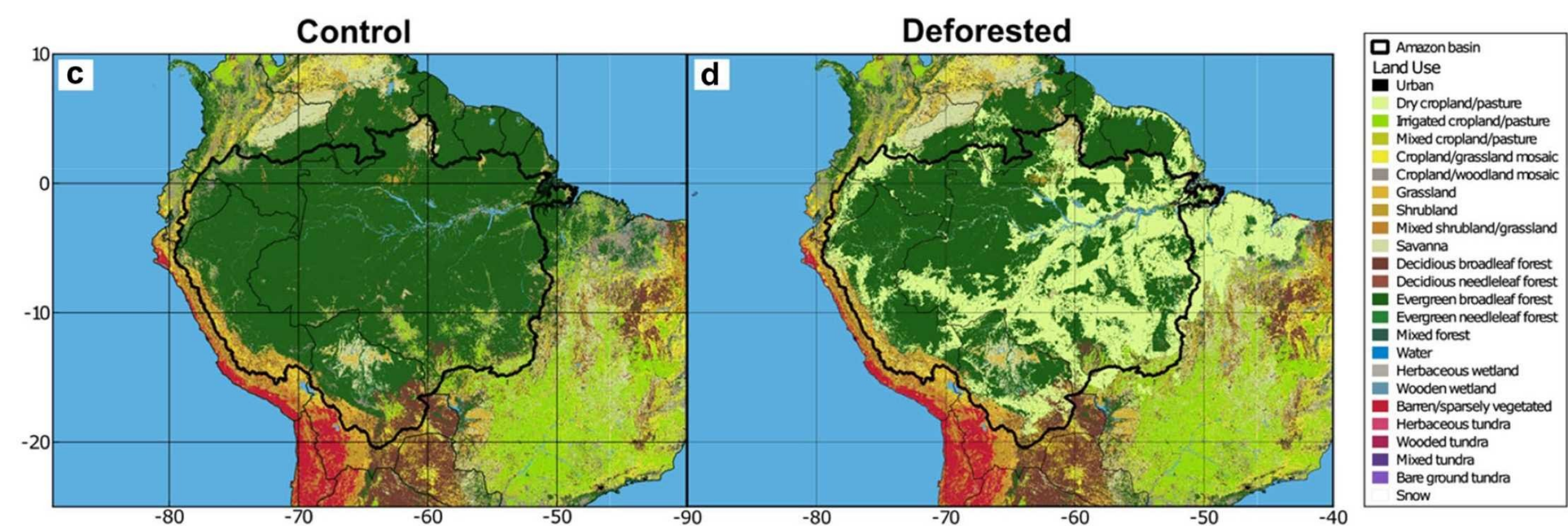


Efecto local y remoto de la deforestación en los recursos hídricos

Experimentos de deforestación con el modelo atmosférico regional WRF muestran:

- Reducción de la radiación superficial neta, la evaporación, la convergencia de humedad y la precipitación (~ 20%) en toda la cuenca del Amazonas,
- Reducción de las precipitaciones nocturnas (20-30%) sobre el flanco oriental de los Andes
- Reducción de la precipitación diurna (10-30%) en los llanos amazónicos después del área deforestada.

