

EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE LAS SELVAS TROPICALES DEL PARQUE NACIONAL

MAIN RANGE DESPUÉS DE LOS INCENDIOS FORESTALES BLACK SUMMER 2019/20 EN AUSTRALIA

Sydney O'Hare

University of Queensland, Australia. Primer lugar del Concurso Internacional Wildfire Exchange 2024 en la categoría "Proyectos de Investigación".¹

RESUMEN

El Parque Nacional Main Range (MRNP) experimentó incendios sin precedentes y fue gravemente afectado por los incendios forestales de la temporada 2019-2020, conocidos como el "Verano Negro" o *Black Summer*. Esta investigación tiene como objetivo comprender cómo se recuperan las selvas tropicales de los incendios forestales severos, comparando su recuperación con la de los bosques de eucaliptos y determinando cuáles ecosistemas regionales de selva (RE) están expuestos a mayor riesgo. Se utilizó la imagen de Sentinel 2 para calcular los valores de dNBR del incendio y los tres años siguientes, validándolos mediante una prueba t emparejada para detectar cambios, con el fin de entender cuán severo fue el incendio y cómo se recuperó la selva tropical. Se descubrió que 81,28 km² se quemaron con una severidad extrema o alta, y 28,35 km² de selva tropical se recuperaron, dejando solo 0,35 km² quemados para 2022. Se determinó que el RE 12.8.4 era el más vulnerable al fuego, debido a que los 0,02 km² restantes quemados en 2022 aún mostraban quemaduras de severidad moderada o alta, lo que permite la posibilidad de transiciones comunitarias, a pesar de que solo se quemaron 2,4 km² en total. Estos resultados muestran que la selva tropical puede recuperarse de incendios extremos; sin embargo, algunos ecosistemas tardan más tiempo en recuperarse y están en mayor riesgo. Este estudio es relevante para futuras respuestas ante incendios, con el fin de priorizar áreas como el RE 12.8.4 para su protección, y además profundizar en el entendimiento de la resiliencia de las selvas tropicales ante los incendios.

Palabras clave: recuperación, dNBR, selva tropical.

ABSTRACT

Main Range National Park (MRNP) experienced unprecedented burning and was severely impacted by the 2019-2020 'Black Summer' bushfires. This report aims to understand how rainforests recover from severe bushfires by comparing their recovery to eucalypt forests and which rainforest Regional Ecosystems (RE) are most at risk. Sentinel 2 imagery was used to calculate dNBR values for the fire and the three years following it and was validated through a paired t-test change detection to understand how severe the fire was and how the rainforest recovered. It was found that 81.28 km² burnt at extreme or high severity with 28.35 km² of rainforest recovering to only 0.35 km² burnt by 2022. RE 12.8.4 was found to be most at risk of fire due to the remaining 0.02 km² burnt by 2022 still appearing as moderate to high severity burns allowing for potential community transitions despite only burning 2.4 km² in total. These results show that rainforest can recover from extreme fires, however some ecosystems take more time to recover and are at higher risk. This study is important for future fire response to prioritise areas such as RE 12.8.4 for protection and for furthering understanding of rainforest's resilience to fire.

Keywords: recovery, dNBR, rainforest.

¹ Esta publicación es posible gracias a un acuerdo de colaboración entre la Revista PLANEEO y el proyecto Wildfire Exchange (WildfireX), consistente en la publicación de un dossier especial con los dos trabajos ganadores del Concurso Internacional Wildfire Exchange 2024. Para mayor información acerca del proyecto WildfireX, se invita a visitar su sitio web: <https://wildfirex.c/>.

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son un amenaza recurrente en el sureste de Queensland (SEQ) y se caracterizan por su capacidad para alterar significativamente los ecosistemas que atraviesan (Qi, Zhou & Feng, 2021). Las selvas tropicales no están adaptadas a estos incendios, ya que han experimentado miles de años entre siniestros de baja severidad e intensidad (Thorley, Srivastava & Shapcott, 2023). Sin embargo, a finales de 2019 y principios de 2020, las selvas subtropicales del este de Australia experimentaron incendios forestales extremadamente severos e intensos (Thorley et al., 2023). El Parque Nacional *Main Range* (MRNP) fue particularmente afectado en 2019 y se encuentra a aproximadamente 90 km de Brisbane, como se muestra en la Figura 1.

