

Artículo de Investigación**TENDENCIA DE LA VEGETACIÓN DEGRADADA EN TERRITORIO BRASILEÑO Y SU RELACIÓN CON LA REDUCCIÓN EN LAS LLUVIAS (2000-2021)****Trend of degraded vegetation in Brazilian territory and its relationship with the reduction in rainfall (2000-2021)**

Leandro Rodrigo Macedo da Silva¹, Humberto Alves Barbosa², Catarina de Oliveira Buriti³, Franklin Paredes-Trejo⁴

¹ Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Campina Grande-PB, Brasil. E-mail. checomacedo@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-4572-3950>

² Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas, Laboratório de Análise e Processamento de Imagens de Satélites (LAPIS), Maceió-AL, Brasil. E-mail. babosa33@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9641-806X>

³ Instituto Nacional do Semiárido (INSA/MCTI), Campina Grande-PB, Brasil. E-mail. catarina.buriti@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-0527-7899>

⁴ Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora, Departamento de Ingeniería Civil, San Carlos, Venezuela. E-mail. franklinparedes75@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0003-3356-602X>

Recebido em 14/11/2022 e aceito em 14/01/2023

Resumen: La degradación de las tierras es considerada uno de los más graves problemas ambientales actualmente. Sin embargo, en Brasil, el grado de conocimiento del proceso y el mapeo de su expansión aún son muy incipientes. El monitoreo de la degradación, utilizando datos de satélites y metodologías estandarizadas, es fundamental para contribuir con estrategias de combate a la degradación ambiental y adaptación a los eventos climáticos extremos, principalmente sequías. El objetivo de esta investigación es evaluar el proceso de degradación de la cobertura vegetal en el territorio brasileño y su relación con la reducción de las lluvias, a partir de series temporales de datos de satélites durante el período 2000-2021. Se identificaron las áreas del territorio brasileño donde la degradación alteró significativamente la dinámica de la vegetación a partir del análisis de las correlaciones entre la tendencia del Índice de Vegetación por Diferencia Normalizada (NDVI), el índice de quemas y la dinámica de la lluvia. Los datos permitieron identificar que 39% de la cobertura vegetal de Brasil se degradó en este período. Por otro lado, se observó un crecimiento de 33% de biomasa, caracterizada por la ganancia de cobertura vegetal agrícola o pastizales. Los resultados permitieron identificar las regiones donde hubo mayor pérdida de vegetación por deforestación y quemas, en las cuales también se registró una reducción histórica en los volúmenes de precipitación. Los resultados alertan sobre la

alta velocidad de la degradación de la vegetación en el territorio brasileño. Como consecuencia, los procesos irreversibles de deterioro ambiental se han expandido, incrementando de esta forma el riesgo de savanización de la Amazonia y la desertificación en el Semiárido brasileño.

Palabras clave: Degradación; Cobertura vegetal; Precipitación; Incendios forestales; Detección remota.

ABSTRACT: Land degradation is considered one of the most serious environmental problems today. However, in Brazil, the degree of knowledge of the process and the mapping of its expansion are still very incipient. The monitoring of degradation, using satellite data and standardized methodologies, is essential to contribute to strategies to combat environmental degradation and adaptation to extreme weather events, especially droughts. The objective of this research is to investigate the degradation process of the vegetation cover in the Brazilian territory and its relationship with the reduction of rainfall, from time series of satellite data, during the period 2000-2021. The areas of the Brazilian territory where the degradation significantly altered the dynamics of the vegetation were identified, from the examination of correlations between the trend of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), index of fires, and rain dynamics. The data allowed to identify that 39% of Brazil's vegetation cover became degraded in the period. On the other hand, there was a growth of 33% of the biomass, usually characterized by the gain of agricultural vegetation or pastures. The data allowed to identify that the places where there was greater loss of vegetation by deforestation and burning, were precisely where a historical reduction in precipitation volumes was recorded. The results of the research alert to the high speed of vegetation degradation in the Brazilian territory. As a consequence, there is the expansion of irreversible processes of environmental deterioration, such as the risk of Amazon savanization and desertification in the Brazilian semi-arid.

Keywords: Degradation; Vegetation cover; Precipitation; Forest fires; Remote sensing.

RESUMO: A degradação das terras é considerada um dos mais graves problemas ambientais atualmente. Todavia, no Brasil, o grau de conhecimento do processo e o mapeamento da sua expansão ainda são muito incipientes. O monitoramento da degradação, usando dados de satélites e metodologias padronizadas, é fundamental para contribuir com estratégias de combate à degradação ambiental e adaptação aos eventos climáticos extremos, principalmente secas. O objetivo desta pesquisa é investigar o processo de degradação da cobertura vegetal no território brasileiro e sua relação com a redução das chuvas, a partir de séries temporais de dados de satélites, do período 2000-2021. Foram identificadas as áreas do território brasileiro onde a degradação alterou significativamente a dinâmica da vegetação, a partir do exame de correlações entre a tendência do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), índice de queimadas e dinâmica da chuva. Os dados permitiram identificar que 39% da cobertura vegetal do Brasil se tornaram degradadas, no período. Por outro lado, houve um crescimento de 33% de biomassa, geralmente caracterizada por ganho de cobertura vegetal agrícola ou de pastagens. Os dados permitiram identificar que os locais onde houve maior perda da vegetação, por desmatamento e queimadas, foram justamente onde se registrou uma redução histórica nos volumes de precipitação. Os resultados da pesquisa alertam para a alta velocidade da degradação da vegetação no território brasileiro. Como consequência, está a ampliação de processos irreversíveis de deterioração ambiental, a exemplo do risco de savanização da Amazônia e da desertificação no Semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Degradação; Cobertura vegetal; Precipitação; Incêndios florestais; Sensoriamento remoto.

INTRODUCCIÓN

Brasil es uno de los países con mayor biodiversidad del mundo, formado por un conjunto de biomas, que tienen en común el creciente proceso de degradación. El deterioro de los ecosistemas pone en riesgo la supervivencia de las especies y acelera los problemas relacionados con el cambio climático en el país (BURITI, BARBOSA, 2018a).

El informe de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) alertó recientemente sobre el recrudecimiento del proceso de cambio climático en el Planeta. El creciente riesgo de deterioro de la crisis ecológica hace urgente buscar alternativas de adaptación, implementando soluciones tecnológicas para reducir el costo humano y financiero de desastres como sequías, degradación de suelos, desertificación, calor extremo e incendios forestales. El calentamiento global ha aumentado la frecuencia e intensidad de estos fenómenos meteorológicos extremos. Además, los fenómenos a largo plazo como el aumento de las temperaturas han hecho inhabitables algunas zonas del mundo (IPCC, 2022; IPCC, 2019).

Los cambios climáticos, aunque de naturaleza global, tienen impactos distintos, en las diferentes regiones del mundo (PAREDES-TREJO, 2021). En la última década, regiones como el Semiárido brasileño, pasaron a enfrentar eventos climáticos más extremos, en forma de sequías, que se tornaron más intensas y frecuentes. Es el caso de la mayor sequía del siglo, que ocurrió en el período 2011-2017 en la región (BURITI, BARBOSA, 2018b; BURITI et. al, 2020).

La selva amazónica, por su parte, desempeña un papel esencial en la regulación del clima global. Recientemente, esa región también enfrentó sequías extremas, en diferentes áreas, siguiendo esa tendencia de aumento de los eventos climáticos extremos. En los años 2005 y 2010, la cuenca amazónica enfrentó dos sequías sin precedentes, causando grandes pérdidas en su cobertura vegetal, principalmente en razón del aumento de los incendios forestales (PAREDES-TREJO et. al., 2022).

Datos de monitoreo por satélite han demostrado el creciente proceso de degradación de la selva amazónica, sobre todo a causa de actividades humanas, como la deforestación de grandes áreas. Recientemente, investigadores concluyeron que las sequías prolongadas contribuyeron a acelerar el proceso de degradación de las tierras, por medio del aumento de la tasa de deforestación, en la cuenca del río Amazonas, en el período de 2001 a 2020. Los resultados del estudio revelaron que cerca de 757 mil km² de la cuenca amazónica, que corresponde a una estimación del 12,5% de la superficie total, se volvió tierra degradada, apenas en las últimas dos décadas (PAREDES-TREJO et. al., 2022).

La vulnerabilidad a la sequía y a la degradación de la tierra ha aumentado mucho en las últimas décadas, sobre todo debido a la presión poblacional y a las limitadas opciones de garantizar los medios de subsistencia en las áreas más propensas a este tipo de evento climático extremo (BARBOSA et. al., 2013). Los signos de degradación ambiental pueden ser evidentes cuantitativamente en varios indicadores. Sin embargo, el indicador más aceptado para detectar señales del inicio del proceso de degradación es la baja cobertura vegetal (MATALLO JUNIOR, 2001).

La degradación de la tierra es considerada uno de los problemas ambientales más graves en la actualidad. Según el Informe Especial del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2019), la degradación de la tierra se define como una tendencia negativa en la condición de la tierra, causada por procesos inducidos por el hombre, expresada como una reducción a largo plazo y pérdida de al menos uno de los siguientes factores: productividad biológica, integridad ecológica o valor para los humanos. Así, la disminución de la biomasa, la pérdida de la cubierta vegetal o el cambio de uso del suelo, la erosión del suelo y los incendios forestales se encuentran entre los impulsores que provocan la degradación.

El mismo informe también refiere el enverdecimiento de la vegetación, definido como “un aumento en la biomasa vegetal fotosintéticamente activa, deducida de las observaciones satelitales”. El oscurecimiento de la vegetación es “una disminución de la biomasa vegetal fotosintéticamente activa, inferida a partir de observaciones satelitales” (IPCC, 2019, p. 8).

Los procesos de degradación casi siempre comienzan con la deforestación y el reemplazo de la vegetación nativa por vegetación cultivada con un tamaño o ciclo de vida diferente. La vegetación arbustiva y arbórea predominante es sustituida por pastos herbáceos o cultivos de ciclo corto (SAMPAIO et. al., 2003).

La severidad del proceso de degradación se deriva de la generación de impactos ambientales que conducen, además de la pérdida de biodiversidad, a la degradación del suelo. Esta pérdida de suelo fértil aumenta las condiciones de vulnerabilidad social y, en consecuencia, profundiza la pobreza, particularmente cuando se asocia a ciclos prolongados de sequía, por el agotamiento de la capacidad productiva de los recursos ambientales. Sin embargo, el grado de conocimiento del proceso de degradación de la tierra y su extensión aún es deficiente y necesita actualizaciones constantes. Si bien los signos de degradación son evidentes, las metodologías para mapear la expansión de la degradación aún son muy incipientes, no brindando resultados consistentes que sustenten la toma de decisiones sobre este grave proceso (BURITI, BARBOSA, 2022).

Por eso, el objetivo de esta investigación es investigar el proceso de degradación de la cubierta vegetal en el territorio brasileño y su relación con la reducción de las precipitaciones, a partir de series temporales de datos satelitales durante el período 2000-2021. Monitorear la extensión de la degradación, utilizando datos satelitales y metodologías estandarizadas, para analizar grandes escalas regionales, es esencial para contribuir a las estrategias para combatir la degradación ambiental y adaptarse a eventos climáticos extremos, especialmente sequías.

Por lo tanto, la pregunta que guía esta investigación es: ¿existe una correlación entre la serie temporal de datos satelitales sobre la degradación de la vegetación (MODIS NDVI e incendios) y la reducción de las precipitaciones en el territorio brasileño?

