

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

**Evaluación de la severidad del fuego en la Reserva para Parque Nacional San Rafael, del
paisaje del Bosque Atlántico del Alto Paraná, Paraguay**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de Posgrado
como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

Paula Alejandra Paniagua Rodas

Turrialba, Costa Rica

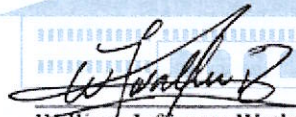
2023

Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero de la estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

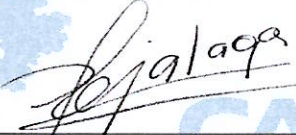
División de Educación

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

FIRMANTES:



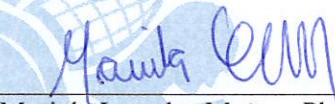
William Jefferson Watler Reyes
William Jefferson Watler Reyes, M.Sc.
Codirector de tesis



Larissa Rejalaga Noguera, M.Sc.
Codirectora de tesis



Cristina Vidal Riveros, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Mariela Leandro Muñoz, Ph.D.
Decana, a.i. Escuela de Posgrado



Paula Alejandra Paniagua Rodas
Candidata

Dedicatoria

A Dios y a la Virgen María, por darme la bendición de cumplir uno de mis más grandes sueños, por darme salud, fortaleza y sabiduría para esta inolvidable etapa de mi vida.

A mis padres, Claudia Rodas y Julio Paniagua, que con su apoyo y confianza me han impulsado a cumplir cada uno de mis sueños, con su ejemplo me han enseñado los valores más importantes que los llevo conmigo cada día de mi vida, con su amor incondicional han hecho que a pesar de la distancia los haya sentido cerca en cada momento de mi estadía en el CATIE.

A mi amada hija Sol Agustina, por ser mi mejor amiga, por darme todo su amor y regalarme su alegría cada día, por alegrar mis días difíciles y por hacerme sentir tan bendecida y feliz de tenerla aquí conmigo durante toda la Maestría.

A mi esposo, Guido Chaparro, por ser mi fiel compañero, por acompañarme cada día, noche y largas madrugadas de estudios, por enseñarme a ser fuerte y valiente ante cualquier situación, y por sobre todas las cosas, por amarme y darme su apoyo desde el día uno de este proceso.

A mi tío Jorge, abuelo Rodas, tía Rosita, por ser mis mayores ejemplos, por motivarme con sus incomparables e históricas trayectorias, por ser luz en el mundo de la investigación.

A mi familia, por el apoyo y el amor incondicional que atraviesa distancias.

Agradecimientos

A mis codirectores de tesis William Watler y Larissa Rejalaga, por la confianza, la dedicación, paciencia, las enseñanzas en este proceso de formación. Por la amistad y el apoyo, estaré siempre muy agradecida.

A la Ing. Cristina Vidal, por sus valiosas enseñanzas, su apoyo y confianza puesta en mí desde el primer día, además de la grandiosa amistad que tenemos.

A la coordinadora de la maestría, PhD. Laura Benegas, por la oportunidad y confianza.

Al Director, PhD Muhammad Ibrahim, por el apoyo y el interés en el bienestar de mi familia.

Al profesor Alejandro Imbach, por sus valiosas e impecables clases, por compartir sus experiencias y conocimientos.

A Eduardo Corrales y Sergio Vílchez, por el apoyo con los análisis estadísticos y por la paciencia de siempre.

Al proyecto Restauración, por el apoyo económico para hacer posible mi estadía, estudios y tesis en el CATIE.

A mis compañeros por todos los momentos inolvidables que quedarán por siempre en mi corazón.

Índice

1. Introducción	1
2. Materiales y Métodos	2
2.1 Área de estudio.....	2
2.2 Descripción del área de estudio	3
2.3 Proceso metodológico	5
2.3.1 Cálculo de índices espectrales.....	7
2.3.2 Estimación del índice CBI	8
2.3.3 Correlación del índice dNBR y CBI	9
3. Resultados	9
3.1- Determinación de las áreas afectadas por el fuego mediante la utilización de sensores remotos.....	9
3.2- Estimación de las áreas afectadas por el fuego mediante el índice CBI.....	12
3.3- Correlación del índice dNBR y el índice CBI	13
4. Discusión	14
5. Conclusión	16
6. Bibliografía	17

Índice de cuadros

Cuadro 1. Clasificación de los niveles de severidad del índice dNBR.	8
Cuadro 2. Modelos de regresión.	9

Índice de figuras

Figura 1. a) Ubicación de la Reserva para Parque Nacional San Rafael, del paisaje del Bosque Atlántico del Alto Paraná, abarcando los departamentos de Caazapá e Itapúa. b) Zona de estudio dentro de la Reserva para Parque Nacional San Rafael.	3
Figura 2. Mapa de uso actual de la propiedad Kanguery perteneciente a la ONG Guyra Paraguay.....	4
Figura 3. Mapa de distribución de las comunidades indígenas dentro de la RPNSR.....	5
Figura 4. Flujo de trabajo del método.	7
Figura 5. (a) Mapa resultante del índice NBR previo. (b) Mapa resultante del índice NBR posterior (dNBR).....	10
Figura 6. (a) Variación de los valores del índice NBR previo y posterior en los sitios muestreados. (b) Imagen de la vegetación afectada con severidad alta. (c) Imagen de la vegetación afectada con severidad baja. (d) Imagen de la vegetación sin incendio.	11
Figura 7. Mapa del índice dNBR del área de estudio, ubicada en la propiedad Kanguery, de la ONG Guyra Paraguay.	11
Figura 8. Mapa del índice dNBR y las áreas afectadas por incendios en el mes de febrero de acuerdo al tipo de uso actual de la tierra del área de estudio, la propiedad Kanguery, de la ONG Guyra Paraguay.	12
Figura 9. (a) Relación de comparación del índice CBI y los estratos. (b) Afectación a nivel de sustratos. (c) Arbustos bajos afectados. (d) El dosel afectado.	13
Figura 10. (a) Relación del índice dNBR y el índice CBI. (b) Asociación categórica entre las variables del índice dNBR y el índice CBI.	14

Lista de acrónimos

<i>BAAPA</i>	Bosque Atlántico del Alto Paraná
<i>BAI</i>	Índice de Área Calcinada
<i>CATIE</i>	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
<i>CBI</i>	Índice Compuesto de Áreas Quemadas
<i>dNBR</i>	Diferencial de Índice Normalizado de Áreas Quemadas
<i>GPS</i>	Sistema de Posicionamiento Global
<i>Ha</i>	Hectárea
<i>Km</i>	Kilómetro
<i>Km²</i>	Kilómetro cuadrado
<i>MADES</i>	Ministerio del Ambiente y Desarrollo Sostenible
<i>mm.</i>	Milímetro
<i>m.</i>	Metros
<i>MODIS</i>	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
<i>NDVI</i>	Normalized Difference Vegetation Index
<i>NBR</i>	Índice Normalizado de Áreas Quemadas
<i>NIR</i>	Infrarrojo cercano
<i>OLI</i>	Operational Land Imagen
<i>QGIS</i>	QuatumGIS
<i>RPNSR</i>	Reserva para Parque Nacional San Rafael
<i>SWIR</i>	Infrarrojo de onda corta
<i>UTM</i>	Universal Transverse Mercator

Evaluación de la severidad del fuego en la Reserva para Parque Nacional San Rafael, del paisaje del Bosque Atlántico del Alto Paraná, Paraguay

Paula Alejandra Paniagua Rodas ¹

¹ Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza- CATIE; Turrialba, Costa Rica
paula.paniagua@catie.ac.cr

Resumen: Dado que existen escasos estudios sobre incendios forestales en Paraguay, se evaluó la severidad del fuego en la Reserva para Parque Nacional San Rafael, del paisaje del Bosque Atlántico del Alto Paraná, con el objetivo de demostrar la utilidad del índice dNBR para la obtención de información sobre los efectos del fuego en la vegetación. Se determinaron las áreas afectadas por el fuego utilizando los índices NBR y dNBR (NBR previo/NBR posterior) para el evento de fuego más reciente (febrero del 2023). Se estimó la severidad del fuego utilizando el índice CBI, el cual cuantifica las características específicas de la vegetación en dos estratos (sotobosque y dosel) a través de observaciones visuales. El muestreo se realizó mediante la utilización del formulario del índice CBI, con muestras de 60 parcelas de 30 m de diámetro, distribuidas estratificadamente según los niveles de severidad. Los resultados obtenidos del índice dNBR se correlacionaron con el CBI, mostrando una respuesta de regresión lineal positiva con un coeficiente de determinación (R^2) del 85%. Este hallazgo demuestra la utilidad del índice de severidad del fuego (dNBR) para evaluar los daños causados por los incendios forestales y sus efectos en la vegetación de la Reserva para Parque Nacional San Rafael.

Palabras clave: severidad, incendios forestales, NBR, dNBR, CBI.

Abstract: Since there are few studies on forest fires in Paraguay, fire severity was evaluated in the San Rafael National Park Reserve, in the Upper Paraná Atlantic Forest landscape, with the objective of demonstrating the usefulness of the dNBR index for obtaining information on the effects of fire on vegetation. The areas affected by fire were determined using the NBR and dNBR (NBR pre/NBR post) indices for the most recent fire event (February 2023). Fire severity was estimated using the CBI index, which quantifies specific vegetation characteristics in two strata (understory and canopy) through visual observations. Sampling was carried out using the CBI index form, with samples from 60 plots of 30 m diameter, stratified according to severity levels. The results obtained from the dNBR index were correlated with the CBI, showing a positive linear regression response with a coefficient of determination (R^2) of 85%. This finding demonstrates the usefulness of the fire severity index (dNBR) to evaluate the damage caused by forest fires and their effects on the San Rafael National Park Reserve vegetation.

