

Dónde, cuándo y cómo ocurren grandes incendios en la provincia de La Pampa, Argentina: Una caracterización basada en sensores remotos

MILAGROS SANCHEZ^{1,✉}; PABLO BALDASSINI^{1,2,3}; MARÍA DE LOS Á. FISCHER⁴; JOAQUÍN TORRE ZAFFARONI & CARLOS M. DI BELLA^{1,2}

¹Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información, Facultad de Agronomía, UBA. Buenos Aires, Argentina.

²IFEVA, Universidad de Buenos Aires, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). ³Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay. ⁴Instituto de Clima y Agua, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Buenos Aires, Argentina.

RESUMEN. Los incendios son fenómenos catastróficos, devastadores, peligrosos y costosos para una región. A pesar de su relevancia, se conoce poco sobre su dinámica espacial y temporal en la provincia de La Pampa. El objetivo general de este trabajo fue identificar y caracterizar los incendios —en particular, los más extensos— ocurridos en la provincia de La Pampa durante el período julio 2001-junio 2017 (16 campañas) empleando información provista por sensores remotos. Para ello se utilizó información de focos de calor de MODIS Rapid Response distribuidos por el sistema *web* FIRMS. Combinando información de índices espectrales (NBR), datos de precipitación y tipos de vegetación se estudió la influencia de los factores predisponentes sobre la ocurrencia de estos eventos. Se observó que, en el período analizado, se quemaron entre 21200 y 667500 ha/año, con un tamaño promedio de evento de 708 ha. Sin embargo, en las últimas cuatro campañas se registró un incremento en la superficie total quemada y en el número de eventos ≥ 5000 ha. En la última campaña, además de registrarse la mayor superficie quemada (667500 ha), ocurrió la mayor cantidad de eventos (10) ≥ 10000 ha (50% de los eventos totales de esa categoría). La superficie quemada total en una campaña se relacionó positivamente con las precipitaciones de la campaña previa ($R^2=0.76$, $P<0.001$). La vegetación más afectada fue el bosque xérico, seguido en menor medida por los bosques de algarrobo y las estepas y matorrales psamófilos. Se espera que la caracterización de la dinámica espacial y temporal de incendios mediante el uso de sensores contribuya a diseñar sistemas de prevención, alerta temprana y control en la región.

[Palabras clave: fuegos, teledetección, interacción clima-vegetación, severidad, MODIS]

ABSTRACT. Where, when and how is the occurrence of large fires in La Pampa province, Argentina: A remote sensing characterization. Fire, as a catastrophic phenomenon, is devastating, dangerous and costly for a region. Despite its relevance, little is known about the spatial and temporal dynamics of this phenomenon in the province of La Pampa. The general objective of this work was to identify and characterize the fires, particularly the most extensive ones, that occurred in the province of La Pampa during the period July 2001-June 2017 (16 campaigns), based on the use of information provided by remote sensors. For this, information from MODIS Rapid Response heat sources, distributed by the FIRMS web system, was used. Combining information from spectral indices (NBR), precipitation data and vegetation types, the influence of predisposing factors on the occurrence of these events was studied. It was observed that, in the analyzed period, between 21200 and 667500 ha/year were burned, with an average event size of 708 ha. However, in the last four seasons, an increase was recorded both in the total area burned and in the number of events ≥ 5 thousand ha. In the last campaign, in addition to registering the largest burned area (667500 ha), the largest number of events (10) ≥ 10 thousand ha (50% of the total events in this category) were observed. The total burned area in a campaign was positively related to the rainfall of the previous campaign ($R^2=0.76$, $P<0.001$). The most affected vegetation was the xeric forest, followed to a lesser extent by the carob forests and the steppes and psamophilic scrubs. It is expected that the characterization of the spatial and temporal dynamics of fires using sensors will contribute to the design of prevention, early warning and control systems in the region.

[Keywords: fires, remote sensing, climate-vegetation interaction, severity, MODIS]

INTRODUCCIÓN

El fuego es una actividad significativa en más del 30% de la superficie terrestre (Chuvienco et al. 2008). Se define como un proceso de combustión que actúa como modelador de la vegetación al ser partícipe del funcionamiento natural de ciertos ecosistemas (Chuvienco 2009; Di Bella and Posse 2014) y que se manifiesta a múltiples escalas, tanto espaciales como temporales (Chuvienco 2003). A nivel global, cada año se queman entre 3300 y 4300 millones de ha (Giglio et al. 2010). A lo largo de la historia, los ciclos climáticos indujeron los regímenes de fuegos, aunque en los últimos siglos, el uso creciente del fuego por el ser humano alteró los regímenes naturales de fuegos en la mayoría de los ecosistemas terrestres (Chuvienco 2008, 2009). A su vez, el cambio del uso de la tierra (en particular, la deforestación), el cambio climático y el fuego generan un sinergismo que incrementa el peligro de incendio (IPCC 2022). La actividad antrópica, además de los factores asociados con el cambio climático —aumento de la frecuencia de sequías, extensión de la temporada de incendios y el incremento de la frecuencia de los años secos— modifican los patrones de ignición y los paisajes y aumentan la probabilidad de que las igniciones coincidan con condiciones climáticas extremas; de esta manera, el fuego se convierte en un forzante de cambio (Pausas and Keeley 2021). La quema prescrita fue reglamentada en la provincia en el año 2000 por medio del Decreto 1925 de la Ley N° 1354 (Ortellado 2020). Esto se ve reflejado en la modificación del comportamiento esperado del fuego, tanto en la ocurrencia de incendios más grandes como en las áreas quemadas totales superiores al final de cada estación (Chuvienco 2009; Viegas 2007).

Los incendios comienzan en una o en múltiples igniciones, y la superficie que abarcan depende de la combinación de 1) el fracaso de la supresión inicial del fuego, 2) una gran área de combustible con continuidad horizontal o vertical y contenido de humedad bajo, 3) la fusión de dos o más incendios independientes, 4) tasas de propagación rápidas, 5) períodos de propagación prolongados, 6) condiciones meteorológicas locales predisponentes (i.e., viento, temperatura, humedad relativa), y 7) falta de control del fuego una vez iniciado, lo que da lugar a una gran propagación influenciada por las condiciones locales predisponentes (Bradstock et al. 2010; Dimitrakopoulos and Papaioannou 2001; Martin and Kauffman 1989; Meyn et al.

2007; Gill and Allan 2009; Peters et al. 2004). La superficie de un incendio resulta del crecimiento del área por unidad de tiempo y de la duración total de la propagación (Gill and Allan 2009). Los grandes incendios, pese a que representan solo una pequeña fracción de la totalidad de los fuegos, contribuyen de manera sustancial al área quemada total (Bradstock et al. 2010; Stocks et al. 2002; Williams 2013). Se los considera como los más devastadores, peligrosos y costosos para una región debido a su elevado poder destructivo (Bradstock et al. 2010; Williams 2013).

Los grandes eventos de incendio modifican profundamente los sistemas socioecológicos. A nivel mundial, se observan cada vez con mayor frecuencia temporadas de incendios sin precedentes, con ocurrencia de eventos de vastas extensiones y pérdida de vidas humanas y de propiedades (McWethy 2019). Los incendios pueden afectar los ciclos biogeoquímicos y flujos de energía y, asimismo, generar impactos negativos en la economías regionales y comunidades locales (Neary et al. 2005). Entre los múltiples impactos de los grandes eventos de incendio se destacan los cambios en las propiedades físicoquímicas del suelo, las variaciones en el volumen de biomasa vegetal, las alteraciones en el ciclo hidrológico, los cambios en la composición de la atmósfera, los impactos en la biodiversidad, las afecciones en la salud de las poblaciones humanas y las pérdidas de vidas y de producción (e.g., Nasi et al. 2002; Ice et al. 2004; Reisen et al. 2015). Debido a los variados efectos que genera la ocurrencia de estos incendios, son parte de la agenda de investigación de múltiples disciplinas como la química atmosférica, la ecología y la silvicultura, entre otras (Chuvienco 2003). En la Argentina, el Servicio Nacional de Manejo del Fuego —organismo que depende del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación— se encarga de la coordinación de los recursos requeridos para el combate de incendios forestales, rurales o de interfase (MAyDS 2022). Es responsable de coordinar al Sistema Federal de Manejo del Fuego, conformado por el propio Servicio Nacional de Manejo del Fuego, la Administración de Parques Nacionales, las provincias y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, y está a cargo de las acciones de manejo del fuego en todo el país. Sus funciones principales son la prevención y alerta de incendios, el combate y la evaluación de daños y acciones de recomposición y restauración de los ecosistemas afectados (MAyDS 2022).

La información provista por sensores remotos montados sobre plataformas satelitales ha sido muy utilizada para analizar y estudiar la ocurrencia de incendios (Chuvienco 2003; Di Bella and Posse 2014; Wooster et al. 2021). La teledetección, además de ser una herramienta idónea para estudiar el área que afectan los incendios por su naturaleza inaccesible y por el tamaño que adquieren, también permite determinar la severidad de los eventos de incendio (Hardy et al. 1999; Vivalda 2020). La severidad se define como el efecto del fuego sobre los ecosistemas, expresado por la magnitud del cambio ecológico causado por la actividad de fuego (Agee 1993; Key and Benson 2006; Sugihara et al. 2006). El mapeo de patrones de severidad es fundamental para predecir la recuperación de la vegetación afectada en función de la magnitud del daño y del tamaño del parche (Miller 2007). En este sentido, la generación de esta información resulta de valor para tomar decisiones que permitan controlar los incendios y para aplicar de medidas precisas de rehabilitación en las zonas afectadas por fuegos (Fischer et al. 2012).

El promedio anual de superficie quemada en la Argentina durante el período 2000-2017 fue ~1.2 millones de ha; en mayor medida se vieron afectados los arbustales (~40%), los pastizales (~33%) y los bosques nativos (~26%) (MAyDS 2020). El 44% de los incendios se originó intencionalmente (~21%) o por negligencia (~23%), el 5% fueron causados por factores naturales, y se desconocen las causas del 51% restante (MAyDS 2020). Las provincias de Córdoba, Mendoza, San Luis y La Pampa, comprendidas en ecorregiones semiáridas y áridas (Monte, Parque Chaqueño y Estepa Pampeana), congregaron el 69% del área nacional quemada durante dicho período (Fischer 2008; MAyDS 2020). La Pampa fue la provincia que mayor superficie incendiada concentró, con un promedio anual de ~520000 ha quemadas, lo que equivale a un 43% de la superficie total quemada en la Argentina (MAyDS 2020). Al igual que en el resto del país, solo el 5% de los incendios fueron de origen natural (MAyDS 2020). Para la temporada estival 2017 se esperaba un comportamiento de fuego extremo debido a un exceso en las precipitaciones registrado en el trimestre anterior (septiembre-noviembre 2016) y valores elevados —por encima de los máximos— en el Índice de Combustible Disponible (BUI, por sus siglas en inglés) (MAyDS 2016). De acuerdo a lo esperado, en esa temporada se produjeron eventos de incendio en el área del

Caldenal, estimados en más de 1 millón de ha quemadas. Los incendios o fuegos de alta severidad y extensión constituyen el disturbio principal del bosque de Caldén (Medus et al. 2008). El 40% de los bosques remanentes de Caldén están afectados por incendios (Diharce et al. 2018). Los fuegos en la provincia de La Pampa ocurren de forma natural antes de poner en producción de las tierras (Ortellado 2020). El régimen natural de incendios sufrió modificaciones asociadas a la actividad antrópica (Ortellado 2020; Vivalda 2020). En la actualidad, la ocurrencia de incendios en La Pampa se la relaciona con la acción antrópica (i.e., prácticas no reglamentadas y otras mal realizadas o con deficiencias técnicas en el manejo del fuego), y —en menor medida— con orígenes naturales (e.g., sequías y tormentas) (Ortellano 2020). Pese a la relevante magnitud del suceso, se observa una falta de cartografía suficientemente detallada y exhaustiva que incluya la localización espacial de las áreas quemadas, las especies afectadas y el impacto o la severidad de los fuegos sobre la vegetación, entre otros (Cases and Pombo 2019). Del mismo modo, no se encuentra disponible una caracterización espacial y temporal de la ocurrencia de los grandes incendios en la provincia de La Pampa.

