

CONDICIONES METEOROLÓGICAS DURANTE LOS INCENDIOS RÉCORD EN EL DELTA DEL RÍO PARANÁ: ANOMALÍAS Y APLICACIÓN DE UN MODELO DE AGRUPAMIENTO

METEOROLOGICAL CONDITIONS DURING RECORD WILDFIRES IN THE PARANÁ RIVER DELTA: ANOMALIES AND APPLICATION OF A CLUSTERING MODEL

A. Ipiña^{*1}, T. Rodríguez^{**2}, A. Orlandini^{1,3}, F. Gómez-Fava³, G. López-Padilla⁴ y M. Arellano-Vazquez²

¹Instituto de Física Rosario – Universidad Nacional Rosario – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, 27 de Febrero 210BIS – (S2000EKF) Rosario – Argentina

²Centro de Investigación e Innovación en Tecnologías de la Información y Comunicación, Cto. Tecnopolo Sur 112 – (20313) Aguascalientes – México

³Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Univ. Nac. Rosario, Ave. Pellegrini 250 – (S2000) Rosario – Argentina

⁴Investigador independiente, Circ. Medicina 9222 – (27087) Torreón – Coahuila – México

Recibido: 07/12/2024 ; Aceptado: 26/01/2025

Cerca del 95 % de los incendios forestales son causados por actividades humanas. La quema de pastizales como método de barrido para la explotación ganadera y agrícola ha sido implementada desde hace más de dos siglos en el continente americano. Cada invierno, el fuego es utilizado para el rebrote de especies forrajeras en el Delta del río Paraná. Las condiciones meteorológicas atípicas y el cambio climático han exacerbado el impacto de los incendios alrededor del mundo. En el año 2020, la acumulación y propagación de las emisiones de incendios forestales sin precedentes afectaron a los habitantes del Área Metropolitana de Rosario (AMR), Argentina. En este trabajo, se analizaron las condiciones meteorológicas, el número de focos de incendios detectados por el instrumento satelital VIIRS y la concentración del material particulado fino (PM2.5) medida en el AMR. Se calcularon las anomalías de la precipitación, humedad relativa y temperatura registradas in situ entre junio y agosto en el periodo 2010-2020. Los resultados muestran que para el año 2020, la humedad y temperatura ambientes tuvieron una disminución en promedio del 10 % y 3 %, respectivamente, mientras que la precipitación acumulada tuvo una reducción alrededor del 70 %, con respecto a los años anteriores. El modelo de agrupamiento mostró que la mediana más alta del Número de focos de Incendios (NI) coincide con la menor precipitación acumulada y baja humedad relativa, así como vientos predominantes del sector noroeste. El análisis de vientos revela que las corrientes provenientes de la dirección noroeste promovieron una mayor afectación superficial de los incendios en el Delta del río Paraná y los vientos del noreste incrementaron los niveles de PM2.5 en el AMR. Estos hallazgos subrayan la importancia de considerar las condiciones meteorológicas en la evaluación de riesgos ambientales y en la formulación de estrategias de mitigación frente a la contaminación del aire y los incendios forestales.

Palabras clave: incendios forestales, modelo de agrupamiento, anomalías, humedales, Delta del río Paraná.

About 95 % of wildfires are caused by human activities. The burning of grasslands as a method of sweeping for livestock and agricultural exploitation has been implemented for over two centuries on the American continent. Every winter, fires are used to promote the regrowth of forage species in the Paraná River Delta. Unusual weather conditions and climate change have intensified the global impact of wildfires. In 2020, the accumulation and spread of unprecedented wildfire emissions affected the inhabitants of the Rosario Metropolitan Area (AMR), Argentina. This work analyzed meteorological conditions, the number of active fires detected by the VIIRS satellite instrument, and the concentration of fine particulate matter (PM2.5) measured in the AMR. Anomalies of precipitation, relative humidity, and temperature recorded in situ between June and August in the period 2010-2020 were calculated. The results show that for the year 2020, ambient humidity and temperature had an average decrease of 10 % and 3 %, respectively, while accumulated precipitation had a reduction of about 70 % with respect to previous years. The clustering model showed that the highest median of Number of active fires (NI) coincides with the lowest accumulated precipitation and low relative humidity, as well as prevailing winds from the northwest. Wind analysis reveals that currents from the northwest direction promoted larger surface fire impacts in the Paraná River Delta, and northeast winds increased PM2.5 levels in the AMR. These findings underline the importance of considering meteorological conditions in assessing environmental risks and in formulating mitigation strategies against air pollution and forest fires.

