



**FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA DEL ROSARIO**

**PROYECTO FINAL DE CARRERA**

**Estudio mediante técnicas de teledetección de los incendios forestales ocurridos en las islas del  
Delta del Paraná durante el año 2020**

**CARRERA:**

**Ingeniería Ambiental**

**ALUMNAS:**

**Guasone, María Victoria**

**Roncoroni, Lucía**

**DIRECTORA: Dra Pettinari, María Lucrecia**

**CO-DIRECTOR: Dr. Luccini, Eduardo**

**ROSARIO**

**Julio de 2022**



Imagen a color real del satélite Suomi-NPP, de fecha 15/08/2020, mostrando columnas de humo ocasionadas por los incendios en el área del Delta de Paraná.



## **Agradecimientos**

Queremos brindar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este Trabajo Final:

En primer lugar, a los Dres. María Lucrecia Pettinari y Eduardo Luccini, docentes de nuestra casa de estudios y tutores académicos, que con su expertise acompañaron y dirigieron el presente trabajo final. A Magi Franquesa, investigador de la Universidad de Alcalá, por su asesoramiento respecto a la aplicación de las Burned Area Mapping Tools (BAMTs).

Al proyecto OAT “Incorporación de la conservación de la biodiversidad y el manejo sostenible de las tierras en la planificación del desarrollo: operacionalizar el Ordenamiento Ambiental del Territorio en la Argentina 19/ARG/G24”, y en particular a Pamela Zamboni, investigadora del Centro Regional de Geomática de la Universidad Autónoma de Entre Ríos, por su colaboración para la obtención de los datos de las áreas quemadas durante el 2020 en la zona del Delta e Islas del Paraná.

Sin más, nuestros agradecimientos a la Universidad Católica Argentina, a los docentes y autoridades de la sede Rosario, por formarnos como profesionales; y especialmente, al Director de Carrera Lic. Javier Gómez Insausti, por permitirnos desarrollar esta línea de trabajo.

## Resumen

Durante el año 2020 se registró en Argentina el pico máximo de focos de incendios forestales. Una de las zonas más afectadas fue la ecorregión Delta e Islas del Paraná, que abarca 4.825.000 hectáreas de humedales a lo largo del tramo inferior del Río Paraná. Esta región, pese a ser reconocida por su valor ecológico y disponer de distintos sistemas de protección y conservación, periódicamente es afectada por incendios que impactan sobre la capacidad de los humedales de prestar servicios ecosistémicos y su biodiversidad. El presente trabajo se enfoca en el estudio de la serie de incendios que afectó la zona comprendida en el Plan Integral Estratégico para la Conservación y Aprovechamiento Sostenible del Delta del Paraná (PIECAS-DP) durante el año 2020, empleando herramientas de teledetección, la plataforma *Google Earth Engine* y las Herramientas para el Mapeo de Áreas Quemadas (*Burned Area Mapping Tools*) para el seguimiento de focos de calor (*hotspots*), estimación del área quemada y la evaluación de la severidad a partir de imágenes satelitales Sentinel 2. Se detectaron en total 39.761 *hotspots* en la zona durante el año 2020. El área quemada total estimada fue de 452.693 ha entre los días 1 de mayo y 22 de diciembre. Esto representa un 21,50% de la superficie total del área del PIECAS-DP. Por su parte, en las regiones del Delta Superior y Medio, la severidad de incendios fue principalmente baja y moderada, observándose una temprana recuperación de la vegetación.

## **Glosario de Abreviaturas**

- BACT:** *Burned Area Cartography Tool*, correspondiente a la herramienta de cartografía de áreas quemadas.
- BAMTs:** *Burned Area Mapping Tools*, correspondiente a las herramientas de cartografía de áreas quemadas. Las mismas engloban las herramientas específicas BACT, RPT, VADT y VAT.
- BAI:** *Burned Area Index*, el cual se basa en el comportamiento espectral de las cenizas y productos carbonizados.
- GEE:** *Google Earth Engine*, plataforma basada en la nube empleada para la visualización, análisis y procesamiento de información geoespacial
- NBR:** *Normalized Burn Ratio*. El mismo se usa para detectar áreas quemadas y dar una medida de la severidad del incendio.
- NBR2:** *Normalized Burn Ratio 2*. Es más sensible a la presencia de agua en la vegetación que el NBR.
- NDVI:** *Normalized Difference Vegetation Index*. Se centra en el reconocimiento de la biomasa fotosintéticamente activa.
- LU:** *Long Unit (LU)*. Es una serie de Short Units consecutivas, que en conjunto cubren un periodo de al menos 100 días. Su uso busca reducir o minimizar el impacto de la precisión temporal de los resultados del producto, que cubren periodos temporales largos, al permitir largos periodos de coincidencia entre los datos del producto y los datos de validación .
- PIECAS-DP:** *Plan Integral Estratégico para la Conservación y Aprovechamiento Sostenible del Delta del Paraná*.
- RGB:** *Red Green Blue*, refiere a los canales rojo, verde y azul por los que se filtra una imagen satelital para obtener composiciones que faciliten resaltar elementos de la superficie.
- RPT:** *Reference Perimeter*, herramienta de perímetros de referencia.
- SIG:** *Sistema de Información Geográfica*. Se trata de un sistema informático que permite gestionar y operar información espacial.
- SU:** *Short Unit (SU)*. Refiere a datos de referencia derivados de un par de imágenes consecutivas, con 16 días o menos de separación entre ellas.
- VADT:** *Validation Area Dates Tool*, herramienta de fechas del área de validación.
- VAT:** *Validation Area Tool*, herramienta de áreas de validación.
- TSAs:** *Thiessen Scene Areas*. Zonas geográficas imaginarias diseñadas por Cohen *et al.* (2010) y Kennedy *et al.* (2010), que proveen marcos no superpuestos para el muestreo de áreas basadas en las escenas de los satélites Landsat.
- WRS-2:** *Worldwide Reference System*. Es el sistema global adoptado por Landsat. Se adiciona -2 para las misiones posteriores a 1983: Landsat 4,5,6,7,8 y 9.

<b>Índice</b>	
<b>Agradecimientos</b>	<b>2</b>
<b>Resumen</b>	<b>3</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
<b>2. Marco teórico</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Delta e Islas del Paraná</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Incendios forestales</b>	<b>14</b>
<b>2.2.1 La problemática de los incendios forestales en la región Delta e Islas del Paraná</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Aportes de la teledetección</b>	<b>18</b>
<b>3. Materiales</b>	<b>20</b>
<b>3.1 Área de estudio</b>	<b>20</b>
<b>3.2 Productos Sentinel 2</b>	<b>21</b>
<b>3.3 Productos adicionales descargados de servicios WFS</b>	<b>24</b>
<b>4. Métodos</b>	<b>26</b>
<b>4.1 Interpretación de imágenes satelitales</b>	<b>26</b>
<b>4.2 Cartografía de áreas quemadas y severidad de incendios</b>	<b>27</b>
<b>4.3 Detección de hotspots y de áreas quemadas</b>	<b>31</b>
<b>4.4 Google Earth Engine</b>	<b>33</b>
<b>4.5 Software para la cartografía de áreas quemadas</b>	<b>33</b>
<b>4.6 QGIS</b>	<b>34</b>
<b>5. Metodología de detección de áreas quemadas</b>	<b>35</b>
<b>5.1 Herramienta para la cartografía de áreas quemadas</b>	<b>35</b>
<b>5.2 Herramienta de área de validación</b>	<b>38</b>
<b>5.3 Herramienta de fechas del área de validación</b>	<b>39</b>
<b>5.4 Herramienta de perímetro de referencia</b>	<b>40</b>
<b>6. Elaboración</b>	<b>42</b>
<b>6.1 Digitalización del área de estudio</b>	<b>42</b>
<b>6.2 Definición del periodo temporal a cubrir</b>	<b>42</b>
<b>6.3 Aplicación de las BAMTs en el área de estudio</b>	<b>46</b>
<b>6.3.1 Aplicación de la herramienta BACT</b>	<b>46</b>
<b>6.3.2 Aplicación de la herramienta VAT</b>	<b>55</b>



6.3.3 Aplicación de la herramienta VADT	58
6.3.4 Aplicación de la herramienta RPT	59
<b>7. Resultados</b>	<b>61</b>
7.1 Áreas quemadas detectadas por la herramienta BACT	61
7.2 Comparación de los resultados obtenidos por la herramienta BACT y por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	67
7.3 Áreas quemadas detectadas por la herramienta RPT	72
7.4 Validación de los resultados obtenidos	74
<b>8. Severidad de incendios</b>	<b>77</b>
8.1 Análisis de severidad de los incendios	77
8.2 Resultados del análisis de severidad de los incendios	86
<b>9. Conclusiones y perspectivas</b>	<b>90</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>94</b>
<b>Apéndice A - Principios de Teledetección</b>	<b>105</b>
<b>Apéndice B - Humedales del Delta del Paraná</b>	<b>111</b>

## 1. Introducción

El fuego es un componente natural de muchos ecosistemas, contribuyendo a la renovación y la sucesión ecológica. De su dinámica depende la distribución de distintas poblaciones animales y vegetales, que están adaptadas en distinto grado a los incendios y a sus efectos en la configuración del paisaje (Brown & Smith, 2000; Campo Parra-Lara & Bernal-Toro, 2010).

En la actualidad, se observa una modificación de los patrones naturales de los incendios, en cuanto a su frecuencia y distribución, incrementándose el riesgo de ocurrencia en ambientes de los cuales no forma parte naturalmente. Esto acarrea consecuencias negativas de índole económico, social, cultural y ecológico: pérdidas humanas, daños a infraestructuras, alteración de las propiedades físico-químicas del suelo, desplazamiento de especies, destrucción de hábitats, contaminación del aire por emisiones de gases contaminantes y partículas, afectación de la capacidad de reproducción de la flora, muerte de poblaciones, invasión de especies exóticas, entre otros. Particularmente, los incendios sobre las coberturas vegetales impactan directamente sobre la diversidad biológica, pudiendo afectar la capacidad natural de prestación de bienes y servicios ecosistémicos (Campo Parra-Lara & Bernal-Toro, 2010).

Los seres humanos son responsables de alterar los regímenes naturales de incendios de forma directa al recurrir a prácticas como la quema para dar inicio al fuego, e indirecta a través del cambio climático, la deforestación y los cambios de uso de suelo (*United Nations Environment Programme*, 2022-a). En ese sentido, el fuego ha sido empleado desde tiempos inmemorables como herramienta de gestión del territorio, con fines agrícolas, silvícolas o ganaderos. La quema de la vegetación natural para preparar el terreno se ha convertido en una herramienta de la producción agropecuaria y su uso está en alza con la expansión de la frontera agrícola (Rubio Torres, 2017).

Al hablar de incendios forestales se suele hacer alusión a la dificultad o imposibilidad de controlar su propagación con recursos humanos y los efectos negativos y no deseados ocasionados (INTA - Centro Regional La Pampa - San Luis, 2020), pudiendo tener un origen tanto natural como antropogénico. Dentro del primer grupo, se encuentran los originados a causa de la caída de un rayo o actividad volcánica. En el segundo grupo, se ubican los ocasionados por actividades humanas, sean intencionales o no.

Además de conocer su origen, un evento de incendio presenta un comportamiento determinado que responde a factores de distinta naturaleza, aunque se agrupan principalmente en tres grupos: combustible, topografía y meteorología.

Durante un evento de incendio se pueden diferenciar tres etapas o periodos: antes, durante y después. En el periodo pre-fuego, se gestan la serie de condiciones que permitirán el inicio y desarrollo del incendio. La distribución espacio-temporal de incendios se puede vincular con la estacionalidad de factores que dan lugar a su ocurrencia y condicionan su evolución (Dentoni & Muñoz, 2012). Durante la ocurrencia del incendio, se evalúa la intensidad del fuego, que es una

medida de la energía liberada por la quema de combustible forestal por unidad de tiempo y longitud (Keeley, 2009). Es función del calor de combustión, el peso del combustible y la velocidad de propagación. También se habla de intensidad de la línea de fuego y es indicativo de la dificultad de su control (Chuvieco *et al.*, 2014).

Finalmente, en la etapa post-fuego, se puede evaluar el grado de afectación del incendio y estimar: área quemada, la severidad del fuego y las pérdidas humanas, ecológicas y económicas asociadas. El área quemada es un indicativo de la extensión de un incendio sobre la superficie o su tamaño, mas no del grado en que se consumió la vegetación. La severidad, por su parte, es un parámetro que señala los efectos sobre el ambiente. Si bien no existe una única definición para este indicador (Keeley, 2009), se lo relaciona con la cantidad de biomasa que se consume durante el evento y, consecuentemente, con el tiempo de recuperación del ecosistema (Montorio *et al.*, 2014), resultando este periodo supeditado al comportamiento del incendio y las condiciones climáticas vigentes.

La dinámica de los incendios forestales responde a factores de distinta naturaleza ya mencionados, aunque se evidencian alteraciones de estos patrones a causa de la intervención humana. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Argentina estima que aproximadamente el 95% de los incendios forestales tienen un origen antrópico, siendo de vital importancia la investigación técnica de sus causas y circunstancias (Zelmar Nuñez, *s.f.*) y la elaboración de informes que sustenten el registro de series históricas para el fortalecimiento de tareas de prevención y combate. Además, es importante incrementar el nivel de conocimientos de los ambientes afectados y medir los impactos asociados a los eventos de incendio, contribuyendo a las tareas de restauración de los ecosistemas. Es por ello, que se realizan estudios de severidad y se elaboran cartografías de áreas quemadas.

El documento *Argentina incendiada. Lo que el fuego nos dejó*, de la Fundación Ambiente y Recursos Naturales (2020), señala que durante 2020 los incendios afectaron un 0.29% de la superficie argentina, develando la problemática de incendios recurrente que acontece particularmente a la región Delta e Islas del Paraná a causa de las quemaduras intencionales y exhibiendo el incumplimiento de las estrategias de conservación planteadas para un área cuyo valor ecológico es ampliamente reconocido.

El Plan Integral Estratégico para la Conservación y Aprovechamiento Sostenible del Delta del Paraná (PIECAS-DP), que data de mayo de 2008, tiene como finalidad ordenar las actividades en el territorio en pos de proteger el ecosistema del humedal. El motor de su formación fue, justamente, la serie de eventos de incendios ocurridos durante ese año en la región.

De acuerdo a la Convención sobre los Humedales Ramsar, desarrollada en la localidad de Ramsar en Irán en el año 1971, un humedal es cualquier extensión de marismas, pantanos o turberas, u otras superficies cubiertas de agua, “sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros” (Secretaría de la Convención de Ramsar, 2013). Se trata de ecosistemas complejos, que pueden tener características variadas y distintivas, pero que comparten la propiedad de ser reservorios de biodiversidad, actuando como el

hogar de numerosas especies de flora y fauna (Benzaquen *et al.*, 2017). Además, prestan numerosos bienes y servicios ecosistémicos (Malvárez, 1997).

De las 11 regiones de humedales de Argentina (Benzaquen *et al.*, 2017), la subregión denominada ríos, esteros, bañados y lagunas del río Paraná, perteneciente a la región de humedales del corredor fluvial Chaco-Mesopotámico, ha estado en el foco de la percepción social, en el marco de numerosos reclamos por parte de distintas ONGs y un aumento de la conciencia social respecto de temáticas ambientales en general, durante los años 2008 y 2020 principalmente, debido a la recurrencia de incendios.

Estos años estuvieron marcados por movimientos por parte de distintas ONGs para aumentar la conciencia social sobre la problemática, reportes periodísticos haciendo seguimiento de la situación y diversas voces alertando sobre la presencia considerable de humo y cenizas en las localidades próximas al Delta. Además, se han intensificado las movilizaciones y los reclamos colectivos demandando la promulgación de una ‘Ley de Humedales’ que reconozca el valor ecológico de los humedales y garantice mecanismos para su uso racional, protección y conservación, regulando complementariamente su ordenamiento territorial y excluyendo actividades que dañan estos ambientes.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en su *Informe de superficies afectadas por incendios en el Delta e Islas del Río Paraná - Segunda parte* (2021), estima que entre enero y diciembre de 2020 se quemó un área de 487.000 ha en la zona del PIECAS-DP. En la primera edición de este documento, *Informe de superficies afectadas por incendios en el Delta e Islas del Río Paraná* (2020), el Ministerio señala algunos de los puntos claves que influyeron sobre la crisis de incendios forestales, tales como la bajante histórica del Río Paraná y la sequía en la cuenca del Plata y de la vegetación por la ocurrencia de heladas invernales. Sin embargo, se recalca que la causa de los incendios fue, muy probablemente, de origen antrópico.

El uso de fuego como herramienta de manejo de pastizales y tierras agrícolas es una práctica recurrente en Argentina (Casillo *et al.*, 2013). No obstante, la falta de control en el manejo del fuego ha ocasionado incendios forestales afectando adversamente a ecosistemas como el humedal. En consecuencia, es indispensable contar con herramientas de apoyo para la prevención, detección temprana, combate, monitoreo, evaluación de daños e implementación de acciones de recomposición o restauración.

Entre estos recursos, se encuentran algunos productos satelitales que aportan valiosa información por su cobertura global y periódica de toda la superficie terrestre (Chuvienco, 1995). Los mismos se obtienen a partir de una técnica de adquisición de datos conocida como teledetección, cuyos principios se explican en detalle en el Anexo A.

La teledetección se emplea para estudiar objetos a partir de la medición de la energía transportada por ondas electromagnéticas que interactúan con dichos objetos (Rodríguez Pérez *et al.*, 2015). Esta medición la realiza un sensor que, sin entrar en contacto directo con los objetos de interés,



puede captar, almacenar y transmitir esa energía de modo que, al ser posteriormente procesada, permite obtener información útil sobre la superficie terrestre. Se pone de manifiesto, por lo tanto, que esta adquisición de información requiere de una serie de elementos interconectados. Los sistemas de teledetección están constituidos por 3 elementos básicos: sensor, objeto observado y flujo energético, siendo este último el componente que permite la interacción entre los dos primeros (Chuvieco, 1992).

Existen distintos programas operativos de plataformas satelitales que son utilizados para el monitoreo de los recursos naturales y que permiten el estudio de problemáticas ambientales, entre las que se incluye la de los incendios forestales. La elección del instrumento y la adquisición de sus productos derivados, está a cargo del usuario y depende de la idoneidad del sensor, en cuanto a sus especificaciones de resolución espacial, temporal, radiométrica y espectral, para satisfacer los requerimientos de objetivo y alcance del proyecto. La resolución espacial indica el nivel de detalle de la imagen a capturar y representa el tamaño del píxel. La resolución temporal es el tiempo de revisita del satélite sobre un punto de la superficie. La resolución espectral hace referencia al número y ancho de las bandas del espectro electromagnético que puede captar un sensor; y la resolución radiométrica indica la capacidad del sensor para discriminar distintos niveles de intensidad de radiación dentro de cada banda (Chuvieco, 1992). En líneas generales, a mayor resolución mayor es el costo asociado al proceso de toma de datos. Además, mayores resoluciones espectral, radiométrica y temporal se obtienen a expensas de una menor resolución espacial.

El flujo energético que llega al sensor tiene una longitud de onda y una cantidad de energía determinada. La fuente de esta energía, que puede ser el propio sensor o el sol, emite radiación en una determinada región del espectro electromagnético. En su trayecto hacia la superficie terrestre, esta energía se va atenuando a causa de los diversos componentes de la atmósfera. La radiación que llega al suelo interactúa con las distintas coberturas para ser finalmente devuelta al espacio. El sensor capta esta energía reflejada o emitida por el objeto observado, también con una longitud de onda característica (Chuvieco, 1992).

Cada elemento de la superficie tiene un comportamiento espectral que permite identificarlo y diferenciarlo de otro. La firma espectral de una cubierta muestra su reflectividad en función de la longitud de onda y es el principio básico de teledetección usado para discriminar superficies; por ello, se han creado bibliotecas con colecciones de firmas espectrales que sirven a modo de referencia (Chuvieco, 2002).

Los valores de energía recibidos por el sensor se digitalizan y se emplean para la elaboración de imágenes que posteriormente pueden ser almacenadas, transmitidas, procesadas e integradas a Sistemas de Información Geográfica, lo que hace posible el uso de la información remota obtenida sobre el objeto de interés para la aplicación en un determinado campo de estudio (Chuvieco, 1995; Chuvieco, 2002).

El empleo de técnicas de teledetección contribuye al estudio de severidad y estimación de área afectada al evaluarse, a partir de productos satelitales, los cambios en la reflectancia de las coberturas

antes y después de que ocurra un incendio; de este modo, el uso de índices espectrales permite discriminar superficies y elaborar cartografía de áreas quemadas (Gajardo *et al.*,2010) que contribuye en la evaluación de los daños y conformación de estadísticas de incendios. Adicionalmente, el sensado remoto permite realizar un seguimiento espacial y temporal de *hotspots* o puntos calientes, compatibles a focos de incendios, por sensores que captan la temperatura de brillo del píxel (Davies *et al.*, 2009; Giglio *et al.*, 2016). La región Delta e Islas del Paraná cuenta con antecedentes de implementación de algunas de estas técnicas mencionadas (Zamboni, 2013).

## 2. Marco teórico

### 2.1 Delta e Islas del Paraná

Delta e Islas del Paraná es una ecorregión que abarca un sistema de 4.825.000 hectáreas de humedales de origen fluvial a lo largo de la llanura chaco-pampeana (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *s.f.-a*). Se extiende en los últimos 300 km del río Paraná (Kandus *et al.*, 2010), desde el sur de la ciudad de Diamante en Entre Ríos. Comúnmente se lo subdivide en 3 regiones: Delta Superior (desde la localidad de Diamante hasta Villa Constitución), Medio (desde Villa Constitución hasta Puerto Ibicuy) e Inferior (desde Puerto Ibicuy hasta la desembocadura en el Río de la Plata).

Es una planicie inundable con características únicas en la Argentina, destacándose entre ellas la heterogeneidad ambiental que surge del encuentro de distintas especies de flora y fauna, provenientes de zonas subtropicales a través del río y de las llanuras pampeana y mesopotámicas vecinas (Malvárez, 1997). Los regímenes hidrológicos y las vegetaciones son elementos claves en la conformación de patrones de paisaje.

Malvárez (1997) estudió la región y definió 11 unidades de paisaje:

- A. Bosques, praderas y lagunas de llanura de meandros.
- B. Isletas de praderas y albardones bajos.
- C. Cordones y depresiones.
  - C1. Praderas.
  - C2. Praderas con isletas de bosque.
  - C3. Bosques, praderas y arroyos.
- D. Praderas de la antigua llanura de mareas.
- E. Bosques y praderas de islas de cauce y fajas de meandro del Paraná.
- F. Praderas y sabanas de la antigua llanura litoral.
- G. Arbustales de antiguos deltas.
- H. Praderas de la Isla de Ibicuy.
- I. Pajonales y bosques del Bajo Delta.

Posteriormente, se han identificado 24 ambientes en la región y agruparon en 5 unidades grandes de paisaje (Kandus *et al.*, 2006):

- Unidad 1: Praderas y sabanas de los alrededores de Ceibas.
- Unidad 2: Bosques y praderas de los alrededores del Río Paranacito.
- Unidad 3: Praderas y médanos de los alrededores de Ibicuy.
- Unidad 4: Pajonales y bosques de las islas deltaicas.
- Unidad 5: Praderas, pajonales y bosques de los alrededores de Villa Paranacito y Puerto Constanza.

Respecto a la flora, se encuentran especies adaptadas a distintos ambientes de hidromorfismo predominando las especies herbáceas frente a las leñosas. Gramíneas, pastizales, juncales, pirizales y pajonales se encuentran en zonas parcialmente inundables. Además, se hallan plantas acuáticas como camalotes y repollitos de agua (Kandus *et al.*, 2011).

Dentro de las especies arbóreas nativas, que se desarrollan en zonas de baja inundabilidad, se incluyen: ceibos, timbós, sauces criollos y alisos de río, en el Delta Superior, y los dos últimos también se extienden sobre los márgenes del Paraná; en el Delta Inferior: bosques de ceibo, algarrobo, tala y espinillo. También, se han introducido especies con finalidad de disponer de sistemas forestales como sauces y álamos. Como árboles exóticos se identifican el ligustro, la ligustrina y el arce (Kandus *et al.*, 2011).

Distintos autores e instituciones han buscado exponer los servicios ecosistémicos que el sistema de humedales del Delta del Paraná proporciona a la sociedad y otros ecosistemas. Se deja a disposición del lector información más detallada al respecto en el Apéndice B.

El régimen hidrológico de la región condiciona en gran medida los tipos de servicios ecosistémicos que el humedal presta. Este régimen depende de los aportes de agua en la cuenca alta del río Paraná, que se incrementan progresivamente entre los meses de septiembre y marzo, para luego descender en el invierno ocasionando una bajante; y de las mareas y sudestadas del estuario del Río de la Plata.

Al ser un área extensa en sus dimensiones de norte a sur, los registros de temperaturas medias y precipitaciones varían en las distintas estaciones hidrometeorológicas ubicadas en ella. Benzaquen *et al.* (2017) identifican en el libro *Regiones de Humedales de la Argentina* una temperatura media anual de 20°C, y un nivel de precipitaciones mayor a 1000 mm anuales en toda la región.

Malvárez (1997) expone que si se realiza el balance hídrico usando el método de Thornthwaite y Mather, se puede ver un período de limitación del recurso hídrico en verano, evidenciado por la utilización del agua del suelo. También explica que el río Paraná juega el papel de moderador para algunas de las condiciones climáticas, como las temperaturas extremas y la deficiencia hídrica.

Los pulsos de inundación y sequía caracterizan la estructura y funcionamiento de los humedales, respondiendo a condiciones atmosféricas regulares y a anomalías como el Niño - Oscilación Sur (Kandus *et al.*, 2011). El fenómeno del Niño ocurre normalmente cada cuatro años y genera un incremento de precipitaciones en la alta cuenca del Paraná-Paraguay, ocasionando inundaciones en el Delta Inferior por la crecida de los ríos Paraná y Uruguay (Kandus *et al.*, 2006).

Estas particularidades, sumadas a las propiedades hidrológicas y edáficas propias de la zona, hacen que este humedal actúe como un proveedor de los mencionados bienes y servicios ecosistémicos, que garantizan la calidad de vida de los habitantes locales y de áreas vecinas (Taller ecologista, 2010).



El Delta del Paraná es una zona atravesada por diversas problemáticas debido, entre otras razones, a la percepción general de que los humedales son tierras improductivas para la prestación de servicios (Baumann *et al.*, 2021) y a su ubicación geográfica: su potencial aprovechamiento como zona agropecuaria productiva y la necesidad creciente de viviendas en las grandes ciudades aledañas al Río Paraná. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (*s.f.-f*) reúne las problemáticas asociadas con la explotación de las tierras del humedal para usos agropecuarios bajo el nombre de “pampeanización”, denominado así por tratarse del cambio de uso de suelo natural del ecosistema del humedal por un uso productivo, con actividades normalmente desarrolladas en el bioma de la pampa húmeda. Este proceso trae aparejado un cambio en la dinámica hídrica de la zona, dada la creación de diques o terraplenes para evitar la inundación de cultivos. A su vez, se asocian a este fenómeno las prácticas de quemas intencionales de pastizales, con el objetivo de eliminar la vegetación y preparar las tierras para los cultivos o para promover el crecimiento de pasturas tiernas para el ganado (Baumann *et al.*, 2021). Estos problemas se ven agravados por pertenecer el área del Delta a distintas jurisdicciones, agregando complejidad al asunto desde un punto de vista legal, político y de intereses privados.

De todos estos cambios, uno en particular destaca en la percepción social, por ser visible, apreciable y devastador. Se trata de los incendios que, como se mencionó anteriormente, tuvieron una especial atención en los años 2008 y 2020 debido a su frecuencia e intensidad (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020). Estos años estuvieron marcados por movimientos y campañas por parte de distintas ONGs para aumentar la conciencia social sobre la problemática, disponer de marcos regulatorios de protección del ecosistema del humedal, ofrecer reportes periodísticos de seguimiento de la situación y de las reiteradas quejas de la población por la presencia considerable de humo y cenizas en las localidades vecinas.

## **2.2 Incendios forestales**

El fuego es el resultado de una reacción química de oxidación o combustión con generación de energía (luz y calor) y sustancias (gases, aerosoles, humos y hollín).

El inicio del fuego implica la coexistencia de tres elementos que conforman el denominado ‘triángulo del fuego’:

- **Combustible:** compuesto que puede oxidarse (quemarse). Se puede encontrar en estado sólido, líquido o gaseoso. Puede ser de origen orgánico o inorgánico, siendo los combustibles a base de carbono los más comunes.
- **Comburente:** es la sustancia oxidante que reacciona con el combustible dando lugar a la combustión. Comúnmente el aire provee el oxígeno para la reacción de combustión.
- **Fuente de calor:** Puede ser una chispa, descarga eléctrica, fricción mecánica, energía solar, llama o reacción química, la cual proveerá la energía necesaria para que tenga

lugar la reacción de combustión. Luego, se produce una reacción en cadena, y el calor se transfiere de una superficie a otra por distintos mecanismos como radiación, conducción y/o convección, condicionando la propagación del fuego.

El fuego se presenta como un factor ecológico de los ecosistemas, siendo la vegetación el combustible a quemarse. La dinámica de la vegetación influye en términos de inflamabilidad, antes de que se genere el incendio, y de respuesta una vez ya sucedido, dando lugar a un nuevo rebrote y/o la germinación de una nueva especie (Jaureguiberry & Díaz, 2019). La vegetación, tanto viva como muerta, es el combustible que puede sufrir un proceso de ignición. El tipo de vegetación, con una estructura y composición propia, y su distribución en el ecosistema influyen en la ignición y propagación. Los combustibles finos, de diámetro menor a 6 mm, ejercen la mayor influencia en el comportamiento del fuego (McArthur 1967; Sullivan et al. 2012, como se citó en United Nations Environment Programme, 2022-b); los más gruesos se queman de forma más lenta, no alimentando el avance del fuego, más si la generación de emisiones (Surawski et al., 2016, como se citó en United Nations Environment Programme, 2022-b). La transmisión del calor, y por ende la propagación, es menor en árboles, ramas y troncos que en arbustos, pastos y hojas. Esta diferencia en la transmisión de calor también se evidencia en la estratificación vertical. De este modo, se distinguen los incendios subterráneos, superficiales y aéreos.

Los incendios subterráneos son aquellos que se producen bajo el terreno a causa de la acumulación de combustibles y materia orgánica. Los superficiales, por su parte, se dan sobre el mismo suelo. Por último, los aéreos o de copa son aquellos en los que la vegetación, generalmente de altura como los árboles, se quema por completo.

La capacidad de ignición del combustible depende de su contenido de humedad. La humedad es función del combustible: tipo (características fonológicas, morfológicas y fisiológicas), tamaño (en términos de grosor), estado (vivo o muerto), y disposición (si se encuentra suelto, en estratos y/o acumulado); además, tiene una estrecha relación con las condiciones hidrometeorológicas del lugar, las cuales influyen directamente sobre las variaciones en la humedad al generarse intercambios de agua, tanto de pérdida y ganancia, entre el material combustible y el suelo o atmósfera circundante (Ruíz González, 2004).

La propagación de incendios requiere de la continuidad del combustible disponible. Si existen discontinuidades en la cobertura vegetal, ya sea por la transición a terreno desnudo, una carretera o superficie de agua, se limita la propagación del fuego actuando como cortafuego.

Luego, las condiciones meteorológicas cumplen también un rol fundamental en favorecer la ignición y/o la propagación. Dentro de la meteorología tienen implicancia en los fenómenos de incendios: temperatura, humedad relativa, precipitaciones y viento (dirección y velocidad). La gran influencia en la propagación de incendios es debido a que condicionan el contenido de humedad de los combustibles forestales y su distribución (Chuvieco & Martín Isabel, 2004). Influyen tanto los

regímenes estacionales esperados como las anomalías climáticas. Las condiciones de sequía, elevadas temperaturas y una alta distribución y frecuencia de vientos favorece la propagación. Altas temperaturas y escasa humedad atmosférica facilitan la evapotranspiración y pérdida de agua desde la superficie. El viento alimenta el fuego con el aporte de oxígeno al tiempo que favorece la desecación del combustible.

La actividad de los incendios ha evolucionado a lo largo de la historia del planeta, desde que se reunieron las condiciones ambientales iniciales (disponibilidad de biomasa vegetal) que permitieron la ocurrencia de los primeros incendios en el Silúrico (hace 440 millones de años), atravesando luego períodos de crecimiento y diversificación de especies vegetales que se adaptan diferencialmente a los regímenes de incendios naturales, hasta el descubrimiento del fuego por parte del ser humano y su control para uso en distintas actividades humanas (Rodríguez-Trejo, 2012). Desde tiempos inmemorables, el fuego ha sido empleado como herramienta de gestión del territorio, con fines agrícolas, silvícolas o ganaderos. La quema de la vegetación natural para preparar (limpiar) el terreno se ha convertido en una herramienta de la producción agropecuaria y su uso está en alza con la expansión de la frontera agrícola (Rubio Torres, 2017).

### **2.2.1 La problemática de los incendios forestales en la región Delta e Islas del Paraná**

En Argentina, el Servicio Nacional de Manejo de Fuego (*s.f.*) define a los incendios forestales como aquellos que afectan a las tierras forestales incluidas en la Ley Nacional de defensa de la Riqueza Forestal: bosques y áreas no aptas para cultivo o pastoreo (pero sí para forestar). De este modo, los diferencia de los incendios rurales, que afectan zonas cultivadas y de vegetación tipo arbustiva o de pastizal; y de los de interfase, que se desarrollan en zonas de transición entre los ejidos urbanos y las áreas rurales.

Según el último Anuario de Estadística Forestal publicado (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021-c), en 2019 se registraron 6.479 incendios, de los cuales sólo al 0,9% se le atribuye su origen debido a una causa natural; a un 46% se le asigna un origen antrópico, ya sea por negligencia o intencionalidad; los incendios restantes no pudieron ser categorizados. Analizando el período 2011-2019, el porcentaje correspondiente a causa natural se mantuvo debajo del 4% para prácticamente todos los años frente a un 45% de origen antrópico promedio. A su vez, las superficies más afectadas por los incendios fueron los pastizales y los bosques nativos, pese a las políticas de conservación y manejo sostenible orientadas a este tipo de vegetación.

En mayo del 2009, se promulgó la Ley N° 26.562 de Presupuestos Mínimos de Protección Ambiental para Control de Actividades de Quemadas y, en enero de 2013, la Ley N° 26.818 de Manejo de Fuego. De esta manera, se buscó hacer frente a los incendios forestales.

Dado la recurrencia de eventos de incendios en la región Delta e Islas del Paraná, también se han elaborado normativas provinciales. No obstante, se incumplen regularmente. Adicionalmente,

continúan en auge los reclamos por la aprobación de una ley de Humedales y la reactivación e implementación efectiva del PIECAS- DP.

La quema de pastizales en áreas destinadas a la actividad ganadera es una práctica regular a fines del invierno, y ocasionalmente en el otoño, para favorecer el rebrote de pastos tiernos. No se trata en un principio de una actividad nueva en el humedal, pero en últimos 20 años ha sufrido, al igual que otras actividades, un proceso de transformación a causa de la adopción de un modelo de producción intensivo que modifica notablemente el ecosistema (Kandus *et al.*, 2020); por ejemplo, al remover su vegetación natural con uso de fuego, y afectar su drenaje natural y régimen hidrológico por obras de endicamiento y construcción de terraplenes no naturales (Wetlands International, 2010). En consecuencia, en ciertas zonas se afectó el ingreso de agua limitando la recarga natural de lagunas y arroyos internos.

Respecto a los eventos de incendios de 2020, esta problemática se complejiza aún más debido a la prolongada sequía que atraviesa la región, condición bajo la cual se favorece la disponibilidad de combustible de biomasa vegetal y la propagación del fuego.

Carlos Rossi (*s.f.*), Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Lomas de Zamora (UNLZ), coincide en que uno de los principales agravantes fue la intensa sequía, junto con las condiciones de extrema bajante del Río Paraná del año 2020. Esto, sumado a las heladas que secan los pastizales, juncales y carrizales, hizo que el fuego pudiera avanzar sobre vegetación seca y por lo tanto más sencilla de encender, y sin interrupciones debido a la falta de cortafuegos naturales en forma de cuerpos de agua superficiales.

Eduardo Díaz, profesor e investigador de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Entre Ríos (UNER), en una entrevista con APFDigital (2020) profundiza más en la razón por la cual los fuegos son capaces de propagarse de la manera en que lo hacen bajo estas condiciones. En su estado normal, la turba del suelo está saturada de agua generando condiciones de anaerobiosis; en ausencia de oxígeno, los microorganismos presentes producen metano. Este metano funciona como combustible para el fuego. Asimismo, un descenso en el nivel del agua deja expuesta la turba y acontecen dos situaciones nuevas: por un lado, la temperatura del metano aumenta al no estar rodeado de agua (que con su gran capacidad calorífica amortigua los cambios de temperatura); y en segundo lugar, el metano entra en contacto con el oxígeno. En suma, esta situación conlleva a que coexistan el combustible y el comburente, restando el aporte de una energía de activación, como una chispa, para que se encienda el fuego. Las circunstancias se complejizan ya que las condiciones mencionadas no son puntuales, sino que se dan por franjas extensas del territorio. En otras palabras, el fuego se extiende bajo la capa de turba para resurgir a cierta distancia en la superficie, dificultando los trabajos de contención y combate de los focos de incendio.

En los eventos del 2008, por ejemplo, los juncales y pirizales del Delta Inferior fueron los más afectados, observándose una recuperación rápida de los juncos en áreas de baja intensidad de incendios y con aportes de agua (Kandus *et al.*, 2011).



Estudios y caracterizaciones de regímenes de incendios se han realizado en algunas ecorregiones argentinas como el Chaco Seco (Landi, 2018) y las sierras de Córdoba (Argañaraz, 2016). Además, el Servicio Nacional de Manejo de Fuego, a través de su *Serie evaluación de peligros de incendios*<sup>1</sup>, publica informes técnicos para distintos casos de incendio, junto a reportes diarios y de alerta temprana. Las distintas sedes del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) elaboran, también, documentos sobre análisis de temporadas de incendios y el comportamiento del fuego en distintas regiones, disponibles en su repositorio institucional<sup>2</sup>.

En todas estas publicaciones se describen las dinámicas de los incendios a nivel local, aunque la mayoría acuerda en 1) el incremento sostenido en la recurrencia de incendios y su relación con el manejo de tierras agropecuarias, 2) la influencia de la inflamabilidad y contenido de humedad de los combustibles en la generación de incendios y su estrecha relación con los pulsos de inundación y sequía, 3) la preponderancia de afectación y propagación de incendios en coberturas de tipo pastizales y arbustales frente a los bosques, y la 4) contribución de la incorporación de productos satelitales y herramientas de teledetección para el abordaje de la problemática.

### **2.3 Aportes de la teledetección**

Según información provista por el Instituto Nacional de Investigación Espacial de Brasil (INPE), en el 2020 se registraron 74.111 *hotspots* en Argentina a partir de los datos provistos por los sensores MODIS y VIIRS. Además, en su sitio web<sup>2</sup>, se publican estadísticas resultantes de los monitoreos de *hotspots* desde 1998 hasta la actualidad, observándose así que en el año 2020 se registraron: el máximo anual de focos totales y los máximos mensuales para los meses de mayo, agosto y octubre.

A nivel regional, desde 2002, la Red Latinoamericana de Teledetección e Incendios Forestales (RedLaTIF) trabaja de forma integrada proyectos de observación y gestión de incendios forestales, haciendo uso de herramientas de teledetección y análisis geoespacial. Argentina a través de un grupo de expertos integra esta red en la que colaboran, también, instituciones como el INTA y la CONAE (Red Latinoamericana de Teledetección e Incendios Forestales, *s.f.*).

En los últimos años se ha estado trabajando en torno al uso de herramientas de mapeo y validación de áreas quemadas con *Google Earth Engine*, reconociendo la potencial aplicación de esta plataforma para el estudio de la región. Se ahondará más adelante sobre esta plataforma y su actual aplicación al estudio de los incendios forestales en las secciones siguientes.