Sierra et al
2022



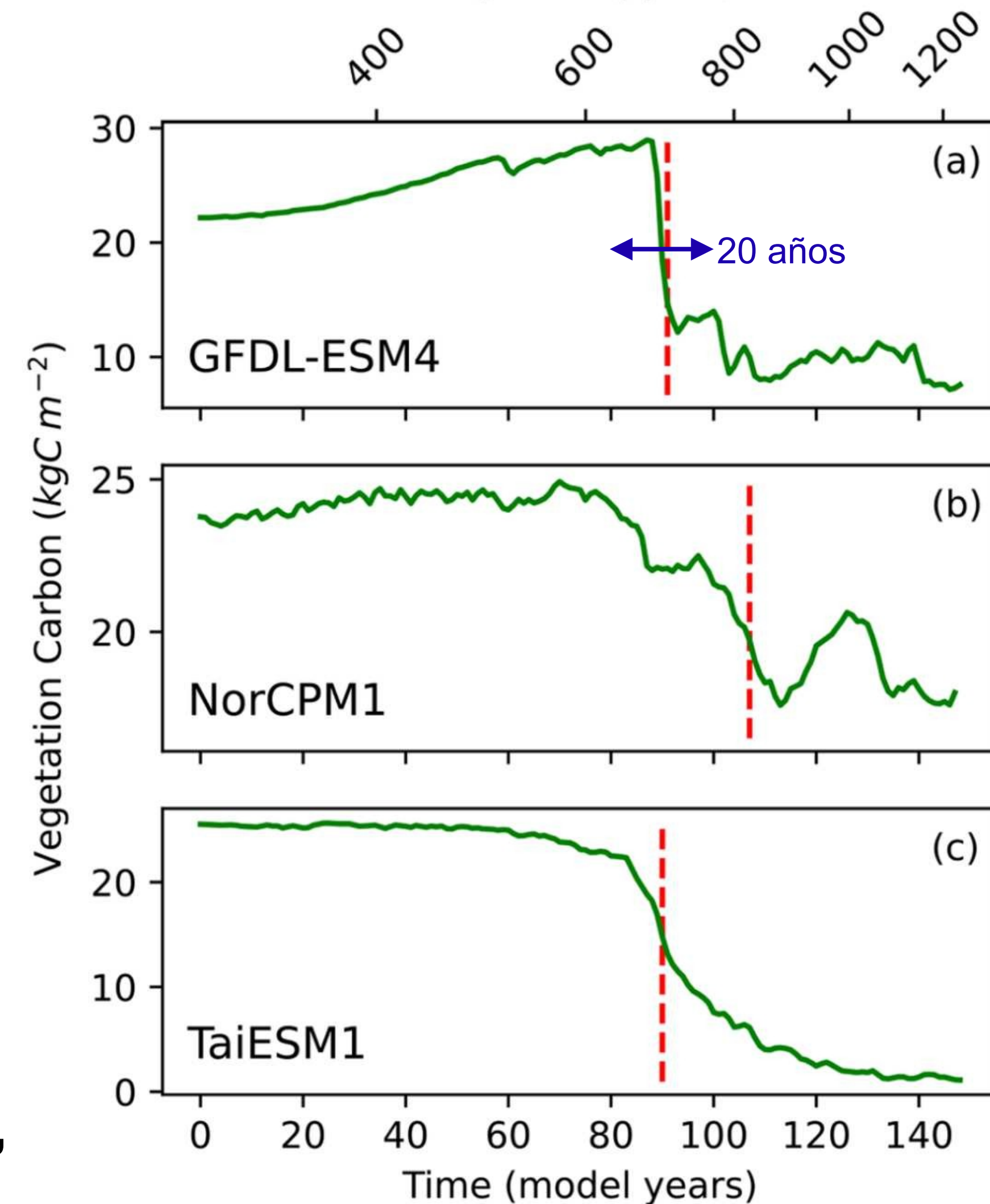
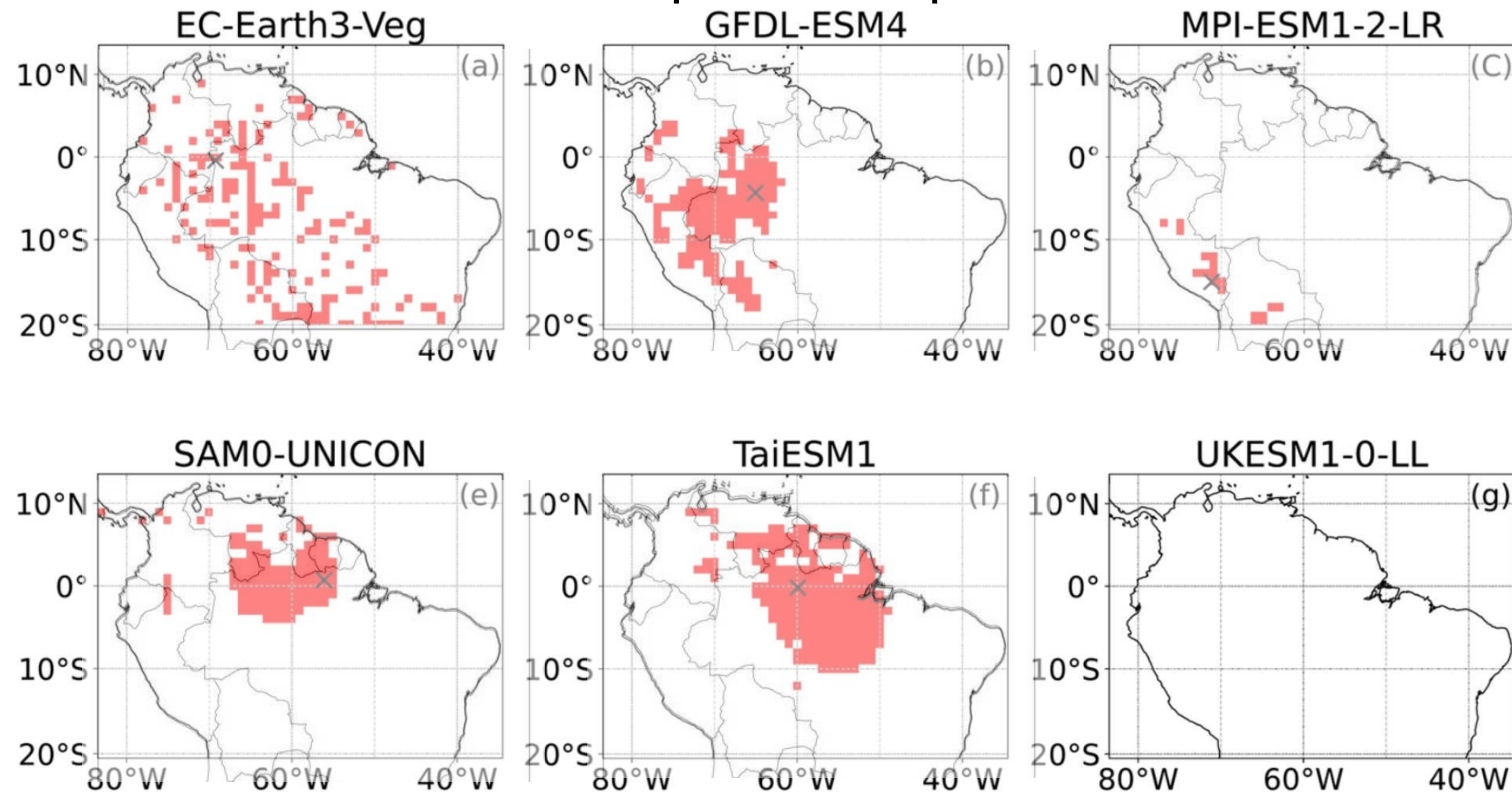
Colapso abrupto del bosque amazónico en modelos de sistema Tierra



Parry et al. (2022)

