POR UNA BIOGEOGRAFÍA PLURAL: PERSPECTIVAS CIENTÍFICAS, CONSERVACIÓN Y CAMBIO CLIMÁTICO

revista
USP
espaço e tempo

ISSN 2179-0892
Volume 28 • n° 3 (2024)
e230743

Análisis de los cambios ambientales en Brasil en el siglo XXI a partir de regímenes bioclimáticos: el caso de la Amazonía, el Cerrado y la Caatinga

Rafael Camara Artigas[1]

[1]Universidad de Sevilla, Sevilla, España
E-mail: rcamara@us.es

Cómo citar este artículo: CAMARA ARTIGAS, R. Análisis de los cambios ambientales en Brasil en el siglo XXI a partir de regímenes bioclimáticos: el caso de la Amazonía, el Cerrado y la Caatinga. Geousp, v. 28, n. 3, e230743. 2024. https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2024.230743es

Este es un artículo publicado en acceso abierto (Open Access) bajo la licencia Creative Commons Attribution (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), que permite su uso, distribución y reproducción en cualquier medio, sin restricciones siempre que el trabajo original sea debidamente citado.

Análisis de los cambios ambientales en Brasil en el siglo XXI a partir de regímenes bioclimáticos: el caso de la Amazonía, el Cerrado y la Caatinga

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es hacer una valoración actual ambiental de Brasil y su proyección para 2070, con un escenario de emisiones que continué aumentando durante todo el siglo XXI. A partir de los mapas de tipos de regímenes bioclimáticos de Brasil se establece su situación actual y su situación para un escenario RCP 8.5 para el año 2070 según el modelo de cambio climático CCSM4 del Quinto Informe de Evaluación del IPCC en 2014. Se relacionan los regímenes bioclimáticos actuales con las principales ecorregiones existentes en Brasil: Amazonia, Cerrado y Caatinga. Con la plataforma *Global Forest Wacht* se muestran los procesos de deforestación en éste país y sus causas, así como el periodo de incendios de gran intensidad en septiembre 2024. Finalmente, a partir de los datos biolimáticos actuales se muestran los cambios en la Amazonia, el Cerrado y la Caatinga.

Palabras clave: Régimen bioclimático. Cambio climático. Antropización. Deforestación. Brasil.

Analysis of environmental changes in Brazil in the 21st century based on bioclimatic regimes: the case of the Amazon, the Cerrado and the Caatinga

ABSTRACT

The objective of this work is to make a current environmental assessment of Brazil and its projection for 2070, with an emissions scenario that will continue to increase throughout the 21st century. Based on the maps of types of bioclimatic regimes in Brazil, its contemporary circumstances and its situation for an RCP 8.5 scenario for the year 2070 are established according to the CCSM4 climate change model of the Fifth Assessment Report of the IPCC in 2014. The current bioclimatic regimes were associated with the main eco-regions existing in Brazil: the Amazon, the Cerrado and the Caatinga. Using the Global Forest Wacht platform, the deforestation processes in this country and their causes are indicated, as well as the period of high intensity fires in September 2024. Finally, based on current biolimatic data, the changes in the Cerrado, the Catinga and the Amazon are shown.

Keywords: Bioclimatic regimes. Climatic change. Anthropization. Deforestation. Brasil.

Análise das mudanças ambientais no Brasil no século XXI a partir de regimes bioclimáticos: o caso da Amazônia, do Cerrado e da Caatinga

RESUMO

O objetivo da pesquisa é fazer uma avaliação dos problemas ambientais que estão ocorrendo atualmente no Brasil e a sua projeção para 2070, com um cenário de emissões que continuará aumentando ao longo do século XXI. A avaliação ocorreu com base em mapas dos tipos de regimes bioclimáticos atual do Brasil, e a sua situação em um cenário RCP 8.5 para o ano de 2070, segundo o modelo de mudanças climáticas CCSM4 do Quinto Relatório de Avaliação do IPCC em 2014. Foram realizadas corelações entre os regimes bioclimáticos das principais ecorregiões existentes no Brasil: Amazônia, Cerrado e Caatinga. Com a plataforma Global Forest

Wacht, foram apresentados os processos de desmatamento e suas causas, bem como o período de incêndios de alta intensidade em setembro de 2024. Por fim, com base em dados biolimáticos, foram apresentados as mudanças que ocorreram na Amazônia, no Cerrado e a Caatinga.
Palavras-chave: Regime bioclimático. Mudanças climáticas. Antropização. Desmatamento. Brasil.

LOS REGÍMENES BIOCLIMÁTICOS DE BRASIL ACTUALES Y PARA EL ESCENARIO RCP 8.5 PARA EL AÑO 2070

Brasil es un país que ocupa la parte oriental de continente sudamericano. Esta gran extensión de 8.515.770 Km^2 permite albergar muchos biomas y formaciones vegetales asociadas a éstos, por lo que es reconocido como un país megadiverso, que contiene al ecosistema más diverso del planeta, la Amazonia. No obstante otros son igual de importantes y emblemáticos como el Cerrado, la Caatinga o la Mata Atlántica. Su larga historia de ocupación desde la colonización hasta la actualidad ha dejado una honda huella en sus ecosistemas, al igual que en otras partes del mundo (que decir de Europa), pero a pesar de eso conserva amplios territorios de naturaleza del cual se tiene aún poco conocimiento dada su envergadura y complejidad. Brasil es un país destacado en investigación nacional y esto ha permitido tener el conocimiento que ahora existe sobre estos medios naturales. Sería muy largo aquí hacer un repertorio de todo el conocimiento que en Brasil existe sobre los biomas citados, pero existen manuales de referencia clásicos como el de Toledo Rizzini (1997) y Ab'Saber (2003) o libros específicos de los biomas en éste siglo como de la Amazonia (Cochrane; Cochrane, 2012), el Cerrado (Sano et al., 2008) la Caatinga (Cardoso da Silva; Leal; Tabarelli, 2017; Leal; Tabarelli; Silva, 2003), y el bosque atlántico (Thomas, 2008), como ejemplo.

A la situación histórica y el propio devenir socioeconómico del futuro se une ahora la incertidumbre creada por el cambio climático, que va a afectar a estos ecosistemas, aún más fuerte si cabe en condiciones de tensión antropogénica.

El objetivo de este trabajo es poner de manifiesto cual es la situación provocada por el cambio climático en estos medios naturales y cuáles son los tensores que agravan esta situación de futuro, a partir de modelos de cambio climático y de los datos actuales de las causas de deforestación en Brasil.

Para lograr la representación de los TRB (Tipos de regímenes bioclimáticos) se aplicó la metodología de Cámara, Díaz Del Olmo y Martínez Batlle (2020) que es un método analítico y cartográfico, que tiene un enfoque multiescalar y multitemporal sobre las formaciones vegetales a partir de los regímenes bioclimáticos.

La elaboración de la cartografía de regímenes bioclimáticos se resolvía con un complicado proceso de calculadora de mapas ráster en el software de SIGs ArcGis. En colaboración con la Universidad de Zaragoza (Serrano-Notivoli; Longares; Cámara, 2022) se ha elaborado un script en el software R que automatiza el proceso, si bien la velocidad de cálculo está condicionada por el detalle de la cartografía procesada. La base de datos climática continua a escala mundial utilizada fue Worldclim (Hijmans et al., 2005; Fick; Hijmans, 2017). Los datos de dicha base son producto de la interpolación de 9.000 a 60.000 estaciones meteorológicas y su resolución espacial es de 1 km^2 (Hijmans et al., 2005; Fick; Hijmans, 2017). Para los datos de deforestación, incendios y causas de la deforestación se ha utilizado la plataforma

Global Forest Wacht (Hansen et al., 2013) de libre acceso, que permite hacer estudios de detalle en función de la demarcación de países, regiones/estados y áreas protegidas.