A nivel nacional, el Servicio Nacional de Manejo de Fuego (SNMF), dependiente del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, es el organismo que se encarga de coordinar y gestionar tareas de prevención, alerta, combate, monitoreo y evaluación de daños de

---

<sup>1</sup> <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/fuego/alertatemprana/evaluacion> [Fecha de consulta: 13/03/2022]

<sup>2</sup> [https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas\\_paises/](https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/portal-static/estatisticas_paises/) [Fecha de consulta: 26/05/2022]

incendios (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *s.f.-b*). El SNMF reporta diaria y mensualmente los niveles de peligro de incendio, en función de las condiciones meteorológicas vigentes y la disponibilidad de combustible/biomasa, y el estado de situación de los focos de incendios que se encuentran activos. A su vez, coordina el despliegue de recursos para combatir los incendios. A partir de la información reportada se estudia la estacionalidad de ocurrencia de incendios y se estima las superficies afectadas. Para el territorio PIECAS-DP, se presentó un informe con las estimaciones de área quemada para el período comprendido entre enero y diciembre de 2020.

En lo que respecta a cartografía de áreas quemadas, se delimitan las superficies en base al empleo de la técnica de interpretación visual de composiciones RGB de productos satelitales de Sentinel 2A, Sentinel 2B y Landsat 8 OLI. También se utiliza como apoyo bases de datos y capas base de organismos nacionales a modo de conocer la distribución de plantaciones forestales, áreas urbanas, zonas ganaderas, bosques, áreas protegidas, infraestructura, etc sobre el área de estudio.

En algunos reportes del 2021, se destaca la incorporación de herramientas de *Google Earth Engine* como complemento para evaluar áreas quemadas. Este es el caso del *Informe de Áreas Quemadas - Incendios "Las Golondrinas" y "El Bolquete"* para las provincias de Río Negro y Chubut (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021-a).

### 3. Materiales

#### 3.1 Área de estudio

El área de estudio seleccionada es la definida por el PIECAS-DP, correspondiente al Plan Integral Estratégico para la Conservación y el Aprovechamiento Sostenible de la Región del Delta del Paraná. Esta área fue creada oficialmente en el año 2014, por un acuerdo entre los gobiernos de las provincias de Entre Ríos, Buenos Aires y Santa Fe, con representación de organismos ambientales y responsables del manejo del fuego en las mismas (Bassati R. *et al.*, 2014). Además, participaron otras dependencias del Poder Ejecutivo Nacional, entre las que se destacan el Ministerio del Interior y de la entonces Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable.

La fuerza impulsora para la creación de esta área fueron los incendios del año 2008, fenómeno que puso en la conciencia colectiva de la población la problemática de la quema de pajonales en el Delta del Paraná, luego de que el humo provocado por esta llegara a la Ciudad de Rosario, a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y al Gran Buenos Aires. En ese momento, se generó una cobertura mediática nacional de este fenómeno, lo que dejó al descubierto sus potenciales efectos perjudiciales sobre los ecosistemas, sus servicios ecosistémicos, los recursos contenidos en ellos y, principalmente, la afectación a la salud de la población (Bassati R. *et al.*, 2014).

Forman parte de la zona incluida en el PIECAS las siguientes Áreas Naturales Protegidas:

- Sitio Ramsar Delta del Paraná: designado como tal en octubre del año 2015, este sitio cubre un área de 243.126 hectáreas e incluye los tramos medio e inferior del cauce principal y la llanura aluvial del río Paraná. El territorio ocupa parte de las provincias de Santa Fe y Entre Ríos, estando delimitado al sur por la sección Islas del departamento de Diamante, en Entre Ríos y al norte por el departamento de San Jerónimo, en Santa Fe. Los límites este y oeste los constituyen las barrancas y la línea de costa del río Paraná. Entre las razones para su constitución se destacan su función como reservorio de biodiversidad, la presencia de flora y fauna emblemáticas de la región, la generación de numerosos servicios ecosistémicos y la importancia de esta zona para el comercio y la economía tanto local como regional (*Wetlands International, s.f.*). En su interior están contenidos el Parque Nacional Pre-Delta y el Parque Nacional Islas de Santa Fe.
- Parque Nacional Pre-delta: creado a partir de la Ley Nacional 24.063 en 1991. Ocupa una superficie de 2.608 ha, ubicado enteramente dentro de la provincia de Entre Ríos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *s.f.-c*).
- Parque Nacional Islas de Santa Fe: creado a partir de la Ley Nacional 26.648 en 2010. Ocupa una superficie de 4.096 ha, ubicado enteramente dentro de la provincia de Santa Fe (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *s.f.-d*).

- Parque Nacional Ciervos de los Pantanos: creado bajo la Ley Nacional 27.456 en 2018, este parque cuenta con 5.200 ha y se originó sobre las conocidas Reserva Natural Otamendi y Reserva Natural Río Luján creadas en la década del 90. Desde 2018 es reconocido como Sitio Ramsar y Área Importante para la Conservación de las Aves (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, *s.f.-e*).
- Reserva de Usos Múltiples Islas de Victoria: en el año 2019, a través de la Ley Provincial 10.671, el gobierno de la Provincia de Entre Ríos declara esta área natural como protegida por resultar de interés provincial, cultural, ambiental y científico (Legislatura de la Provincia de Entre Ríos, 2019). La misma ocupa un área de 376.000 ha, comprendiendo la zona de humedales e islas incluidas en el ejido urbano de la ciudad de Victoria (Secretaría de Ambiente de Entre Ríos, 2020).
- Reserva de Biósfera Delta del Paraná: declarada como tal en el año 2000, ocupa un área de 900 km<sup>2</sup> dentro de la provincia de Buenos Aires. Sigue objetivos de investigación, desarrollo humano y conservación ambiental propuestos por la UNESCO (Municipio de San Fernando, *s.f.*).

Por último, cabe mencionar que se han realizado estudios en el área del PIECAS-DP que aportan datos relevantes a este trabajo, y que pueden usarse como antecedentes para comparar los resultados aquí obtenidos.

Considerando lo mencionado anteriormente y teniendo en cuenta los objetivos del presente trabajo, consideramos adecuada la utilización de la zona definida por el PIECAS-DP como área de estudio. En la Figura 1, se presenta un mapa mostrando el área de estudio.

### **3.2 Productos Sentinel 2**

La serie de satélites Sentinel 2 MSI fue puesta en órbita por la Agencia Espacial Europea en el marco del programa Copernicus de la Comisión Europea. Desde 2014, con el lanzamiento del primer satélite, la finalidad de este programa es disponer de datos continuos de la superficie terrestre y que estos estén disponibles para la administración pública y apoyen la toma de decisiones en materia de ambiente y seguridad (Instituto Geográfico Nacional-Gobierno de España, 2018). Para lograr dichos objetivos, se han desarrollado 6 misiones, cada una de las cuales está integrada por dos satélites que, con un desfase de 180° entre sí, adquieren imágenes con una mayor resolución temporal. Las distintas misiones responden a fines específicos y permiten el monitoreo terrestre, oceánico y atmosférico (Agencia Espacial Europea, *s.f.*).

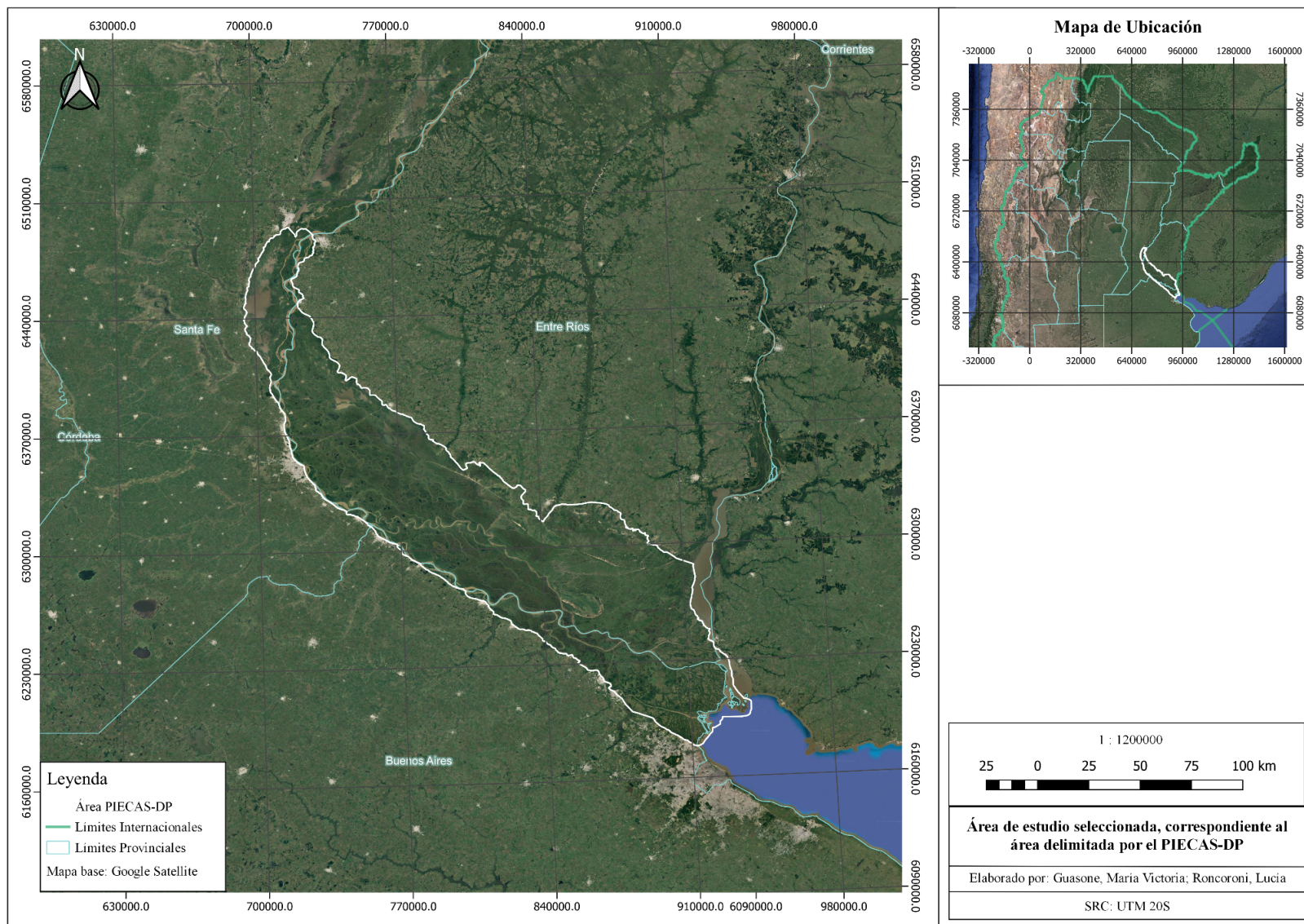


Figura 1: Área de estudio seleccionada, correspondiente al área delimitada por el Plan Integral Estratégico para la Conservación y Aprovechamiento Sostenible en el Delta del Paraná (PIECAS-DP). Capa shapefile ordenamiento:piecas\_dp\_2021\_4326 obtenida el 22/06/2021 del servicio WFS del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.



Particularmente, Sentinel 2 ofrece datos multiespectrales para la observación remota de la tierra. Incluye los satélites Sentinel 2A y 2B, que son idénticos y se encuentran en la misma órbita pero separados por 180°. De este modo, se logra una resolución temporal conjunta de 5 días (individual de 10 días). El sensor transportado por este satélite, el MultiSpectral Imaging (MSI), trabaja con 13 bandas que abarcan desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta.

Las características de las bandas se resumen en la Tabla 1:

TABLA 1: CARACTERÍSTICAS DE LAS BANDAS SENTINEL 2.

Banda	Sentinel 2A		Sentinel 2B		Resolución (m)
	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	Longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	
B1 - Aerosol	442,7	21	442,2	21	60
B2 - Blue	492,4	66	492,1	66	10
B3 - Green	559,8	36	559,0	36	10
B4 - Red	664,6	31	664,9	31	10
B5 - Red edge 1	704,1	15	703,8	16	20
B6 - Red edge 2	740,5	15	739,1	15	20
B7 - Red edge 3	782,8	20	779,7	20	20
B8 - Near Infrared (NIR) 1	832,8	106	833,0	106	10
B8A - Near Infrared (NIR) 2	864,7	21	864,0	22	20
B9 - Water vapour	945,1	20	943,2	21	60
B10 - Cirrus	1373,5	31	1376,9	30	60
B11 - SWIR 1	1613,7	91	1610,4	94	20
B12 - SWIR 2	2202,4	175	2185,7	185	20

Elaborada a partir de los datos provistos por la Agencia Espacial Europea<sup>3</sup>.

Previamente a disponer de las imágenes satelitales para su uso, para cualquiera de las bandas de trabajo, se aplican una serie de correcciones a fines de ‘limpiar’ la imagen de posibles ruidos y

<sup>3</sup> <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric> [Fecha de consulta: 2/06/2022]

distorsiones de los valores de intensidad de radiación que llega al sensor, teniendo en cuenta que el flujo energético es modificado por los componentes atmosféricos. Básicamente, existen dos tipos de correcciones: radiométrica y geométrica. La primera realiza ajustes de los valores de intensidad de brillo que llega al sensor al, por ejemplo, verse atenuada la radiación por efectos atmosféricos o por calibración del sensor. La corrección geométrica, por su parte, se basa en posicionar con un mayor grado de exactitud la imagen satelital sobre el terreno. Existen 5 niveles de procesamientos de productos Sentinel 2, pero sólo los productos de nivel 1C y 2A están disponibles para descarga del usuario y se presentan en la Tabla 2:

TABLA 2: PRODUCTOS SENTINEL 2.

Nivel de producto	Tipo de corrección
0	Producto bruto
1C	Imágenes ortorectificadas y corregidas a tope de la atmósfera (TOA)
2A	Imágenes ortorectificadas y corregidas por debajo de la atmósfera (BOA)

Elaborada a partir de los datos provistos por la Agencia Espacial Europea<sup>4</sup>.

La mínima unidad de estos productos se denomina *tile*, que tiene una extensión de 100 km x 100 km y proyección UTM/WGS84.

Para el presente trabajo se utilizaron imágenes Sentinel 2 nivel 2A, corregidas por debajo de la atmósfera, ya procesadas y provistas por la base de datos geoespacial de *Google Earth Engine*.

### 3.3 Productos adicionales descargados de servicios WFS

El Servicio de Vectores en Web, *Web Feature Service* (WFS) en inglés, es uno de los geoservicios que presta la *Infraestructura de Datos Espaciales de la República Argentina* (IDERA). A través del servicio WFS se accede, visualiza y descarga información geográfica en formato vectorial, la cual es provista por distintos organismos nacionales, para su uso por parte de un usuario de un Sistema de Información Geográfico como QGIS (IDERA, *s.f.*). Para la elaboración de los mapas que se publican en este documento se utilizaron las siguientes capas<sup>5</sup>:

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (datos espaciales con Sistema de Referencia de Coordenadas geográficas EPSG:4326 - WGS 84):

A. *areas\_protegidas: Eco-Región\_DeltaeIslasdelParaná*. Esta capa con geometría tipo polígono muestra los límites de la Ecorregión Delta e Islas del Paraná.

<sup>4</sup> <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types> [Fecha de consulta: 2/07/2022]

<sup>5</sup> [https://www.idera.gob.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=335:geoservicios&catid=33&Itemid=169](https://www.idera.gob.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=335:geoservicios&catid=33&Itemid=169) [Fecha de consulta: 15/07/2022]

- B. *ordenamiento:piecas\_dp\_2021\_4326*. Capa que contiene la extensión del Plan Integral Estratégico para la Conservación y Aprovechamiento Sostenible en el Delta del Paraná (PIECAS-DP). De este shapefile derivó la capa que delimita el área de estudio en este trabajo.
- Catálogo de Objetos Geográficos del Instituto Geográfico Nacional (con Sistema de Referencia de Coordenadas geográficas EPSG:4326 - WGS 84):
    - A. *area\_protegida*: capa de geometría polígono que contiene todas las Áreas Protegidas del territorio argentino. Dentro de los metadatos se incluye el atributo *Tipo de Área Protegida* que indica su nivel de conservación. Se la utiliza para elaborar la cartografía de áreas quemadas en territorio protegido dentro del PIECAS-DP.
    - B. *localidad\_bahra*: capa de tipo punto que ubica los asentamientos, centros poblados y localidades de Argentina. Permite referenciar otros elementos en los mapas de áreas quemadas presentados en este trabajo.
    - C. *provincia*: capa polígono con la demarcación de las provincias argentinas y la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Asimismo, esta capa permite referenciar y ubicar otros elementos en los mapas elaborados.



## 4. Métodos

### 4.1 Interpretación de imágenes satelitales

Una de las técnicas más empleadas en teledetección para el estudio y tratamiento de las imágenes satelitales es la interpretación visual. Mediante el análisis visual se incorporan criterios complejos como brillo, textura, tamaño, conocimiento geográfico del área de estudio, entre otros, para identificar elementos y fenómenos en la superficie terrestre (Chuvieco, 1995; CONAE, *s.f.*). En este caso, son sumamente importantes las habilidades, conocimientos y entrenamiento de la persona encargada de realizar la fotointerpretación porque introducirá un error adicional en el análisis, que se espera que sea el menor posible.

La Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE), en marco de su proyecto educativo y de formación denominado *Programa 2Mp* buscan promover y facilitar el uso y acceso democrático a la tecnología geoespacial<sup>6</sup>, ha elaborado la *Guía de Interpretación Visual de Imágenes Satelitales* (CONAE, *s.f.*). Siguiendo este documento, se aplican distintos criterios de complejidad variable en la técnica de análisis visual.

El criterio primario es el espectral e incorpora los parámetros brillo y color. El brillo se emplea como indicador de los niveles de reflectancia de la cobertura observada. A mayor nivel de brillo mayor reflectancia y viceversa. A su vez, a las distintas bandas se les asigna color para favorecer la observación y resaltar ciertas superficies, teniendo en cuenta que cada banda multiespectral en realidad puede tener 256 niveles de intensidad de grises difícilmente diferenciables. Una de las técnicas más empleada es el uso de composiciones RGB, que consiste en asignar filtros de color rojo (*red*), verde (*green*) y azul (*blue*) a las distintas bandas espectrales. Por ejemplo, el color real busca representar las cubiertas de una forma similar a la que se encuentran en la naturaleza, presentando las vegetación en distintas tonalidades de verde y marrón, y los cuerpos de agua en azul. El infrarrojo color asigna el color rojo a la banda del infrarrojo; de esta manera permite diferenciar distintas coberturas vegetales entre sí (por diferencia en su estado y actividad fotosintética) y de otras coberturas que no presentan alta reflectividad en esta porción del espectro. Por último, el falso color real permite resaltar zonas urbanas y cuerpos de agua en color magenta y azul respectivamente, y diferenciarlo de la vegetación en verde.

A continuación, se aplican criterios espaciales y temporales. Con los primeros se busca identificar, primero, objetos individuales según su tamaño, forma y textura; y segundo, cómo estos objetos se agrupan en patrones regulares o irregulares, la sombra que generan y su contexto respecto a

---

<sup>6</sup> Ver sección Educación y Capacitación en: <https://www.argentina.gob.ar/ciencia/conae> [Fecha de consulta: 6/09/2021]

otros elementos de la imagen. El criterio temporal consiste en analizar series temporales, es decir, utilizar dos imágenes del mismo lugar, con igual resolución y combinación de bandas, pero adquiridas en distintos momentos. De esta forma, se pueden analizar cambios en las coberturas por algún fenómeno determinado.

Por su parte, el tratamiento digital se basa en los valores de intensidad de radiación de cada píxel a los que se les aplica umbrales más precisos para una clasificación de coberturas. Requiere del soporte de programas informáticos y reduce el error de la interpretación visual al no depender de la capacidad limitada de detección del ojo humano, además de permitir utilizar más de tres bandas simultáneamente. Sin embargo, debe mencionarse que el tratamiento de la información espectral no puede prescindir por completo de la información textual y contextual propia de la fotointerpretación (Sarría, *s.f.*). Una clasificación supervisada se basa en definir a priori ciertos elementos que por sus características espectrales pertenecen a ciertas categorías, así se determinan áreas de entrenamiento que sirven para la posterior agrupación de clases. La clasificación no supervisada se realiza por medios estadísticos, pero requiere definir a priori el número de clases a obtener o la distancia entre los umbrales. Por último, se lleva a cabo una validación para conocer el error de clasificación.

En la actualidad existen diferentes plataformas y programas que permiten visualizar y procesar imágenes satelitales. De esta manera, se facilita el tratamiento de las mismas pudiendo trabajar simultáneamente con un gran conjunto de datos y en distintas escalas temporales y espaciales.

Por último, cabe mencionar que cualquier proceso de interpretación y tratamiento de información geoespacial responde a un nivel de detalle de trabajo requerido y que el mismo no puede sustituir la toma de datos en campo (Serrato Álvarez, 2018) para la validación.

#### **4.2 Cartografía de áreas quemadas y severidad de incendios**

Para la identificación y cartografía de áreas quemadas es muy valioso el aporte de información remota, ya sea para cubrir extensas áreas de terreno y/o realizar análisis temporales de series de incendios que ocurrieron en períodos anteriores. Además, se aplican distintos ‘filtros’ que permiten resaltar áreas de interés facilitando el reconocimiento de distintas coberturas.

El principio básico que permite llevar a cabo la detección de área quemada es que esta última presenta un comportamiento espectral diferente a un área no perturbada. La superficie vegetal previa a un incendio tiene una reflectancia alta en el infrarrojo cercano (NIR) y baja en el infrarrojo de onda corta (SWIR) del espectro electromagnético. Por su parte, las áreas recientemente quemadas tienen una baja reflectancia en el NIR y alta reflectancia en la banda SWIR (Key & Benson, 2006). Estas variaciones se corresponden con el contenido de humedad presente en las distintas superficies. La estructura celular de la vegetación sana contiene moléculas de agua que se reflejan en el NIR. Por su parte, un suelo desnudo y que ha perdido humedad tiene una elevada reflectancia en el SWIR. A partir

del uso de sensores que captan radiación en estas regiones del espectro, es posible delimitar la extensión y severidad del incendio.

La técnica más elemental para estimar el área quemada es la interpretación visual de imágenes satelitales. Para ello, con una selección adecuada de las bandas de trabajo y aplicando distintos criterios, que se basan en el comportamiento espectral, tamaño, textura y distribución espacial de las distintas superficies, el usuario procede a identificar los distintos elementos en las imágenes y digitalizarlos (Chuvieco, 1995; CONAE, *s.f.*). El grado de precisión de esta técnica es menor y se introduce un error adicional por el factor humano.

Más allá de trabajar con composiciones, se puede avanzar a una etapa posterior de procesamiento y obtener productos derivados como los denominados índices espectrales. Estos índices se obtienen de realizar operaciones entre las bandas del sensor del satélite a fines de resaltar, analizar y clasificar distintas coberturas terrestres.

Algunos índices que se emplean en el estudio de eventos de incendios son:

- *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI): permite estimar la cantidad y el desarrollo de la vegetación a partir de la medición de intensidad de la radiación en las bandas roja y NIR. Si la vegetación es fotosintéticamente activa -con un alto contenido en clorofila- absorbe mayor cantidad de luz visible y refleja intensamente en el infrarrojo cercano. Sabiendo que esto es incompatible en áreas quemadas, este índice es indicador de la relación entre el área incendiada y la disminución en la cubierta vegetal (Chuvieco, 1995). Se representa con la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

$$NDVI(Sentinel 2) = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

- *Normalized Burn Ratio* (NBR): combina el NIR y el SWIR, dos bandas espectrales que permiten un mayor contraste por el efecto del fuego. Como se mencionó anteriormente, la reflectividad del NIR desciende debido a la desaparición de la vegetación activa mientras que la del SWIR aumenta por la pérdida de humedad y exposición del suelo (Chuvieco, 1995). Se representa con la siguiente ecuación:

$$NBR = \frac{NIR - LongSWIR}{NIR * LongSWIR}$$

Para el caso del satélite Sentinel 2:

$$NBR(Sentinel 2) = \frac{B8 - B12}{B8 + B12}$$

- *delta Normalized Burn Ratio* (dNBR): este método propuesto por Key & Benson (2006) se obtiene de la resta de los índices NBR para una imagen pre-fuego y otra post-fuego.
- *Burned Area Index* (BAI): definido para el cálculo de áreas quemadas, se basa en el comportamiento espectral de las cenizas y productos carbonizados. Toma los valores de reflectividad en el NIR y en el rojo y calcula cuánto se aproximan dichos valores a los valores

de comportamiento espectral definidos para píxeles recientemente quemados (Nieto & Isabel, 2008). Se representa con la siguiente ecuación:

$$\bullet \quad BAI = \frac{1}{(pc - RED)^2 + (pcNIR - NIR)^2}$$

Donde  $pc$  y  $pcNIR$  son valores de convergencia para áreas recientemente quemadas.

Para el caso del satélite Sentinel 2:

$$\bullet \quad BAI (Sentinel 2) = \frac{1}{(pc - B4)^2 + (pcNIR - B8)^2}$$

- **NBR2: Normalized Burn Ratio 2:** se trata de una modificación del NBR para que el índice sea más sensible al agua contenida en la vegetación. Tiene utilidad para el estudio de la recuperación de la vegetación después de un incendio (U.S. Geological Survey, *s.f.*). Depende de los valores del *LongSWIR* y el *ShortSWIR*. Se representa con la siguiente ecuación:

$$NBR2 = \frac{ShortSWIR - LongSWIR}{ShortSWIR + LongSWIR}$$

Para el caso del satélite Sentinel 2:

$$NBR2 (Sentinel 2) = \frac{B11 - B12}{B11 + B12}$$

Para todas las ecuaciones anteriores:

- **LongSWIR:** hace referencia, dentro del rango de ondas del espectro electromagnético, a la sección de mayor longitud de onda dentro de la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR), por sus siglas en inglés *long Short Wave Infrared*. Cubre el rango del espectro electromagnético de 1,7 a 2,5  $\mu\text{m}$  de longitud de onda. También se lo denomina SWIR-2.
- **NIR:** hace referencia, dentro del rango de ondas del espectro electromagnético, al infrarrojo cercano, por sus siglas en inglés *near infrared*. Cubre el rango del espectro electromagnético de 0,7 a 0,9  $\mu\text{m}$  de longitud de onda.
- **RED:** hace referencia al rango de ondas del espectro electromagnético correspondiente al rojo visible. Cubre el rango del espectro electromagnético de 0,665 a 0,7  $\mu\text{m}$  de longitud de onda.
- **ShortSWIR:** hace referencia, dentro del rango de ondas del espectro electromagnético, a la sección de menor longitud de onda dentro de la banda del infrarrojo de onda corta, por sus siglas en inglés *short Short Wave Infrared*. Cubre el rango del espectro electromagnético de 0,9 a 1,7  $\mu\text{m}$  de longitud de onda. También se lo denomina SWIR-1.

El NDVI se ha empleado para usos de severidad en sensores de baja resolución. El uso de Índices como el dNBR está ampliamente difundido y estos se han validado para estudios de severidad, teniendo en cuenta tanto su ventaja para mostrar cambios en el suelo como sus limitaciones en cuanto

a diferencias en los niveles de precisión según el ecosistema estudiado y nivel de severidad (Arellano *et al.*, 2017).

Por último, una tercera metodología, derivada del análisis de productos satelitales, es la estimación de área quemada a partir de focos activos. El principio de esta metodología es determinar anomalías térmicas, asimilables a *hotspots*, sobre la superficie terrestre. Una vez localizados los puntos calientes se realizan cálculos estadísticos para conocer la superficie quemada en cada píxel. Además, esta técnica puede combinarse con el uso de índices de vegetación como el NDVI que permite conocer el porcentaje de superficie vegetal, muy vinculada a la propagación del fuego.

Independientemente de cuál sea la metodología a emplear, se requiere contar con un software que permita visualizar y procesar la información geoespacial y realizar análisis espacio-temporales. Los elegidos comúnmente para dicha tarea son los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como ENVI, SNAP, QGIS, ARCGIS, entre otros.

Una alternativa interesante es el empleo de la plataforma *Google Earth Engine* (GEE), creada en 2010, que permite a los usuarios acceder a grandes cantidades de datos geoespaciales, de todas partes del mundo y en series históricas, y realizar análisis complejos sin necesidad de disponer de un complejo sistema computacional. Para estudios de ocurrencia y severidad de incendios, a través de un editor de código, se escribe y ejecuta un *script* que permite visualizar una determinada imagen en el momento anterior y posterior al fuego.

El cálculo del área quemada y los estudios de severidad de incendios ofician en sí mismos como datos de entrada para el abordaje de estudios posteriores. Por ejemplo, a partir de los datos obtenidos se puede estimar el porcentaje de biomasa quemada y, con ello, los contaminantes gaseosos emitidos. Conocer esta información es importante por su contribución global a la problemática del calentamiento global y por su impacto local y regional en términos de detrimento de la calidad del aire. También se deben tener en cuenta para realizar proyectos de restauración de áreas quemadas.

Para la zona del Delta o litoral del Río Paraná, se han publicado algunos trabajos sobre incendios forestales en los que se incorporan herramientas satelitales. En el trabajo *Patrones Espacio - Temporales de Incendios en el Complejo Litoral del Río Paraná* (Zamboni, 2013) se investiga la ocurrencia de incendios forestales para el periodo 2004-2008 mediante un análisis de *hotspots*. Utilizando productos del sensor MODIS Aqua y validando los resultados con datos de campo, se agruparon los *hotspots* para determinar el número de incendios ocurridos en ese periodo y caracterizar su régimen. El análisis de ocurrencia estacional muestra que los incendios ocurren mayormente en invierno y a menor nivel del Río Paraná, lo cual es consistente con un periodo de sequía. Además, se concluyó que en el año 2008 tuvo lugar el mayor número de incendios para el área de estudio, duplicando el valor registrado para el año anterior. Se muestra, además, que la superficie quemada en ese año fue de 70.000 hectáreas.

La cátedra de Teledetección Aplicada y Sistemas de Información Geográfica de la Facultad de Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Rosario) también ha desarrollado investigaciones en el

tema. En *Estimación de la severidad de incendios en el Alto Delta del Paraná según diferencias relativas del índice espectral NBR* (Di Leo et al., 2014) se indica que el dNBR posee sensibilidad para evaluar la severidad de incendios en zona de humedales. Los datos analizados corresponden a la serie de incendios de 2008 y se utilizaron imágenes Landsat 5 TM.

Respecto al año 2020 existen algunas investigaciones respecto a la ocurrencia y efectos de los incendios en el Delta. Como se mencionó anteriormente, según el *Informe de superficies afectadas por incendios en el Delta e islas del Río Paraná - Segunda parte* (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021-b) en el periodo enero-diciembre de 2020 se quemaron 487.000 ha. Este trabajo incluye un mapa de áreas quemadas elaborado a partir de la digitalización de áreas afectadas y el empleo de bases de datos de diversos organismos públicos. La detección de áreas quemadas se realiza por interpretación visual de imágenes satelitales Sentinel 2A y 2B y Landsat 8 OLI y se presentan resultados diferenciados por provincia, jurisdicción, y actividad forestal y/o nivel de conservación (bosque nativo, área protegida y zona ganadera).

#### **4.3 Detección de *hotspots* y de áreas quemadas**

Los *hotspots* -en español, focos de calor- son anomalías térmicas en la superficie terrestre detectadas a través de imágenes satelitales, las cuales indican un punto en donde la superficie está notablemente más caliente que la zona circundante. Si bien los *hotspots* no implican necesariamente la presencia de fuego, aportan información relevante sobre las posibles ubicaciones de focos de incendio y sobre la manera en la que ese incendio evoluciona a lo largo del tiempo.

El análisis de los *hotspots* consiste en identificar puntos del terreno con una temperatura elevada. La detección remota permite captar la temperatura de brillo de un determinado píxel y compararlo con el de los píxeles circundantes. De este modo, se indica si el valor supera el promedio y se lo marca como un *hotspot*. Los productos que permiten detectar *hotspots* tienen un pre-procesamiento para descartar otras anomalías térmicas. De esta manera, los datos obtenidos por satélites se integran con plataformas SIG conectadas a la web, permitiendo realizar un monitoreo de estos focos activos (Davies et al, 2009).

Existen diversas misiones satelitales que proveen información sobre *hotspots*. Algunos de los sensores que contemporáneamente obtienen datos sobre los *hotspots* a escala global son el MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), a bordo de los satélites Terra y Aqua, el *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS), a bordo de los satélites *Suomi National Polar Orbiting Partnership* (S-NPP) y *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA-20), operados por la NASA, y el SLSTR (*Sea and Land Surface Temperature Radiometer*) a bordo del satélite Sentinel 3, operado por la Agencia Espacial Europea.

Los sensores VIIRS S-NPP, lanzado en octubre 2011, y VIIRS NOAA-20, de noviembre de 2017, han comenzado a complementar los registros de *hotspots* históricos a causa de la discontinuidad de los productos MODIS.

Los sensores VIIRS poseen una resolución espacial de 375 m, contra los casi 1.000 m del producto MODIS y los 500 m (para las bandas de reflectancia solar) y 1000 m (para las bandas del infrarrojo) del SLSTR. Esta resolución espacial aumentada se traduce en una mayor probabilidad de detección de *hotspots*, además de ser más sensible a los *hotspots* que se presenten en zonas nocturnas de la órbita del satélite (NASA EARTHDATA, *s.f.*).

Finalmente, la diferencia entre ambos sensores VIIRS se centra en los productos que se encuentran disponibles al público. En este sentido, el VIIRS NOAA-20 sólo tiene disponible información a partir de diciembre de 2019, y actualmente sólo es accesible al público general el producto *Near Real Time* (NRT, o casi en tiempo real en español)<sup>7</sup>. Este producto es publicado aproximadamente 3 horas después del pasaje del satélite por la zona respectiva, por lo que no cuenta con las correcciones que se le hacen al producto *Standard* (que cumple con los requerimientos de *Science Quality*, o calidad científica), es decir está sujeto a errores de localización y reprocesamiento. En comparación, el VIIRS S-NPP cuenta con información disponible desde el año 2011 y ofrece el producto de calidad científica corregido.

La detección de *hotspots* resulta de interés durante la etapa de desarrollo del incendio, debido a la determinación de focos activos, pero no para la evaluación de daños. No permite calcular áreas quemadas, más sí hacer un seguimiento temporal y espacial. Esta información está disponible a través de diversas plataformas como *Fire Information for Management System* (FIRMS)<sup>8</sup>. En este trabajo se recurrirá a información del satélite S-NPP para la obtención de los *hotspots* presentes en el área de estudio en el periodo estudiado.

Otros productos relacionados son los productos de detección de áreas quemadas. Principalmente, los productos MCD64A1 y FireCCI51. El MCD64A1 es un producto derivado del procesamiento conjunto de imágenes de 500 metros de resolución y observaciones de 1 km de resolución de fuegos activos, ambos provenientes del sensor MODIS (Griglio *et al.*, 2016). El producto FireCCI51 es un conjunto de datos global con resolución espacial de alrededor de 250 metros publicado mensualmente, que contiene información sobre áreas quemadas así como otra información auxiliar (Lizundía-Loiola, Otón, & Chuvieco, 2020). Se basa en la detección del producto MODIS de la reflectancia de la superficie en la banda del infrarrojo cercano.

En este trabajo se recurre al producto MCD64A1 como herramienta auxiliar de detección de áreas quemadas, como se describe más adelante en la sección de metodología de detección de áreas quemadas.

---

<sup>7</sup> <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/Readme.txt>

<sup>8</sup> <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/> [Fecha de consulta: 23/03/2022]

#### 4.4 Google Earth Engine

Es un servicio de procesamiento geoespacial, que permite trabajar con datos a escala planetaria. Ghandi (2020), explica que la plataforma contiene 3 componentes básicos:

- *Google Cloud Platform*: es la plataforma de procesamiento, la cual está co-localizada con los datos. Esto significa que el procesamiento de los datos se hace en la nube de *Google Earth Engine*, la cual tiene una capacidad de procesamiento de 300 millones de horas CPU por año.
- Repositorio de datos: cuenta con un repositorio de datos públicos con más de 40 años de imágenes históricas y sets de datos. Tiene más de 40 petabytes de datos almacenados y más de 700 *sets* de datos.
- API (*Application Programming Interface*): permite al usuario programar las instrucciones para indicarle a la plataforma qué hacer con los datos que se le ingresan. Soporta lenguajes de programación de varios niveles, como JavaScript y Python, así como algunos de otras plataformas como QGIS y R.

#### 4.5 Software para la cartografía de áreas quemadas

A partir del año 2008, cuando las imágenes Landsat históricas se volvieron de acceso público, fue posible empezar a realizar un mapeo de las áreas quemadas en zonas extensas y en periodos de tiempo más extendidos. Estas posibilidades se acrecentaron con la llegada de las imágenes Sentinel 2, disponibles a partir del 2015 (Roteta *et al.*, 2021b). A partir de estas nuevas posibilidades, se desarrollaron algunos algoritmos automáticos para detección de áreas quemadas, como los presentados por Boschetti *et al.* (2015), Long *et al.* (2019) y Roteta *et al.* (2019).

Una alternativa más atractiva en cuanto a la confiabilidad de los resultados es una clasificación supervisada semi-automática, la cual puede refinarse manualmente. En 2014, la Universidad del País Vasco desarrolló un software con estas características para la cartografía supervisada de áreas quemadas (BAMS o *Burned Area Mapping Software*). Este software se basa en el procesamiento de dos imágenes Landsat, haciendo el mapeo de las áreas quemadas entre ambas escenas (Bastarrika *et al.*, 2014). Si bien este fue un gran avance en las técnicas existentes, aún se reconocían ciertas limitaciones, como la imposibilidad de procesar datos de Sentinel, dependía de la capacidad de procesamiento de la computadora del usuario, y no permitía entrenar al algoritmo sobre la categoría “no quemada”, lo que muchas veces se traducía en errores de comisión que debían ser corregidos manualmente (Roteta *et al.*, 2021-b).

Muchas de estas limitaciones pudieron superarse gracias al desarrollo de una nueva herramienta conocida como Herramientas para el Mapeo de Áreas Quemadas (*Burned Area Mapping Tools* o BAMTs, por sus siglas en inglés). Las mismas hacen uso de *Google Earth Engine* como



plataforma de procesamiento, permiten al usuario entrenar al algoritmo sobre las áreas quemadas y no quemadas, permiten hacer las iteraciones que sean necesarias hasta obtener un buen resultado y cuentan con más de una herramienta, de manera tal que incluyen algoritmos de cartografía y de validación (Roteta *et al.*, 2021-a). Los detalles de aplicación de estas herramientas se desarrollarán en las siguientes secciones.

#### **4.6 QGIS**

Quantum GIS (comúnmente conocido como QGIS) es un Sistema de Información Geográfica de código abierto que, a través de una interfaz gráfica que resulta amigable para el usuario, permite operar con un gran número de datos geoespaciales en formato ráster y vectorial, accediendo a bases de datos y bibliotecas. A través de sus funciones, herramientas y complementos permite visualizar, gestionar, editar, analizar, procesar y representar en mapas información geográfica de interés. Este software se actualiza constantemente a partir de los aportes de los usuarios (QGIS, *s.f.*).

## 5. Metodología de detección de áreas quemadas

Para la determinación de áreas quemadas se decidió recurrir a las BAMTs (*Burned Area Mapping Tools*). En esta sección se explicará cada una en mayor detalle. La información que aquí se explica fue extraída de la guía del usuario “*Burned Area Mapping Tools in Google Earth Engine Version 1.6*”, publicada en febrero de 2021 por Ekhi Roteta y Aitor Bastarrika, los creadores de estas herramientas, y disponible en [https://github.com/ekhiroteta/BAMT/blob/master/docs/BAMT\\_GEE\\_UserGuide\\_v1.6.pdf](https://github.com/ekhiroteta/BAMT/blob/master/docs/BAMT_GEE_UserGuide_v1.6.pdf).

[Fecha de consulta: 06/05/2021]<sup>9</sup>

### 5.1 Herramienta para la cartografía de áreas quemadas

Llamada BACT, por sus siglas en inglés, *Burned Area Cartography Tool*, esta herramienta permite obtener el área quemada dentro de una región extensa y durante un periodo temporal largo, utilizando el método de clasificación supervisada.