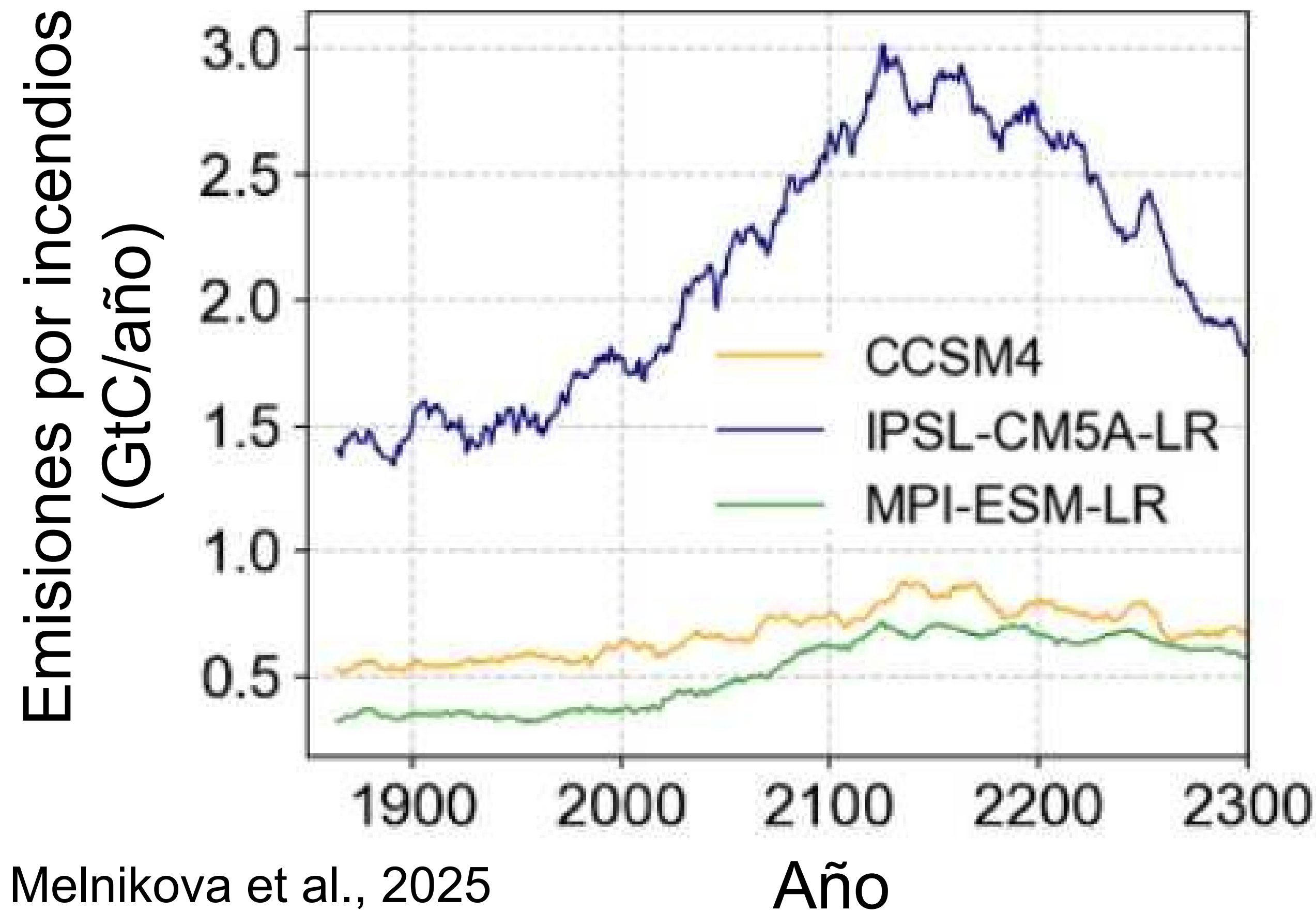
CO₂ level (ppmv)

CMIP6 - 1pctCO2 experiments



Algunos modelos de Sistema Tierra producen colapsos abruptos debido a la interacción entre la vegetación y el clima, incluso siguiendo incremento en el carbono del bosque.

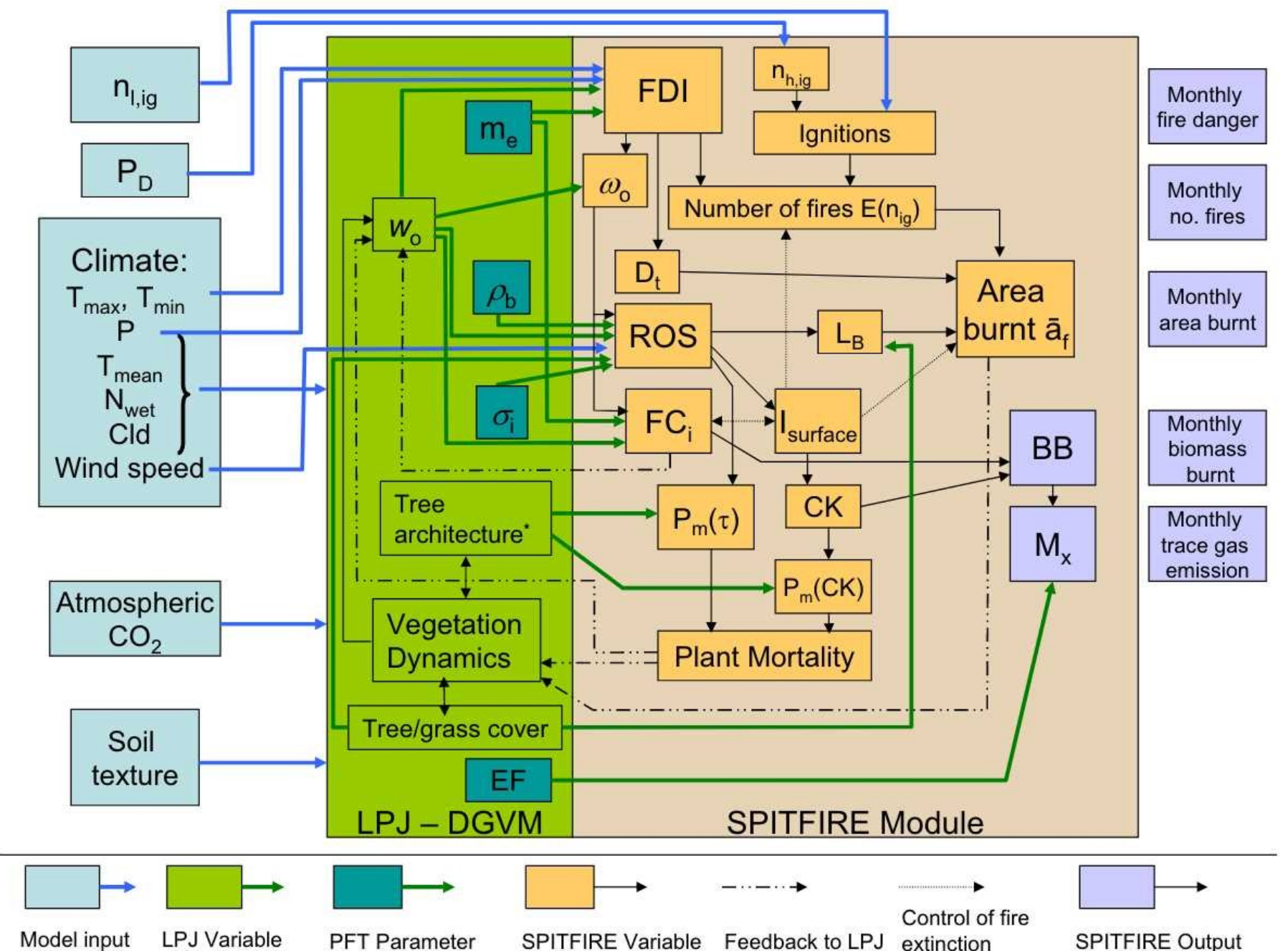
Incendios forestales en modelos de sistema Tierra