A continuación, describiremos los procedimientos metodológicos utilizados para analizar esta cuestión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación abarcó todo el territorio brasileño, cubriendo cerca de 8,5 millones de kilómetros cuadrados de área (Figura 1), albergando la Amazonía (49,29%), Cerrado (23,92%), Mata Atlántica (13,04%), Caatinga (9,92%), Pampa (2,07%) y Pantanal (1,76%) (IBGE, 2004).

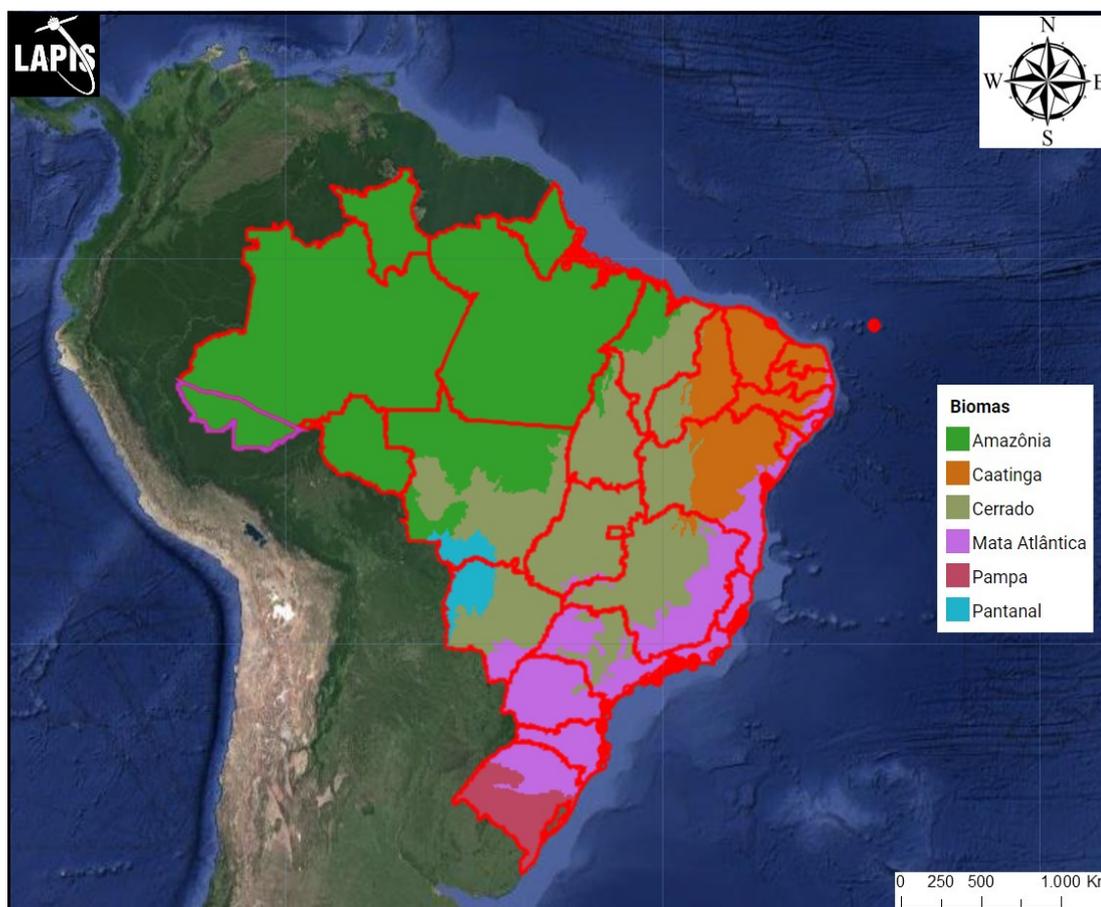


Figura 1. Distribución de biomas en el territorio brasileño. **Fuente:** MapBiomas.

En cada uno de estos ecosistemas se desarrollan diversos tipos de actividades económicas. En tal sentido, existen diferentes clases de cobertura, uso y ocupación del suelo, así como procesos de degradación específicos que amenazan los biomas brasileños. Ellos son: deforestación, incendios, desertificación, agricultura, minería, caza ilegal, pesca depredadora, entre otros (BURITI, BARBOSA, 2018a).

Base de datos y metodología

Esta investigación se desarrolló en dos fases: 1ª) análisis de las tendencias de la vegetación y las precipitaciones; 2º) identificación de áreas geográficas donde los cambios en el uso del suelo o la degradación de la vegetación han alterado significativamente la dinámica de la vegetación, con base en el examen de las

correlaciones entre la tendencia del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el índice de incendios y la dinámica de la precipitación. Estas variables se utilizan como los principales indicadores para estimar la degradación ambiental, en el territorio brasileño, durante las dos décadas analizadas.

Los datos de monitorización satelital utilizados en este estudio fueron obtenidos por la Estación EUMETCast, desplegada desde 2007 en el Laboratorio de Análisis y Procesamiento de Imágenes Satelitales (Lapis). Es una estación descentralizada de recepción de datos satelitales, de la Agencia Europea para la Recepción de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT) (BARBOSA, 2013).

La metodología utilizada en este estudio, para el análisis estadístico de la cobertura vegetal, precipitación e incendios, se basó en la investigación de Barbosa, Lakshmi-Kumar y Silva (2015). Se utilizaron técnicas de teledetección para extraer información de datos satelitales globales de última generación a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG).

A continuación, se presentan los tipos de datos satelitales utilizados para calcular la tendencia de cada variable analizada en este estudio.

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

En las últimas décadas, la teledetección satelital ha contribuido enormemente a documentar los cambios en la cubierta terrestre y monitorear la desertificación, la sequía, los incendios y las actividades agrícolas a escalas espaciales regionales y globales. Una de las herramientas de evaluación más utilizadas es el NDVI, un indicador de cobertura del suelo utilizado principalmente para monitorear cambios en la vegetación debido a anomalías climáticas. El NDVI se calcula como el cociente de la diferencia entre el rojo y el infrarrojo cercano, basado en el principio de que la vegetación sana tiene más absorbancia y la vegetación pobre tiene mayor reflectancia (BARBOSA, LAKSHMI-KUMAR, SILVA, 2015). Es un índice importante en los estudios ecológicos, ya que proporciona un vínculo claro entre la estructura del ecosistema y las condiciones climáticas (BARBOSA et. al., 2006).

El valor de NDVI varía de menos uno (-1) a más uno (+1): valores bajos de NDVI (<0.2) reflejan vegetación escasa; y valores más altos de NDVI (>0.4) reflejan altas densidades de plantas (BARBOSA et al., 2013). Varios estudios en ecosistemas áridos y semiáridos demuestran que el NDVI tiene una correlación particularmente estrecha con la precipitación, de hasta 0,70 (BARBOSA et. al., 2006; BARBOSA et. al., 2013; TOTE et. al., 2011). La causa de esta correlación es doble: primero, el crecimiento de la vegetación está limitado por la cantidad de agua contenida en la superficie del suelo; segundo, la precipitación de las regiones áridas y semiáridas es muy sensible a los cambios en la vegetación. Como resultado, se espera una fuerte relación entre el NDVI y los datos de lluvia, que involucra una respuesta tardía de la vegetación a las condiciones de lluvia (BARBOSA, 1998). El desafío de este tipo de método es discriminar entre perturbaciones biogénicas (ataques de insectos), climáticas (sequía) y antropogénicas (deforestación) (EASDALE et. al., 2018). En la

cuenca del Amazonas, es bien sabido que las sequías extremas disminuyeron significativamente los valores de NDVI en pastizales (BARBOSA et. al., 2015).

El NDVI se utilizó en este estudio como indicador de la condición de la vegetación y la respuesta de la vegetación a la variabilidad de las precipitaciones. NDVI ($\text{NIR} - \text{Red} / \text{NIR} + \text{Red}$), una relación normalizada de reflejos espectrales del rojo (RED) y del infrarrojo cercano (IR) del sensor multiespectral MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), es sensible a la presencia, densidad y condición de la vegetación. Así, se correlaciona con la radiación fotosintéticamente activa absorbida (PAR) y con la producción primaria de la vegetación (BARBOSA, 2013).

El método utilizado en este estudio para generar el mapa de tendencia de la biomasa se consolidó en la investigación de Barbosa (1998) e Teich et al. (2019). Esos estudios fueron seleccionados porque el producto MOD13Q1 proporciona series temporales de NDVI desde 2001 en adelante. El índice de estabilidad se calcula utilizando la pendiente determinada al ajustar un modelo de regresión lineal en la serie temporal anual de NDVI. El nivel de referencia de la productividad (biomasa inicial) es el NDVI promedio de los veinte años. Todo el procesamiento se implementó a través de tendencias, utilizando el software QGIS.

Estimación de precipitaciones

En la mayor parte del territorio brasileño, las estaciones meteorológicas son escasas y de confiabilidad variable, y las mediciones de lluvia no siempre están disponibles.

La precipitación es uno de los factores decisivos para el crecimiento de la vegetación, especialmente en las regiones semiáridas, donde existen fuertes correlaciones entre la precipitación y el NDVI. Por lo tanto, este indicador es ampliamente utilizado para evaluar la condición de la vegetación y su respuesta a la variabilidad de las precipitaciones. A partir de la correlación del NDVI y la dinámica de la precipitación, se pueden identificar áreas donde la pérdida de vegetación no solo está relacionada con el clima, sino principalmente con impactos antrópicos (TOTE et al., 2011; BARBOSA et. al., 2006).

En esta investigación, a partir del monitoreo satelital, realizado en el Laboratorio Lapis, se generó el mapa de tendencias de precipitación, referente al período 2000-2020. Los datos fueron estimados por un índice que representa el nivel de acuerdo entre tres bases de datos globales: TerraClimate, ERA5 y Global Precipitation Mission (GPM), <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>.

Las tendencias de lluvia, en el territorio brasileño, fueron calculadas sobre la precipitación total anual, utilizando una prueba de Mann-Kendall (YUE, WANG, 2004), para cada producto, y clasificando el resultado como negativo, positivo o no significativo (estable).

Los tres mapas resultantes se combinaron para mostrar áreas de acuerdo, lo que genera un mayor nivel de confianza. El resultado del mapeo muestra tendencias de reducción, estabilidad o aumento de las precipitaciones, con base en la distribución espacial de las precipitaciones, durante las dos décadas analizadas.

Con este análisis, buscamos detectar directamente cualquier asociación entre anomalías de lluvia y condiciones de cobertura vegetal. Cabe señalar que la evaluación de las sequías está más allá del alcance del presente estudio. Sin embargo, después de identificar las anomalías de precipitación, se realizó un análisis de correlación con los datos de MODIS NDVI. Para identificar si un píxel está verde o degradado, tras investigar los datos del NDVI, se analizó la tendencia de la serie temporal de precipitación, teniendo en cuenta la precipitación acumulada en el periodo (TOTE et al., 2011; BARBOSA, LAKSHMI-KUMAR, SILVA, 2015).

Con base en los procedimientos metodológicos adoptados en este estudio, fue realizado un análisis comparativo visual de los datos de los mapas generados. Es importante identificar si existe una correlación visual aparente entre el NDVI y los mapas de lluvia, mediante la cual se vinculan los datos de MODIS – NDVI de vegetación y lluvia. En particular, resaltar la coincidencia entre las áreas más degradadas y aquellas que tuvieron una reducción en los volúmenes de precipitación durante el período.

La relación entre el NDVI y la precipitación puede ser muy diferenciada en el espacio o en el tiempo. En parte, esto se debe a las respuestas espacial y temporalmente heterogéneas de los tipos de cobertura del suelo a las variaciones de las precipitaciones. Debido a este alto grado de variación espacial y temporal en los valores de precipitación, no se esperarían relaciones significativas en áreas donde la precipitación es baja e infrecuente. Al comienzo de la temporada de lluvias, el reverdecimiento de la vegetación ocurre casi simultáneamente con el inicio de las lluvias. Después de la estación lluviosa, la máxima productividad de la vegetación se alcanza solo 2 a 3 meses después de la máxima precipitación, especialmente para las zonas de matorral y sabana (BARBOSA, 1998).

