

IMPACTO DE LA QUEMA DE BIOMASA EN EL PANTANAL SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE EN PARAGUAY EN EL PERIODO 2010 A 2022

Sergio Daniel Mendez

Universidad Nacional de Itapúa

Fernando José Mendez

Universidad Nacional de Itapúa

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: La quema de biomasa debido a causas antropogénicas es un fenómeno cíclico que es observado en la región central de América del Sur, en especial en la zona del Pantanal la cual es una zona muy rica en biodiversidad. Este fenómeno ha tomado relevancia en los últimos años debido al cambio en las condiciones climáticas normales, generando una problemática a causa al transporte de contaminantes emitidos a la atmosfera hacia zonas remotas. El objetivo principal de esta investigación es analizar el impacto en la calidad del aire en el Paraguay debido a la quema de biomasa en el Pantanal durante el periodo 2010 a 2022. Para realizar la investigación se tomaron en cuenta datos del Reanálisis Global del *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAM5), de donde se tomaron datos de: potencia radiativa de incendios forestales con resolución espacial de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ y resolución temporal de 1 día; datos de material particulado Grueso PM10, material particulado fino PM2.5, columna total de monóxido de carbono CO, columna total de dióxido de nitrógeno NO₂ y columna total de dióxido de azufre SO₂, con resolución espacial de $0.75^\circ \times 0.75^\circ$ y resolución temporal de 3 horas; datos del campo de viento del Reanálisis del Era 5 (u, v) en diferentes niveles verticales con resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y resolución temporal de 3 horas. Para el análisis se tomó en consideración la emisión de contaminantes en el dominio del pantanal a causa de quema de biomasa y el posterior transporte hacia el territorio paraguayo debido al viento del sector norte – noreste. Los resultados muestran que este fenómeno es observado generalmente entre los meses de agosto y octubre, con un máximo principal en el mes de septiembre. Se observó particularmente que los años 2010, 2019 y 2020 presentaron picos importantes de quema de biomasa en la zona del pantanal. También así, se observaron picos importantes de

contaminantes como PM10, SO₂ y NO₂ en las mismas fechas, no se observó una muy buena correlación con valores de CO. Se observa una muy buena correlación en valores medios de incendios forestales y contaminantes que presentan sus valores máximos entre los meses de agosto a octubre, principalmente en septiembre. La mejor correlación se observó entre incendios forestales y material particulado, con un valor de correlación de 0.919. Por último, se analizó un caso de altos incendios forestales en la zona del pantanal, el cual mostró espacialmente la distribución de contaminantes. El viento norte consecuencia del jet de bajos niveles es un factor importante a la hora de transportar contaminantes, el cual facilita la eficiencia de transporte de contaminantes desde el Pantanal hacia el Paraguay.

Palabras-clave: quemadas, calidad del aire, Pantanal

INTRODUCCIÓN

La quema de biomasa y la emisión de contaminantes en el Pantanal son temas de gran preocupación debido a sus impactos negativos en el medio ambiente y la salud humana. El Pantanal, la mayor área de humedales del mundo con 195.000 km², se encuentra en peligro debido a la creciente deforestación y la expansión de la agricultura y la ganadería. La quema de biomasa en esta región es una práctica común utilizada para limpiar terrenos y fomentar el crecimiento de pastizales, pero tiene consecuencias graves (Haidar et al., 2019).

Según algunos estudios, la quema de biomasa en el Pantanal es responsable de la emisión de grandes cantidades de contaminantes atmosféricos. Estos contaminantes incluyen dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV) y material particulado. Estas emisiones contribuyen al calentamiento

global y la degradación de la calidad del aire, lo que afecta tanto al ecosistema local como a las comunidades cercanas (Coelho et al., 2019).

La quema de biomasa también puede tener impactos negativos en la biodiversidad del Pantanal. Muchas especies de plantas y animales dependen de los humedales para su supervivencia, y la alteración del equilibrio ecológico causada por la quema puede llevar a la pérdida de hábitats y la disminución de la biodiversidad. Además, la liberación de contaminantes puede afectar la calidad del agua de los ríos y lagos, poniendo en peligro la vida acuática y las actividades humanas relacionadas, como la pesca (Lathuillière et al., 2021).

Varias investigaciones han demostrado que la exposición a los contaminantes generados por la quema de biomasa en el Pantanal puede tener efectos negativos en la salud humana. Los contaminantes atmosféricos pueden irritar las vías respiratorias, aumentar el riesgo de enfermedades respiratorias como el asma y la bronquitis, y contribuir al desarrollo de enfermedades cardiovasculares. Además, las partículas finas liberadas durante la quema pueden transportar compuestos tóxicos que pueden ser inhalados por las personas y tener efectos perjudiciales a largo plazo (Arantes et al., 2020).