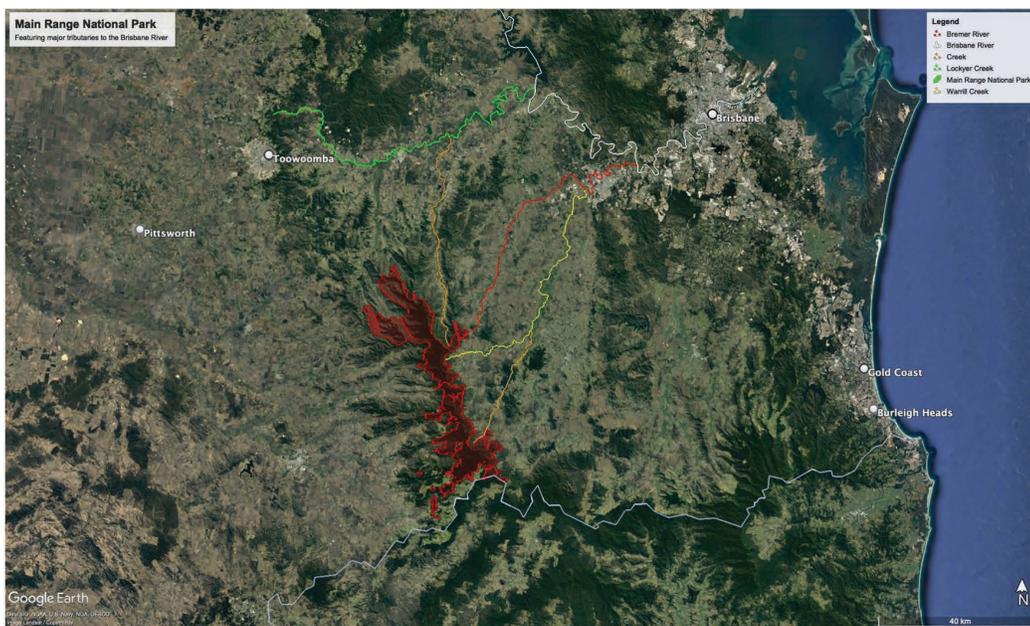


Figura 1. Mapa del Parque Nacional *Main Range* y afluentes del río Brisbane al que contribuye su cuenca. Fuente: Elaboración propia, Google Earth (2023) y Queensland Department of Environment and Science (2013a).

El parque tiene una extensión de 30.170 ha y, tras los incendios forestales, 25.919 ha fueron quemadas, lo que representa el 85,9% del área total del parque (Smith, Velasquez & Pickering, 2021). El MRNP forma parte del área del Patrimonio Mundial de Gondwana, conocida por su flora y fauna de gran valor medioambiental, que permanecen relativamente inalteradas en comparación con sus ancestros (Australian Government, 2023). Debido a la importancia del MRNP y a la previsión de que los incendios de alta severidad sean cada vez más comunes debido al cambio climático (Smith et al., 2021), es importante comprender la severidad de los incendios forestales y evaluar la recuperación de la selva tropical. La recuperación se refiere al regreso del ecosistema a su estado previo al incendio en términos tanto de la composición, la cobertura de follaje como de la fauna existente (Saunders et al., 2021). Es vital comprender la recuperación, ya que muestra cuán resilientes son las selvas tropicales y permite influir en la orientación de los objetivos de conservación y gestión de incendios. La teledetección es una técnica clave para analizar este caso, ya que puede mostrar eficazmente la cobertura de follaje y la salud de la vegetación a gran escala temporal y

espacial. Esto significa que, en preparación para futuros eventos, si una zona es vulnerable a los incendios forestales, se puede proteger para ayudar a mantener los ecosistemas y preservar un entorno equilibrado de áreas quemadas y no quemadas en la selva tropical (Saunders et al., 2021). Esta investigación tiene como objetivo responder a la pregunta de cómo se recuperan las selvas tropicales de los incendios forestales severos, y lo hará investigando el evento de los incendios forestales del “Verano Negro” entre septiembre y diciembre de 2019. Se calcularán los valores de dNBR durante los 6 meses previos al incendio, de abril a septiembre de 2019, inmediatamente después de los incendios, en diciembre de 2019, y en diciembre de 2020, 2021 y 2022 para evaluar la recuperación. Dado que el MRNP no está compuesto en su totalidad por selva tropical, la recuperación se comparará con la de los bosques circundantes utilizando el Marco de Ecosistemas Regionales (RE) de Queensland. A través de este análisis, se identificará la recuperación de la selva tropical en comparación con la de los bosques de eucalipto y el RE de selva tropical con mayor riesgo de incendios forestales. Como resultado, el objetivo principal de este informe es evaluar la recuperación del MRNP respondiendo a la pregunta de investigación y utilizar los resultados para informar a los gestores sobre dónde deben centrarse los esfuerzos de conservación y protección en futuros incendios severos.