Esta metodología de los TRB establece 27 tipos en función de la paralización vegetativa térmica e hídrica establecida a partir de los diagramas bioclimáticos de Montero de Burgos y González (1974) y los balances hídricos de Thornthwaite y Mather (1955) y Thornthwaite, Mather y Carter (1957). Así la clasificación de los regímenes bioclimáticos identificados por Cámara, Díaz Del Olmo y Martínez Batlle (2020) queda definida de la siguiente manera en base a los postulados de Schimper (1903), Warming (1909) y Huguet del Villar (1929). En función de las situaciones térmicas:

- **Termofilia:** se localizan en lugares sin restricciones térmicas, y con una amplitud térmica anual reducida. Es el régimen térmico de los medios tropicales.
- **Euritermofilia:** hay variación térmica importante a lo largo del año y en cada mes, pero sin que exista paralización vegetativa por causas térmicas. Es el régimen térmico de los medios subtropicales. Es el régimen térmico de las áreas subtropicales.
- **Criofilia:** aquella que se presenta cuando existe paralización térmica corta a media, de 1 a 5 meses. Es el régimen característico de los bosques caducifolios por stress térmico. Es el régimen térmico de las áreas templadas frías.
- **Mesocriofilia:** se presentan en lugares donde esta paralización térmica es de 6 a 9 meses, que condiciona la distribución de los planifolios, dominando las coníferas, o formaciones mixtas de los dos. Es el régimen térmico de las áreas subpolares.
- **Hipercriofilia:** que limitan el desarrollo de especies leñosas, de 10 a 12 meses de paralización vegetativa térmica. Son los ambientes de tundra. Es el régimen térmico de las áreas polares.

En función de la limitación de humedad en un espacio se presentarán diferentes tipologías de la clasificación:

- **Ombrofilia:** que se presentan en lugares donde no existe ningún déficit de agua durante todo el año (todos los meses la precipitación es superior a 60 mm).
- **Mesofilia:** existe una mayor escasez hídrica pero sin que ésta suponga una paralización vegetativa. Algunos meses pueden presentar déficit hídrico del suelo.
- **Tropofilia:** cuando existe déficit hídrico edáfico que da lugar a la paralización vegetativa, siempre que está dure de 1 a 4 meses. Los bosques presentan especies caducifolias por stress hídrico.
- **Xerofilia:** si las condiciones hídricas conducen a una paralización vegetativa más larga, de 5 a 8 meses. Predominan los arbustos y crasuláceas, con caracteres espinosos.
- **Hiperxerofilia:** con 9 a 12 meses de paralización vegetativa hídrica, con vegetación arbustiva y crasulácea abierta, muy dispersa, o prácticamente sin ella. Es el ambiente de los desiertos..

Estos resultados quedan reflejados en la Figura 1 en Brasil con 10 regímenes bioclimáticos de los 27 tipos posibles, lo que marca la riqueza bioclimática del país. Los regímenes presentes son los tropicales ombrófilo, mesófilo, tropófilo, xerófilo, y ombro tropófilo en el centro y norte de Brasil, los subtropicales euritermo ombrófilo, euritermo mesófilo y euritermo tropófilo, restringidos al sur del país, y los templados fríos crio ombrófilo y crio mesófilo, apenas perceptibles en áreas de montaña. En la Tabla 1 se muestra la relación

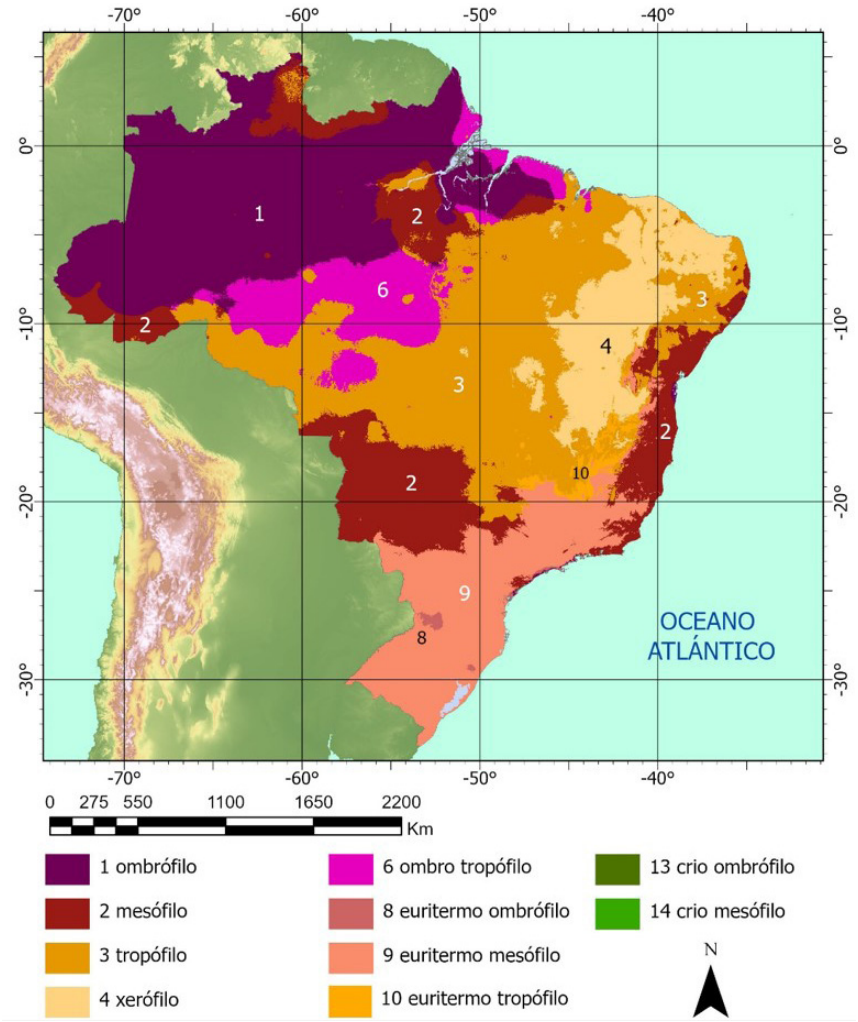

Figura 1 – Regímenes bioclimáticos de Brasil en la actualidad.
Fuente: elaboración propia a partir de base continúa de datos climáticos de Wordclim (Hijmans et al., 2005; Fick; Hijmans, 2017).

Tabla 1 – Equivalencia entre los tipos de regímenes bicoclimáticos de Cámara, Díaz Del Olmo y Martínez Batlle (2020), la clasificación de Köppen y las principales ecorregiones de Brasil.

Régimen bioclimático	Equivalencia Köppen	Ecorregión	Formaciones vegetales
Ombrófilo	Af, As	Tropical Moist Forests	Bosque amazónicos
			Mata atlántica septentrional
Ombro tropófilo y Ombro xerófilo	Am	Tropical Moist Broadleaf Forests	Bosques amazónicos con especies semideciduas
Mesófilo	Aw	Tropical Moist Broadleaf Forests	Bosques atlánticos secos
			Bosques húmedos de Tapajós-Xingu
Mesófilo/Tropófilo	Aw	Tropical Grasslands, Savannas and Shrublands	Bosque y sabanas de Cerrado
Tropófilo/Xerófilo	BSh	Deserts and Xeric Shrublands	Bosques, sabanas y formaciones arbustivas de Caatinga
Euritermo mesófilo	Cfa	Tropical and Subtropical Moist Broadleaf Forests	Bosque atlánticos del alto Paraná
			Bosques de Araucaria
			Mata atlántica meridional

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Fondo Mundial para la Naturaleza (World Wildlife Fund for Nature, 2024).

entre los regímenes bioclimáticos, los tipos de Köppen y la ecorregión correspondiente con sus formaciones vegetales más emblemáticas.

Para el escenario de cambio climático de 2070 se ha utilizado la trayectoria concentración representativa (*Representative Concentration Trajectory*-RCP) de concentración de gases de efecto invernadero adoptada por el Quinto Informe de Evaluación del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014) en 2014 considerando el forzamiento radiativo junto con las trayectorias socioeconómicas compartidas (ver Tabla 2).

Tabla 2 – Forzamiento radiativo, tendencia del forzamiento radiativo y concentración de CO_2 en ppm en 2100.

	FR (W/m^2)	Tendencia FR	CO_2 en 2100 en ppm
RCP 2.6	2,6	decreciente en 2100	421
RCP 4.5	4,5	estable en 2100	538
RCP 6.0	6,0	creciente	670
RCP 8.5	8,5	creciente	936

Fuente: Quinto informe del Intergovernmental Panel on Climate Change (2014).