Para abordar este problema, es fundamental implementar medidas de control y reducción de la quema de biomasa en el Pantanal. Es necesario promover prácticas agrícolas sostenibles que eviten el uso indiscriminado del fuego, fomentar la educación ambiental y concientizar a la población sobre los impactos negativos de la quema de biomasa. Además, se deben establecer políticas públicas que regulen y monitoreen las actividades agrícolas y ganaderas en la región, promoviendo alternativas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente (Ferreira & Alencar, 2021).

Asimismo, es importante fortalecer la investigación científica y el monitoreo ambiental en el Pantanal para comprender mejor los efectos de la quema de biomasa y desarrollar estrategias efectivas de mitigación. Esto incluye el estudio de las interacciones entre la quema de biomasa, los recursos hídricos y la biodiversidad de la región, así como la evaluación de los impactos socioeconómicos de la implementación de prácticas más sostenibles (Estrella et al., 2022).

El objetivo principal de esta investigación es analizar el aporte de contaminantes que se generan debido a la quema de biomasa en la zona del Pantanal a la región de Paraguay.

Los objetivos específicos de la investigación son: Caracterizar los periodos de quema de biomasa a partir de los datos de incendios forestales en la zona del pantanal; Describir la distribución temporal de emisión de diferentes contaminantes en el periodo 2010 a 2022 en la zona del pantanal; Analizar las condiciones dinámicas en la baja troposfera en un evento de quema de biomasa intensa y su transporte a territorio paraguayo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron datos del reanálisis CAMS ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4 del Centro Europeo de Predicción a Mediano Plazo, la cual es una herramienta utilizada en esta investigación para obtener datos de composición atmosférica de alta calidad y resolución espacial y temporal (Inness et al., 2019). Este reanálisis se basa en un modelo atmosférico global y utiliza una combinación de observaciones in situ, satelitales y de modelos para generar estimaciones coherentes y consistentes de los gases y aerosoles presentes en la atmósfera.

El proceso de reanálisis comienza con la recopilación de datos observacionales de diversas fuentes, como estaciones de monitoreo terrestres, satélites y dispositivos

de medición en aeronaves. Estos datos se someten a un riguroso proceso de calidad y corrección, donde se aplican algoritmos y técnicas avanzadas para eliminar errores y calibrar las mediciones (Inness et al., 2019). A continuación, los datos observacionales se combinan con un modelo atmosférico global que simula las interacciones y procesos fisicoquímicos en la atmósfera.

El modelo atmosférico utilizado en el reanálisis CAMS ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4 es altamente sofisticado y se basa en las ecuaciones fundamentales de la física atmosférica. Este modelo tiene en cuenta factores como la radiación solar, el transporte atmosférico, los procesos de mezcla y reacción química para simular de manera realista la distribución de gases y aerosoles en la atmósfera a nivel global (Inness et al., 2019).

Una vez que se ha ejecutado el modelo atmosférico, los resultados se comparan y ajustan con las observaciones disponibles para mejorar la precisión y la representación de los patrones atmosféricos. Este proceso se conoce como asimilación de datos y es esencial para garantizar la coherencia y consistencia entre las observaciones y el modelo (Inness et al., 2019).

El reanálisis CAMS ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4 proporciona una amplia gama de variables atmosféricas, como la concentración de gases de efecto invernadero, aerosoles y contaminantes, así como también la distribución espacial y temporal de estas variables. Estos datos se presentan en una cuadrícula regular y se pueden utilizar para investigaciones científicas, análisis de tendencias, modelado de calidad del aire y estudios de impacto ambiental, entre otros (Inness et al., 2019).

Para esta investigación, se utilizaron datos de las siguientes variables conforme a la tabla I:

Variable	Resolución temporal	Resolución espacial	Unidad de medida
Potencia radiativa de incendios forestales GFAS	24 horas	0.1°x0.1°	mW m ⁻²
Material particulado grueso MP10	3 horas	0.75°x0.75°	µg m ⁻³
Material particulado fino MP2.5	3 horas	0.75°x0.75°	µg m ⁻³
Columna total de monóxido de carbono CO	3 horas	0.75°x0.75°	mg m ⁻²
Columna total de dióxido de nitrógeno NO ₂	3 horas	0.75°x0.75°	mg m ⁻²
Columna total de dióxido de azufre SO ₂	3 horas	0.75°x0.75°	µg m ⁻²

Tabla I. Variables, características de resoluciones espacio-temporales y unidades de medida de los datos utilizados en esta investigación

También así, se utilizaron datos del reanálisis del ERA 5 para el análisis de los datos meteorológicos. El reanálisis ERA 5 del ECMWF es una herramienta ampliamente utilizada en la investigación climática y meteorológica para obtener datos precisos y coherentes de las condiciones atmosféricas pasadas (Hersbach et al., 2020). Este reanálisis se basa en un sofisticado sistema de asimilación de datos y un modelo atmosférico de alta resolución para generar estimaciones detalladas de variables climáticas, como temperatura, precipitación, viento y presión atmosférica.