REVISIÓN DE LITERATURA

Los estudios previos sobre la recuperación de las selvas tropicales tras incendios forestales han sido limitados, ya que estos incendios no ocurren con frecuencia, y gran parte de la investigación se centra en la severidad y la extensión del daño. Sin embargo, aún existen varios estudios que han abordado la recuperación de las selvas tropicales mediante teledetección. Zhang et al. (2021) estudiaron la selva amazónica y utilizaron el satélite MODIS, que ofrece la mejor resolución para la extensión del área, con píxeles de 500 m (Zhang et al., 2021). A una escala similar, Thorley et al. (2023) estudiaron toda la región del sureste de Queensland (SEQ) y utilizaron una combinación de imágenes de Sentinel 2 para sitios de entrenamiento a pequeña escala y MODIS cuando se ampliaba el área (Thorley et al., 2023). En la mayoría de los estudios, las imágenes de Landsat y Sentinel fueron las más adecuadas debido al tamaño de píxel más pequeño, de 20 a 30 m (Gibson & Hislop, 2022; Knox & Clarke, 2012; Bonney et al., 2020). Para estudios de tamaño medio, como los de Hines et al. (2021) y Laidlaw et al. (2022), que analizaron los incendios forestales del “Verano Negro” en el Scenic Rim en 2019, fue necesario combinar varios sensores, utilizando imágenes de Planet y Sentinel 2 para obtener la imagen de mayor calidad (Hines et al., 2021; Laidlaw et al., 2022). Por último, el análisis de Smith et al. (2021) sobre los incendios forestales del “Verano Negro” en SEQ adoptó un enfoque diferente y utilizó únicamente el sensor de radiometría infrarroja visible (VIIRS) de la NASA (Smith et al., 2021). El resto de los estudios utilizaron las bandas roja, verde, azul, infrarrojo de onda corta (SWIR) e infrarrojo cercano (NIR) (Zhang et al., 2021; Gibson & Hislop, 2022; Knox & Clarke, 2012; Hines et al., 2021; Laidlaw et al., 2022; Thorley et al., 2023; Bonney et al., 2020).

Si bien, los estudios investigaron diferentes áreas, algunos utilizaron los mismos métodos de procesamiento de imágenes. A excepción de Smith et al. (2021), que emplearon enfoques de SIG, todos los estudios utilizaron técnicas de teledetección para analizar la recuperación tras los incendios y correcciones de enmascaramiento de nubes para asegurar que las imágenes fueran de la más alta calidad (Bonney et al., 2020; Laidlaw et al., 2022; Knox & Clarke, 2012; Gibson & Hislop, 2022; Hines et al., 2021; Thorley et al., 2023; Zhang et al., 2021). La principal diferencia entre los estudios fue el método utilizado para analizar la recuperación. En Thorley et al. (2023) y Zhang et al. (2021), se utilizó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en combinación con el Índice de Quema Normalizado (NBR) para comprender la recuperación. El NDVI se calcula sumando las bandas NIR y roja, y dividiendo el resultado entre la diferencia de la banda NIR y la banda roja, lo que da un valor que indica cuán saludable está la vegetación (Zhang et al., 2021). El NBR utiliza la banda NIR menos la banda SWIR, dividida por la suma de ambas bandas (NIR + SWIR), y se usa para determinar la severidad del incendio (Thorley et al., 2023). A pesar de usar ambas técnicas, se encontró que el NBR era más útil, ya que el NDVI puede verse afectado por sequías o por las estaciones del año, mientras que el NBR proporcionó una representación más precisa de la recuperación real del bosque (Thorley et al., 2023; Zhang et al., 2021). El resto de los estudios (Bonney et al., 2020; Gibson & Hislop, 2022; Hines et al., 2021; Knox & Clarke, 2012; Laidlaw et al., 2022) utilizaron NBR o el NBR diferenciado (dNBR), que se calcula restando el NBR posterior al incendio del NBR pre-incendio. En general, el dNBR fue el método más preciso, con niveles de precisión superiores al 91% en Bonney et al. (2020) y Gibson y Hislop (2022). Sin embargo, es notable que el NBR tuvo una menor precisión para valores pequeños (Gibson & Hislop, 2022).

Los tres métodos utilizados dieron resultados diferentes, y se encontró que el método NBR/dNBR fue el más efectivo para identificar la severidad de la quema y la recuperación del incendio. Esto se debe a que la comparación entre las imágenes pre y post-incendio es mucho más confiable que el NDVI. Aunque el método de SIG de Smith et al. (2021) fue útil para escalas grandes, a escalas más pequeñas resulta inexacto (Smith et al., 2021), lo que hace que el dNBR sea el mejor método a utilizar. Por último, a pesar de que el método NBR+ desarrollado por Alcaras et al. (2022) tiene una alta precisión del 98% y no requiere enmascaramiento de nubes o agua, que generan errores en el método NBR normal, es el primer estudio en utilizar el método NBR+, por lo que requiere más pruebas (Alcaras et al., 2022). Un resumen de los principales atributos de cada estudio y sus hallazgos más importantes se puede ver en la Tabla 1.