Ante la ocurrencia de eventos de incendio con superficies cada vez más extensas y de mayor poder destructivo en la provincia de La Pampa, se torna imperante la necesidad de mejorar el conocimiento de sus patrones espaciales y temporales, al igual que de sus relaciones con los factores subyacentes del riesgo humano (Martínez et al. 2009). El objetivo de este trabajo fue identificar y caracterizar los eventos de incendio, particularmente los grandes, en la provincia de La Pampa durante el período julio 2001-junio 2017, y también analizar la influencia de los factores predisponentes (clima y tipo de vegetación). Específicamente, se buscó 1) caracterizar los eventos de incendios en función de su tamaño o extensión espacial, su ocurrencia temporal, su duración y velocidad de avance, 2) identificar los grandes incendios y la superficie total afectada en el tiempo y en el espacio, y 3) evaluar la severidad de los grandes incendios sobre la vegetación. Es de esperar que períodos sucesivos de excesos y déficit hídricos alteren los patrones normales de ocurrencia de grandes incendios. Aunque los seres humanos son responsables de la mayoría de las igniciones, las variables climáticas —como la precipitación anual— y los predictores biológicos (e.g., NDVI) se

consideran los factores más determinantes de la frecuencia de incendios (Argañaraz et al. 2015). Sin embargo, ningún factor por sí solo produce grandes incendios; más bien, ocurren cuando se sobrepasan los umbrales de incendios (Pausas and Keeley 2021). Los eventos meteorológicos anómalos pueden reducir estos umbrales y, por lo tanto, aumentar la probabilidad y la propagación de incendios (Pausas and Keeley 2021). Dado que en las estaciones secas precedidas por un período húmedo se prestan a una gran acumulación de biomasa combustible con continuidad horizontal o vertical y bajo contenido de humedad, lo que favorecería la ocurrencia de grandes incendios (Glave 2006; Romero-Ruiz et al. 2010; Marcos et al. 2015; Vázquez 2017; Ortellado 2020). A pesar de la extensa superficie quemada anualmente y del acontecimiento de eventos extremos, aún existe un entendimiento escaso de los grandes incendios y de su comportamiento, y la literatura abocada a ellos es poca. Por

eso, este trabajo pretende contribuir a la comprensión de la ocurrencia de grandes eventos de incendio en la provincia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio correspondió a la provincia de La Pampa, cuya extensión es 140000 km² (Figura 1). Su clima templado, con una temperatura media anual entre 14 y 16° C, y precipitaciones principalmente estivales que van desde los 250 mm/año en el SO hasta los 850 mm/año hacia el NE (INTA 1980). Este gradiente hidrológico árido-subhúmedo determina, en gran parte, la variación en los tipos de vegetación, los usos y la cobertura del suelo (INTA 1980). En la región, el fuego es una práctica de manejo habitual que emplean los productores ganaderos para mejorar la calidad de los recursos forrajeros (Fischer 2012; Medina 2007; Peláez and Mayor 2008).

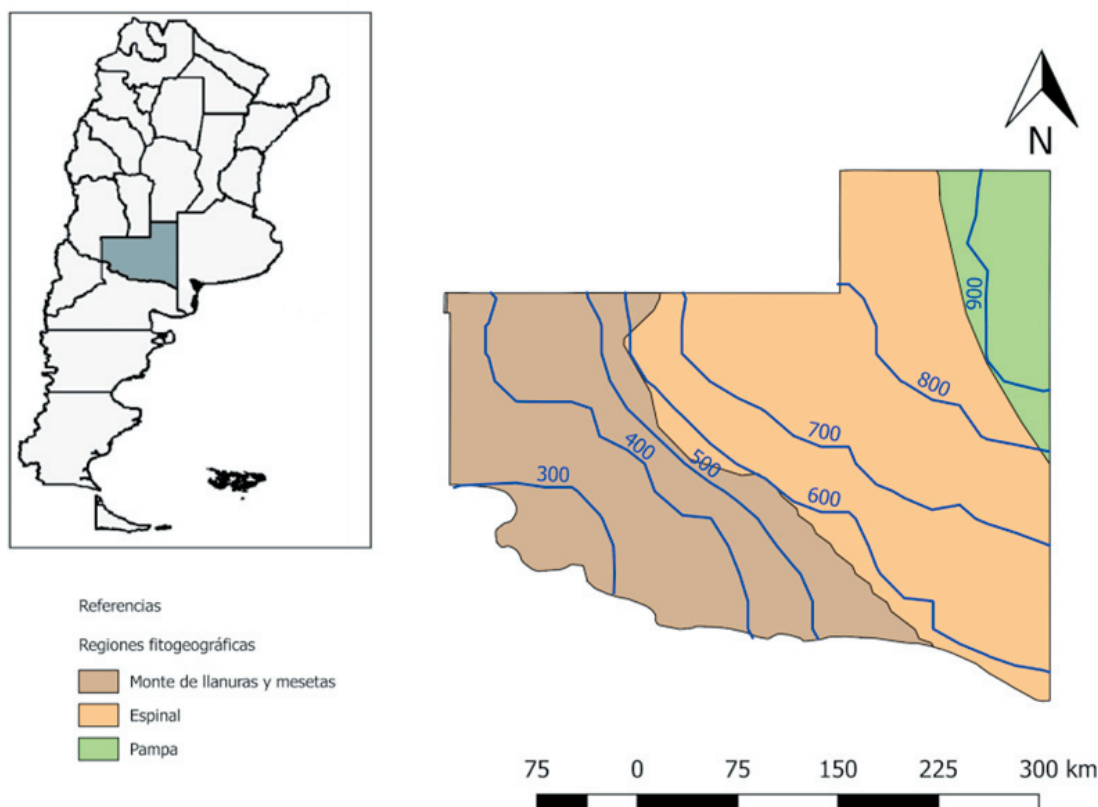


Figura 1. Regiones fitogeográficas de la provincia de La Pampa (Monte de llanuras y mesetas, Espinal y Pampa) e isohietas de precipitación media anual calculadas a partir de imágenes TRMM (producto TRMM 3B43) para el período 1998-2017.

Figure 1. Phytoecographic regions of the province of La Pampa (Monte de llanuras y mesetas, Espinal and Pampa) and isohietas of mean annual precipitation calculated from TRMM images (product TRMM 3B43) for the period 1998-2017.

La ganadería bovina es la actividad que ocupa la mayor extensión de la geografía provincial, y se desarrolla en ~11 millones de ha (~79% del territorio provincial) (Roberto et al. 2009).

En el área de estudio se identifican tres grandes regiones fitogeográficas: Monte de llanuras y mesetas, Espinal y Pampa (INTA 1980) (Figura 1). El Caldenal es el distrito fitogeográfico de transición entre la Pampa y el Monte (SAyDS 2007). Se ubica entre las isohietas de 400-600 mm y cubre un área de ~7 millones de ha (Roberto et al. 2005). El bosque xerófito, dominado principalmente por *Prosopis caldenia*, es abierto y caducifolio (Oyarzabal et al. 2018). Puede estar acompañado por un estrato arbustivo y herbáceo, dado que es frecuente que los bosques de caldén sean discontinuos y alternen con pastizales o arbustales (Fischer 2008). El estrato arbustivo puede presentar diversas especies como *Condalia microphylla*, *Larrea* sp. y *Lycium chilense*, mientras que el estrato gramíneo suele estar dominado por gramíneas perennes (Ortellado 2020). Históricamente, el sector más afectado por eventos de incendio fue la franja central oblicua de la región, que coincide con el área del Caldenal (Ortellado 2020). En la ecorregión Pampa, ubicada al noreste de la provincia, predominan los cultivos anuales, aunque originalmente dominaban las estepas psamófilas (Di Bella et al. 2019). Al oeste, donde se ubica el Monte de llanuras y mesetas, prevalecen especies arbustivas (Di Bella et al. 2019).

Detección de incendios y cuantificación del área afectada

Para identificar los incendios se utilizaron los focos de temperatura anómala registrados durante el período julio 2001-junio 2017 por el sensor MODIS a bordo de los satélites Terra y Aqua. Esta información se obtuvo de la base de datos de focos de calor de MODIS Rapid Response, distribuidos por medio del sistema web FIRMS (*Fire Information for Resource Management System*, firms.modaps.eosdis.nasa.gov). El producto MCD14DL Colección 6 utilizado presenta una cobertura global diaria y una resolución espacial de 1 km², y posee una sensibilidad de detección de 100 m² (Giglio et al. 2003). El algoritmo de detección utiliza las temperaturas de brillo de las bandas MODIS centradas en los 4 μm (infrarrojo medio) y 11 μm (infrarrojo térmico) (Giglio et al. 2003). Las anomalías térmicas detectadas por el algoritmo representan el centro de píxeles de 1 km, que contienen uno o más focos de

temperatura anómala que representarían los fuegos activos. Para evitar falsas detecciones, este algoritmo contempla el comportamiento espectral de las superficies vecinas a través de un algoritmo contextual (Giglio et al. 2003).

Mediante un código desarrollado *ad hoc* en Python se agruparon los focos de calor coincidentes con una ventana de detección de dos días y dos kilómetros (Fischer et al. 2015), considerándolos, así, como pertenecientes a un mismo evento de incendio. Se tuvieron en cuenta eventos de incendio a los que congregaron al menos dos focos de calor; es decir, aquellos cuyo tamaño fue ≥ 2 píxeles MODIS contiguos de 1 km². A pesar de que la estimación del tamaño del incendio a partir de las bases de datos de focos de calor no es completamente fidedigna, y que seguramente se podría sobreestimar la extensión espacial de los eventos de incendio (dado que el algoritmo puede detectar focos con un tamaño mínimo de 100 m²; es decir, 1% del tamaño del píxel [Giglio et al. 2003]), se puede considerar que el tamaño del incendio obtenido a partir de los datos del evento corresponde al tamaño potencial de cada evento de incendio (Fischer et al. 2012).