Para identificar si un píxel es verde, ya sea positivo (regeneración o reforestación) o negativo (degradación o desertificación), se realizaron análisis de tendencia por mínimos cuadrados lineales en la serie temporal de NDVI y precipitación, teniendo en cuenta la precipitación acumulada durante el período. La idea básica de este enfoque es comparar la dinámica de estas dos variables, registradas en una sola serie de tiempo (BARBOSA, LAKSHMI-KUMAR, SILVA, 2015).

Índice de fuego

Para analizar la degradación de la vegetación en el territorio brasileño, se evaluó la recurrencia de incendios, en escala anual, para el período 2001-2021. El índice de recurrencia de incendios se calculó a partir del número de eventos de incendio (años en los que estuvo ardiendo), dividido por la serie temporal, en este caso, por 21 años.

En el mapa Índice de Incendios, los valores cercanos a 1 indican el registro de al menos un evento de incendio, para todos los años de la serie temporal; y valores de 0.1 indican un registro de un evento de incendio cada 10 años. En Brasil, algunas áreas con mayor frecuencia de incendios están asociadas a la disminución de la biomasa, es decir, la pérdida de la cobertura vegetal.

El índice se calculó utilizando datos del Sistema de Información sobre Incendios para la Gestión de Recursos (FIRMS), de la base de datos de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA, <https://lpdaac.usgs.gov>). También se utilizó el producto de área quemada MCD64A1, versión 6 (MODIS Terra y Aqua), que combina datos mensuales de área quemada y una red global de 500 metros.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Mapeo de la degradación en el territorio brasileño (2001-2021)

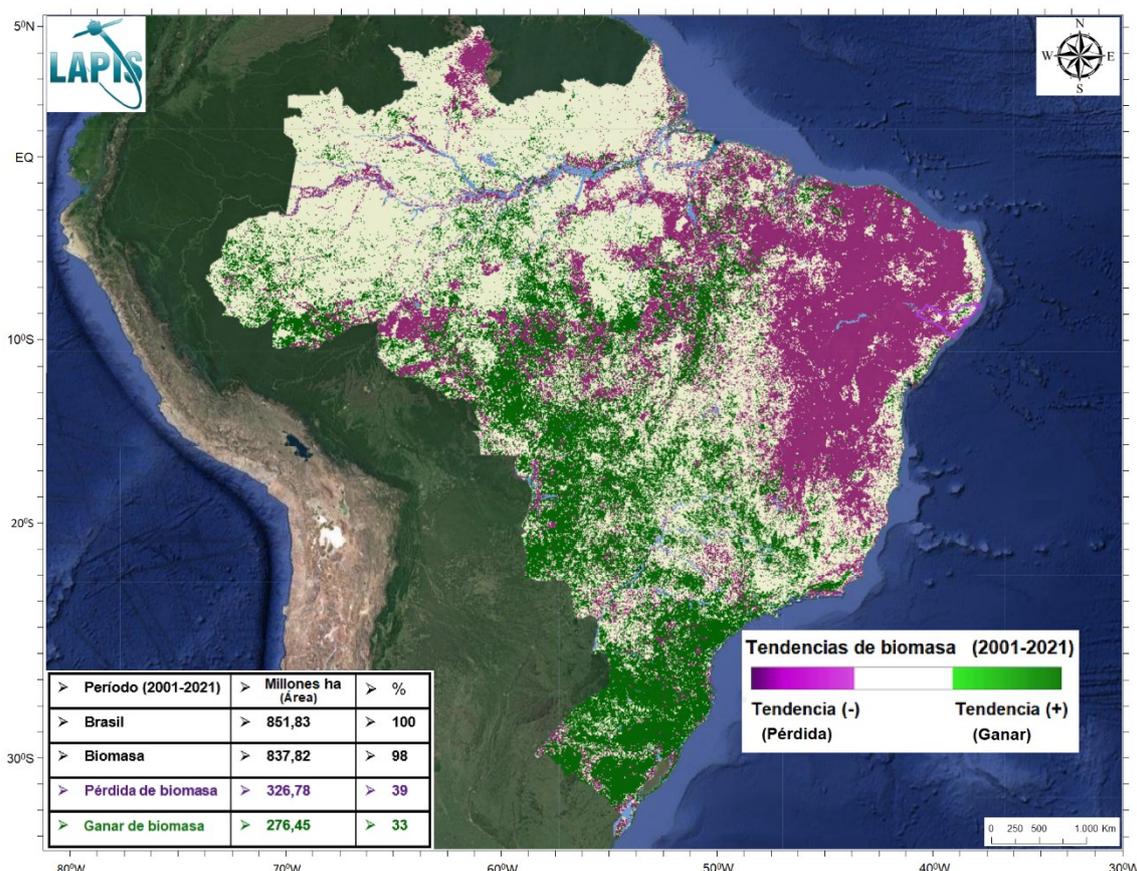


Figura 2. Mapa de tendencias de biomasa en territorio brasileño (2001-2021). **Fuente:** Lapis.

La Figura 2 muestra las áreas donde hubo crecimiento y pérdida de cobertura vegetal en el territorio brasileño, en el período 2001-2021. Las áreas en púrpura, concentradas en la región semiárida, además de las áreas de la Amazonía, el Sudeste y el Centro-Oeste, resaltan donde hubo una reducción de la cobertura vegetal en Brasil. El mapa fue elaborado a partir del cálculo del NDVI, que estima el desarrollo de la cobertura vegetal en las regiones.

Destacan las áreas con cobertura vegetal reducida durante el período donde se intensificaron los procesos de degradación. Según el mapa de biomasa, en las últimas dos décadas, hubo una disminución de 326,78 millones de hectáreas (Mha) de

biomasa (39%) y 276,45 Mha de ganancia de cobertura vegetal (33%) en el territorio brasileño.

Estos datos de monitoreo satelital nos permitieron identificar que el 39% de la cobertura vegetal en Brasil se degradó solo en el período 2001-2021. Por otro lado, hubo un crecimiento de 33% en la biomasa, generalmente caracterizado por un aumento de cobertura vegetal agrícola o de pastizales, en diferentes zonas de la Amazonía, Centro-Oeste, parte del Sudeste y Sur del país.

El área total que tiene algún tipo de cobertura vegetal en Brasil corresponde a 837,82 millones de hectáreas. Esto en relación a la superficie total del territorio brasileño, que es de 851,83 millones de hectáreas.

Los datos satelitales utilizados en esta investigación alertan sobre la alta velocidad de degradación en el territorio brasileño. La mayor parte de las áreas degradadas están ubicadas en la región semiárida brasileña, en la Amazonía y en áreas de la región Sudeste del país. Entre los factores que explican la velocidad de degradación de la vegetación en estas áreas se encuentran: 1) escenario climático: es el caso del aumento en la frecuencia de eventos climáticos extremos, principalmente sequías; 2) aumento de la deforestación y los incendios forestales.

Durante las dos décadas analizadas, se observó que la reducción de las precipitaciones en la región Centro-Norte de Brasil fue bastante crítica, aumentando las presiones humanas sobre la biomasa vegetal de esas áreas. Este factor explica que las áreas más degradadas, identificadas en la Figura 2, coincidan con los lugares donde hubo una mayor reducción de los volúmenes de precipitación durante el período. Los resultados del mapeo de precipitaciones se presentarán más adelante.

La investigación también identificó el porcentaje de pérdida de cobertura forestal en el territorio brasileño. Según los datos, solo en el período 2018-2020, Brasil perdió el 1,6% de la cobertura forestal, lo que corresponde a 12,9 Mha.

En cuanto al mapeo de la cobertura vegetal, mostrado en la Figura 2, se destaca que el aumento del 33% de la biomasa en el territorio brasileño se debe principalmente a la expansión agrícola. En este sentido, el aparente crecimiento de la cubierta vegetal oculta un intenso proceso de cambio de uso del suelo, normalmente con la conversión de áreas de vegetación autóctona a ganadería o la ocupación de áreas ya convertidas por la agricultura.

La expansión agrícola ha sido el motor de la devastación de los biomas brasileños (BURITI, BARBOSA, 2018). Según un informe de MapBiomass (2022), el área total ocupada por la agricultura en Brasil se triplicó en solo 37 años, pasando de 19 millones de hectáreas mapeadas en 1985 a 62 millones de hectáreas en 2021. Este aumento se produjo principalmente en municipios del Cerrado y Pampa, pero también hubo avances en la Amazonía, entre los estados del Amazonas, Rondônia, Acre, Roraima y Pará.

Según otro informe de MapBiomass (2021), el principal uso que se le da al suelo brasileño es para pastos: ocupa 154 millones de hectáreas, con presencia en todos los biomas brasileños. La agricultura y ganadería ganó 81,2 millones de hectáreas en

el período 1985-2020, lo que corresponde a un crecimiento del 44,6%. En el caso de la Amazonía, las imágenes satelitales muestran que la ganadería aumentó en 38 Mha entre 1985 y 2020, un aumento de alrededor del 200%. Este crecimiento ha hecho que la Amazonía sea actualmente el bioma con mayor extensión de pastos cultivados, con 56,6 Mha, seguida por el Cerrado (47 Mha), la Mata Atlántica (28,5 Mha), la Caatinga (20 Mha) y el Pantanal (2,4 Mha).

La Figura 3 muestra el mapa de las principales formas de cobertura y uso del suelo en el territorio brasileño en 2020, con énfasis en la expansión agrícola.

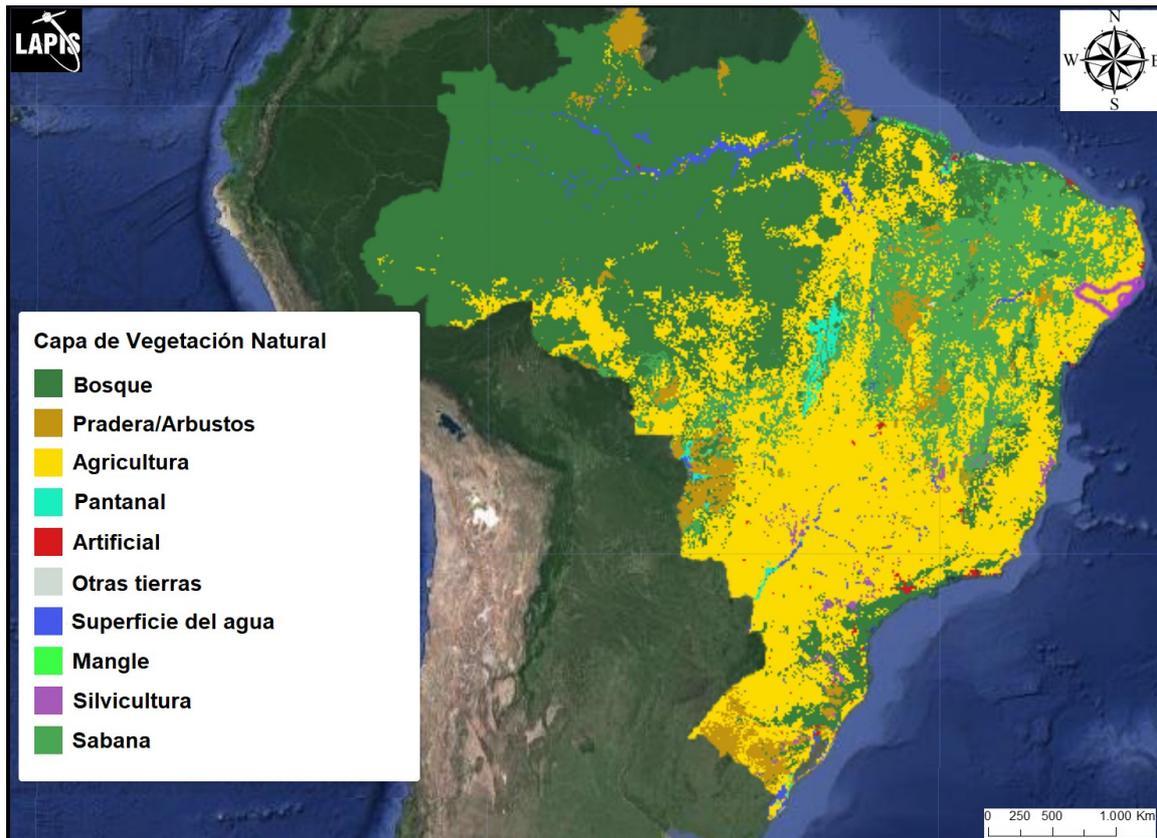


Figura 3. Mapa de uso y cobertura del suelo. **Fuente:** MapBiomass (2020).