El proceso consiste en dos fases. Una primera fase donde se definen los parámetros con los que se va a trabajar, y una segunda fase donde se entrena al algoritmo para que distinga las áreas quemadas de las no quemadas. Para la primer fase se siguen los siguientes pasos:

1. Definir el área de estudio dentro de la cual el algoritmo hará la detección de áreas quemadas (*studyArea*).
2. Definir la base de datos que se desea usar (*dataset*). En este caso pueden elegirse imágenes provenientes de los satélites Sentinel 2 o de los satélites de la serie Landsat.
3. Definir 3 fechas, las primeras dos correspondientes al periodo pre-fuego y la última correspondiente al periodo post-fuego (*date\_1*, *date\_2* y *date\_3*). La fecha de en medio se considera a la vez como el último día del periodo pre-fuego y el primer día del periodo post-fuego.
4. Correr el algoritmo por primera vez.
5. A partir de estos datos, el algoritmo genera, con la base de datos elegida y para el área de estudio seleccionada, una imagen compuesta para el periodo temporal pre-fuego y otra imagen compuesta para el periodo temporal post-fuego (utilizando las *date\_2* y *date\_3*). Para lograr estas imágenes compuestas, el algoritmo toma todas las imágenes disponibles para la región elegida entre las dos fechas indicadas, y enmascara las nubes y sus sombras en base al valor de la banda de calidad (esto es, la banda *pixel\_qa* para imágenes Landsat y la banda *QA60* para imágenes Sentinel 2). Luego computa el NBR (*Normalized Burn Ratio*) y crea la imagen compuesta minimizando su valor en cada pixel.

---

<sup>9</sup> La última versión de estas herramientas puede encontrarse en: <https://github.com/ekhiroteta/BAMT>

6. Se genera una imagen adicional para el periodo post-fuego, con la fecha para la cual cada píxel fue extraído, es decir, la fecha para la cual se registró el menor valor de NBR. Más tarde esta imagen se usará para conseguir las fechas de detección de las áreas quemadas.
7. En cada compuesto, se seleccionan 6 bandas espectrales: las del visible (rojo, verde y azul), la del infrarrojo cercano, la del *ShortSWIR* y la del *LongSWIR*. Además de estas 6 bandas, el algoritmo computa 3 índices espectrales:
  - a. NDVI: *Normalized Difference Vegetation Index*
  - b. NBR: *Normalized Burn Ratio*
  - c. NBR2: *Normalized Burn Ratio 2*

Donde:

- *NBR*: son las siglas correspondientes al índice *Normalized Burn Ratio*. El mismo se usa para detectar áreas quemadas y dar una medida de la severidad del incendio. Depende de los valores del NIR y el SWIR.
  - *NBR2*: son las siglas correspondientes al índice *Normalized Burn Ratio 2*. Depende de los valores del *LongSWIR* y el *ShortSWIR*. Es más sensible a la presencia de agua en la vegetación que el NBR.
  - *NDVI*: son las siglas correspondientes al índice *Normalized Difference Vegetation Index*. Se centra en el reconocimiento de la biomasa fotosintéticamente activa.
8. El algoritmo muestra en el mapa una serie de capas: la imagen compuesta correspondiente al periodo pre-fuego, la imagen compuesta correspondiente al periodo post-fuego y una imagen de diferencia, que corresponde a la diferencia entre ambas composiciones de color ( $image_{post-fire} - image_{pre-fire}$ ). Las imágenes pre-fuego y post-fuego se representan en una composición falso color (infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta y rojo). Además se muestran los productos de área quemada MCD64A1 y FireCCI51, de 500 y 250 metros de resolución respectivamente. Estos productos tienen el objetivo de apoyar al usuario en la detección de áreas quemadas.

Terminada esta primera etapa, se procede a entrenar el algoritmo usando como referencia las imágenes compuestas de pre-fuego, post-fuego y la imagen de diferencia. Para esto se marcan polígonos sobre las áreas correspondientes a cada categoría, ‘quemado’ y ‘no quemado’, con cuidado de elegir al menos un polígono para cada una. Por ejemplo, en la zona correspondiente al PIECAS-DP las áreas no quemadas incluyen cuerpos de agua, zonas previamente ocupadas por cuerpos de agua pero que quedaron al descubierto por la sequía, vegetación que no fue afectada por los incendios, etc.

Ya entrenado el algoritmo, se corre el mismo por segunda vez, y automáticamente se detectan las áreas quemadas usando como base la información espectral de los píxeles contenidos por los polígonos de entrenamiento. La clasificación se hace a través del clasificador *Random Forest* con 100 árboles de decisión y nodos con un mínimo de 10 hojas. El clasificador *Random Forest* es un

clasificador basado en árboles de decisión, y provee una alta exactitud en la clasificación. Las ventajas de este clasificador incluyen: su robustez contra los datos *outliers*, su simpleza y la facilidad con la que se puede paralelizar (Tokar *et al.*, 2018). En la herramienta BACT, se introducen un total de 18 variables correspondientes a las 6 bandas y los tres índices incluidos en la primera fase, cada una dos veces: una por los valores post-fuego y otra por los valores correspondientes a la diferencia entre los valores pre-fuego y post-fuego. Lo que se obtiene es una imagen de probabilidad, con valores que van de 0% (no quemado) a 100% (quemado). En el mapa de visualización de GEE, se muestran dos capas nuevas:

9. *Burned Area*: correspondiente a la imagen de probabilidad, mostrando en un gradiente de blanco a azul sólo aquellos píxeles que tengan 50% o más de probabilidad de estar quemados.
10. *Seeds* (semillas): de la imagen de *Burned Area* se extraen aquellos píxeles que tienen 100% de probabilidad de estar quemados y se muestran en color rojo.

El usuario puede, en esta etapa, decidir si desea modificar los polígonos de entrenamiento para mejorar el resultado. Si se modifican los polígonos, el resultado obtenido a través del algoritmo también cambia. Cada instancia en la que se entrena y se corre nuevamente el algoritmo se denomina iteración.

Al exportar finalmente la imagen de probabilidad, las áreas quemadas se expanden hacia afuera desde las “semillas” (píxeles con 100% de probabilidad de estar quemados), con un umbral máximo del 50%. Esto implica que no todos los píxeles con probabilidad mayor a 50% de estar quemados serán exportados finalmente, dado que se requiere la presencia de una semilla para esto.

Los resultados obtenidos a partir de esta herramienta son:

- Una capa mostrando el área quemada, en formato de archivo Shapefile de ESRI, conteniendo sólo polígonos cuyo único campo (llamado *BurnDate*) en la tabla de atributos corresponde a la fecha de detección del área quemada. Esta fecha se obtiene de la siguiente manera: al momento de generar el mosaico post-fuego, el algoritmo asigna a cada píxel quemado la fecha correspondiente al valor mínimo de NBR para todo el periodo. Sin embargo, al exportar los datos, como cada polígono debe tener una única fecha como *BurnDate*, se asigna al polígono la fecha moda de todos los píxeles que se encuentran contenidos dentro del mismo. Es importante considerar al momento de procesar las imágenes que algunos de los atributos pueden tener en el campo de *BurnDate* una fecha con valor 0, lo cual indica que estos polígonos no corresponden a zonas detectadas como quemadas, sino a zonas marcadas como “No Observadas”, es decir, zonas que en alguna de las dos fechas no pudieron ser observadas de acuerdo a la interpretación del algoritmo. Normalmente, estas zonas corresponden a áreas de la imagen que presentan cobertura nubosa.
- La imagen de probabilidad resultante del clasificador de *Random Forest* en formato GeoTIFF, con los píxeles con valores entre 0 y 100.

## 5.2 Herramienta de área de validación

En inglés llamada *Validation Area Tool* (VAT), esta herramienta permite seleccionar las áreas de validación que serán usadas como referencia para evaluar los resultados obtenidos en el BACT. Para la selección usa una metodología de muestreo aleatorio estratificado.

El algoritmo permite seleccionar áreas cuadradas de 10, 20, 30, 50 o 100 km de lado. Estas áreas se ubican en el centro de cada *tile* de Sentinel o de cada área de Thiessen (TSAs) correspondiente a imágenes Landsat. Las áreas de Thiessen son zonas diseñadas por Cohen *et al.* (2010) y Kennedy *et al.* (2010) para facilitar la selección de áreas de muestreo. Su principal ventaja es que proveen de marcos no superpuestos para el muestreo, a diferencia de las zonas que se obtienen con el sistema WRS-2 (*Worldwide Reference System-2*) (Figura 2a). Es el Sistema de Referencia Mundial usado por los satélites Landsat 4, 5, 7, 8 y 9, que conforma una cuadrícula de dos coordenadas: *path* y *row* (trayectoria y fila, equivalente a columnas y filas), donde el *path* se asemeja a la ruta seguida por el satélite y *row* se corresponde con las líneas de latitud. La codificación *path/row* permite ubicar cualquier escena Landsat (Landsat NASA, 2021). Como puede verse en la Figura 2a, las escenas tienen zonas superpuestas entre sí, a diferencia de las de las áreas de Thiessen.

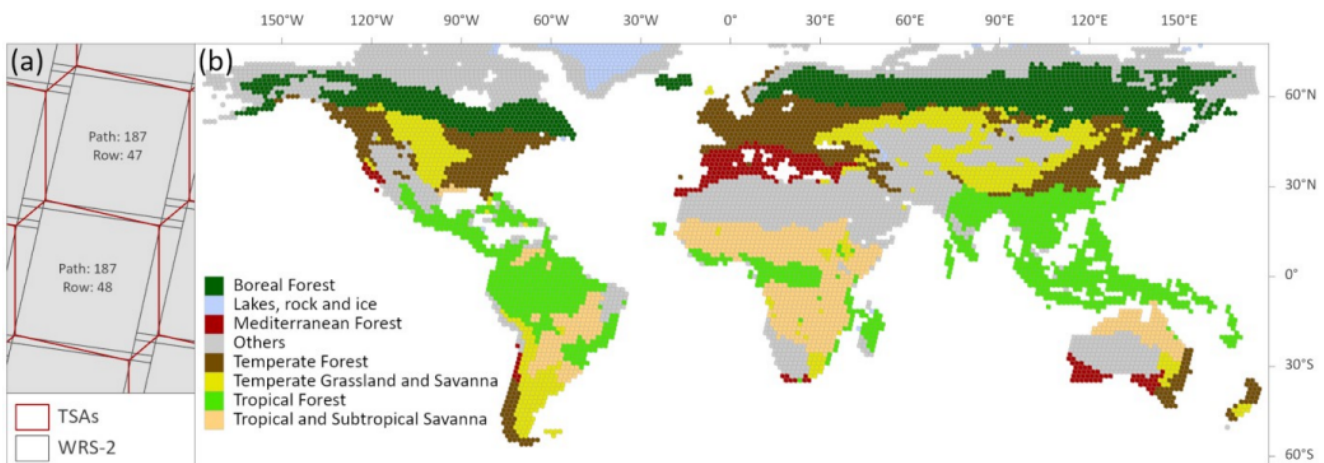


Figura 2: Áreas de Thiessen y WRS-2 (a) y biomas de Olson reclasificados por Padilla *et al.*, 2014 (b). Fuente: Franquesa *et al.*, 2020.

Los parámetros que se necesita definir para esta herramienta son el área de estudio, el set de datos que se va a usar (*dataset*, *Landsat* o *Sentinel 2*), las fechas entre las que se quiere detectar el área quemada (*date\_pre* y *date\_post*), la cantidad de áreas de validación que se desea obtener (*numberVA*) y la dimensión de las mismas (*dimension*). También es posible aplicar una serie de parámetros que actúan como filtro para las áreas de estudio que se obtienen a partir de esta herramienta. Las mismas son los parámetros:

- *minFreq*, que requiere que haya una imagen disponible cada la cantidad indicada de días,

- *minLength*, que requiere que la frecuencia de imágenes indicada por *minFreq* se mantenga por cierta cantidad de días y
- *maxCloud*, que pone un máximo a la cobertura nubosa de las imágenes obtenidas con los dos criterios anteriores. Esta información se obtiene de los metadatos de las imágenes, lo que puede resultar poco preciso debido a que la misma hace referencia a la cobertura nubosa presente en la totalidad de la imagen, no a la que se encuentra en el área seleccionada.

Luego de definir estos parámetros, se puede correr el algoritmo para obtener las áreas de validación. Internamente, el algoritmo en este momento asigna a cada unidad de muestreo una de las biomas de Olson (Olson *et al.*, 2001), distribuidos como se muestra en la Figura 2b, que cubre la mayor parte de su área y la superficie quemada total para el periodo elegido de acuerdo al producto MCD64A1 o FireCCI51. Las unidades se dividen entre aquellas con alta y baja área quemada en cada bioma, y las áreas de validación se seleccionan de cada substrato de área quemada/bioma en proporción al número de unidades en ese substrato.

Terminado el procesamiento, la lista de biomas que se encuentran en el área de estudio se imprime a la consola de *Google Earth Engine*, y las áreas de validación obtenidas se muestran en el mapa.

### 5.3 Herramienta de fechas del área de validación

En inglés llamada *Validation Area Dates (VADT)*. Luego de conseguir las áreas de validación a través de la herramienta anterior, se deben crear datos de referencia, pero para esto es necesario conocer las fechas exactas para las cuales hay imágenes disponibles. El objetivo de esta herramienta es, justamente, mostrarle al usuario las fechas para las que hay imágenes disponibles en cada área de validación.

Para poder obtener las fechas, se debe en primer lugar correr el algoritmo. Esto hará que aparezca en la pantalla principal de GEE una interfaz que pide los siguientes datos:

- *Dataset*: este debe ser el mismo set de datos seleccionado en la herramienta de VAT. Puede ser Sentinel o Landsat.
- *Region*: el tamaño del área de validación (10, 20, 30, 50 o 100 km), y el *path* y *row* correspondiente a la escena Landsat seleccionada o el código del *tile* correspondiente del conjunto de datos de Sentinel 2. Esto debe coincidir con la variable *dimension* de la herramienta anterior.
- *Dates*: las fechas correspondientes al inicio y final del periodo de incendio.
- *Cloud coverage*: se filtran aquellas imágenes con cobertura nubosa mayor a la indicada. Este valor debe ser el mismo al utilizado en la herramienta anterior.

Luego de definir estos parámetros, se puede usar el botón *Load and display* de la interfaz para que las imágenes disponibles de acuerdo a los parámetros definidos se muestran en el mapa.

#### 5.4 Herramienta de perímetro de referencia

Su nombre original en inglés corresponde a *Reference Perimeter Tool* (RPT). Esta herramienta se usa para lograr una detección de áreas quemadas de alta calidad para evaluar los resultados obtenidos con la herramienta BACT. Para lograrlo, esta herramienta se divide en dos etapas.

En la primera etapa, el usuario debe definir algunos parámetros iniciales que incluyen:

1. *date\_1*: fecha anterior al incendio.
2. *date\_2*: fecha posterior al incendio. Estas dos fechas se usan para obtener las imágenes correspondientes y compararlas entre sí.
3. *region\_type*: hace referencia a la región en la que se va a realizar la detección del área quemada. Hay 3 opciones para la misma, que son: *manual*, Landsat y Sentinel. Si se usa la opción *manual* el usuario puede definir un rectángulo, e indicar al algoritmo el set de datos que desea usar (Landsat o Sentinel 2). Si se usa la opción Landsat, la región será la correspondiente a un cuadrado ubicado en el centro de la escena Landsat, seleccionada a partir del *path* y *row* que le corresponda. Si se usa la opción *Sentinel*, la región será un cuadrado en el centro el *tile* de Sentinel que se indique. Tanto para las opciones *Landsat* como *Sentinel*, es necesario definir otra variable *region\_dimension* que define el ancho y alto del cuadrado en km. Los valores que puede tomar la variable *region\_dimension* son 10, 20, 30, 50 o 100 km.

Luego de definir estas variables, el usuario puede correr el algoritmo. En este momento, se obtienen las imágenes correspondientes a las fechas y región indicadas por el usuario y de las mismas se seleccionan 6 bandas espectrales: las del visible (rojo, verde y azul), la del infrarrojo cercano, la del *ShortSWIR* y la del *LongSWIR*. Además de estas 6 bandas, el algoritmo computa los 3 índices espectrales utilizados en la BACT.

Al mismo tiempo, el algoritmo muestra en el mapa una serie de capas: la imagen pre-fuego, la imagen post-fuego y una imagen de diferencia, que corresponde a la diferencia entre ambas imágenes ( $image_{post-fire} - image_{pre-fire}$ ). Además se muestran los productos MCD64A1 y FireCCI51, de 500 y 250 metros de resolución respectivamente.

Terminada esta primera etapa, se procede a entrenar el algoritmo usando como referencia las imágenes pre-fuego, post-fuego y la imagen de diferencia. Se realiza el mismo procedimiento descrito para la aplicación de la BACT. Tal y como se mencionó anteriormente, el usuario es quién define el número de polígonos de entrenamiento y las veces a correr el algoritmo para obtener resultados deseados.

Los resultados finales obtenidos a partir de esta herramienta son:

- Una capa de área quemada, en formato de archivo Shapefile de ESRI, conteniendo únicamente polígonos cuyo único atributo es una etiqueta (*LABEL*), que indica si los mismos son polígonos quemados o no observados. Los polígonos que contienen en el campo de *LABEL* un valor de *UNOBSERVED*, son polígonos que no corresponden a zonas detectadas como quemadas, sino a zonas marcadas como “No Observadas”, es decir, zonas que en alguna de las dos fechas no pudieron ser observadas de acuerdo a la interpretación del algoritmo. Normalmente, estas zonas corresponden a áreas de la imagen que presentan cobertura nubosa.
- La imagen de probabilidad resultante del clasificador de *Random Forest* en formato GeoTIFF, con los píxeles con valores entre 0 y 100. También es posible exportar las imágenes pre-fuego y post-fuego con las composiciones de color con las que se muestran en el mapa.

Para definir de manera más clara la diferencia entre las herramientas BACT y RPT, debe entenderse que la segunda es meramente una herramienta de validación, la cual busca lograr una detección más precisa de áreas quemadas al delimitar el área de entrenamiento a sólo una porción del área de estudio. El mecanismo de entrenamiento de ambas herramientas es el mismo, sin embargo la herramienta RPT permite al analista hacer un mejor entrenamiento al restringir el área sobre la que se debe trabajar. Luego, los resultados de la herramienta de BACT para el área de validación pueden compararse con los de la herramienta RPT para validarlos. Este método de validación es especialmente útil cuando se tienen áreas de estudio grandes, como países enteros.



## 6. Elaboración

### 6.1 Digitalización del área de estudio

Para la digitalización del área de estudio se utilizó como capa base el Shapefile *ordenamiento:piecas\_dp\_2021\_4326* provista como datos abiertos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible que se conecta a través del servicio *Web Feature Services* (WFS). Una vez descargada esa capa se procede a su corrección y comprobación de topología teniendo como referencia la zona definida como PIECAS-DP.

### 6.2 Definición del periodo temporal a cubrir

Los *hotspots* detectados en el área de estudio, obtenidos recurriendo a los datos del sensor VIIRS S-NPP, fueron usados para un análisis preliminar de la distribución temporal de los *hotspots*. Se descargó toda la serie temporal correspondiente al año 2020, obteniendo la distribución mensual de *hotspots* que se muestra en la Figura 3.

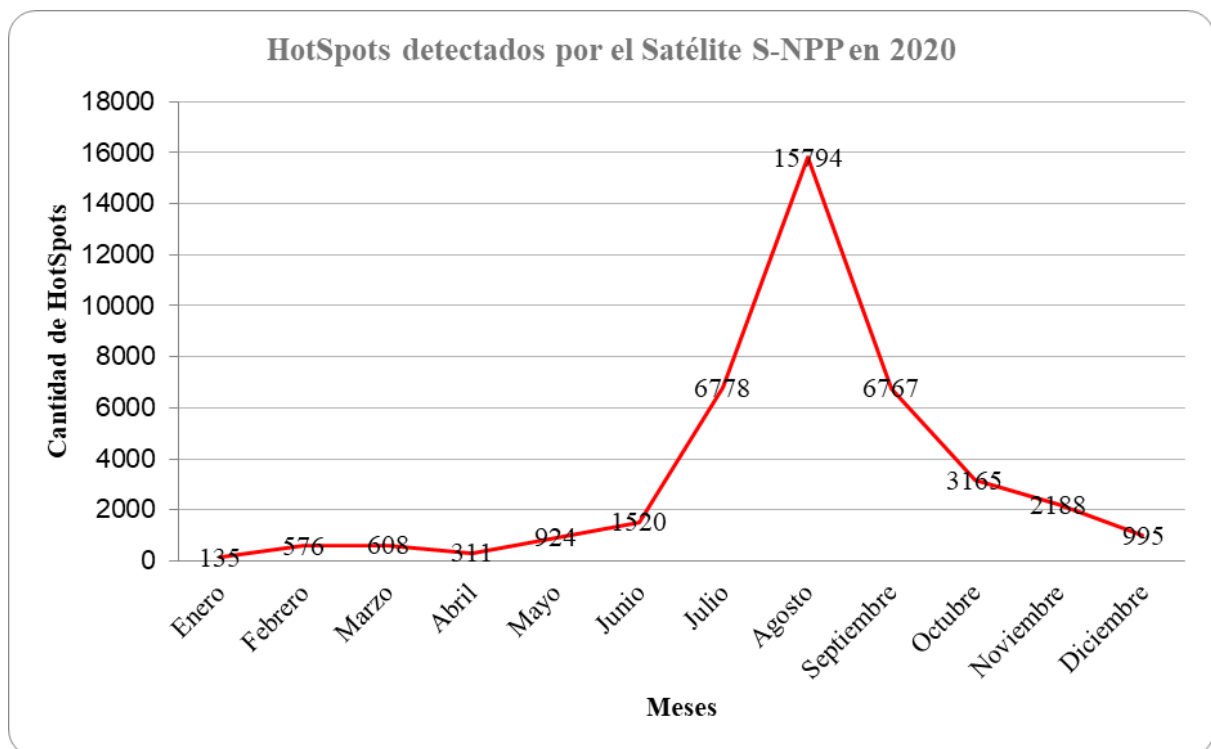


Figura 3: Distribución mensual de los hotspots dentro del área definida por el PIECAS-DP para el año 2020, de acuerdo a la detección del satélite S-NPP. Datos obtenidos de: NASA FIRMS<sup>10</sup>.

<sup>10</sup> <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>

Observando la distribución de los *hotspots*, vemos que hay un marcado aumento en su cantidad comenzando en el mes de mayo, con un claro pico en el mes de agosto, para luego disminuir hacia fin de año, alcanzando en Diciembre valores similares a los de mayo.

Respecto de su distribución espacial, en la Figura 4 se representan los *hotspots* detectados entre los meses de mayo y diciembre.

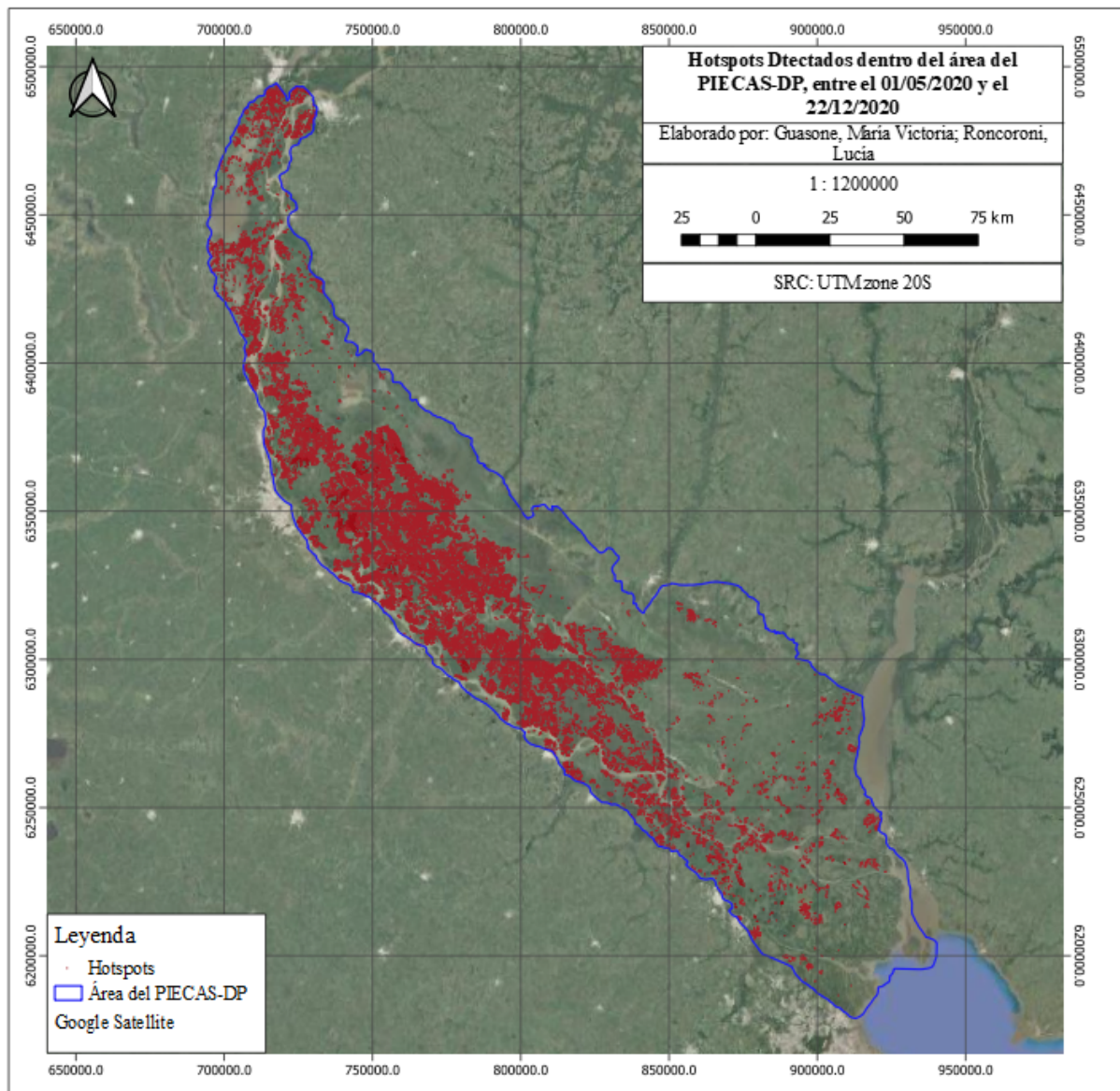


Figura 4: Mapa mostrando los hotspots detectados en la zona del PIECAS-DP, entre los días 01/05/2020 y el 22/12/2020, por el sensor S-NPP. Estas fechas coinciden con las utilizadas en la detección de áreas quemadas mediante el uso de las herramientas de mapeo de áreas quemadas (BAMTs), explicadas anteriormente y puestas en práctica en las secciones siguientes.

Para tener un marco de referencia, los registros históricos desde el año 2001 (Figura 5), obtenidos del sensor MODIS, muestran que la cantidad de *hotspots* suele comenzar a aumentar hacia el mes de junio, para alcanzar valores cercanos a los registrados en mayo de 2020 recién en los meses de julio, agosto, o septiembre, y comienza a disminuir nuevamente hacia octubre.

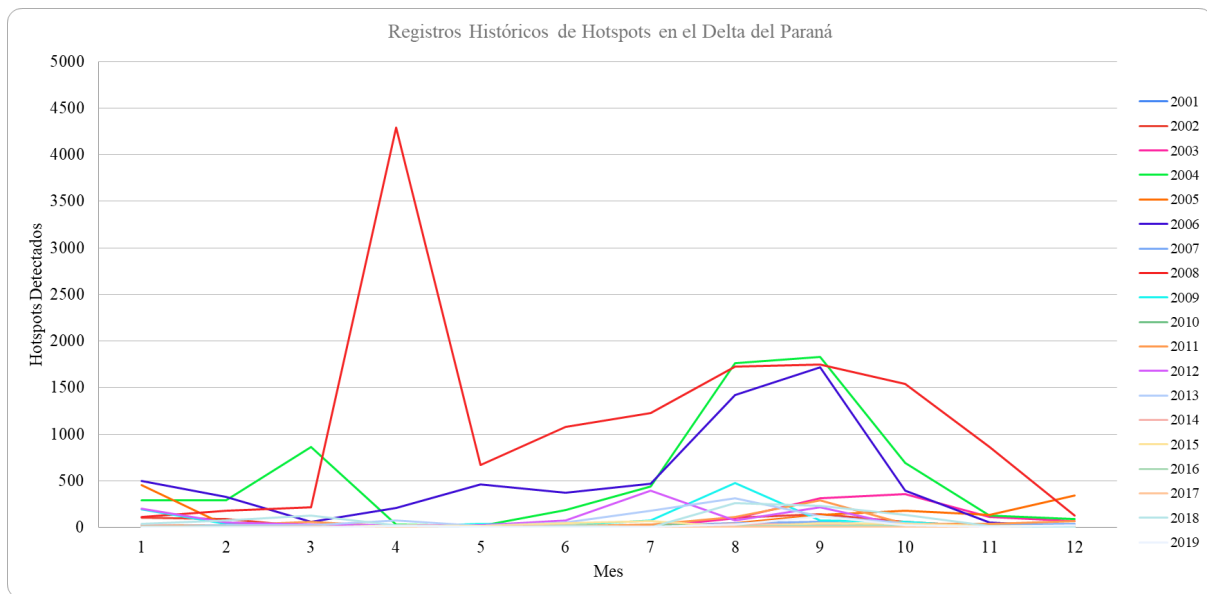


Figura 5: Registros históricos de los hotspots detectados en el Delta del Paraná por el sensor MODIS, de 2001 a 2019.

Estas observaciones coinciden con lo que se esperaría encontrar cuando se considera que la principal causa de los incendios es la quema de pastizales en primavera, eliminando la vegetación seca que deja atrás el invierno (Machain *et al.*, 2013).

Estos valores históricos aportan la perspectiva de que los *hotspots* detectados en 2020 tienen una distribución relativamente típica, estando los mayores valores concentrados en los meses de julio a octubre. Pueden verse ciertos años con una distribución de *hotspots* anómala, como el 2004 o el 2008. El 2004 muestra una presencia de *hotspots* alta para los meses de enero, febrero y marzo, comparado a los otros años mientras que el 2008 presenta una cantidad de *hotspots* especialmente elevada en casi todos los meses, con un notorio pico en abril, mes que normalmente no muestra presencia de estas anomalías térmicas. Como se mencionó anteriormente, esta situación del año 2008 fue una de las grandes impulsoras de la formación del PIECAS-DP.

Comparando la distribución que presentan los *hotspots* detectados por los sensores VIIRS (Figura 3) y MODIS (Figura 5), se puede distinguir que el pico que se presenta en agosto de 2020, especialmente elevado comparado con el mes anterior y posterior, no es característico.

Otro factor importante a la hora de definir el periodo temporal a cubrir en este estudio, son las condiciones hidrometeorológicas a las que haya estado sometida el área de estudio durante los periodos que presentan mayor cantidad de *hotspots*.

Como se explicó en el marco teórico de este trabajo, el área de estudio tiene una dinámica hídrica muy compleja, la cual puede afectar la manera en la que el ecosistema responde y resiste a los frentes de avance del fuego. Si los incendios coinciden con épocas en las que el Río Paraná tiene una altura normal o mayor a esta, el fuego se encontrará con pequeños cuerpos de agua en el interior del humedal, que además de proteger el suelo que cubren, previenen la propagación del fuego a través de ellos. En el caso contrario, en condiciones de sequía, con la exposición de la turba al aire se promueve

el fenómeno de propagación del fuego bajo la capa de turba acumulada sobre la superficie del suelo explicado por Díaz (2020).

Por lo tanto, es importante considerar cuáles eran las condiciones del sistema hídrico del Delta en el momento en que se generan los incendios (Figura 6).

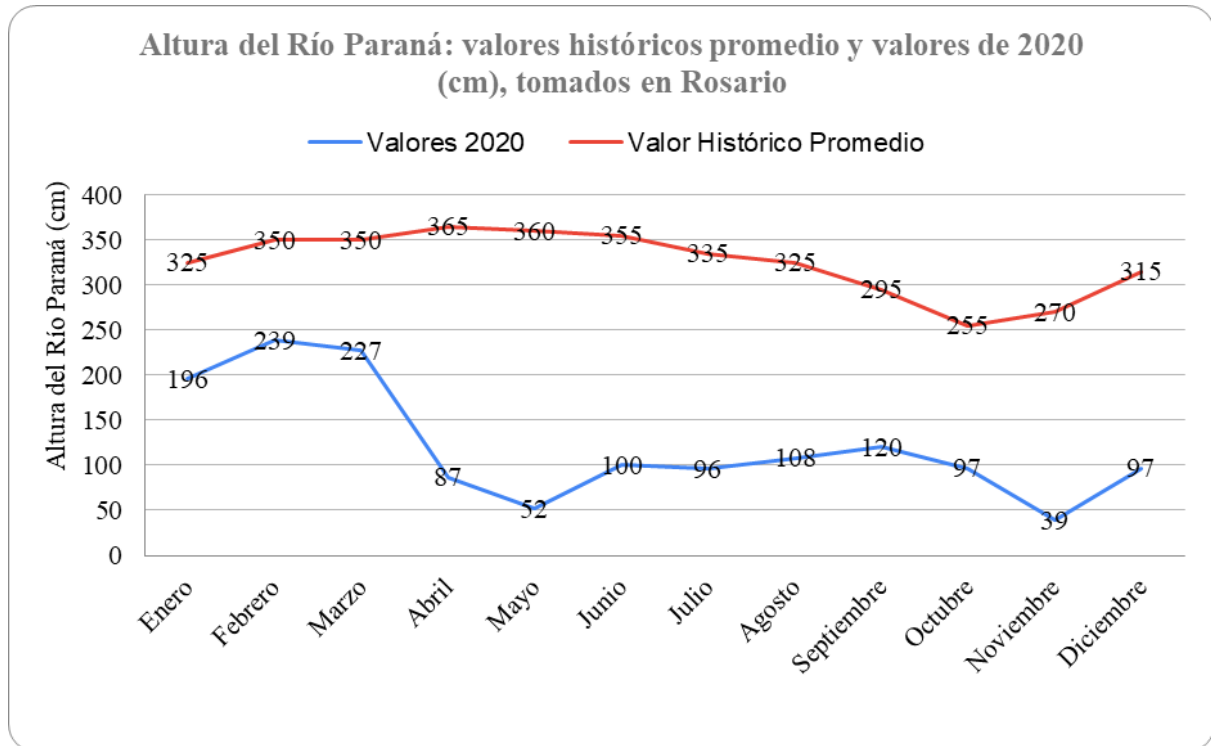


Figura 6: Valores históricos mensuales vs. valores para el año 2020 de la altura del Río Paraná, tomados a la altura de la ciudad de Rosario. Los valores históricos son niveles medios mensuales entre los años 1992 y 2017. El valor para la altura del río en agosto de 2020 se obtuvo promediando los valores de julio y septiembre, debido a la falta de datos en la fuente. Fuente de los datos: los promedios históricos mensuales fueron obtenidos de datos abiertos del INA (Instituto Nacional del Agua)<sup>11</sup>; los datos de 2020 fueron obtenidos del documento “Posibles escenarios hidrológicos en la Cuenca del Plata durante el periodo junio-julio-agosto 2021”<sup>12</sup>. Gráfico: elaboración propia.

Como puede verse, la altura del Río Paraná en 2020 fue extremadamente baja en comparación a los valores promedios mensuales. No menos importante, la altura del río es especialmente baja en todos los meses donde se detecta una cantidad alarmante de *hotspots*, como puede verse en la Figura 6.

Resumiendo las observaciones planteadas anteriormente, puede verse que los meses de mayo a diciembre de 2020 reúnen una serie de condiciones que los hacen más propensos al avance del fuego: una gran cantidad de *hotspots* singularmente alta respecto a los datos históricos y una marcada sequía con el consecuente retroceso de cuerpos de agua que pueden actuar como cortafuegos

<sup>11</sup> [https://www.ina.gov.ar/archivos/alerta/Escenario2021\\_Junio.pdf](https://www.ina.gov.ar/archivos/alerta/Escenario2021_Junio.pdf) [Fecha de consulta: 27/05/2022]

<sup>12</sup>

<https://es.scribd.com/document/511436185/POSIBLES-ESCENARIOS-HIDROLOGICOS-EN-LA-CUENCA-DEL-PLATA-DURANTE-EL-PERIDO-JUNIO-JULIO-AGOSTO-2021>

naturales. En base a estos criterios, en este trabajo se decidió aplicar los BAMTs para hacer una estimación del área dentro del PIECAS-DP afectada por los incendios entre los meses de mayo y diciembre de 2020.

### **6.3 Aplicación de las BAMTs en el área de estudio**

Para lograr la detección de las áreas quemadas en el área y periodo de estudio se aplicaron las herramientas BAMTs explicadas en la sección 5.

#### **6.3.1 Aplicación de la herramienta BACT**

Como se indicó en la sección 5, los primeros pasos para la aplicación de estas herramientas dependen del suministro de datos a cargo del usuario:

- Área de estudio: en lugar de seleccionarla usando herramientas de geometría en el visor del espacio de trabajo de GEE, se importa directamente el archivo vectorial del área de estudio (ver sección 6.1).
- Fechas: Se definieron las fechas que delimitan los periodos pre-fuego y post-fuego teniendo en cuenta el periodo temporal a cubrir (Ver sección 6.2). Adicionalmente, la fecha correspondiente al 2020-12-22 fue seleccionada de manera tal que coincidiera con la última fecha disponible de imágenes Sentinel sin cobertura nubosa para el mes de diciembre, de acuerdo con los resultados de la herramienta VADT, explicados más adelante.
- Base de datos (datasets): se accede a la colección de datos de imágenes de Sentinel 2 corregidas atmosféricamente disponibles en la nube. La elección de colecciones de imágenes de Sentinel, frente a las de Landsat, responde a que el primero tiene una mayor resolución espacial, permitiendo trabajar con un mayor nivel de detalle (ver sección 3.2).
- Polígonos de entrenamiento: a través de los criterios de interpretación visual ya descritos anteriormente (ver sección 4.1) se procedió a dibujar áreas quemadas y no quemadas para entrenar el algoritmo, diferenciándose según su color, forma, textura y patrón espacial.

Para lograr la detección de áreas quemadas con esta herramienta se realizaron en total 4 iteraciones. En cada iteración, se adicionaron y modificaron agregaron más polígonos de entrenamiento para lograr un mejor resultado.

Comenzando así por la herramienta BACT, las variables utilizadas fueron las que se representan en la Tabla 3:

TABLA 3: RESUMEN DE LAS VARIABLES DE LAS QUE DEPENDE EL ALGORITMO CORRESPONDIENTE A LA HERRAMIENTA BACT, Y SU VALOR ASIGNADO PARA ESTE ESTUDIO.

<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Valor Asignado</b>
<b><i>studyArea</i></b>	Área de estudio sobre la cual se desea realizar la detección de las áreas quemadas	Área correspondiente al PIECAS-DP
<b><i>date_1</i></b>	Fecha en la que inicia el periodo pre-fuego	2020-04-01
<b><i>date_2</i></b>	Fecha en la que termina el periodo pre-fuego y comienza el periodo post-fuego	2020-05-01
<b><i>date_3</i></b>	Fecha en la que termina el periodo post-fuego	2020-12-22
<b><i>dataset</i></b>	Conjunto de datos que se desea usar (Landsat o Sentinel)	Sentinel
<b><i>identifier</i></b>	Nombre con el que se quiere identificar las imágenes resultantes	PIECAS_BAC_2020

Definidas el área de estudio, las fechas y la base de datos, a continuación, usando las imágenes de *pre-fire*, *post-fire* y *difference* se detectaron las zonas quemadas. Las mismas se caracterizan por ser zonas que en en la imagen *pre-fire* se muestran en colores verdes (vegetación sana), en la imagen *post-fire* se muestran como zonas rojas, bordó o rojo oscuro (vegetación seca, muy seca o quemada) y en la imagen de *difference* se muestran como zonas rosa brillante o morado (vegetación que ha sufrido incendios). Estos colores se corresponden con los resultantes de la composición en falso color compuesto del *LongSWIR*, *ShortSWIR* y *Red*. En las Figuras 7, 8 y 9 se muestra un ejemplo de cómo se visualizan las imágenes *pre-fire*, *post-fire* y *difference* en *Google Earth Engine*, y se provee una explicación de cómo se interpretaron los distintos colores.