A partir de los estudios previos, existen brechas y áreas donde las investigaciones futuras deben enfocarse. En primer lugar, al analizar escalas más grandes, como lo han hecho la mayoría de los estudios, la resolución espacial puede ser demasiado baja, lo que no proporciona resultados precisos. Esto se observó en Zhang et al. (2021), donde, en escalas mayores, los sensores ópticos a veces no pudieron distinguir entre diferentes coberturas vegetales debido a la resolución más gruesa (Zhang et al., 2021). Como resultado, estudios a menor escala, como el de Knox y Clarke (2012) en la región de Nueva Inglaterra y el de

Cita del artículo	Área del estudio	Fecha del estudio	Sensores utilizados y tamaño de píxel	Algoritmos	Principales hallazgos
Alcaras et al., 2022	Noreste de Sicilia, área de 500 km ²	24 de julio - 24 de agosto de 2019	Sentinel 2A, 20m	NBR, NBR+, otras comparaciones	NBR+ es un método más efectivo para identificar áreas quemadas.
Bonney et al., 2020	Kangaroo Island	Años de incendios forestales: 1988 - 2020	Landsat 7 y Landsat 8, 50m	NBR	Las áreas con menor vegetación sobreviviente se recuperaron más rápidamente; los bosques de eucaliptos tienen una alta capacidad de recuperación.
Gibson & Hislop, 2022	SEQ, esquina sureste de Australia, Alpes Australianos	Inmediatamente después del incendio y un año después	Sentinel 2, 20m	dNBR	La mitad de los bosques de eucaliptos se recuperaron en aproximadamente un 80% un año después del incendio, pero la recuperación fue limitada en áreas afectadas por sequías y en ecosistemas sensibles al fuego, como los bosques lluviosos.
Hines et al., 2021	Parque Nacional Main Range	Inmediatamente después del incendio, con datos de campo registrados entre enero y abril de 2020	Landsat 8, Sentinel 2 y PlanetScope, 50, 10, 20 y 1.5m	NBR	Main Range fue severamente afectado, más que el resto de los parques en SEQ.
Knox & Clarke, 2012	Parque Nacional Gibraltar Range-Washpool	Evento de incendio en octubre de 2002 - octubre de 2009	Landsat 7, 50m	NBR	Hay poca evidencia de un cambio hacia un bosque más seco después de incendios severos en los bosques lluviosos.
Laidlaw et al., 2022	SEQ Scenic Rim	Temporada de incendios forestales 2019 - 2020	Sentinel 2 y PlanetScope, 10, 20 y 1.5m	NBR	La severidad no siempre correspondió con el mismo nivel de impacto ecológico.
Smith et al., 2021	SEQ	1 de septiembre - 31 de diciembre de 2019	Sensor NASA VIIRS, conjuntos de datos GIS	Integración de GIS de puntos VIIRS y clasificación	El método es efectivo a gran escala, pero requiere refinamiento.
Thorley et al., 2023	SEQ	Inmediatamente después del incendio y un año después	Sentinel 2, 20m	dNBR para 5 parques nacionales, ampliado a toda SEQ en GIS	Los bosques lluviosos suprimieron los incendios; sin embargo, los bosques lluviosos más húmedos y antiguos refugios fueron los más afectados.
Zhang et al., 2021	Selva Amazónica	Enero de 2012 - diciembre de 2020	MODIS, 500m	NDVI, NBR	Estos métodos mostraron una recuperación rápida al centrarse en las hojas en lugar de la humedad del suelo; NBR es más preciso.

Tabla 1. Resumen de revisión de estudios. Fuente: Elaboración propia.

Bonney et al. (2020) en la Isla Canguro, proporcionaron resultados más efectivos sobre el rebrote real. Dado que la teledetección se realiza desde una vista aérea, a menos que se verifique con datos de campo, estudios como los de Gibson y Hislop (2022) y Bonney et al. (2020) podrían no reflejar una recuperación precisa, ya que el sensor solo puede observar el dosel, omitiendo potencialmente especies clave del suelo y del sotobosque que solo están presentes en un ecosistema completamente recuperado (Gibson & Hislop, 2022). Si bien la recuperación tras incendios en los bosques lluviosos de SEQ ha sido estudiada tanto por Hines et al. (2021) como por Laidlaw et al. (2022), estos trabajos se enfocaron en la severidad del fuego y las pérdidas en el ecosistema, más que en el rebrote de los bosques lluviosos (Laidlaw et al., 2022; Knox & Clarke, 2012). Además, debido al tamaño de sus análisis, que abarcaron toda la región de Scenic Rim, el área más afectada del Parque Nacional Main Range (MRNP) podría no haber sido mapeada de la manera más efectiva posible.