Además de los factores relacionados con el crecimiento de la biomasa, especialmente para la expansión agrícola, esta investigación destaca el mapeo de la pérdida del 39% de la biomasa en otras zonas del país. Esta reducción de la cobertura vegetal corresponde a la degradación de la vegetación por la deforestación y los incendios forestales, impulsada por el aumento de las sequías.

Los resultados del estudio desarrollado por Paredes-Trejo et. al. (2022) mostró precisamente cómo el aumento de las sequías en la Amazonía ha intensificado los principales impulsores de degradación de la tierra, como la deforestación y los incendios. Esta asociación entre factores climáticos e impactos antrópicos llevó a la degradación de al menos el 12,5% de la cuenca amazónica en las últimas dos décadas.

A continuación, se analizará la degradación de la vegetación en las regiones brasileñas, con énfasis en el aumento y la pérdida de biomasa por cada estado.

Región Nordeste

Esta investigación también evaluó la degradación de la vegetación en el Nordeste de Brasil en el período 2001-2021. La Figura 4 muestra cómo se ha comportado la productividad de la vegetación en las últimas dos décadas. Datos satelitales indican que hubo una degradación del 51% de la biomasa vegetal en la región, es decir, se perdió más de la mitad de su cobertura vegetal.

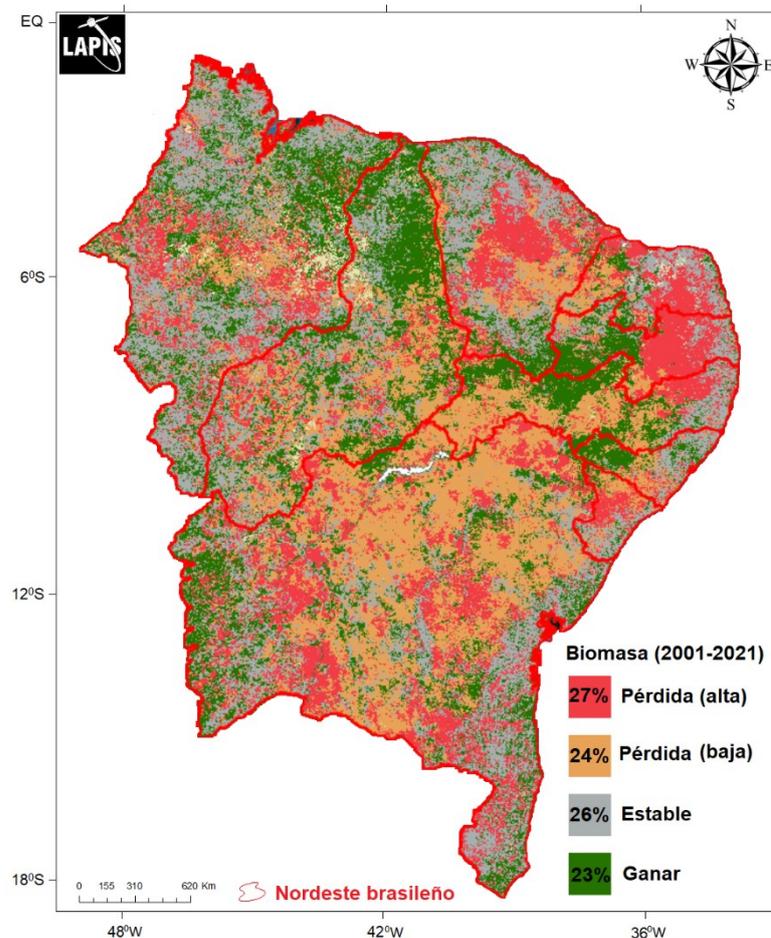


Figura 4. Pérdida y aumento de biomasa en el Nordeste brasileño (2001-2021). **Fuente:** Lapis.

Del total de áreas degradadas en el período, hubo una degradación intensa en el 27% de la cobertura vegetal de la región (áreas en magenta, en el mapa), mientras que el 24% de su superficie sufrió una baja pérdida de biomasa. Por otro lado, hubo un crecimiento del 23% en la cobertura vegetal (áreas verdes en el mapa) y el 26% del área no sufrió cambios significativos durante el período. En el período 2018-2020, la pérdida de bosques en el Nordeste fue de 3,68%, equivalente a 0,52 Mha.

En la Figura 5, se presentan los resultados del mapeo de los aumentos y pérdidas de cobertura vegetal para cada estado del Nordeste brasileño. El color magenta muestra las áreas degradadas de la región, incluida la unión de la pérdida alta y baja de cobertura vegetal.

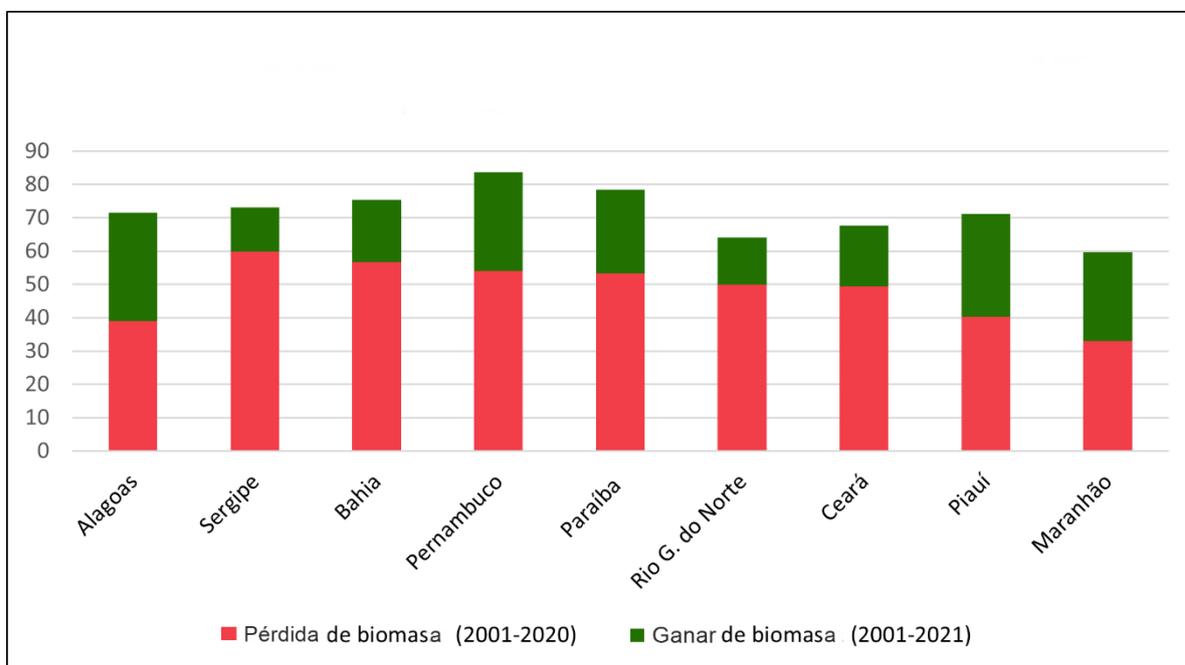


Figura 5. Aumento y pérdida de cobertura vegetal por estado en el Nordeste. **Fuente:** Lapis.

Al mapear la intensidad de la pérdida de biomasa en el noreste brasileño, la Figura 4 destaca un proceso de pérdida de cobertura vegetal en la Caatinga y el Cerrado brasileños. Según MapBiomás (2022), en el período 1985-2021, la Caatinga perdió alrededor del 10,1% de su cobertura vegetal. Además, la degradación muestra el proceso acelerado de conversión de áreas naturales en Matopiba, una región del Cerrado que abarca los estados de Maranhão, Tocantins, Piauí y Bahia.

Otro informe de MapBiomás (2021) destacó los impactos de la intensificación de la deforestación y la actividad agrícola en la frontera agrícola de Matopiba, donde el área destinada a la agricultura casi se ha triplicado en los últimos 36 años. En un incremento del 258%, se pasó de 5,6 Mha a 14,6 Mha para la actividad, observándose la mayor extensión espacial en el estado de Amapá.

La degradación de más de la mitad de la vegetación del Nordeste brasileño (51%), en apenas dos décadas, es un factor que acelera el proceso de desertificación. En efecto, los datos muestran que el 27% de la cobertura vegetal de la región se degradó intensamente.

La región semiárida brasileña, por su gran extensión y población, es considerada una de las mayores áreas del mundo susceptibles al proceso de desertificación. También es una de las regiones brasileñas más vulnerables al aumento de eventos climáticos extremos (BURITI, BARBOSA, 2022).

La desertificación se define como la degradación severa o muy severa de la tierra en regiones áridas, semiáridas y subhúmedas secas, como resultado de las actividades humanas y las variaciones climáticas, que puede conducir a condiciones desérticas (BURITI, BARBOSA, 2018b). La expansión de las áreas desertificadas ocurre en el semiárido brasileño o en sus alrededores, precisamente la región que ha enfrentado la mayor degradación en las últimas dos décadas.

El aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías es uno de los factores que incrementan las presiones sobre la cobertura vegetal en la región. Como se mostrará más adelante en el mapeo de precipitaciones, durante el período analizado, la región enfrentó una gran reducción en sus volúmenes históricos de precipitaciones.

Región Norte

En esta investigación también se evaluó la dinámica de la vegetación en la región Norte, que incluye gran parte de la selva amazónica brasileña. Según la Figura 6, alrededor del 24% de la cobertura vegetal de la región se degradó en el período 2001-2021. De este porcentaje de pérdida, cerca del 20% se encuentran en condiciones de alta degradación de la cobertura vegetal.