Para obtener la superficie total afectada en tiempo y espacio por los eventos de incendio, se delimitaron sus perímetros. Por medio de un código desarrollado en Python, y usando la estructura de datos para conjuntos disjuntos Union-Buscar, se realizaron las operaciones de búsqueda y de unión a fin de identificar a qué evento de incendio pertenecía cada foco, y así agruparlos en caso de cumplir con las condiciones de proximidad espacial y temporal. Por último, se determinó la ubicación espacial, el centroide del polígono, el tamaño, la duración, la velocidad de avance y el perímetro de cada evento de incendio a través de identificar el casco convexo, empleando el algoritmo Quick-Hull (Barber et al. 1996). La definición de la extensión afectada considerada como grande se realizó por medio del análisis de la distribución de la frecuencia de tamaños de los eventos de incendio de todo el período analizado. De esta manera, se consideraron como grandes a todos aquellos eventos cuya extensión espacial fue igual o mayor al percentil 90.

Dinámica espacial de los incendios

La dinámica espacial se abordó mediante el cálculo de la superficie de los eventos de incendio en cada una de las 16 campañas

comprendidas entre julio 2001 y junio 2017, y del análisis de la equitatividad de la distribución espacial de la ocurrencia y extensión de los eventos de incendio. Para ello, se calculó el índice de Gini, que es muy usado para medir la equitatividad y se puede representar gráficamente por medio de la curva de Lorenz (Gastwirth 1972; Morgan 1962; Yitzhaki 1983). El índice puede oscilar entre 0 y 1; los valores más bajos indican una mayor equitatividad de la superficie quemada entre los eventos de incendio con respecto a la superficie total de los eventos, mientras que los valores más altos se condicen con una dominante desigualdad. El índice de Gini (G) se calculó para toda la provincia de La Pampa (denominado global) y para cada una de las 66 celdas de 50 km² en la cual se particionó la provincia (Ecuación 1):

$$G = |1 - \sum_{k=1}^n (X_k^{k+1} - X_k) (Y_k^{k+1} + Y_k)|$$

Ecuación 1

donde X=proporción acumulada de eventos de incendio, Y=proporción acumulada de superficie de los eventos, k+1=tamaño acumulado y k=tamaño acumulado de la categoría anterior.

Dinámica temporal de los incendios

La dinámica temporal de los eventos de incendio se abordó mediante el análisis de la duración (días) y la velocidad de avance (miles de ha/día), como así también a través de cuantificar la frecuencia o la recurrencia de eventos en el tiempo. La duración (días) de los eventos de incendio se obtuvo por medio de la identificación temporal de los focos de calor pertenecientes a cada evento mediante un código desarrollado en Python. A partir de la duración de cada evento de incendio, se calculó la frecuencia relativa acumulada de todos los eventos. Con los datos del cociente entre el tamaño de cada evento (miles de ha) y su duración (día), se determinó la velocidad de avance (miles de ha/día) de los eventos de incendio. Para conocer la estacionalidad en la ocurrencia de eventos de incendio, se identificó el número de eventos por mes de análisis. El rango de meses con actividad de fuego fue de 0 a 12, indicando valores cercanos a 0 una elevada estacionalidad en la ocurrencia de eventos de incendio y valores cercanos a 12, eventos de incendio durante todo el año.

Para analizar la equitatividad de la distribución temporal de los eventos de incendio, concerniente al número de meses

con actividad de fuego y a la cantidad de eventos mensuales, se calculó el índice de Pielou (1969) para cada una de las celdas de 50 km². Este índice mide la proporción de la diversidad observada en relación con la máxima diversidad esperada (Ibañez et al. 1995). Su valor oscila entre 0 y 1, de forma que 1 corresponde a una distribución mensual equitativa de los eventos de incendio y 0 a una predominante desigualdad en la distribución temporal. Una distribución mensual igualitaria indica que los sitios no solo se queman todo el año, sino que la proporción de la ocurrencia de eventos de incendio en los meses con actividad de fuego es similar a lo largo del año. Los píxeles con una distribución temporal inequitativa congregan los eventos de incendio en un solo momento del año. Para obtener el índice de Pielou, primero fue necesario computar el índice de Shannon-Wiener (Shannon and Weaver 1949). Este índice, ampliamente utilizado para mensurar la diversidad, se basa en la teoría de la información, ya que mide el contenido de información por símbolo dadas S clases de símbolos discretos (12 meses en este caso) (Help and Engels 1974; Pla 2006). La diversidad máxima ($H'_{\max} = \log_2 S$) se alcanza cuando los eventos de incendio ocurren todos los meses. Una vez obtenido el índice de Shannon-Wiener (H') para las 66 celdas, se calculó el índice de Pielou (J') (1969) como:

$$J' = H' / \log_2 S$$

Ecuación 2

donde H' =índice de Shannon-Wiener y $S=12$.

Efecto del clima y el tipo de vegetación

Para analizar el efecto del clima se obtuvo la precipitación media mensual provista por el satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Se utilizó el producto TRMM 3B43, que desde 1998 provee información con una resolución espacial de 0.25° y una escala temporal de 3 horas. Luego, se realizaron análisis de regresión entre la superficie quemada por campaña (julio-junio) y las precipitaciones ocurridas durante la campaña corriente (C_0), antecedente (C_{-1}) y de dos campañas previas (C_{-2}).

Para obtener la superficie quemada por tipo de vegetación se utilizó una clasificación de usos y cobertura del suelo de Sudamérica, desarrollada por la USGS (*United States Geological Survey*) en 2005 y actualizada en 2008 (Sayre et al. 2014), que presenta una resolución

espacial de 450 m. Se trata de una matriz de datos ecosistémicos que mapea la distribución de los sistemas ecológicos, definidos como conjuntos de tipos de vegetación coexistentes espacialmente que comparten un sustrato común subyacente, proceso ecológico o gradiente. Las clases de cobertura vegetal identificadas en La Pampa fueron vegetación acuática y palustre, pastizales, bosques xéricos, vegetación halófila, estepas y matorrales psamófilos, estepa arbustiva, matorral pedemontano, matorral y bosques riparios, matorral de la llanura aluvial salina, matorral de cordillera frontal, precordillera y sierras del monte central y septentrional, matorrales en depresiones salinas del monte, estepa en médanos del monte, bosques de algarrobo degradado, matorral y bosque de *Tamarix* sp., matorral en afloramientos terciarios del monte central, estepas y matorrales preandinos de la Patagonia y cultivos agrícolas. Para cada tipo de vegetación se calculó la superficie quemada y el porcentaje de los eventos de incendio a lo largo del período 2001-2017.

Severidad de los grandes incendios

Se estimó la severidad intra-evento de 18 eventos de incendio ocurridos durante el período de análisis, los cuales presentaron extensiones superiores a las 10000 ha. Para ello, se calculó el índice espectral bitemporal dNBR (*delta Normalized Burned Ratio*), el cual diferencia los conjuntos de datos previos y posteriores al evento de incendio para determinar la extensión y el grado de cambio ocasionado por el fuego (Escuin et al. 2008). En la mayoría de los casos, este índice separa de manera confiable las superficies quemadas de las no quemadas e identifica de manera óptima un amplio gradiente de niveles de severidad (Escuin et al. 2008). De esta manera, el dNBR es un método muy utilizado para mapear grandes incendios, dado que se asume que la diferencia bitemporal de NBR es directamente proporcional a la severidad del evento de incendio (Cocke et al. 2005; Roy et al. 2006). Para ello, se utilizó información espectral provista por el sensor MODIS (producto MOD09A1), obtenida a partir de la plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al. 2017). Este producto tiene una resolución espacial de 500 m y una resolución temporal de 8 días. A partir de la identificación de la fecha de inicio y de finalización de cada uno de los 18 eventos de incendio, se seleccionaron en cada caso las imágenes MODIS inmediatamente anteriores y posteriores y se calculó el índice NBR pre- y post incendio (Ecuación 3):

$$\text{NBR} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

Ecuación 3

donde NIR y SWIR representan los valores de reflectancia por pixel de las porciones del infrarrojo cercano (banda 2) e infrarrojo medio (banda 7) del sensor MODIS, respectivamente.

Como resultado del uso de estas dos bandas, el NBR resulta en particular sensible a los cambios en la cantidad de vegetación verde, el contenido de humedad y las condiciones edáficas (Miller 2007). Este índice toma valores que oscilan entre -1 y 1. En áreas con vegetación verde, el NBR presenta valores positivos, mientras que los valores negativos corresponden al suelo desnudo y a áreas quemadas. En zonas afectadas por eventos de incendio, los valores de NBR disminuyen a medida que aumenta la severidad del incendio (Escuin et al. 2008). A partir del NBR pre y post incendio, se calculó el delta NBR (dNBR) como la diferencia entre el NBR pre- y post-evento (Ecuación 4):

$$\text{dNBR} = \text{NBR}_{\text{pre}} - \text{NBR}_{\text{post}}$$

Ecuación 4

donde NBR_{pre} es el valor de NBR correspondiente a la fecha inmediatamente anterior al evento de incendio y NBR_{post} es el valor de NBR correspondiente a fecha inmediatamente posterior al evento de incendio.

Este índice también toma valores entre -1 y 1; cuanto más alto es el valor, mayor es la severidad del evento de incendio (Di Bella and Posse 2014). Para determinar el nivel de severidad intra-evento, se utilizaron los umbrales de dNBR propuestos por la USGS: nula (vegetación en crecimiento), nula (no quemado), baja, baja a moderada, moderada a severa, y severa (Tabla 1). Por último, se

Tabla 1. Categorías de severidad del incendio definidas en base a los umbrales de dNBR establecidos por la USGS (modificado de Eidenshink et al. [2007]).

Table 1. Fire severity categories defined on the basis of the dNBR thresholds established by the USGS (modified from Eidenshink et al. [2007]).

dNBR	Categoría	Severidad
<0.1	1	Nula (vegetación en crecimiento)
-0.1 a 0.1	2	Nula (no quemado)
0.1 a 0.27	3	Baja o leve
0.27 a 0.44	4	Leve a moderado
0.44 a 0.66	5	Moderado a severo
>0.66	6	Severo

calculó la superficie afectada con distintos niveles de severidad.