Melnikova et al., 2025

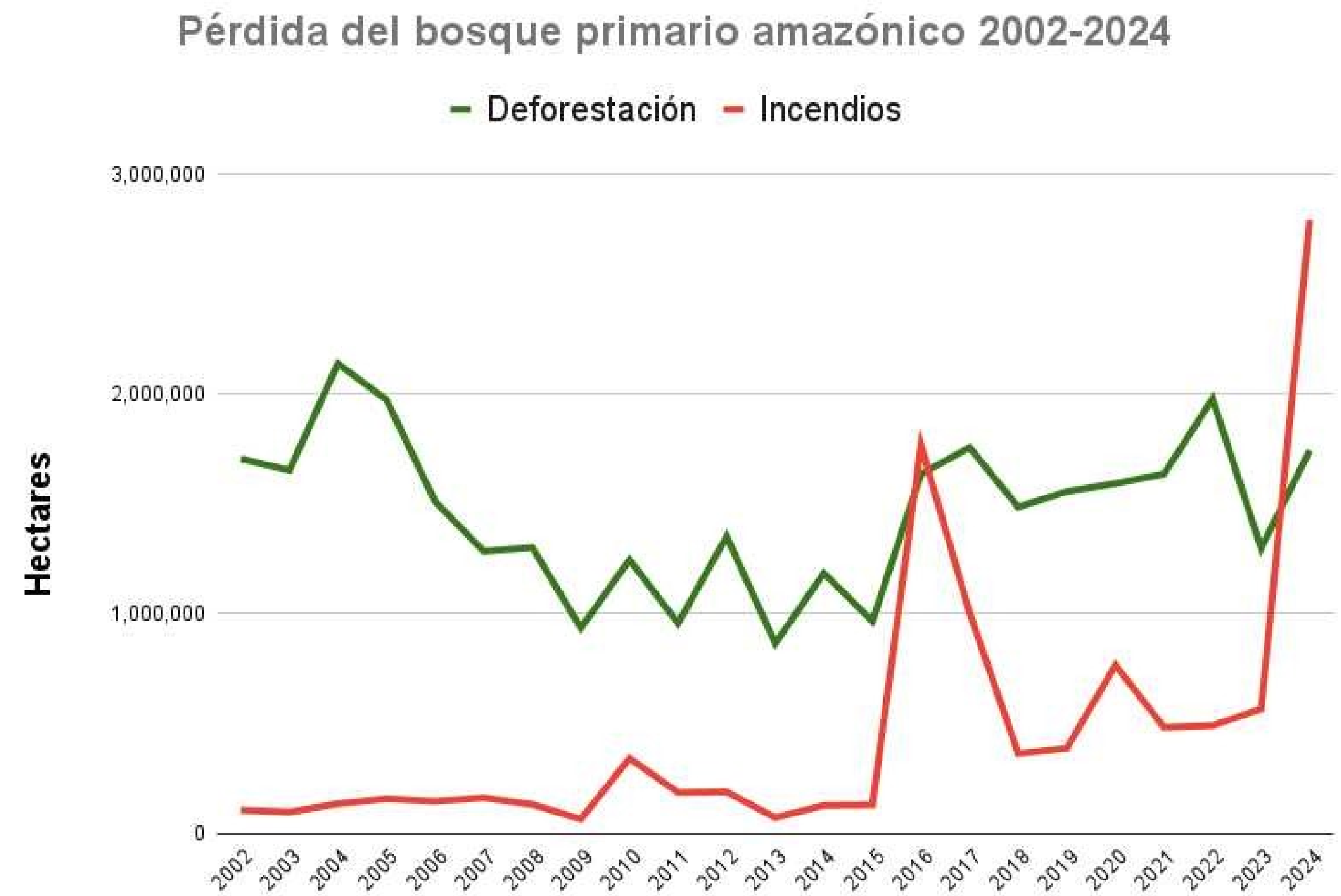
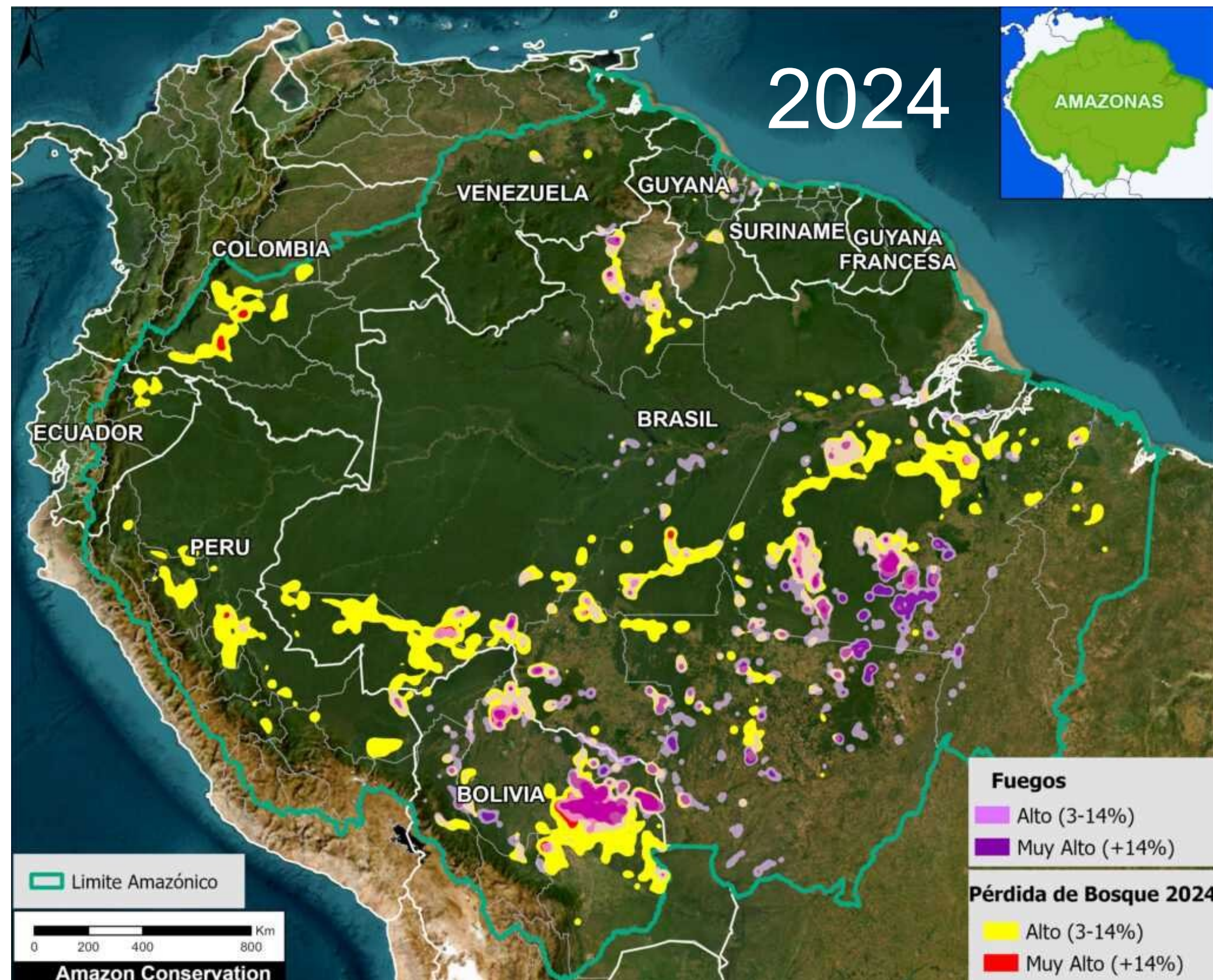
Aún pocos modelos de Sistema Tierra simulan la ocurrencia de incendios forestales y su interacción con el clima. Quizás aumente con CMIP7 (FireMIP)