El proceso de reanálisis comienza con la recopilación de una amplia gama de observaciones atmosféricas, que incluyen datos de estaciones meteorológicas, boyas oceánicas, radares, satélites y radiosondas. Estos datos observacionales se combinan con un modelo numérico de predicción del tiempo y se procesan utilizando técnicas de asimilación de datos avanzadas, como el sistema de asimilación de datos 4D-Var, para obtener una representación coherente del estado atmosférico pasado. A partir de esto, se generan campos tridimensionales y

series temporales de variables climáticas en una cuadrícula regular, lo que permite un análisis detallado de los patrones climáticos y fenómenos meteorológicos (Hersbach et al., 2020).

Para esta investigación, se utilizaron datos de las siguientes variables meteorológicas con resolución espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ y resolución temporal de 3 horas:

- Componente del viento zonal U
- Componente del viento meridional V

ÁREA DE ESTUDIO

Se analiza principalmente la emisión de contaminantes en la zona de la ecorregión del Pantanal (Longitud: -58° a -54° , Latitud: -22° a -15°) y el posterior impacto de la emisión de los contaminantes para la región de Paraguay, conforme se observa en la Figura 1:

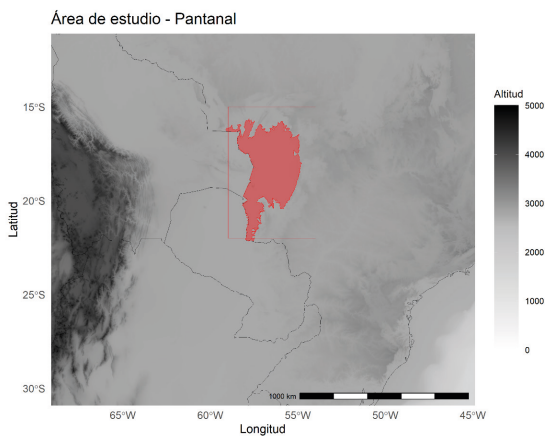


Figura 1. Área de estudio de la presente investigación. El cuadro rojo representa el área del pantanal y la paleta de colores representa la elevación del terreno en metros.

Se considera esta zona debido a la gran cantidad de emisiones generadas por la quema de biomasa y la configuración del campo de viento en superficie, el cual es viento del sector norte, que es acelerado y afectado por el Jet de Bajos Niveles el cual favorece para el transporte de contaminantes hacia la región de Paraguay (Vera et al., 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

COMPORTAMIENTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN LA ZONA DEL PANTANAL

Como primer análisis, se muestra la distribución temporal de potencia radiativa de incendios forestales en el área del pantanal desde el 01 de de enero del 2010 al 31 de diciembre del 2022 en $mW m^{-2}$ (Figura 2), en donde se observa que existe un comportamiento cíclico de la ocurrencia del fenómeno, especialmente durante los meses de septiembre de todos los años como fue encontrado también por Menezes et al., 2022. Se observan 4 picos principales, el más importante durante el año 2020 llegando a valores máximos de hasta $198 mW m^{-2}$, el segundo en el año 2010 con valores máximos de hasta $130 mW m^{-2}$, el tercero en el año 2019 con valores máximos de hasta $66 mW m^{-2}$ y el cuarto en el año 2021 con valores máximos de hasta $67 mW m^{-2}$. En los demás años también se observan picos secundarios, pero con valores no tan elevados como los cuatro mencionados anteriormente.

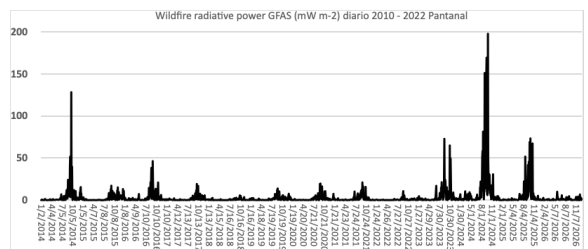


Figura 2. Serie temporal de potencia radiativa de incendios forestales en el área del pantanal desde el 01/01/2010 hasta el 31/12/2022. La unidad de medida es $mW m^{-2}$

El año 2020 fue caracterizado como un año catastrófico debido a la gran cantidad de incendios forestales en la zona del pantanal en comparación con los últimos 20 años, esto es a consecuencia de la sequía muy intensa que estaba instalada en la región desde el año

2019, la cual fue la más intensa de los últimos 70 años (Libonati et al., 2022).