La lectura de mayo de 2019 de la concentración de CO_2 en el observatorio Mauna Loa (Hawai, Estados Unidos) era 415.26 ppm, en 2023 era 419.68 ppm, y en agosto del año 2024 era 422.99 ppm (National Oceanic & Atmospheric Administration, 2024). Las tasas medias anuales de crecimiento de dióxido de carbono en ppm para Mauna Loa desde el año 2020 hasta el año 2024 son 2,28, 2,39, 1,81 y 3.36 ppm. respectivamente. A este ritmo, considerando una tasa media de crecimiento de moderada de 2,4 ppm/año, en 2070 se puede alcanzar las 533 ppm, y en 2100 el valor de 605 ppm. Puesto que el ritmo de crecimiento de la media anual ha variado de 0,94 ppm en 1959 a 3,36 ppm en 2024 (incrementándose claramente desde los años 70), es posible plantear un escenario de RCP 8.5 entre 2070 y 2100, si no se toma medidas decisivas en los próximos años.

El modelo de cambio climático utilizado es CCSM4 (Sistema Climático Comunitario) patrocinado por la National Science Foundation (NSF) y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE), porque es un modelo de clima acoplado para simular el sistema climático de la Tierra, compuesto por cinco modelos separados que simulan simultáneamente la atmósfera, el océano, la tierra, el hielo terrestre y el hielo marino de la Tierra, más un componente acoplador central (CAM) que coordina los modelos y pasa la información entre ellos, y permite realizar investigaciones fundamentales sobre los estados climáticos pasados, presentes y futuros de la Tierra.

El resultado de la aplicación del modelo de los tipos de regímenes bioclimáticos muestra un mapa (ver Figura 2) en el cual los regímenes tropicales se extienden hacia el sur restringiendo los tipos subtropicales euritermo con una disminución de 561.363 Km^2 (ver Tabla 3), pero lo más significativo es la disminución del régimen ombrofilo (Amazonía) con cerca de 1,5 millones de Km^2, y el mesófilo (763.681 Km^2), con un aumento del régimen ombro tropófilo (Am de Köppen) de 613.701 Km^2, que equivale a una selva húmeda con uno a tres meses de paralización vegetativa hídrica, que favorece la presencia de especies semideciduas y la aparición de palmas que progresan por la luz durante el periodo de

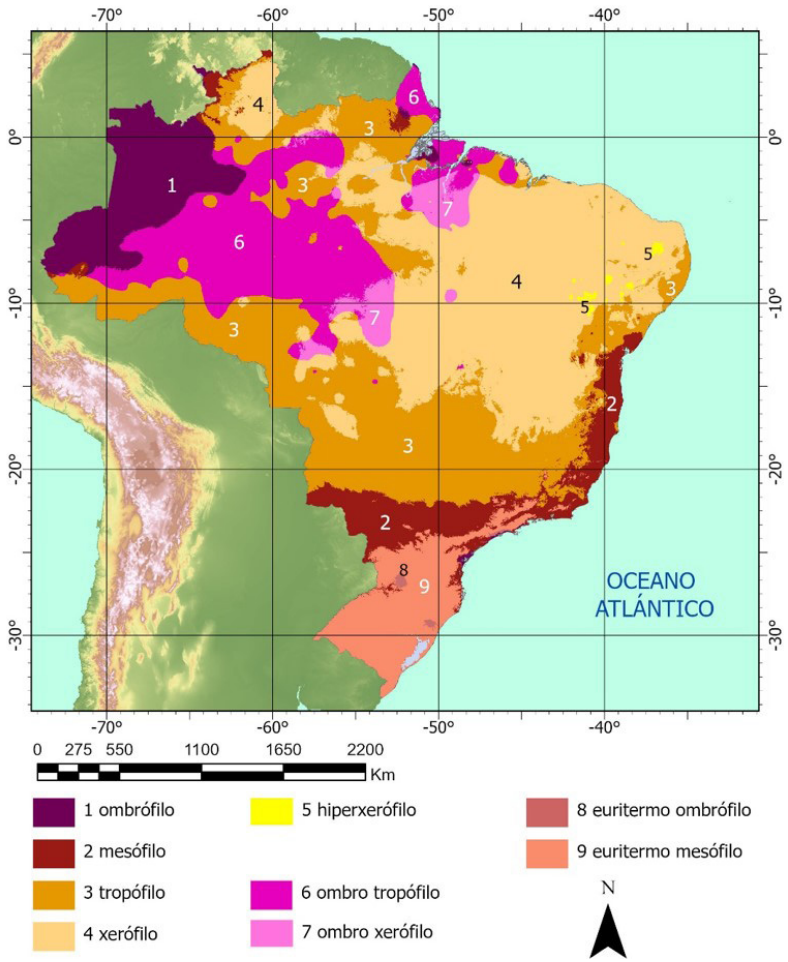

Figura 2 – Regímenes bioclimáticos de Brasil para el escenario RCP 8.5 en 2070.
Fuente: elaboración propia a partir de base continúa de datos climáticos de Wordclim (Hijmans et al., 2005; Fick; Hijmans, 2017).

Tabla 3 – Variación de extensión Km² entre los regímenes bioclimáticos actuales y el escenario RCP 8.5 para 2070.

	actual Km²	RCP 8.5 Km²	diferencia Km²
ombrófilo	2.165.396,08	695.513,38	-1.469.882,69
mesófilo	1.372.406,84	608.725,54	-763.681,29
tropófilo	2.385.938,13	2.481.580,78	95.642,64
xerófilo	758.915,77	2.577.751,99	1.818.836,22
hiperxerófilo	0,00	22.380,33	22.380,33
ombro tropófilo	691.026,41	1.304.728,06	613.701,65
ombro xerófilo	0,00	246.759,97	246.759,97
euritermo ombrófilo	17.768,34	12.560,67	-5.207,67
euritermo mesófilo	1.037.904,25	558.628,01	-479.276,23
euritermo tropófilo	80.267,13	272,68	-79.994,46
euritermo xerófilo	2.093,31	0,00	-2.093,31
crio ombrófilo	59,57	0,00	-59,57
crio mesófilo	9,23	0,00	-9,23

Fuente: Elaboración propia a partir de base continúa de datos climáticos de Wordclim (Hijmans et al., 2005; Fick; Hijmans, 2017).

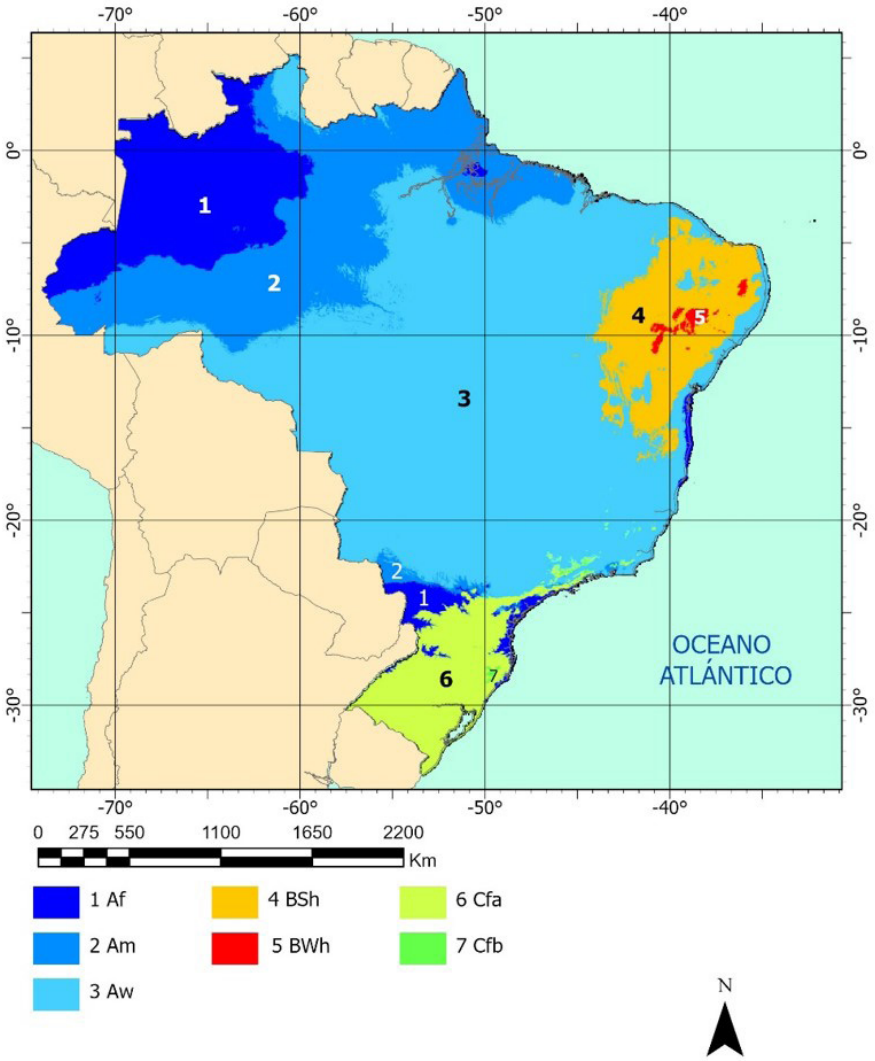

Figura 3 – Escenario de Clasificación climática de Köppen-Geiger para Brasil (2071-2100).
Fuente: Beck et al. (2018).