RESULTADOS

Dinámica espacial

En total, se identificaron 29170 focos, agrupados en 3697 eventos de incendio durante el período de estudio. La superficie afectada por cada evento de fuego osciló entre 200 ha (2 focos de calor) y 109400 ha, con un promedio de ~708 ha. Se consideraron como grandes a aquellos eventos de incendio iguales o superiores a 1500 ha (percentil 90). Se observó que 3406 de los eventos fueron incendios pequeños (menores a 1500 ha) y 291 fueron grandes (7.8%); se distribuyeron en las siguientes clases: 220 entre 1.5 y 5000 ha, 51 entre 5000 y 10000 ha, y 18 con superficies ≥ 10000 ha. A lo largo de las 16 campañas

analizadas se observó una variación marcada en la superficie de los eventos de incendio (Figura 2a). Por las superficies quemadas más extensas se observaron durante las campañas 2 (2002-2003) y 16 (2016-2017), con extensiones de 519500 y 667500 ha, respectivamente (Figuras 2a y 2b). En la última campaña no solo se registró la mayor superficie de eventos (667500 ha) (Figura 2a), sino también el mayor número de eventos (10 incendios) con extensiones ≥ 10000 ha (Figura 2b), lo cual representa el 50% de los eventos de incendio más grandes del período. Por su parte, las menores áreas quemadas se registraron durante las campañas 9 (2009-2010), 10 (2010-2011) y 12 (2012-2013), con una superficie quemada total entre 21200 y 24300 ha (Figura 2a). Estas campañas, a su vez, fueron las únicas del período que no presentaron grandes eventos de incendio (Figura 2a).

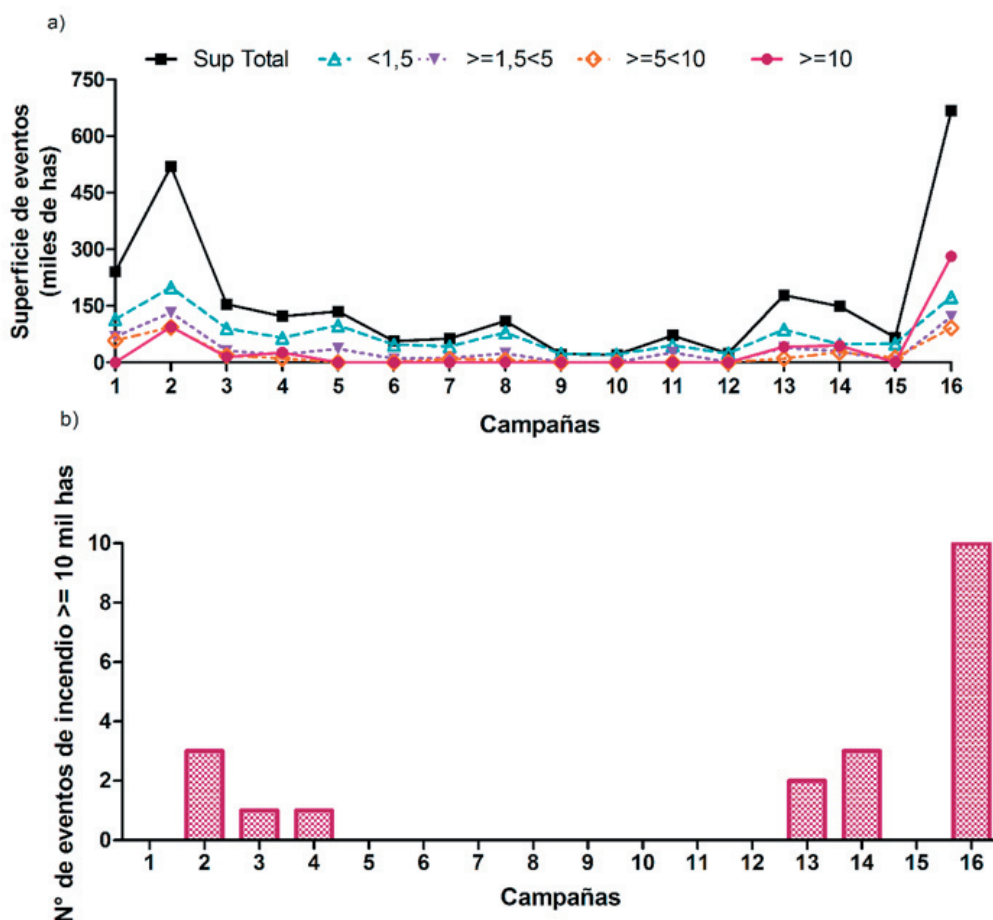


Figura 2. a) Superficie de eventos (en miles de ha) por tamaño de evento de incendio (<1500 ha, entre 1500 y 5000 ha, entre 5000 y 10000 ha, >10000 ha) durante las 16 campañas analizadas. b) Número de eventos de incendio ≥ 10000 ha durante las 16 campañas estudiadas.

Figure 2. a) Area of events (in thousands of ha) by size of fire event (<1500 ha, between 1500 and 5000 ha, between 5000 and 10000 ha, >10000 ha) during the 16 campaigns analyzed. b) Number of fire events ≥ 10000 ha during the 16 campaigns studied.

En cuanto a la distribución espacial de los eventos de incendio, se observaron diferencias pronunciadas. El índice de Gini varió fuertemente a lo largo del territorio provincial (Figura 3a). Los valores más bajos se encontraron al noreste de la región, alcanzando la celda más equitativa un valor de 0.095 (Figura 3a). La celda presentó un comportamiento similar a la línea de igualdad 1:1; en la misma, el 69% de los eventos representaron el 61% de la superficie quemada (Figura 3b). Los valores más elevados, por su parte, se ubicaron sobre todo en la región centro-sur de la provincia (Figura 3a); la celda más inequitativa alcanzó un valor de 0.882. En este caso, el 8% de los eventos de incendio congregó el 88% de la superficie quemada (Figura 3b). Las celdas más desiguales (con valores de índice de Gini en el rango de 0.488-0.882) presentaron los eventos de incendio con las mayores superficies incendiadas en el período. El comportamiento global de la provincia también presentó una asimetría notable entre el número de eventos y la superficie quemada, con un valor del índice de Gini de 0.613 (Figura 3b). El análisis regional mostró que el 4% de los eventos de incendio ocurridos en La Pampa representaron el 41% de la superficie quemada (Figura 3b).

Dinámica temporal

Se observó una variabilidad temporal marcada en la ocurrencia de eventos de incendio durante el período de estudio. Los eventos tuvieron una duración de entre 1 y 27 días (Figura 4a). El 90% de los eventos de incendio menores a 1500 ha y entre 1500 y 5000 ha presentaron una duración máxima de 1 día (Figura 4a). Por su parte, el 90% de los eventos de incendio entre 5000 y 10000 ha presentó una duración máxima de 3 días, mientras que la duración de los eventos de incendio ≥ 10000 ha fue 4 días (Figura 4a). La velocidad de avance se correspondió de forma positiva con el tamaño de los eventos (Figura 4b). Los eventos de incendio ≥ 10000 ha presentaron una velocidad de avance promedio de 7500 ha/día, hasta 1462 veces mayor que la de los eventos pequeños (Figura 4b).

Si bien en la provincia preponderó una distribución mensual equitativa de los eventos de incendio, presentando un 54% de la región valores por encima de 0.70 en el índice de Pielou, se observaron diferencias pronunciadas con respecto a la distribución temporal de los eventos de incendio concerniente a la cantidad de meses que sufrieron actividad de fuego. Los eventos de incendio ocurrieron con mayor

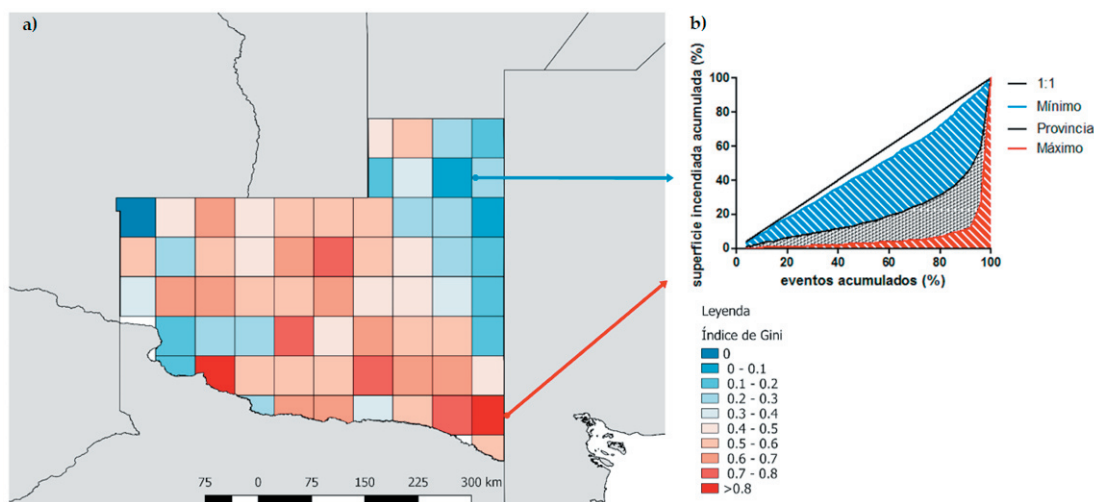


Figura 3. a) Índice de Gini calculado para cada una de las celdas de 50 km² en las que se subdividió la provincia (n=66). En azul se representan los valores más bajos del coeficiente (cerca de 0) que corresponden a una equitatividad elevada en la distribución de la superficie quemada entre eventos de incendio, y en rojo se expresan los valores más elevados (próximos a 1), que corresponden a una desigualdad dominante. b) Porcentaje de la superficie quemada acumulada de los eventos de incendio en función del porcentaje acumulado de eventos de incendio (curva de Lorenz) para las celdas que mostraron los valores de Gini mínimo (en azul), máximo (en rojo) y promedio para la provincia (en negro).

Figure 3. a) Gini index calculated for each 50 km² of the cells in which the province was subdivided (n=66). In blue, the lowest values of the coefficient (close to 0) are represented, which correspond to a high equality in the distribution of the burned area between fire events; in red, the highest values (close to 1) are expressed, which represent a dominant inequality. b) Percentage of the accumulated burned area of the fire events as a function of the accumulated percentage of fire events (Lorenz curve) for the cells that showed the minimum (in blue), the maximum (in red) and average Gini values for the province (in black).

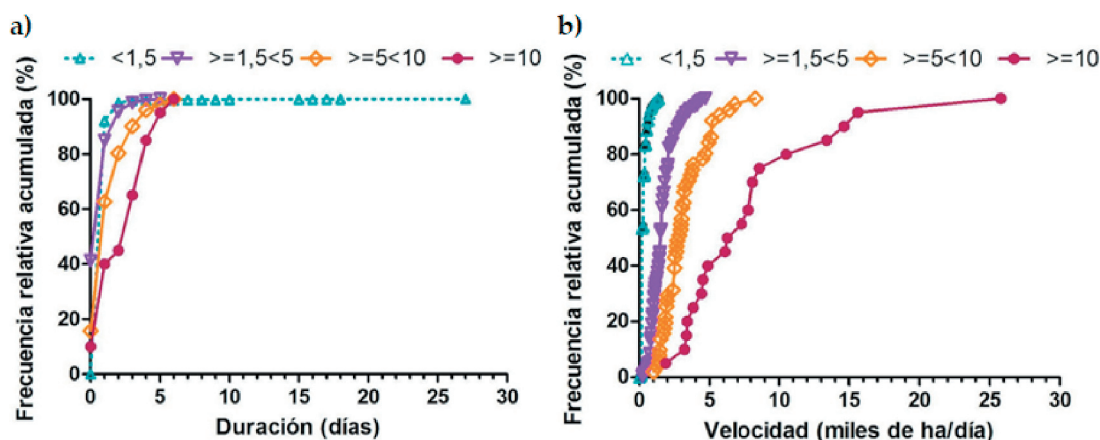


Figura 4. a) Frecuencia relativa acumulada de los eventos de incendio durante el período julio 2001-junio 2017 en función de su duración (días). b) Frecuencia relativa acumulada de los eventos de incendio durante el período julio 2001-junio 2017 en función de la velocidad de avance (miles de ha/día).