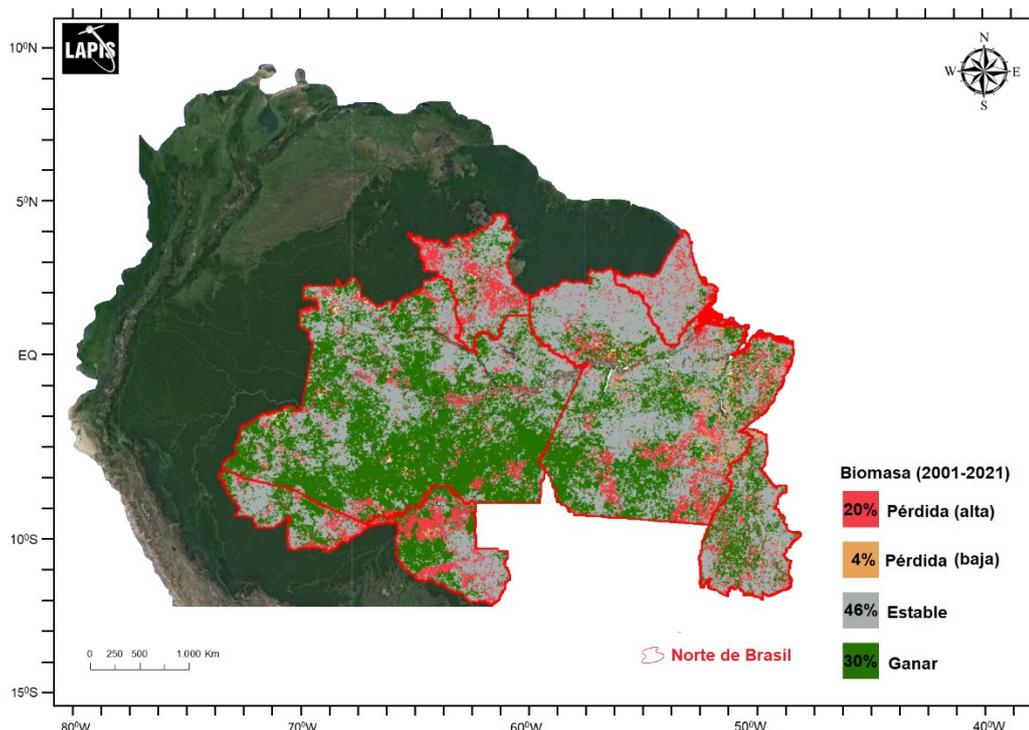


Figura 6. Pérdida y aumento de biomasa en el norte de Brasil (2001-2021). **Fuente:** Lapis.

Si bien hubo un aumento del 30% en la biomasa en la región Norte durante el mismo período, este crecimiento se debe a la expansión agrícola, principalmente a través de la sustitución de extensos bosques continuos por pastizales. Además, el “arco de deforestación” es la región con las mayores tasas de degradación de la cobertura

vegetal nativa, en el bioma amazónico, donde la frontera agrícola avanza hacia la selva. Son más de 500 mil km² de tierra, que van desde el noroeste de Tocantins, pasando por el sur de Pará, Mato Grosso y Rondônia, extendiéndose hasta Acre.

En la Amazonía brasileña, la principal causa de la deforestación es la conversión de áreas forestales para dar paso a la ganadería extensiva. El fuego es ampliamente utilizado para abrir nuevas áreas de pastizales con el objetivo de expandir la ganadería. De hecho, en este estudio se identificó que la pérdida de bosque en la región norte de Brasil corresponde a 1,41% de bosque, equivalente a 0,21 Mha en el período 2018-2020.

En la Figura 7, se presentan los resultados del mapeo de los aumentos y pérdidas de cobertura vegetal agrupado por estado en el Norte de Brasil. El color magenta muestra las áreas degradadas en la región durante el período, mientras que el color verde muestra la ganancia en la cobertura vegetal.

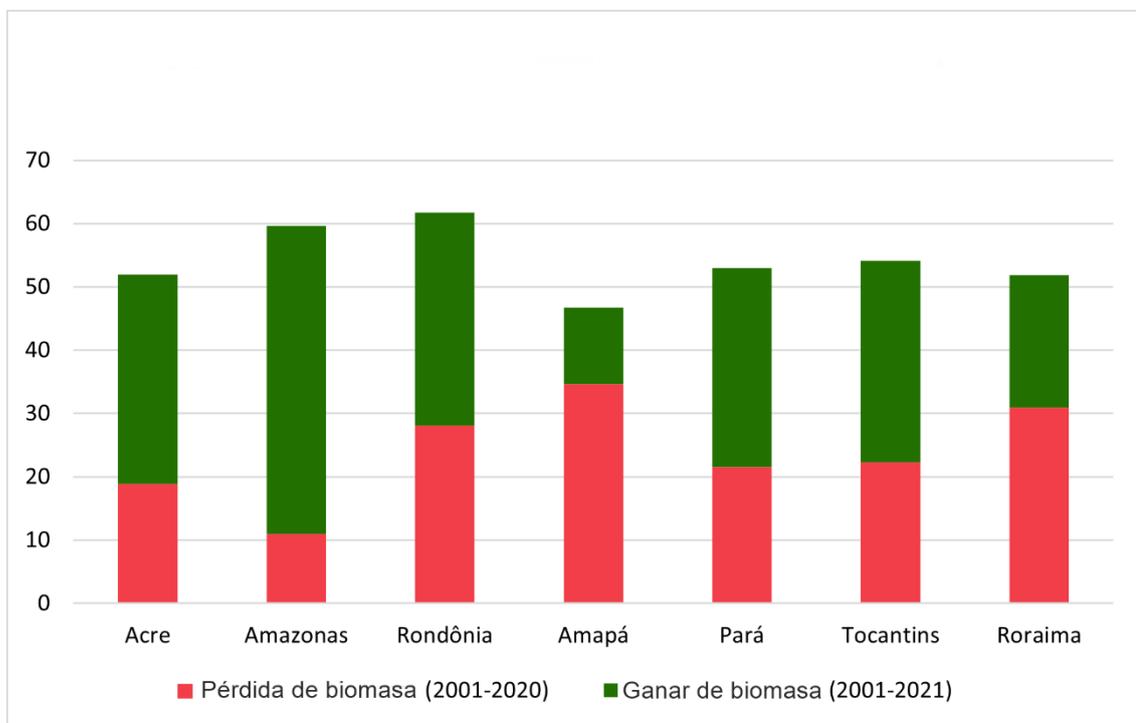


Figura 7. Ganancia y pérdida de cobertura vegetal por estado en la región Norte. **Fuente:** Lapis.

Este proceso de degradación de la vegetación aumenta el riesgo de sabanización de la Amazonía brasileña. Es un proceso irreversible de transformación de áreas ocupadas por una densa vegetación en desiertos parciales, con la acción humana como principal impulsor, especialmente en el bioma amazónico.

Motivados por el aumento de los fenómenos meteorológicos extremos, hemos evaluado los impactos de la sabanización en la Amazonía. Los cambios en el uso del suelo, especialmente la deforestación, asociados al escenario de cambio climático, tienden a elevar las temperaturas locales. Para el año 2100, es posible que más de 11 millones de personas estén expuestas al estrés por calor, a un nivel que puede

exceder su capacidad de adaptación y afectar la salud humana (OLIVEIRA et al., 2021).

Región Sudeste

Las estimaciones sobre la productividad de la vegetación en el Sudeste de Brasil en el período 2001-2021 se muestran en la Figura 8. Los resultados del mapeo destacan la degradación del 24% de la biomasa vegetal en la región.

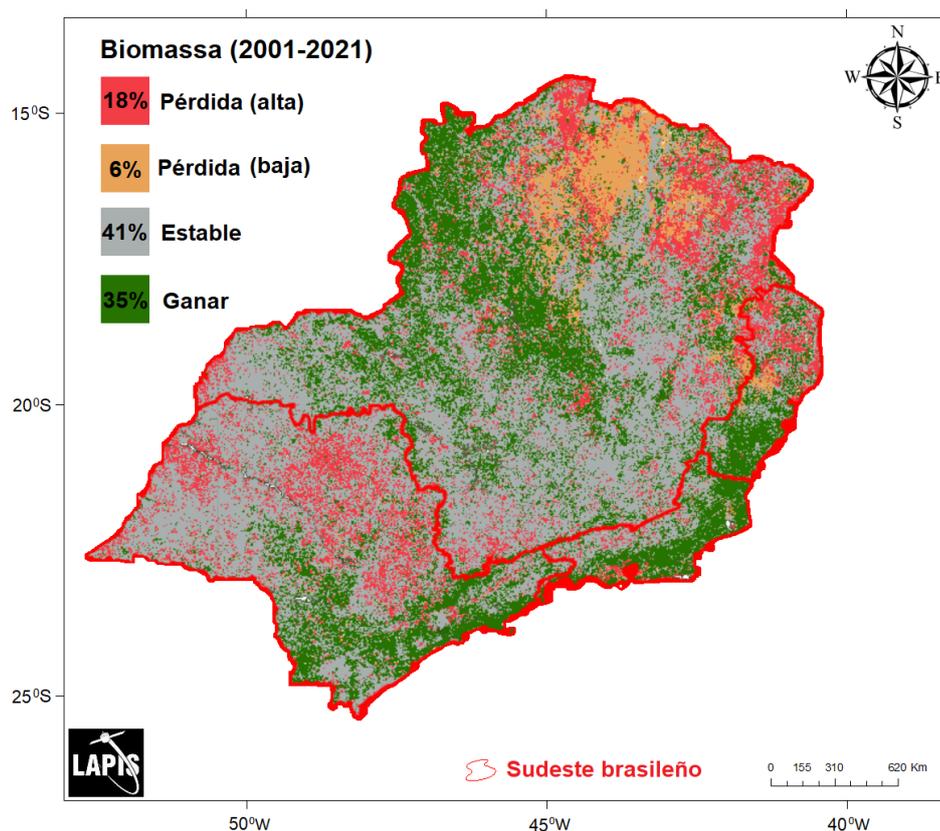


Figura 8. Pérdida y ganancia de biomasa en el sureste de Brasil (2001-2021). **Fuente:** Lapis.

De acuerdo con el mapa, del total de áreas degradadas en la región Sudeste, cerca del 18% de la cubierta vegetal sufrió una intensa degradación, mientras que el 6% sufrió una baja pérdida de biomasa. Por otro lado, hubo una ganancia del 35% en biomasa y el 41% del área no sufrió cambios significativos. La pérdida de bosques en la región para el período 2018-2020 se estimó en 1%, equivalente a 0,29 Mha.

Las estimaciones de degradación en el Sudeste brasileño son cercanas a las estimadas para la región Sur. Sin embargo, la ganancia de cobertura vegetal fue significativamente mayor en el Sudeste (35%). Este aumento en la productividad de la biomasa se debió principalmente al aumento de las áreas agrícolas o de pastizales en esta región.

La Figura 9 muestra los resultados del mapeo de la ganancia o pérdida de cobertura vegetal por cada estado en el sureste de Brasil. El color magenta muestra las áreas degradadas en la región, incluyendo la unión de la condición de alta y baja pérdida de cobertura vegetal.