Key words: severity, wildfires, NBR, dNBR, CBI.

1. Introducción

Los incendios forestales, tanto de origen natural como antrópico, se propagan a través de la vegetación (combustible), que pueden ser zonas boscosas, pastizales, humedales, matorrales entre otros, donde la inflamabilidad aumenta en épocas de sequías prolongadas (más de una estación sin lluvias), debido a que se alteran considerablemente las características físicas, químicas y bióticas (como los nutrientes y retención de agua) y la desecación de la hojarasca de la vegetación (Asner y Alencar 2010; Pausas 2012; Sánchez et al. 2021).

Además de afectar la biodiversidad, los incendios forestales tienen impactos socioeconómicos y contribuyen significativamente al calentamiento global, al incrementar las emisiones de gases de efecto invernadero y, en consecuencia, elevan la temperatura general del planeta y provocan eventos climáticos extremos (Cochrane 2009). En el 2019, se liberaron 7.800 millones de toneladas de dióxido de carbono (CO₂) a nivel mundial, lo que indica un aumento del 26% en las emisiones provenientes de incendios forestales en comparación con años anteriores (Hernández 2020).

Los incendios forestales son fenómenos que pueden estudiarse a través de sus características principales como la intensidad, frecuencia y severidad. Este estudio se centra específicamente en la severidad, que se refiere a la cantidad de daño ocasionado por el fuego y el tiempo necesario transcurrido para que el ecosistema se recupere y vuelva a su estado natural o estado anterior al incendio (Ice et al. 2004). La regeneración posterior al incendio está relacionada con la severidad, por lo tanto, es fundamental mapearla para comparar la vegetación afectada en diferentes periodos (pasado y presente) y para identificar áreas con mayor riesgo de ocurrencia. Esto es útil para la toma de decisiones con respecto a la gestión y prevención de incendios (Morgan et al. 2001; Bran et al. 2007; Vega et al. 2010; Pausas y Keeley 2014).

En Sudamérica, la mayor área afectada por los incendios forestales proviene del cambio del uso del suelo por la actividad antrópica (Martino 2007). Se han realizado diversos estudios (Alves y Pérez 2017; Armenteras et al. 2020; Leszczuk et al. 2022) relacionados con los incendios forestales, utilizando sensores remotos como una herramienta eficaz para obtener informaciones biofísicas de interés, antes, durante y después de un incendio específico. En el sur de la provincia de Buenos Aires, se realizó un estudio (Delegido et al. 2018) sobre la severidad de un incendio ocurrido en diciembre del 2016, utilizaron índices espectrales NDVI, NBR y la combinación de ambos para la estimación de la severidad en el terreno utilizaron el CBI. Se encontró una alta correlación entre los resultados del terreno y los datos del índice dNBR, resaltando la capacidad de las imágenes de Sentinel-2 y Landsat-8 como capaces de estimar la severidad de los incendios y la recuperación de la vegetación. En Paraguay se realizó un estudio (Martín y Rejalaga 2010) en la Reserva de la Biosfera del Gran Chaco, donde se identificaron las áreas quemadas del año 2004, con la utilización de imágenes satelitales del sensor MODIS, se procesaron y calcularon índices espectrales concluyendo que el índice BAI fue el más adecuado para la identificación de áreas quemadas en zonas pantanosas y de suelos desnudos. En el mismo país, se realizó un estudio (Zimmermann et al. 2021) sobre la dinámica de los incendios forestales del año 2007 al año 2017 en la Reserva para Parque Nacional San Rafael ubicada en la ecorregión del BAAPA. Se utilizaron imágenes satelitales para identificar los focos de calor, y se obtuvo que los meses de mayor ocurrencia de incendios van desde junio a noviembre, siendo julio el mes con la mayor cantidad de focos de calor, sin embargo, se determinó que la incidencia de los incendios no estaba relacionada con el régimen pluviométrico, atribuyéndose las causas a actividades

antropogénicas. A raíz de estos hallazgos, se realizó un plan de prevención y control de incendios forestales para la reserva en cuestión.

La ecorregión del BAAPA alberga los fragmentos de bosques más extensos, con una gran cantidad de biomasa y abarcando las laderas occidentales de la Serra do Mar en Brasil, la provincia de Misiones de Argentina y el este de Paraguay, con un área original de 471.204 km². Esta ecorregión es considerada la más amenazada, ya que conserva el 7,4% de su cobertura forestal original, lo que la convierte en una prioridad para la conservación a nivel nacional; asimismo, es hogar de más del 58% de las aves documentadas en el Paraguay (Zimmermann et al. 2021; Di Bitetti et al. 2003).

La Reserva para Parque Nacional San Rafael (RPNSR) desempeña un papel crucial en la conservación de la biodiversidad y los servicios ecosistémicos en la ecorregión del BAAPA, ya que alberga una amplia variedad de especies endémicas y en peligro de extinción, y tiene una gran importancia para la conectividad de los fragmentos de bosque remanente. Asimismo, presenta diversas amenazas, como la caza furtiva de fauna silvestre, extensión ganadera, conflictos relacionados con los derechos de propiedad, ocurrencia de incendios forestales, entre otros, que conllevan a una degradación de la vegetación (Amarilla et al. 2019).

Cabe mencionar que la información disponible sobre la ocurrencia de incendios forestales en Paraguay es bastante escasa, sin embargo, existen datos sobre su origen, basados en las causas consideradas regionalmente, como el uso del fuego destinada a la limpieza de terrenos, el manejo de pasturas, la caza de animales silvestres o la colecta de miel, asimismo, gran parte de la información existente se basa en reportes de focos de calor (Alvear 2008; Molinas y Florentín 2021).

De esta manera, los Sistemas de Información Geográfica permiten la utilización de imágenes de satélites, que favorecen la evaluación y el mapeo de las áreas quemadas y es útil para contrastar índices de severidad de incendios. Cabe resaltar que, la estimación de los índices de severidad en zonas de difícil acceso ayuda a reducir periodos necesarios para la toma de datos de campo. En la investigación utilizamos los índices espectrales “*Normalized Burn Ratio*” (NBR), que utiliza dos bandas del infrarrojo y el “*delta Normalized Burn Ratio*” (dNBR) que se basa en la diferencia del NBR previo al incendio y NBR posterior al incendio para determinar el daño causado por el fuego en la vegetación (Parsons 2003; Key y Benson 2006; Escuin et al. 2008; Arellano et al. 2017).

La presente investigación evaluó la severidad del fuego en la Reserva para Parque Nacional San Rafael del paisaje del Bosque Atlántico del Alto Paraná en las áreas afectadas por el fuego. Se utilizaron los índices NBR y dNBR para estimar la severidad del fuego basada en el índice CBI. Por último, se correlacionaron los resultados obtenidos del índice dNBR con el CBI.

2. Materiales y Métodos

2.1 Área de estudio

Dentro de la ecorregión del Bosque Atlántico del Alto Paraná se encuentra la Reserva para Parque Nacional San Rafael, ubicada en los Departamentos de Caazapá e Itapúa (Figura 1a). La reserva abarca los distritos de San Pedro del Paraná, Alto Verá, Itapúa Poty y Tavai, y tiene una

extensión de 74.800 ha (García Calabrese et al. 2018). El área de estudio se encuentra en la propiedad Kanguery, que pertenece a la ONG Guyra Paraguay, abarcando una superficie de 8.068 ha con un buffer de 2 km (Figura 1b).

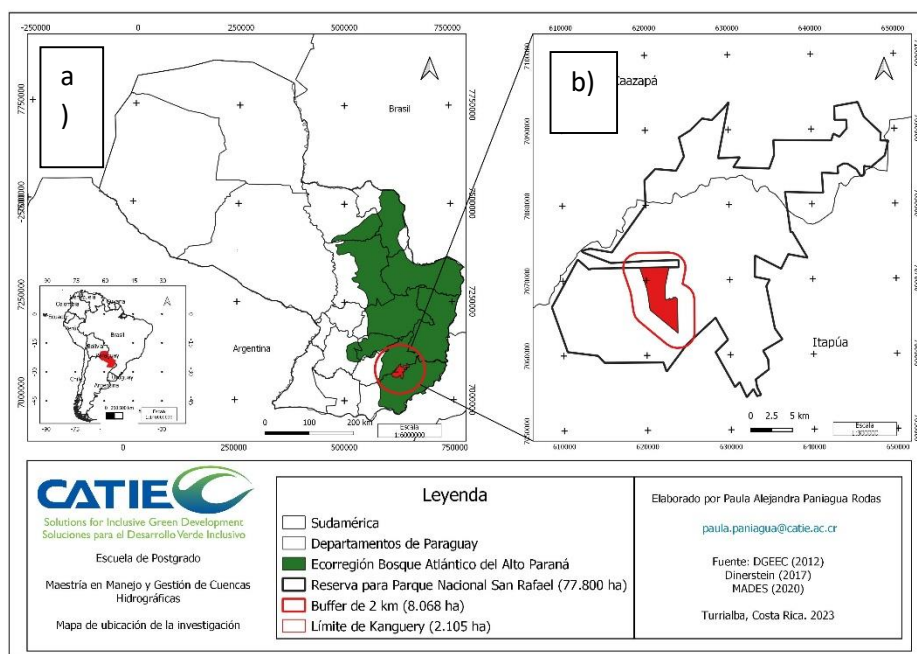


Figura 1. a) Ubicación de la Reserva para Parque Nacional San Rafael, del paisaje del Bosque Atlántico del Alto Paraná, abarcando los departamentos de Caazapá e Itapúa. b) Zona de estudio dentro de la Reserva para Parque Nacional San Rafael (Decreto N°13.680/92), la propiedad Kanguery que forma parte del Complejo de Reservas Guyra Reta, de la ONG Guyra Paraguay, con un buffer de 2 km, con el objetivo de abarcar las áreas afectadas por los incendios del mes de febrero dentro del sitio y en sus inmediaciones.