Figure 4. a) Cumulative relative frequency of fire events during the period July 2001-June 2017 as a function of duration (days). b) Cumulative relative frequency of fire events during the period July 2001-June 2017 depending on the speed of advance (thousands of ha/day).

frecuencia en el centro de la región. El índice de Pielou arrojó valores entre 0 y 0.93 (Figura 5). El valor más desigual (0) se observó en una zona donde los eventos de incendio (2) se concentraron en un solo mes (diciembre). La celda más equitativa (índice de Pielou=0.93) se encontró al sudoeste de la provincia; en esa celda se registró una superficie quemada similar a lo largo del año. Los eventos de incendio ≥ 10000 ha ocurrieron en celdas con una equitatividad preponderante, con valores del índice de Pielou entre 0.58 y 0.84. En relación con la variabilidad intra-anual, se hallaron diferencias estacionales acentuadas durante las 16 campañas estudiadas. En el centro de la región se observaron áreas que sufrieron eventos de incendio hasta en un 90% del año, mientras que al sudoeste de la provincia se concentró la ocurrencia de eventos en casi un 33% del año (Figura 5b). Los meses estivales (enero, febrero y marzo) congregaron el 56% de los grandes eventos de incendio. En enero y diciembre se concentró el 85% de los eventos de incendio ≥ 10000 ha.

Controles ambientales de los fuegos

A nivel provincial, las precipitaciones de la campaña anterior (C_{-1}) explicaron el 76% de la variabilidad en la superficie quemada total de la campaña ($P < 0.001$) (Figura 6). Por su parte, las precipitaciones ocurridas en la campaña corriente (C_0) y en las dos campañas previas (C_{-2}) no mostraron una relación estadísticamente significativa con la superficie quemada de la campaña. En las campañas 1 (2001-2002) y 15 (2015-2016), las precipitaciones promedio

de la provincia fueron las más elevadas del período de análisis (750 mm y 889 mm, respectivamente) (Figura 6), mientras que la precipitación media en el período analizado fue 615 mm. En la campaña 1 (2001-2002) llovió un 22% más respecto al promedio anual, y en la campaña 15 (2015-2016), las precipitaciones fueron 45% superiores al promedio. Estas lluvias antecedieron a las campañas 2 y 16, que correspondieron a las mayores superficies quemadas (2002-2003 y 2016-2017, respectivamente). El 46% de la superficie de los eventos en la campaña 2 (2002-2003) se vio explicado por grandes incendios, mientras que el 74% de la superficie de eventos en la campaña 16 (2016-2017) se atribuyó a eventos de incendio mayores o iguales a 1500 ha (Figura 2).

Los bosques xéricos, ubicados entre las isohietas de 400 y 900 mm (Figura 1), no solo fueron el tipo de vegetación natural más afectado por los eventos de incendio (37.68% de los eventos de incendio, 46.1% de la superficie de los eventos y 64% de la superficie de eventos ≥ 10000 ha), sino también los que mostraron una mayor proporción de su superficie quemada (32.06%) (Tabla 2). Alrededor de 1200000 ha de este tipo de vegetación se vio afectada por los incendios ocurridos en el período 2001-2017. Los bosques de algarrobo degradados y las estepas y matorrales psamófilos, aunque en menor medida, también se vieron muy afectados por los incendios. Alrededor del 20% y el 27% de la superficie de estos dos tipos de vegetación se vio afectado por la ocurrencia

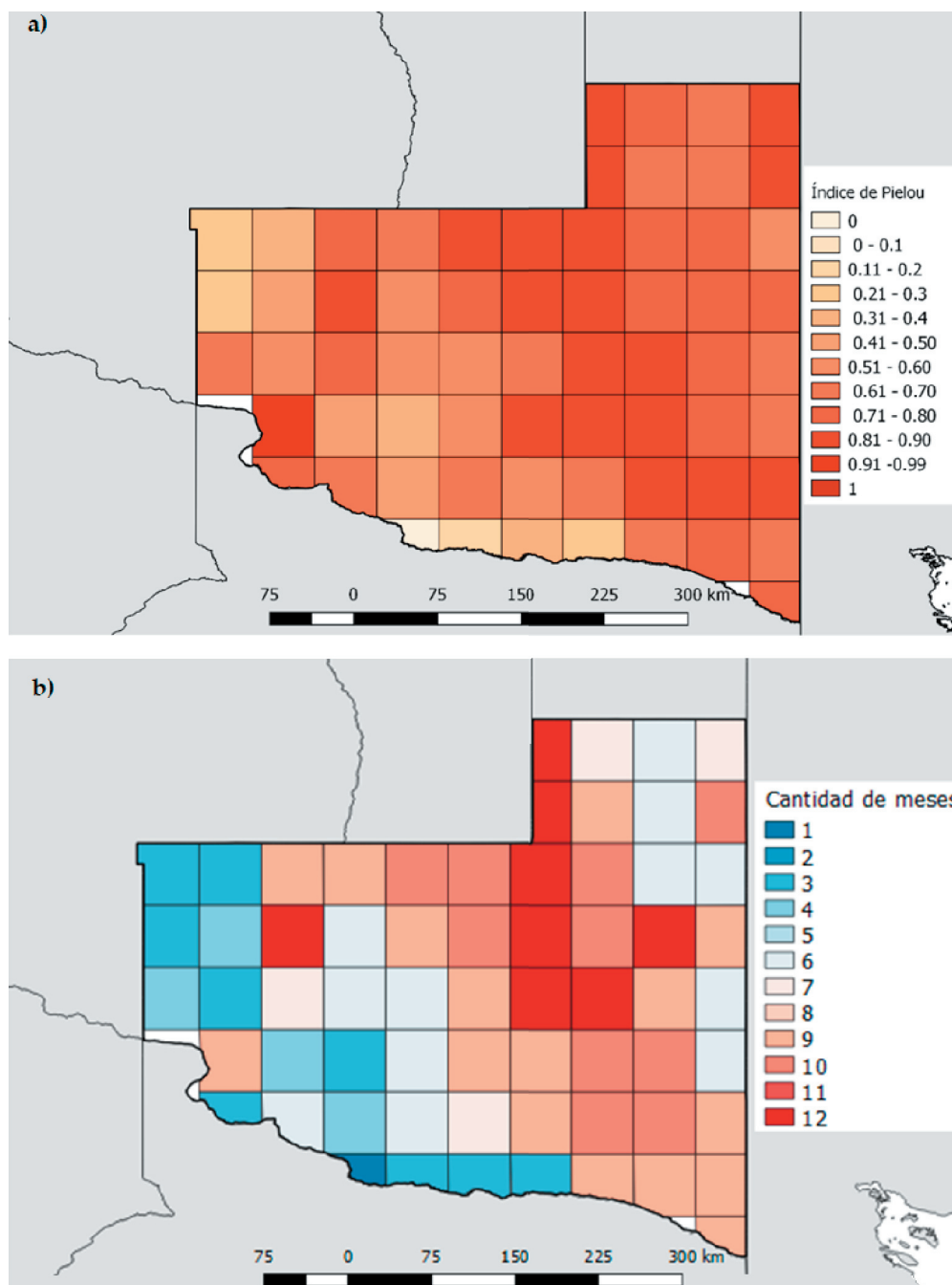


Figura 5. a) Índice de Pielou calculado para cada una de las celdas de la grilla de 50x50 km. En naranja se indican los valores más bajos del coeficiente (cerca de 0), que representan una desigualdad elevada en la distribución temporal de los eventos de incendio, mientras que en rojo se representan los valores más elevados (próximos a 1), que corresponden a una equitatividad dominante en la distribución temporal de los eventos. b) Cantidad de meses con eventos de incendio durante el período julio 2001-junio 2017, considerando el número total de meses en el que cada celda presentó al menos un evento de incendio.

Figure 5. a) Pielou index calculated for each of the cells of the 50x50 km grid. In orange, the lowest values of the coefficient (close to 0), which represent a high inequality in the temporal distribution of fire events; in red, the highest values (close to 1), which correspond to a dominant equity in the temporal distribution of events. b) Number of months with fire events during the period July 2001-June 2017, considering the total number of months in which each cell presented at least one fire event.

del 16.28% y el 28.82% de los eventos de incendio, respectivamente, representando entre ambos el 35.6% de la superficie quemada

(Tabla 2). Por su parte, los eventos de incendio ≥ 10000 ha afectaron sobre todo a los bosques xéricos (~64% de la superficie de los grandes

Tabla 2. Superficie de los eventos (%) y superficie quemada del total de los tipos de vegetación (%) en función de los tipos de vegetación y el número de eventos de incendio.

Table 2. Area of the events (%) and burned area of the total types of vegetation (%) according to the types of vegetation and the number of fire events.

Tipo de vegetación	Superficie de los eventos (%)	Superficie quemada del total de los tipos de vegetación (%)	Eventos de incendio
Bosques de algarrobo	20.78	20.42	638
Bosque xérico	46.10	32.06	1377
Estepas y matorrales	14.91	27.10	1053
Cultivos agrícolas	5.83	5.84	563
Otras coberturas	12.38	8.28	66

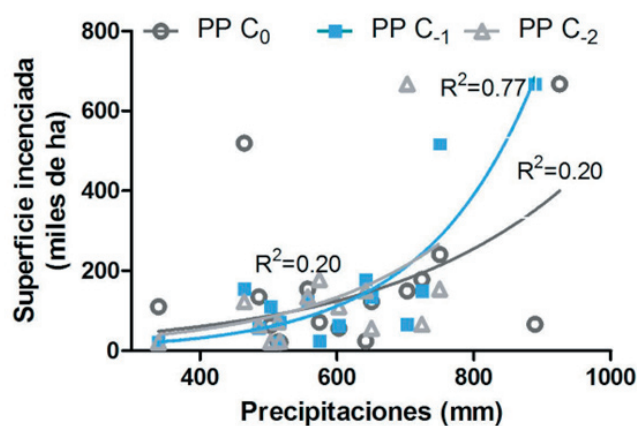


Figura 6. Superficie de los eventos (en miles de ha) por campaña durante el período julio 2001-junio 2017 para la provincia de La Pampa en función de las precipitaciones de la campaña corriente (C0), la campaña antecedente (C-1) y las dos campañas previas (C-2).

Figure 6. Area of the events (in thousands of ha) per season during the period July 2001-June 2017 for the province of La Pampa as a function of the rainfall of the current season (C0), the previous season (C-1) and the two previous campaigns (C-2).