Keywords: wildfires, clustering model, anomalies, wetlands, Paraná River Delta

<https://doi.org/10.31527/analesafa.2025.36.1.1>



ISSN 1850-1168 (online)

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático ha exacerbado el impacto de los incendios forestales alrededor del mundo [1]. Se estima que

* ipina@ifir-conicet.gov.ar

** rodriguezctadeo@gmail.com

cerca del 95 % de los incendios forestales derivan de actividades antropogénicas [2, 3]. La quema de pastizales como método de barrido para la explotación ganadera y agrícola, se ha implementado desde hace más de dos siglos en el continente americano [4-6]. Los incendios tienen gran variabilidad periódica, asociada a patrones de precipitaciones anuales, estacionalidad y oscilaciones climáticas a mayor escala como el fenómeno ENSO (El Niño–Southern Oscillation) [7]. Los combustibles vegetales poseen un grado de hidratación que depende de la humedad relativa, mientras que la temperatura y el viento intervienen en su secado. El clima extremo y el estado de la biomasa influyen en la rapidez con la que se propaga el fuego cuando es aplicado en el cambio de uso de suelo [8, 9]. En el año 2019, la extrema sequía seguida de incendios forestales clandestinos devastaron miles de hectáreas del Amazonas [10]. La prolongación regional de esta sequía hacia el invierno 2020, el nivel más bajo del río en los últimos 50 años y el uso del fuego, provocaron la devastación de los humedales en el Delta del río Paraná, Argentina. Las emisiones afectaron a más de un millón de habitantes del AMR durante el Aislamiento Social Preventivo y Obligatorio (ASPO) implementado por la pandemia de COVID-19 [11]. En este trabajo se presenta un estudio de las condiciones meteorológicas durante estos incendios récord en el Delta del río Paraná. Se diseñó una herramienta de procesamiento de datos satelitales para el conteo de focos activos y se calcularon las anomalías meteorológicas (temperatura, humedad y precipitación) en cada temporada invernal 2010-2020. Por medio de la aplicación de un modelo de agrupamiento, se evaluó el impacto de las variables meteorológicas. En particular se analizó el comportamiento del viento y su influencia en la dispersión del PM_{2.5} proveniente de los incendios forestales registrados entre junio y agosto del año 2020.

II. MÉTODOS

Datos in situ

Las mediciones de temperatura ambiente (°C), humedad relativa (%), precipitación acumulada (mm), dirección y velocidad del viento (m/s) fueron registradas por la estación meteorológica Davis, ubicada en el Instituto de Física Rosario (IFIR-CONICET-UNR) [32.96°S, 60.62°O]. El conjunto de datos se compone por los promedios horarios de dichas variables meteorológicas para los meses de junio, julio y agosto 2010-2020. Las mediciones de la concentración del PM_{2.5} (μg/m³) se obtuvieron con un instrumento portátil, marca HoldPeak, en una estación meteorológica [32.86°S, 60.70°O] perteneciente al Centro Monitoreo Meteorológico y Climático (CMMC) en el AMR.

Datos satelitales

El instrumento satelital VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) monitorea anomalías de temperatura en la superficie terrestre, con una resolución espacial de 375m. El instrumento es operado por la NASA en colaboración con la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) de EE.UU. con el objetivo de detectar incendios activos. El paso del satélite por la región de la Pampa húmeda ocurre alrededor de las 14:00 h y las 2:00 h tiempo local (GMT - 3 h) del AMR. Los focos ígneos son captados

diariamente y pueden ser visualizados en imágenes secuenciales de la plataforma FIRMS (*Fire Information for Resource Management System*). La anomalía de temperatura superficial y la potencia radiativa del fuego (Fire Radiative Power, FRP) son los productos derivados de las mediciones satelitales [12] empleados en este estudio para el conteo del NI.