la estación seca. El otro dato relevante es el aumento de la aridez representado por el crecimiento en extensión del régimen tropófilo (95.642 Km^2), el xerófilo (1,8 millones de Km^2) y la aparición del régimen hiperxerófilo (BWh de Köppen) con 22.380 Km^2. Se pueden comparar los resultados alcanzados por el método de TRB, con la propuesta de Beck et al. (2018) para la clasificación de Köppen para el rango 2070-2100 (ver Figura 3), en la que el clima Af queda restringido al oeste al igual que el ombrófilo, ante la extensión del Am (ombrotropófilo) donde antes estaban las selvas muy húmedas. También la extensión del clima Aw (tropófilo y xerófilo) y la aparición del BWh (hiperxerófilo) en el nordeste.

SITUACIÓN DE LA DESFORESTACIÓN EN BRASIL Y SUS PRINCIPALES CAUSAS EN EL SIGLO XXI

En 2010, Brasil tenía 492 millones de hectáreas de bosque natural, que se extendía por el 59% de su superficie terrestre. Desde 2001 hasta 2023, Brasil perdió 31.1 millones de hectáreas de bosque primario húmedo (bosque ombrófilo, Af de Köppen), lo que representa

45% de su pérdida total de cobertura arbórea en el mismo periodo de tiempo. En éste mismo periodo perdió 68.9 millones de hectáreas de cobertura arbórea, lo que equivale a una disminución del 13% de la cobertura arbórea desde 2000, y al 37.7 Gt de las emisiones de CO_2. Sólo en 2023, perdió 2.73 millones de hectáreas, equivalente a 1.80 Gt de emisiones de CO_2 (Hansen et al., 2013) (ver Figura 4).

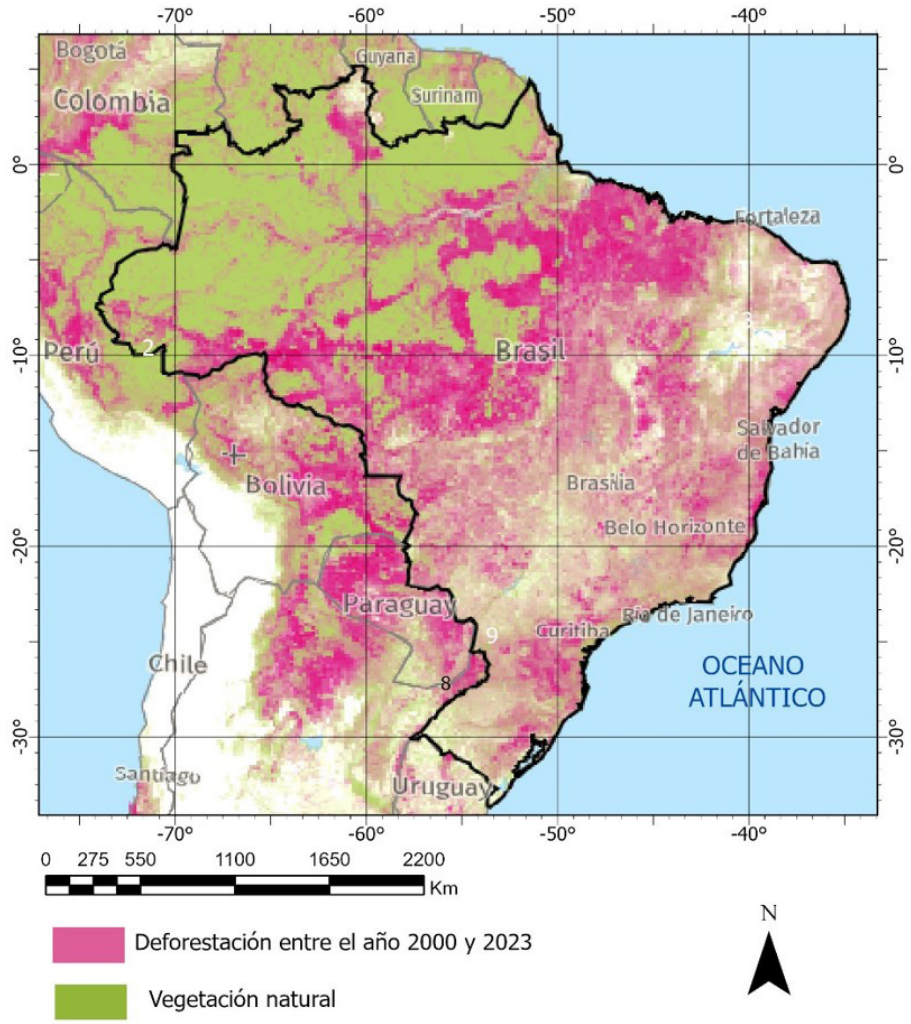

Figura 4 – Pérdida de masa forestal en Brasil entre los años 2000 y 2023.
Fuente: Hansen et al. (2013). Acceso a través de Global Forest Watch (2024).

Destaca la pérdida 5.378.844 hectárea en el año 2016 (ver Figura 5), vinculadas principalmente a la pérdida de bosque en la Amazonía, tal como se puede observar en la Figura 6.

Los datos de las Figuras 5 y 6 muestran una pérdida por deforestación de 68 millones de hectáreas en Brasil en el transcurso del siglo XXI, con un 6,31% de pérdida localizada en el estado de Amazonia. Destaca especialmente el año 2016, en el qué sólo en él se perdieron 5 millones de hectáreas, de las cuales un 10% se localizaron en el estado de Amazonia.

Si se analizan las causas de estas pérdidas, en la plataforma *Global Forest Wacht* se centra en 5 componentes, tres de ellas muy importantes: la deforestación por cultivo de

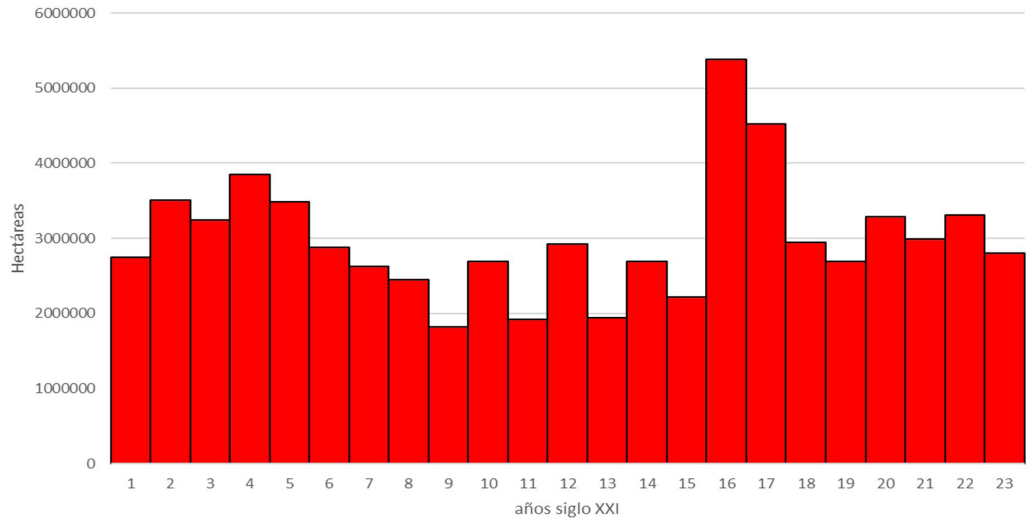

Figura 5 – Pérdida de cobertura arbórea en Brasil en el siglo XXI.
Fuente: Global Forest Change 2000-2022 Data Download. Fuente: Hansen et al. (2013).