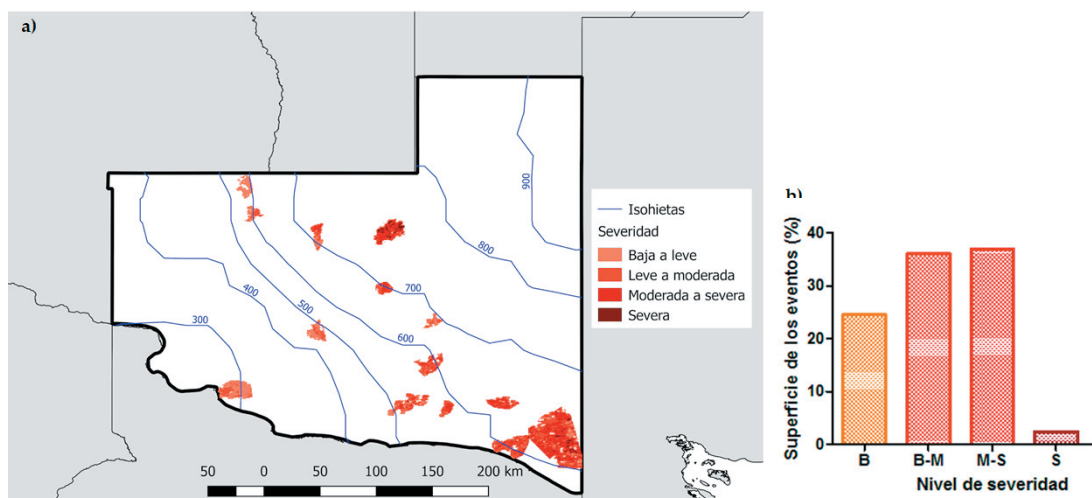


Figura 7. a) Ubicación y niveles de severidad de los eventos de incendio ≥ 10000 ha durante el período julio 2001-junio 2017 en base a la clasificación de la USGS: baja, baja a moderada, moderada a severa, severa. b) Superficie de eventos ≥ 10000 ha (%) en función de los niveles de severidad (B: baja, B-M: baja a moderada, M-S: moderada a severa, S: severa) para el período julio 2001-junio 2017.

Figure 7. a) Location and severity levels of fire events ≥ 10000 ha during the July 2001-June 2017 period based on the USGS classification: low, low to moderate, moderate to severe, severe. b) Area of events ≥ 10000 ha (%) depending on the severity levels (B: low, BM: low to moderate, MS: moderate to severe, S: severe) for the period July 2001-June 2017.

eventos), seguidos por estepas y matorrales psamófilos (~23%), bosques de algarrobo (~13%) y vegetación halófila (~0.2%).

Severidad de los grandes eventos

Los eventos de incendio más extensos se concentraron principalmente en la región centro de la provincia, lo cual representa, en conjunto, 504100 ha (Figura 7a). Se registraron 3 grandes eventos de incendio severos entre las isohietas de 600 y 800 mm (dNBR mayor a 0.66) (Figura 7a), los que ocurrieron en las campañas 2 (2002-2003) y 16 (2006-2017). La mayor parte de la superficie quemada presentó una severidad baja a moderada (35%) y moderada a severa (37%), mientras que una pequeña porción presentó niveles severos (3%) (Figura 7b).

DISCUSIÓN

Los grandes incendios, pese a que representaron solo una pequeña fracción de la totalidad de los eventos de incendio (~8%), contribuyeron de forma sustancial a la superficie quemada total (~54%). Si bien el producto MODIS utilizado de base para detectar anomalías térmicas potencialmente asociadas con eventos de incendio (MCD14DL) seguramente podría sobreestimar las dimensiones espaciales de los eventos de incendio dada su resolución espacial (1 km²), contar con información diaria de las anomalías térmicas brindó la posibilidad de delimitar e individualizar la extensión espacial de cada uno de ellos a partir de la definición de la ventana de detección espacial y temporal implementada. Si bien se dispone de otros productos satelitales, ninguno brinda información histórica con mayor resolución espacial e igual resolución temporal. Por ejemplo, el Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental (GOES, por sus siglas en inglés) provee información de anomalías térmicas con mayor resolución temporal, pero cuenta con menor resolución espacial (Xu et al. 2021). Del mismo modo, los productos Fire_cci de la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés) (Chuvieco et al. 2018) y GABAM (Long et al. 2019) brindan información de área quemada a mayor resolución espacial (250 m y 30 m, respectivamente) pero, de manera respectiva, a escala mensual y anual. Esta resolución temporal no permitiría identificar de manera clara aquellas áreas quemadas que pertenezcan a eventos sucedidos en distintos momentos.

Los resultados obtenidos, al igual que Díaz y Pons (2001), mostraron que la ocurrencia de grandes incendios explica la desigualdad en la distribución espacial de los eventos. Si bien no presentaron una tendencia clara, se observó un incremento en la cantidad de eventos grandes durante el período de análisis, que se ubicaron en su mayoría en la región central de la provincia. Esta situación particular podría deberse, por un lado, a la acumulación de biomasa de la vegetación natural al inicio de la estación de fuego, que junto con las bajas cargas ganaderas se traduciría en una cantidad vasta de combustible disponible para la ignición (Fischer 2008; Fischer et al. 2012; Starns 2019). Por otro lado, el uso de fuego como práctica de manejo (Medina 2007) puede aumentar tanto la frecuencia de incendios como la densidad y la magnitud de los eventos (Fischer 2008). Al este de La Pampa, por el contrario, la actividad de fuego fue acotada y, a su vez, no se detectaron grandes eventos de incendio. Esto puede estar vinculado a la predominancia de cultivos agrícolas (Sierra et al. 1995; Viglizzo et al. 1995), dado que ciertos autores observaron una relación negativa entre la fracción del área quemada y la fracción de la superficie agrícola en ambientes áridos y semiáridos de la Argentina (Di Bella et al. 2006; Fischer et al. 2012). En este sentido, Di Bella et al. (2006) encontraron que la agricultura disminuye la densidad de los eventos de incendio debido a prácticas de manejo que involucran la reducción del combustible disponible y a la presencia de sistemas de riego. En la región sudoeste de La Pampa, dominada por bosques de algarrobo degradados y matorrales, tampoco preponderaron los grandes eventos de incendio. A causa de las reducidas precipitaciones medias anuales (menores a 300 mm), la baja producción de biomasa y la escasa disponibilidad de combustible no es suficiente para que el fuego se propague (Archibald et al. 2008; Tropolle et al. 2002). Asimismo, la escasa productividad de la zona implica una menor actividad humana y, en consecuencia, una disminución de eventos de incendio de origen antrópico (Fischer et al. 2012).

Las precipitaciones de la campaña antecedente explicaron, en gran medida, la superficie quemada total, mostrando una relación exponencial positiva. Los resultados obtenidos en este trabajo se corresponden con lo observado por Di Bella et al. (2011), quienes sostienen que la variación interanual de los eventos de incendio está vinculada con la disponibilidad de agua durante el período

de crecimiento previo. De esta manera, la acumulación de biomasa durante la campaña de crecimiento anterior, producto de la mayor disponibilidad de agua, se traduce en una gran cantidad de combustible disponible en la estación seca de la campaña siguiente, lo que aumenta el riesgo de ocurrencia de eventos de incendio (Ortellado 2020; Romero-Ruiz et al. 2010; Vázquez 2017). De esta manera, las precipitaciones superiores al promedio en las campañas previas explicaron la ocurrencia de incendios de vastas extensiones. En este trabajo no se indagó sobre los orígenes de los eventos de incendio, aunque evidencias previas sostienen que en la región preponderan los de tipo antrópico (accidentales-intencionales) (MAyDS 2020). La quema prescripta fue reglamentada en la provincia en el año 2000 por medio del Decreto 1925 de la Ley N° 1354 (Ortellado 2020). Si bien a los fines técnicos y legales, la 'quema prescripta' se realiza con el objetivo de reducir el peligro de fuegos accidentales o espontáneos, incrementar la productividad ganadera, controlar plagas y enfermedades y mejorar el uso del agua o la calidad del hábitat de la fauna silvestre (Estelrich et al. 2005), en la práctica, su uso más frecuente es para reducir biomasa muy combustible a fin de utilizar el rebrote de las gramíneas para favorecer la actividad ganadera (Medina 2007; Ortellado 2020; Peláez and Mayor 2008). Así, los tratamientos mecánicos que reduzcan la cantidad de combustible disponible antes de realizar quemas prescriptas podrían mitigar el riesgo de ocurrencia de eventos de incendio grandes y severos (Hessburg et al. 2016; Mitchell et al. 2014; Stephens et al. 2012).

Los eventos más extensos mostraron una duración corta y una rápida velocidad de avance o propagación. Los grandes incendios están típicamente asociados con velocidades de avance rápidas, por lo cual resultan más difíciles y peligrosos de controlar (Syphard et al. 2011). Las zonas afectadas por grandes incendios se caracterizan por presentar escasas barreras físicas para evitar la propagación del fuego, dado que la región está comprendida por vastas superficies sin restricciones para el desplazamiento del ganado y, en consecuencia, para el avance del fuego (Fischer 2008). De esta manera, se torna relevante la velocidad de avance de los eventos de incendio para generar alertas tempranas que permitan garantizar el tiempo de acción necesario para actuar ante un disturbio y mermar el posible daño ocasionado, por ejemplo, en zonas

productivas dedicadas a la cría extensiva de ganado bovino. El informe técnico del área de Gestión Ambiental y Recursos Naturales del año 2017 de la unidad de INTA-Anguill registró que solo durante el período que abarcó (desde el 21 de diciembre de 2016 hasta el 2 de enero de 2017), los eventos de incendio afectaron a 70500 cabezas de ganado en la provincia de La Pampa.

Los resultados obtenidos también mostraron una variabilidad temporal marcada en la ocurrencia de eventos de incendio. Según la literatura, los meses de noviembre a marzo se caracterizan por sus altas temperaturas, fuertes vientos, baja humedad relativa y alta acumulación de material vegetal combustible (Medina 2007; MAyDS 2018; Peláez and Mayor 2008). Además, al presentar una mayor frecuencia de tormentas eléctricas convectivas, los rayos pueden generar desde igniciones aisladas poco extensas hasta eventos de incendio muy grandes (Medina 2007). Estos meses también se caracterizan por el uso de fuego antrópico como práctica de manejo (Medina 2007). Los fuegos realizados en primavera y verano se usan para inducir el rebrote de pastos y así aumentar la cobertura de especies forrajeras con fines ganadero-pastoriles (Medina 2007; Peláez and Mayor 2008). Aplicar prácticas para reducir el combustible disponible (pastoreos racionales o cortes de biomasa durante la época estival), así como crear cortafuegos, disminuye la tasa de propagación del fuego y puede contribuir a evitar la ocurrencia de grandes eventos de incendio (Di Bella et al. 2011; Fischer 2008; Moritz et al. 2014).