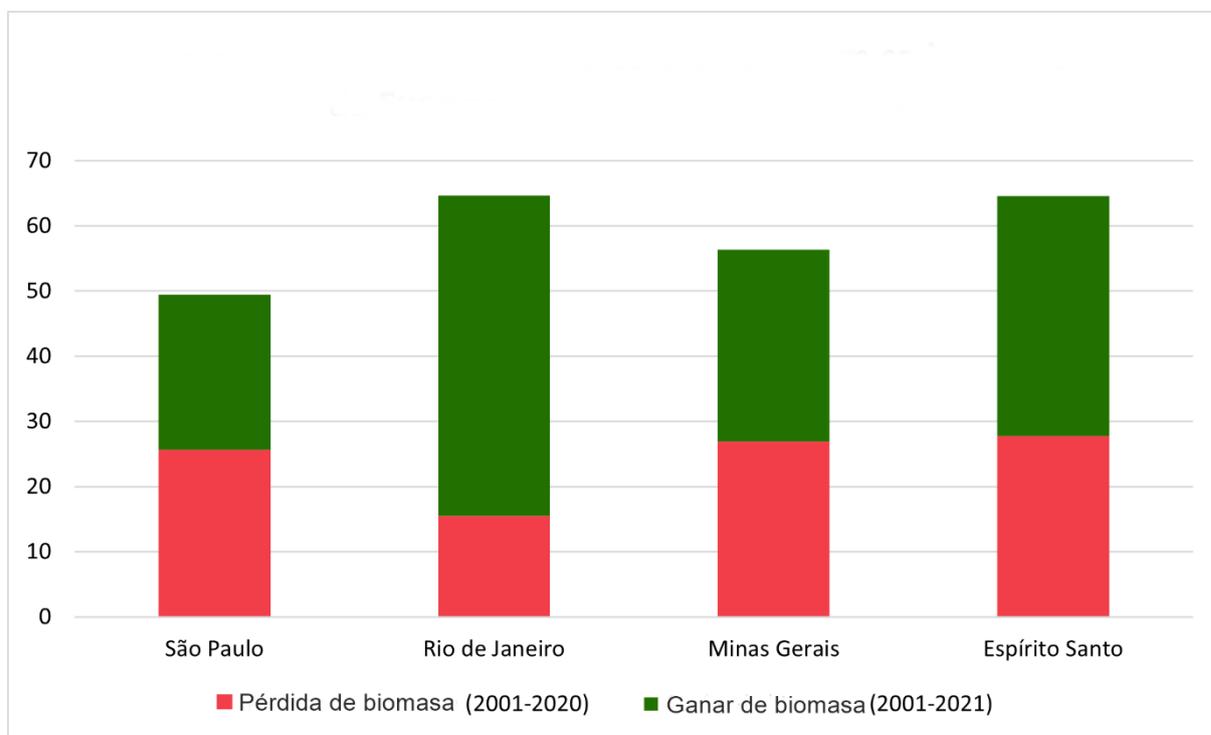


Figura 9. Ganancia y pérdida de cobertura vegetal por estado en la región Sudeste.
Fuente: Lapis.

Región Centro-Oeste

A propósito de la degradación de la vegetación en el Medio Oeste de Brasil en el período 2001-2021, la Figura 10 muestra la ocurrencia de una pérdida del 21% de la cobertura vegetal en la región en las últimas dos décadas. El registro de pérdida de biomasa incluye condiciones de alta y baja degradación de la cobertura vegetal.

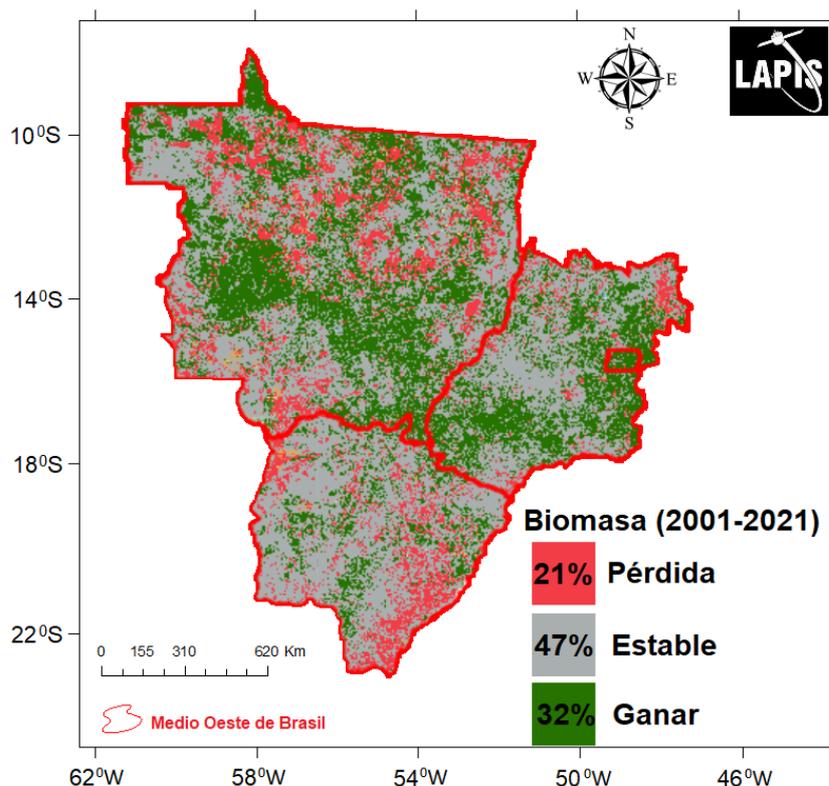


Figura 10. Pérdida y ganancia de biomasa en la región del Centro-Oeste (2001-2021). **Fuente:** Lapis.

Alrededor del 47% de la cubierta vegetal en el Centro-Oeste se mantuvo estable, mientras que hubo un aumento del 32% en la biomasa durante el período. Es importante resaltar que, en esta región, como en otras zonas del país, el crecimiento de la cobertura vegetal suele deberse a la expansión del área ocupada por pastizales o agricultura. En otras palabras, el crecimiento de la biomasa corresponde a nuevas formas de uso y degradación de la tierra.

En cuanto al 47% de cobertura vegetal estable, es necesario llamar la atención que esta aparente estabilidad esconde un intenso proceso de cambio de uso del suelo, con la conversión de áreas de vegetación nativa a ganadería o la ocupación por pastos de áreas previamente convertidas al uso agricultura.

El mapeo también reveló que, en el período 2018-2020, hubo una pérdida de 1,16% de bosque en la región del Centro-Oeste, equivalente a 0,68 Mha.

La Figura 11 muestra los resultados del mapeo de la ganancia o pérdida de cobertura vegetal por estado, en la región del Medio Oeste de Brasil. El color magenta destaca las áreas degradadas en la región durante el período, mientras que el color verde muestra la ganancia de cobertura vegetal.

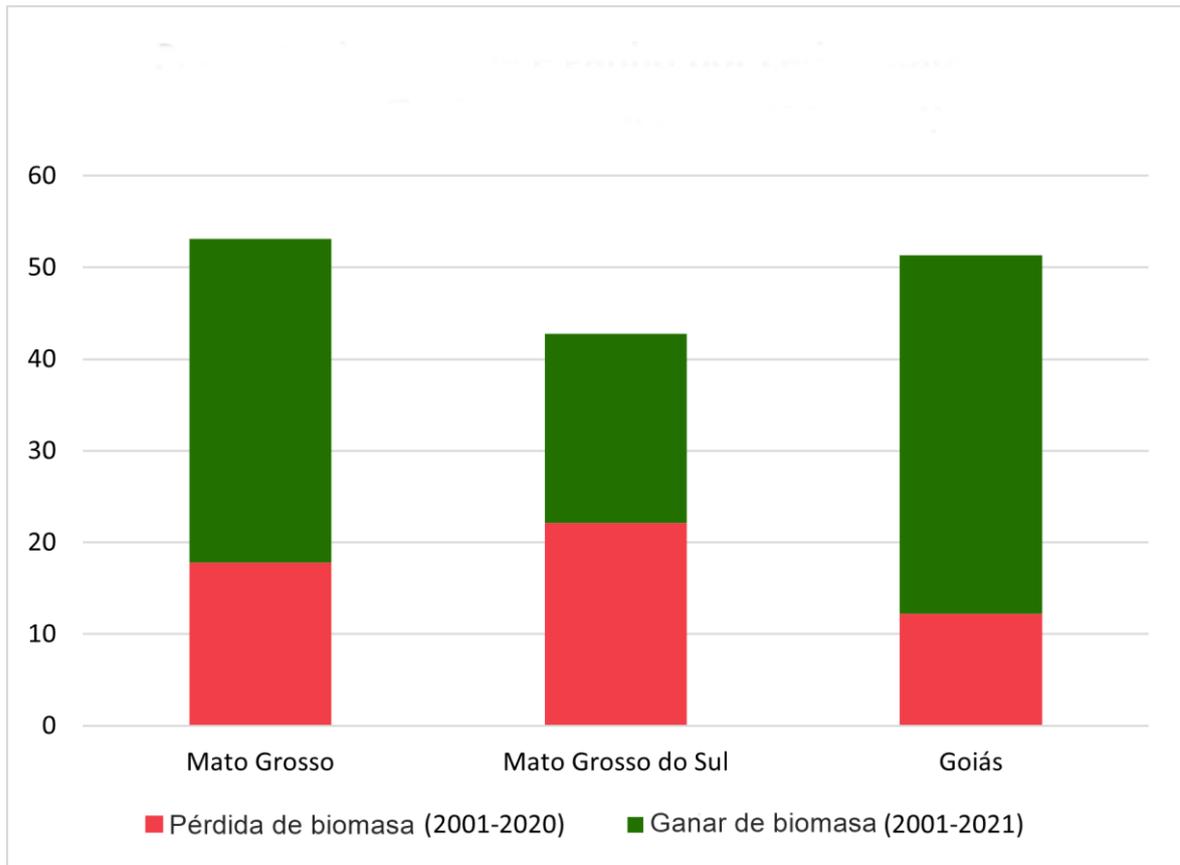


Figura 11. Ganancia y pérdida de cobertura vegetal por estado en la región del Centro-Oeste. **Fuente:** Lapis.

Región Sur

En este estudio se cartografió la degradación de la vegetación en el sur de Brasil, en el período 2001-2021. Los resultados mostraron que alrededor del 26% de la cubierta vegetal de la región estaba degradada (Figura 12). El registro de pérdida de biomasa incluye condiciones de alta y baja degradación de la cobertura vegetal.

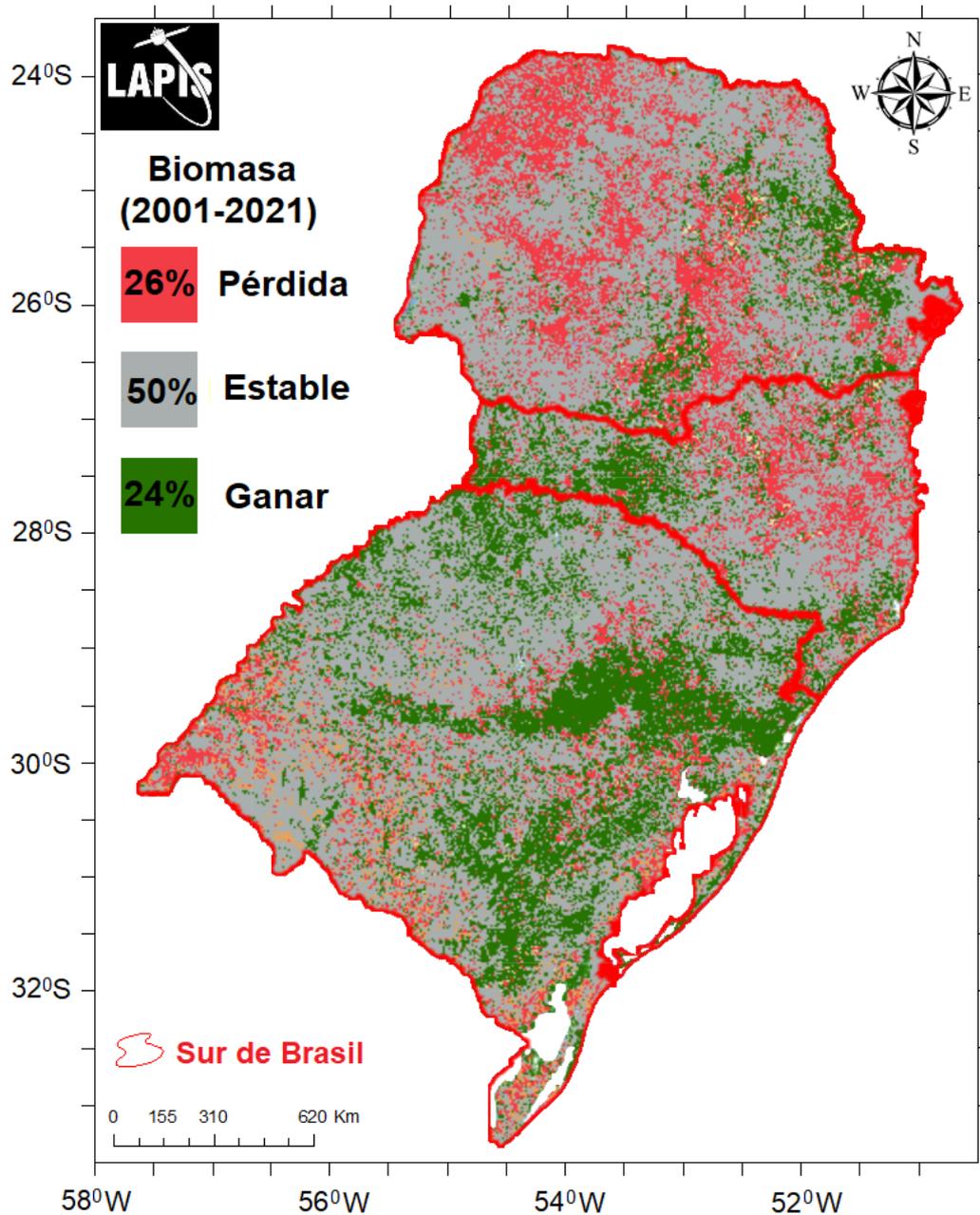


Figura 12. Pérdida y ganancia de biomasa en la región Sur (2001-2021). **Fuente:** Lapis.