Analizando en detalle el comportamiento mensual del promedio de potencia radiativa de incendios forestales, podemos observar con más claridad que el mes de septiembre es el mes en donde se observan la mayor cantidad de incendios en la zona del pantanal (Figura 3). Se observan valores mínimos en el periodo de enero a julio con valores de 1 mW m^{-2} aproximadamente, a partir de agosto empiezan a observarse valores más altos, dándose el pico máximo en el mes de septiembre con $11,8 \text{ mW m}^{-2}$, luego se observa una disminución en octubre y noviembre, siendo diciembre ya un mes con valores bajos. En términos de valores máximos mensuales, se observa una curva parecida a los valores del promedio mensual, observándose el valor máximo en septiembre del 2020, en concordancia a lo observado en la Figura 2. El análisis del comportamiento mensual de los incendios forestales nos da un sustento para el análisis de emisión de contaminantes, principalmente entre los meses de agosto, septiembre y octubre, dando principal énfasis al mes de septiembre.

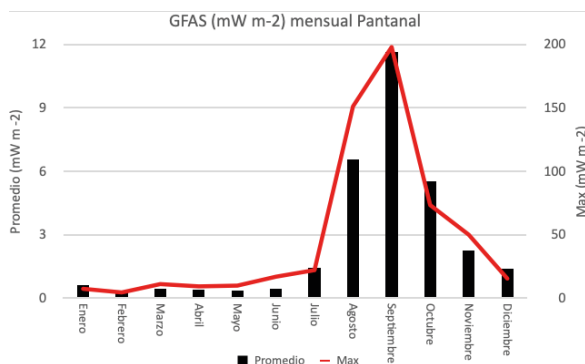


Figura 3. Distribución mensual en promedio y máximos de incendios forestales en la zona del Pantanal. Las barras negras representan el promedio de incendios mensuales, y la línea roja representa el valor máximo de cada mes.

La unidad de medida es mW m^{-2}

COMPORTAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA DEL PANTANAL

A partir de los resultados obtenidos del análisis de los incendios forestales en la zona del Pantanal, se analizan los contaminantes emitidos a la atmosfera a causa de estos incendios. En la Figura 4 se observa la distribución temporal de los contaminantes en la atmosfera en la zona del Pantanal, se observan las variables monóxido de carbono CO, dióxido de nitrógeno NO_2 , material particulado grueso PM_{10} , material particulado fino $\text{PM}_{2.5}$ y dióxido de azufre SO_2 , el cual es el mismo periodo analizado en la Figura 2.

En términos de material particulado grueso PM_{10} y material particulado fino $\text{PM}_{2.5}$, se observan que ambas variables tienen un comportamiento bastante similar, se observan valores máximos y mínimos en las mismas fechas, por lo que a partir de este momento cuando se menciona material particulado grueso se tendrá en cuenta el mismo comportamiento que material particulado fino. Esta variable también tiene un ciclo anual muy bien definido, y tiene una muy buena respuesta a lo observado en el ciclo anual los incendios forestales. Se observan 3 picos máximos en el periodo considerado, teniéndose un pico máximo en septiembre del 2020 con $941 \mu\text{g m}^{-3}$, segundo pico máximo en septiembre del 2010 con $610 \mu\text{g m}^{-3}$ y el tercer pico máximo en septiembre del 2019 con $\mu\text{g m}^{-3}$. En términos de promedio, por más de que la variable se observa en valores bajos durante todo el año, se concluye que el pico máximo se tiene en el mes de septiembre, mes de máxima ocurrencia de incendios forestales, pudiéndose concluir que el material particulado es dependiente de los incendios forestales.

Respecto a la variable columna total de monóxido de carbono, se observa que la variable tiene un comportamiento anual

bastante regular, teniendo los valores máximos en el mes de octubre en el orden de 1343 mg m^{-2} , también así, se observan dos picos máximos, uno en octubre del 2010 con valores de 2700 mg m^{-2} y otro en octubre del 2020 con 2600 mg m^{-2} . Es interesante mencionar que estos picos máximos son observados todos los años en forma periódica, y no solamente durante años en donde se observaron incendios forestales intensos.