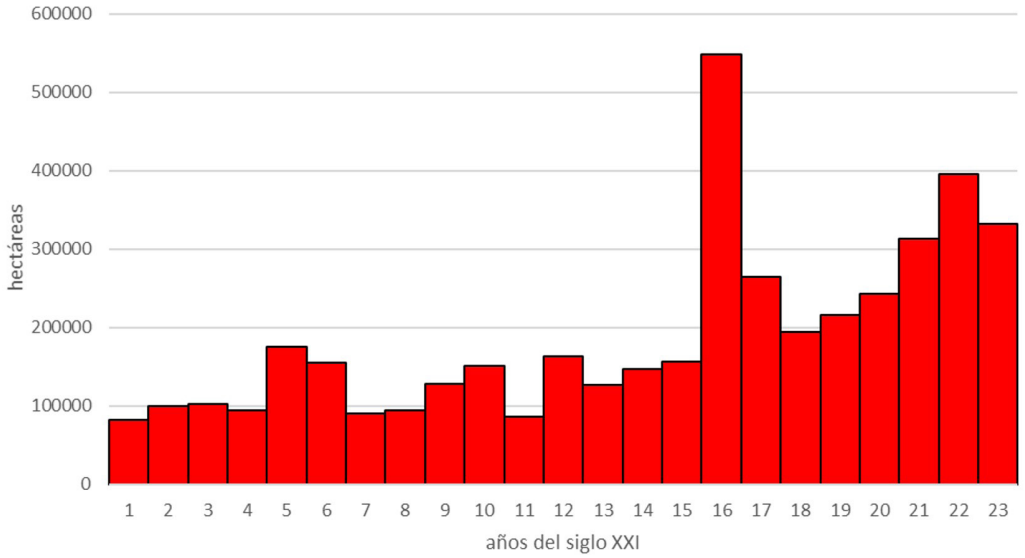

Figura 6 – Pérdida de cobertura arbórea en la Amazonía en el siglo XXI.
Fuente: Global Forest Change 2000-2022 Data Download.
Fuente: Hansen et al. (2013).

productos básicos, la deforestación por agricultura itinerante y la silvicultura (sustitución de bosques naturales por plantaciones arbóreas), y dos menores en extensión superficial relativa, que son la urbanización y los incendios forestales (ver Figura 7).

Si se analizan las causas de deforestación por tipologías de cultivo de productos básicos, silvicultura y agricultura itinerante, los datos en 23 años (siglo XXI) (Figura 8) marcan como impacto más importante el cultivo de productos básicos de alimentación con 42,8 millones de hectáreas, seguido de la agricultura itinerante con 16,7 millones de hectáreas, y la silvicultura con 7 millones de hectáreas. Otras causas menores en extensión pero no menos importantes por su impacto irreversible (Figura 9) son la extensión urbanística con 53 mil

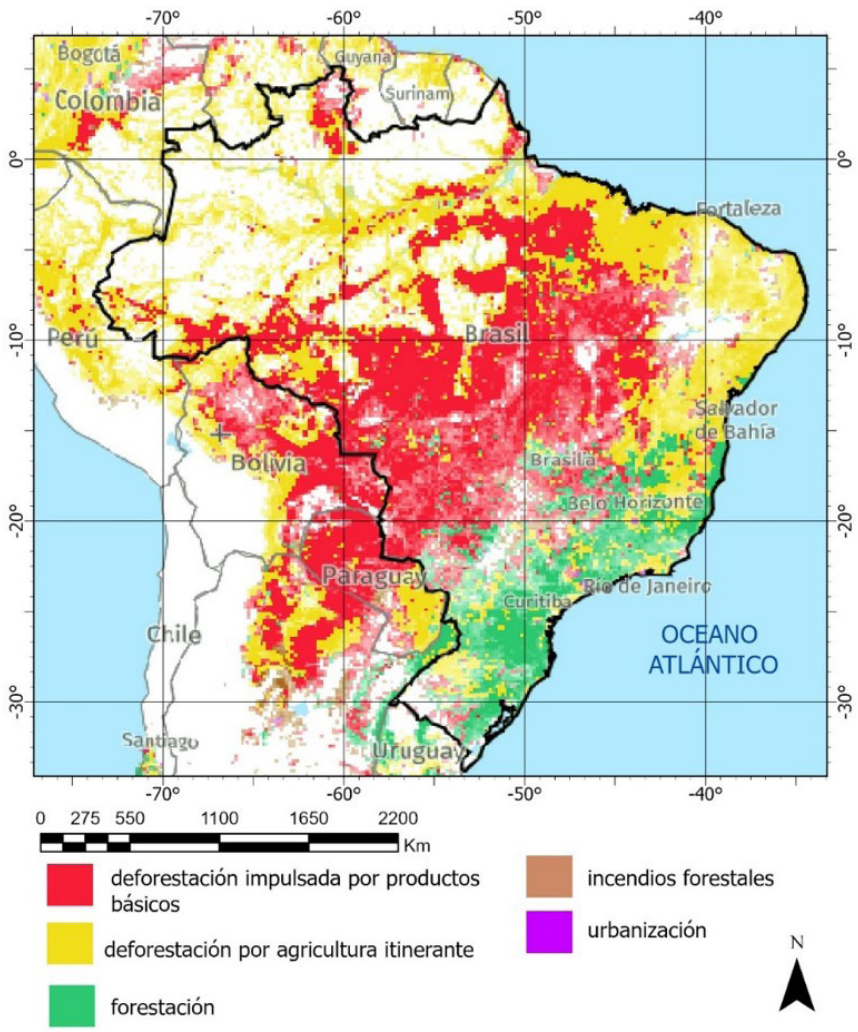

Figura 7 – Mapa de causas principales de deforestación en Brasil durante el siglo XXI.
Fuente: Curtis et al. (2018).

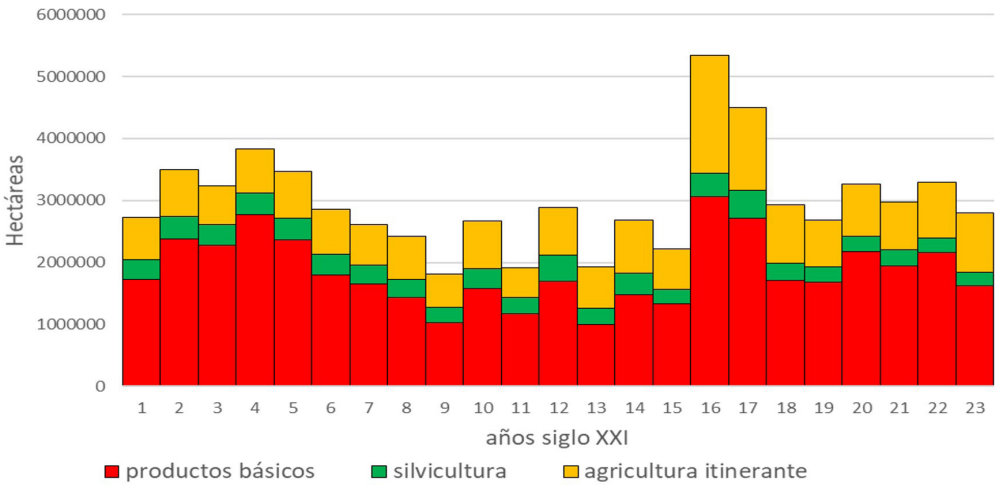

Figura 8 – Causas de deforestación de mayor extensión en Brasil en el siglo XXI.
Fuente: Curtis et al. (2018).