Esquema del modelo de fuego SPITFIRE



Thonicke et al., 2010

Deforestación e incendios en el bosque amazónico



Finer et al., 2025

<https://www.maaprogram.org/es/deforestacion-incendios-amazonia-2024>

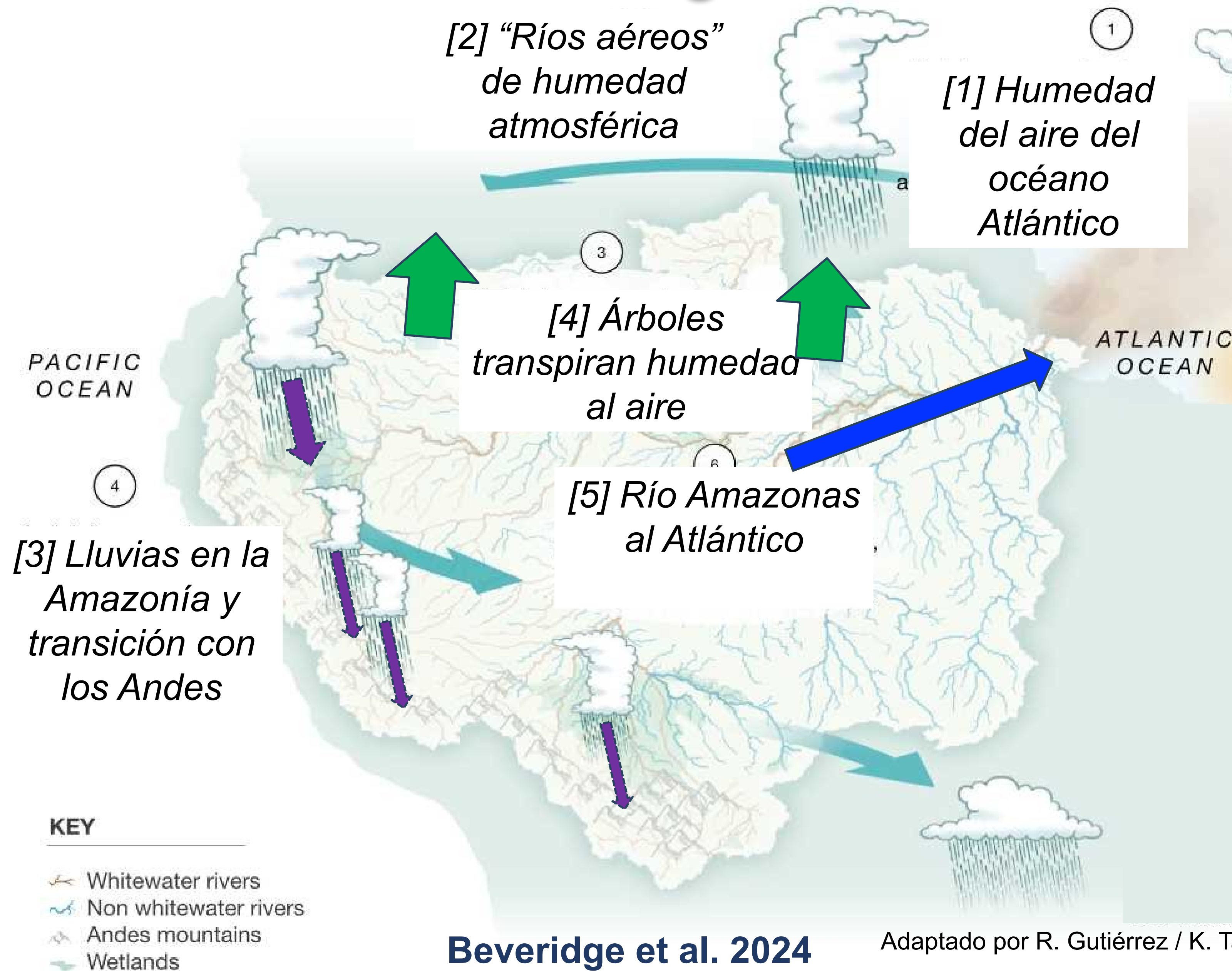


- Las sequías y la longitud de la temporada seca en la Amazonía probablemente aumentarán con el cambio climático.
- Los eventos El Niño tienen un rol importante en las sequías amazónicas y, posiblemente, en los incendios
- Es incierta la posibilidad de colapsos de gran escala del bosque amazónico, pero el análisis de la interacción entre clima, deforestación e incendios es fundamental para reducirla.
- La ciencia y modelamiento del “sistema climático” ha dado lugar al del “Sistema Tierra”. Probablemente necesitamos incluir a los humanos como componente al modelar dicho sistema y la posibilidad de colapso.
- La componente de fuego aún no está generalmente presente en los modelos de Sistema Tierra, se espera que en la siguiente generación de modelos podamos evaluar una mayor diversidad de modelos.
- Los modelos de Sistema Tierra regionales ofrecen una oportunidad para investigar más focalizadamente los procesos en la Amazonía.