Con relación a la variable columna total de dióxido de nitrógeno NO_2 , se observa que la variable está muy relacionada a los picos máximos de incendios forestales, debido a que se observan 4 picos máximos, el principal en septiembre del 2020 con $16,2 \text{ mg m}^{-2}$, el segundo pico máximo en septiembre del 2010 con $14,0 \text{ mg m}^{-2}$, el tercer pico máximo en septiembre del 2019 con $9,1 \text{ mg m}^{-2}$ y el cuarto pico máximo en septiembre de 2021 con $13,8 \text{ mg m}^{-2}$, el resto de los años no se observan picos importantes de dióxido de nitrógeno en la zona del Pantanal. Es interesante mencionar que esta variable no tiene un ciclo anual bien definido a diferencia de lo observado con la variable monóxido de carbono, pudiéndose concluir que esta variable es muy sensible a picos máximos de incendios forestales.

Finalmente, se analiza la variable columna total de dióxido de azufre SO_2 . Esta variable también presenta un ciclo anual bien definido, observándose los valores máximos en los meses de septiembre, en concordancia con los picos máximos de incendios forestales. El pico máximo se observa en septiembre del 2010 con un valor de $5518 \text{ } \mu\text{g m}^{-2}$. A diferencia de las variables analizadas anteriormente, no se observan picos muy elevados en el año 2020, siendo el 2010 el más elevado de todos. Los otros dos picos máximos secundarios se observaron en octubre de 2016 y octubre 2019, pudiéndose concluir que los picos máximos encontrados no responden directamente a los incendios observados en la zona del Pantanal,

pudiendo haber transporte de esta variable desde otras zonas remotas debido al viento en la baja troposfera.

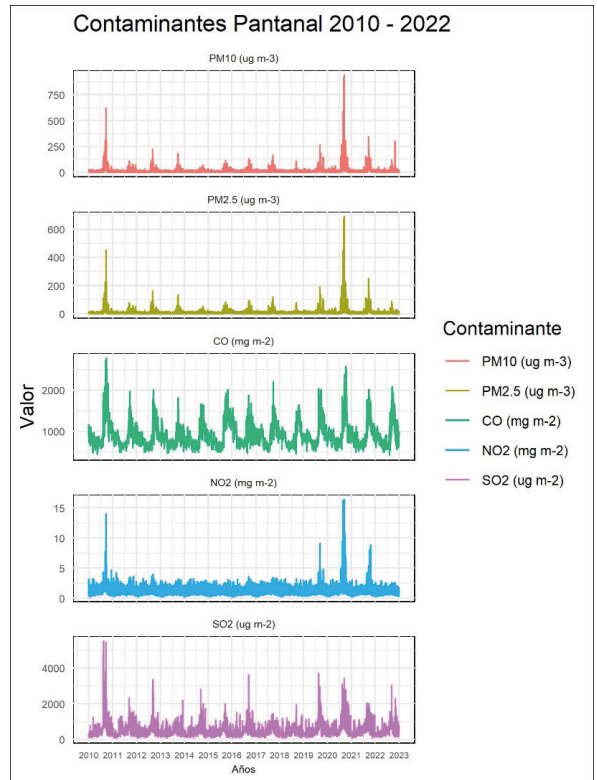


Figura 4. Distribución temporal de los contaminantes en la zona del pantanal en el periodo 01/01/2010 a 31/12/2020: monóxido de carbono CO, dióxido de nitrógeno NO_2 , material particulado grueso PM_{10} , material particulado fino $\text{PM}_{2,5}$, dióxido de azufre SO_2 .

También se analiza la correlación entre los incendios forestales y las variables de contaminantes del aire, como se observa en la Figura 5. Se observa que existe una muy buena correlación entre los incendios forestales y el PM_{10} ($\text{corr} = 0,919$), NO_2 ($\text{corr} = 0,877$) y SO_2 ($\text{corr} = 0,839$), sin embargo, con la variable CO la correlación no es muy buena ($\text{corr} = 0,575$). Este resultado es consistente con los gráficos de la serie temporal observado en las Figuras 2 y 4. Estos resultados también están en concordancia con varios autores que concluyen las relaciones entre los incendios forestales y emisión de contaminantes a la

atmosfera (Andreae y Merlet (2001); Artaxo et al. (2002), Hao, et al. (1996); Reid et al. (1998), Ward et al. (1996)).