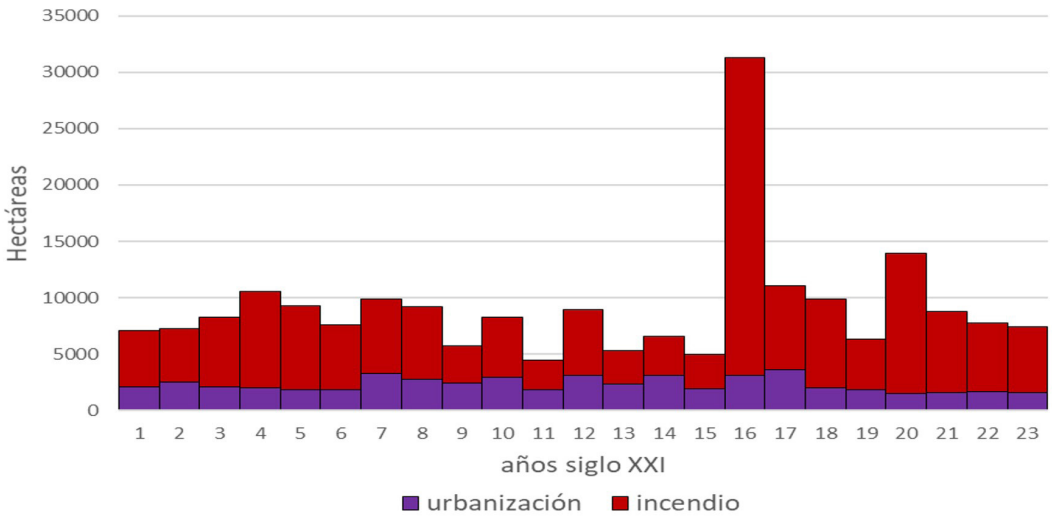

Figura 9 – Causas de deforestación de mayor extensión en Brasil en el siglo XXI.
Fuente: Curtis et al. (2018).

hectáreas, y los incendios naturales no provocados con 156 mil hectáreas, que se incluyen en los provocados de los que a continuación damos más detalles.

La pérdida de cobertura arbórea a causa de los incendios Brasil de 2001 a 2023 (Figura 10), fue de 10.6 millones de hectáreas a causa de los incendios (15% de la pérdida de cobertura arbórea), que se unen a los 58.4 millones de hectáreas ya citados por otras causas. Durante ese período, el año con mayor pérdida de cobertura arbórea a causa de los incendios fue 2016 con 2.38 millones de hectáreas desaparecidas, el 44% de la pérdida total de cobertura arbórea para ese año.

Uno de los momentos de mayor intensidad ha tendido lugar en septiembre de 2024 (Figura 11). Estos datos se han obtenido a partir de *The Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) 375 m *thermal anomalies* del conjunto de radiómetros de imágenes infrarrojas visibles del sensor VIIRS (satélites NASA/NOAA) que complementan la detección de incendios del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS). Para estas fechas la cartografía mostró en estas fechas una concentración de incendios en el centro del país, no precisamente en la Amazonía, es decir, más en el área del Mato Grosso y del Cerrado, tal como se puede observar en la Figura 10 de los últimos 23 años, aunque en ésta se ve una apertura muy clara a partir de aguas abajo hacia aguas arriba en el río Amazonas.

CAMBIOS REGISTRADOS EN LOS REGÍMENES BIOCLIMÁTICOS EN LA CAATINGA, CERRADO Y AMAZONIA

Una vez presentada la situación de cambio ambiental por el clima futuro y las causas antropogénicas de la deforestación, presentamos los cambios ambientales por el cambio climático en tres biomas importantes de Brasil de características muy diferentes que van desde la situación hiperhúmeda a la más árida: la Amazonía, el Cerrado y la Caatinga

En el caso de la Amazonía (ver Figura 12 y ver Tabla 4) se observa un claro retroceso de la selva muy húmeda (bosque de régimen bioclimático ombrófilo, Af de Köppen) con una pérdida de 1.315.379,17 Km^2, frente a los bosque de selva con especies semideciduas y palmas

Figura 10 – Focos de incendios en Brasil entre los años 2000 y 2023.
Fuente: Tyukavina et al. (2022).

Tabla 4 – Cambios en la extensión de los regímenes bioclimáticos entres la situación actual y el escenario de cambio climático para RCP 8.5 para el año 2017 en la Amazonía.

	actual Km²	RCP 8.5 Km²	diferencia Km²
ombrófilo	1.997.846,94	813.430,00	-1.315.379,17
mesófilo	337.674,85	41.810,00	-302.596,26
tropófilo	270.474,30	1.062.877,00	621.279,50
xerófilo	0,00	291.887,00	244.893,19
ombro tropófilo	435.833,65	1.348.290,00	695.381,66
ombro xerófilo	0,00	66.476,00	55.773,36
euritermo ombrófilo	17,62	0,00	-17,62

Fuente: Elaboración propia.

(ombrotropófilo, Am de Köppen) que avanza sobre ésta 695.381,66 Km², y la aridificación del extremo oriental y septentrional con extensión de los regímenes bioclimáticos tropófilo (621.279,50 Km²) y xerófilo (244.893,19 Km²) que se relacionan respectivamente con el

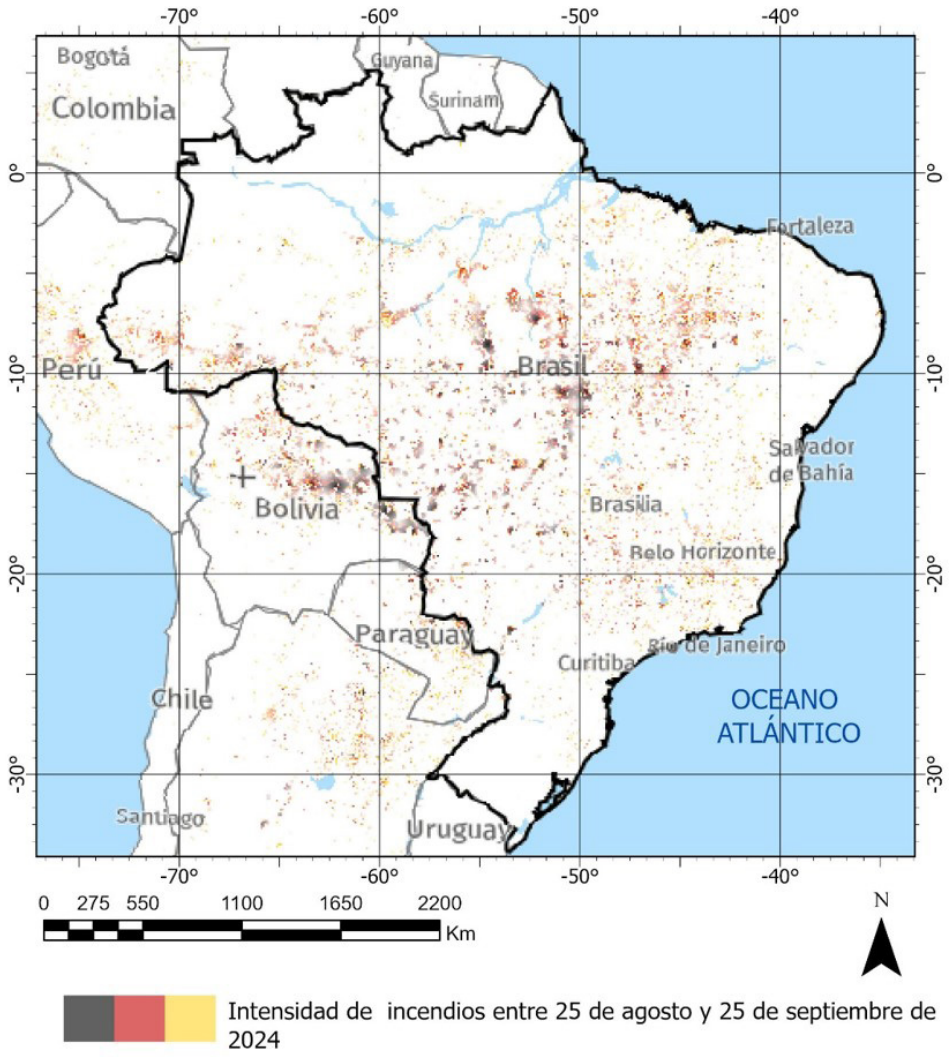

Figura 11 – Concentración de incendios en el mes de agosto de 2024.
Fuente: Hansen et al. (2013).