2.2 Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra en la cuenca alta del río Tebicuary y presenta una amplia red de drenaje, donde el río Tebicuary presenta una extensión aproximada de 500 km, desemboca en el río Paraguay y se encuentra en el límite de la RPNSR. Los principales arroyos son Kanguery, Karumbey, Tajy, Jhu, y Benítez (CEAMSO 2020). El arroyo Kanguery atraviesa a la propiedad Kanguery y tiene una longitud de 16,9 km aproximadamente.

En el área de estudio, la cobertura predominante es el bosque (5.106,09 ha), que se presenta en distintas formas de degradación, incluyendo a los bosques en isletas. Los humedales comprenden 2.321,93 ha con pastizales y arbustos bajos (CEAMSO 2020). Se ha denominado otros usos, a las zonas destinadas al uso agropecuario y los asentamientos abarcando 644,94 ha como se presenta en la Figura 2.

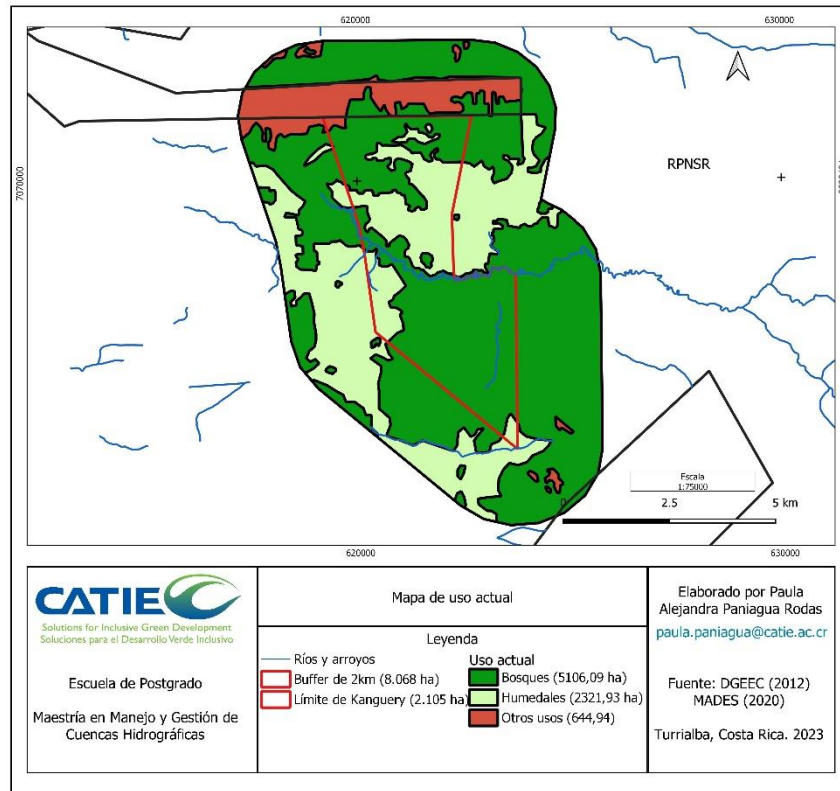


Figura 2. Mapa de uso actual de la propiedad Kanguery perteneciente a la ONG Guyra Paraguay. Los bosques abarcan el 63,25 % del área de estudio, los humedales el 28,76 % y otros usos el 7,99 %.

La temperatura de la región es variable. Los meses de verano de diciembre a marzo registran temperaturas extremas que pueden alcanzar los 42°C. Por otro lado, durante los meses de invierno de mayo a agosto, las temperaturas disminuyen por debajo de 0°C. En cuanto a la precipitación anual, se estima que oscila entre los 1.300 a 1.800 mm (Da Ponte et al. 2017).

El BAAPA se caracteriza por su riqueza de diversidad biológica y por presentar un alto grado de endemismo. En cuanto a la flora, se caracteriza por la presencia de flora paranaense o lautiflora, y la flora semicaducifolia del Pleistoceno, que se extiende desde la Región Oriental del país hasta el Chaco Húmedo, mientras que el estrato arbóreo superior es caducifolio en su mayoría (Cartes 2006).

La RPNSR alberga diferentes tipos de vegetación, como el bosque primario que se caracteriza por árboles mayores a 20 metros de altura con dosel cerrado y el sotobosque abierto. Estos bosques presentan cierto grado de degradación y son afectados por las actividades antrópicas, de la misma manera, se menciona la existencia de los bosques ribereños en la reserva. Los matorrales se presentan entre los bosques y pastizales, y se caracterizan por la presencia de arbustos bajos. Y los humedales que se caracterizan por tener suelos anegados con presencia de gramíneas y son los más afectados por incendios (Esquivel et al. 2007).

En la RPNSR se encuentran ubicadas 25 comunidades indígenas, la mayoría de ellas pertenecen a la familia Guaraní y Pueblo Mbya, con un total aproximado de 315 familias, ocupando una

superficie total de 14.198,23 ha. La distribución de estas comunidades dentro de la RPNSR se muestra en la Figura 3 (FAPI 2017).

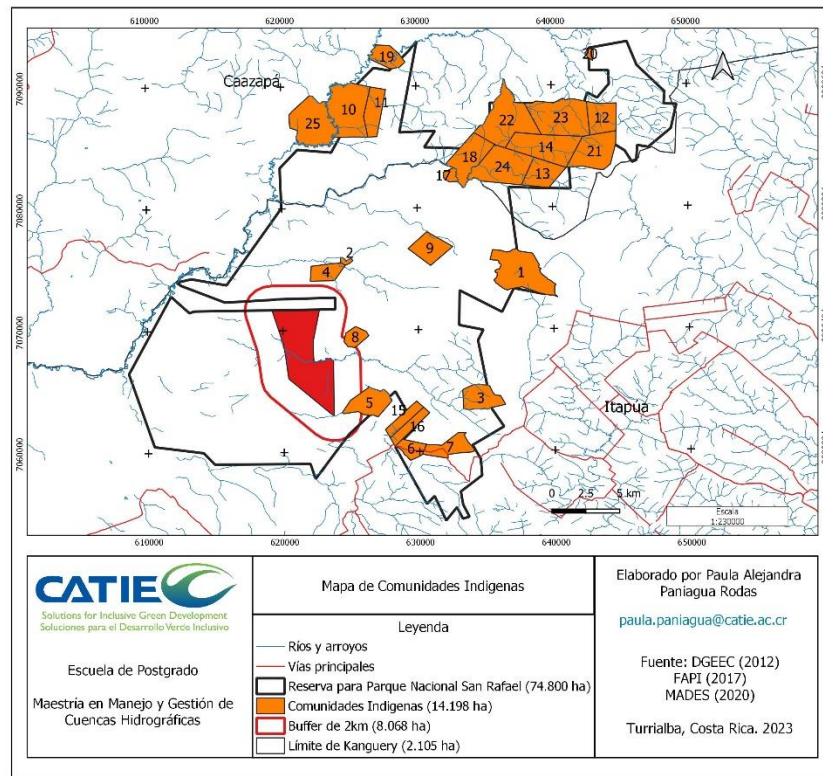


Figura 3. Mapa de distribución de las comunidades indígenas dentro de la RPNSR. Las comunidades indígenas 5 “Cerrito” (199,45 ha) y 8 “Arroyo Moroti” (538,47 ha), se sitúan a aproximadamente 650 m y 1.600 m, respectivamente, de la propiedad Kanguery, abarcando parte del buffer de 2 km de la zona de estudio.

2.3 Proceso metodológico

El proceso metodológico propuesto se resume en la Figura 4, aplicado en la propiedad Kanguery, que pertenece a la ONG Guyra Paraguay de la Reserva para Parque Nacional San Rafael, del paisaje del Bosque Atlántico del Alto Paraná. Se basó en el uso de los índices espectrales NBR y dNBR mediante la plataforma Google Earth Engine, el índice CBI a campo, con la utilización de un formulario (Key y Benson 2006), y la correlación de los valores del índice dNBR y el CBI mediante la utilización de la herramienta Infostat.