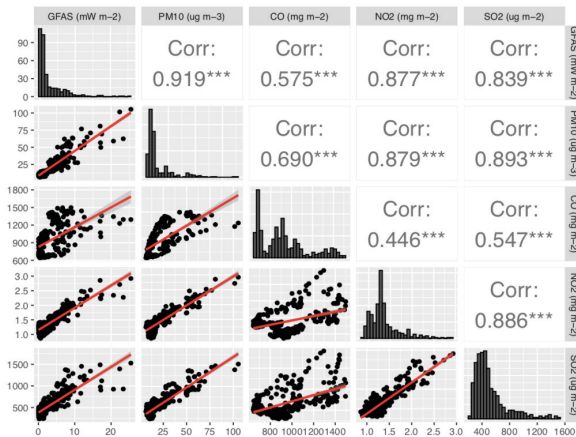


Figura 5. Correlación entre incendios forestales GFAS y contaminantes PM₁₀, CO, NO₂, SO₂ para la zona del pantanal. Distribución de probabilidad de contaminantes y correlación entre las variables

ESTUDIO DE CASO DE UN EVENTO DE MÁXIMA OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES

Se tomó en consideración uno de los eventos de máxima ocurrencia de incendios forestales, y para eso se analiza el comportamiento de las variables del evento del 21 de septiembre de 2010. En esta fecha en la región del pantanal se registraron picos de incendios forestales, como se puede observar en la Figura 6.a. Se observan varios puntos con valores de hasta 5 mW m⁻² y también algunas otras áreas importantes en zonas aledañas. Para este análisis, en todos los casos se tomó en consideración el campo de viento (componente zonal y componente meridional) en el nivel de 925 hPa (720 msnm aproximadamente), se tomó este nivel teniendo en cuenta que ya hay poco efecto del rozamiento, y el viento circula más libremente. Un vector de viento representa un módulo de 15 m s⁻¹. Se observa principalmente que el viento tiene una componente norte en la zona del pantanal, siendo propicio para el

transporte desde esa zona hacia el Paraguay.

En la Figura 6.b se observa la variable material particulado grueso y viento en 925 hPa, y se observan altos valores de material particulado en la zona del pantanal, con valores de hasta más de 250 µg m⁻³. Es importante resaltar que en zonas en donde hay incendios forestales también se observan altos valores de material particulado grueso, y por consecuencia, zonas sin incendios forestales presentan bajos valores de material particulado grueso. El viento norte es un factor importante para el transporte de material particulado desde el pantanal hacia el Paraguay.

La variable columna total de dióxido de azufre presenta un comportamiento parecido a material particulado grueso, conforme se observa en la Figura 6.c. Zonas que presentan importantes valores de incendios forestales también presentan altos valores de dióxido de azufre, y también así, estos valores son transportados por los vientos en la baja troposfera.

Por último, se observa la variable columna total de monóxido de carbono en la Figura 6.d. A diferencia de las variables de PM₁₀ y SO₂, el CO no presenta valores muy elevados en la zona del pantanal, presentando valores más altos hacia la zona de Bolivia. Se podría concluir que esta variable no tiene muy buena correlación con los incendios forestales provenientes del pantanal, y podría ser adveccionado desde otras zonas remotas.

La circulación atmosférica en la baja troposfera en los meses de septiembre para esta zona de América del Sur está muy influenciada por la Alta subtropical del Atlántico Sur, y para esa zona en particular se tiene la influencia del jet de bajos niveles, el cual produce una aceleración del viento en la baja troposfera, y por consecuencia alta eficiencia en la advección de contaminantes (Vera et al., 2006).