METODOLOGÍA

El proceso de recopilación de datos y secuenciación de imágenes implicará la adquisición de imágenes del satélite Sentinel-2 del MRNP, las cuales serán corregidas y mejoradas para que se pueda realizar el análisis NBR. Los resultados se compararán con mapas conocidos de severidad de incendios NBR, imágenes en verdadero color (RGB) y análisis de detección de cambios para su validación. Esto se muestra en la Figura 2.

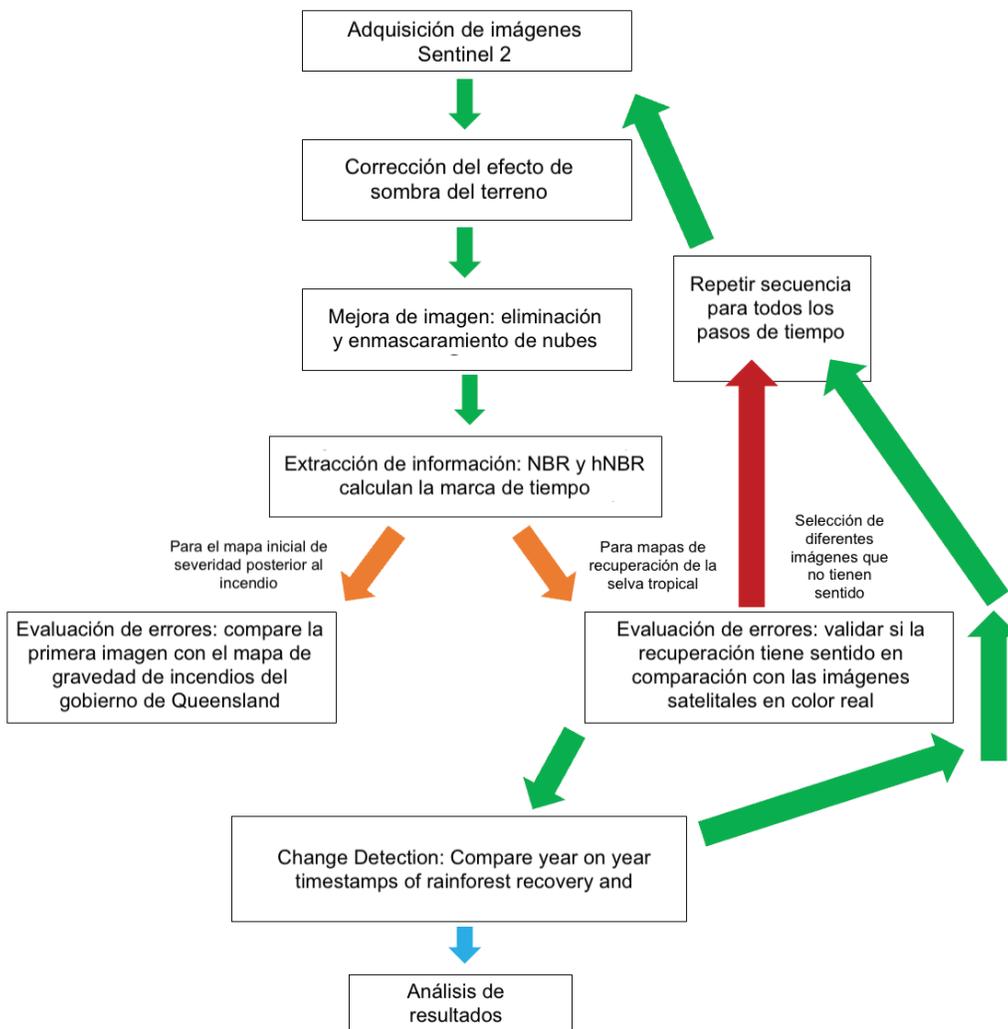


Figura 2. Diagrama de flujo de métodos que muestra la secuencia de procesamiento de imágenes. Fuente: Elaboración propia.