Alrededor del 50% de la cobertura vegetal en la región Sur se mantuvo estable. Por otro lado, hubo una ganancia de 24% en la cobertura vegetal, generalmente caracterizada por la expansión del uso de suelo para agricultura o pastizales.

El mapeo permitió estimar la pérdida de bosque en el Sur de Brasil, en el período 2018-2020. Como resultado se encontró que hubo una pérdida de 1,47% de bosque, equivalente a 0,20 Mha.

La Figura 13 muestra los resultados del mapeo de la ganancia o pérdida de cobertura vegetal, según los datos recolectados para cada estado del Sur de Brasil. El color magenta muestra las áreas degradadas en la región durante el período, mientras que el color verde muestra la ganancia de cobertura vegetal.

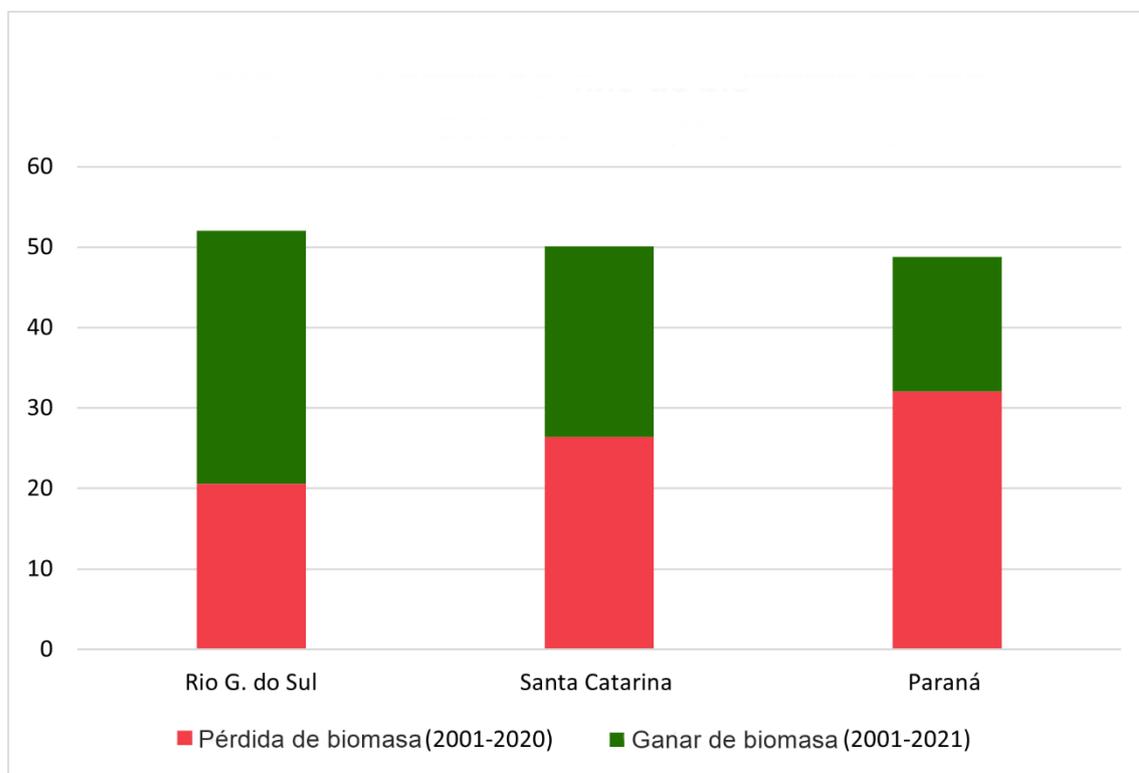


Figura 13. Ganancia y pérdida de cobertura vegetal por estado en la región Sur. **Fuente:** Lapis.

El mapeo de incendios muestra intensa degradación en áreas de expansión agrícola

En este estudio las áreas de recurrencia de incendios forestales en el país para el período 2001-2021 fueron mapeadas. De la Figura 14, se destaca la intensificación de la recurrencia de la quema de vegetación en Matopiba, la nueva frontera agrícola de Brasil. El Centro-Oeste también se muestra como un área con alta frecuencia de incendios forestales. Estas áreas están resaltadas en amarillo, naranja y púrpura en el mapa, con excepción de la delimitación de Alagoas, donde el púrpura es solo la delimitación del mapa político del estado.

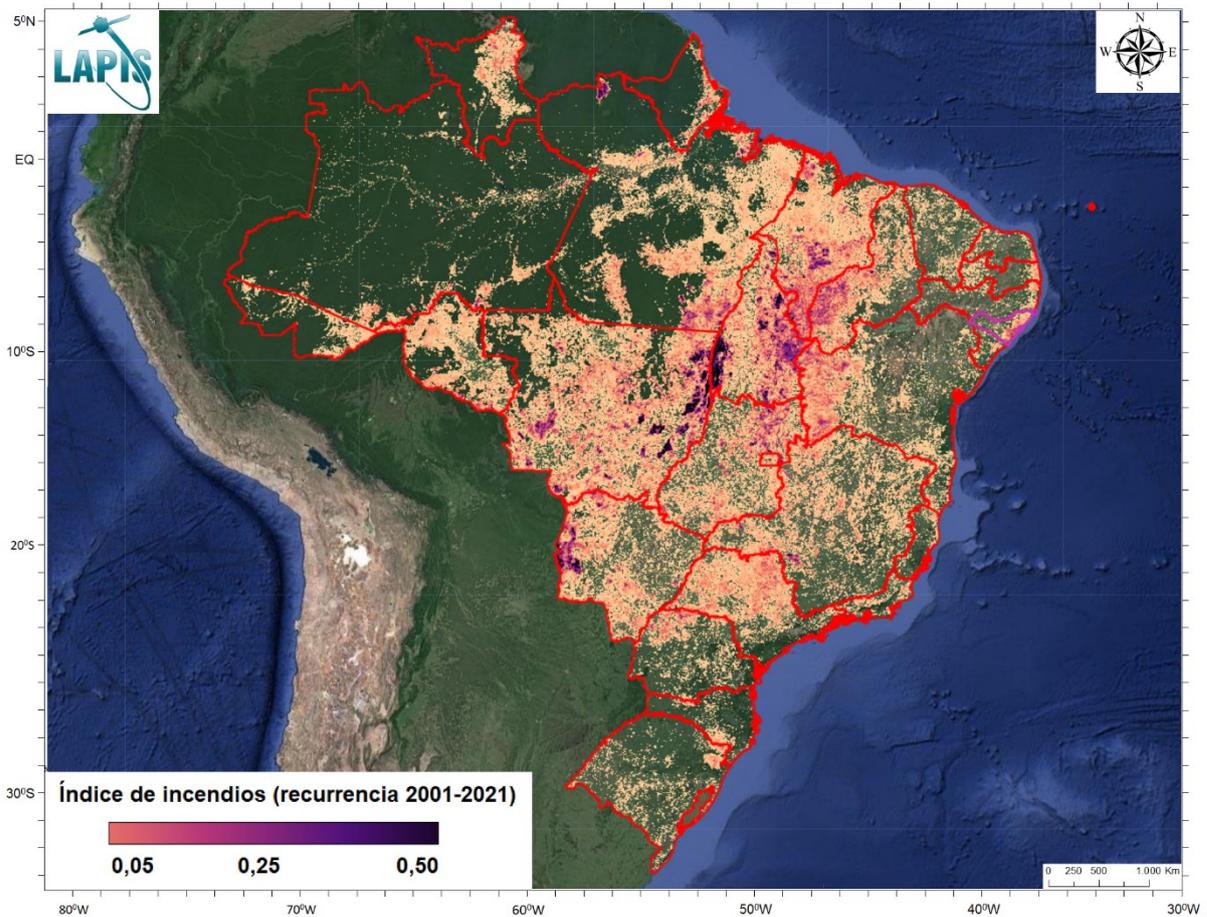


Figura 14. Mapa Índice de Recurrencia de Incendios (2001-2021). **Fuente:** Lapis.

El aumento de las temperaturas y el aumento de la frecuencia de las sequías contribuyeron a que los incendios forestales fueran más recurrentes, generalizados, severos y con efectos biológicos que modifican el tipo de cobertura vegetal en el territorio brasileño. Estos factores afectan la diversidad de especies, lo que lleva a la pérdida de biomasa y la erosión del suelo.

El fuego también se usa ampliamente para limpiar la tierra de las áreas cultivadas, lo que tiene un impacto directo en las emisiones de gases de efecto invernadero.

Mapecto de áreas con precipitaciones reducidas

En esta investigación se estimó las áreas donde hubo una reducción en los volúmenes de lluvia entre 2000 y 2021 (Figura 15). Las áreas marrones indican dónde hubo una reducción de las precipitaciones durante el período, que comprenden una gran parte de Brasil, incluidas las regiones con una fuerte vocación por la agricultura. Los tonos de azul muestran la tendencia de aumento de las precipitaciones, las cuales se

circunscribe a zonas muy específicas de la Amazonía. Las áreas beige muestran estabilidad en los volúmenes de lluvia, en relación con el promedio histórico.