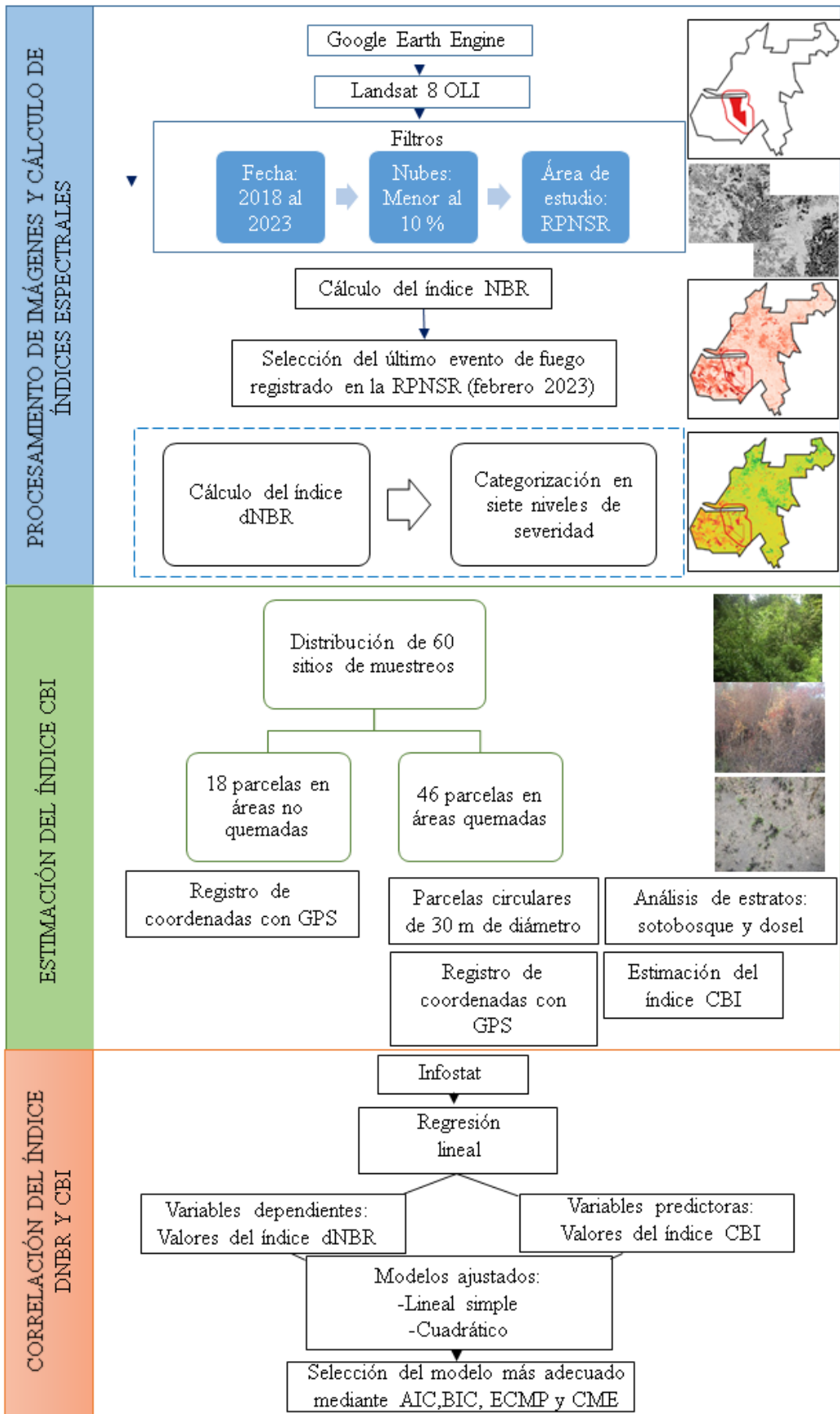


Figura 4. Flujo de trabajo del método. La primera parte muestra el proceso metodológico del procesamiento de las imágenes del satélite Landsat y el cálculo de los índices espectrales. La segunda parte muestra los pasos del procedimiento para la estimación del índice CBI. La tercera parte se refiere al proceso de la correlación del índice dNBR y el CBI.

2.3.1 Cálculo de índices espectrales

Existen varias opciones de imágenes satelitales disponibles para cartografiar y evaluar diferentes características de los recursos naturales, siendo la serie Landsat la que más se destaca por su relevancia en este campo. Es importante mencionar que la serie Landsat consta de 11 bandas, cada una de longitud de onda diferente, por lo tanto, las distintas combinaciones entre sí crean los índices espectrales que son útiles para abordar diversos aspectos científicos, como el índice NBR, por ejemplo. En el caso de la investigación, se justifica el uso de imágenes Landsat 8 OLI, las cuales fueron utilizadas para la correlación y validación del índice CBI (Gutiérrez et al. 2005; Key y Benson 2006; López 2014). Las escenas utilizadas tuvieron como referencia espacial 224/078 y 225/078 (path/row), con una resolución de 30 metros. El periodo estudiado abarcó desde el año 2018 hasta el 2023 para hallar el último evento de fuego ocurrido en la RPNSR.

Para obtener mejores resultados en estudios de incendios forestales, se menciona que el índice NBR es el más adecuado (Chuvienco 1999; Karl 2001), debido a que tiene la capacidad para combinar dos bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), que responden de manera específica al fuego (Escuin et al. 2008; Vlassova et al. 2014; Guillem et al. 2017). Por lo tanto, en el estudio se determinaron las áreas afectadas por el fuego con la utilización del índice NBR para el periodo de estudio mencionado. La forma de representación de la magnitud de la diferencia espectral es mediante la relación entre las bandas NIR y SWIR, y su expresión se rige de acuerdo con la siguiente ecuación (Arellano et al. 2017):

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$$

Donde:

NIR: reflectancia en la banda 5 del infrarrojo cercano.

SWIR: reflectancia en la banda 7 del infrarrojo de onda corta.

A partir del índice NBR, es posible realizar una comparación bitemporal, utilizando datos previos, que muestran el estado de la vegetación antes de la perturbación y datos posteriores al incendio. Esto permite identificar los cambios inducidos por el fuego en la respuesta espectral de las coberturas de la tierra mediante la estimación del índice dNBR (Key y Benson 2006; Giglio et al. 2006).

Basándonos en los resultados obtenidos de los mapas del índice NBR, se seleccionó el último evento de fuego ocurrido en la RPNSR, registrado en el mes de febrero del 2023, donde se estimó la severidad del fuego mediante el cálculo del índice dNBR, utilizando la siguiente ecuación:

$$dNBR = NBR \text{ (previo al incendio)} - NBR \text{ (posterior al incendio)} \quad (1)$$

Valores altos del índice dNBR indican daños más severos, mientras que valores negativos indican nuevos crecimientos posterior al incendio (Key y Benson 2006). De esta manera, se

categorizó en los niveles de severidad de acuerdo con lo propuesto por la USGS, como se presenta en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Clasificación de los niveles de severidad del índice dNBR.

Niveles de severidad	Rangos de dNBR (sin escala)	Rangos de dNBR (escala 10³)
Mayor crecimiento, altura (posterior al incendio)	-0.500 a -0.251	-500 a -251
Crecimiento mejorado, bajo (posterior al incendio)	-0.250 a -0.101	-250 a -101
Sin incendio	-0.100 a 0.99	-100 a +99
Severidad baja	+0.100 a +0.269	+100 a +269
Severidad moderadamente baja	+0.270 a +0.439	+270 a +439
Severidad moderadamente alta	+0.440 a +0.659	+440 a +659
Severidad alta	+0.660 a +1,300	+660 a +1300

Una vez obtenido el mapa categorizado del índice dNBR, se procedió a seleccionar los sitios de muestreos, utilizando los datos de los focos de calor del mes de febrero (INPE). De acuerdo con los niveles de severidad se distribuyeron de manera aleatoria estratificada los 60 sitios de muestreo, los cuales incluyeron 42 áreas quemadas y 18 áreas no quemadas.

2.3.2 Estimación del índice CBI

El índice CBI es utilizado para correlacionar la información obtenida mediante los índices espectrales, ya que intenta responder desde el punto de vista ecológico la significancia de las consecuencias de un incendio específico, es decir, cuantifica la alteración del incendio a las condiciones biofísicas naturales de un área específica (Key y Benson 2006; Ludwig et al. 2007). Con este propósito, se estimó el índice CBI mediante la utilización de un formulario, en el que se evaluaron las características específicas de la vegetación como el porcentaje de hojarasca, follaje alterado, vegetación viva, establecimiento de nuevas especies colonizadoras, abundancia, crecimiento, mortalidad, el ennegrecimiento de los árboles y la altura de caracteres. El índice presenta un rango de valores de 0,0 a 3,0, indicando desde ningún efecto de quema hasta un alto grado de efecto de quema, respectivamente (Key y Benson 2006).

Se establecieron 42 sitios de muestreo en áreas quemadas y 18 sitios en áreas sin incendio. En los sitios sin incendio, se verificó que ninguna parcela hubiera sido afectada por el fuego, y se registraron las coordenadas UTM. Para cada sitio en área quemada, se establecieron parcelas circulares de 30 metros de diámetro, donde en cada parcela, se registraron los datos de las coordenadas UTM con la utilización del GPS y se realizaron observaciones de las características de la vegetación. Los estratos analizados fueron basados en el sotobosque, que incluye los sustratos, arbustos bajos y árboles menores a 5 metros de altura, y el dosel, que incluye árboles mayores a 5 metros. Además, se estableció una parcela total que abarcaba ambos estratos (sotobosque y dosel). Para cada estrato, se estimó el promedio de acuerdo con los puntajes de cada variable observada, y finalmente, se obtuvo el promedio general para la parcela total (Key y Benson 2006).

2.3.3 Correlación del índice dNBR y CBI

Se llevó a cabo un análisis de regresión lineal para evaluar la relación entre los índices, utilizando los valores del índice dNBR como variables dependientes y los valores del CBI como variables predictoras (Arellano et al. 2017). Se ajustaron dos modelos: un modelo lineal simple y un modelo cuadrático. El modelo lineal resultó ser el más adecuado, ya que mostró mejores indicadores en términos de AIC, BIC, ECMP y CME (Cuadro 2).

Cuadro 2. Modelos de regresión.

Modelo	Medidas de bondad de ajuste				
	R ² ajustado	AIC	BIC	ECMP	CME
Lineal	0,85	736,39	742,67	12343,32	11721,15
Cuadrático	0,85	737,20	745,58	13116,16	11693,85

De acuerdo con el modelo seleccionado, se describe a continuación el modelo matemático utilizado:

$$dNBR_i = a + b * CBI_i + E_i \quad (2)$$

Donde:

dNBR_i: diferencial NBR del iésimo CBI.

a y b: coeficientes del modelo matemático.