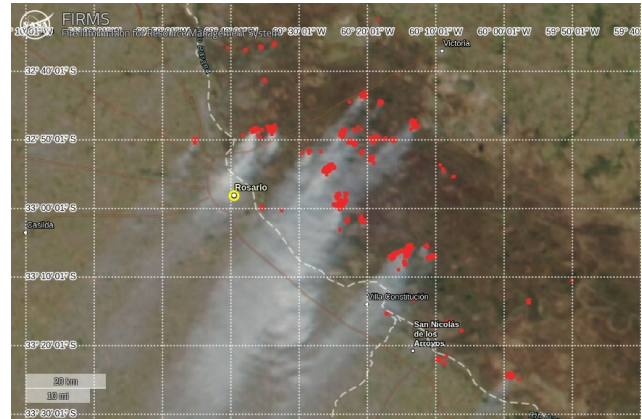


FIG. 1: Imagen adaptada VIIRS-NOAA-NASA [13]. Incendios (rojo) en el Delta del río Paraná y humo dirigido hacia el Área Metropolitana de Rosario (14 de junio 2020).

En la imagen satelital del 14 de junio 2020 (Fig. 1) se observa el AMR afectada por el humo emitido desde los incendios del Delta del río Paraná [13]. Frente a los humedales existe un cordón industrial donde suele aparecer de manera repetitiva falsos focos ígneos correspondientes a industrias siderúrgicas, para los cuales se realiza un preprocesamiento.

Criterios de procesamiento

Se seleccionaron las mediciones satelitales sobre el área delimitada por el río Paraná y un radio de 60km desde Rosario hacia los humedales. Se aplicó un código propio en *Python*, considerando la clasificación del producto FRP para descartar aquellos puntos de calor reconocidos por su localización como plantas en el cordón industrial. Posteriormente, se contabilizó el NI y se ubicaron en una grilla de 1°x1° [32.5 - 33.5 °S, 60.0 - 61.0 °O] como se muestra en la Fig. 2.

Modelo de agrupamiento

Se aplicó el modelo *K-means* implementado en la librería *scikit-learn* de *Python*, para la segmentación de variables meteorológicas en el periodo de análisis. Este modelo consiste en una técnica de agrupamiento de datos, cuyos parámetros describen los centroides de cada clúster generado. El modelo *K-means* encuentra la posición de los centroides tal que la sumatoria de la distancia al cuadrado de cada observación al centroide más cercano sea mínima. La función objetivo de este modelo se describe como:

$$J = \sum_{i=1}^K \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2 \quad (1)$$

donde μ_i es el centroide del i -ésimo cluster y x son las mediciones meteorológicas. Este método de conglomerado de datos ha sido aplicado en estudios de contaminación del aire

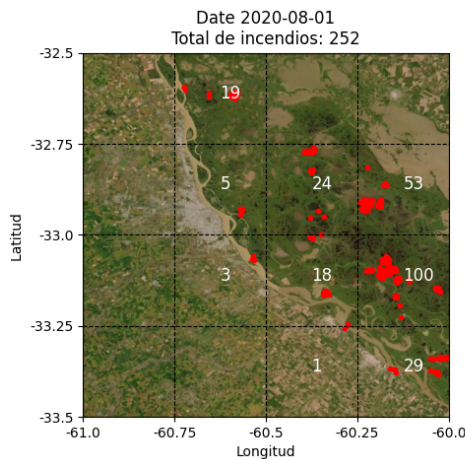


FIG. 2: Localización y conteo de focos de incendios (puntos rojos) sobre el Delta del río Paraná, basada en mediciones del instrumento satelital VIIRS-NOAA-NASA.

y clasificación de sequías [14, 15]. Existen estados de viento determinados de manera estocástica por las condiciones geográficas y meteorológicas del sitio [16] que permiten interpretar la influencia de las variables meteorológicas en el NI al implementar el modelo.