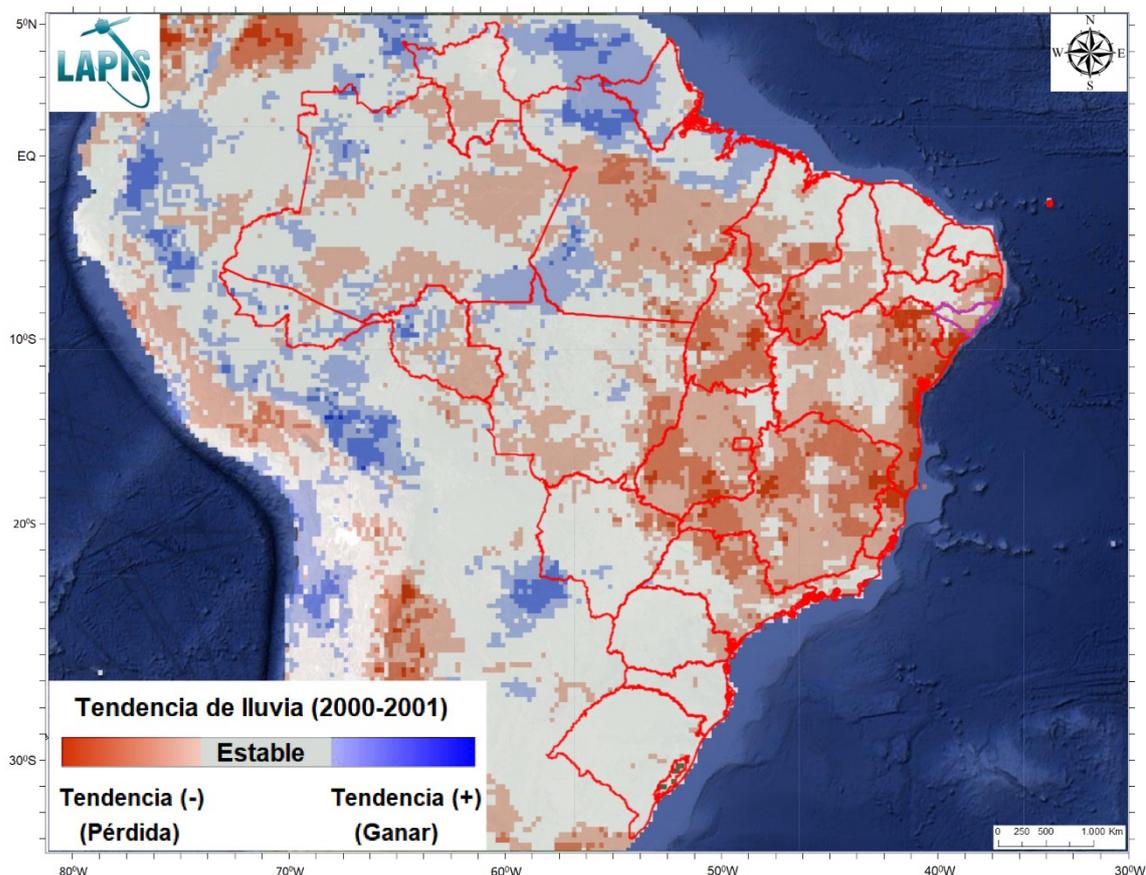


Figura 15. Mapa de tendencia de las precipitaciones en el territorio brasileño (2000-2021).
Fuente: Lapis.

El uso de datos climáticos para examinar la historia reciente de la tendencia de las precipitaciones, contribuye a una mejor comprensión de los factores que impulsan la pérdida o el aumento de la cobertura vegetal en Brasil. También es un dato importante para planificar la necesidad de adaptación al clima, especialmente en el contexto actual de aumento de los fenómenos meteorológicos extremos.

En la Figura 15 se revela una alta proporción del área del territorio brasileño donde hubo reducción de las precipitaciones. Estos datos contribuyen a entender el aumento de la sequía como uno de los impulsores de degradación. La pérdida sistemática de la cobertura vegetal se deriva de un proceso que se retroalimenta, tanto de los cambios inducidos por el clima, como de la degradación de la vegetación por la acción humana.

CONSIDERACIONES FINALES

Además de analizar la pérdida de cobertura vegetal en las regiones brasileñas en las últimas décadas, el presente estudio mapeó las áreas más expuestas a incendios y reducción de los niveles de precipitación en el mismo período.

En general, esta investigación mostró que las áreas de degradación de la cobertura vegetal en Brasil coinciden con los lugares donde hubo una reducción histórica en los volúmenes de lluvia en el país. Fue posible mapear características importantes del área de estudio, relacionadas con la dinámica de la vegetación y el régimen de lluvias, mostrando signos de degradación y reverdecimiento. El NDVI se presentó como un buen indicador para identificar áreas degradadas en Brasil, demostrando en algunos casos una fuerte dependencia de la vegetación en relación a la precipitación.

Los impactos de la expansión agrícola, además de otras formas de uso de la tierra, llevaron a la pérdida de la cobertura vegetal en el territorio brasileño. La deforestación y los incendios han incrementado considerablemente los procesos de degradación de la vegetación en las últimas dos décadas. La falta de manejo sustentable de la vegetación resulta en la expansión de procesos irreversibles de deterioro ambiental, como el aumento del riesgo de sabanización de la Amazonía y desertificación en la región semiárida brasileña.

Los datos satelitales analizados permitieron concluir que los lugares donde hubo mayor pérdida de vegetación por deforestación e incendios, fueron precisamente, donde hubo una reducción histórica en los volúmenes de precipitación. En otras palabras, el aumento en la frecuencia e intensidad de las sequías, resultantes de eventos climáticos extremos, ha aumentado los impactos de la degradación de la vegetación en el territorio brasileño.

A partir de este proceso que asocia el cambio y la variabilidad climática con la acción humana, se expanden las áreas en proceso de desertificación en la región semiárida y el proceso de sabanización en la Amazonía brasileña. En un escenario de cambio climático, estas consecuencias son drásticas para la salud y garantía de los medios de vida de la población expuesta en estas áreas degradadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la CAPES – Coordinación de Perfeccionamiento del Personal de Educación Superior, por su apoyo en la realización de esta investigación, a través del Proyecto Epidemias de la Capes (Proceso n° 23038.013745/2020-69). También agradecen al CNPq – Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico, por apoyar esta investigación a través del Proyecto Universal (Proceso n° 403223/2021-0) y por otorgar una beca de doctorado al autor Leandro Macedo, a través del PPGMET/UFCCG.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Concepción: Leandro Macedo y Humberto Barbosa concibieron y diseñaron esta investigación. **Metodología:** Leandro Macedo y Humberto Barbosa procesaron los

dados y aportaron la metodología y herramientas de análisis. **Análisis formal:** Catarina Buriti analizó los datos. **Investigación:** Leandro Macedo, Humberto Barbosa y Catarina Buriti realizaron la investigación. **Recursos:** se utilizaron recursos de todos los autores. **Preparación de datos:** Humberto Barbosa y Franklin Paredes prepararon los datos. **Redacción del artículo:** Leandro Macedo y Catarina Buriti escribieron el artículo. **Revisión:** Todos los autores discutieron los resultados y mejoraron la versión final del manuscrito. **Supervisión:** Humberto Barbosa supervisó la investigación. **Adquisición de financiamiento:** Humberto Barbosa obtuvo financiamiento para la ejecución del proyecto. Todos los autores leyeron y estuvieron de acuerdo con la versión publicada del manuscrito.

REFERENCIAS

- BARBOSA, H. A., HUETE, A. R., BAETHGEN, W. E. A 20-year study of NDVI variability over the Northeast Region of Brazil. In: **Journal of Arid Environments**, n. 67, 2006. p. 288-307. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.02.022>
- BARBOSA, H. A. **Sistema EUMETCast: uma abordagem aplicada dos satélites Meteosat de Segunda Geração.** EDUFAL, 2013. 203 p.
- BARBOSA, H. A. **Spatial and temporal analysis of vegetation index derived from AVHRR/NOAA and rainfall over Northeastern Brazil during 1982-1985.** Master degree dissertation in Remote Sensing [in Portuguese]. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos (SP), Brazil, 1998.
- BARBOSA, H. A.; LAKSHMI-KUMAR, T. V.; SILVA, L. R. M. Recent trends in vegetation dynamics in the South America and their relationship to rainfall. **Nat Hazards**, n. 77, 2015. p. 883-899. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1635-8>
- BARBOSA, Humberto et. al. Harnessing Earth Observation and Satellite Information for Monitoring Desertification, Drought and Agricultural Activities in Developing Countries. In: SILVERN, S.; YOUNG, S. (Org.). **Environmental Change and Sustainability**. 3. ed. Croácia: IntechOpen, 2013. p. 92-121. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/55499>
- BURITI, C. O.; BARBOSA, H. A. **Biomás do Brasil: conheça as 9 principais ameaças.** Acessado em: 08 nov 2022. Disponível em: <https://www.letrasambientais.org.br/posts/biomas-do-brasil:-conheca-as-9-principais-ameacas.2018a>.
- BURITI, C. O.; BARBOSA, H. A. **Um século de secas.** Lisboa-Portugal, 2018b.
- BURITI, C. O. et. al. Um Século de Secas: Por que as Políticas Hídricas não Transformaram a Região Semiárida Brasileira? In: **Rev. Bras. Meteorol.** n. 35, v. 4, 2020. p. 683-688. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863540073>
- BURITI, C. O.; BARBOSA, H. A. Desertificação e mapeamento de áreas degradadas no semiárido brasileiro a partir de satélites. In: MAGNONI JÚNIOR, Lourenço et. al. (Orgs.). **Ensino de Geografia e a Redução do Risco de Desastres em espaço rural e urbano.** São Paulo: Centro Paula Souza, 2022. p. 465-483.

EASDALE, M. H.; BRUZZONE, O.; MAPFUMO, P.; TITTONELL, P. Phases or regimes? Revisiting NDVI trends as proxies for land degradation. In: **Land Degradation & Development**. 29, 2018. p. 433-445. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2871>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa de Biomas do Brasil: Primeira Aproximação**, 2004.

IPCC. **Climate Change and Land**: an IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. August 2019.

IPCC. The Working Group II contribution was released on 28 February 2022. **Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, 2022.

MAPBIOMAS. **Destaques do mapeamento anual e qualidade de pastagens no Brasil entre 1985 a 2020**. Coleção 6. Acesso em: 08 nov 2022. Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Fact_Sheet_PASTAGEM_13.10.2021_ok_ALTA.pdf, 2021.

MAPBIOMAS. **Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra: agricultura e silvicultura**. Coleção 7. Acesso em: 08 nov 2022. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1Vt0nfq_puKJlwekiqZRry1mdX4Y-fSLo/view?pli=1 2022.

MATALLO JÚNIOR, H. **Indicadores de Desertificação: histórico e perspectivas**. Brasília-DF: UNESCO, 2001. Acesso em: 12/11/2022. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001298/129871POR.pdf>

OLIVEIRA, Beatriz Fátima Alves de et. al. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. In: **Communications Earth & Environment**. v. 2, n. 207, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00275-8>

PAREDES-TREJO, F. J. Drought variability and land degradation in the Amazon River Basin. *Frontiers*. In: **Earth Science**, v. 1, p. 1-35, 2022.

PAREDES-TREJO, F.; BARBOSA, H. A.; GIOVANNETTONE, J.; LAKSHMI KUMAR, T. V.; KUMAR-THAKUR, M.; BURITI, Catarina de Oliveira. Long-Term Spatiotemporal Variation of Droughts in the Amazon River Basin. In: **Water**, v. 13, p. 351-366, 2021b.

PAREDES-TREJO, Franklin et. al. Drought variability and land degradation in the Amazon River basin. **Frontiers Earth Science**. 2022. DOI: 10.3389/feart.2022.939908

SAMPAIO, E. V. B.; SAPAIO, Y.; VITAL, T.; ARAÚJO, S. B.; SAMPAIO, G. R. **Desertificação no Brasil: Conceitos, núcleos e tecnologias de recuperação e convivência**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2003.

TEICH, I. et. al. Combining Earth Observations, Cloud Computing, and Expert Knowledge to Inform National Level Degradation Assessments in Support of the

2030 Development Agenda. In: **Remote Sens.** v. 11, n. 24: 2918, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11242918>

TOTE, C. Monitoring environmental change in the Andes based on SPOT-VGT and NOAA-AVHRR time series analysis. In: **6th International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images (Multi-Temp)**, 2011. p. 268-272. DOI: 10.1109/Multi-Temp.2011.6005100

YUE, S.; WANG, C. The Mann-Kendall Test Modified by Effective Sample Size to Detect Trend in Serially Correlated Hydrological Series. In: **Water Resour. Manag**, n. 18, 2004. p. 201-218.



Revista Geonorte, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus-Brasil. Obra licenciada sob Creative Commons Atribuição 3.0