Se utilizó Sentinel-2 ya que proporciona imágenes de alta resolución con píxeles de 20m, lo que representa mejor la escala espacial para el área de estudio debido a su gran tamaño y la necesidad de precisión. Asimismo, Sentinel-2 dispone de las bandas NIR y SWIR para calcular el NBR; sin embargo, debido a que su resolución más alta es de 10 m, su uso para la validación de imágenes RGB está limitado (Alcaras et al., 2022). Los efectos de las sombras

del terreno se eliminarán de las imágenes antes de la mejora utilizando las bandas NBART de Sentinel-2, que corrigen la reflectancia superficial y las sombras del terreno, y la función 'load_ard', que carga datos listos para el análisis que han sido corregidos geoméricamente, atmosféricamente y por el terreno (Krause et al., 2021). Las nubes se eliminarán utilizando la función de máscara, asegurando la factibilidad de los datos. La principal razón por la que se utiliza el dNBR es debido a su éxito en otros estudios, así como su mayor fiabilidad en comparación con el método NDVI. Se encontró que era el método más exitoso en Knox y Clarke (2012) y Laidlaw et al. (2022), quienes analizaron escalas temporales similares (Knox & Clarke, 2012) y la misma ubicación (Laidlaw et al., 2022). A pesar de que el NBR+ mostró buenos resultados en Alcaras et al. (2022), se utilizó el dNBR ya que el área de estudio no presenta grandes cuerpos de agua y la máscara de nubes elimina de manera eficaz la otra fuente de error del NBR. Como resultado, el dNBR es el método más eficaz para entender la recuperación post-incendio.

El MRNP es el área de estudio seleccionada debido a que forma parte del Patrimonio Mundial de Gondwana, debido a sus vitales bosques tropicales ubicados en las laderas más altas de la cadena montañosa (Tanner-Macallister, Rhodes & Hockings, 2018). Las cumbres crean masas de nubes brumosas que provocan alta humedad y precipitaciones, lo que favorece grandes zonas de selva tropical en las laderas de barlovento (Tanner-Macallister et al., 2018). El MRNP alberga hábitats cruciales para el relictos icónico de Gondwana, "Nothofagus moorei" o haya antártica (Queensland Department of Environment and Science, 2013b) en el sur del parque (Australian Government, 2023), y el históricamente talado "Toona ciliate" o cedro rojo (Queensland Department of Environment and Science, 2013b). Una variedad de otras especies cubre el resto del área de 128,17 km² de la selva tropical, que es una zona de alta biodiversidad (Thorley et al., 2023). Existen 28 REs (unidades de vegetación) de abundancia variable en el parque, de las cuales 8 son selvas tropicales, sin contar los REs transicionales (Queensland Government, 2023a). Los REs más comunes de selva tropical son 12.8.4, 12.8.5 y 12.8.9, que cubren la mayoría de los picos, áreas de alta elevación y barrancos del parque (Queensland Government, 2023a). La Figura 3 muestra la distribución de la selva tropical y el bosque de eucalipto, y las Figuras 4 a 6 muestran ejemplos de REs de selva tropical en el parque.

Como se puede observar, el dosel de los REs de selva tropical está dividido en un estrato intermedio y un dosel superior. En su mayoría, cubre el suelo desde arriba y tiene baja variedad de especies (Queensland Government, 2013), lo que lo hace fácilmente detectable por los satélites.

Áreas de selva tropical y bosque de eucaliptos en Main Range National Park

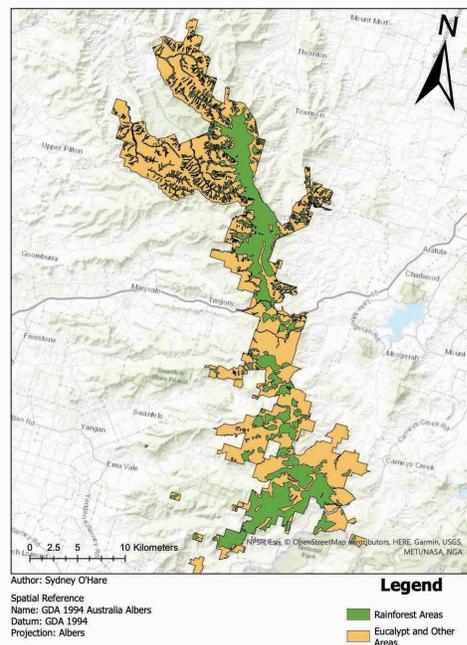


Figura 3. Distribución de áreas de bosques tropicales y eucaliptos en el Parque Nacional Main Range. Fuente: Elaboración propia, utilizando Queensland Government (2023a).