III. RESULTADOS

Incendios, PM2.5, precipitación, temperatura y humedad

En la Fig. 3a se presentan los valores diarios del NI, el PM2.5 y la precipitación acumulada entre junio y agosto del 2020. La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda evitar la exposición prolongada a concentraciones de PM2.5 promedio en 24 horas mayores a $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El 83 % de los promedios diarios sobrepasaron el umbral de la OMS (77 días críticos) durante el periodo de incendios. A la par del registro de precipitaciones, el número de focos de incendio cayó a cero, con excepción del día 7 de agosto. En esta fecha el episodio de lluvia se presentó posterior a la hora del paso del satélite por la zona, por lo que el NI y el PM2.5 mostraron una reducción significativa al día siguiente. Por otro lado, el cambio del índice de movilidad

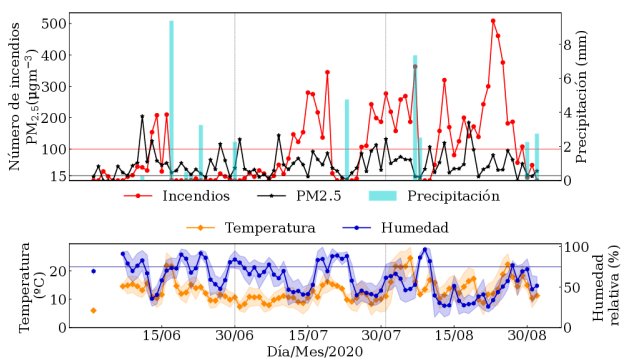


FIG. 3: a) Valores diarios de precipitación acumulada, número de focos de incendios y PM2.5 promedio (días críticos; $\text{PM}_{2.5} \geq 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). b) Temperatura y humedad relativa (valor de referencia 75%) promedios y desviación estándar en el periodo junio-agosto 2020.

en porcentaje, comparado con la movilidad habitual para la provincia de Santa Fe (lugar donde el AMR posee más de la mitad de la población total), osciló entre un mínimo del -43 % y un máximo del -18 % entre junio y agosto (periodo de prolongación del ASPO). Si bien hubo flexibilizaciones en la apertura de actividades, la circulación de vehículos automotor y de transporte público fue reducida debido al cierre de los planteles educativos y un aforo restringido en comercios e industrias [11]. En la Fig. 3b se muestran los promedios diarios de la temperatura y humedad relativa. En particular, los días críticos de incendios coinciden con el comportamiento de la humedad relativa, que presenta valles y valores por debajo del promedio trimestral histórico ($75 \pm 4\%$). La evolución de la temperatura promedio mostró dos incrementos cercanos a los 20°C , al mismo tiempo que se registró un aumento del NI.

Anomalías meteorológicas

En el trimestre junio-agosto a lo largo de la última década, se observó una tendencia de disminución de la precipitación acumulada. En este trimestre del año 2020, se registró casi la mitad de los días de lluvia (12) en comparación con el promedio de los días de lluvia registrados en los últimos diez años (23). En la Tabla I se desglosan las anomalías del año 2020 respecto al periodo 2010-2019.

Los promedios trimestrales para las anomalías de la humedad relativa, la precipitación y el número de días de lluvia mostraron una caída significativa, encontrada también en otras regiones del territorio argentino [17]. La humedad relativa y la temperatura ambiente disminuyeron el 10% y el 3% respectivamente en el trimestre junio-agosto 2020, comparado con el mismo periodo de la década anterior. Asimismo, los días de lluvia y la precipitación acumulada disminuyeron el 47% y el 72%, respectivamente. Estos resultados muestran que las condiciones meteorológicas en el año 2020 fueron atípicas en toda la Pampa húmeda, principalmente por la escasa precipitación. En este contexto, se investigó la influencia de los vientos en la propagación de incendios.

Variable	Junio	Julio	Agosto	JJA
Temperatura ($^\circ\text{C}$)	-0.5	-1.2	0.5	-0.41
Humedad (%)	0.5	-5.7	-16.8	-7.3
Precipitación (mm)	5	-44.6	-52.7	-30.8
Días de lluvia	1.5	-5	-3.5	-2.3

TABLA 1: Anomalías para el año 2020 respecto a su promedio mensual en el periodo 2010-2019 y el promedio del trimestre Junio, Julio y Agosto (JJA).