Los bosques xéricos del espinal meridional, situados en la región central de La Pampa, fueron el tipo de vegetación más afectado por la actividad de fuego, tal como evidenció Medina (2008) en distrito fitogeográfico de transición del Caldenal. Esta elevada actividad de fuego se podría explicar por la coexistencia de formas de crecimiento en capas o estratos (i.e., hierbas, arbustos y árboles) y por la combinación de diferentes combustibles: finos (los que por lo general dan inicio al fuego), medianos y gruesos (que arden durante más tiempo y pueden generar llamas de mayor altura) (Clarke et al. 2020; Kunst et al. 2003; Van Wagner 1987). Estas formas de crecimiento mantienen una continuidad horizontal y vertical que favorece no solo la ignición, sino también la propagación del fuego, promoviendo la quema de vastas extensiones (Fischer 2008). Estos bosques,

a su vez, mostraron los mayores niveles de severidad (moderada a severa y severa). Esto podría deberse a la mayor duración de los eventos de incendio que presentan las coberturas de especies leñosas (Mari et al. 2007), dado que el nivel de permanencia de las llamas sobre un sitio está estrechamente vinculado con el nivel del daño (Neary et al. 1999). Los bosques de algarrobo degradados y estepas y matorrales psamófilos —aunque en menor medida— también se vieron afectados por la actividad de fuego. Estudios de campo demostraron que los eventos de incendio afectan más a los bosques degradados que a los vigorosos y cerrados, ya que suelen presentar una mayor disponibilidad de combustible con bajos contenidos de humedad en las temporadas secas (Kyreh et al. 2006).

CONCLUSIONES

A partir del análisis de información espectral provista por sensores remotos a bordo de satélites se pudo caracterizar la dinámica espacial y temporal de los eventos de incendio en la provincia de La Pampa —en particular,

de los grandes— y analizar el efecto conjunto de las condiciones climáticas, el tipo de vegetación predominante y el uso del suelo como factores determinantes. La distribución espacial de los eventos de distinto tamaño mostró el papel relevante que desempeñan los grandes incendios en relación con el área quemada total; estos eventos de incendio se asociaron con el nivel de precipitaciones registrado en la campaña previa. Si bien en este trabajo no se indagaron los orígenes de los eventos de incendio, conocer sus causas podría resultar muy útil para plantear medidas de prevención e intervención. A su vez, aunque se pudo determinar la severidad con la cual los grandes incendios afectaron a los tipos de vegetación, las futuras investigaciones deberían orientarse a medir índices de severidad a campo (*Composite Burn Index*, o CBI) que permitan establecer umbrales del dNBR a escala local. De esta manera se podría generar información más precisa sobre el impacto de los incendios sobre la vegetación. A partir de los trabajos de este tipo es posible contribuir al diseño de políticas de prevención y supresión de incendios a escala provincial.

REFERENCIAS

- Agee, J. K. 1993. Fire ecology of Pacific Northwest forests. Washington, D.C. Island Press. Pp. 493.
- Argañaraz, J. P., G. G. Pizarro, M. Zak, M. A. Landi, and L. M. Bellis. 2015. Human and biophysical drivers of fires in Semiarid Chaco mountains of Central Argentina. *Science of the Total Environment* 520:1-12. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.02.081>.
- Barber, C. B., D. P. Dobkin, and H. Huhdanpaa. 1996. The quickhull algorithm for convex hulls. *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* 22(4):469-483. <https://doi.org/10.1145/235815.235821>.
- Bradstock, R. A., J. S. Cohn, A. M. Gill, M. Bedward, and C. Lucas. 2010. Prediction of the probability of large fires in the Sydney region of south-eastern Australia using fire weather. *International Journal of Wildland Fire* 18(8):932-943. <https://doi.org/10.1071/WF08133>.
- Cases, F., and D. Pombo. 2019. Evaluación de áreas afectadas por incendios forestales mediante el uso de imágenes satélites: Parque Lihué Calel (La Pampa). In XXI Jornadas de Geografía de la UNLP 9 al 11 de octubre de 2019 Ensenada, Argentina. Construyendo una Geografía Crítica y Transformadora: En defensa de la Ciencia y la Universidad Pública. Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Departamento de Geografía.
- Chuvieco, E. 2003. Wildland fire danger: estimation and mapping: the role of remote sensing data (Vol. 4). World Scientific. <https://doi.org/10.1142/5364>.
- Chuvieco, E., L. Giglio, and C. Justice. 2008. Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global Change Biology* 14(7):1488-1502. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01585.x>.
- Chuvieco, E. 2009. Earth observation of wildland fires in Mediterranean ecosystems. Dordrecht, The Netherlands: Springer. Pp. 251. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01754-4>.
- Chuvieco, E., J. Lizundia-Loiola, M. L. Pettinari, R. Ramo, M. Padilla, et al. 2018. Generation and analysis of a new global burned area product based on MODIS 250 m reflectance bands and thermal anomalies. *Earth System Science Data* 10(4):2015-2031. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2015-2018>.
- Clarke, H., T. Penman, M. Boer, G. J. Cary, J. B. Fontaine, et al. 2020. The proximal drivers of large fires: a pyrogeographic study. *Frontiers in Earth Science* 8:90. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00090>.
- Cocke, A. E., P. Z. Fulé, and J. E. Crouse. 2005. Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire* 14(2):189-198. <https://doi.org/10.1071/WF04010>.
- Dýiaz-Delgado, R., and X. Pons. 2001. Spatial patterns of forest fires in Catalonia (NE of Spain) along the period 1975-1995: analysis of vegetation recovery after fire. *Forest Ecology and Management* 147(1):67-74. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00434-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00434-5).
- Di Bella, C. M., E. G. Jobbágy, J. M. Paruelo, and S. Pinnock. 2006. Continental fire density patterns in South America. *Global Ecology and Biogeography* 15(2):192-199. <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00225.x>.

- Di Bella, C. M., M. A. Fischer, and E. G. Jobbágy. 2011. Fire patterns in north-eastern Argentina: influences of climate and land use/cover. *International Journal of Remote Sensing* 32(17):4961-4971. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.494167>.
- Di Bella, C. M., and G. Posse. 2014. Estudio y seguimiento de los incendios. Percepción remota y sistemas de información geográfica. Sus aplicaciones en Agronomía y Ciencias Ambientales. J. M. Paruelo, C. M. Di Bella y M. Milkovic (eds.). Editorial Hemisferio Sur.
- Di Bella, C. M., M. E. Beget, A. N. Campos, E. F. Viglizzo, E. G. Jobbágy, et al. 2019. Changes in vegetation seasonality and livestock stocking rate in La Pampa Province (Argentina). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo* 51(1):79-92.
- Diharce, M. C., M. Herlein, and B. Dillon. 2018. Incendios en La Pampa: un análisis en el impacto territorial (2016-2018). Como enseñar estos contenidos en la escuela secundaria. V Jornadas Nacionales de Investigación en Geografía Argentina. Tandil, Buenos Aires.
- Dimitrakopoulos, A. P., and K. K. Papaioannou. 2001. Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technology* 37(2):143-152. <https://doi.org/10.1023/A:1011641601076>.
- Eidenshink, J., B. Schwind, K. Brewer, Z. L. Zhu, B. Quayle, et al. 2007. A project for monitoring trends in burn severity. *Fire Ecology* 3(1):3-21. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0301003>.
- Escuin, S., R. Navarro, and P. Fernández. 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation 52 Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing* 29(4):1053-1073. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>.
- Fischer, M. A. 2008. Condiciones de la vegetación que favorecen la ocurrencia, propagación y duración de los incendios en la Región Semiárida Argentina. Tesis de Magister Science. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Fischer, M. A., C. M. Di Bella, and E. G. Jobbágy. 2012. Fire patterns in central semiarid Argentina. *Journal of Arid Environments* 78:161-168. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.11.009>.
- Fischer, M. D. L. A., C. M. Di Bella, and E. G. Jobbágy. 2015. Influence of fuel conditions on the occurrence, propagation and duration of wildland fires: A regional approach. *Journal of Arid environments* 120:63-71. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.04.007>.
- Gastwirth, J. L. 1972. The estimation of the Lorenz curve and Gini index. *The Review of Economics and Statistics* 306-316. <https://doi.org/10.2307/1937992>.
- Giglio, L., J. Desloitures, C. O. Justice, and Y. J. Kaufman. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment* 87(2-3):273-282. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00184-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00184-6).
- Giglio, L., J. T. Randerson, G. R. Van der Werf, P. S. Kasibhatla, G. J. Collatz, et al. 2010. Assessing variability and long-term trends in burned area by merging multiple satellite fire products. *Biogeosciences* 7(3). <https://doi.org/10.5194/bg-7-1171-2010>.
- Gill, A. M., and G. Allan. 2009. Large fires, fire effects and the fire-regime concept. *International Journal of Wildland Fire* 17(6):688-695. <https://doi.org/10.1071/WF07145>.
- Glave, A. 2006. Influencia climática en el sudoeste bonaerense y sudeste de La Pampa. *ACAECER Revista de la Asociación de Cooperativas Argentinas* 31(360).
- Hardy C. C., D. L. Brunnell, J. P. Menakis, K. M. Schmidt, D. G. Long, et al. 1999. Coarse-scale spatial data for wildland fire and fuel management. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fire Sciences Laboratory.
- Heip, C., and P. Engels. 1974. Comparing Species Diversity and Evenness Indices. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 54(03):559. <https://doi.org/10.1017/S0025315400022748>.
- Hessburg, P. F., T. A. Spies, D. A. Perry, C. N. Skinner, A. H. Taylor, et al. 2016. Tamm review: management of mixed-severity fire regime forests in Oregon, Washington, and Northern California. *Forest Ecology and Management* 366: 221-250. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.034>.
- Ibañez, J. J., S. De-Albs, F. F. Bermúdez, and A. García-Álvarez. 1995. Pedodiversity: concepts and measures. *Catena* 24(3):215-232. [https://doi.org/10.1016/0341-8162\(95\)00028-Q](https://doi.org/10.1016/0341-8162(95)00028-Q).
- INTA, U. 1980. Inventario integrado de los recursos naturales de la Provincia de La Pampa: clima, geomorfología, suelo y vegetación. INTAU. N. de La Pampa.
- INTA. 2017. Informe técnico: Incendios en la provincia de La Pampa 02/01/2017 - 10/01/2017. Estado de Situación. INTA. EEA Anguil. Área de Gestión Ambiental y Recursos Naturales. URL: tinyurl.com/3udf4tke.
- IPCC. 2022. Summary for Policymakers. Pp. 3-33 *en* H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller and A. Okem (eds.). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009325844.001>.
- Kunst, C. R., S. Bravo, and J. L. Panigatti (eds.). 2003. Fuego: En los Ecosistemas Argentinos. INTA. EEA. Santiago del Estero.
- Kyereh, B., R. Ninnoni, and V. K. Agyeman. 2006. Degraded forests are more susceptible to forest fires: Some possible ecological explanations. *Journal of Science and Technology (Ghana)* 26(2):40-47. <https://doi.org/10.4314/jst.v26i2.32987>.
- Long, T., Z. Zhang, G. He, W. Jiao, C. Tang, et al. 2019. 30 m resolution global annual burned area mapping based on Landsat Images and Google Earth Engine. *Remote Sensing* 11(5):489. <https://doi.org/10.3390/rs11050489>.
- Marcos, R., M. Turco, J. Bedía, M. C. Llasat, and A. Provenzale. 2015. Seasonal predictability of summer fires in