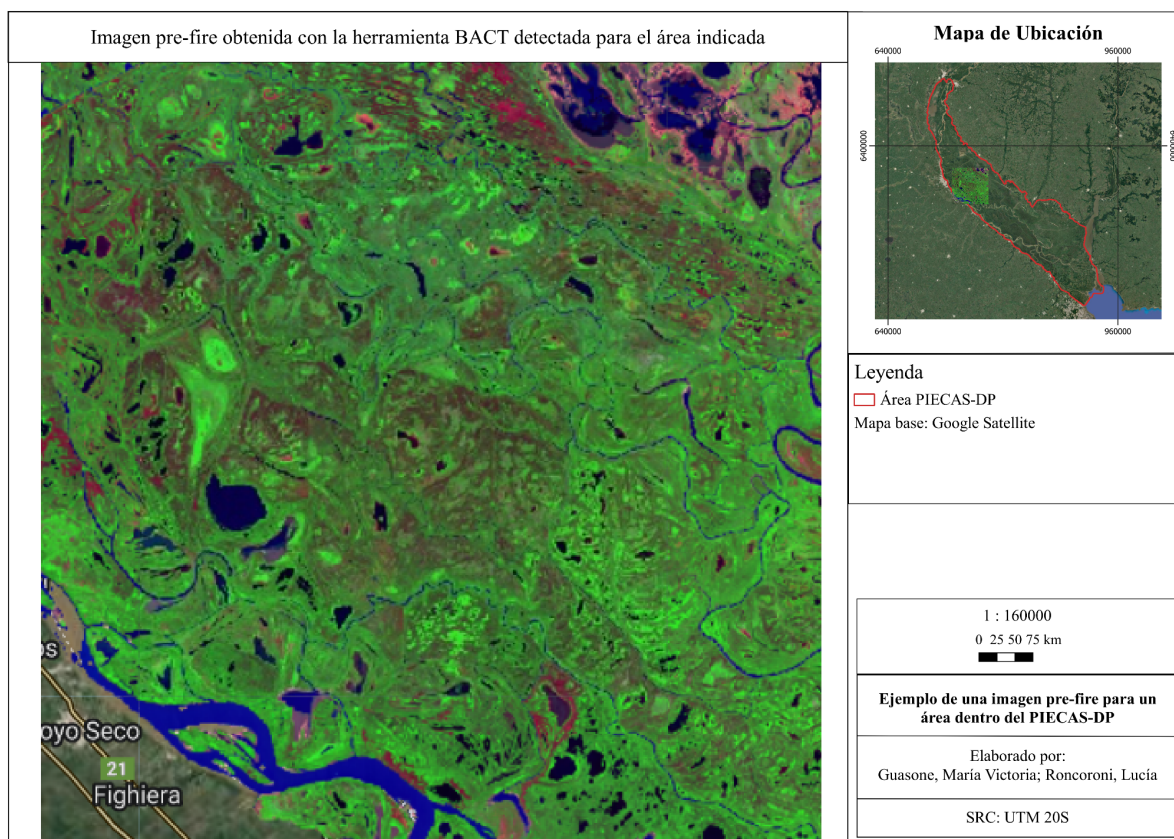


Figura 7: Ejemplo de una zona de la imagen pre-fire generada por la herramienta BACT entre el 01/04/2020 y el 1/05/2020. Las zonas verdes corresponden a vegetación, las azules a zonas de agua, y las zonas rojas a zonas donde la vegetación se encuentra seca, muy seca o quemada. Al ser esta la imagen pre-fire, esto significa que hay zonas que presentan alguna de estas características desde el comienzo del periodo de estudio. Las zonas de color rosado y violeta corresponden a las orillas de cuerpos de agua que se han secado.

Para la detección visual de áreas quemadas, usadas para generar los polígonos de entrenamiento, se agregó dentro del *script* el producto FIRMS, usando el mismo como guía para reconocer zonas con alta probabilidad de haber sido afectadas por los incendios. Como se explicó en las secciones anteriores, el producto FIRMS se usa para hacer seguimiento de *hotspots*, que corresponden a focos de fuego activos. Para beneficio del lector, se incluyen ejemplos de visualización de este producto, tal como se muestra en *Google Earth Engine*, en las Figuras 10 y 11.

Como se explicó en la sección 5.1, el algoritmo también provee los productos de áreas quemadas MCD64A1 y FireCCI51 para facilitar la identificación de áreas quemadas. Sin embargo, en este estudio no fue posible recurrir al producto FireCCI51, dado que no se encontraban disponibles los productos procesados para el periodo de estudio en el momento en que se aplicaron estas herramientas.

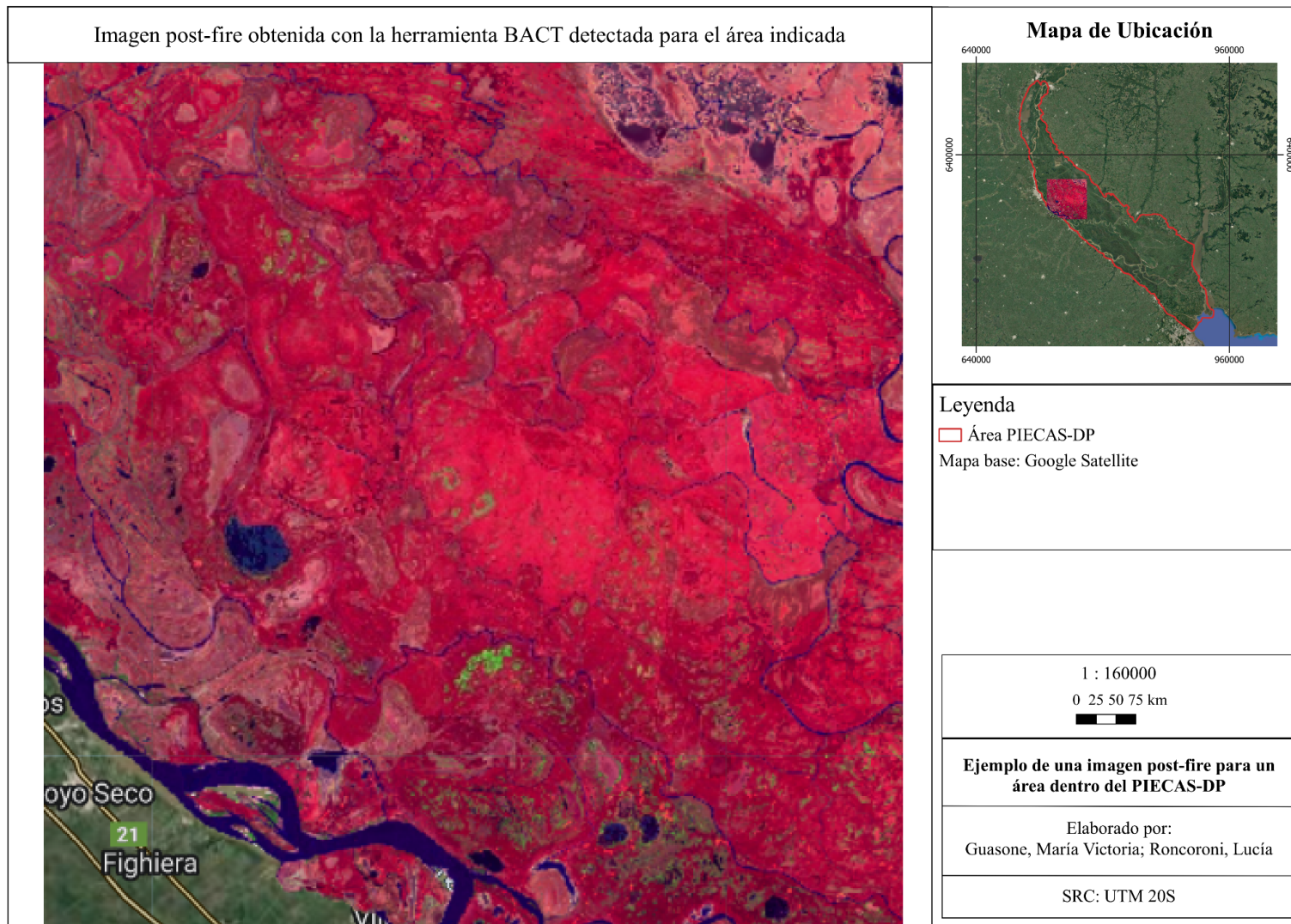


Figura 8: Ejemplo de una zona de la imagen post-fuego generada por la herramienta BACT entre el 1/05/2020 y el 22/12/2020. Las zonas verdes corresponden a vegetación, las azules a zonas de agua, y las zonas rojas a zonas donde la vegetación se encuentra seca, muy seca o quemada. Las zonas de color rosado y violeta corresponden a las orillas de cuerpos de agua que se han secado.



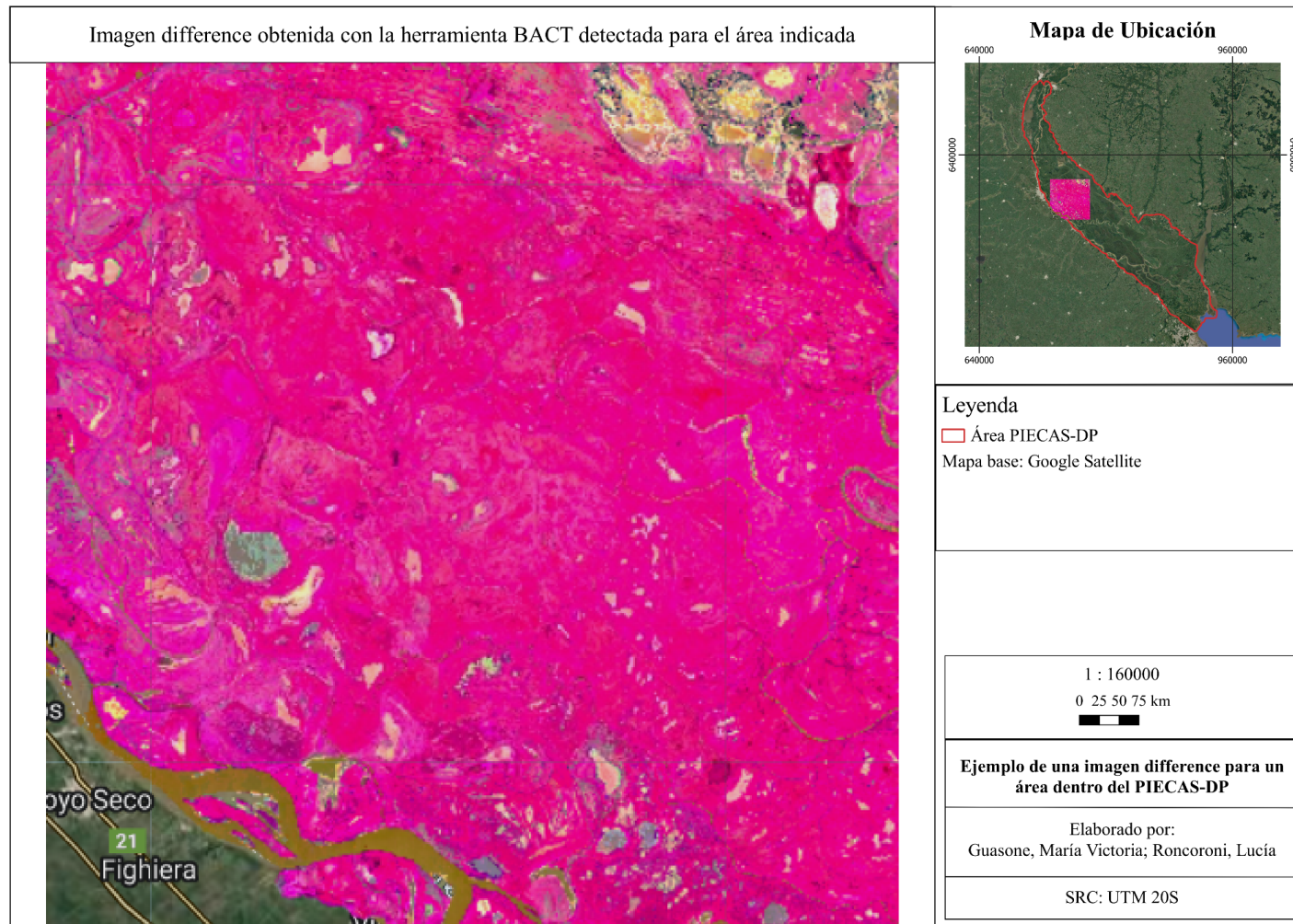


Figura 9: Ejemplo de una zona de la imagen difference generada por la herramienta BACT entre el 1/05/2020 y el 22/12/2020. Dentro del área de estudio, las zonas verdes corresponden a vegetación, incluyendo vegetación que se ha regenerado entre la imagen pre-fire y la post-fire, es decir, zonas que contienen más densidad de vegetación o vegetación más sana en el periodo post-fuego respecto al pre-fuego. Las zonas en rosa fuerte corresponden a zonas que se han quemado entre la imagen pre-fire y la post-fire. Las zonas en naranja claro o marrón apagado corresponden a zonas en las que no se han presentado cambios o zonas donde se han secado cuerpos de agua.

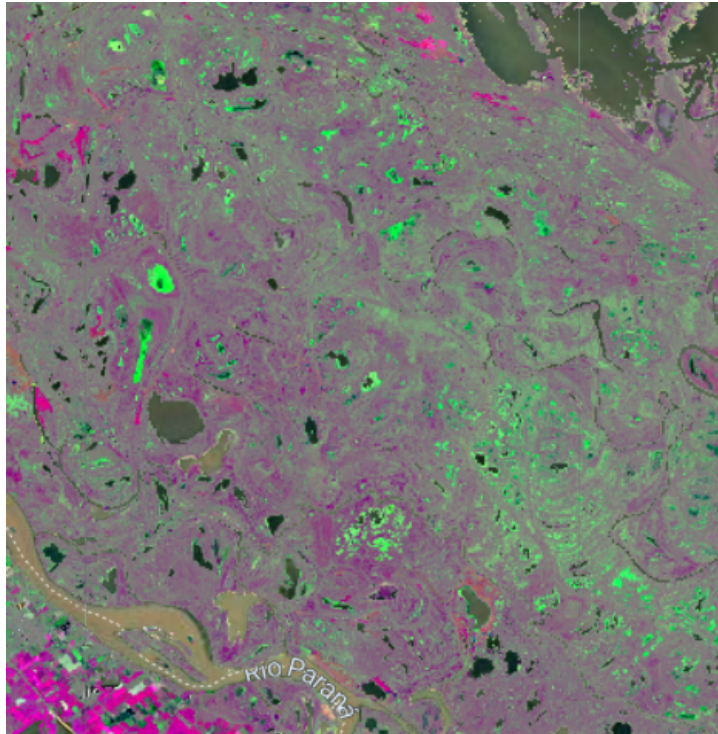


Figura 10: Ejemplo de una imagen difference sin el producto FIRMS. Las zonas con coloración violeta y rosa brillante se reconocen como zonas quemadas. Las zonas de colores grises o apagados son zonas en las que no se detectan grandes cambios entre la imagen pre-fuego y la post-fuego. Las zonas de color verde corresponden a vegetación que se ha regenerado entre la imagen pre-fire y la post-fire. Se aclara que la zona ubicada al suroeste del Río Paraná no está incluida dentro del área de estudio, dado que queda ubicada fuera del área del PIECAS-DP. Esta imagen difference corresponde al periodo del 02/03/2020 al 22/03/2020, el cual es un periodo más acotado que el utilizado para la herramienta BACT, por lo que los resultados obtenidos son distintos.

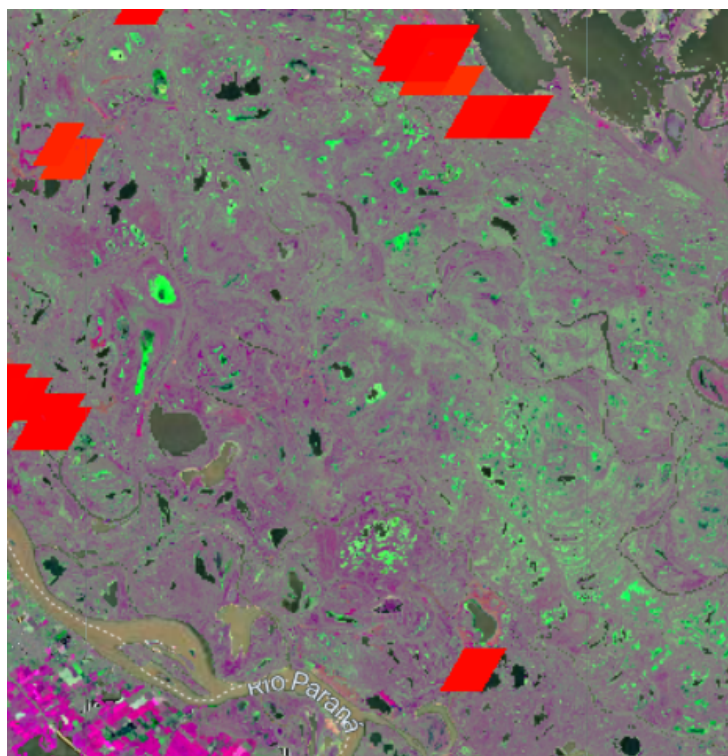


Figura 11: Se muestra la misma imagen anterior pero con las zonas con incendios activos detectadas por el producto FIRMS (trapezios de color rojo intenso), tal como se muestran en Google Earth Engine. Como puede verse, la ubicación de estos polígonos coincide con zonas con coloración violeta y rosa brillante, correspondientes a zonas quemadas.



Como consideración adicional, debe saberse que en el procesamiento pueden presentarse zonas con ruido, es decir, con grupos de píxeles que se presentan con una coloración anómala que no coincide con lo que se esperaría encontrar en esa zona (Figura 12). Esto se da debido a que las imágenes *pre-fire* y *post-fire* son mosaicos de las imágenes disponibles para sus respectivos periodos. En los casos donde se identificaron zonas con ruido, se evitó entrenar el algoritmo sobre las mismas.

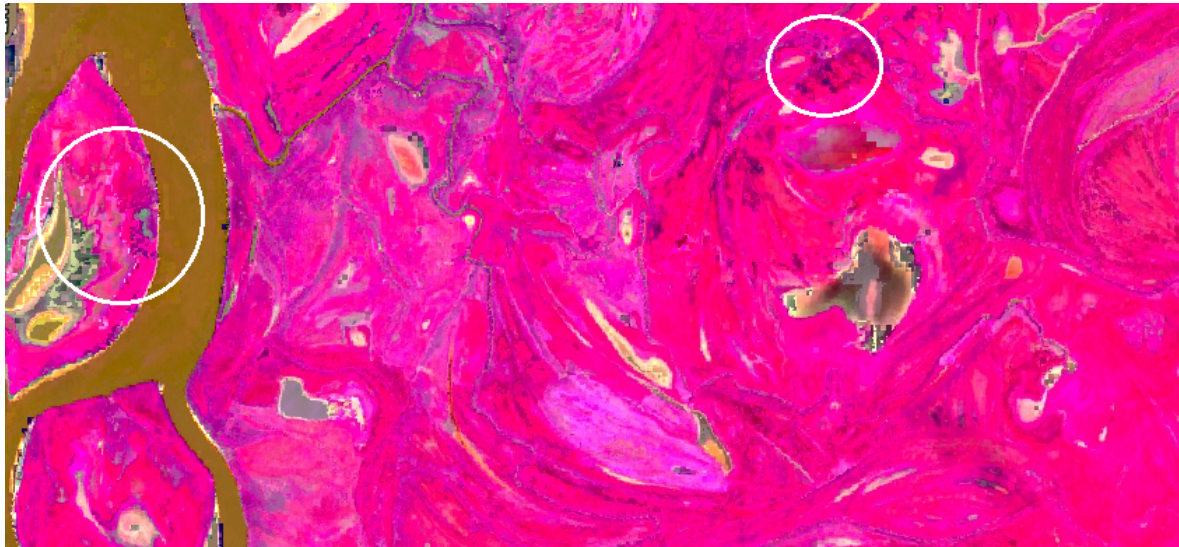


Figura 12: Ejemplo de un sector de la imagen difference con zonas de ruido, marcadas con óvalos blancos.

Corroborando que se cumplieran todas estas características se entrenaron, entre las 4 iteraciones, 13 polígonos quemados (se incluye un ejemplo en la Figura 13).

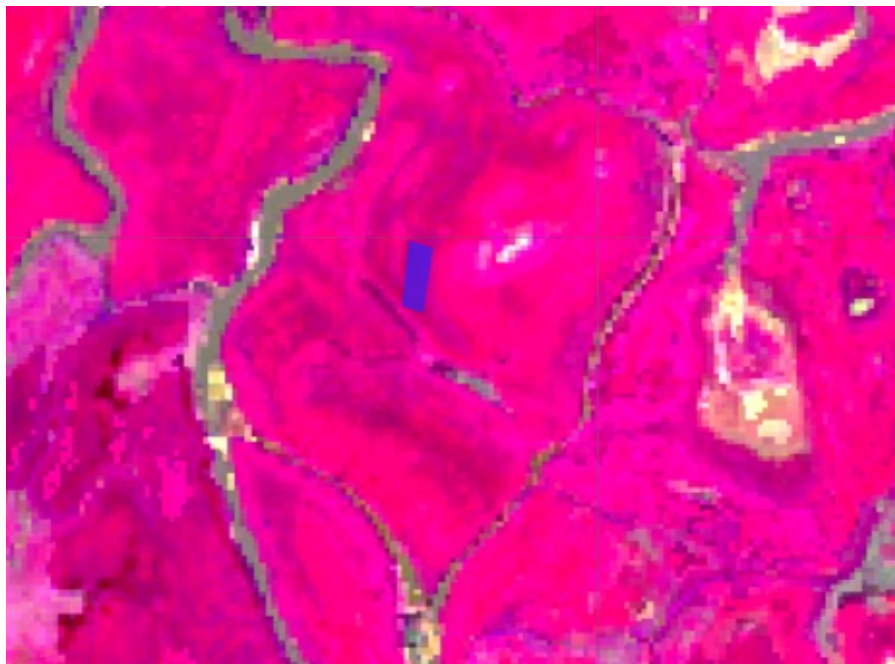
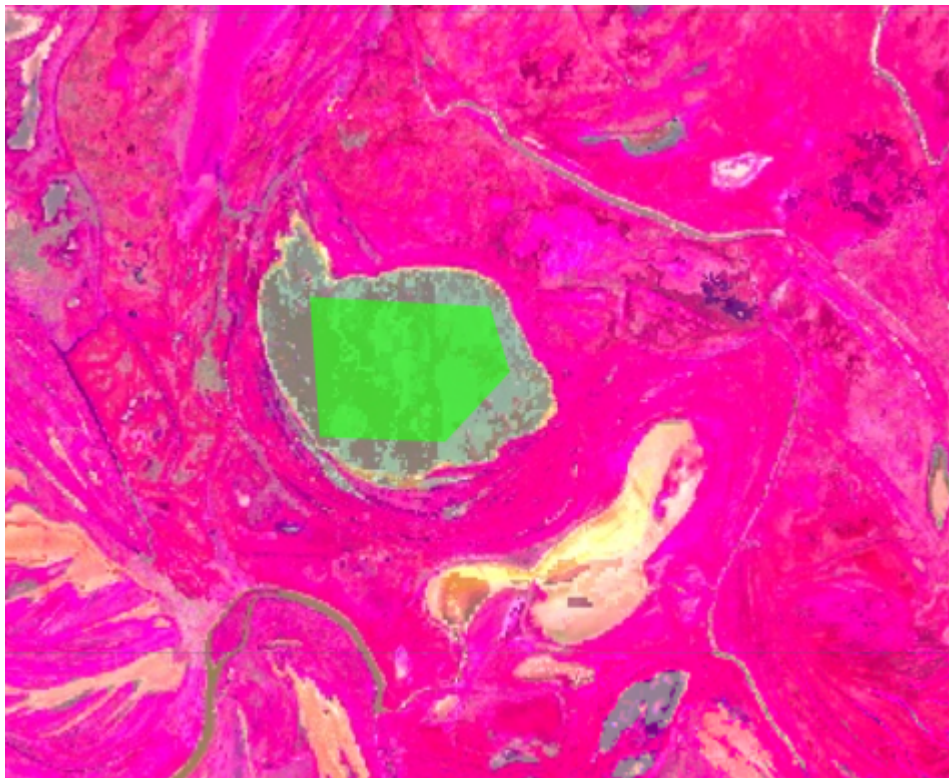


Figura 13: Ejemplo de una zona quemada, rodeada por otras zonas similares, como se visualiza en la imagen de difference. La coloración violácea y rosa fuerte se asocia a áreas quemadas, como se muestran en la imagen difference de la Figura 9. El polígono azul que se muestra en la imagen es un polígono de entrenamiento usado para indicar al algoritmo de la herramienta BACT cuáles son las áreas quemadas.

Respecto de los polígonos de entrenamiento correspondientes a coberturas no quemadas, debido a las características del área de estudio se encuentra una gran variabilidad entre los tipos de coberturas que deben clasificarse. Las mismas incluyen: cuerpos de agua (ríos y cuerpos de agua no perennes), costas de los cuerpos de agua que debido a la bajante del Río Paraná se secaron dejando nuevas tierras al descubierto, vegetación que no sufrió cambios en el periodo de estudio, vegetación que se regeneró en el periodo de estudio y zonas cultivadas. Las zonas cultivadas son especialmente distinguibles por sus patrones espaciales y formas geométricas regulares. Usando estos criterios, entre las 4 iteraciones se entrenaron 42 polígonos no quemados (se incluyen ejemplos en las Figuras 14, 15 y 16).



*Figura 14: Ejemplo de una zona no quemada (polígono verde), como se visualiza en la imagen difference, ubicada en el interior de un cuerpo de agua no perenne. La coloración verdosa de los píxeles se asocia con la aparición de la vegetación sobre la tierra del fondo del cuerpo de agua seco.*

Es importante en este punto aclarar que si bien el color verde indica una regeneración o reverdecimiento de la vegetación en el periodo de estudio, es decir una mayor densidad de vegetación o vegetación más sana que en el periodo anterior, esto no significa que haya re-aparecido la vegetación nativa o la vegetación anterior al incendio. Sólo implica la reaparición de algún tipo de vegetación.



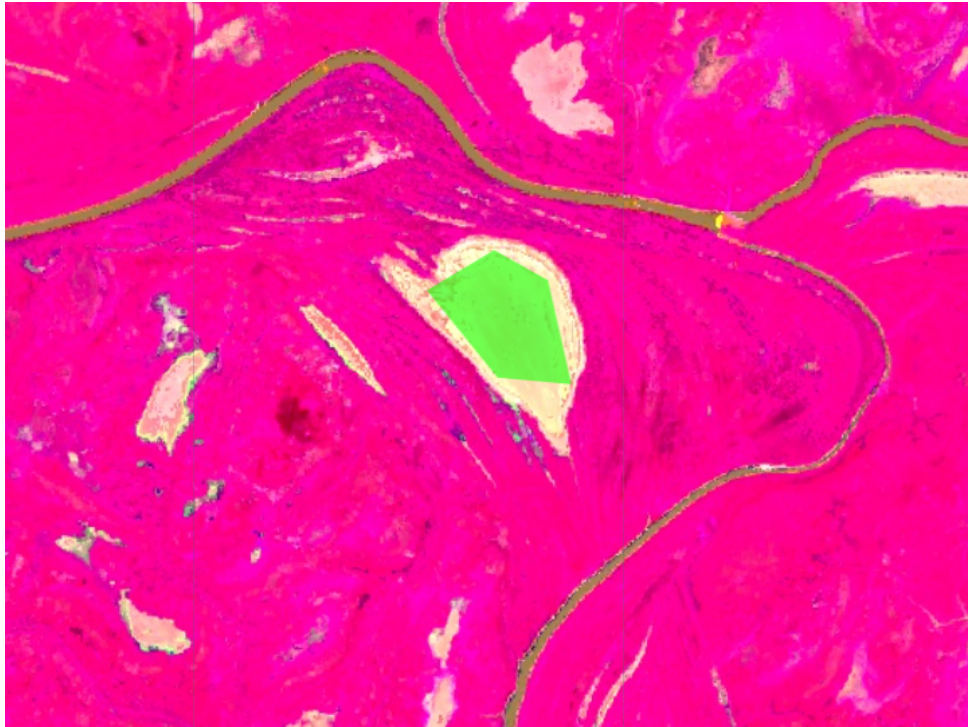


Figura 15: Ejemplo de una zona no quemada (polígono verde), como se visualiza en la imagen difference, ubicada en el interior de un cuerpo de agua no perenne. La coloración en tonos marrones claros de los píxeles se debe a la evaporación del agua.

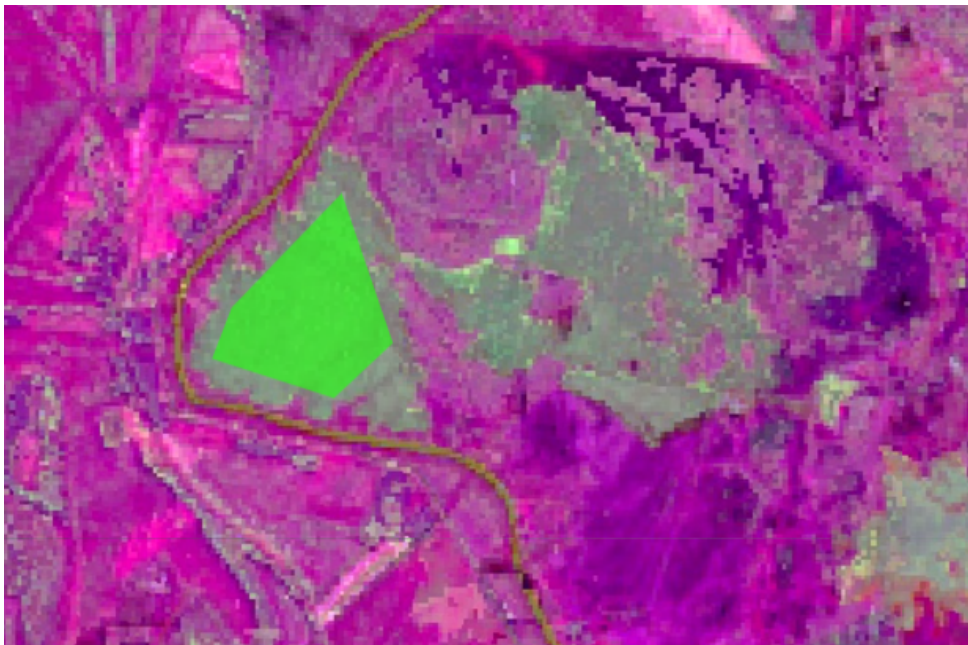


Figura 16: Ejemplo de una zona no quemada (polígono verde), como se visualiza en la imagen difference. La coloración verdosa de los píxeles se debe a vegetación que reverdeció a lo largo del periodo de estudio.

Los resultados obtenidos fueron exportados para poder proceder con su análisis en el software libre QGIS.

### 6.3.2 Aplicación de la herramienta VAT

Con el fin de seleccionar las áreas de validación a utilizar, se corrió la herramienta VAT. Las variables con las que se decidió trabajar fueron las que se presentan en la Tabla 4:

TABLA 4: RESUMEN DE LAS VARIABLES DE LAS QUE DEPENDE EL ALGORITMO CORRESPONDIENTE A LA HERRAMIENTA VAT.

<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Valor Asignado</b>
<i>studyArea</i>	Área de estudio sobre la cual se desea realizar la detección de las áreas quemadas	Área correspondiente al PIECAS-DP
<i>date_pre</i>	Fecha en la que inicia el periodo post-fuego	2020-04-30
<i>date_post</i>	Fecha en la que termina el periodo post-fuego	2020-05-31
<i>dataset</i>	Conjunto de datos que se desea usar (Landsat o Sentinel)	Sentinel
<i>identifier</i>	Nombre con el que se quiere identificar las imágenes resultantes	BAMT_VA_MAY_2
<i>dimension</i>	Dimensión de las áreas de validación (10, 20, 30, 50 o 100 km)	50
<i>numberVA</i>	Cantidad de áreas de validación que se desea obtener. La cantidad de áreas de validación obtenidas puede ser menor que la cantidad indicada debido a una falta de unidades de muestreo, en este caso se aumenta el valor de esta variable	100
<i>globalVA</i>	Seleccionar mostrar la actividad de fuego detectada por el producto MCD64A1 o el producto FIRECCI51	MCD64
<i>availableData</i>	Usar o no los criterios opcionales para la determinación de áreas de validación	FALSE



Se seleccionó dentro de esta herramienta mostrar el producto MCD64A1, dado que el producto FireCCI51 no se encontraba disponible para el periodo de estudio en el momento en que se aplicaron estas herramientas.

Al correr la herramienta, la misma devuelve 5 posibles áreas de validación, las cuales son las zonas del centro de los *tiles* 20HQJ, 21HTC, 20HQK, 21HUC y 21HTD, recortadas de forma tal que sus lados midan 50 km (Figura 17). La elección de este largo de lado para cada uno de los *tiles* se basa primeramente en que, a excepción de los *tiles* 20HQJ, 21HUC y 21HTD, los otros *tiles* tienen su centro en puntos que no están dentro del área de estudio, requiriendo un área mayor para que logren cubrir al menos una parte del área de estudio. Adicionalmente, para el *tile* 20HQJ específicamente este largo de lado logra que el *tile* ocupe una porción significativa del área correspondiente al Delta Medio, zona en la que según el análisis previo se concentra la mayor cantidad de *hotspots*.



Figura 17: Mapa mostrando la ubicación de los tiles 20HQK, 20HQJ, 21HTD, 21HTC y 21HUC.

De estos *tiles*, el 20HQK y el 21HTC fueron descartados debido a que se superponen con una zona muy pequeña del área de estudio. Por su parte, el *tile* 21HUC se localiza en la zona del Delta Inferior donde se detectó la menor superficie quemada con la aplicación de las BAMTs, haciendo que no sea ideal para la comparación de los resultados de la herramienta BACT y RPT. En consecuencia, los *tiles* más convenientes para utilizarse como área de validación son los 20HQJ y 21HTD. De estos, el *tile* 21HTD se descarta debido a que solo la mitad de su área coincide con el área de estudio, y que la zona que sí coincide corresponde con un área especialmente difícil de clasificar por la presencia dominante de pequeñas lagunas y zonas inundables.

Por su parte, el *tile* 20HQJ presenta algunas ventajas: 1) la mayor parte de su superficie está incluida dentro del área de estudio y 2) a la hora de correr la herramienta, la configuración del territorio para el área delimitada por el *tile* incluye las principales coberturas de interés: agua, área quemada, vegetación, áreas seca, cultivo; siendo la identificación y diferenciación de las mismas más asequible que para el *tile* 21HTD considerado anteriormente. Por estas razones se selecciona el *tile* 20HQJ para realizar la validación (Figura 18).

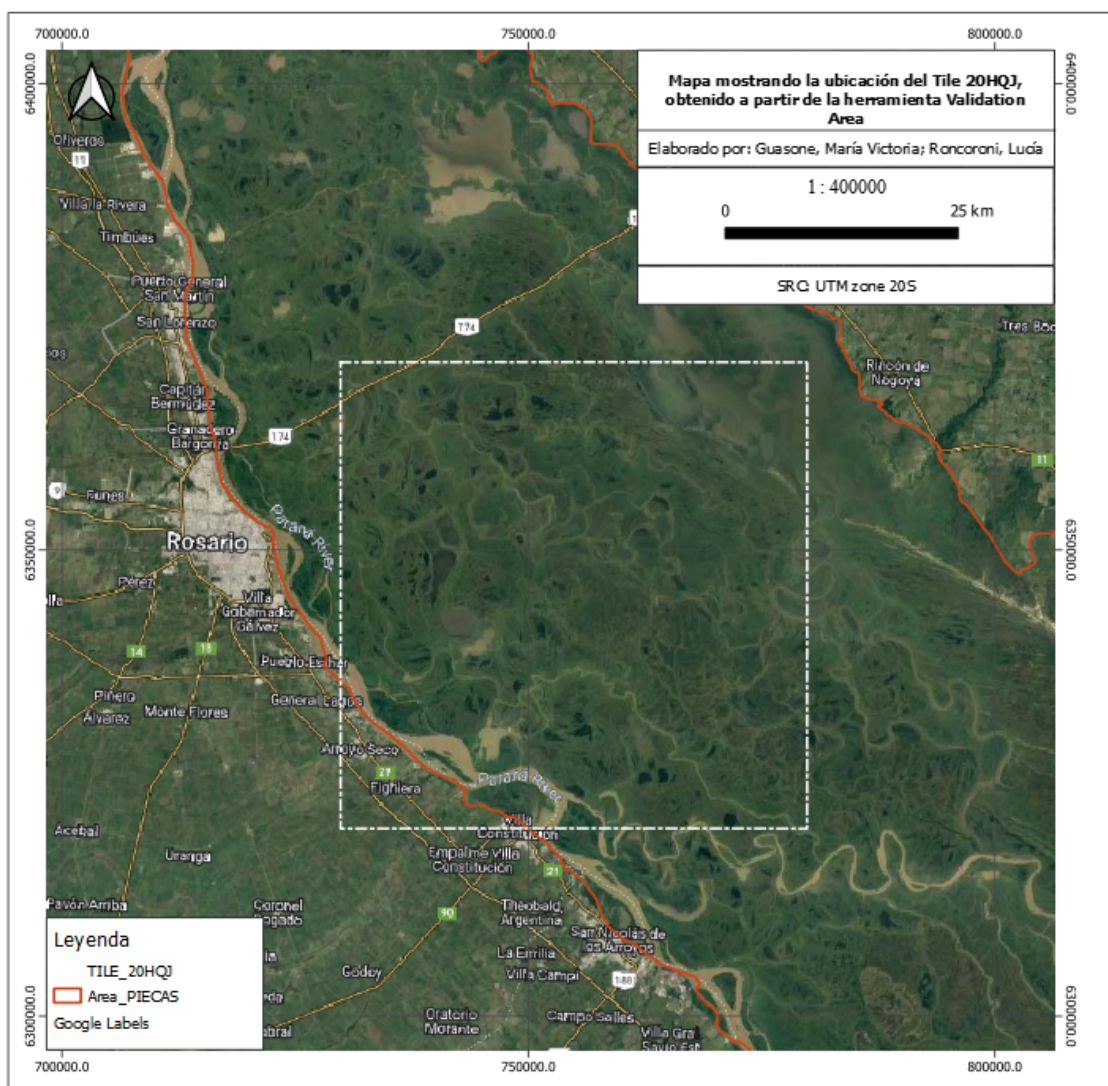


Figura 18: Mapa mostrando la ubicación del tile 20HQJ.



### 6.3.3 Aplicación de la herramienta VADT

Para obtener las fechas disponibles asociadas al *tile* seleccionado, se usó la herramienta VADT, con los parámetros que se muestran en la Tabla 5:

TABLA 5: RESUMEN DE LAS VARIABLES DE LAS QUE DEPENDE EL ALGORITMO CORRESPONDIENTE A LA HERRAMIENTA VADT, Y VALORES ASIGNADOS PARA ESTE ESTUDIO.

<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Valor Asignado</b>
<b><i>dataset</i></b>	Conjunto de datos que se desea usar (Landsat o Sentinel). Debe ser el mismo que se usó para la herramienta de VAT.	Sentinel
<b><i>dates</i></b>	Fechas que corresponden con el día de inicio y fin del periodo de incendio.	2020-05-01, 2020-12-22
<b><i>Region</i></b>	Dimensión de las áreas de validación (10, 20, 30, 50 o 100 km). Debe coincidir con el seleccionado para la herramienta de VAT.	50
<b><i>Cloud Coverage</i></b>	Valor máximo tolerado para la cobertura nubosa de la imagen.	30

A partir de esta herramienta, se obtuvo una lista con todas las fechas disponibles que contienen imágenes que cumplen con la condición indicada respecto a la nubosidad. De las imágenes obtenidas, se seleccionaron únicamente aquellas sin cobertura nubosa. Esto se hizo a modo de preservar los resultados ante la aplicación de una sola área de validación. Con apoyo de un navegador que permite visualizar y filtrar colecciones de imágenes de Sentinel 2 según varios criterios, se seleccionó un conjunto de las mismas, consiguiendo que los periodos de tiempo entre una imagen y la siguiente se mantengan entre 10 y 40 días.

Siguiendo estos lineamientos, se obtuvieron las siguientes fechas para trabajar en la herramienta RPT (Tabla 6), correspondientes al *tile* 20HQJ.

TABLA 6: FECHAS UTILIZADAS PARA DELIMITAR LOS PERIODOS DE ESTUDIO DE LA HERRAMIENTA RPT, OBTENIDOS A PARTIR DE LA HERRAMIENTA VADT.

Fechas	
<i>date_pre</i>	<i>date_post</i>
2020-05-01	2020-05-16
2020-05-16	2020-05-31
2020-05-31	2020-06-25
2020-06-25	2020-07-15
2020-07-15	2020-07-30
2020-07-30	2020-09-08
2020-09-08	2020-09-28
2020-09-28	2020-10-13
2020-10-13	2020-11-12
2020-11-12	2020-11-27
2020-11-27	2020-12-07
2020-12-07	2020-12-22

#### 6.3.4 Aplicación de la herramienta RPT

Usando los resultados obtenidos de las herramientas VAT y VADT se pudo hacer uso de la herramienta RPT. Las áreas quemadas detectadas a través de esta herramienta fueron usadas para validar los datos de la herramienta BACT, a través de la generación de una matriz de confusión, ante la falta de datos de campo.