CBI_i: efecto del iésimo Índice Compuesto de Áreas Quemadas (CBI).

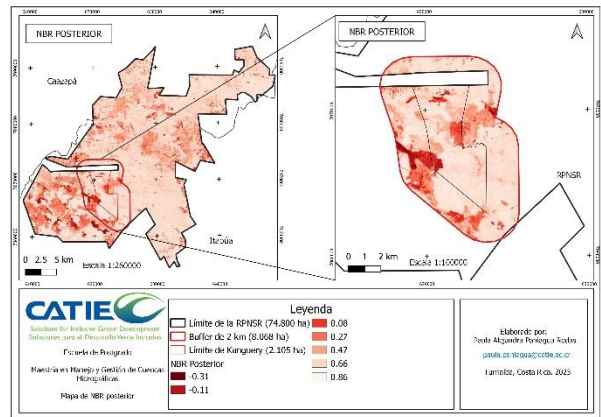
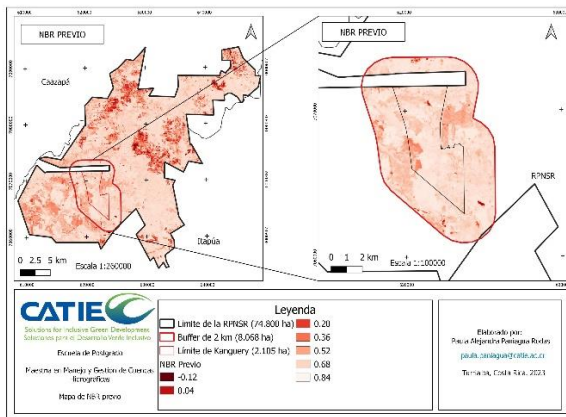
E_i: error aleatorio del iésimo efecto del Índice Compuesto de Áreas Quemadas (CBI).

3. Resultados

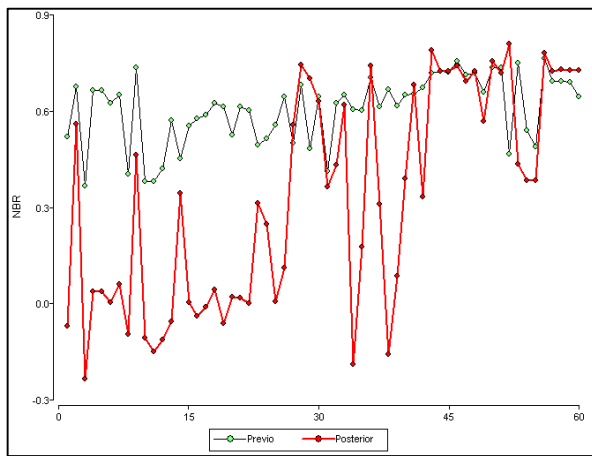
Los resultados se presentan en tres partes: en la primera parte, se muestran las áreas afectadas por el fuego mediante la utilización de los índices NBR y dNBR; en la segunda parte, se presenta el índice CBI junto con los valores estimados de severidad en el terreno; y, en la tercera parte, se analiza la correlación entre los valores resultantes del índice dNBR en relación con los valores del índice CBI.

3.1- Determinación de las áreas afectadas por el fuego mediante la utilización de sensores remotos

En la Figura 5 (a, b) se presentan los mapas resultantes del índice NBR previo y posterior de los eventos de fuego. En los sitios muestreados, se observó una variación de los valores del índice NBR, que oscilan entre -0,24 y 0,81 (Figura 6a), indicando el nivel de daño causado por los incendios. Valores menores del índice indican un mayor daño causado por el fuego. Al comparar los valores del índice NBR y dNBR en los sitios muestreados, se encontró que los niveles de severidad alta (Figura 6b) presentaron valores negativos en el índice NBR. Sin embargo, en los niveles de severidad baja (Figura 6c) y sin incendio (Figura 6d), presentaron valores de 0,38 y 0,55 respectivamente, los cuales son similares y muy cercanos entre sí.



(a) Mapa resultante del índice NBR previo. (b) Mapa resultante del índice NBR posterior (dNBR).



(c) (d)

Figura 6. (a) Variación de los valores del índice NBR previo y posterior en los sitios muestreados. (b) Imagen de la vegetación afectada con severidad alta. (c) Imagen de la vegetación afectada con severidad baja. (d) Imagen de la vegetación sin incendio.

En la Figura 7 se muestra el mapa resultante del índice dNBR, el cual ha sido clasificado en siete niveles de severidad (Cuadro 1). En este caso, los valores mayores del índice dNBR indican una alta severidad del incendio y los valores menores o negativos indican sin incendio, así como también un mejor crecimiento de la vegetación posterior a un evento de fuego. En el área de estudio, se identificaron 100,5 hectáreas de severidad alta (1,11%), 469,8 hectáreas de severidad moderadamente alta (5,19%), 328,95 hectáreas de severidad moderadamente baja (3,63%), 922,86 hectáreas de severidad baja (10,19%), 7.006,32 hectáreas sin incendio (77,39%), 185,22 hectáreas de crecimiento mejorado bajo posterior al incendio (2,05%) y 40,05 hectáreas de mayor crecimiento, nuevo rebrote posterior al incendio (0,44%). El valor mínimo registrado del índice dNBR es de -83,60, lo cual indica la ausencia de incendio, que abarca el 77,39 % del área de estudio y el valor máximo es de 866,50, correspondiente al nivel de severidad alto, abarcando 1,11 % del área de estudio, que se refiere a los sitios donde el incendio ha sido severo causando daños significativos en la vegetación. La vegetación afectada principalmente (223,33 ha, 97,89% de las áreas muestreadas) fueron los pastizales y arbustos bajos que se encuentran en los humedales del área de estudio, los bosques han sido afectados en menor proporción (4,19 ha, 1,83%), como se muestra en la Figura 8.

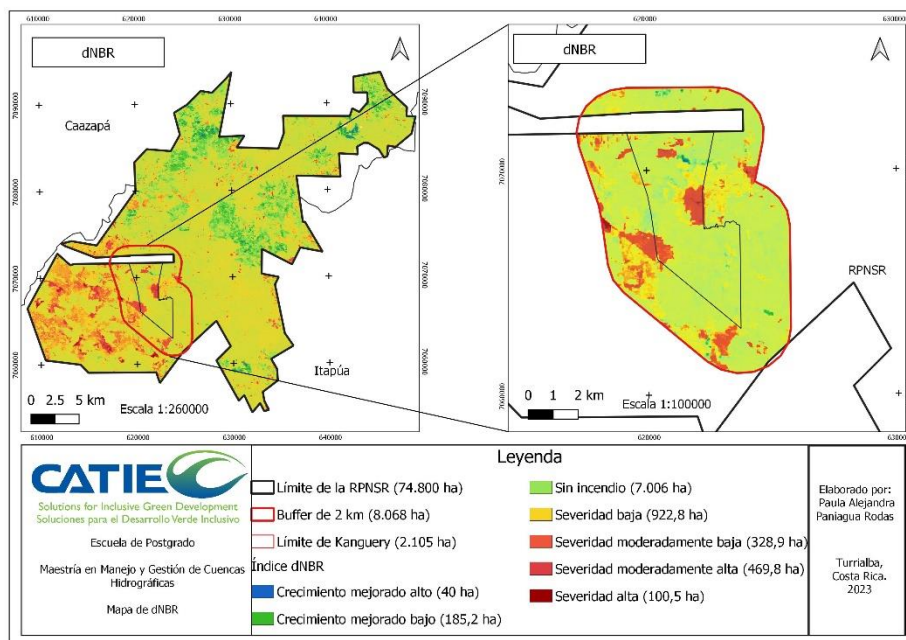


Figura 7. Mapa del índice dNBR del área de estudio, ubicada en la propiedad Kanguery, de la ONG Guyra Paraguay.

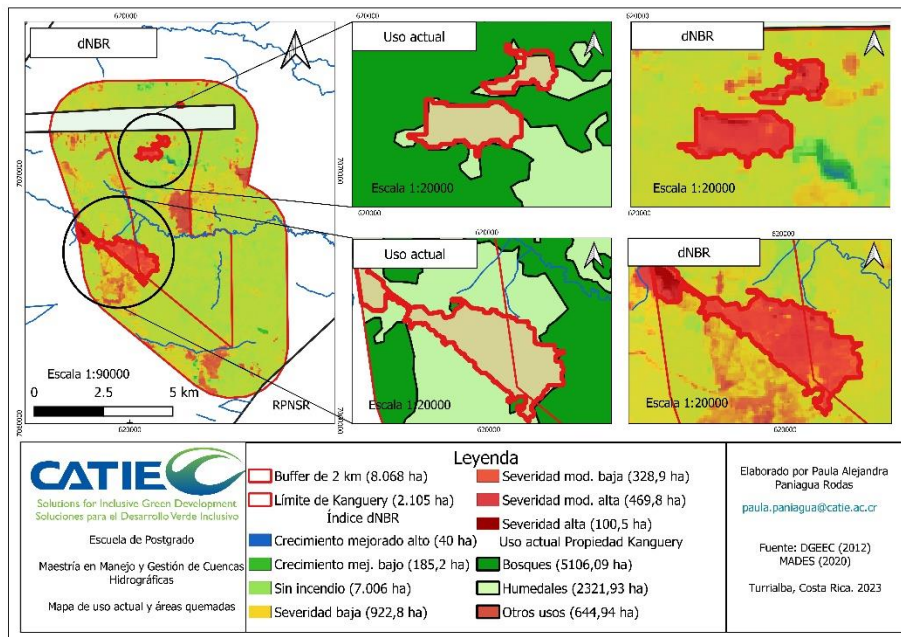
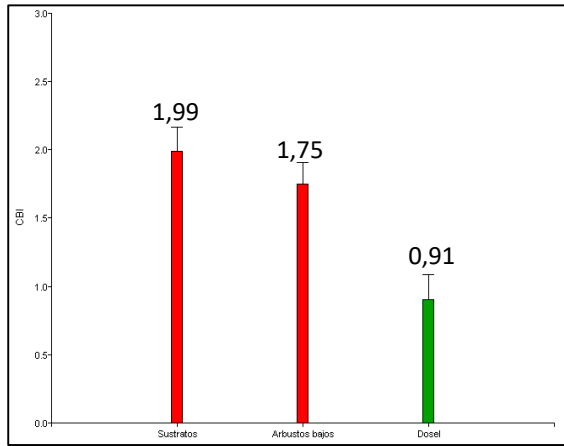


Figura 8. Mapa del índice dNBR y las áreas afectadas por incendios en el mes de febrero de acuerdo al tipo de uso actual de la tierra del área de estudio, la propiedad Kanguery, de la ONG Guyra Paraguay.