- a Mediterranean environment. *International Journal of Wildland Fire* 24(8):1076-1084. <https://doi.org/10.1071/WF15079>.
- Mari, N., C. Di Bella, M. D. L. A. Fischer, and F. Ferrer. Respuesta Espectral de la vegetación quemada para distintos Ecosistemas de la Argentina. XII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Mar del Plata, Argentina.
- Martin, R. E., and J. B. L. Kauffman. 1989. Use of prescribed fire to reduce wildfire potential. Pp. 17-22 *en* N. H. Berg (coord.). Proceedings of the Symposium on Fire and Watershed Management: October 26-28, 1988, Sacramento, California. Gen. Tech. Rep. PSW-109. Berkeley, Calif.: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. Vol. 109.
- Martínez, J., C. Vega-García, and E. Chuvieco. 2009. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management* 90(2):1241-1252. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.005>.
- McWethy, D. B., T. Schoennagel, P. E. Higuera, M. Krawchuk, B. J. Harvey, et al. 2019. Rethinking resilience to wildfire. *Nature Sustainability* 2(9):797-804. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0353-8>.
- Medina, A. A. 2007. Reconstrucción de los regímenes de fuego en un bosque de *Prosopis caldenia*, provincia de La Pampa, Argentina. *Bosque (Valdivia)* 28(3):234-240. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002007000300008>.
- Medina, A. A. 2008. Cicatrices de fuego en el leño de *Prosopis caldenia* en Luán Toro, provincia de La Pampa, Argentina. *Bosque (Valdivia)* 29(2):115-119. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002008000200003>.
- Medus, N. B., H. A. Alfageme, A. Socolovsky, M. S. Poey, E. B. Martín, et al. 2008. El desarrollo local en la gestión del territorio: La sinergia entre lo agropecuario y el Caldenal. Departamento Loventué, La Pampa, Argentina.
- Meyn, A., P. S. White, C. Buhk, and A. Jentsch. 2007. Environmental drivers of large, infrequent wildfires: the emerging conceptual model. *Progress in Physical Geography* 31(3):287-312. <https://doi.org/10.1177%2F0309133307079365>.
- Miller, J. D., and A. E. Thode. 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment* 109(1):66-80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2016. Informe Nacional de Peligro de Incendios de Vegetación 2016. Programa de Evaluación de Peligro y Alerta Temprana Coordinación de Desarrollo Técnico Servicio Nacional de Manejo del Fuego Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. URL: <https://zdocs.mx/doc/informe-nacional-de-peligro-de-incendios-de-vegetacion-7p4m24rdr5pj>.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2018. Áreas afectadas por incendios forestales y rurales en la región pampeana y noreste de la región patagónica durante la temporada 2016-2017. URL: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ambiente-it13_incendios_2016-2017.pdf.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2020. Datos Abiertos de Ambiente y Desarrollo Sostenible. URL: datos.ambiente.gob.ar/dataset.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. 2022. Servicio Nacional de Manejo del Fuego. URL: argentina.gob.ar/ambiente/manejo-del-fuego.
- Mitchell, R. J., Y. Liu, J. J. O'Brien, K. J. Elliott, G. Starr, et al. 2014. Future climate and fire interactions in the southeastern region of the United States. *Forest Ecology and Management* 327:316-326. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.12.003>.
- Morgan, J. 1962. The anatomy of income distribution. *The Review of Economics and Statistics* 44(3):270-283. <https://doi.org/10.2307/1926398>.
- Moritz, M. A., E. Batllori, R. A. Bradstock, A. M. Gill, J. Handmer, et al. 2014. Learning to coexist with wildfire. *Nature* 515(7525):58-66. <https://doi.org/10.1038/nature13946>.
- Nasi, R., R. Dennis, E. Meijaard, G. Applegate, and P. Moore. 2002. Los incendios forestales y la diversidad biológica. Unasylva (FAO).
- Neary, D. G., K. C. Ryan, and L. F. DeBano. 2005. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 4:250. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-42-V4>.
- Ortellado, M. R. 2020. Incendios, inundaciones y sequías en la pampa entre 1998 y 2018. Una mirada desde la perspectiva del riesgo y desastre ambiental. *Semiárida* 30(2):19-36. [https://doi.org/10.19137/semiarida.2020\(02\).19-36](https://doi.org/10.19137/semiarida.2020(02).19-36).
- Oyarzabal, M., J. Clavijo, L. Oakley, F. Biganzoli, et al. 2018. Unidades de vegetación de la Argentina. *Ecología austral* 28(1):040-063. <https://doi.org/10.25260/EA.18.28.1.0.399>.
- Peláez, D. V., M. D. Mayor, and O. R. Elia. 2008. Ecología y manejo del fuego en el Caldenal. *AgroUNS* 5(9):14-17.
- Peters, D. P., R. A. Pielke, B. T. Bestelmeyer, C. D. Allen, S. Munson-McGee, et al. 2004. Cross-scale interactions, nonlinearities, and forecasting catastrophic events. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 101(42):15130-15135. <https://doi.org/10.1073/pnas.0403822101>.
- Pielou, E. C. 1966. The measurement of diversity in different types of biological collections. *J Theor Biol* 13:131-144. [https://doi.org/10.1016/0022-5193\(66\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0022-5193(66)90013-0).
- Pausas, J. G., and J. E. Keeley. 2021. Wildfires and global change. *Frontiers in Ecology and the Environment* 19(7):387-395. <https://doi.org/10.1002/fee.2359>.
- Pla, L. 2006. Biodiversidad: Inferencia basada en el índice de Shannon y la riqueza. *Inter ciencia* 31(8):583-590. URL: redalyc.org/articulo.oa?id=33911906.
- Reisen, F., S. M. Duran, M. Flannigan, C. Elliott, and K. Rideout. 2015. Wildfire smoke and public health risk. *International Journal of Wildland Fire* 24(8):1029-1044. <https://doi.org/10.1071/WF15034>.
- Roberto, Z., E. Adema, and T. Rucci. 2005. Relevamiento fisonómico de la vegetación en el área del Caldenal. INTA

- EEA Anguil. Publicación Técnica N° 60.
- Roberto, Z., E. Frasier, P. Goyeneche, F. González, and E. Adema. 2009. Evolución de la carga animal en la provincia de La Pampa. Publicación Técnica (74):1-26.
- Romero-Ruiz, M., A. Etter, A. Sarmiento, and K. Tansey. 2010. Spatial and temporal variability of fires in relation to ecosystems, land tenure and rainfall in savannas of northern South America. *Global Change Biology* 16(7):2013-2023. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02081.x>.
- Roy, D. P., L. Boschetti, and S. N. Trigg. 2006. Remote sensing of fire severity: assessing the performance of the normalized burn ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 3(1):112-116. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2005.858485>.
- Sayre, R., J. Dangermond, C. Frye, R. Vaughan, P. Aniello, et al. 2014. A new map of global ecological land units—an ecophysiological stratification approach. Washington, DC: Association of American Geographers.
- Schmidt, I. B. 2021. Managing Fire to Avoid Wildfires in Fire-prone Ecosystems (No. EGU21-10273). Copernicus Meetings. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-10273>.
- Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 2007. Primer inventario nacional de bosques nativos. Segunda etapa: inventario de campo de la región espinal distritos Caldén y Ñandubay. 1a ed. Pp. 154.
- Shannon, C. E., and W. Weaver. 1949. The mathematical theory of communication. Univ. Illinois Press, Urbana. Pp. 117.
- Sierra, E. M., M. Conde Prat, and S. I. L. V. I. A. Pérez. 1995. La migración de cultivos de granos como indicador del cambio climático 1941-93 en la Región Pampeana Argentina. *Rev Fac Agr* 15(2-3):171-176.
- Starns, H. D., S. D. Fuhlendorf, R. D. Elmore, D. Twidwell, E. T. Thacker, et al. 2019. Recoupling fire and grazing reduces wildland fuel loads on rangelands. *Ecosphere* 10(1):e02578. <https://doi.org/10.1002/ecs2.2578>.
- Stephens, S. L., J. D. McIver, R. E. Boerner, C. J. Fettig, J. B. Fontaine, et al. 2012. The effects of forest fuel-reduction treatments in the United States. *BioScience* 62(6):549-560. <https://doi.org/10.1525/bio.2012.62.6.6>.
- Stocks, B. J., J. A. Mason, J. B. Todd, E. M. Bosch, B. M. Wotton, et al. Skinner. 2002. Large forest fires in Canada, 1959-1997. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 107(D1). <https://doi.org/10.1029/2001JD000484>.
- Sugihara, N. G., J. W. van Wagtenonk, K. E. Shaffer, J. Fires-Kaufmann, and A. E. Thode (eds.). 2006. Fire in California ecosystems Berkeley, CA: University of California Press. Pp. 596.
- Van Wagner, C. E. 1987. Development and structure of the Canadian forest fire weather index system (Vol. 35). Ottawa: Canadian Forestry Service.
- Vázquez, P. 2017. Prevención de Incendios en la región árida - semiárida aledaña al río Colorado: pronóstico temprano de peligrosidad. Período diciembre 2017 - marzo 2018. INTA. URL: tinyurl.com/bdebnr8m.
- Viegas, D. X. 2007. Climate, Man and forest fires. *Elements for Life* 148-149.
- Viglizzo, E. F., Z. E. Roberto, M. C. Filippin, and A. J. Pordomingo. 1995. Climate variability and agroecological change in the Central Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 55(1):7-16. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(95\)00608-U](https://doi.org/10.1016/0167-8809(95)00608-U).
- Vivalda, F. L. 2020. Efecto del fuego sobre la estructura y densidad de leñosas del bosque de *Prosopis caldenia* (Burkart) en La Pampa, Argentina. Tesis de maestría. Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de La Pampa, Argentina.
- Williams, J. 2013. Exploring the onset of high-impact mega-fires through a forest land management prism. *Forest Ecology and Management* 294:4-10. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.030>.
- Wooster, M. J., G. J. Roberts, L. Giglio, D. P. Roy, and P. H. Freeborn, et al. 2021. Satellite remote sensing of active fires: History and current status, applications and future requirements. *Remote Sensing of Environment* 267:112694. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112694>.
- Xu, W., M. J. Wooster, J. He, and T. Zhang. 2021. Improvements in high-temporal resolution active fire detection and FRP retrieval over the Americas using GOES-16 ABI with the geostationary Fire Thermal Anomaly (FTA) algorithm. *Science of Remote Sensing* 3:100016. <https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100016>.
- Yitzhaki, S. 1983. On an extension of the Gini inequality index. *International Economic Review* 24(3):617-628. <https://doi.org/10.2307/2648789>.