A pesar de que esta herramienta fue desarrollada con este propósito, hay algunas consideraciones que se deben tener al momento de evaluar estos resultados:

- El método utilizado para detectar las áreas quemadas fue el mismo para la herramienta BACT y para la herramienta RPT.
- El entrenamiento del algoritmo se basa en la interpretación visual de las imágenes, al igual que en la herramienta BACT.
- GEE automáticamente enmascara los cuerpos de agua de las imágenes *pre-fire*, *post-fire* y *difference*.

- No siempre se puede generar la imagen *pre-fire*, la *post-fire* y la imagen de diferencia. Esto ocurre normalmente en zonas de agua o sus bordes, como el cuerpo principal del Río Paraná (Figura 19).



Figura 19: Ejemplo de zonas que no son procesadas en las imágenes *pre-fire*, *post-fire* y *difference*. Al no ser procesadas por ninguna de las tres imágenes, las zonas permanecen con el color original anterior a la aplicación de la herramienta. Puede verse dentro del óvalo blanco un ejemplo de una de estas áreas, donde se mantiene el color verdoso de un cuerpo de agua que no sufrió procesamiento. El tramo del río Paraná que aparece en la imagen es otro ejemplo de un área que no fue procesada. Esta imagen corresponde a una zona de una imagen *post-fire*.

La reglas generales que se siguieron para lograr la identificación de polígonos de entrenamiento quemados y no quemados fue la misma que la descrita en el punto 6.3.1. Como regla adicional, para todos los períodos de estudio se realizaron al menos dos iteraciones para corregir o agregar nuevos polígonos de entrenamiento.

## 7. Resultados

### 7.1 Áreas quemadas detectadas por la herramienta BACT

Para lograr obtener el área quemada detectada a través de la herramienta BACT, se debió en primer lugar preprocesar las capas vectoriales devueltas por el algoritmo, debido a que había zonas de superposición entre las capas adyacentes. Esto se da debido a la manera en la que el algoritmo procesa y exporta las capas.

Luego de realizar este proceso, se debieron eliminar aquellos polígonos clasificados como “No Observados”, es decir, aquellos que en la tabla de atributos presentan en el campo *BurnDate* un valor de 0. Cabe destacar que, si bien normalmente las zonas que quedan encuadradas en esta categoría son zonas que no pudieron ser observadas debido a la presencia de cobertura nubosa, en este caso las zonas que presentaron un *BurnDate* de 0 corresponden casi en su totalidad a zonas ocupadas por cuerpos de agua, como se muestra a continuación (Figura 20).

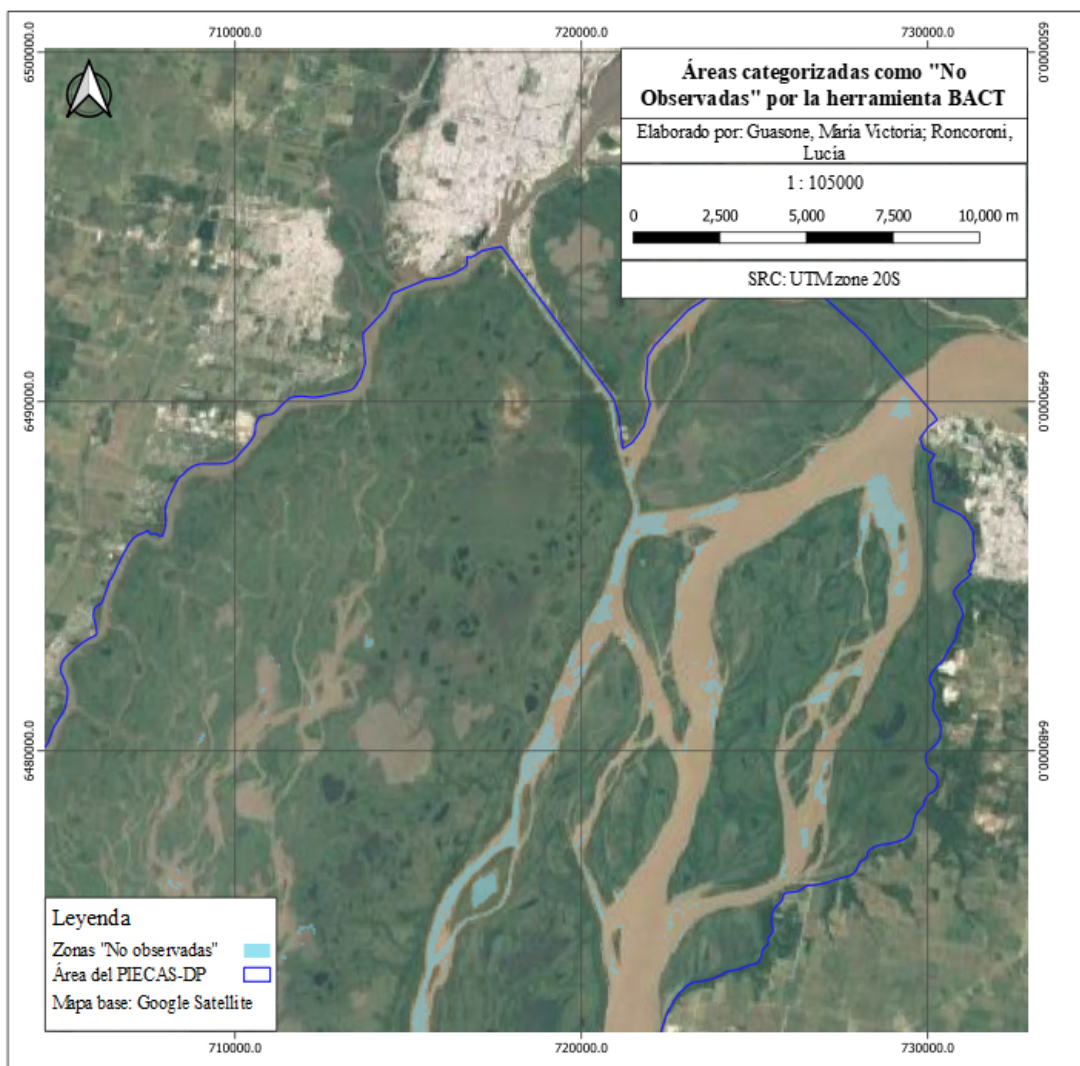


Figura 20: Mapa mostrando un ejemplo de zonas que el algoritmo de la herramienta BACT clasifica como “No observadas”.



Adoptando la metodología descrita, dentro del área correspondiente al PIECAS-DP se obtuvo un área quemada total de 452.693 ha entre los días 1 de mayo de 2020 y 22 de diciembre de 2020. Esto representa un 21,50% de la superficie total del área del PIECAS-DP. A continuación se presenta un mapa que muestra la distribución de las áreas quemadas (Figura 21).

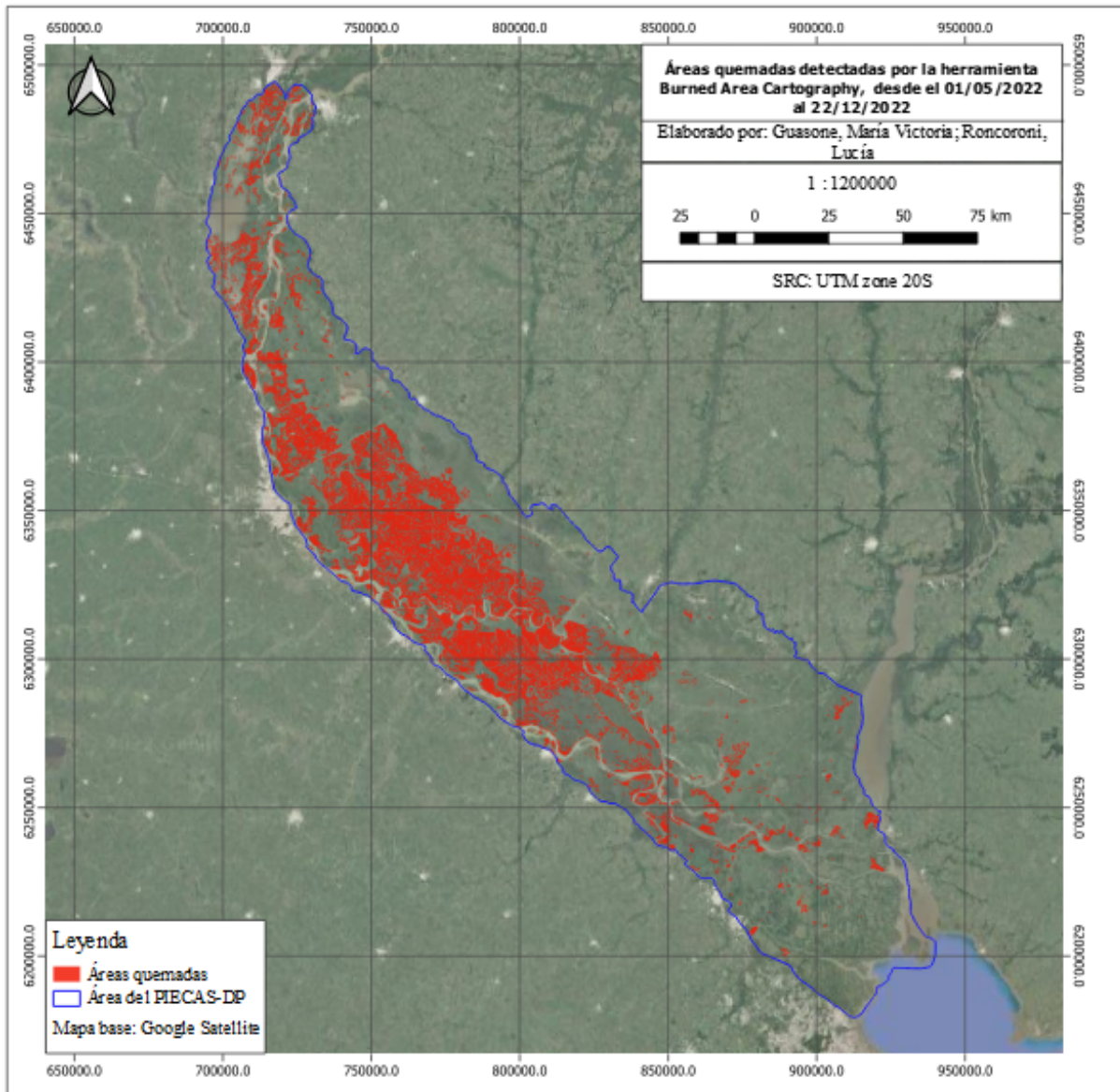


Figura 21: Mapa mostrando los resultados de la herramienta BACT, para los meses de mayo a diciembre.

Como puede verse, las zonas más afectadas por los incendios se presentan en las secciones media y superior del Delta, siendo esto coincidente con la distribución de *hotspots* antes presentada. Además, suelen estar concentradas sobre el margen oeste del Delta. Esto puede deberse a la presencia de cuerpos de agua permanentes sobre el margen derecho, los cuales hasta cierto punto son capaces de soportar las condiciones de sequía de este periodo.

Resulta de interés la comparación de estos resultados con la detección de hotspots para las mismas fechas. En la Figura 22 puede verse esta distinción para la zona del Delta Medio. Está claro que existe una correlación entre la ubicación de los hotspots identificados y las áreas quemadas calculadas. Si bien esto no puede usarse como medida de la calidad del producto de la herramienta BACT, sí es un indicador de que es al menos probable la presencia de áreas quemadas en esas zonas.

Por último, se procede a estimar el porcentaje de áreas quemadas por jurisdicciones y áreas protegidas. Este análisis permite, a partir del cruce con bases de datos gubernamentales, aportar información ilustrativa sobre la distribución de áreas quemadas entre las distintas jurisdicciones, de forma de incrementar las herramientas disponibles para la toma de medidas fundadas y garantizar el cumplimiento de las normativas provinciales.

Complementariamente, se identifican aquellas áreas de conservación que fueron más afectadas por los incendios. En las Tablas 8 y 9 se presentan los resultados, y en la Figura 23 puede verse la distribución espacial de estas áreas.

TABLA 8: DISTRIBUCIÓN PROVINCIAL DE LAS ÁREAS QUEMADAS DETECTADAS POR LA HERRAMIENTA BACT EN EL PERIODO MAYO-DICIEMBRE.

<b>Provincia</b>	<b>Superficie en PIECAS (ha)</b>	<b>Hectáreas quemadas detectadas en el periodo de estudio mayo-diciembre</b>	<b>Porcentaje quemado en el periodo de estudio mayo-diciembre</b>
Buenos Aires	324.953 (15%)	15.447	4%
Entre Ríos	1.600.884 (76%)	383.873	87%
Santa Fe	179.407(9%)	40340	9%
Total	2.105.244	452.693	21%



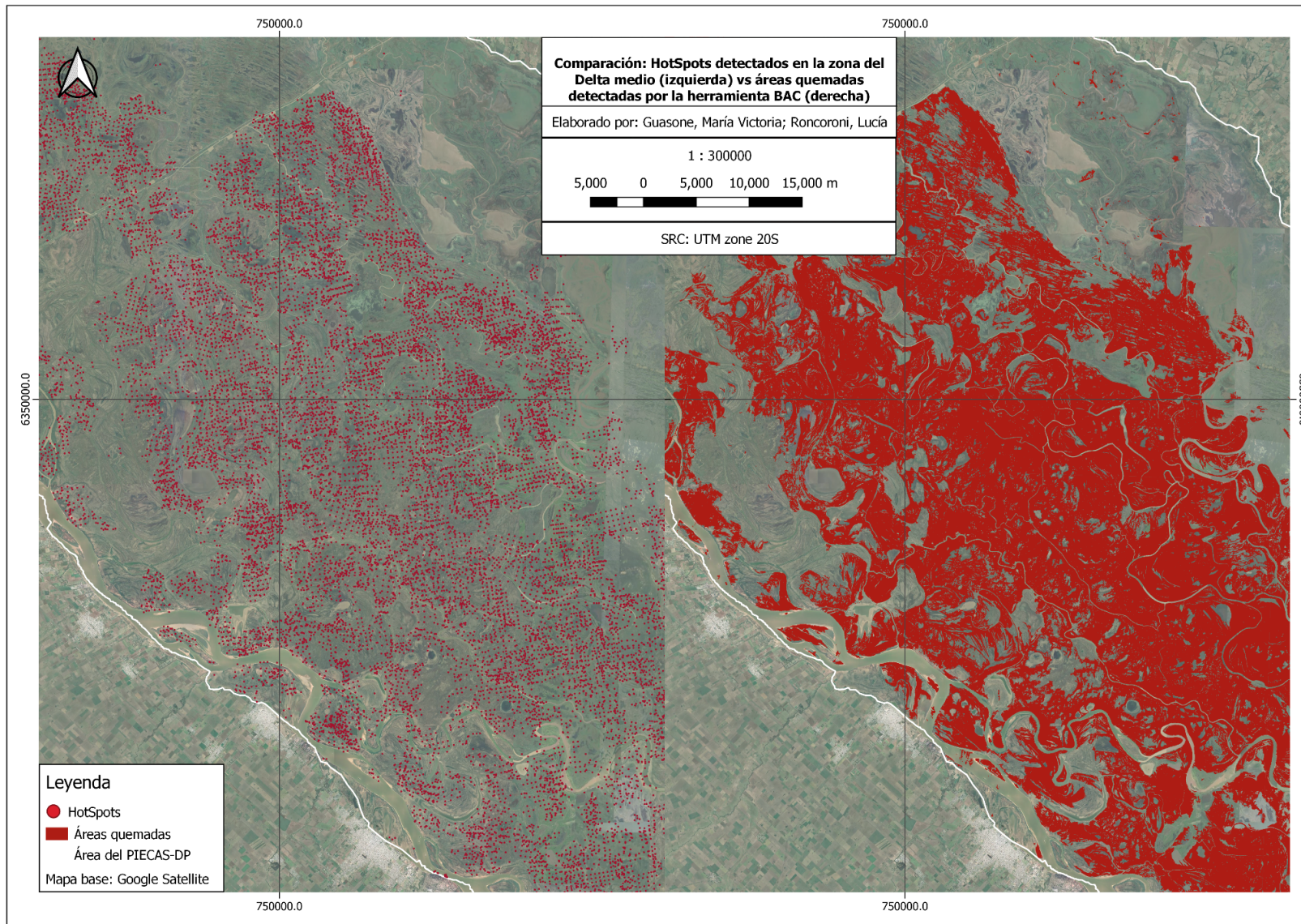


Figura 22: Mapa de comparación entre los hotspots detectados por el satélite S-NPP y las áreas quemadas detectadas por la herramienta BACT en la zona del Delta Medio para el periodo mayo-diciembre de 2020.

TABLA 9: ÁREAS QUEMADAS DETECTADAS POR LA HERRAMIENTA BACT UBICADAS DENTRO DE ZONAS PROTEGIDAS. EN LA FIGURA 23 SE MUESTRA LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ESTAS ÁREAS.

Área protegida	Categoría de conservación <sup>13</sup>	Superficie	Hectáreas quemadas detectadas en el periodo de estudio mayo-diciembre
Sitio Ramsar Delta del Paraná	Reconocimiento internacional	243.126	71.884 (30%)
Reserva de la Biósfera Delta del Paraná	Reconocimiento internacional	88.624	1.187 (1%)
Parque Nacional Predelta	II UICN	2.608	26 (<1%)
Parque Nacional Islas de Santa Fe	II UICN	4.775	4.207 (88%)
Parque Nacional Ciervo de los Pantanos	II UICN	5.200	490 (9%)
Reserva Usos Múltiples Islas Victoria	No homologable	376.000	<b>257.193 (68%)</b>
Total	-	720.333(34%)	<b>334.987 (47%)</b>

Se concluye que :

- La provincia más afectada por los incendios fue Entre Ríos (87% del total del área quemada detectada), seguida por Santa Fe (9%) y Buenos Aires (4%).
- Entre los municipios que más se vieron impactados por los incendios se encuentra Victoria, Entre Ríos, que registró el máximo número de incendios, incluida la zona correspondiente a la Reserva de Usos Múltiples de nombre homónimo. Esta localidad se encuentra frente a la ciudad de Rosario y ha sido base de múltiples reclamos por parte de la ciudadanía que fue testigo directo de esta problemática.
- El Parque Nacional Islas de Santa Fe, en relación a su extensión, fue el que más se quemó, con un 88% de su superficie afectada.
- Un 34% del área de estudio se encuentra protegida en distintos niveles de conservación. Se quemó un 47 % del territorio protegido.

<sup>13</sup> [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe\\_ambiente\\_y\\_ap\\_final\\_0.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_ambiente_y_ap_final_0.pdf)



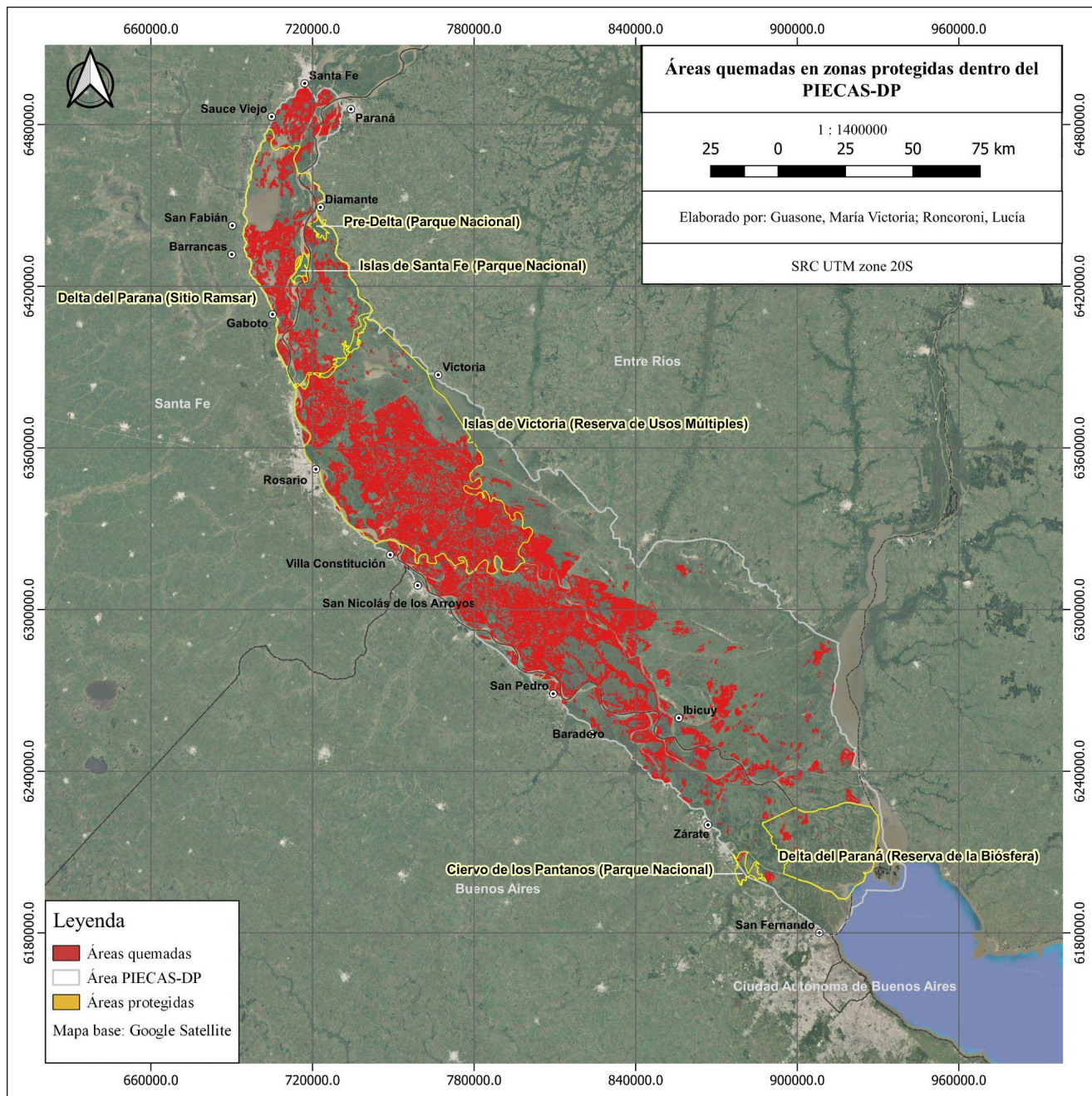


Figura 23: Mapa mostrando las zonas quemadas que coinciden con zonas protegidas ubicadas dentro del área del PIECAS-DP. La información de las localidades y áreas protegidas es provista por los servicios WFS del Instituto Geográfico Nacional y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

## **7.2 Comparación de los resultados obtenidos por la herramienta BACT y por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible**

En el año 2021, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible publicó su *Informe de superficies afectadas por incendios en el Delta e islas del Río Paraná - Segunda parte*. En el mismo reporta una superficie quemada de 487.000 ha para todo el año 2020, las cuales son detectadas mediante una metodología de detección visual, que se explica a continuación. La distribución espacial de estas áreas quemadas se presenta en la Figura 24.

Los resultados obtenidos por ambos métodos no son disímiles en general en cuanto a la distribución (ver la Figura 21), y se observa una diferencia de aproximadamente 7% en cuanto a los valores de superficie quemada que fueron estimados (452.693 ha de la BACT y 487.000 ha del Ministerio, correspondientes a un período más extendido que también incluye enero a abril). Las diferencias podrían deberse a que se emplearon distintos métodos para la detección de áreas quemadas: mientras que en el presente trabajo se usan las BACTs, en el informe presentado por la autoridad ambiental se adopta la metodología de interpretación visual para el análisis de imágenes, usando como referencia compuestos en composición RGB tanto en color real como en falso color compuesto (composición SWIR-NIR-RED) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

El análisis visual de áreas quemadas exige cubrir exhaustivamente toda la región de estudio, identificando individualmente cada área quemada y dejando a criterio de interpretación del analista la clasificación de las coberturas. En cambio, con las BACTs se limita el análisis visual a la etapa de entrenamiento, permitiendo un ahorro considerable de tiempo, para que luego se ejecute una clasificación automática de todos los píxeles de la imagen, en función de los valores de las bandas e índices espectrales que procesa el algoritmo. Si bien se trata de un criterio de clasificación unificado, los resultados son sensibles a los valores de los índices calculados en el análisis multi-temporal, pudiendo no diferenciarse claramente las distintas coberturas y variar de acuerdo a la calidad del entrenamiento; de esta forma, se deben incluir también criterios visuales de interpretación complejos durante esta etapa, ya sea la textura, forma y/o distribución espacial de los distintos elementos, y repetir el proceso hasta alcanzar un resultado conforme.

Estas diferencias en la metodología llevan a que cada método llegue a errores de comisión y de omisión distintos, es decir, que cada método detecta áreas quemadas que el otro no identifica como tales. En las Figuras 25 y 26 se muestran ejemplos de esto.



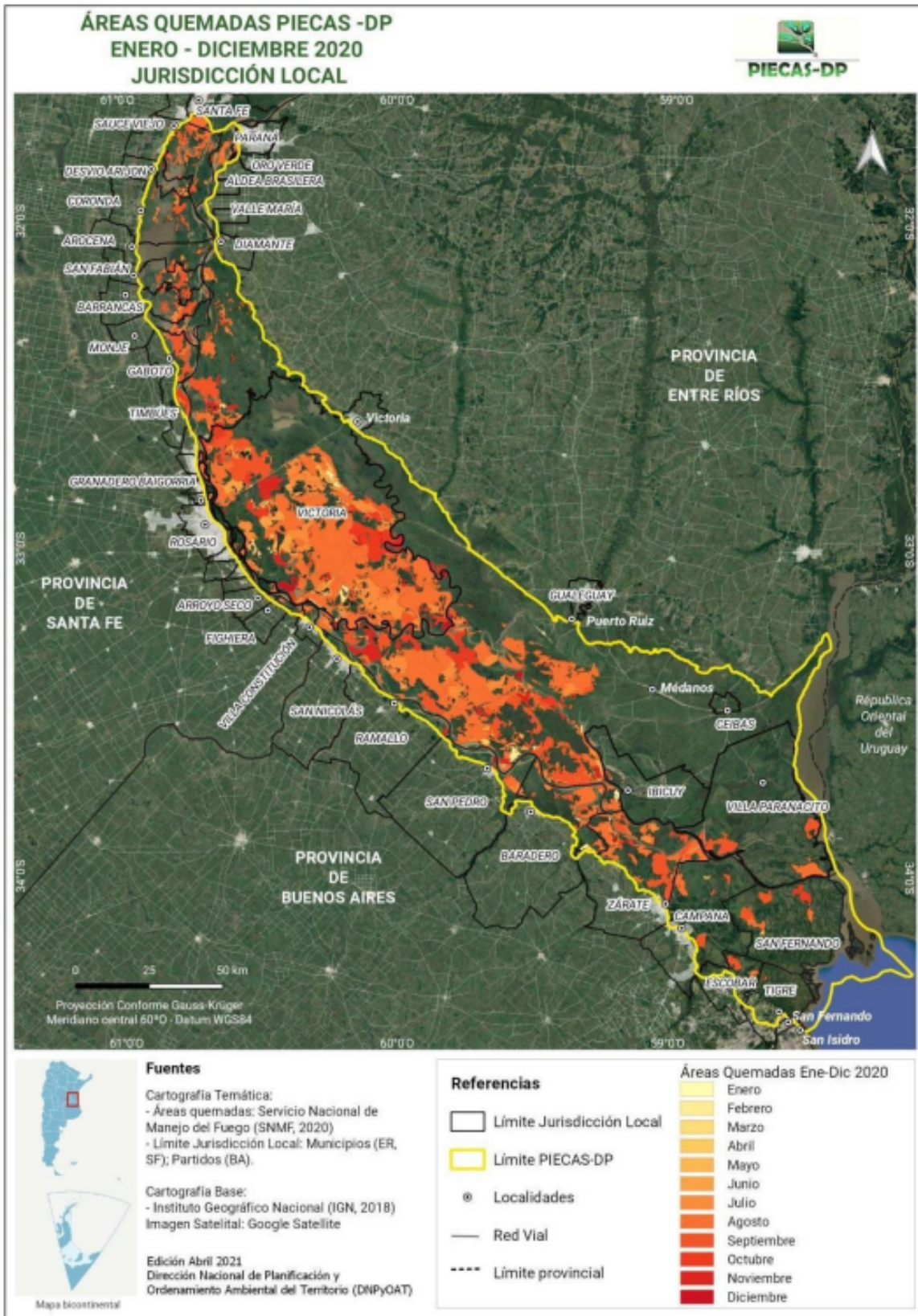


Figura 24: Mapa mostrando los resultados presentados en el Informe de superficies afectadas por incendios en el Delta e islas del Río Paraná - Segunda parte, del año 2021 (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021-b). Esta figura cubre el periodo de enero a diciembre.

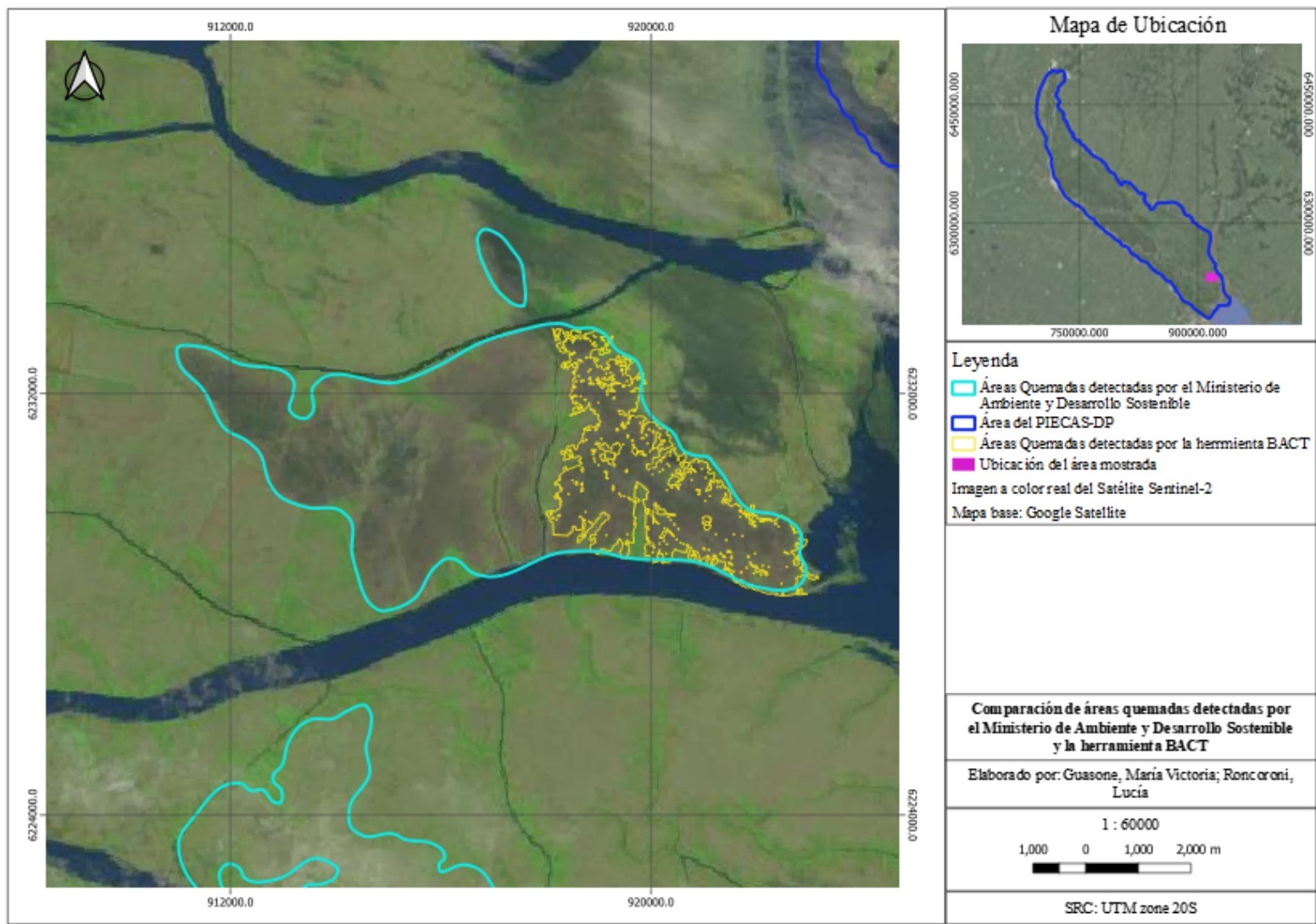


Figura 25: Mapa mostrando las áreas quemadas detectadas por la herramienta BACT y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el periodo mayo-diciembre, en la zona del Delta Inferior. En esta imagen se ve un error de omisión de los resultados del algoritmo de la herramienta BACT (identificado con una línea amarilla), a diferencia del resultado del Ministerio, el cual detectó una zona más extensa quemada (identificado con una línea color celeste). En este último caso, aunque se observa que se detecta un mayor perímetro de incendio, el mismo incluye errores de comisión, ya que no discrimina las zonas no quemadas dentro del incendio. La imagen base es del Satélite Sentinel 2, de fecha 30/09/2020.



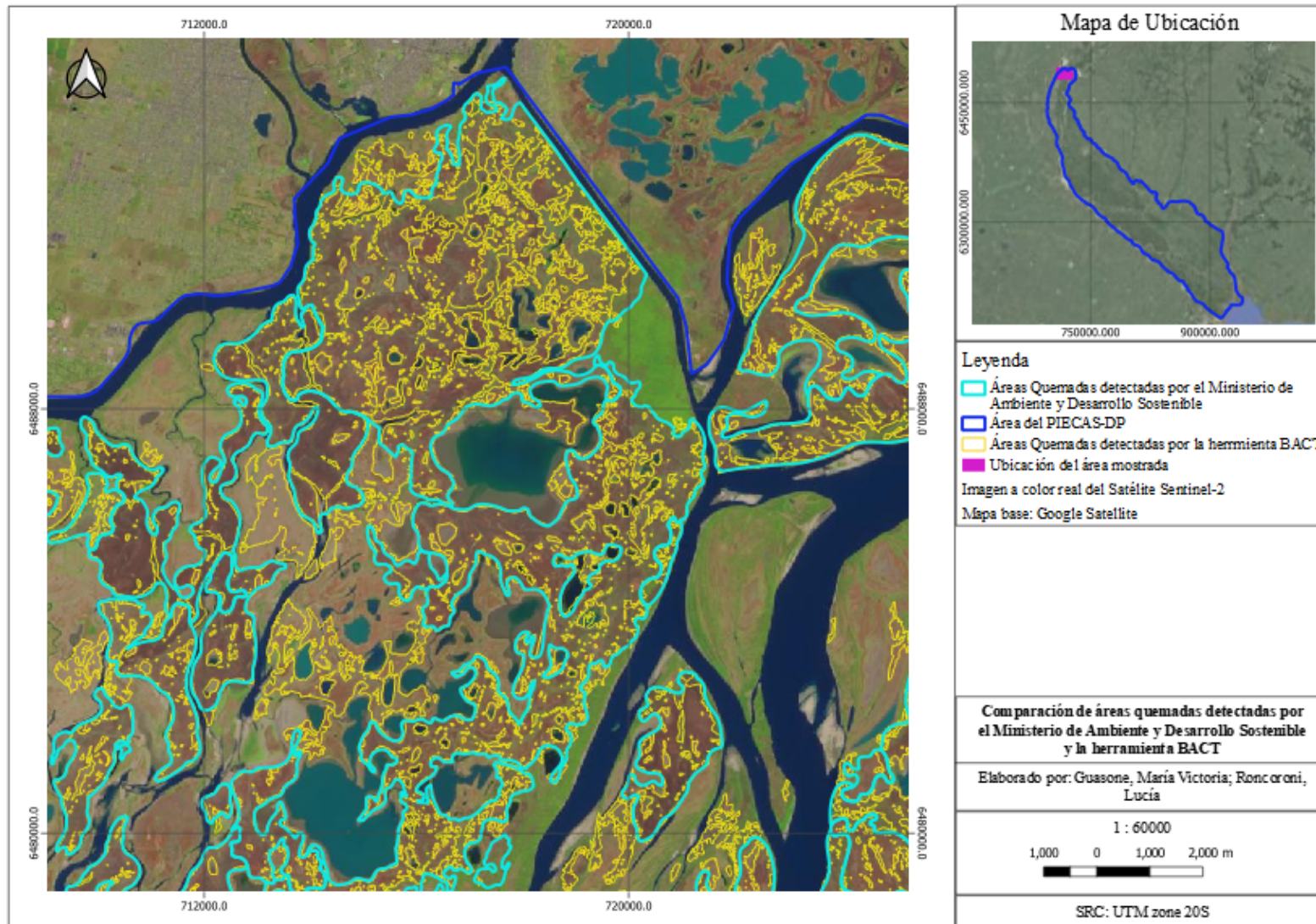


Figura 26: Mapa mostrando las áreas quemadas detectadas por la herramienta BACT y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en el periodo mayo-diciembre, en la zona norte del Delta. En esta imagen puede verse un error de comisión de los resultados del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, dado que el método de detección visual de áreas quemadas hace que el analista deba centrarse en reconocer las zonas quemadas en general, y no puede detenerse a observar píxel por píxel para identificar islas no quemadas dentro del incendio, como sí logra el algoritmo de la herramienta BACT. La imagen base es del Satélite Sentinel 2, de fecha 28/09/2020.

Para mostrar la variabilidad de los resultados obtenidos con la herramienta BACT, en la Tabla 10 se muestran las hectáreas quemadas obtenidas por mes en el presente trabajo y por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, para todo el año.

TABLA 10: COMPARACIÓN DE LAS HECTÁREAS DE ÁREAS QUEMADAS OBTENIDAS POR MES PARA CADA UNO DE LOS PERIODOS DE ESTUDIO.

Mes en el que se detectaron las áreas quemadas	Hectáreas quemadas detectadas en el periodo de estudio mayo-diciembre	Hectáreas quemadas detectadas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
Enero	-	1.089
Febrero	-	5.981
Marzo	-	1.478
Abril	-	1.416
Mayo	17	2.892
Junio	67	18.121
Julio	2.253	80.342
Agosto	41.179	223.079
Septiembre	367.581	95.951
Octubre	19.572	33.844
Noviembre	16.567	20.799
Diciembre	5.457	4.570
<b>Total</b>	<b>452.693</b>	<b>489.562</b>

*Nota: si bien el Informe de superficies afectadas por incendios en el Delta e Islas del Río Paraná - Segunda parte se reporta un área quemada total de 487.000 ha, esa cantidad es la corregida y acordada por el Servicio Nacional de Manejo del Fuego. Las hectáreas que se reportan en la tabla son las correspondientes a la capa vectorial original generada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, por lo que hay una diferencia mínima en el total.*

Una observación de interés es que, para los resultados de la herramienta BACT, la mayor parte de las áreas quemadas tienen asignada su fecha de quemado en el mes de septiembre, a pesar de que la mayoría de los *hotspots* detectados corresponden al mes de agosto (ver Figura 3). Esto puede deberse parcialmente a que las imágenes disponibles del satélite Sentinel para el mes de agosto presentan una gran cobertura nubosa, en conjunto con el hecho que el algoritmo informa la fecha del área quemada a cada polígono como la fecha correspondiente a la moda de las fechas quemadas para los píxeles contenidos dentro del polígono. Esto hace que la fecha informada no necesariamente coincida con la fecha en la que todos los píxeles del polígono realmente se quemaron.

Comparando con los resultados del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, es notable que si bien el resultado para todo el periodo de estudio se encuentra en el mismo orden de

magnitud, los resultados mes a mes sí son extremadamente disímiles. Esto también es consecuencia de la manera en la que funciona el algoritmo de la BACT, debido a que si un mismo píxel se quema en dos ocasiones, la única fecha que queda registrada es la que corresponde a la moda para todos los píxeles de ese polígono. Esto también explica por qué para los resultados de la BACT se concentran las zonas quemadas en los meses de agosto y septiembre, fecha en la cual hubo más incendios de acuerdo a la mayor concentración de *hotspots* presentada en la Figura 3, lo que en consecuencia hace que la fecha moda del polígono probablemente se encuentre en ese mes.

De este último análisis parte la observación de que no es conveniente emplear el método de detección de áreas quemadas con las BACTs si se busca poder distinguir precisamente la fecha de las áreas quemadas, cuando los periodos de estudio son largos o cuando se sabe que hay una gran probabilidad de que una misma área se haya quemado en más de una ocasión.