Análisis de dirección y velocidad del viento

Para los días críticos se estimó que cerca del 70% de los vientos tuvieron dos efectos: 1) desde el sector noroeste al norte, extendieron el fuego hacia los humedales y 2) desde el sector norte-noreste al sureste, arrastraron el humo hacia el AMR. La prevalencia de los vientos este y noreste el 31 de julio 2020 (Fig. 4a), en simultáneo con 277 focos de incendios, produjeron un incremento del PM2.5 promedio diario de $126 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Fig. 3a).

Los vientos leves facilitan la propagación y duración de los incendios. La altura e intensidad de la llama se relacionan directamente con la cantidad de combustible y con la velocidad del viento. En la Fig. 4b se presenta un histograma de la magnitud de la velocidad del viento por hora y el promedio en todo el periodo (2.4 m/s). La magnitud del vector de viento es inversamente proporcional al tiempo de residencia del fuego [18]. Por ello, la alta frecuencia de vientos leves fue un factor importante en la permanencia y propagación del fuego.

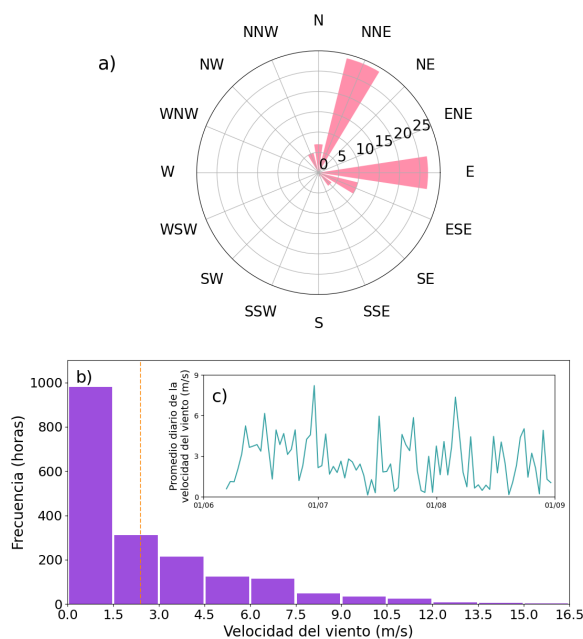


FIG. 4: a) Frecuencias de la dirección del viento el 31 de julio 2020. Velocidad del viento: b) Frecuencia horaria y promedio total (línea naranja) y c) promedio diario en el trimestre junio, julio y agosto 2020.

Modelo de agrupamiento

Para evaluar el grado de influencia de las variables meteorológicas sobre los incendios extremos, se ingresaron las mediciones de humedad relativa, precipitación, velocidad y dirección del viento en el modelo *K-means*. Con el propósito de identificar los hiperparámetros óptimos, se empleó una metodología basada en la búsqueda con rejilla. Este enfoque incluye los algoritmos de optimización Elkan y Lloyd, así como el número de clusters a generar, considerando un rango de 2 a 8 clusters. La Fig. 5a muestra el comportamiento de la distancia cuadrática media en función del número de clústeres. Se observa una disminución aproximadamente del 40% de la distancia cuadrática media de 2 a 3 clústeres, esto indica que la configuración óptima ocurre en 3 agrupamientos. En ese sentido, las diferencias entre las distancias cuadráticas obtenidas por los algoritmos Elkan y Lloyd no afectan significativamente el resultado del modelo. Al segmentar las mediciones dentro de 3 clústeres, se identificaron patrones que permiten interpretar las condiciones meteorológicas durante los incendios en ese periodo. En la Fig. 5b se muestran las componentes de la velocidad del viento de

los 3 agrupamientos con la condición del ordenamiento para la menor varianza. Al realizar un análisis de cuartiles de las variables meteorológicas y el NI, se observa que el clúster 1 contiene una mayor frecuencia de vientos provenientes de la región noroeste (en dirección hacia los humedales). En el mismo se encontró que el valor de la mediana del NI fue el más alto con respecto a los clústeres 2 y 3, mientras la precipitación y de la humedad obtuvieron los valores más bajos.