Figura 4. Bosque tropical RE 12.8.9 en el Parque Nacional Main Range a lo largo de Dalrymple Creek. Se encuentra comúnmente en barrancos y crestas expuestas en el parque dominado por especies de enredaderas y "Lophostemon confertus" (Queensland Government, 2023a). Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Bosque tropical RE 12.8.4 en la sección norte de Goomburra. RE 12.8.4 es altamente vulnerable al fuego y es común en áreas de gran elevación de la mitad norte del Parque Nacional *Main Range* (Queensland Government, 2023a). El RE está dominado por bosques de vid notófilo con rodales dispersos de pino (Queensland Government, 2023a). Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. RE 12.8.5 de selva tropical en el monte Matheson. Se encuentra en las secciones sur del parque, a más de 600 m de altura, y proporciona refugio para muchas especies endémicas y amenazadas, estando dominado por especies de enredaderas "Notophyll" (Queensland Government, 2023a). Fuente: Elaboración propia.

Dado que en el parque existen una gran variedad de paisajes, además de la selva tropical, se mapearán otras áreas de bosque, pero estas se utilizarán para comparar la recuperación con otros tipos de cobertura. La figura 7 muestra el área de estudio a analizar.

En la Figura 7, el área de estudio cubre la mayor parte del parque y excluye las secciones más al sur cerca de Killarney, ya que fueron las áreas menos afectadas (Hines et al., 2021).

Las imágenes satelitales utilizadas cubren la misma extensión espacial, bandas espectrales y tienen las mismas correcciones radiométricas. Las bandas espectrales utilizadas no cambian, porque los cálculos de NBR y las imágenes RGB son las únicas necesarias y requieren las bandas roja, azul, verde, NIR y SWIR, a las que Sentinel 2 tiene acceso (Krause et al., 2021). Las correcciones radiométricas permanecen iguales entre las imágenes, siendo las máscaras de nubes, NBART y las correcciones de terreno 'load_ard' las mismas. El único aspecto que cambia entre las imágenes es el temporal, ya que se necesitan imágenes pre-incendio, post-incendio y en etapa de recuperación para completar el análisis. Esta información se resume en la Tabla 2.

Para restringir las imágenes satelitales a los límites del MRNP, se utilizó un *shapefile* obtenido del portal de datos del Gobierno de Queensland, Qspatial, ya que es la fuente más actualizada y precisa para los límites del parque. De manera similar, los *shapefiles* de RE

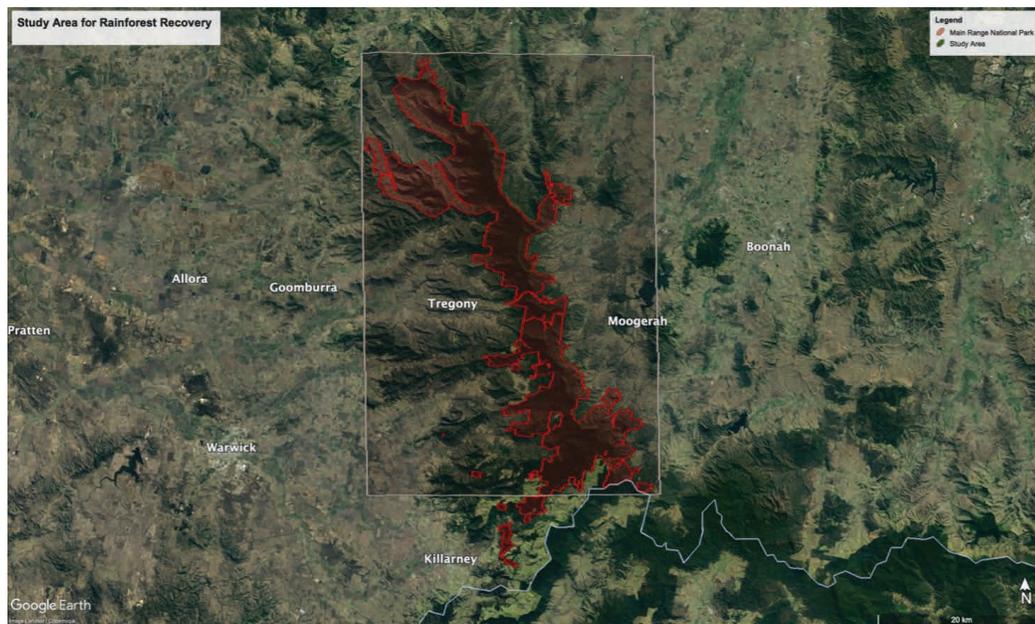


Figura 7. Área de estudio planificada que mide 34x56 km². Fuente: Elaboración propia, Google Maps (2023) y Queensland Department of Environment and Science (2013a).