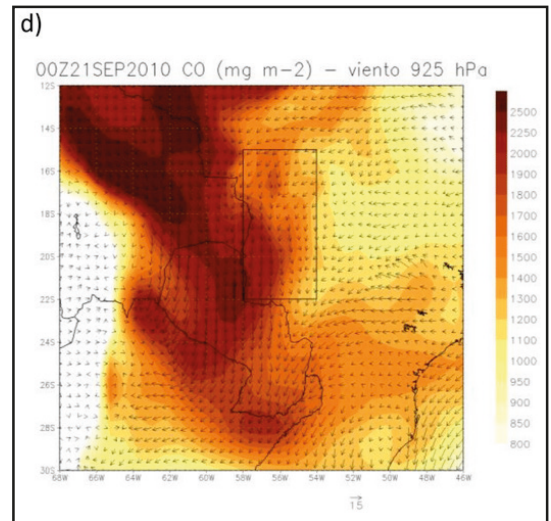
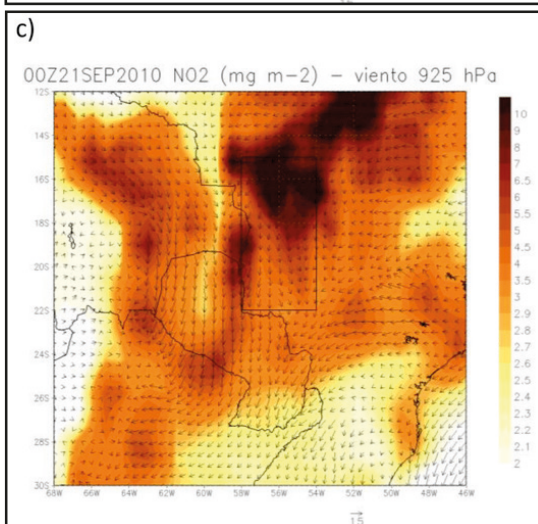
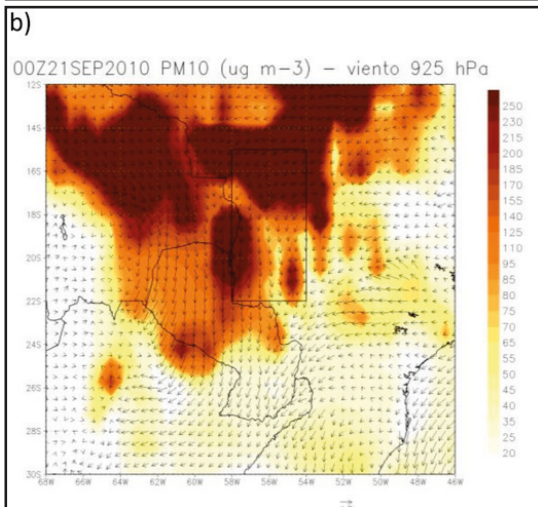
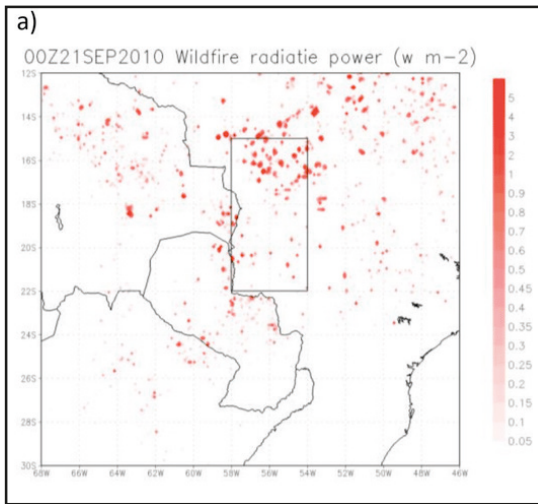


Figura 6. a) Acumulado total de puntos de poder radiativo de incendios en $W m^{-2}$ para el 21-09-2010, b) Concentración de material particulado grueso en $ug m^{-3}$ y viento en el nivel de 925 hPa para el 21-09-2010, c) Columna total de dióxido de nitrógeno en $mg m^{-2}$ y viento en el nivel de 925 hPa para el 21-09-2010, d) Columna total de monóxido de carbono en $mg m^{-2}$ y viento en el nivel de 925 hPa para el 21-09-2010. La escala está representada por la paleta de colores en el lado derecho de cada figura.

CONCLUSIONES

En esta investigación fueron analizados los incendios forestales y sus impactos a los contaminantes en la zona del Pantanal a partir de los datos del reanálisis del CAMS ECMWF Atmospheric Composition Reanalysis 4 del Centro Europeo de Predicción a Mediano Plazo en el periodo del 2010 al 2022.

Se concluye que los incendios forestales presentan un comportamiento cíclico durante todos los años, presentando valores más altos desde agosto hasta octubre, presentando el valor máximo en el mes de septiembre. Se observa que en este periodo se observaron 4 valores máximos, en el 2010, 2019, 2020 y 2021.

Analizando los valores de contaminantes, se observan que los contaminantes PM_{10} , SO_2 y NO_2 presentan un ciclo similar a lo observado con los incendios forestales, sin embargo, la variable CO presenta un ciclo un poco

distinto. Realizando la correlación lineal entre los incendios forestales y los contaminantes, se observa que existe alta correlación con las variables PM_{10} , SO_2 y NO_2 , con valores de correlación por encima de 0,8, la correlación con la variable CO presenta un valor de 0.57, no siendo representativo.

Se analizó un evento de pico máximo de incendios forestales, el cual fue el 21 de septiembre de 2010. Se concluyó que fue el día más intenso respecto del año 2010, y el segundo más intenso luego del 2020. Se observó que se tuvo un importante aporte de contaminantes PM_{10} , SO_2 y NO_2 , y que las mismas fueron transportados por el viento del sector norte analizado en el nivel de 925 hPa, el cual luego afectó principalmente a Paraguay. La variable CO también fue analizada no presentando una buena representación espacial respecto a la zona de incendios forestales registrados en el Pantanal.