Adicionales

El ciclo hidrológico en la cuenca Amazónica

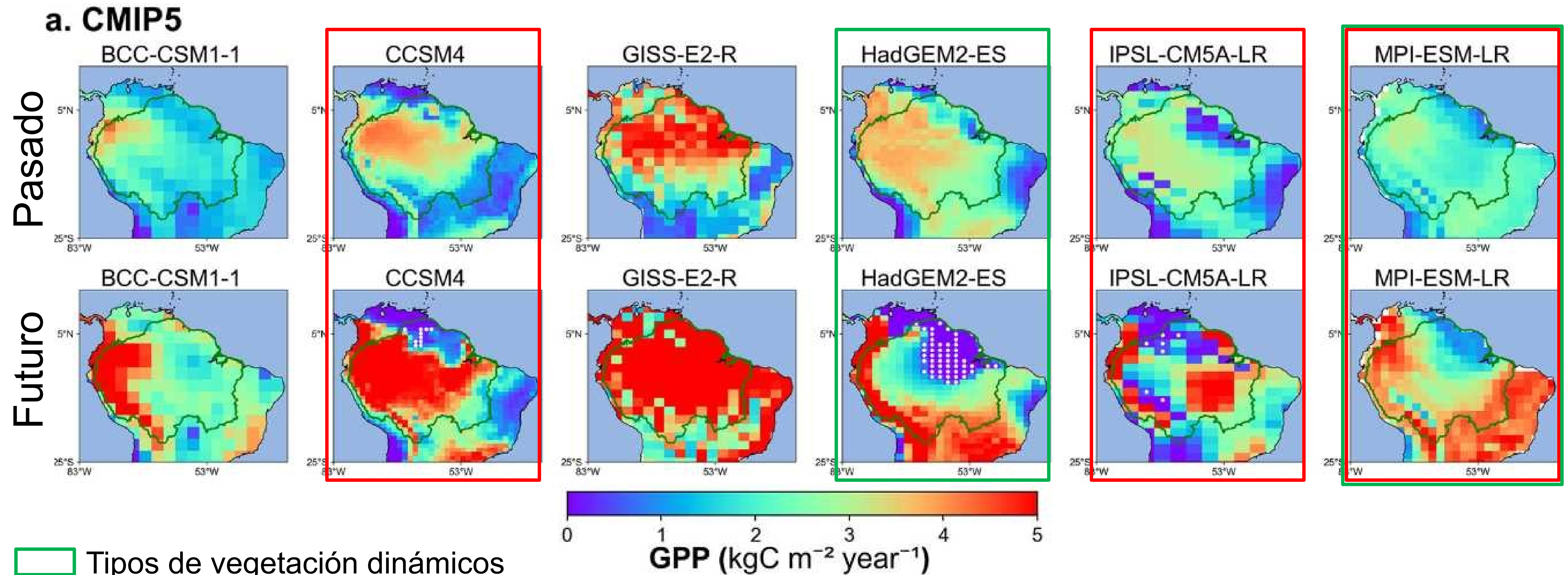


Beveridge et al. 2024

Adaptado por R. Gutiérrez / K. Takahashi

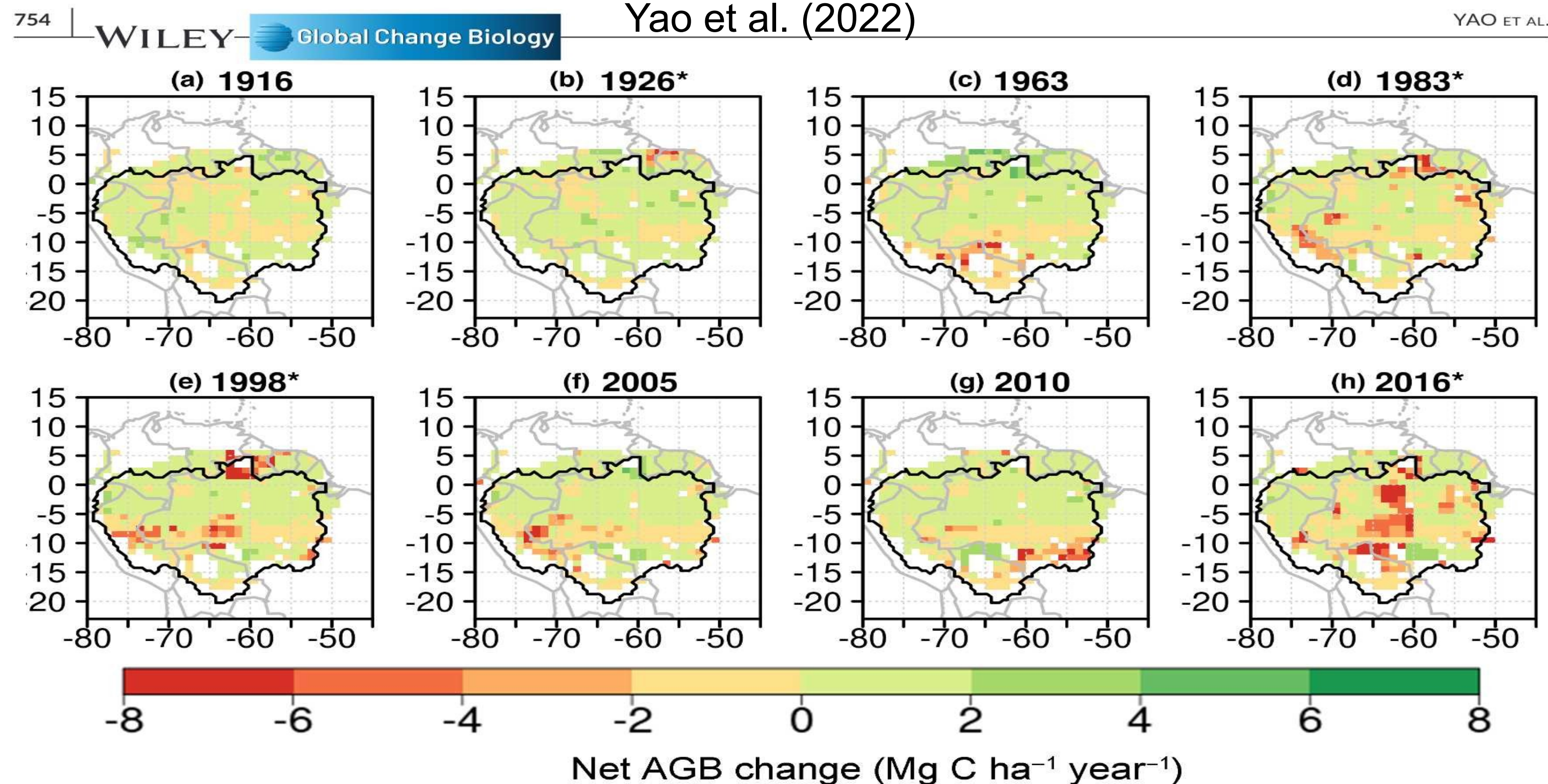
- La circulación atmosférica y la transpiración de los bosques son elementos clave del ciclo del agua en la Amazonía.
- Hasta la mitad de la precipitación andino-amazónica se debe a la transpiración de los árboles amazónicos (Staal et al., 2018).