### **7.3 Áreas quemadas detectadas por la herramienta RPT**

Para validar los resultados obtenidos a partir de la herramienta BACT, se recurrió al método de validación usado en el proyecto FireCCI Global (Franquesa *et al.*, 2020). El mismo adopta los conceptos de *Short Unit* (SU) y de *Long Unit* (LU). El término *Short Unit* refiere a datos de referencia derivados de un par de imágenes consecutivas, con 16 días o menos de separación entre ellas. El término *Long Unit* refiere a una serie de *Short Units* consecutivas, que en conjunto cubren un periodo de al menos 100 días. El uso de estos LUs busca reducir o minimizar el impacto de la precisión temporal de los resultados del producto, que cubren periodos temporales largos. Esto es gracias a que los LUs permiten largos periodos de coincidencia entre los datos del producto y los datos de validación (Franquesa *et al.*, 2020).

Con este método de validación, si un píxel se clasifica como sin datos en cualquiera de los SUs, el mismo píxel se mantiene en esa categoría en el resultante LU. De forma similar, si un píxel se clasifica como quemado en cualquiera de los SUs el mismo se considera quemado en el LU resultante, tomando como fecha en la que el píxel se quemó la fecha de la imagen post-fuego correspondiente a ese *Short Unit*.

Este método se aplicó con ciertas modificaciones dado que, como se explicó anteriormente, el periodo máximo obtenido entre dos fechas con la herramienta VADT es de 40 días, es decir, los *Short Units* utilizados son imágenes consecutivas pero con una separación máxima de 40 días entre ellas.

Con el fin de validar los resultados obtenidos por la herramienta BACT, se usaron los polígonos obtenidos de la herramienta RPT. Para poder lograr esto, primero debieron pre-procesarse las capas Shapefile de cada uno de los 12 periodos analizados. Esto es debido a que el periodo temporal en estudio es lo suficientemente largo para que la vegetación se recupere y nuevamente se queme, por lo que hay zonas de superposición entre las áreas detectadas en los distintos subperiodos.



Este preprocesamiento consiste en primer lugar en dividir cada una de las capas vectoriales obtenidas en 2: una conteniendo los polígonos categorizados como “No Observados” y otra conteniendo los polígonos categorizados como “Quemados”. Se obtienen así 24 capas vectoriales. Luego, para cada grupo de 12 capas correspondientes a la misma categoría (Quemado o No Observado), se recurrió al uso de la herramienta de QGIS “Union” para generar una única capa que contiene todos los atributos con una misma clasificación.

Para el caso de los polígonos clasificados como “No Observados”, similar al caso de los polígonos “No Observados” de la herramienta BACT, estos coinciden en su mayoría con cuerpos de agua, como se muestra en la Figura 27:

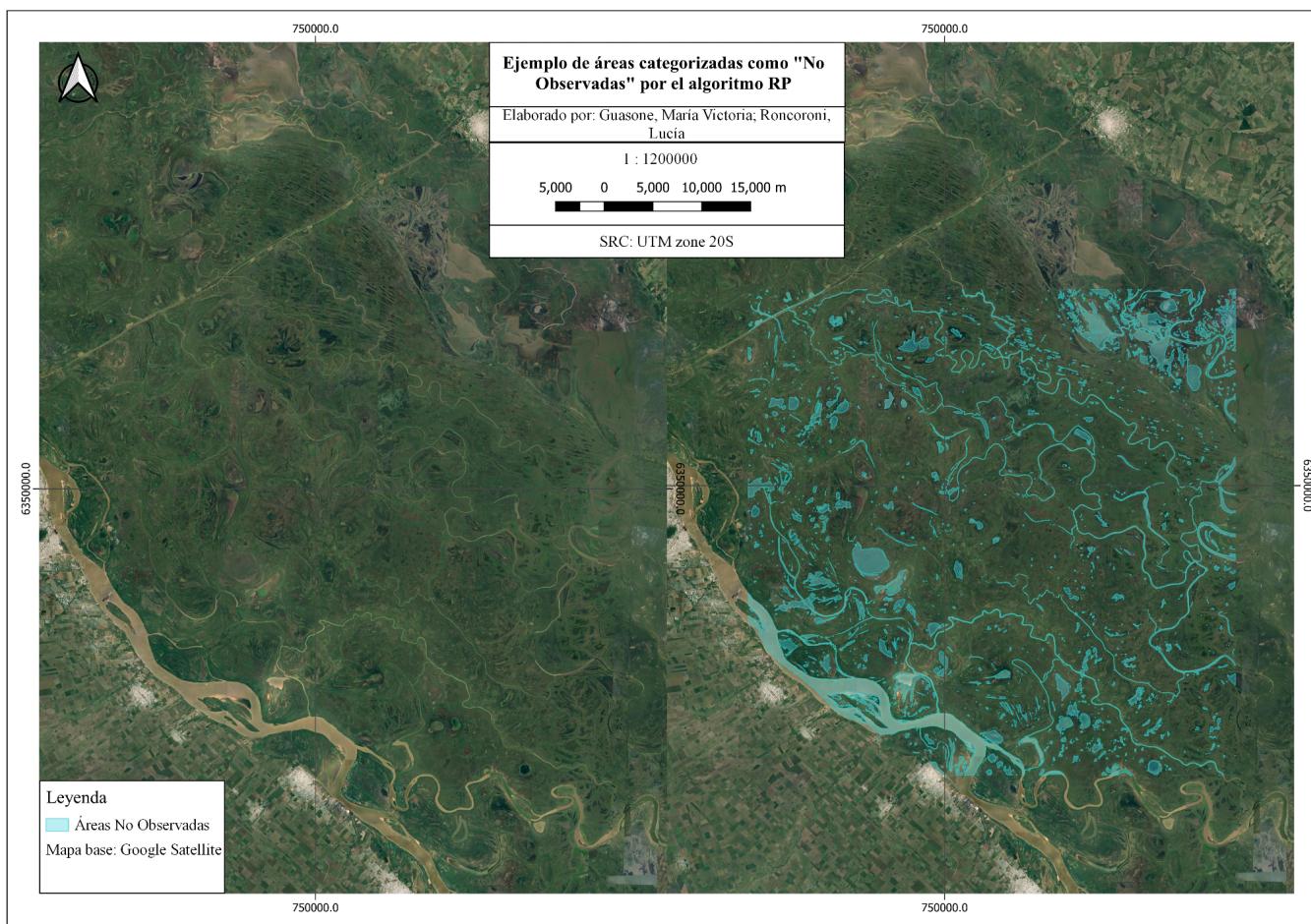
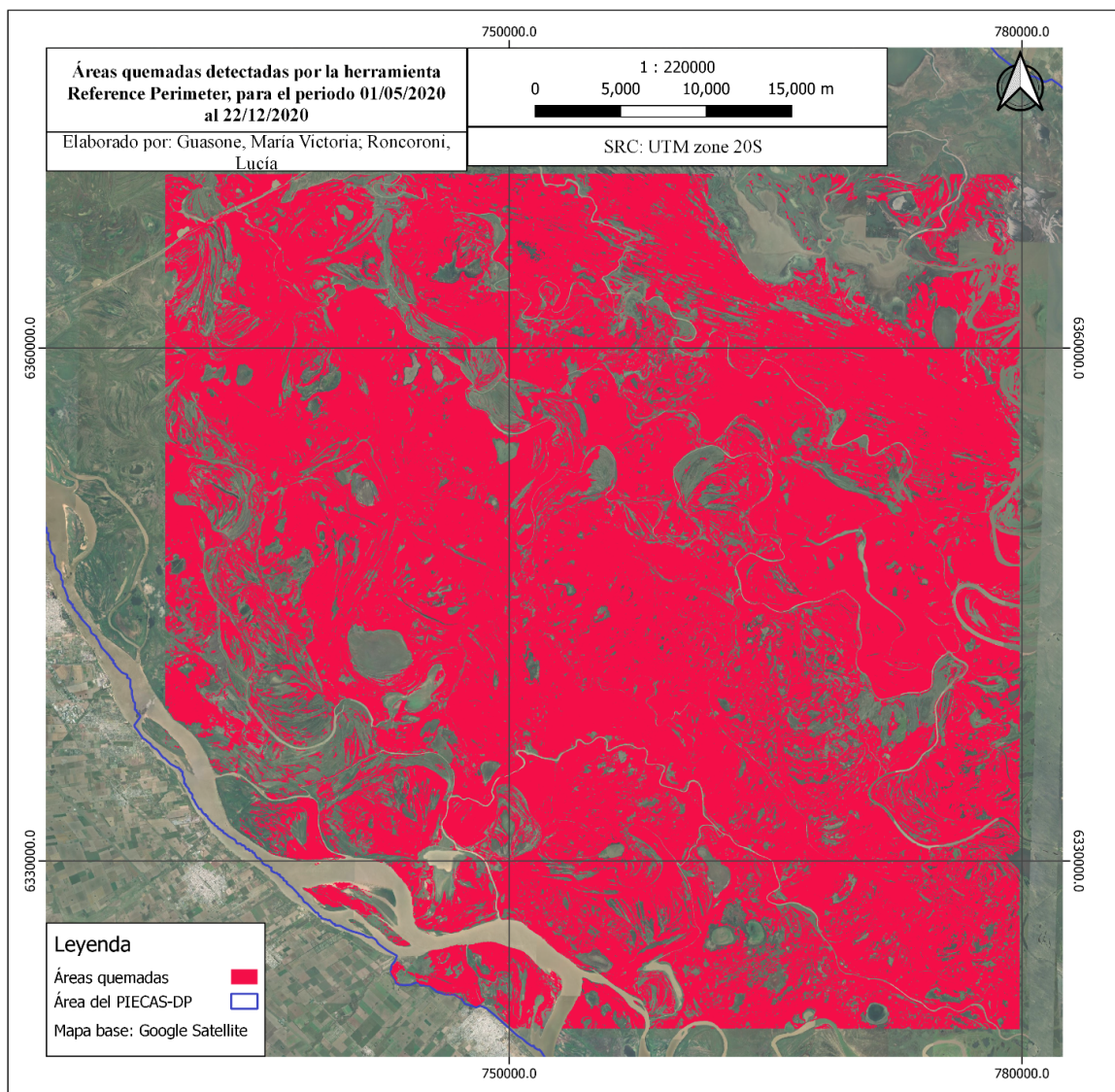


Figura 27: Mapa mostrando ejemplos de zonas clasificadas como no observadas por el algoritmo de la herramienta RPT.

Se exponen a continuación las áreas quemadas detectadas a través del uso de la herramienta RPT, dentro del *tile* 20HQJ (Figura 28):





*Figura 28: Áreas quemadas detectadas por la herramienta RPT, presentadas como Long Unit, para el periodo de estudio. Esto quiere decir que lo que se muestra son las áreas quemadas detectadas en todo el periodo de estudio, para todos los subperiodos de la herramienta RPT.*

#### 7.4 Validación de los resultados obtenidos

Para continuar con el análisis se procede a recortar la capa vectorial correspondiente a los resultados de la BACT para que incluya únicamente la extensión del *tile* 20HQJ. De esta manera, puede hacerse un análisis de la superposición de ambas capas a fines de generar una matriz de confusión que muestre la coincidencia entre ambas y validar los resultados obtenidos. En la Figura 29, se presenta una comparación de las áreas quemadas detectadas por ambas herramientas.

Generando los análisis correspondientes, se obtiene la siguiente matriz de confusión (Tabla 11).

TABLA 11: MATRIZ DE CONFUSIÓN COMPARANDO LOS RESULTADOS DE LAS CLASIFICACIONES OBTENIDAS CON LAS HERRAMIENTAS BACT Y RPT.

—	Clasificación de la Herramienta BACT			
	—	Quemado	No Observado	No Quemado
Clasificación de la Herramienta RPT	Quemado	50,79%	0,01%	9,99%
	No Observado	0,00%	0,02%	14,45%
	No Quemado	5,92%	0,16%	18,66%
	—			

Lo que quiere decir que el 69,47% del área fue clasificada correctamente, usando como datos de validación los resultados de la herramienta RPT. Esto deja un margen de error del 30% el cual, de acuerdo a la aplicación que se le pretende dar a la detección de áreas quemadas, puede resultar aceptable. Por ejemplo, si se pretende generar un plan de recuperación de la vegetación puede usarse un análisis similar para detectar las zonas más afectadas.

También debe considerarse que un alto porcentaje del área analizada con la herramienta RPT resultó bajo la categoría de no observado (un 14,47%). Esto es consecuencia de la aplicación de los *Short Units*, debido a que cada vez que en cualquiera de ellos aparece una zona como no observada, esta permanece bajo esa clasificación en el conjunto que forma el Long Unit. Es decir, una vez que un píxel es clasificado como no observado en cualquiera de los periodos de entrenamiento de la herramienta RPT, el mismo también tendrá esta clasificación al hacer la unión de todos estos periodos, independientemente de si en otro le fue asignada una clasificación diferente.



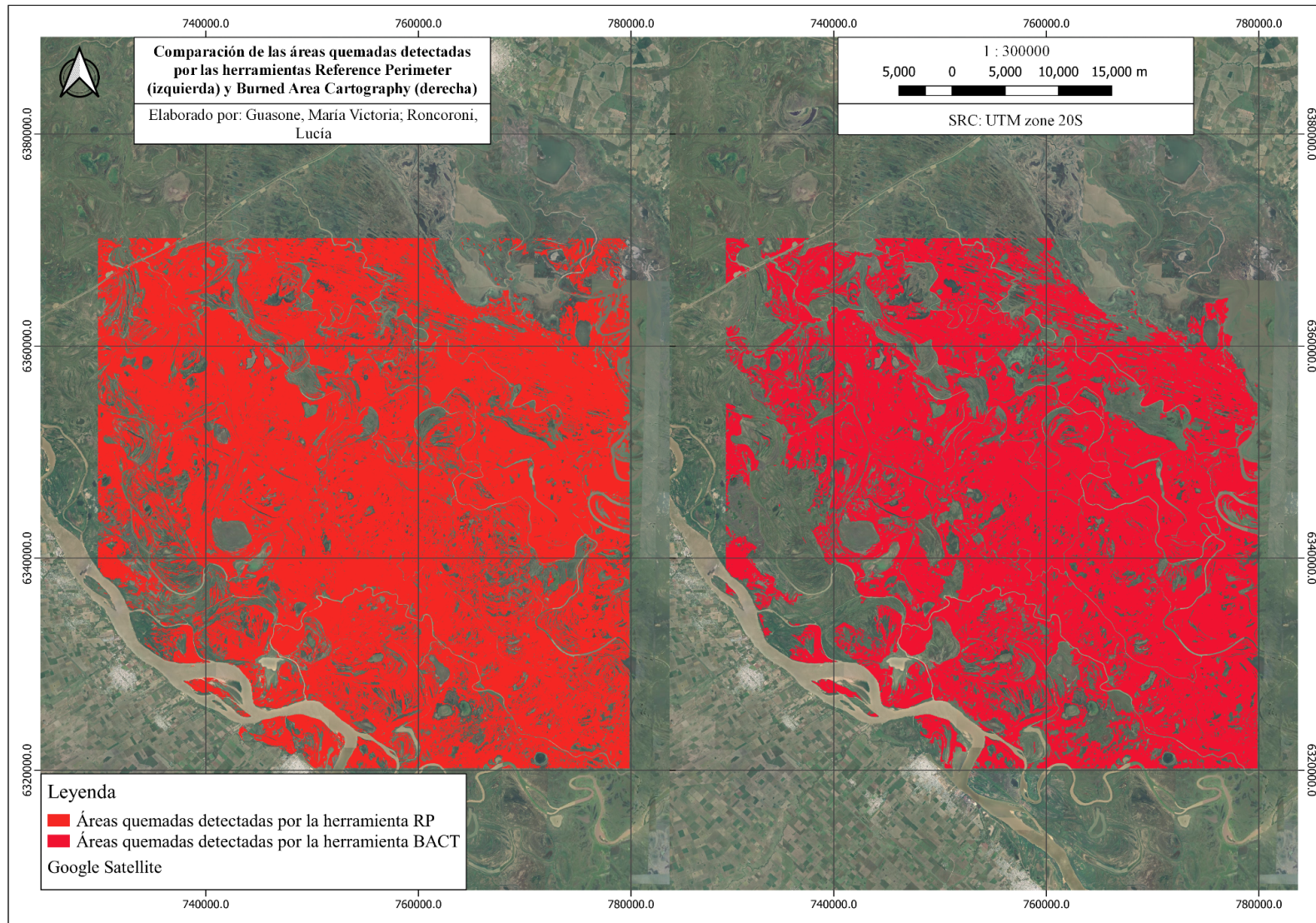


Figura 29: Mapa de comparación entre las áreas quemadas detectadas por la herramienta RPT y la herramienta BACT, entre las fechas 01/05/2020 y 22/12/2020. Puede verse que una pequeña porción de las áreas quemadas se muestran sobre zonas de agua en el mapa base. Esto se debe a que la imagen base proviene de la capa de Google Satellite disponible de forma gratuita, la cual no necesariamente refleja la desaparición de zonas de agua producto de la sequía.

## 8. Severidad de incendios

Además de elaborar cartografía de áreas quemadas, *Google Earth Engine* tiene un gran potencial para realizar análisis de severidad de incendios. Conocer este parámetro es importante porque permite evaluar con mayor precisión los daños forestales a causa de un incendio o advertir el grado de regeneración de la vegetación. Comúnmente se basa en el Índice de Diferencia Normalizada (dNBR) obtenido a partir de la diferencia de los valores de NBR (ver Sección 4.2) para una colección de imágenes pre-fuego y otra post-fuego.

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

Para efectuar este análisis, y siguiendo las mismas pautas que para la estimación de áreas quemadas, se utilizan imágenes pertenecientes a la colección Sentinel 2 y se trabaja con las bandas B8 y B12 teniendo en cuenta que este índice se vale de las bandas infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR-2) para resaltar áreas quemadas con distinto grado de daño. Si la diferencia entre NBR pre-fire y post-fire arroja un valor grande y positivo, la severidad es alta. Valores cercanos a cero indican que no se han producido cambios; y número negativos significan una recuperación de la vegetación. Es importante recordar, en este punto, que al hablar de recuperación de la vegetación no se refiere necesariamente a la regeneración del ejemplar preexistente, sino que se observa un reverdecimiento de algún tipo de cobertura vegetal que hace que los valores de reflectancia de la cobertura puedan confundirse con los de la vegetación original.

### 8.1 Análisis de severidad de los incendios

En este trabajo se calculó la severidad para dos áreas quemadas, de forma de mostrar la potencialidad de este análisis. La metodología propuesta para el análisis de severidad es la desarrollada por las Naciones Unidas, a través de la plataforma UN-SPIDER, en su práctica recomendada *Paso a Paso: Mapeo de la Severidad de Incendios Forestales en Google Earth Engine* (United Nations, 2020), ajustando los parámetros a nuestra área de interés. Tal y como se mencionó en el apartado anterior, la estimación de la severidad se basa en la diferencia en los valores del índice NBR entre imágenes obtenidas antes y después de ocurrido el incendio y se utiliza el siguiente *script*:

<https://code.earthengine.google.com/44f88f402f4e370f90bc38383e1ae494>

La clasificación en clases de severidad se basa en los rangos de dNBR ya definidos por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) (United Nations, *s.f.*), como se muestra en la Tabla 12, aunque introduciendo algunas modificaciones. El raster generado con los valores de dNBR se descarga como GeoTiff y se abre en QGIS para realizar una reclasificación de los píxeles en el SIG de escritorio y así obtener las categorías simplificadas:

- Alta severidad.
- Moderada severidad: a partir de reagrupar las clases ‘Alta-Moderada’ y ‘Baja-Moderada’.
- Baja severidad.
- No quemado.
- Rebrote: a partir de las clases ‘Alto crecimiento’ y ‘Bajo crecimiento’ de la vegetación. Esta nueva categorización se fundamenta en que, en función de los perímetros y periodos seleccionados, no es posible asegurar que la identificación de parches con ‘reverdecimiento’ implique una recuperación de la vegetación con cierta tasa de crecimiento luego de un evento de incendio particular, pudiendo tratarse, además, de áreas quemadas en periodos anteriores o responder a la variación de la superficie cubierta por lagunas y bañados (teniendo en cuenta la sequía histórica que atraviesa la región y la alta actividad ígnea durante todo el 2020).

TABLA 12: CATEGORÍAS USADAS PARA REALIZAR LA CLASIFICACIÓN DE SEVERIDAD.

Severidad			
Categorías	Rango dNBR USGS	Categoría	dNBR
Alto Crecimiento de la vegetación	-0.500 a -0.251	Rebrote	-0.500 a -0.101
Bajo Crecimiento de la vegetación	-0.250 a -0.101		
No quemado	-0.100 a 0.99	No quemado	-0.100 a 0.99
Baja severidad	0.100 a 0.269	Baja severidad	0.100 a 0.269
Moderada- Baja severidad	0.270 a 0.439	Moderada severidad	0.270 a 0.659
Moderada - Alta severidad	0.440 a 0.659		
Alta Severidad	0.660 a 1.300	Alta severidad	0.660 a 1.300

*Tabla adaptada a partir de los valores propuestos por el USGS*

Respecto a los parámetros que deben definirse para la secuencia de comandos de GEE que permitirá evaluar la severidad, se tiene:

- *Área*: región sobre la cual se realizará el análisis. Se optó por seleccionar una serie de perímetros entre el total de áreas quemadas resultante de aplicar las herramientas BAMTs en el territorio de PIECAS-DP. Estos perímetros son previamente modificados en QGIS a fin de definir polígonos simplificados, sin agujeros y con bordes suavizados que puedan importarse como capa shapefile a la plataforma. Como salvedad se menciona que en caso de evidenciarse cuerpos de agua dentro de las áreas, estos deben enmascarse ya que el índice NBR es sensible a este elemento. La selección de estos perímetros se argumenta en que: 1) tienen un tamaño considerable, atendiendo a que el procesamiento y la exportación de vectores de áreas quemadas desde GEE se da a nivel de píxel y que áreas muy minúsculas no permitirían el análisis; 2) se encuentran distribuidos en distintas zonas del Delta; 3) se pueden aproximar las fechas de inicio y fin de esos eventos de incendio y 4) para el presente trabajo, el procesamiento tanto en la nube como a cargo del usuario se optimiza y agiliza al trabajar con áreas no tan extensas.



- Intervalos de tiempo (*prefire\_start*, *prefire\_end*, *postfire\_start* y *postfire\_end*): para proceder con el análisis, se definen los dos periodos de tiempo a partir del cual se construirán los dos mosaicos de imágenes: un intervalo anterior del incendio (*Pre-fire*) y uno posterior al incendio (*Post-fire*). Se recomienda seleccionar un periodo temporal no demasiado corto, teniendo en cuenta que la resolución temporal de Sentinel 2 es de 5 días y se debe disponer de imágenes óptimas (sin nubosidad) para la estimación; adicionalmente, este periodo tampoco debe ser demasiado extenso a causa de los cambios y la evolución de las distintas coberturas luego de desaparecida la perturbación ambiental. Si se conocen las fechas de inicio y fin del incendio, mejor será el ajuste del periodo pre-fuego y post-fuego y más preciso resultará el análisis.
- *Platform* (plataforma de satélite empleada): Sentinel 2, en base al mismo criterio aplicado para los demás análisis efectuados en marco de este proyecto.

Una vez definidas las variables de entrada y corrido el *script*, se crean dos mosaicos de imágenes, uno por el periodo anterior al incendio y otro por el posterior, recortados sobre el área de estudio y se enmascaran las nubes. A continuación, se seleccionan las bandas B8 y B12 de cada conjunto de imágenes para calcular el NBR anterior y posterior al incendio (preNBR y postNBR). Para obtener las diferentes clases de severidad, se definen los umbrales de cada categoría y se realiza la clasificación de los valores de dNBR. Finalmente, se recuentan los píxeles que se incluyen en cada grupo y se les asigna etiquetas y parámetros de visualización.

Una vez obtenidos los píxeles agrupados en cada clase, se los exporta de GEE para una posterior reclasificación y vectorización en QGIS. De esta manera, se elaboran mapas con cuatro categorías de severidad: rebrote, no quemado, baja, moderada y alta. Si bien se incluye una categoría vinculada al crecimiento de vegetación, no se cuenta con información de campo que permita aportar información sobre la aparente recuperación de la vegetación y sus características.

Para el análisis, se seleccionaron incendios ocurridos durante los meses de agosto, septiembre y octubre. La elección de los perímetros quemados en determinados periodos se basa en: el seguimiento espacial de *hotspots* que, por su distribución espacio-temporal, pueden formar parte de la misma serie de eventos de incendios; la visualización de imágenes satelitales de Sentinel 2 en el portal *EO Browser - Sentinel Hub*<sup>14</sup>; y la información provista por la capa de área quemada obtenida a partir de la aplicación de las BAMTs.

### **Caso n°1: Zona del Delta Medio, área quemada durante los meses de septiembre y octubre del 2020.**

El perímetro se encuentra ubicado dentro del Delta Medio a la altura de la ciudad de San Nicolás (ver Figura 30). Se toman las fechas 01/09/2020 - 19/09/2020 como pre-fuego y 18/10/2020 - 02/11/2020 como post-fuego. Si bien es a mediados de julio cuando se identifican los primeros *hotspots*, en el límite superior del área delimitada, el evento de incendio estudiado se desarrolla en los

<sup>14</sup> <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>

meses de septiembre y octubre (Ver Figura 31) . De este modo, se incluyen los incendios que se desarrollaron entre el 19/09 y 18/10, fechas que coinciden con la detección y cese de los puntos calientes para los meses indicados respectivamente. Adicionalmente, el 18/10 es la fecha que la herramienta BACT computabiliza el área quemada. Finalmente, se garantiza que exista al menos una imagen Sentinel disponible sin cobertura nubosa para cada periodo.

A continuación se presenta la Tabla 13 con un resumen de las variables utilizadas:

TABLA 13: RESUMEN DE LAS VARIABLES DE LAS QUE DEPENDE EL ALGORITMO EMPLEADO EN EL ANÁLISIS DE SEVERIDAD Y VALORES ASIGNADOS.

<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Valor Asignado</b>
<i>prefire_start</i>	Inicio periodo pre- incendio	01/09/2020
<i>prefire_end</i>	Fin del periodo pre-incendio. Se toma como la fecha de inicio del incendio	19/09/2020
<i>postfire_start</i>	Inicio del periodo post- incendio. Se toma como la fecha de fin del incendio	18/10/20
<i>postfire_end</i>	Fin del periodo post-incendio.	02/11/20
<i>platform</i>	Plataforma de satélite a utilizar (Landsat 8 o Sentinel 2)	Sentinel 2 (S2)
<i>área</i>	Área de estudio sobre la cual se desea realizar el análisis de severidad	Extensión: -59.82,-33.40: -59.70,-33.24

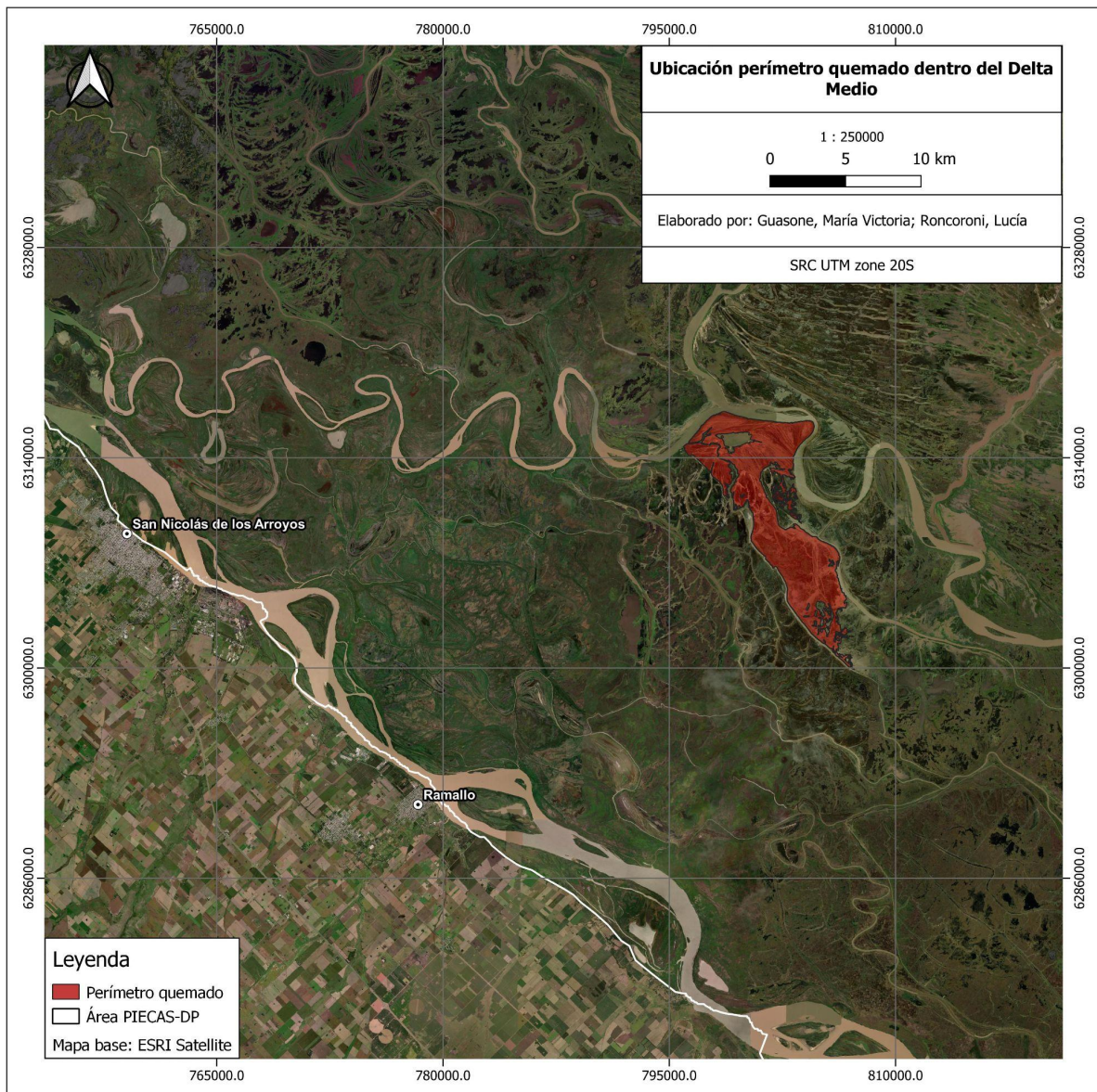


Figura 30: Mapa de ubicación del perímetro quemado en Delta Medio.



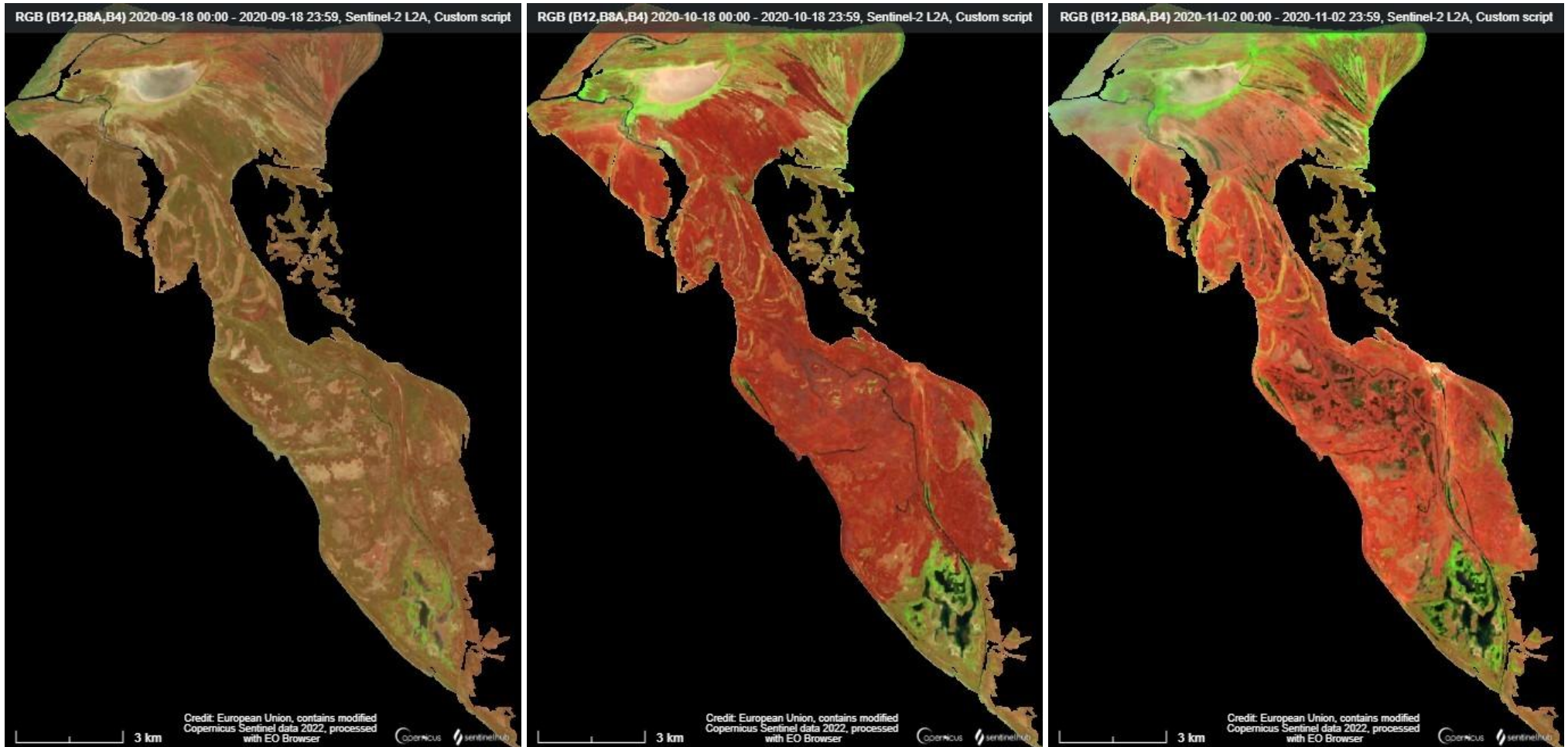


Figura 31: Serie de imágenes Sentinel 2 con combinación RGB de bandas B12,B8A,B4 que muestra la evolución del incendio. De izquierda a derecha: a- imagen correspondiente a una fecha anterior al inicio del incendio en el periodo pre-fuego; b- imagen de fin del incendio que da inicio al periodo post-fuego; c- imagen del último día del periodo post-fuego, mostrando la evolución del área luego de ocurrido el incendio, donde también puede observarse la subida del nivel del río por la aparición de lagunas (zonas oscuras) en la zona media de la imagen. Las imágenes se descargaron del portal Sentinel Hub - EO Browser.

**Caso n° 2: Zona del Delta Superior, frente a Puerto Gaboto, área quemada entre el 10 y el 17 de agosto del 2020.**

El perímetro se encuentra dentro del Delta Superior, a unos 12 km de la localidad de Puerto Gaboto, Santa Fe, sobre la margen izquierda del río Paraná (ver Figura 32). Para realizar el análisis, se seleccionó un perímetro de área quemada fechado el 08/09/2022. La elección se sustenta en información provista por los organismos oficiales, la capa de áreas quemadas obtenida de la herramienta BACT, y la visualización de imágenes satelitales de Sentinel 2 en el portal *EO Browser - Sentinel Hub*. Si bien presenta una fecha posterior, el polígono se quemó durante agosto del 2020 siendo fechado a principios de septiembre debido a la falta de imágenes para el mes de agosto que cumplan con los requisitos de cobertura nubosa para la extensa región del PIECAS-DP. No obstante, realizando un seguimiento de los *hotspots* puede observarse que la zona se quemó entre el 10 y 17 de agosto (Ver Figura 31), utilizándose este criterio para definir el inicio del periodo pre-fuego y post-fuego.

A continuación se presenta la Tabla 14 con un resumen de las variables utilizadas:

TABLA 14: RESUMEN DE LAS VARIABLES DE LAS QUE DEPENDE EL ALGORITMO EMPLEADO EN EL ANÁLISIS DE SEVERIDAD Y VALORES ASIGNADOS.

<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Valor Asignado</b>
<i>prefire_start</i>	Inicio periodo pre- incendio	30/07/2020
<i>prefire_end</i>	Fin del periodo pre-incendio. Se toma como la fecha de inicio del incendio	10/08/2020
<i>postfire_start</i>	Inicio del periodo post- incendio. Se toma como la fecha de fin del incendio	18/08/2020
<i>postfire_end</i>	Fin del periodo post-incendio.	25/08/2020
<i>platform</i>	Plataforma de satélite a utilizar (Landsat 8 o Sentinel 2)	Sentinel 2 (S2)
<i>area</i>	Área de estudio sobre la cual se desea realizar el análisis de severidad	Extensión de la capa: -60.71,-32.42 : -60.65,-32.34

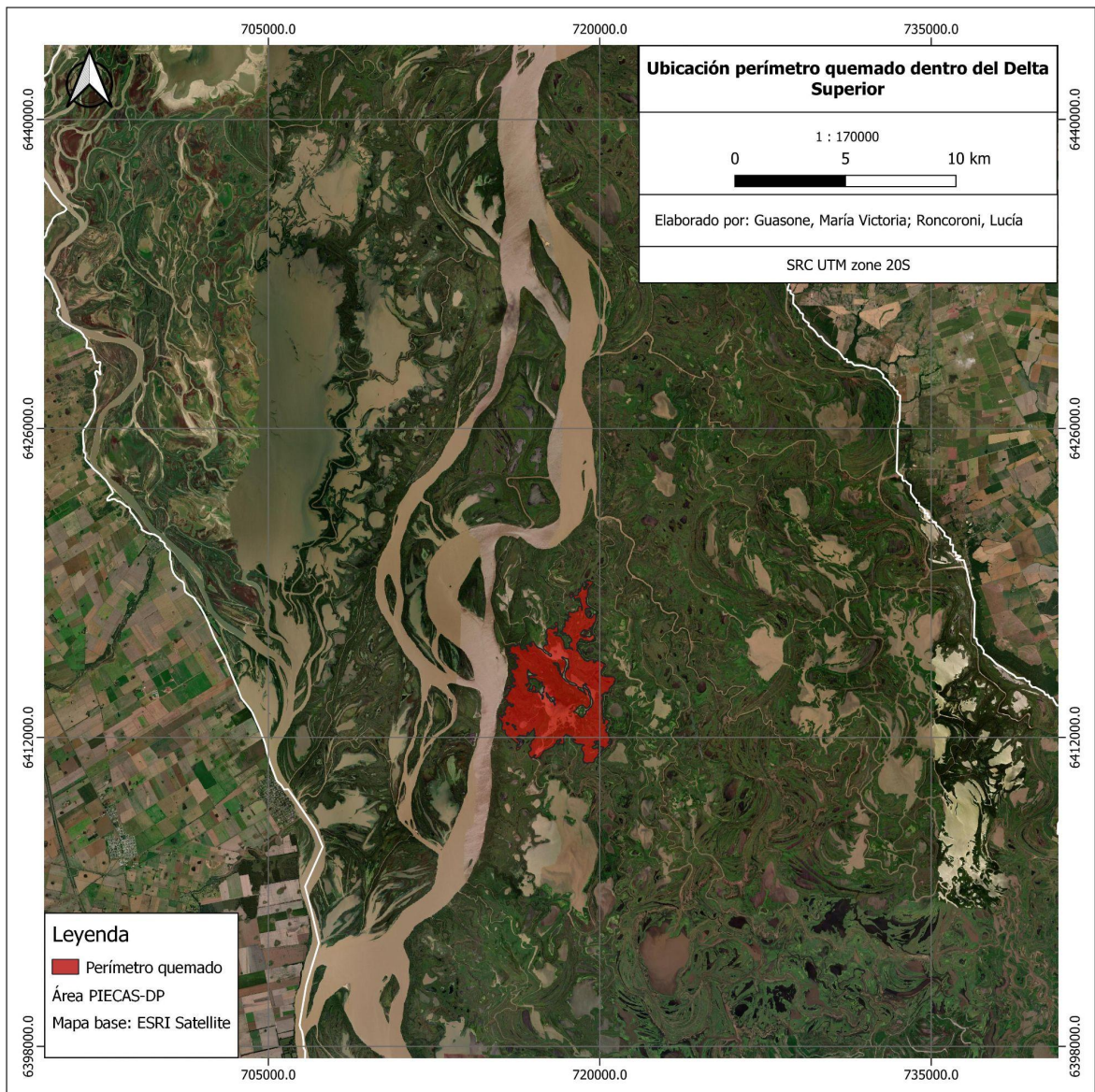


Figura 32: Mapa ubicación del perímetro quemado en Delta Superior.