En conclusión, el estudio sobre el impacto de la quema de biomasa en el Pantanal sobre la calidad del aire en Paraguay revela un panorama preocupante en relación con los efectos ambientales y de salud pública. Los resultados obtenidos a lo largo de esta década demuestran que las emisiones provenientes de la quema de biomasa en el Pantanal han tenido un impacto significativo en la calidad del aire en territorio paraguayo. Los niveles elevados de contaminantes atmosféricos han generado una degradación de la calidad del aire en diversas regiones del país.

Estos hallazgos subrayan la necesidad urgente de implementar medidas de gestión y control de la quema de biomasa en el Pantanal, así como estrategias de mitigación en Paraguay. La adopción de políticas gubernamentales encaminadas a reducir las prácticas de quema no solo contribuirá a la conservación de los ecosistemas y la biodiversidad en el Pantanal, sino que también tendrá un impacto positivo en la salud y el bienestar de la población paraguaya.

REFERENCIAS

- Andreae, M. O., & Merlet, P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(4), 955-966.
- Aranes, A. E., Lopes, M. H., Figueira, R. C. L., & Pereira, G. M. (2020). Atmospheric pollution in the Brazilian Pantanal during a severe drought: An analysis of particulate matter characteristics and sources. *Environmental Pollution*, 266(Pt 1), 115231.
- Artaxo, P., Martins, J. V., Yamasoe, M. A., Procópio, A. S., Pauliquevis, T. M., Andreae, M. O., ... & Rizzo, L. V. (2002). Physical and chemical properties of aerosols in the wet and dry seasons in Rondônia, Amazonia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(D20), LBA 55-1 - LBA 55-18.
- Coelho, M. S., Miranda, A. C., Pereira, G. M., & Ynoue, R. Y. (2019). Impact of biomass burning on air quality in the Brazilian Amazon region. *Environmental Pollution*, 252(Pt A), 104-113.
- Estrella, F., Alves, G. M., Ferreira, J. N., & Alencar, A. A. (2022). Ecological and Socioeconomic Aspects of Biomass Burning in the Pantanal: Challenges and Perspectives. In A. A. Alencar et al. (Eds.), *Pantanal: Ecology, Challenges, and Perspectives* (pp. 235-258). Springer.
- Ferreira, J. N., & Alencar, A. A. (2021). Biomass burning emissions in the Pantanal wetland during the extreme drought of 2019. *Atmospheric Pollution Research*, 12(3), 2223-2231.
- Haidar, R. F., Botelho, L. M., Carriello, G. G., & Miraglia, S. G. E. K. (2019). Wildfires and biomass burning in Brazilian Pantanal and changes in the carbon and nitrogen dynamics. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 94.
- Hao, W. M., Ward, D. E., & Susott, R. A. (1996). Design and performance of a unique, open-path, Fourier transform infrared (OP-FTIR) spectrometer: observations of gases and particles from prescribed burns. *Atmospheric Environment*, 30(3), 505-519.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., et al (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049. Doi: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., and Suttie, M.: The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 3515–3556, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>, 2019.

Lathuilière, M. J., Pequeno, P. A., Espírito-Santo, F. D. B., & Vieira, S. A. (2021). Interactions between biomass burning and water resources in the Pantanal wetlands: Present knowledge and future challenges. *Science of the Total Environment*, 754, 142149.

Libonati, R., Geirinhas, J. o. L., Silva, P. S., Russo, A., Rodrigues, J. A., Belém, L. B. C., ... Trigo, R. M. (2022). Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. *Environmental Research Letters*, 17(1). Retrieved from <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac462e>

Menezes, L. S., De Oliveira, A. M., Santos, F. L. M., Russo, A., De Souza, R. A. F., Roque, F. O., & Libonati, R. (2022). *Lightning patterns in the Pantanal: 1 untangling natural and anthropogenic-induced wildfires 2 3*.

Reid, J. S., Hobbs, P. V., Ferek, R. J., Blake, D. R., Martins, J. V., Dunlap, M. R., ... & Liousse, C. (1998). Physical, chemical, and optical properties of regional hazes dominated by smoke in Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 103(D24), 32059-32080.

Vera, C., Baez, J., Douglas, M., Emmanuel, C. B., Marengo, J., Meitin, J. ,.. Zipser, E. (2006). The South American low-level jet experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(1), 63–77. Retrieved from <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-1-63>

Ward, D. E., Hao, W. M., Susott, R. A., Babbitt, R. E., & Riggan, P. J. (1996). Emissions from forest fires near the Rio Branco, Rondônia, Brazil. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 101(D19), 24,285-24,295.