Diversidad de modelos de Sistema Tierra



Melnikova et al., 2025

Biomass changes in a vegetation model (ORCHIDEE) with enabled drought-mortality



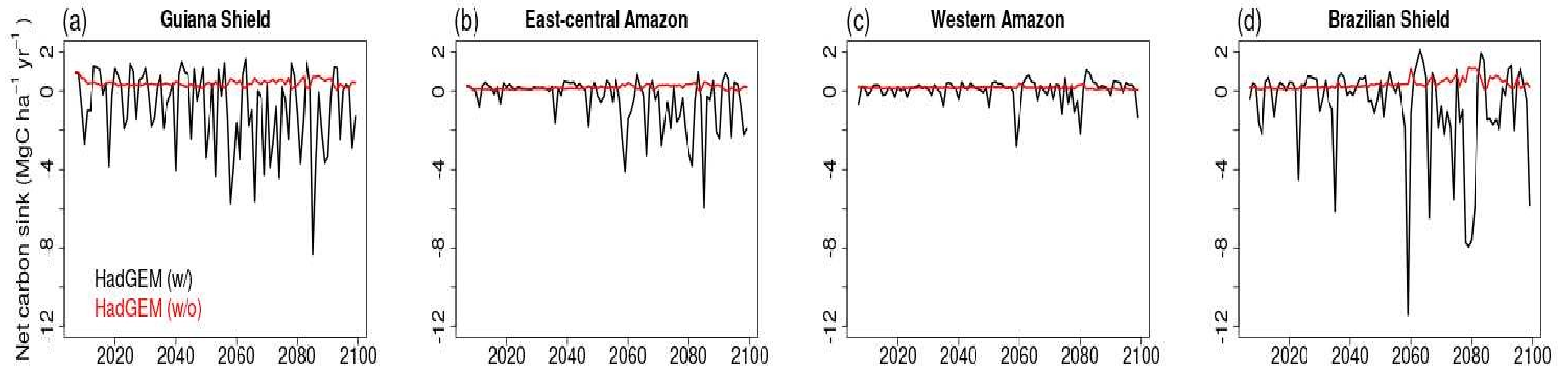
Recent drought events resulted in a negative carbon sink in the Amazon, and is associated with a decelerating trend in biomass gains due to CO₂ “fertilization” (Yao et al. 2022)