3.2- Estimación de las áreas afectadas por el fuego mediante el índice CBI

Se obtuvieron los valores del índice CBI, donde las 18 áreas no quemadas mostraron valores de 0, mientras que las áreas quemadas presentaron valores que oscilaron entre 0,5 y 3. Al comparar los diferentes estratos de la vegetación, se encontró que los estratos de sustratos y arbustos bajos presentaron un promedio de severidad más alto, con valores de 1,99 y 1,75 respectivamente, en comparación con el dosel, que tuvo un promedio de 0,91 (Figura 9 a). El grado de afectación de la vegetación según los diferentes estratos estudiados, los sustratos, arbustos bajos y dosel se pueden observar en la Figura 9 b, c, d. Es importante mencionar que, de las 46 parcelas correspondientes a áreas quemadas, 16 de ellas presentaron los tres tipos de vegetación: sustratos, arbustos bajos y dosel. Sin embargo, en las parcelas restantes, solo se encontraron los tipos de vegetación de sustratos y arbustos bajos.



(a)

(b)



(c)

(d)

Figura 9. (a) Relación de comparación del índice CBI y los estratos. (b) Afectación a nivel de sustratos. (c) Arbustos bajos afectados. (d) El dosel afectado.

3.3- Correlación del índice dNBR y el índice CBI

La relación entre el índice dNBR y el índice CBI, está representada por una regresión lineal, la que resultó en una correlación positiva con un valor de $R^2 = 85\%$ (Figura 10 a). La ecuación resultante fue la siguiente:

$$dNBR = -18,79 + 204,54 * CBI \quad (3)$$

Asimismo, las variables categóricas del índice dNBR y CBI, presentaron una asociación positiva, como se puede observar en la Figura 10 b. Las variables categóricas correspondientes a severidad baja en ambos índices se encuentran relacionadas en menor proporción en comparación con las variables que indican ausencia de incendio en el índice dNBR y ausencia de efecto en el índice CBI, las cuales están altamente relacionadas. Además, se encontró una

fuerte relación entre las variables que representan niveles de severidad moderadamente altos a altos en el índice dNBR con las variables de severidad alta en el índice CBI.

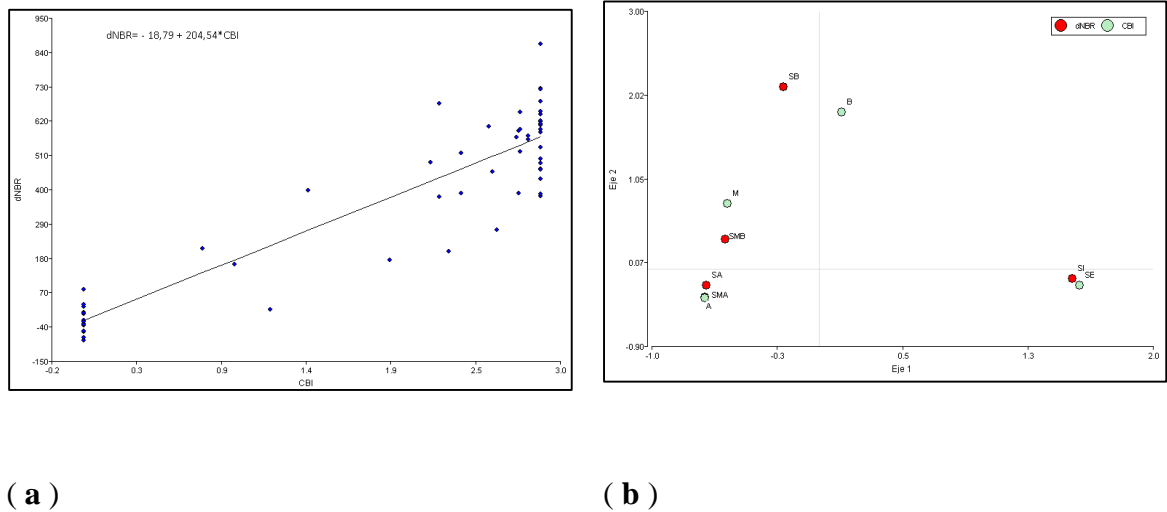


Figura 10. (a) Relación del índice dNBR y el índice CBI. (b) Asociación categórica entre las variables del índice dNBR y el índice CBI.

4. Discusión

El índice NBR midió la cantidad de energía reflejada por la vegetación respecto a la energía solar incidente, donde los valores de los píxeles analizados en las áreas quemadas y no quemadas coinciden con los hallazgos descritos por varios autores (Escuin et al. 2008; Vlassova et al. 2014; Guillem et al. 2017). Según estos estudios, la vegetación en buen estado generalmente presenta valores cercanos a 1 en el índice NBR, mientras que la vegetación afectada por el fuego muestra valores más bajos o negativos, dependiendo de la gravedad del incendio.

Por otro lado, el mapa resultante del índice dNBR, que ha sido una aproximación bitemporal, mostró el estado de la vegetación antes de la perturbación con los datos previos al incendio y el análisis posterior al incendio permitió identificar los cambios inducidos por el fuego en la respuesta espectral de las coberturas de la tierra, donde, fue categorizado en siete niveles de severidad, lo cual se alinea con investigaciones previas que también han empleado este índice para delimitar y evaluar áreas afectadas por incendios forestales, así como para cuantificar el daño y la recuperación de la vegetación (Delegido et al. 2018; Giglio et al. 2006; Key y Benson 2006; Castillo et al. 2019; Maillard et al. 2022).

El análisis del índice de CBI reveló que los sustratos y arbustos bajos fueron los componentes de la vegetación que presentaron un mayor nivel de severidad, mientras que no se observaron pérdidas arbóreas significativas, el índice determinó desde el punto de vista ecológico la significancia de las consecuencias de del incendio dado, es decir, cuantificó la alteración del incendio a las condiciones naturales biofísicas de un área específica (Key y Benson 2006; Ludwig et al. 2007). Esto indica que la afectación se centró en el paisaje de humedales, alterando la estructura y composición de la vegetación, lo cual concuerda con resultados similares obtenidos por otros autores (Delegido et al. 2018). Cabe mencionar que los incendios alteran

directamente la distribución de la vegetación y como consecuencia generan la fragmentación del paisaje, como efectos negativos a los patrones del paisaje (Vallecillo 2009; Blondel y Fernández 2012; Alva et al. 2018). Sin embargo, los resultados pueden variar según la región, el tipo de vegetación, la frecuencia de ocurrencia de los incendios, su intensidad, duración y las variables climáticas. Por ejemplo, en un estudio anterior (Leszczuk et al. 2022), se encontró que los incendios afectaron principalmente a los bosques nativos y plantaciones forestales. En un estudio similar, resultó que el índice dNBR y el CBI permitieron la determinación de la severidad y los cambios en los niveles de regeneración posterior a los incendios ocurridos en zonas boscosas y no boscosas. Estas diferencias pueden atribuirse a las características específicas de cada ecosistema, y a las condiciones y severidad del incendio. Es importante mencionar que, la inflamabilidad de la vegetación está estrechamente relacionada al tipo de ecosistema, siendo los pastizales más propensos a incendios que los bosques. Esto se debe a que los bosques tienen una mayor cantidad de humedad, lo que disminuye la probabilidad de que el combustible se incendie, por lo tanto, el contenido de agua en la vegetación es un factor clave para comprender la posibilidad de que ocurra la combustión, es así que se ha reportado que el alto contenido de humedad retrasa la ignición (Anderson 1982; Bianchi y Defosse 2014; Scarff 2021).

Algunos autores mencionan que el índice CBI presenta limitaciones para estimar la severidad en algunos estratos del ecosistema. Además, su efectividad puede disminuir al estimar los impactos después de dos temporadas de lluvias, especialmente en áreas con vegetación de rápido crecimiento como pastizales o humedales. Estos ecosistemas, debido a su naturaleza, pueden recuperarse más rápidamente en comparación con estratos como las especies leñosas. A pesar de estas consideraciones, el índice CBI continúa siendo ampliamente utilizado como un indicador de referencia para evaluar los efectos del fuego tanto en la vegetación como en el suelo (Fernández et al. 2008; De Santis 2009). En este contexto, es valioso destacar que existe una oportunidad de mejora en el formulario de CBI al incluir variables específicas destinadas a la estimación más precisa de los efectos del fuego sobre el suelo. Entre las variables, resulta fundamental considerar la cantidad de carbono presente en el suelo, la mineralogía y la medición de la repelencia al agua (Fernández et al. 2021), pues, estas variables permitirían comprender mejor la regeneración y la estructura del suelo tras eventos de quema.