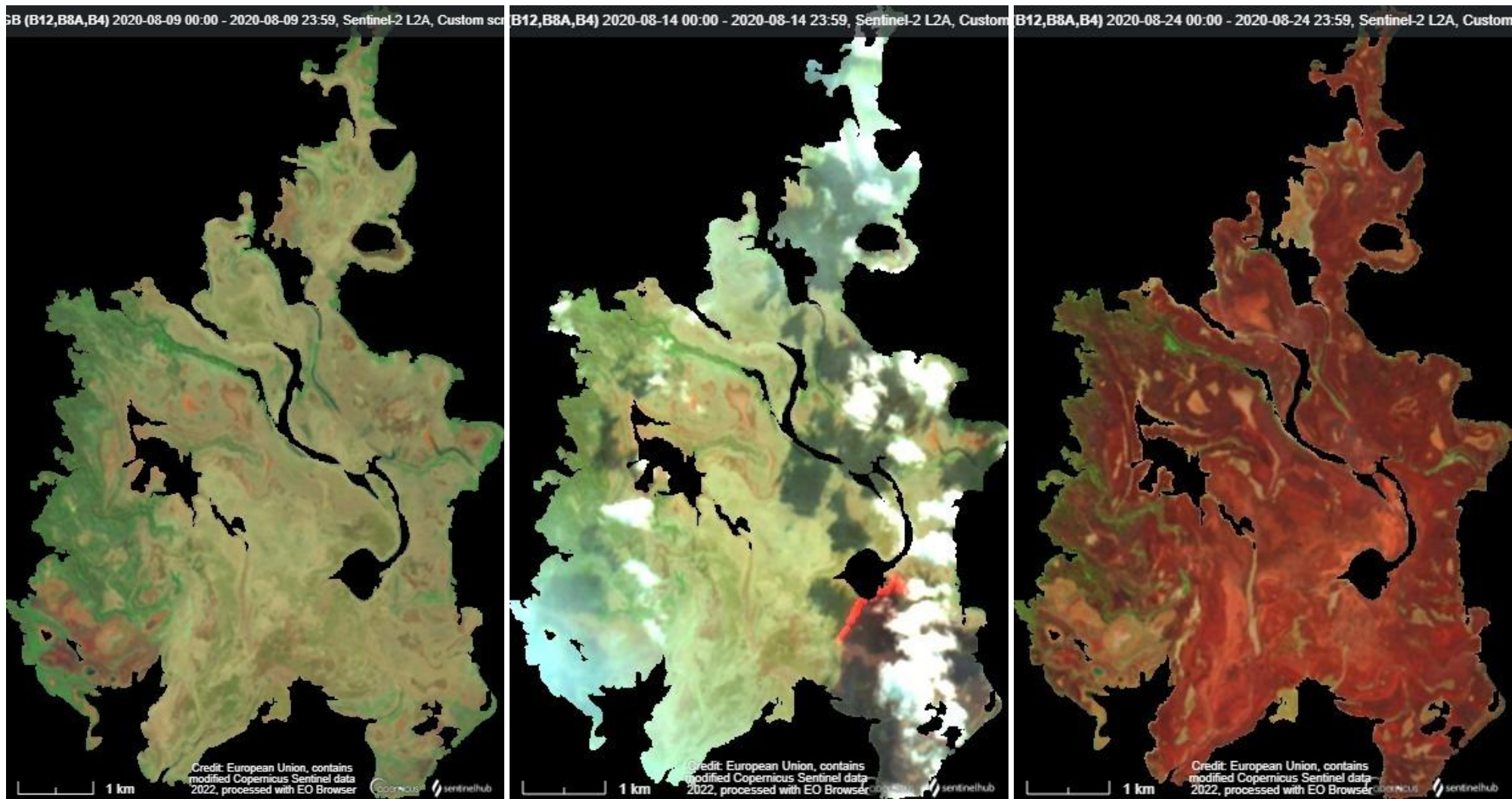


Figura 33: Serie de imágenes Sentinel 2 con combinación RGB de bandas B12,B8A,B4 que muestra la evolución del incendio. De izquierda a derecha: a- imagen correspondiente a una fecha anterior al inicio del incendio en el periodo pre-fuego; b imagen durante el avance del fuego con cobertura nubosa; c- imagen del periodo post-fuego. Las imágenes se descargaron del portal Sentinel Hub - EO Browser.

## 8.2 Resultados del análisis de severidad de los incendios

Los porcentajes de severidad obtenidos se presentan en las Tablas 15 y 16, y en las Figuras 32 y 33.

TABLA 15 : PORCENTAJE DE ÁREAS PARA CADA NIVEL DE SEVERIDAD PARA CASO N°1.

	Severidad 1° Caso				
<b>Fecha</b>	<i>prefire_start</i> = '2020-09-01'; <i>prefire_end</i> = '2020-09-19'		<i>postfire_start</i> = '2020-10-18'; <i>postfire_end</i> = '2020-11-02'		
<b>dNBR</b>	Alta	Moderada	Baja	No quemada	Rebrote
<b>Porcentaje</b>	<1	13,26	36,08	<b>32,17</b>	<b>18,48</b>
<b>Área quemada (ha)</b>	<1	927,72	2.523.87	<b>2.250,27</b>	<b>392,58</b>
<b>Superficie (ha)</b>	6.094,4				

Luego de efectuar el primer análisis, se concluye que un 13% del área se quema con una intensidad moderada y un 36% con intensidad baja. Por su parte, el porcentaje correspondiente a la clase 'alta severidad' es menor al 1%.

Si bien el área delimitada para el análisis se corresponde con un polígono de área quemada exportado de GEE fechado en octubre, obtenido de aplicar las BAMTs para el total del territorio del PIECAS-DP, el porcentaje detectado como no quemado es del 32% y un 18% corresponde a zonas con crecimiento de vegetación. Esto puede deberse a que la herramienta BACT se corre inicialmente para un periodo más extenso (desde mayo a diciembre del 2020), observándose que varias zonas se queman más de una vez a lo largo del año. Los perímetros quemados se distinguen con una única fecha de adquisición de imágenes por el barrido de Sentinel 2 sobre el área de interés, siendo esta fecha la moda de todos los píxeles que integran dicho polígono; es decir, se le asigna la fecha en la que se quemaron un mayor número de píxeles. Las regiones dentro del polígono que muestran un reverdecimiento se quemaron en periodos anteriores y durante los meses siguientes creció la vegetación. Esto condice con la identificación de *hotspots*, por ejemplo, en el límite noreste del perímetro durante el mes de julio. También, se visualiza en las imágenes de combinación RGB de bandas 12, 8A, 4 de Sentinel 2 de la Figura 30. No obstante, una mayor precisión en el análisis resultaría de corroborar la información geoespacial con datos de campo.

Asimismo, la zona sur del perímetro aparece como no quemada y con regeneración de la vegetación, lo cual es resultado de un error de comisión en la definición del parche de área quemada al aplicar la herramienta BACT. Haciendo un seguimiento de la evolución de la actividad ígnea, puede



observarse que esa zona nunca se quemó, pero sí presentaba características de suelo seco que se recuperó con la creciente del río, explicando el reverdecimiento de la zona.

Por último, al analizar los porcentajes correspondientes a cada categoría, puede concluirse que se observa un recuperación del ecosistema afectado luego del incendio. Esta evolución está condicionada por la disponibilidad del recurso hídrico en la zona y del tipo de cobertura que se quema, siendo los pajonales tipos de vegetación del humedal que se recuperan rápidamente, pero requiriendo conocer con más precisión la distribución espacial de las distintas especies vegetales para evaluar el grado de pérdida de biomasa y definir las tareas de restauración, que deben contemplar tanto las características naturales, que dará lugar a una regeneración natural, como los distintos usos de suelo que tienen lugar en la región del Delta Paraná.

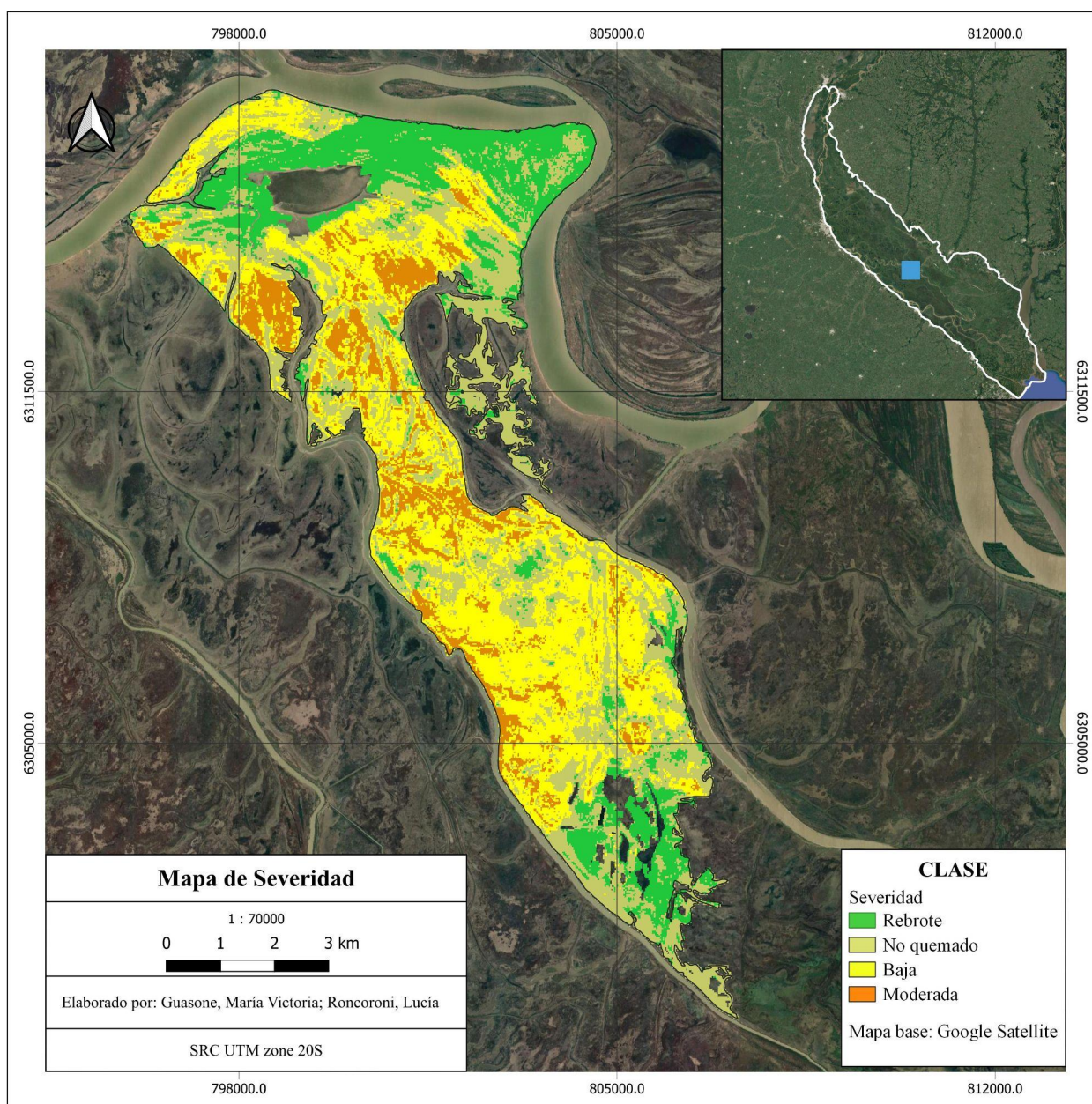


Figura 32: Mapa de severidad de incendios en el Delta Medio para los meses de septiembre y octubre en perímetro quemado.

TABLA 16 : PORCENTAJE DE ÁREAS PARA CADA NIVEL DE SEVERIDAD PARA CASO N°2.

	<b>Severidad 2° Caso</b>				
<b>Fecha</b>	<i>prefire_start</i> = '2020-07-30'; <i>prefire_end</i> = '2020-08-10'		<i>postfire_start</i> = '2020-08-18'; <i>postfire_end</i> = '2020-08-25'		
<b>dNBR</b>	Alta	Moderada	Baja	No quemada	Rebrote
<b>Porcentaje</b>	<1	<b>67,65</b>	28,8	9,33	-
<b>Área quemada (ha)</b>	5,31	<b>1.658,52</b>	558,9	228,78	-
<b>Superficie (ha)</b>	2.451,51				

Luego de efectuar el segundo análisis, se concluye que para mediados de agosto en la zona de interés un 67% del área se quema con una intensidad moderada y un 28% con intensidad baja. Por su parte, el porcentaje correspondiente a la clase ‘alta severidad’ ,al igual que el caso anterior, es menor al 1%. Los valores de severidad moderada y baja, así como el bajo porcentaje correspondiente a severidad alta, pueden ser indicativos de presencia de cobertura remanente luego del incendio; debiéndose ajustar los umbrales del índice NBR para las distintas coberturas del área de estudio, ya que se advierte en este análisis que los valores de píxeles agrupados en cada categoría están muy próximos entre sí.

Respecto a los píxeles clasificados como ‘no quemados’, estos se distribuyen como parches dentro del perímetro quemado trabajado, pudiendo tratarse de:

- Zonas quemadas en periodos anteriores, como es el caso del parche ubicado en el límite inferior, el cual se quemó en el mes julio.
- Errores de comisión durante la clasificación de píxeles quemados al aplicar la herramienta BACT, a partir de la cual se obtuvo la capa vectorial de áreas quemadas.



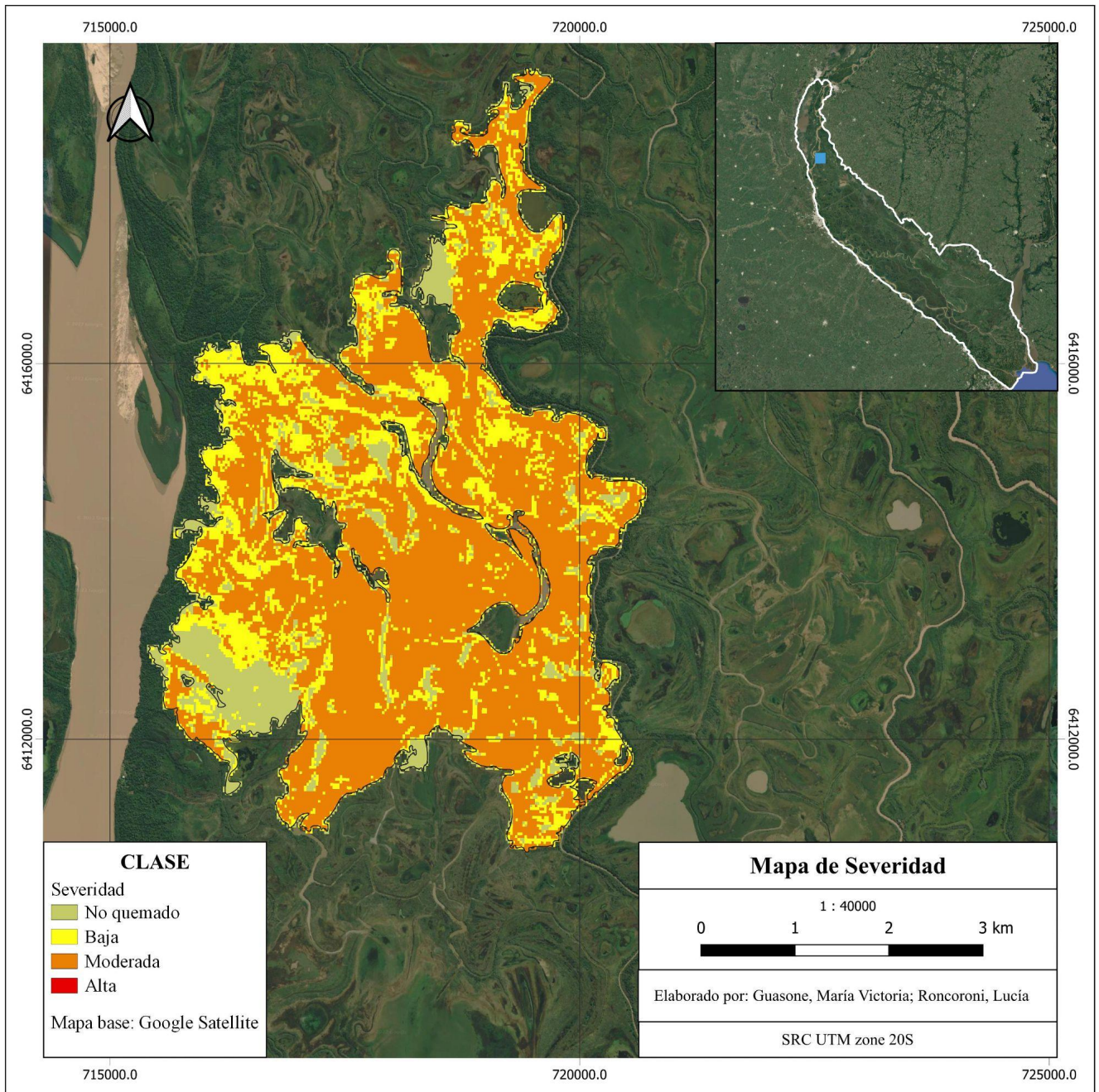


Figura 33: Mapa de severidad de incendios para zona del Delta Superior para el mes de agosto en el perímetro quemado.

## 9. Conclusiones y perspectivas

De acuerdo con una visión general de las ventajas y limitaciones de la aplicación de técnicas y herramientas de teledetección que se desarrollaron en el presente trabajo, consideramos que el acceso a imágenes y datos geospaciales históricos, y de forma continuada, es una oportunidad para aumentar la comprensión del Delta y las problemáticas ambientales que allí acontecen.

Particularmente el empleo de herramientas de teledetección ha contribuido de forma considerable al estudio de incendios forestales, siendo estos cada vez más frecuentes en nuestro país. En la etapa post-fuego, la cartografía de áreas quemadas y el análisis de severidad permiten evaluar los daños ocasionados por los incendios y definir estrategias de restauración de los ecosistemas afectados. Plataformas basadas en la nube ofrecen una amplia ventaja en términos de acceso a cientos de catálogos de información geoespacial y series históricas, sin necesidad de su descarga, y capacidad de procesamiento de grandes volúmenes de datos. En este sentido, *Google Earth Engine* (GEE) posibilita la implementación de herramientas como las *Burned Area Mapping Tools*, cuyo algoritmo se fue ajustando y mejorando en los últimos años. Las BAMTs recopilan los índices más utilizados para el estudio de incendios, que advierten los cambios en el comportamiento espectral de las distintas coberturas luego de ocurrido un evento, y, con la supervisión del usuario, discriminan parches de áreas quemadas. Adicionalmente, GEE tiene potencial para realizar estudios de severidad permitiendo comparar en la nube índices NBR de un conjunto de imágenes pre y post fuego. Todos los resultados obtenidos, tanto en formato ráster como vectorial, pueden ser exportados desde la plataforma y trabajados secundariamente en softwares SIG de escritorio. QGIS, como programa de código abierto y con una interfaz sencilla, permite crear fácilmente composiciones de mapas y así obtener la cartografía de áreas quemadas buscada.

Dentro de las limitaciones, la falta de datos de campo en un momento próximo a concluido el evento de incendio, dificulta la validación de las herramientas aplicadas. Adicionalmente, son escasos y restringidos los estudios de los humedales del Delta que permitan disponer de información actualizada sobre los cambios de uso de suelo y procesos de transformación que sufrió el ecosistema, para la selección de las metodologías más idóneas y el apoyo en la toma de decisiones y definición de políticas que se alineen con los objetivos perseguidos por el PIECAS-DP.

A partir del uso de las herramientas BAMTs se determinó que, dentro de la zona delimitada por el Plan Integral Estratégico para la Conservación y Aprovechamiento Sostenible en el Delta del Paraná (PIECAS-DP) entre los días 01/05/2020 y 22/12/2020, se quemó un área de 452.693 ha. Esto equivale al 21,50% del área definida por el PIECAS-DP. La mayor parte de las zonas quemadas detectadas coinciden con la porción media del Delta del Paraná, mientras que una menor proporción se encuentra en el Delta Superior. Al sur del área de estudio, en el Delta Inferior, la cantidad de zonas quemadas detectadas resulta ser notablemente menor. Estos hallazgos coinciden con los *hotspots* detectados por el satélite S-NPP entre esas mismas fechas.

Respecto al estudio de severidad, en las zonas definidas para el Delta Medio y Superior, la severidad en las áreas quemadas fue principalmente moderada y baja en los ejemplos analizados, observando una recuperación temprana de la vegetación luego de ocurrido el incendio, lo que sustenta la disponibilidad de biomasa como combustible para la quema continua a lo largo del año. No obstante, esta información no es suficiente para definir estrategias de recomposición del ecosistema, debiéndose, de forma complementaria, precisar las coberturas vegetales disponibles en función de las características hidrometeorológicas reinantes.

De la experiencia de realizar estos análisis se desprenden una serie de recomendaciones y consideraciones para otros usuarios que deseen aplicar las BAMTs y el índice dNBR en la zona del Delta del Paraná, las cuales se exponen a continuación:

- Las BAMTs como método de detección de áreas quemadas sólo puede utilizarse en casos en los que resulte aceptable una incertidumbre alta (alrededor del 30%), como es esperable de un método que no depende de datos de validación obtenidos en campo. Estos valores siempre están referidos a la validación mediante la herramienta RPT, y pueden variar de acuerdo a la experiencia del analista.
- Se recomienda usar, para la herramienta BACT, un periodo de estudio más corto, para evitar errores asociados a la recuperación y subsecuente quema reiterada de la vegetación. Asociado a esta observación, usar un periodo de estudio más largo implica no saber si hubo zonas que fueron afectadas por los incendios en más de una oportunidad, como asimismo no poder distinguir con precisión las fechas en las que las distintas zonas se quemaron. Debido a que el algoritmo agrupa los píxeles quemados contiguos en un único polígono, debe asignarle al conjunto una única fecha quemada (la moda de todos los píxeles de ese polígono), por lo que esta fecha será la única que se conozca.
- Los resultados obtenidos a partir del uso de las herramientas BAMTs van a variar ampliamente de acuerdo al grado de experiencia y entendimiento de la zona de la persona que entrene al algoritmo para la subsiguiente clasificación supervisada.
- Las BAMTs tienen la ventaja, sobre la detección visual de áreas quemadas, de llevar a cabo la clasificación píxel a píxel, tarea imposible de realizar de forma manual.
- Los resultados de la herramienta RPT también presentan errores, los cuales están asociados a la habilidad de la persona que entrene el algoritmo, por lo que incluso si hubiera una coincidencia del 100% entre los resultados de esta herramienta y la de BACT cabría la posibilidad de que los mismos no fueran del todo confiables. Por tal motivo, es aconsejable que la persona que realiza el entrenamiento del BACT fuera diferente de quien entrena el RPT, para asegurar que no haya un error sistemático en ese aspecto.



- Incluso tomando las consideraciones mencionadas en el punto anterior, resulta ideal e irremplazable en su calidad la toma de datos en campo para la validación de los resultados obtenidos.
- Si bien el algoritmo de las herramientas BACT y de la herramienta RPT permite visualizar en la imagen *difference* generada, además de zonas quemadas, zonas donde hay una recuperación de la vegetación, esto no debe interpretarse como un regreso de la vegetación original. Las limitaciones del algoritmo llevan a que se pueda detectar la presencia de vegetación más sana o de mayor densidad en el periodo post-fuego (interpretado como una recuperación de la vegetación), pero eso no necesariamente implica que se haya recuperado la vegetación original o nativa.
- Para evaluar el grado de afectación de un evento puntual, a partir de un análisis de severidad que utiliza el índice NBR, es indispensable precisar las fechas de inicio y fin del incendio. Si se quiere estudiar la regeneración del ecosistema y el proceso de recuperación del suelo y de las distintas coberturas, se puede prolongar el periodo de análisis, teniendo en cuenta que tanto la dinámica natural como otras perturbaciones influyen en este proceso.
- El índice NBR es sensible a los cambios de cobertura, pudiendo dificultar la diferenciación entre áreas no quemadas y quemadas con baja severidad. También es sensible al agua, siendo necesario enmascarar los cuerpos de agua previo al análisis. A causa de la situación de estrés hídrico que atraviesa la región, no se evidencia en este aspecto una limitación de la aplicación de este índice. No obstante, deberá re-evaluarse su aplicabilidad bajo un régimen hidrológico normal y cuando el Río Paraná recupere su nivel.
- La falta de validación de índices en estudios de severidad en el ecosistema del humedal, al igual que mapas actualizados de coberturas vegetales, limita el análisis de severidad, al no poder precisar el tipo de biomasa consumida y establecer relaciones entre clase de severidad y tipo de vegetación; de la misma forma, son indispensables estudios complementarios para elaborar propuestas de restauración.

A partir de la realización de este Proyecto Final de carrera se logró, dentro de la Facultad de Química e Ingeniería del Rosario, una primera experiencia en la aplicación de herramientas de teledetección para la detección de áreas quemadas y estudio de severidad de incendios dentro del PIECAS-DP, contribuyendo al estudio de una problemática ambiental sumamente relevante y vigente en la región. Tanto los estudios de severidad como las estimaciones de área quemada, sirven para evaluar la extensión y el grado de afectación de un ecosistema a causa de los incendios forestales, y así disponer de información para definir políticas, acciones y estrategias para su prevención, combate y recomposición de las zonas quemadas.

De esta práctica, han surgido una serie de recomendaciones y comentarios de utilidad para investigaciones posteriores que apliquen las metodologías descritas y utilicen las BAMTs e índices espectrales para evaluar el impacto de los incendios dentro de Delta, remarcando la necesidad de validar estas herramientas y métodos con datos de campo y consolidar las bases de datos espaciales disponibles para la zona. También, se han logrado identificar algunas limitaciones relacionadas a la aplicación de las BAMTs en esta área de estudio.

La ecorregión Delta e Islas del Paraná acoge a un sistema de humedales que brinda un sinfín de servicios ecosistémicos, pero esta capacidad se ve cada vez más afectada a causa de la intervención humana, al introducirse actividades de cambio de uso de suelo y configuración del paisaje, que son compatibles con el desarrollo de eventos de incendios que implican una pérdida de biodiversidad. Las herramientas de teledetección tienen un gran potencial para el estudio de estos ambientes al permitir acceder a series de datos de amplio alcance territorial y temporal que pueden ser procesados, analizados y exportados de acuerdo con las necesidades del usuario y del proyecto específico.

Por último, esperamos que este documento sea un punto de partida para otras líneas de trabajo que profundicen y avancen en la construcción del conocimiento en torno a esta temática, sea en la zona del PIECAS-DP o en otras partes de la región o el país.

## Bibliografía

Agencia Espacial Europea. (s.f.). *Aplicaciones*. Recuperado el 24 de Agosto de 2021, de Las Misiones de Sentinel:

[https://www.esa.int/Applications/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/The\\_Sentinel\\_missions](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/The_Sentinel_missions)

Arellano, S., Vega, J. A., Rodríguez y Silva, F., Fernández, C., Vega-Nieva, D., Álvarez-González, J. G., & Ruiz-González, A. D. (2017). *Validación de los índices de teledetección dNBR y RdNBR para determinar la severidad del fuego en el incendio forestal de Oia-O Rosal (Pontevedra) en 2013*. *Revista de Teledetección*, 49. Pp.: 49-61. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.4995/raet.2017.7137>

Argañaraz, J. P. (2016). *Dinámica espacial del fuego en las Sierras de Córdoba*. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas. Instituto de Diversidad y Ecología Animal (CONICET - UNC), Córdoba.

Bastarrika, A., Alvarado, M., Artano, K., Martínez, M., Mesanza, A., Torre, L., . . . Chuvieco, E. (9 de diciembre de 2014). *BAMS: A Tool for Supervised Burned Area Mapping Using Landsat Data*. Recuperado el 1 de abril de 2022, de: <https://www.mdpi.com/2072-4292/6/12/12360/htm>

Bassati, R., Isarría, A., Belfer, L., Larrán, G., Grimoldi, F., & Rodríguez Paz, J. M. (2014). *Plan Integral Estratégico para la Conservación y el Aprovechamiento Sostenible de la Región del Delta del Paraná*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina. Pp.: 6-14.

Blanco, D. E., & Méndez, F. M. (Eds.). (2010). *Endicamientos y terraplenes en el Delta del Paraná: Situación, efectos ambientales y marco jurídico* (1.a ed.). Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales/Wetlands International. Buenos Aires, Argentina.

Baumann, E., Acosta, C., Paccotti, V., & Vázquez, M. (2021). *Cuaderno de Educación Ambiental: Rosario y sus Humedales* (2da Edición digital ed.). Rosario, Santa Fe, Argentina: Secretaría de Ambiente y Espacio Público de Rosario. Pp.: 55-57. 62-65. Recuperado el 22 de junio de 2021, de: [https://www.rosario.gob.ar/web/sites/default/files/manual\\_humedales\\_rosario\\_2020.pdf](https://www.rosario.gob.ar/web/sites/default/files/manual_humedales_rosario_2020.pdf).

Benzaquen, L., D.E. Blanco, R. Bo, P. Kandus, G. Lingua, P. Minotti y R. Quintana (editores) (2017). *Regiones de Humedales de la Argentina*. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Fundación Humedales/Wetlands International, Universidad Nacional de San Martín y Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. Pp.: 21 - 22.

Brown, J. K., & Smith, J. K. (2000). *Wildland Fire in Ecosystems: Effects of fire in flora* (Vols. General Technical Report RMRS-GTR-42- volume 2). Ogden, Utah, USA: Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Campo Parra-Lara, Á., & Bernal-Toro, F. H. (2010). Incendios de cobertura vegetal y biodiversidad: una mirada a los impactos y efectos ecológicos potenciales sobre la diversidad vegetal. *El Hombre y la Máquina*, (35), 67-81. ISSN: 0121-0777. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47817140008>

Casillo, J., di Giacomo, A. G., & Marino, G. D. (2013). *Quemas controladas en pastizales Una herramienta para el manejo de pastizales con fines productivos y conservacionistas*. Fundación Vida Silvestre Aves Argentinas. Recuperado de: [https://www.produccion-animal.com.ar/produccion\\_y\\_manejo\\_pasturas/uso\\_del\\_fuego/28-Quemas\\_controladas\\_en\\_pastizales.pdf](https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/uso_del_fuego/28-Quemas_controladas_en_pastizales.pdf)

Castro Sardiña, L. S., García, P. E., & Menendez, Á. N. (2010). *Base de datos Georeferenciada del Delta de Paraná*. Ezeiza, Buenos Aires, Argentina: Programa de Hidráulica Computacional, Laboratorio de Hidráulica, Instituto Nacional del Agua (INA).

Chuvieco, E. (1992). *Teledetección, SIG y Cambio Global*. *Geographicalia*, vol. 29. Pp.:33-55.

Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (segunda ed.). Madrid: Rialp S.A. ISBN 84-321-2680-2

Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental: La Observación de la Tierra Desde el Espacio*. Barcelona: Ariel Ciencia Series. ISBN: 84-344-8047-6

Chuvieco, E., & Martín Isabel, M. (2004). *Nuevas tecnologías para la estimación del riesgo de incendios forestales*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Recuperado el 15 de octubre, de: <https://elibro.net/ereader/sibuca/41573>

CONAE. (s.f.). *Programa 2Mp: Guía de Interpretación Visual de Imágenes Satelitales*. Recuperado de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia\\_de\\_interpretacion\\_visual\\_de\\_imagenes\\_satelitales.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/guia_de_interpretacion_visual_de_imagenes_satelitales.pdf)

Davies, D. K., Ilavajhala, S., Wong M. M., & Justice, C.O. (2009). Fire Information for Resource Management System: Archiving and Distributing MODIS Active Fire Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47 (1), 72-79. doi: 10.1109/TGRS.2008.2002076

Dentoni, M., & Muñoz, M. M. (2012). *Informe Técnico N° 1. Sistemas de Evaluación de Peligro de Incendios*. Esquel, Chubut, Argentina: Plan Nacional de Manejo del Fuego. Programa Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios y Alerta Temprana. ISSN 2313-9420

Di Leo, N., Conti, N., Longo, M., & Welschen, A. (s.f.). *Estimación de la severidad de incendios en el Alto Delta del Paraná según diferencias relativas del índice espectral NBR*. Teledetección Aplicada y Sistemas de Información Geográfica; Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Rosario. Recuperado 5 de enero de 2022, de <https://m.unr.edu.ar/descargar.php?id=20205>

Díaz, E. (07 de julio de 2020). *La UNER estudia la relación entre la bajante del Río Paraná y los incendios en el Delta*. (APFDigital, Entrevistador) Recuperado el 3 de agosto de 2021, de: [http://www.apfdigital.com.ar/despachos.asp?cod\\_des=358578&ID\\_Seccion=1&fecemi=06/07/2021&Titular=la-uner-estudia-la-relacioacuten-entre-la-bajante-del-riacuteo-paranaacute-y-los-incendios-en-el-delta.html](http://www.apfdigital.com.ar/despachos.asp?cod_des=358578&ID_Seccion=1&fecemi=06/07/2021&Titular=la-uner-estudia-la-relacioacuten-entre-la-bajante-del-riacuteo-paranaacute-y-los-incendios-en-el-delta.html).

Earth Engine Data Catalog. (s.f.). *FireCCI51: MODIS Fire\_cci Burned Area Pixel Product, Version 5.1*. Recuperado el 23 de marzo de 2022, de: [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ESA\\_CCI\\_FireCCI\\_5\\_1](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ESA_CCI_FireCCI_5_1)

Franquesa, M., Vanderhoof, M. K., Stavrakoudis, D., Gitas, I. Z., Roteta, E., Padilla, M., & Chuvieco, E. (8 de diciembre de 2020). Development of a standard database of reference sites for validating global burned area products. *Earth System Science Data*, 12, 3229–3246, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3229-2020>

Fundación Ambiente y Recursos Naturales (FARN). (Diciembre de 2020 ). *Argentina Incendiada. Lo que el fuego nos dejó*. Recuperado el 27 de marzo de 2022, de: [https://farn.org.ar/wp-content/uploads/2020/12/DOC\\_ARGENTINA-INCENDIADA\\_links.pdf](https://farn.org.ar/wp-content/uploads/2020/12/DOC_ARGENTINA-INCENDIADA_links.pdf)

Gajardo, J., Mena, C., Ormazábal, Y., & Morales, Y. (Octubre de 2010). *Cartografía local de áreas quemadas empleando teledetección*. Centro de Geomática. Universidad de Talca. Recuperado el 19 de mayo de 2022, de: [https://www.researchgate.net/publication/229031782\\_Cartografia\\_local\\_de\\_areas\\_quemadas\\_empleando\\_teledeteccion](https://www.researchgate.net/publication/229031782_Cartografia_local_de_areas_quemadas_empleando_teledeteccion)

Ghandi, U. (29 de noviembre de 2020). *Introduction to Google Earth Engine (End-to-End Google Earth Engine)*. Recuperado el 01 de 03 de 2022, de: <https://www.youtube.com/watch?v=kpfncBHZBto>

Giglio, L., Schroeder, W., & Justice, C. O. (2016). The collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire products. *Remote Sensing of Environment*, 178, 31-41. Recuperado el 10 de mayo de 2022, de: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0034425716300827?token=0160F450EA7194483EC8A5E3B58E3E360B3F909081AF79A985EE2CFCE547F0EEAC89FD083F9A141FAF6D5353CA323D5A&originRegion=us-east-1&originCreation=20220727234418>



Gómez Nieto, I., & Martín Isabel, M. P. (2008). *Estudio Comparativo de Índices Espectrales para la Cartografía de Áreas Quemadas con Imágenes MODIS*. (Asociación Española de Teledetección, Ed.) *Revista de Teledetección* 29. Pp.: 15-24. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10261/157342>

Google. (27 de mayo de 2021). *Google Earth Engine Developers Guide*. Recuperado el 20 de agosto de 2021, de Unsupervised Classification (clustering): <https://developers.google.com/earth-engine/guides/clustering>.

Global Observations of Forest Cover and Land-use Dynamics. (s.f.). *Welcome to GOFCC-GOLD*. Recuperado el 16 de Noviembre de 2021, de: <https://gofccgold.umd.edu/>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2019). Resumen para responsables de políticas. *El cambio climático y la tierra: Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas*. (P. R. Shukla, J. Skea, E. C. Buendía, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. Roberts, . . . J. Malley, Edits.) Recuperado el 2 de febrero de 2022, de: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL\\_SPM\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf)

IDERA. (2022). *Geoservicios*. Recuperado el 15 de julio de 2022, de: [https://www.idera.gob.ar/index.php?option=com\\_content&view=article&id=335:geoservicios&catid=33:services&Itemid=302](https://www.idera.gob.ar/index.php?option=com_content&view=article&id=335:geoservicios&catid=33:services&Itemid=302)

Instituto Geográfico Nacional- Gobierno de España. (7 de septiembre de 2018). *Plan Nacional de Teledetección*. Recuperado el 8 de Agosto de 2021, de Misiones Sentinel (Copernicus): <https://pnt.ign.es/misiones-sentinel-copernicus>

INTA - Centro Regional La Pampa - San Luis (2020). *Herramientas satelitales para la detección y monitoreo de incendios*. SIG y Teledetección. Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=zs5xVpVnRCQ>

Jaksic, F. M., & Fariña, J. M. (2015). Incendios, sucesión y restauración ecológica en contexto. *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, 43(1), 23-24. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2015000100003>

Jaureguiberry, P., & Díaz, S. M. (9 - 13 de Septiembre de 2019). *Avances metodológicos en ecología de fuego y su importancia para estudios comparativos*. XXVII Jornadas Argentinas de Botánica - Rol Ecológico y evolutivo del fuego sobre los ecosistemas argentinos, 54, 47. Recuperado el 20 de febrero de 2022, de: <https://botanicaargentina.org.ar/wp-content/uploads/2019/09/Jornadas-Argentinas->

Jiménez, M. R. (s.f.). *Emisiones de gases y productos de los Incendios Forestales en Cuba entre 1989-1999*. Centro de Contaminación y Química Atmosférica. I. Meteorología. CITMA.

Junk, W. J., An, S., Finlayson, C. M., Gopal, B., Kvet, J., Mitchell, S. A., Mitsch, W. J., & Robarts, R. D. (2013). *Current state of knowledge regarding the world 's wetlands and their future under global climate change: a synthesis*. Aquatic Sciences. Pp.: 151–167.

Kandus, P., Minotti, P., & Borro, M. (2011). *Contribuciones al conocimiento de los humedales del Delta del Río Paraná. Herramientas para la evaluación de la sustentabilidad ambiental*. San Martín: Universidad Nacional de San Martín. Recuperado el 7 de febrero de 2022, de: <http://www.unsam.edu.ar/institutos/3ia/libros/LibroLETyE.pdf>

Kandus, P. & Minotti, P. (2018). *Propuesta de un marco conceptual y lineamientos metodológicos para el Inventario Nacional de Humedales*. Informe final elaborado por solicitud del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Pp.: 27-29.

Kandus, P., Morandeira, N., & Minott, P. (13 de agosto de 2020). *El Delta en llamas: Incendios en las islas del Bajo Paraná*. Noticias UNSAM. Recuperado el 12 de junio de 2022, de: <https://noticias.unsam.edu.ar/2020/08/10/el-delta-en-llamas-incendios-en-las-islas-del-bajo-parana/>

Kandus, P., Morandeira, N. & Schivo, F. (editores) (2010). *Bienes y Servicios Ecosistémicos de los Humedales del Delta del Paraná*. Fundación Humedales / Wetlands International. Buenos Aires, Argentina. Pp.: 3, 6-7.

Kandus, P., Quintana, R. D., & Bó, R. F. (2006). *Patrones de paisaje y Biodiversidad del Bajo Delta del Río Paraná. Mapa de Ambientes*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Recuperado el 2022 de 2 de septiembre, de: [https://www.researchgate.net/publication/242719546\\_Patrones\\_de\\_Paisaje\\_y\\_Biodiversidad\\_del\\_Bajo\\_Delta\\_del\\_Rio\\_Parana](https://www.researchgate.net/publication/242719546_Patrones_de_Paisaje_y_Biodiversidad_del_Bajo_Delta_del_Rio_Parana)

Keeley, J. E. (2009). *Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage*. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116-126. doi:10.1071/WF07049

Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment (LA). Sampling and Analysis Methods. En D. C. Lutes, R. E. Keane, J. F. Caratti, C. H. Key, N. C. Benson, S. Sutherland, & L. J. Gangi (Eds.), *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD* (pp. 1–51). USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

La Nación. (10 de Octubre de 2018). *Aprueban la creación de un nuevo parque nacional a minutos del Obelisco*. Recuperado el 22 de junio de 2021, de: <https://www.lanacion.com.ar/sociedad/aprueban-creacion-nuevo-parque-nacional-minutos-del-nid2180545/>.