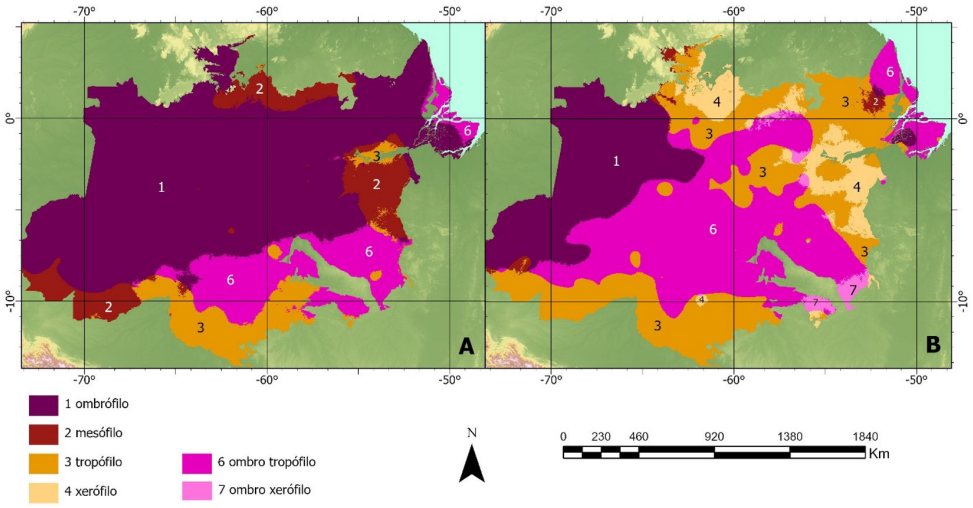

Figura 12 – Regímenes bioclimáticos actuales (A) y regímenes bioclimáticos para el escenario de cambio climático RCP 8.5 para el año 2070 (B) para la Amazonía.
Fuente: elaboración propia a partir de base continúa de datos climáticos de Wordclim (Hijmans et al., 2005; Fick; Hijmans, 2017).

Cerrado (sabanas y bosque) y la Caatinga arbustiva. Estos resultados se pueden comparas con la aportación de Beck et al. (2018) en la Figura 3. Esto supone un cambio ambiental importante con el riesgo de una importante pérdida de biodiversidad en flora y fauna.

En el Cerrado los cambios son más importantes en el norte y en el suroeste. En el norte se pasa de un régimen tropófilo tipo Aw de Köppen con bosques y sabanas (pérdida 329.544,94 Km^2) a un régimen xerófilo tipo BSh de Köppen con formaciones arbustivas más propias de la Caatinga (avance en extensión de 774.411,26 Km^2). Al sur desaparece en las montañas el régimen euritermo mesófilo de tipo subtropical y es sustituido el mesófilo y tropófilo tropical, lo que supone un cambio muy importante en la biocenosis de sus especies, pudiendo dar lugar a sustituciones. En la parte suroccidental las formaciones de bosque mesófilo (bosque de cerrado principalmente) son sustituidas en su retroceso (264.261,51 Km^2), por el régimen bioclimático tropófilo más propio de bosques secos tropicales y sabanas (ver Figura 13 y ver Tabla 5).

En la Caatinga lo más importante es la desaparición prácticamente del régimen mesófilo (retroceso de 62.674,14 Km^2) en las áreas montaña sustituido por el régimen tropófilo, dando paso de bosques semideciduos a bosques secos tropicales y sabanas. En la superficie del escudo oriental brasileño, el régimen bioclimático tropófilo pierde a su vez superficie (100.560,02 Km^2) ante el régimen bioclimático xerófilo, sustituyendo los bosques secos y sabanas de la Caatinga subhúmeda por formaciones arbustivas espinosas propias de la Caatinga árida. De forma puntual, donde en la actualidad domina la Caatinga seca (régimen xerófilo) es sustituido por extensiones reducidas de régimen bioclimático hiperxerófilo (BWh de Köppen) tal como aparece en el mapa de Köppen para el escenario 2070-2100 (Figura 3), que da lugar a formaciones vegetales desérticas (ver Figura 14 y Tabla 6). Los regímenes euritermofilos de carácter subtropical en las montañas, desparecen y son sustituidos por el régimen tropófilo.

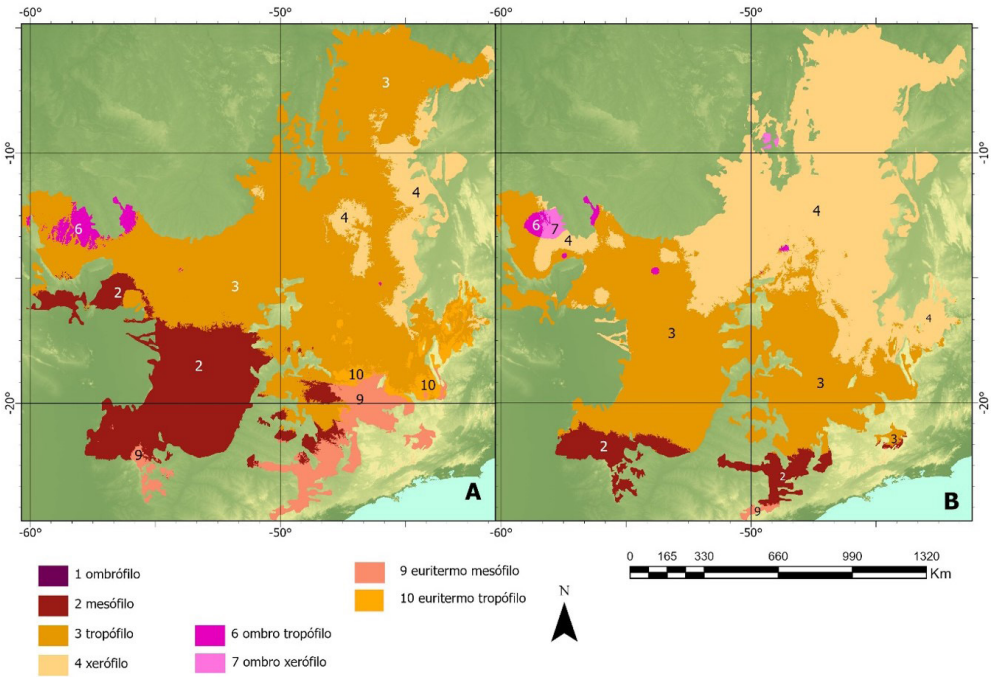

Figura 13 – Regímenes bioclimáticos actuales (A) y regímenes bioclimáticos para el escenario de cambio climático RCP 8.5 para el año 2070 (B) para el Cerrado.
Fuente: elaboración propia a partir de base continúa de datos climáticos de Wordclim (Hijmans et al., 2005; Fick; Hijmans, 2017).

CAMARA ARTIGAS, R.

Tabla 5 – Cambios en la extensión de los regímenes bioclimáticos entres la situación actual y el escenario de cambio climático para RCP 8.5 para el año 2017 en el Cerrado.

	actual Km²	RCP 8.5 Km²	diferencia Km²
mesófilo	369.918,46	105.656,95	-264.261,51
tropófilo	1.175.692,38	846.147,44	-329.544,94
xerófilo	172.323,89	946.735,15	774.411,26
ombro tropófilo	29.646,90	12.442,37	-17.204,53
ombro xerófilo	0,00	12.648,76	12.648,76
euritermo mesófilo	130.868,06	6.808,49	-124.059,57
euritermo tropófilo	52.143,01	160,25	-51.982,76
euritermo xerófilo	6,71	0,00	-6,71

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6 – Cambios en la extensión de los regímenes bioclimáticos entres la situación actual y el escenario de cambio climático para RCP 8.5 para el año 2017 en la Caatinga.

	actual Km²	RCP 8.5 Km²	diferencia Km²
mesófilo	68.354,17	5.680,03	-62.674,14
tropófilo	205.905,70	105.345,68	-100.560,02
xerófilo	549.904,93	706.010,11	156.105,18
hiperxerófilo	0,00	22.380,33	22.380,33
euritermo mesófilo	11.007,68	18,46	-10.989,22
euritermo tropófilo	3.444,10	0,00	-3.444,10
euritermo xerófilo	839,00	0,00	-839,00

Fuente: Elaboración propia.