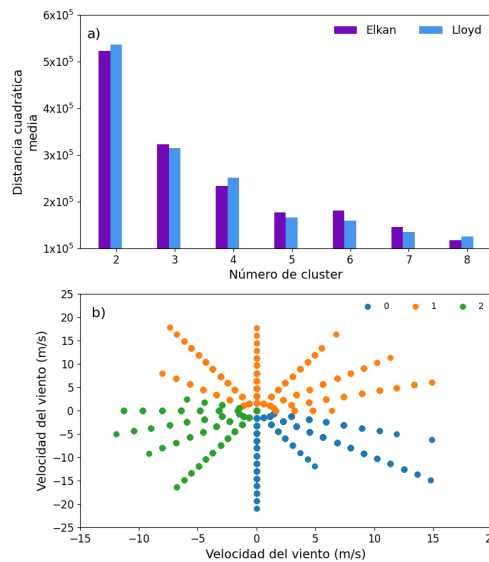


FIG. 5: a) Distancia cuadrática media obtenida por el modelo *K-means* para el algoritmo de optimización Elkan y Lloyd y número de clusters. b) Segmentación obtenida a partir del modelo *K-means* para el periodo junio-agosto 2020.

IV. CONCLUSIONES

Las condiciones meteorológicas atípicas y la quema de pastizales provocaron incendios sin precedentes en el Delta del río Paraná. La escasa precipitación, la baja humedad relativa y el viento noroeste favorecieron la propagación del fuego sobre los combustibles, mientras que el viento noreste arrastró las emisiones en detrimento de la calidad del aire del AMR. A pesar de que la mayor parte del tiempo se mantuvieron los decretos del ASPO, el 83% de los promedios diarios de PM2.5 superaron el límite recomendado por la OMS. La conformación de este análisis sostiene que la mayor contribución al incremento del PM2.5 en el trimestre junio-agosto 2020 fue de origen primario derivado de las quemas de biomasa y una fracción menor provino de actividades antropogénicas de rutina (movilidad, construcción, fábricas, cocina, etc.). El desplazamiento de masas de aire por las corrientes de viento es determinante en la meteorología y la calidad del aire. Por ello, se requiere una caracterización extendida al territorio de los humedales para conocer los estados del viento, aplicando el modelo *K-means* u otros modelos de agrupamiento. El incremento de aerosoles y el impacto de los gases contaminantes hacia lugares densamente poblados [19, 20] subrayan la urgencia de establecer regulaciones. En la actualidad, la provincia de Santa Fe carece de normativas específicas sobre el PM2.5, un contaminante que puede tener efectos adversos signifi-

cativos en la salud. Estos hallazgos resaltan la importancia de tener en cuenta las condiciones meteorológicas al evaluar los riesgos ambientales y al formular estrategias para reducir tanto la contaminación del aire como los incendios forestales.

V. AGRADECIMIENTOS

Las personas autoras agradecen a la Universidad Nacional de Rosario por las becas de investigación otorgadas a las estudiantes A.O. y F.G-F. así como al CONAHCYT por la beca de posgrado otorgada a G.L-P. Asimismo, agradecen al Dr. Arístides Pochettino, director de la Plataforma de Estudios Ambientales y Sostenibilidad (PEAS-UNR) por la difusión de este estudio y a Jorge Giometti del Centro de Monitoreo Meteorológico y Climático (CMMC) SAT por su orientación técnica y las mediciones compartidas.