Landi , M. A. (2018). *Caracterización del Régimen de Incendios, su relación con el clima y su efecto en la resiliencia y estructura de la vegetación. Tesis de Doctorado en Ciencias Biológicas*. Córdoba: Instituto de Diversidad y Ecología Animal (CONICET- UNC). Recuperado el 17 de marzo de 2022, de:

[https://notablesdelaciencia.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/117532/CONICET\\_Digital\\_Nro.03acc3b4-211d-4210-9f5f-f9a35d3dc3b7\\_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://notablesdelaciencia.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/117532/CONICET_Digital_Nro.03acc3b4-211d-4210-9f5f-f9a35d3dc3b7_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

Landsat NASA. (2021). *The Worldwide Reference System | Landsat Science*. Landsat Science | A Joint NASA/USGS Earth Observation Program. Recuperado 13 de junio de 2022, de: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/about/the-worldwide-reference-system/>

La Red Latinoamericana de Teledetección e Incendios Forestales. (s.f.). *Sobre - RedLaTIF* Recuperado el 16 de noviembre de 2021, de: <http://www.redlatif.org/sobre/>

Legislatura de la Provincia de Entre Ríos. (12 de abril de 2019). *Ley N° 10.671*. Recuperado el 22 de junio de 2021, de: [https://www.entrierios.gov.ar/ambiente/userfiles/files/archivos/Ley%2010671\\_ANP.pdf](https://www.entrierios.gov.ar/ambiente/userfiles/files/archivos/Ley%2010671_ANP.pdf)

Lizundia-Loiola, J., Otón, G., & Chuvieco, E. (enero de 2020). *A spatio-temporal active-fire clustering approach for global burned area mapping at 250 m from MODIS data. Remote Sensing of Environment*, 236(111493). Recuperado el 6 de junio de 2022, de: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111493>

Machain, N., Penedo, C., Blanco, D., Andelman, M., Di Pangraccio, A., Daneri, J., . . . Peirano, M. (2013). *Una mirada sobre los conflictos y la problemática de la tenencia de la tierra en el Delta del Paraná*. Buenos Aires: Fundación para la Conservación y el Uso Sustentable de los Humedales. Recuperado el 11 de agosto de 2021, de: [https://lac.wetlands.org/wp-content/uploads/sites/2/dlm\\_uploads/2019/04/Una-mirada-sobre-los-conflictos-y-la-problem%C3%A1tica-de-la-tenencia-de-la-tierra-en-el-Delta-del-Paran%C3%A1.pdf](https://lac.wetlands.org/wp-content/uploads/sites/2/dlm_uploads/2019/04/Una-mirada-sobre-los-conflictos-y-la-problem%C3%A1tica-de-la-tenencia-de-la-tierra-en-el-Delta-del-Paran%C3%A1.pdf). Pp.: 5-23.

Malvárez, A. I. (1997). *El Delta del Río Paraná como Mosaico de Humedales. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina: Universidad de Buenos Aires*. Recuperado el 22 de junio de 2021, de: <https://www.fcnym.unlp.edu.ar/catedras/proteccion/tp5/parana1.pdf>. Pp.: 35-38.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021-a). *Informe de Áreas Quemadas - Incendios " Las Golondrinas" y "El Bolquete"*. Dirección Nacional de Planificación y Ordenamiento Ambiental del Territorio. Recuperado el 16 de diciembre de 2021, de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe\\_aq\\_rio\\_negro\\_chubut\\_07may2021.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_aq_rio_negro_chubut_07may2021.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021-b). *Informe de superficies afectadas por incendios en el Delta e Islas del Río Paraná (Territorio PIECAS-DP). Año 2020. Segunda parte. Implicancia en los humedales*. Recuperado el 20 de mayo de 2022, de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2020/12/informe\\_aq\\_piecas\\_2020\\_30-9-21\\_final\\_rev1\\_sada.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2020/12/informe_aq_piecas_2020_30-9-21_final_rev1_sada.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación. (2021-c). *Anuario de Estadística Forestal*. Recuperado el 9 de mayo de 2022, de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2018/11/anuario\\_de\\_estadistica\\_forestal.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2018/11/anuario_de_estadistica_forestal.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (noviembre de 2020). *Informe de superficies afectadas por incendios en el Delta e Islas del Río Paraná*. Argentina. Recuperado el 22 de junio de 2021, de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe\\_superficies\\_afectadas\\_por\\_incencios\\_2020\\_piecas-dp\\_final.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_superficies_afectadas_por_incencios_2020_piecas-dp_final.pdf). Pp.: 14-27.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.-a). *Parques Nacionales*. Recuperado el 7 de febrero de 2022, de: Delta e Islas del Paraná: <https://www.argentina.gob.ar/ecorregiones/delta-e-islas-del-parana>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.-b). *Servicio de Manejo del Fuego*. Recuperado el 16 de Noviembre de 2021, de: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/fuego/servicio-nacional>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.-c). *Ficha: Parque Nacional Pre-Delta*. Recuperado el 22 de junio de 2021, de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ficha\\_-\\_pn\\_pre-delta.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ficha_-_pn_pre-delta.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.-d). *Ficha: Parque Nacional Islas de Santa Fe*. Recuperado el 22 de junio de 2021, de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ficha\\_-\\_pn\\_islas\\_de\\_santa\\_fe.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ficha_-_pn_islas_de_santa_fe.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.-e). *Ficha: Parque Nacional Ciervo de los Pantanos*. Recuperado el 22 de junio de 2021, de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ficha\\_-\\_pn\\_ciervo\\_de\\_los\\_pantanos.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ficha_-_pn_ciervo_de_los_pantanos.pdf)

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.-f). *Acción ambiental*. Recuperado el 6 de agosto de 2021, de: Faros de conservación: una solución integral para proteger el delta del Paraná: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/faros-de-conservacion>

Montorio Llovería, R., Pérez-Cabello, F., García-Martín, A., Vlassova, L., & De la Riva Fernández, J. R. (2014). *La severidad del fuego: Revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales*. En J.

Arnáez Vadillo, P. González-Sampériz, T. Lasanta Martínez, & B. Valero-Garcés, *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: Homenaje al profesor José María García-Ruiz*. España: Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Pp.: 427-440. Recuperado el 2 de abril, de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4854191>

NASA EARTHDATA. (s.f.). *FIRMS FAQ*. Recuperado el 6 de julio de 2021, de: <https://earthdata.nasa.gov/faq/firms-faq#ed-viirs-375m-product>

Nieto, G., & Isabel, M. P. (2008). Estudio Comparativo de Índices Espectrales para la Cartografía de Áreas Quemadas con Imágenes MODIS. *Asociación Española de Teledetección*, 15-24. ISSN: 1988-8740. Recuperado el 13 de septiembre, de: <https://digital.csic.es/handle/10261/157342>

Olha Tokar, O. V., Tokar, O., Vovk, O., Kolyasa, L., Havryliuk, S., & Korol, M. (9 de 2018). *Using the Random Forest classification for land cover interpretation of Landsat images in the Prykarpattya region of Ukraine*. Recuperado el 23 de febrero de 2022, de: [https://www.researchgate.net/publication/327593624\\_Using\\_the\\_Random\\_Forest\\_Classification\\_for\\_Land\\_Cover\\_Interpretation\\_of\\_Landsat\\_Images\\_in\\_the\\_Prykarpattya\\_Region\\_of\\_Ukraine](https://www.researchgate.net/publication/327593624_Using_the_Random_Forest_Classification_for_Land_Cover_Interpretation_of_Landsat_Images_in_the_Prykarpattya_Region_of_Ukraine)

Olson, D. M., Dinerstein, E., Wikramanayake, E. D., Burgess, N. D., Powell, G. V., Underwood, E. C., . . . Kassem, K. R. (noviembre de 2001). Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth. *BioScience*, 51(11), 933-938. Recuperado el 14 de enero de 2022, de: <https://academic.oup.com/bioscience/article/51/11/933/227116>

QGIS. (s.f.). *QGIS - El SIG Líder de Código Abierto para Escritorio*. Recuperado el 7 de febrero de 2022, de: <https://www.qgis.org/es/site/about/index.html>

Rodríguez Pérez, D., Sánchez Carnero, N., Domínguez Gómez, J. A., & Santa Marta Pastrana, C. (2015). *Cuestiones de Teledetección*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia. Recuperado de: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat07959a&AN=bidi.ELB48836&lang=es&site=eds-live&scope=site>.

Rodríguez-Trejo, D. A. (2012). Génesis de los Incendios Forestales. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(3). doi:10.5154/r.rchscfa.2011.12.091

Roteta, E., & Bastarrika, A. (23 de febrero de 2021-a). *Burned Area Mapping Tools in Google Earth Engine - User Guide*. (1.6). (U. o. Country, Ed.) Vitoria-Gasteiz, España. Recuperado el 1 de agosto de 2021, de: <https://github.com/ekhiroteta/BAMT>



Roteta, E., Bastarrika, A., Franquesa, M., & Chuvieco, E. (23 de febrero de 2021-b). *Landsat and Sentinel-2 Based Burned Area Mapping Tools in Google Earth Engine*. Recuperado el 1 de abril de 2022, de: <https://www.mdpi.com/2072-4292/13/4/816/htm>

Rossi, C. (s.f.). *Incendios en el Delta y Córdoba: causas y consecuencias del “pulso biológico” en malas condiciones ambientales*. (U.N.L.Z., Entrevistador) Recuperado el 2021 de 9 de junio, de: <https://www.unlz.edu.ar/incendios-en-el-delta-y-cordoba-causas-y-consecuencias-del-pulso-biologico-en-malas-condiciones-ambientales/>

Rubio Torres, P. (2017). *Iniciación a las quemadas y a la piroecología*. (Autoedición, Ed.) Madrid: Bubok Publishing S.L. ISBN: 978-84-697-3302-8

Ruiz González, A. D. (2004). *La predicción de la humedad en los restos forestales combustibles; aplicación a masas arboladas en Galicia. Tesis Doctoral*. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Silvopascicultura. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes, Madrid. Recuperado el 9 Abril de 2022, de: [https://oa.upm.es/302/1/Ana\\_Daria\\_Ruiz\\_Gonz%C3%A1lez.pdf](https://oa.upm.es/302/1/Ana_Daria_Ruiz_Gonz%C3%A1lez.pdf)

Sáenz-Ceja, J. E., & Pérez-Salicrup, D. R. (1 de enero de 2019). *El papel del fuego en la regeneración de los bosques de coníferas*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. Pp.: 123-139. doi:10.5154/r.rchscfa.2018.06.054

Sarría, F. A. (s.f.). *Sistemas de Información Geográfica* (Vol. Tema 9). Universidad de Murcia. Recuperado el 10 abril de 2022, de: <https://www.um.es/geograf/sigmur/teledet/tema09.pdf>

Secretaría de Ambiente de Entre Ríos. (26 de septiembre de 2020). *Noticias*. Recuperado el 22 de junio de 2021, de: Elaboran el plan de manejo de la reserva de usos múltiples Islas de Victoria: [https://www.entrieros.gov.ar/ambiente/index.php?codigo=&cod=1339&codtiponoticia=1&noticia=ver\\_noticia&modulo=noticia](https://www.entrieros.gov.ar/ambiente/index.php?codigo=&cod=1339&codtiponoticia=1&noticia=ver_noticia&modulo=noticia)

Secretaría de Ambiente de Entre Ríos. (s.f.). *Delta Sustentable*. Recuperado el 30 de julio de 2021, de: Gestión Integrada para el Desarrollo Productivo Sostenible del Delta Entrerriano: <https://www.entrieros.gov.ar/deltasustentable/index.php?codigo=20&codsubmenu=36&menu=menu&modulo=>

Secretaría de la Convención de Ramsar. (2013). *Manual de la Convención de Ramsar: Guía a la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971)* (6 ed.). Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar. Recuperado el 19 de julio de 2021, de: <https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/manual6-2013-sp.pdf>

Secretaría de Salud Pública, Desarrollo Humano y Políticas Ambientales del Municipio de San Fernando. (s.f.). *Reserva de Biósfera Delta del Paraná*. Recuperado el 23 de junio de 2021, de:

<https://www.sanfernando.gob.ar/municipio/secretarias/secetaria-de-salud/direccion-general-de-medio-ambiente/reserva-de-biosfera-delta-del-parana/caracteristicas>

Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). (s.f.). *Sensores Remotos*. Recuperado el 11 de octubre de 2021, de:

<https://www.argentina.gob.ar/produccion/segemar/geologia-y-recursos-minerales/sensores-remotos>

Serrato Álvarez, P. K. (noviembre de 2018). *Conceptos básicos de interpretación de aerofotografías e imágenes satelitales*. doi:10.13140/RG.2.2.18697.08809

Taller Ecologista, LETyE, 3iA, UNSAM. (octubre de 2010). Humedales del Paraná: Biodiversidad, usos y amenazas del Delta Medio. Argentina: *Inercia Comunicaciones*. Pp.: 21-22. Recuperado el 25 de junio de 2021, de:

[https://www.researchgate.net/publication/285599713\\_Humedales\\_del\\_Parana\\_Biodiversidad\\_usos\\_y\\_amenazas\\_en\\_el\\_Delta\\_Medio](https://www.researchgate.net/publication/285599713_Humedales_del_Parana_Biodiversidad_usos_y_amenazas_en_el_Delta_Medio).

The European Space Agency (s.f.). *Sentinel-2 MSI User Guide - Product Types*. Recuperado el 2 de julio de 2022, de <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types>

Tokar, O., Vovk, O., Kolyasa, L., Havryliuk, S., & Korol, M. (2018). *Using the Random Forest Classification for Land Cover Interpretation of Landsat Images in the Prykarpattya Region of Ukraine*. Lviv: Lviv Polytechnic National University. doi:<http://dx.doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526646>

United Nations. (s.f.). *Indice Normalizado de Área Quemada (NBR)*. UN-SPIDER Knowledge Portal. Recuperado 11 de diciembre de 2021, de: <https://un-spider.org/es/node/10959>

United Nations. (2020). *Prácticas Recomendadas: Paso a Paso: Mapeo de la Severidad de Incendios Forestales en Google Earth Engine*. Recuperado el 15 de diciembre de 2021, de: <https://www.un-spider.org/es/asesoria/practicas-recomendadas/practica-recomendada-mapeo-gravedad-quemaduras/paso-a-paso/google-earth-engine>

United Nations Environment Programme (2022-a). *Frontiers 2022: Noise, Blazes and Mismatches – Emerging Issues of Environmental Concern*. Nairobi. ISBN: 978-92-807-3917-6. Recuperado el 5 de marzo de 2022, de: <https://www.unep.org/frontiers>

United Nations Environment Programme. (2022-b). *Spreading like Wildfire - The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fire*. Nairobi: UNEP A Rapid Response Assessment. Recuperado el 12 febrero de 2022, de: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/38372>

U.S. Geological Survey. (s.f.). *Landsat Normalized Burn Ratio 2* .Recuperado 5 de junio de 2022, de: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-normalized-burn-ratio-2>

Vega-García, C., & Balde, B. (2019). *Estimación de emisiones de GEI y sus trayectorias en grandes incendios forestales en Cataluña, España. Madera y bosques.*

Wetlands International. (s.f.). *Sitio Ramsar Delta del Paraná*. Recuperado el 22 de junio de 2021, de: <https://lac.wetlands.org/wp-content/uploads/sites/2/2019/01/Sitio-Ramsar-DdParana-10-1-1.pdf>

World Wildlife Fund. (s.f.). *Glosario Ambiental*. Recuperado el 20 de julio de 2021, de: [https://www.wwf.org.co/de\\_interes/noticias/glosario\\_ambiental/#AnclaS](https://www.wwf.org.co/de_interes/noticias/glosario_ambiental/#AnclaS)

Young, H. D., & Freedman, R. A. (2013). *Física universitaria con física moderna* (decimotercera ed., Vol. 2). México: Pearson.

Zamboni, L. P., Tentor, F. R., Sione, W. F., Hardtke, L. A., del Valle, H. F., Quignard, I., & Aceñolaza, P. G.(2013). Patrones espacio-temporales de incendios en el Complejo Litoral del Río Paraná. *Interciencia*, 38(9),634-641.ISSN: 0378-1844. Recuperado el 15 de junio de 2021, de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33929480003>

Zelmar Nuñez, H. *La Investigación de Incendios y Explosiones*. IUPFA . Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina. Secretaría de Investigación y Desarrollo - Artículos. Recuperado el 20 de marzo de 2022, de: [https://www.iupfa.edu.ar/articulos/IN002\\_IYD\\_InvestigacionIncendiosExplosiones.html](https://www.iupfa.edu.ar/articulos/IN002_IYD_InvestigacionIncendiosExplosiones.html)

## Apéndice A - Principios de Teledetección

El flujo energético hace referencia a la energía electromagnética por unidad de tiempo que, partiendo de un objeto en superficie, llega al sensor. En otras palabras, es la potencia de la radiación electromagnética y se mide en vatios (W) en el Sistema Internacional de Unidades. Luego, resulta de utilidad describir la radiación en términos de energía radiada no sólo por unidad de tiempo, sino también por área. Es así como se obtienen las magnitudes emitancia e irradiancia (según se trate de energía emitida o incidente respectivamente); en este caso, la unidad asignada es vatios por metros cuadrados (W/m<sup>2</sup>).

La naturaleza de la radiación, principalmente de la luz, ha sido interés de estudio desde el siglo XVII. Para el siglo XIX el descubrimiento del comportamiento dual onda-partícula sentó las bases de la física cuántica. Según esta teoría, el comportamiento corpuscular explica los fenómenos de emisión y absorción de la radiación, ya que los intercambios de energía con el medio se hacen en cantidades discretas, o paquetes, llamados fotones. Por otro lado, el comportamiento ondulatorio describe la propagación de la radiación, y efectos como la interferencia y difracción (Young & Freedman, 2013).

La teoría ondulatoria es la que define el modelo para el transporte de energía en forma de ondas. De este modo, la generación y propagación de estas ondas responde a campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí. La propagación se da a la velocidad de la luz, siguiendo un comportamiento armónico, pudiéndose describir a partir de estas dos magnitudes fundamentales:

- Longitud de onda ( $\lambda$ ): distancia entre dos crestas sucesivas de la onda. Se mide en metros.
- Frecuencia ( $f$ ): el número de ciclos de oscilación por segundo en un mismo punto. Se mide en Hertz (Hz).

La relación entre ambas es:

$$c = \lambda * f$$

donde  $c$  es igual a la velocidad de la luz ( $c = 300000 \text{ km/s}$ ).

Al ser inversamente proporcionales, las ondas electromagnéticas de corta longitud tienen alta frecuencia, y viceversa.

Por otro lado, la teoría cuántica define al fotón como la partícula portadora de energía electromagnética que puede ser absorbida o emitida por la materia. Este intercambio de energía se da en cantidades fijas y depende de la frecuencia del fotón. Einstein explicó este fenómeno, llamado efecto fotoeléctrico, a través de la siguiente ecuación:

$$E = f * h$$

donde  $f$  es la frecuencia y  $h$  la constante de Planck ( $6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$ )

Entonces, se tiene que la energía que contiene la radiación es inversamente proporcional a la longitud de onda. A menor longitud de onda, mayor energía.

En función de su longitud de onda y frecuencia, la radiación presenta un comportamiento determinado. Es por ello, que se la divide en una serie de bandas para conformar el denominado espectro electromagnético. El espectro electromagnético incluye el total de ondas electromagnéticas, desde aquellas con longitudes de onda en orden de los 0,01 nm, como los rayos gamma, hasta radiaciones con longitudes de varios kilómetros, tal como lo son las ondas de radio. Se presenta una representación gráfica del espectro electromagnético en la Figura 33.

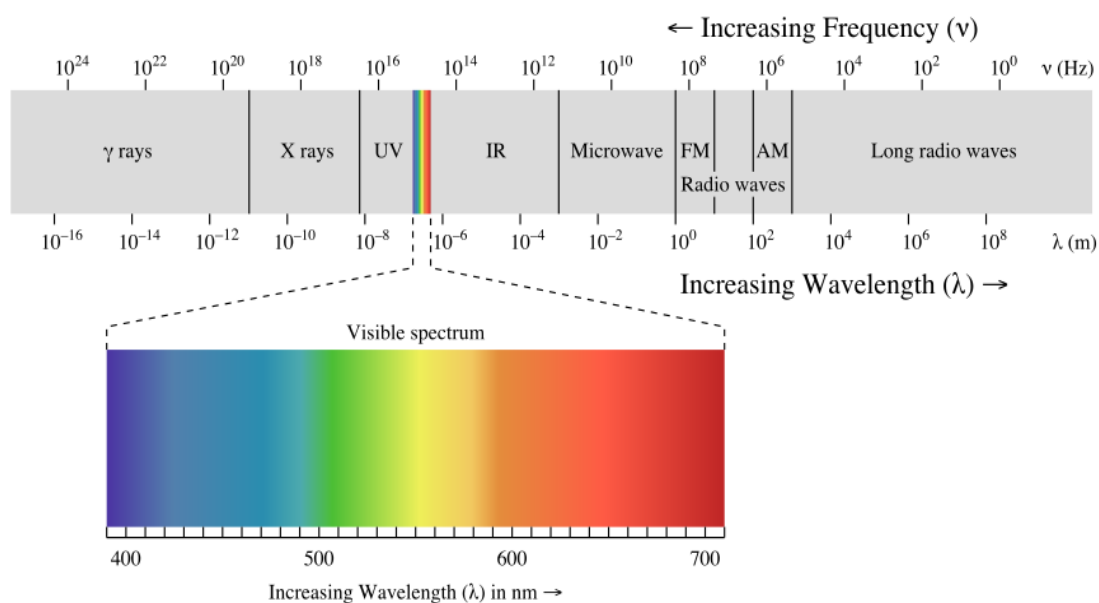


Figura 33: Espectro electromagnético. Imagen recuperada de Chemistry Library de UC Davis: *The Electromagnetic Spectrum*. (2021, February 14). Obtenido de: <https://chem.libretexts.org/@go/page/47515>

La capacidad de los distintos sensores para operar en las distintas bandas determinará la información que será posible recolectar. El diseño y la aplicación de cada instrumento se sustenta en el tipo de radiación a cuantificar y estudiar.

Las propiedades que caracterizan a cada tipo de radiación depende de dos factores: 1) la fuente emisora de dicha energía y 2) las interacciones con los objetos que encuentre a su paso. Este comportamiento espectral se puede explicar a partir de las denominadas Leyes de la radiación.

El sol es la principal fuente de energía del planeta. Se trata de una estrella compuesta principalmente por los elementos helio, hidrógeno y carbono sometidos a condiciones elevadas de presión y temperatura. Las distintas reacciones nucleares que tienen lugar en su interior son responsables de la liberación de enormes cantidades de calor.

Sólo en su superficie, el sol alcanza temperaturas próximas a los  $6000^{\circ}\text{C}$ . Como consecuencia de estas temperaturas, se irradian enormes cantidades de energía al espacio. Parte de esa energía llega



a la capa exterior de la atmósfera permitiendo los procesos atmosféricos y el desarrollo de la vida en sus múltiples formas.

Este fenómeno se explica siguiendo la Ley de Planck. Según esta ley, todo cuerpo negro que se encuentre a una temperatura determinada emitirá radiación con una distribución espectral definida. Si bien el cuerpo negro perfecto no existe, es decir una superficie u objeto capaz de emitir o absorber la máxima cantidad de energía disponible, pero considerando que muchos objetos se comportan como cuerpos negros casi perfectos, se concluye que toda materia con temperatura superior al cero absoluto ( $-273^{\circ}\text{C}$ ) emite energía, y esa energía se incrementa con el aumento de temperatura. Por consiguiente, a mayor temperatura se irradia radiación de longitud de onda más corta. En el caso del sol, emite principalmente radiación de onda corta, con valores entre los 200 y 3000 nm, que se ubica en las bandas del ultravioleta, visible e infrarrojo cercano.

Por su parte, la ley de Stefan-Boltzmann permite calcular la energía total emitida por un cuerpo negro a una determinada temperatura absoluta. Se obtiene integrando la fórmula de Planck para todas las longitudes de onda y permite diferenciar el aporte de energía en cada región del espectro.

Otra ley de radiación que es interesante conocer, y que también deriva de la de Planck, es la ley de Wein. De acuerdo a la misma, la longitud de onda a la cual se produce la máxima emitancia de un cuerpo también depende de su temperatura. Para el sol, la máxima emitancia se da en la región del espectro visible (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ).

Las leyes de radiación mencionadas explican el comportamiento del sol como principal fuente de energía del planeta y permiten la caracterización de la radiación que emite. Muchos sensores se basan en este principio para su funcionamiento y se conocen como sensores pasivos.

Además del uso de la energía solar, algunos instrumentos están diseñados para emitir su propio flujo energético. De este modo, se independizan de la actividad solar para la obtención de datos. Generalmente estos trabajan en el rango de las microondas y son útiles, por ejemplo, en días nublados o durante la noche. En este caso, los sensores son portadores de su propia fuente de energía y se los denomina sensores activos.

Si bien la radiación electromagnética se puede medir en cualquier punto del planeta, y describir en términos de las magnitudes físicas indicadas (y otras más, no mencionadas en este texto), el fenómeno de propagación de energía es de naturaleza variable en tiempo y espacio. A su vez, debido a que el transporte no se da en el vacío, la radiación interactúa con diferentes componentes del medio experimentando modificaciones varias a su paso.

La radiación que ingresa en la capa superior de la atmósfera es atenuada por las interacciones con los elementos que encuentra a su paso, como gases y aerosoles. Los fenómenos que pueden darse se presentan en la Tabla 17:

TABLA 17: INTERACCIONES ENTRE LA RADIACIÓN SOLAR Y LOS COMPONENTES DE LA ATMÓSFERA.

<b>Reflexión</b>	La radiación es enviada hacia el espacio sin ningún cambio en las características de la onda incidente. Las nubes reflejan gran parte de radiación
<b>Dispersión</b>	La radiación se distorsiona en distintas direcciones. El efecto de dispersión depende del tamaño de la partícula y, además, a mayor longitud de onda menor será el efecto de dispersión. La dispersión de Rayleigh es la responsable de la coloración azul del cielo durante gran parte del día y de las tonalidades anaranjadas en el amanecer y/o atardecer. Otras son la dispersión de Mie y la no selectiva.
<b>Refracción</b>	Se produce un cambio en la dirección a causa de los cambios de densidad del medio. Da lugar a los espejismos
<b>Absorción</b>	La radiación absorbida genera un incremento de la temperatura del cuerpo. Distintas regiones del espectro son absorbidas por distintos gases como el dióxido de carbono, el ozono y el vapor de agua. Las zonas del espectro donde no hay absorción se denominan ventanas. Los sensores son operativos en estas regiones

En la toma de datos remotos, el objeto observado suele referirse a distintas coberturas terrestres. Para estos, también aplican las leyes de radiación previamente mencionadas. La radiación procedente de una fuente de energía que alcanza la superficie terrestre también interactúa con los distintos objetos que se encuentren sobre ella. De este modo, la energía puede:

- reflejarse ( y ser enviada nuevamente al espacio)
- absorberse ( elevando la energía interna del objeto)
- transmitirse ( hacia otros objetos sin una mayor modificación)

De manera análoga que para los componentes de la atmósfera, el porcentaje de energía que será reflejada, absorbida o transmitida depende de las características de la radiación y de los objetos sobre los que incide.

La observación remota de los objetos de la superficie terrestre es posible a partir del empleo de sensores capaces de medir la radiación electromagnética proveniente de la superficie terrestre en sus diferentes longitudes de onda (ya sea emitida o reflejada).

Se debe considerar, tal y como se indicó anteriormente, que la radiación que llega al sensor depende de una serie de factores: cobertura terrestre, condiciones atmosféricas, emplazamiento ambiental de la cubierta y geometría de observación (Chuvienco, 1992).

La observación remota puede realizarse desde distintas plataformas de observación: drones, globos, aviones y satélites.

En el caso de las plataformas satelitales, estas presentan como ventaja la cobertura sistemática de la superficie terrestre permitiendo obtener información de extensas áreas del territorio de forma periódica. Como desventaja, se indica que debido a la elevada altura a la que se encuentra el satélite, se incrementan los efectos de la atmósfera sobre los valores de radiación que llegan al sensor desde la superficie terrestre.

Los sensores se pueden clasificar en dos grupos: activos y pasivos. Dentro del primer grupo, se encuentran los que emiten su propia radiación, actuando como fuente de energía y recibiendo la que es devuelta desde la superficie terrestre. Las principales tecnologías disponibles son el radar y el lidar.

Los sensores pasivos, por su parte, también reciben la radiación proveniente de la superficie terrestre, pero el origen de esta energía es una fuente externa al instrumento de medición (como lo es el sol). Se incluyen en esta categoría sistemas ópticos electrónicos como los radiómetros de barrido y empuje.

Los distintos sensores transportados pueden captar radiación de distintas zonas del espectro electromagnético conocidas como bandas o canales. Los sensores multiespectrales analizan pocas bandas del espectro electromagnético (entre 3 y 20) mientras que los hiperespectrales trabajan con un mayor número de bandas y permiten estudiar prácticamente de forma continua el espectro dentro del rango de trabajo (Rodríguez Pérez *et al.*, 2015). La resolución espectral hace referencia al número y ancho de las bandas que puede captar un sensor. A mayor número de bandas, más regiones del espectro se pueden captar. Si las bandas son estrechas, se puede hacer un mejor discernimiento de las mismas.

La resolución radiométrica es la capacidad del sensor para discriminar distintos niveles de intensidad de radiación. Algunos sensores almacenan dicha información en 8 bits, lo que equivale a 255 niveles de energía, que al ser representados en tonalidades de grises sólo pueden distinguirse a aplicando filtros para las distintas bandas de trabajo

La resolución espacial indica el nivel de detalle alcanzado y representa el tamaño del píxel, que es la mínima unidad que puede distinguirse en una imagen. A menor tamaño de píxel, mayor será la resolución. Los sensores pueden ser de alta, media o baja resolución espacial. Por ejemplo, una resolución de 1000 m es considerada baja y significa que el píxel cubre un área de 1000 m x 1000 m. Este parámetro se mide en superficie y depende de especificaciones del sensor como su campo instantáneo de visión.

La resolución temporal, o tiempo de revisita, es el periodo de tiempo que le toma al satélite en capturar dos imágenes consecutivas de un mismo punto sobre la superficie. Es variable según la

plataforma que transporte el sensor. En caso de los satélites, depende de la órbita que siga y el ángulo de barrido

Estas resoluciones caracterizan al sensor y delimitan la información que será posible obtener de la superficie terrestre. Comúnmente, a mayor resolución mayor es el volumen de datos a procesar y el costo asociado.

Las imágenes satelitales obtenidas presentan una resolución determinada, tanto espacial como temporal, debido a que los satélites se encuentran en órbitas fijas. La posibilidad de cobertura global y periódica de la superficie terrestre, así como el acceso a áreas remotas, posibilita el diseño de bases de datos históricos para la investigación de temáticas ambientales diversas (Chuvienco, 1992).

## Apéndice B - Humedales del Delta del Paraná

Sin dudas, el sistema de humedales del Delta del Paraná proporciona a la sociedad y otros ecosistemas un invaluable conjunto de servicios ecosistémicos. A continuación, en la Tabla 18, se presenta un resumen de los mismos, indicando los autores que los han reconocido.

TABLA 18: SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL DELTA DEL PARANÁ, DE ACUERDO CON DISTINTOS AUTORES.

Bienes y Servicios Ecosistémicos		Autores
Servicios de Sostenimiento	Ciclado y almacenaje de nutrientes	Kandus <i>et al.</i> (2010) Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> ) Baumann <i>et al.</i> (2021) Machain <i>et al.</i> (2013)
	Retención de agua	Kandus <i>et al.</i> (2010) Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> )
	Transformación de nutrientes y contaminantes	Kandus <i>et al.</i> (2010) Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> ) Machain <i>et al.</i> (2013)
Servicios de Regulación	Desaceleración de los flujos y disminución de la turbulencia del agua	Kandus <i>et al.</i> (2010) Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> )
	Regulación de las inundaciones	Kandus <i>et al.</i> (2010) Baumann <i>et al.</i> (2021) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ( <i>s.f.</i> )
	Retención y estabilización de sedimentos	Kandus <i>et al.</i> (2010) Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> ) Baumann <i>et al.</i> (2021) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ( <i>s.f.</i> ) Machain <i>et al.</i> (2013)
	Regulación de procesos de evapotranspiración	Kandus <i>et al.</i> (2010) Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> )
	Regulación de la salinidad	Kandus <i>et al.</i> (2010) Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> )



	Exportación de nutrientes y otros compuestos	Kandus <i>et al.</i> (2010)
	Regulación de caudales	Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> )
	Mejoramiento de la calidad del aire	Baumann <i>et al.</i> (2021)
	Absorción de CO2 atmosférico	Baumann <i>et al.</i> (2021)
		Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ( <i>s.f.</i> ) Machain <i>et al.</i> (2013)
Estabilización microclimática	Machain <i>et al.</i> (2013)	
<b>Servicios de Aprovechamiento</b>	Recarga de acuíferos	Kandus <i>et al.</i> (2010) Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> ) Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible ( <i>s.f.</i> )
	Producción primaria (uso de vegetación autóctona e introducida con fines medicinales, comestibles, forrajeros, etc.)	Kandus <i>et al.</i> (2010) Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> ) Machain <i>et al.</i> (2013)
	Producción secundaria (sistemas productivos y actividades varias: ganadería, apicultura, pesca, caza, pastoreo, etc).	Kandus <i>et al.</i> (2010) Secretaría de Ambiente de Entre Ríos ( <i>s.f.</i> ) Machain <i>et al.</i> (2013)
	<b>Servicios Culturales</b>	Atractivo turístico
Provisión de sitios de recreación		Baumann <i>et al.</i> (2021) Machain <i>et al.</i> (2013)

La disponibilidad de estos servicios está ligada y condicionada directamente por la presencia del río y la dinámica que trae en toda su extensión, así como por la vegetación distintiva de la zona. En este sentido, las afectaciones sobre estos elementos ocasionan una disminución del rendimiento en la prestación de estos servicios, supeditando su aprovechamiento por parte de las personas y dañando los ecosistemas.

La introducción de actividades agropecuarias decanta en una serie de consecuencias que afectan al ecosistema en su conjunto: erosión y compactación del suelo por el pisoteo, contaminación del suelo y el agua con nitrógeno y fósforo por la materia fecal del ganado y con químicos artificiales provenientes de los agrotóxicos, desequilibrios en el flujo hidrológico, alteración de los canales de comunicación utilizados por los lugareños, degradación de la calidad del suelo y destrucción de la biodiversidad (Baumann *et al.*, 2021). Machain *et al.* (2013) detalla más específicamente los impactos de estas y otras actividades recientemente introducidas en el Delta del Paraná, haciendo la distinción en cuanto a escala, entre actividades tradicionales y otras asociadas a procesos recientes. Se puede ver un resumen en la Tabla 18.

TABLA 19: RESUMEN DE LAS ACTIVIDADES RECIENTEMENTE INTRODUCIDAS EN EL DELTA DEL PARANÁ, DE ACUERDO A MACHAIN *et al.* (2013).

Actividad	Descripción	Impactos
<b>Ganadería extensiva de alta carga</b>	A partir de la década del 90, se produjo una expansión de la producción ganadera en las islas, impulsada en gran medida por el avance de la soja en el continente. Esto implicó que las prácticas tradicionales de la ganadería de islas pasaran a usarse en una escala mayor.	1- Instalación de infraestructura para prevenir la inundación del terreno, con efectos sobre la calidad de agua, retención de materia orgánica y nutrientes. 2- Quema de pastizales produciendo incendios que se extienden sobre la vegetación nativa, generando cambios en la composición de las especies vegetales, compactando el suelo y reduciendo su fertilidad. Esto también tiene efectos sobre las actividades apícolas.
<b>Agricultura intensiva</b>	Dada la alta rentabilidad de la soja, muchos productores han mostrado intenciones de introducir este y otros cultivos a la región del Delta del Paraná.	1- Instalación de infraestructura para prevenir la inundación del terreno, con efectos sobre la calidad de agua, retención de materia orgánica y nutrientes. 2- Reemplazo de la vegetación nativa por las especies cultivadas, con pérdida de productividad primaria y biodiversidad. 3- Elevado riesgo de contaminación

		<p>directa del agua por la aplicación de fertilizantes y agroquímicos. Esto tiene el potencial de afectar otras actividades como la apicultura, la pesca, la ganadería y la agricultura familiar.</p>
<p><b>Mega urbanizaciones</b></p>	<p>Desarrollo de grandes urbanizaciones cerradas en las planicies de inundación del Delta. Esto normalmente trae aparejado la construcción de puentes, túneles u otras obras de infraestructura.</p>	<p>1- Conversión de las tierras de humedal a un sistema terrestre, con el consiguiente desplazamiento de las aguas y alteraciones al régimen hídrico.</p> <p>2- Dragado de los sedimentos del río para la construcción, con la posibilidad de re-movilizar contaminantes contenidos en los mismos.</p> <p>3- Impedimento de la circulación por las costas (camino de sirga), que puede afectar a las comunidades locales.</p> <p>4- Fragmentación del ecosistema por la infraestructura necesaria para conectar las urbanizaciones con el continente.</p>
<p><b>Construcción de terraplenes</b></p>	<p>Evitan la inundación de una zona, protegiéndola contra las crecidas. También pueden usarse como base para la construcción de vías de comunicación.</p>	<p>1- Producen cambios en el régimen hidrológico, especialmente cuando se consideran los efectos acumulativos de todas estas construcciones.</p> <p>2- El paisaje se ve modificado por la desaparición de los bajos y pajonales del centro de las islas por el drenaje.</p> <p>3- Afectan la conectividad del sistema para la fauna nativa, afectando a su vez las actividades desarrolladas por la población local que dependen de ella, como la pesca.</p>
<p><b>Construcción de diques</b></p>	<p>Son otro tipo de infraestructura que busca evitar la inundación de una zona determinada. Los diques en particular suelen construirse asociados a la actividad forestal, silvopastoril o agrícola, o a</p>	<p>3- Afectan la conectividad del sistema para la fauna nativa, afectando a su vez las actividades desarrolladas por la población local que dependen de ella, como la pesca.</p>

	emprendimientos urbanísticos.	4- Afectación a la biodiversidad por el reemplazo de la cobertura vegetal original.
<b>Dragado</b>	A fin de permitir y facilitar el tránsito de buques de ultramar en el tramo Santa Fe-Escobar-Nueva Palmira (590 km), se han concesionado trabajos de dragado y balizamiento.	<p>1- Remoción de los sedimentos del fondo de los canales, alterando su composición y en consecuencia a las comunidades bentónicas que de ellos dependen.</p> <p>2- Resuspensión de los sedimentos, junto con los contaminantes depositados entre ellos, generando un incremento de la turbidez del agua.</p> <p>3- Resuspensión de nutrientes previamente inmovilizados, aumentando la eutrofización y la demanda de oxígeno.</p> <p>4- Aumento de la sección de los canales, permitiendo una mayor influencia marina y generando un aumento de la salinidad.</p>
<b>Instalación de puertos</b>	Los puertos funcionan como la vía de salida para la producción de la región, asociada principalmente a la minería, agricultura, ganadería, actividad petroquímica y siderúrgica.	1- Aumento del transporte que circula por la región, desde y hacia el puerto, por tierra y por agua. Esto conlleva aumento de emisiones de CO <sub>2</sub> , y contaminación por efluentes cloacales e industriales.

Baumann *et al.* (2021) reconocen además otros conflictos, que suelen tener menor visibilidad, como son:

- Contaminación por vertidos líquidos y gaseosos: proveniente principalmente del cordón industrial del Gran Rosario, y de los polos petroquímico, agroexportador y agroindustrial.
- Aumento del parque náutico: particularmente debido a los vehículos a motor, que al transitar producen erosiones en las costas y emiten ruidos molestos para la fauna y los pobladores locales. Ocasionalmente puede producirse un derrame de hidrocarburos,

como lubricantes o combustibles, formando una película sobre la superficie del agua, que dependiendo de su extensión puede impedir la oxigenación del agua.

- Residuos: en el caso particular de los plásticos, pueden generar la muerte de animales que los ingieren al confundirlos por alimento.

Estos problemas se ven agravados por pertenecer el área del Delta a distintas jurisdicciones, agregando complejidad al asunto desde un punto de vista legal, político y de intereses privados.