Los resultados obtenidos en este estudio revelan una relación positiva entre el índice dNBR y el índice CBI, así como una asociación significativa entre las variables categóricas analizadas. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas realizadas por otros autores (Delegido et al. 2018; Arellano et al. 2017; Maillard et al. 2022), quienes también han observado una correlación positiva entre el índice dNBR y el CBI, destacando la capacidad del índice dNBR para proporcionar información precisa sobre las áreas afectadas por incendios.

La correlación existente entre el índice dNBR y el CBI tiene potencial de generar información válida para la estimación de áreas afectadas por incendios. Además, el uso del índice dNBR puede acortar los periodos de toma de datos en campo, proporcionando una visión integral acerca de la toma de decisiones posteriores a los incendios y ayuda a identificar las zonas aptas para trabajos de restauración del paisaje (Bajocco y Ricotta 2008).

A partir de los resultados de la investigación, se sugiere la implementación de un sistema de monitoreo a nivel nacional para abordar los efectos de los incendios forestales. El sistema de monitoreo debería ser colaborativo e involucrar a organismos gubernamentales, instituciones de

investigación y organizaciones ambientales para asegurar una recopilación de datos rigurosa y continua. Dado que los ecosistemas varían en su composición y respuesta a los incendios, es necesario realizar ajustes específicos al índice CBI para distintos estratos de vegetación, los ajustes deben basarse en datos recopilados localmente y ser validados mediante comparaciones con observaciones de campo. El sistema de monitoreo proporcionará información crítica para la toma de decisiones informadas en la gestión de incendios y la conservación del suelo a nivel nacional. Estas recomendaciones buscan fortalecer la capacidad de evaluación de los impactos del fuego y permitir una respuesta más rápida y efectiva ante eventos de incendios y sus consecuencias socio ambientales.

5. Conclusión

El estudio demostró que mediante la utilización de los índices NBR y dNBR ha sido posible determinar las áreas afectadas por el fuego en la RPNSR. Asimismo, se cuantificaron estas áreas y se determinaron las distintas categorías de afectación de la vegetación mediante los siete niveles de severidad.

Ha sido posible estimar el índice CBI a campo, donde la vegetación mayormente afectada en los incendios de febrero en la RPNSR han sido los humedales, que están constituidos por pastizales naturales y arbustos bajos, mientras que las pérdidas arbóreas fueron menos pronunciadas (<2% de las áreas afectadas por el fuego).

Finalmente, la relación entre el índice dNBR y el índice CBI resultó positiva en la RPNSR, lo cual demuestra la utilidad de los índices espectrales para facilitar la toma de datos a campo.

6. Bibliografía

- Alva, G; Reyes, H; Palacio, A; Núñez, D; Muñoz, C. 2018. Cambios en el paisaje ocasionados por incendios forestales en la región de Madera, Chihuahua (en línea). *Madera y bosques* 24 v. Consultado 24 nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431697>.
- Alvear, G. 2008. Managing efforts to prevent forest fires in South America (en línea). Albany, CA. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station, vol.208. p. 661-671. Consultado 23 abr. 2022. Disponible en https://www.fs.usda.gov/psw/publications/documents/psw_gtr208en/psw_gtr208eng.pdf.
- Alves, DB; Pérez, F. 2017 Series multitemporales Landsat/MODIS en el análisis de áreas quemadas en ambientes de sabana tropical de la Amazonia Meridional brasileña (en línea). Tesis de doctorado. Zaragoza, España. Consultado 17 nov. 2022. Disponible en <https://zaguan.unizar.es/record/75758/files/TESIS-2018-092.pdf>.
- Amarilla, S; Yanosky, A; Villalba, J. 2019. San Rafael Reserve, Paraguay: Key Social Stakeholders and Sustainability Scenarios Through Environmental Governance Approaches (en línea). *Social-ecological Systems of Latin America: Complexities and Challenges*. Consultado 27 abr. 2023. DOI: 10.1007/978-3-030-28452-7_13.
- Anderson, H. 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior (en línea). United States, s.e., vol.2. 30 p. Consultado 19 jul 2023. Disponible en <https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=IeAhH-ovVKcC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Aids+to+determining+fuel+models+for+estimating+fire+behavior&ots=1h3mqCf3-q&sig=KAKNStYGWgYadSFdYXzq-jSNWro#v=onepage&q&f=false>.
- Arellano, S; Vega, J; Rodríguez y Silva, F; Fernández, C; Vega-Nieva, D; Álvarez, J; Ruiz, A. 2017. Validation of the remote sensing indices dNBR and RdNBR to assess fire severity in the Oia-O Rosal (Pontevedra) wildfire in 2013 (en línea). *Revista de Teledetección* 2017(49 Special Issue):49-61. Consultado 29 jul. 2022. DOI: <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7137>.
- Armenteras, D; González, T; Vargas, J; Meza Elizalde, M; Oliveras, I. 2020. Incendios en ecosistemas del norte de Suramérica: avances en la ecología del fuego tropical en Colombia, Ecuador y Perú (en línea). *Caldasia* 42(1):1-16. Consultado 04 may. 2022. DOI: <https://doi.org/10.15446/caldasia.v42n1.77353>.
- Asner, G; Alencar, A. 2010. Drought impacts on the Amazon forest: The remote sensing perspective (en línea). *New Phytologist* 187(3):569-578. Consultado 3 may. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03310.x>.
- Bajocco, S; Ricotta, C. 2008. Evidence of selective burning in Sardinia (Italy): Which land-cover classes do wildfires prefer? (en línea). *Landscape Ecology* 23(2):241-248. Consultado 07 nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-007-9176-5>.

- Bianchi, LO; Defosse, GE. 2014. Ignition probability of fine dead surface fuels in native Patagonia forests of Argentina. *Forest Systems* 23(1):129-138. DOI: <https://doi.org/10.5424/fs/2014231-04632>.
- Blondel, M; Fernández, I. 2012. Efectos de la fragmentación del paisaje en el tamaño y frecuencia de incendios forestales en la zona central de Chile (en línea). *Revista Conservación Ambiental* 2 v. 7-16 p. Consultado 24 nov. 2022. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/243962903_Efectos_de_la_fragmentacion_d_el_paisaje_en_el_tamano_y_frecuencia_de_incendios_forestales_en_la_zona_central_de_Chile.
- Bran, D; Cecchi, G; Gaitán, J. 2007. Efecto de la severidad de quemado sobre la regeneración de la vegetación en el Monte Austral (en línea). *Ecología Austral* 17(8400):123-131. Consultado 23 abr. 2022. Disponible en <https://royalsocietypublishing.org/doi/epdf/10.1098/rstb.2012.0163>.
- Cartes, JL. 2006. Breve Historia de la Conservación en el Bosque Atlántico. In: *El Bosque Atlántico en Paraguay, Biodiversidad, Amenazas y Perspectivas*. State of Hotspots Series. Conservation Internacional – Center for Applied Biodiversity Science – Guyra Paraguay. Asunción. p. 37-57.
- Castillo, M; Saavedra S., J; Brull B., J. 2019. Fire severity in mega wildfires in Chile in 2017: actions to improve the protection system (en línea). *Territorium: Revista Portuguesa de riscos, prevenção e segurança* 26(26 (I)):5-18. Consultado 17 nov. 2022. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_26-1_1.
- Centro de Estudios Ambientales y Sociales (CEAMSO). 2020. Libro Blanco San Rafael (en línea). Ministerio. Asunción, Paraguay, s.e. 140 p. Consultado 12 jul. 2023. Disponible en <http://www.ceamso.org.py/upload/publicaciones/1614168427.pdf>.
- Chuvienco, E. 1999. Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin (en línea). New York: Springer. Consultado 23 abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60164-4>.
- Cochrane, M. 2009. Tropical fire ecology (en línea). Mason, J (ed.). South Dakota, USA, Praxis Publishing Ltd, Chichester, UK, 2009, vol.25. 286-291 p. Consultado 23 abr. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1191/030913301673370581>.
- Da Ponte, E; Mack, B; Wolfart, C; Rodas, O; Fleckenstein, M; Oppelt, N; Dech, S; Kuenzer, C. 2017. Assessing forest cover dynamics and forest perception in the Atlantic Forest of Paraguay, combining remote sensing and household level Data (en línea). *Forests* 2017, 8, 389. Consultado 29 ago. 2022. DOI: 10.3390/f8100389. Disponible en: www.mdpi.com/journal/forests.
- Delegido, J; Pezzola, A; Casella, A; Winschel, C; Urrego, EP; Jiménez, JC; Sobrino, JA; Soria, G; Moreno, J. 2018. Estimación del grado de severidad de incendios en el sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, usando Sentinel-2 y su comparación con Landsat-