REFERENCIAS

- [1] J. T. Abatzoglou y A. P. Williams. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **113**, 11770-11775 (oct. de 2016). ISSN: 1091-6490. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1607171113>.
- [2] J. K. Balch *et al.* Human-started wildfires expand the fire niche across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **114**, 2946-2951 (feb. de 2017). ISSN: 1091-6490. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1617394114>.
- [3] B. A. Leys, J. R. Marlon, C. Umbanhowar y B. Vanni re. Global fire history of grassland biomes. *Ecology and Evolution* **8**, 8831-8852 (ago. de 2018). ISSN: 2045-7758. <http://dx.doi.org/10.1002/ece3.4394>.
- [4] M. S. Allen y M. W. Palmer. Fire history of a prairie/forest boundary: more than 250 years of frequent fire in a North American tallgrass prairie: Fire history of a prairie/forest boundary. *Journal of Vegetation Science* **22**, 436-444 (mar. de 2011). ISSN: 1100-9233. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1654-1103.2011.01278.x>.
- [5] C. Portillo-Quintero, A. Sanchez-Azofeifa y M. Marcos do Espirito-Santo. Monitoring deforestation with MODIS Active Fires in Neotropical dry forests: An analysis of local-scale assessments in Mexico, Brazil and Bolivia. *Journal of Arid Environments* **97**, 150-159 (oct. de 2013). ISSN: 0140-1963. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2013.06.002>.
- [6] N. Hoyos *et al.* The environmental envelope of fires in the Colombian Caribbean. *Applied Geography* **84**, 42-54 (jul. de 2017). ISSN: 0143-6228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.05.001>.
- [7] D. M. J. S. Bowman *et al.* Fire in the Earth System. *Science* **324**, 481-484 (abr. de 2009). ISSN: 1095-9203. <http://dx.doi.org/10.1126/science.1163886>.
- [8] A. Lima *et al.* Land use and land cover changes determine the spatial relationship between fire and deforestation in the Brazilian Amazon. *Applied Geography* **34**, 239-246 (mayo de 2012). ISSN: 0143-6228. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.10.013>.
- [9] S. Kumar *et al.* Changes in land use enhance the sensitivity of tropical ecosystems to fire-climate extremes. *Scientific Reports* **12** (ene. de 2022). ISSN: 2045-2322. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-022-05130-0>.
- [10] J. A. Marengo *et al.* Corrigendum: Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers in Water* **4** (jun. de 2022). ISSN: 2624-9375. <http://dx.doi.org/10.3389/frwa.2022.942068>.
- [11] G. de la Provincia de Santa Fe. *Decretos 048720 y 057220* <https://www.santafe.gob.ar/ms/covid19/normativa/> [Accedido: (6 de diciembre 2024)]. 2020.
- [12] W. Schroeder, P. Oliva, L. Giglio e I. A. Csizsar. The New VIIRS 375 m active fire detection data product: Algorithm description and initial assessment. *Remote Sensing of Environment* **143**, 85-96 (mar. de 2014). ISSN: 0034-4257. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.008>.
- [13] FIRMS-NOAA-NASA. *Fire Information for Resource Management System* <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/> [Accedido: (6 de diciembre 2024)]. 2024.
- [14] P. Zeng *et al.* Mapping future droughts under global warming across China: A combined multi-timescale meteorological drought index and SOM-Kmeans approach. *Weather and Climate Extremes* **31**, 100304 (mar. de 2021). ISSN: 2212-0947. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wace.2021.100304>.
- [15] P. Govender y V. Sivakumar. Application of k-means and hierarchical clustering techniques for analysis of air pollution: A review (1980–2019). *Atmospheric Pollution Research* **11**, 40-56 (ene. de 2020). ISSN: 1309-1042. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.009>.
- [16] P. A. S nchez-P rez, M. Robles y O. A. Jaramillo. Real time Markov chains: Wind states in anemometric data. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* **8** (mar. de 2016). ISSN: 1941-7012. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4943120>.
- [17] M. de los Milagros Skansi y N. Garay. *Bolet n climatol gico* 2020. <https://repositorio.smn.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12160/1495/0048CL2020.pdf>.
- [18] M. A.G. y C. N.P. Report on the southern Tasmanian bushfires of 7 February 1967. (1967).
- [19] C. Aguirre *et al.* Atmospheric dispersion simulation of an accidental smoke plume using a heat diffusion algorithm into a LES-STO coupled model. *Atmospheric Environment: X* **14**, 100172 (abr. de 2022). ISSN: 2590-1621. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100172>.

- [20] A. Ipiña, G. Salum, E. Crinó y R. Piacentini. Satellite and ground detection of very dense smoke clouds produced on the islands of the Paraná river delta that affected a large region in Central Argentina. *Advances in Space Research* **49**, 966-977 (mar. de 2012). ISSN: 0273-1177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2011.12.009>.