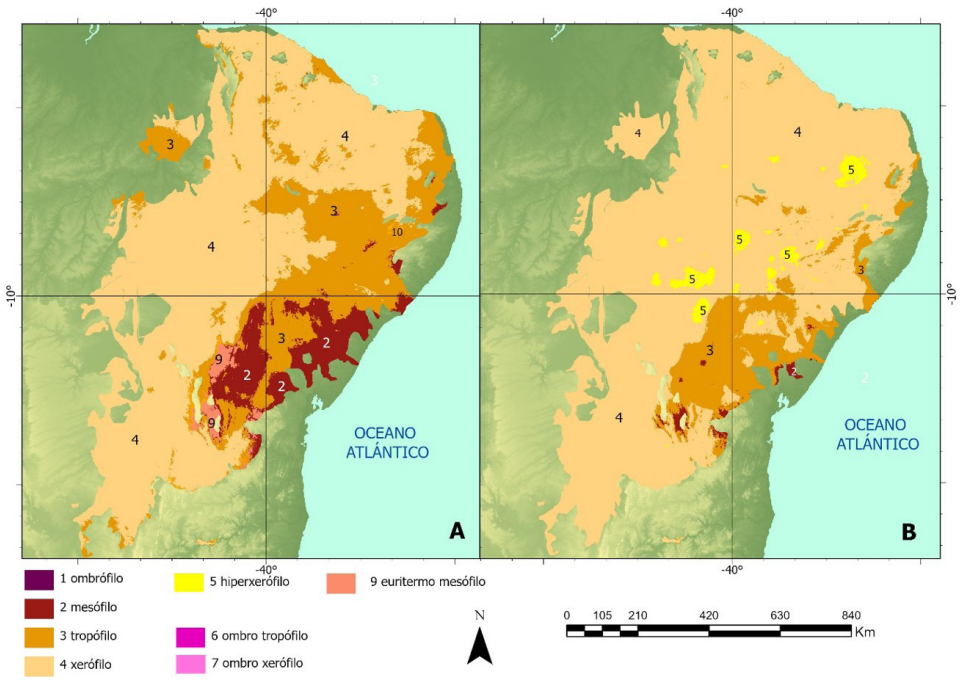

Figura 14 – Regímenes bioclimáticos actuales (A) y regímenes bioclimáticos para el escenario de cambio climático RCP 8.5 para el año 2070 (B) para la Caatinga.
Fuente: elaboración propia a partir de base continúa de datos climáticos de Wordclim (Hijmans et al., 2005; Fick; Hijmans, 2017).

CONCLUSIONES

Los cambios ambientales que han tenido lugar en los bosques de Brasil, especialmente durante el siglo XXI que es lo que se contempla en este trabajo, ha supuesto una importante pérdida de la masa forestal del país: 68.9 millones de hectáreas de cobertura arbórea, de las cuales 31.1 millones de hectáreas eran bosque primario húmedo. Ha habido años muy críticos en este proceso, como ha sido el 2016, pero en el balance final la deforestación por causas de suministro de alimentos básicos y la agricultura itinerante ha sido lo más impactante en éste siglo, es decir, el avance de la frontera agrícola, que se ha practicado directamente a partir de la tumba y tala de bosque natural, como por la acción del fuego.

A ésta situación de tensores antropogénicos hay que unir las perspectivas con el cambio climático por el calentamiento del planeta, con una aridificación del territorio promovida por la desertificación antrópica, que supone el avance 1,9 millones de hectáreas de regímenes bioclimáticos subáridos y áridos como son los regímenes bioclimáticos tropófilo y xerófilo, especialmente en el Cerrado y la Caatinga, pero también en la Amazonía, que pierde 1,4 millones de héctares de régimen bioclimático ombrófilo relacionado con los bosque muy húmedos. Esto ha sido expuesto en detalle para los biomas de la Amazonía, el Cerrado y la Caatinga.

La Amazonía es un área emblemática internacional, no lo es menos el Cerrado y la Caatinga, que silenciosamente sufren también un gran retroceso, pero sobre todo es un bien nacional de Brasil. Más allá de la repercusión del cambio climático es preciso tomar medidas para frenar el avance de la frontera agrícola, o de lo contrario los efectos de las condiciones bioclimáticas para el escenario de 2070 serán aún más graves.

REFERENCIAS

AB'SABER, A. N. **Os domínios de Natureza no Brasil:** potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

BECK, H. E. *et al*. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1 km resolution. **Scientific Data**, London, v. 5, n. 1, p. 180214, 2018. DOI: http://doi.org/10.1038/sdata.2018.214.

CÁMARA, R.; DÍAZ DEL OLMO, F.; MARTÍNEZ BATLLE, J. R. TBRs, a methodology for the multi-scalar cartographic analysis of the distribution of plant formations. **Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles**, Tarragona, v. 85, p. 1-38, 2020. DOI: http://doi.org/10.21138/bage.2915.

CARDOSO DA SILVA, J. M.; LEAL; I. R.; TABARELLI, M. **Caatinga:** the largest tropical dry forest Region in South America. USA: Springer, 2017. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-68339-3.

COCHRANE, T. T.; COCHRANE, T. A. **La Amazonia Tierras de Bosques y Sabanas**: una guia del clima, vegetacion, paisajes y suelos de Sudamerica tropical central. New Zealand: University of Canterbury, 2012.

CURTIS, P. G. *et al*. Classifying drivers of global forest loss. **Science**, New York, v. 361, n. 6407, p. 1108-1111, 2018. DOI: http://doi.org/10.1126/science.aau3445. PMid:30213911.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. Worldclim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land áreas. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017. DOI: http://doi.org/10.1002/joc.5086.

GLOBAL FOREST WATCH. 2024. Disponible en: https://www.worldwildlife.org/biomes. Accedido en: 25 sept 2024.

HANSEN, M. C. *et al*. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. **Science**, New York, v. 342, n. 6160, p. 850-853, 2013. DOI: http://doi.org/10.1126/science.1244693. PMid:24233722.

HIJMANS, R. J. *et al*. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land áreas. **International Journal of Climatology**, Chichester, v. 25, n. 15, p. 1965-1978, 2005. DOI: http://doi.org/10.1002/joc.1276.

HUGUET DEL VILLAR, E. **Geobotánica**. Barcelona: Labor, 1929. Colección Labor. Sección XII, Ciencias Naturales, nº 199-200.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2013: the physical science basis**, 2014. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/. Accedido en: 14 nov 2024.

LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. **Ecologia e conservação da Caatinga**. Recife: Editora Universitaria UFPE, 2003.

MONTERO DE BURGOS, J. L., GONZÁLEZ J. L. **Diagramas bioclimáticos**. Madrid: ICONA. Ministerio de Agricultura, 1974.

NATIONAL OCEANIC & ATMOSPHERIC ADMINISTRATION; Global Monitoring Laboratory. **Carbon cycle greenhouse gases**: trends in CO2. 2024. Disponible en: https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/. Accedido en: 22 Oct. 2024.

SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. **Cerrado:** ecologia e flora. Brasilia: Editores Técnicos, 2008. Embrapa Informação Tecnológica.

SCHIMPER, A. F. W. Plant-geography upon a physiological basis. Oxford: Clarendon Press, 1903. Disponible en: https://archive.org/details/plantgeographyup00schi/page/n6. Accedido en: 22 Oct. 2024.

SERRANO-NOTIVOLI, R.; LONGARES, L. A.; CÁMARA, R. Bioclim: an R package for bioclimatic classifications via adaptive water balance. **Ecological Informatics**, Netherlands, v. 71, p. 101810, 2022. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101810.

THOMAS, W. W. **The Atlantic Forest of Northeastern Brasil**. New York. The New York Botanical Garden, 2008.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centertonl: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1955. Publ. in Climatology. v. 8, p. 1-104.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R.; CARTER, D. B. **Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance**. Centertonl: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1957. v. 10, p. 181-311. Publ. in Climatology. Disponible en: https://www.wrc.udel.edu/wp-content/publications/ThornthwaiteandMather1957Instructions_Tables_ComputingPotentialEvapotranspiration_Water%20Balance.pdf. Accedido en: 22 Oct. 2024.

TOLEDO RIZZINI, C. **Tratado de fitogeografia do Brasil:** aspectos ecológicos, sociológicos y florísticos. Rio de Janeiro: Ed. Ambito Cultural, 1997.

TYUKAVINA, A. *et al*. Global trends of forest loss due to fire, 2001-2019. **Frontiers in Remote Sensing**, Lausanne, v. 3, p. 825190, 2022. DOI: http://doi.org/10.3389/frsen.2022.825190.

WARMING, E. **Oecology of plants:** an introduction to the study of plant communities. Oxford: Oxford University Press. London, 1909. DOI: http://doi.org/10.5962/bhl.title.160223.

WORLD WILDLIFE FUND FOR NATURE. **Ecoregions**. 2024. Disponible en: https://www.worldwildlife.org/biomes. Accedido en: 14 nov 2024.

Editores del artículo

Gustavo Schacht, Sueli Angelo Furlan y Karine Vargas

Recibido: Oct. 22, 2024
Aceptado: Nov. 14, 2024