Biomass changes in a vegetation model (ORCHIDEE) with enabled drought-mortality



Red lines: net carbon sink simulated by ORCHIDEE-CAN-NHA **without drought mortality parameterisation**

Black lines: net carbon sink simulated by ORCHIDEE-CAN-NHA **with enabled drought mortality parameterisation**



Yao et al. (2024)

Recent drought events resulted in a negative carbon sink in the Amazon, and is associated with a decelerating trend in biomass gains due to CO₂ “fertilization” (Yao et al. 2022)

Future climate change, particularly a BAU scenario, can potentially result in central and northeastern Amazon transitioning towards a carbon source region at the middle of the century (Yao et al., 2024)

Variabilidad y tendencias de conteos de fuegos en la Amazonía



Las sequías explican ~30 % de la variabilidad de los incendios

Según análisis de regresión especial, las contribuciones son:

- Deforestación = 0,67
- Expansión de tierras agrícolas = 0,20
- Sequías = 0,05

Xu et al., 2025

- Reducción es en zonas ya deforestadas
- Aumento es en los bordes

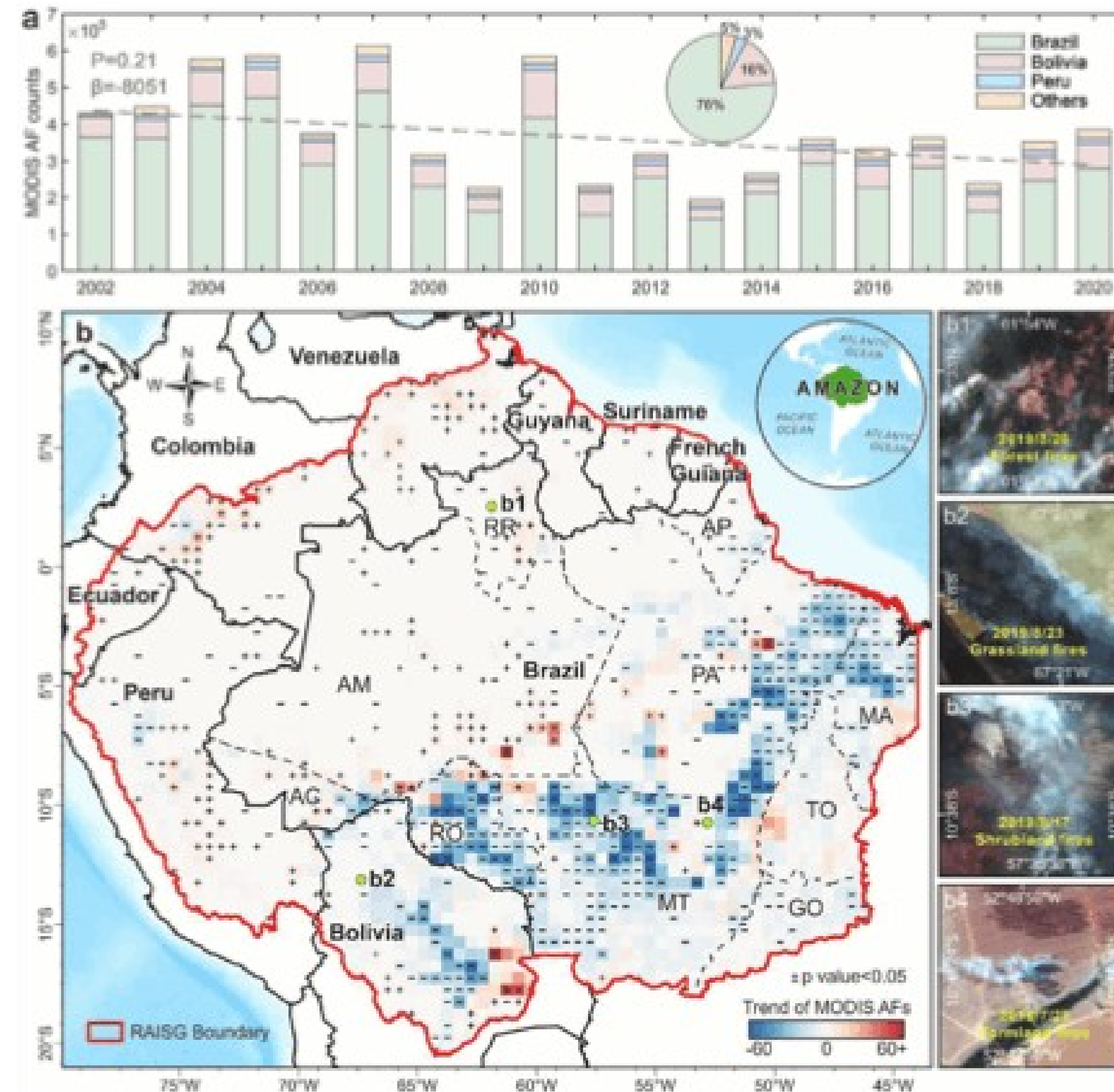


Fig. 1. Fire activity in the Amazon from 2002 to 2020. (a) Annual variation in MODIS active fire (AF) counts, categorized by Amazonian countries. (b) Spatial trends in annual MODIS-derived AF counts per year. Plus (+) and minus (-) symbols denote statistically significant increasing and decreasing trends, respectively. (b1-b4) High-resolution Sentinel-2 imagery illustrating representative types of vegetation fires in the Amazon, including forest fires (b1), grassland fires (b2), shrubland fires (b3), and farmland fires (b4).