- 8 (en línea). *Revista de Teledetección* (51):47. Consultado 17 nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8934>.
- De Santis, A; Chuvieco, E. 2009. GeoCBI: A modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data (en línea). *Remote sensing of Environment*, 113(3), 554-562. Consultado 18 ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.011>.
- Di Bitetti, M; Placci, G; Dietz, L. 2003. A biodiversity vision for the Upper Parana Atlantic Forest ecoregion: designing a biodiversity conservation landscape and setting priorities for conservation action (en línea). (February):116. Consultado 14 may. 2022. Disponible en http://www.wwf.org.br/informacoes/biblioteca/publications_in_english/?uNewsID=28224.
- Escuin, S; Navarro, R; Fernández, P. 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images (en línea). *International Journal Remote Sensing* 29, 1053-1073. Consultado 14 may. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>.
- FAPI (Federación por la Autodeterminación de los Pueblos Indígenas). 2017. Mapa de las tierras indígenas Paraguay (en línea). Consultado 17 nov. 2022. Disponible en <https://www.tierrasindigenas.org/Mapa>.
- Fernández, C; Vega J; Fonturbel, M; Jiménez, E; Pérez, P. 2008. Wildfire, salvage logging and slash manipulation effects on *Pinus pinaster* Ait. recruitment in Orense (N.W. of Spain) (en línea). *For. Ecol. Manage.*, 255, 1294-1304. Consultado 18 ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.034>.
- Fernández, C; Fernández, J; Keizer, J; Girona, A. 2021. Guía para la evaluación de campo de la severidad del fuego en el suelo (en línea). Centro de Investigación Forestal de Lourizán-Xunta de Galicia. Consultado 05 ago. 2023. Disponible en https://www.researchgate.net/profile/Cristina-Fernandez-Filgueira/publication/358046949_GUIA_PARA_LA_EVALUACION_DE_CAMPO_DE_LA_SEVERIDAD_DEL_FUEGO_EN_EL_SUELO/links/61ee76b49a753545e2f2f380/GUIA-PARA-LA-EVALUACION-DE-CAMPO-DE-LA-SEVERIDAD-DEL-FUEGO-EN-EL-SUELO.pdf.
- García Calabrese, M; Peralta Kulik, N; Valleu, V; Villalba, H; Wenninger, C; Zarate Betzel, G; Amarilla, SM; Villalba, LJ. 2018. Propuesta de categoría de manejo para el Área Protegida San Rafael, Paraguay (en línea). Toledo, Universidad de Castilla-La Mancha. p. 1316. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/332448607_PROPUESTA_DE_CATEGORIA_A_DE_MANEJO_PARA_EL_AREA_PROTEGIDA_PARQUE_NACIONAL_SAN_RAFAEL_PARAGUAY/references.
- Giglio, L; Csiszar, I; Justice, C. 2006. Global distribution and seasonality of active fires as observed with the Terra and Aqua Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

- (MODIS) sensors (en línea). *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 111(G2). Consultado 03 may. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1029/2005JG000142>.
- Gutiérrez, M; Branch, J; Botero, V. 2005. Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: Landsat-ETM+ (en línea). *Facultad Nacional de Agronomía Medellín* vol. 58 no.1. Consultado 06 nov 2022. Disponible en http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0304-28472005000100004#:~:text=Ahora%2C%20se%20define%20la%20clasificaci%C3%B3n,tipo%20de%20cubierta%20de%20terreno.
- Guillem, R; Vinué, D; Caselles, V; Espinós, H. 2017. Estudio crítico de los índices de severidad y la superficie afectada por el incendio de Sierra de Luna (Zaragoza) (en línea). *Revista de Teledetección* 2017(49):63. Consultado 23 abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7117>.
- Hernández, L. 2020. El planeta en llamas: Propuesta Ibérica de WWF para la prevención de incendios (en línea). WWF España y ANP. Consultado 24 nov. 2022. Disponible en https://wwfes.awsassets.panda.org/downloads/wwf_informe_incendios_2020_el_planeta_en_llamas.pdf.
- Ice G; Neary D; Adams P. 2004. Effects of wildfire on soils and watershed processes (en línea). *Journal of Forestry* 102(6), 16–20. Consultado 03 agos. 2022. Disponible en <https://academic.oup.com/jof/article/102/6/16/4613173?login=true>.
- Karl, J. 2001. Normalized Burn Ratio. the LandscapeToolBox (en línea). Consultado 23 jul. 2022. Disponible en: <http://wiki.landscapetoolbox.org>.
- Key, CH; Benson, NC. 2006. Landscape Assessment (LA) sampling and analysis methods (en línea). s.l., USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Ogden, UT. Consultado 03 may. 2022. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/241687027_Landscape_Assessment_Ground_measure_of_severity_the_Composite_Burn_Index_and_Remote_sensing_of_severity_the_Normalized_Burn_Ratio.
- Leszczuk, AA; Lorán, D; Martínez, ME; Leizica, JE; Seppi, S. 2022. Estudio de los incendios ocurridos en la Provincia de Misiones, Argentina entre diciembre del año 2021 a marzo del año 2022 (en línea). XXXVI Jornadas Forestales de Entre Ríos. Misiones, s.e. p. 212-216. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/364345795>.
- López, YS. 2014. Landsat: breve historia en millones de imágenes I (en línea). *Cienciorama*:1-13. Consultado 17 nov. 2022. Disponible en http://www.cienciorama.unam.mx/a/pdf/334_cienciorama.pdf.
- Ludwig, J; Bastin, G; Wallace, J; McVicar, T. 2007. Assessing landscape health by scaling with remote sensing: when is it not enough? (en línea). *Landscape Ecology*, 22, 163–169. Consultado 23 abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10980-006-9038-6>.

- Maillard, O; Flores, M; Michme, G; Coronado, R; Bachfischer, M; Azurduy, H; Vides, R; Flores, R; Angulo, S; Mielich, N. 2022. Phenology patterns and postfire vegetation regeneration in the Chiquitania Region of Bolivia Using Sentinel-2 (en línea). *Fire*. 2022; 5(3):70. Consultado 17 nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/fire5030070>.
- Martín, PI; Rejalaga, LK. 2010. Cartografía de incendios forestales en Paraguay mediante imágenes Aqua-MODIS (en línea). *Serie Geográfica* 16:61-70. Consultado 17 nov. 2022. Disponible en http://geogra.uah.es/revista/pdfrevista16/OK-05-articulo_pags_61_a_70.pdf.
- Martino, D. 2007. Deforestación en la Amazonía: principales factores de presión y perspectivas (en línea). *Revista del Sur* n169. Consultado 17 nov. 2022. Disponible en https://rinconcete.com/files/Deforestacion_amazonia.pdf.
- Molinas, C; Florentín, P. 2021. Incendios forestales en Paraguay: implicaciones para su prevención y manejo (en línea). *Investigaciones y Estudios - UNA I* (12):47-57. Consultado 03 may. 2022. DOI: <https://doi.org/10.47133/ieuna2115>.
- Morgan P; Hardy C; Swetnam T; Rollins M; Long D. 2001. Mapping fire regimes across time and space: Understanding coarse and fine-scale fire patterns (en línea). *International Journal of Wildland Fire* 10, 329–342. Consultado 03 agos. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1071/WF01032>.
- Pausas, J; Keeley, J. 2014. Evolutionary ecology of resprouting and seeding in fire-prone ecosystems (en línea). s.l., John Wiley; Sons; Ltd, vol.204. p. 55-65. Consultado 14 may. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1111/nph.12921>.
- Pausas, J. 2012. Incendios forestales: una visión desde la ecología (en línea). Madrid, España. 124 p. Consultado 23 abr. 2022. Disponible en <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=i1jZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT2&dq=frecuencia+de+incendios&ots=0KOELUvVDI&sig=o6awu0Q0N4d9eAWOeYLFqnI7zXE#v=onepa-ge&q=frecuencia%20de%20incendios&f=false>.
- Parsons, A. 2003. Soil Burn Severity Definitions and Mapping Guidelines Burned Area Emergency Rehabilitation (Baer) Soil Burn Severity Definitions and Mapping Guidelines Draft Soil Burn Severity Definitions and Mapping Guidelines (en línea). Service Region USDA Forest Service Region USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station 6(6):1-12. Consultado 03 agos. 2022. Disponible en <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.485.9254&rep=rep1&type=pdf>.
- Sánchez, S; Zanvettor, RE; Grilli, MP; Ravelo, AC. 2021. Impacto de la sequía en los incendios forestales en las Sierras de Córdoba, Argentina (en línea). *Revista Argentina de Agrometeorología*; 12;9-2021; 37-45. Consultado 24 nov. 2022. Disponible en <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/157645>.

- Scarff, FR; Lenz, T; Richards, AE; Zanne, AE; Wright, IJ; Westoby, M. 2021. Effects of plant hydraulic traits on the flammability of live fine canopy fuels. *Functional Ecology* 35(4):835-846. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13771>.
- Vallecillo, S. 2009. Los cambios en el paisaje y su efecto sobre la distribución de las especies: Modelización y aplicación a la conservación de las aves de hábitats abiertos en paisajes mediterráneos (en línea). Tesis de doctorado. Solsona, España. Consultado 24 nov. 2022. Disponible en <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/8354/Tsvr1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Vega, J; Fernández, C; Pérez, P, Fonturbel, T. 2010. Response of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) recruitment to fire severity and post-fire management in a coastal burned area in Galicia (NW Spain) (en línea). *Plant Ecol* 206: 297-308. Consultado 24 abr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11258-009-9643-y>.
- Vlassova, L; Pérez, F; Mimbrero, M; Llovería, R; García, A. 2014. Analysis of the Relationship between Land Surface Temperature and Wildfire Severity in a Series of Landsat Images (en línea). *Remote Sensing*, 6, 6136-6162. Consultado 14 may. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs6076136>.
- Zimmermann, L; Eisenkölbl, A; Amarilla, S. 2021. Dinámica de incendios forestales en la Reserva para Parque Nacional San Rafael, Paraguay, periodo 2007-2017 (en línea). *Revista de la Sociedad Científica del Paraguay* 26(1):17-34. Consultado 03 ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.32480/rscp.2021.26.1.17>.