Espacial	Espectral	Radiométrica	Temporal
El área es de aprox. 34x52 km ²	Roja, verde, azul, NIR y SWIR	Todas las imágenes se corregirán según las sombras del terreno y se mejorarán para enmascarar las nubes.	Múltiples marcas de tiempo Imagen previa al fuego aprox. un año Imagen posterior al incendio: diciembre de 2019 Imágenes posteriores al incendio en diciembre cada 12 meses hasta la actualidad

Tabla 2. Detalles de las imágenes satelitales. Fuente: Elaboración propia.

para el MRNP también se obtuvieron de Qspatial debido a su fiabilidad y se recortaron en ArcGIS Pro para contener únicamente los RE dentro del área del parque.

El procesamiento y análisis de datos siguió un proceso que acumuló los datos año tras año. En primer lugar, todas las herramientas de geoprocésamiento y mapeo se importaron al DEA Sandbox. El rango de fechas y horas del incendio se estableció en 6 meses para el período base y 4 meses para los períodos post-incendio, debido a que este fue el tiempo aproximado en que los incendios afectaron el parque (Hines et al., 2021). Los datos satelitales de Sentinel-2 se cargaron y recortaron para ajustarse a los límites del MRNP, los *shapefiles* de RE de selva tropical y bosque de eucalipto, y al área de interés para el estudio. Al cargar los datos, cada imagen utilizada tenía al menos un 80% de píxeles utilizables después de aplicar las máscaras de nubes y sombras, lo que garantizó resultados de alta calidad en la imagen compuesta de la serie temporal. La imagen compuesta de la serie temporal

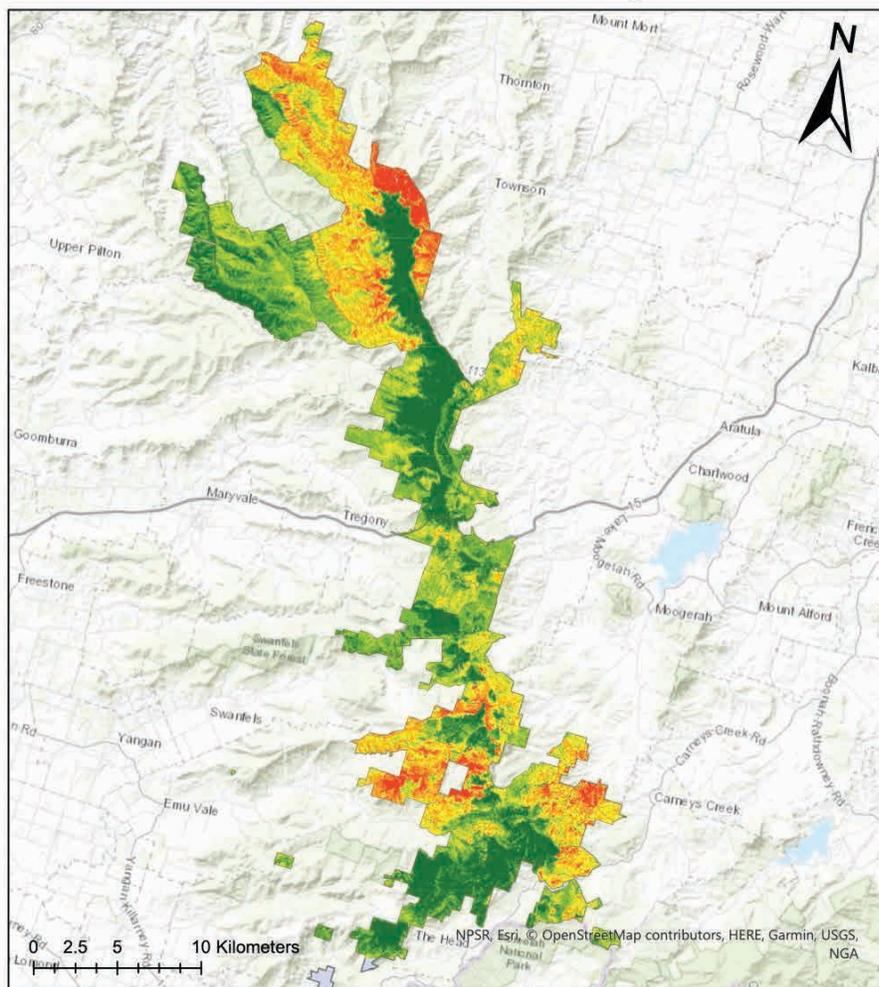
tiene en cuenta la estacionalidad de los datos al proporcionar el valor promedio de cada píxel. A continuación, se calcularon los valores de dNBR para el período base y post-incendio, proporcionando la cifra clave para evaluar la severidad del incendio y la recuperación, junto con una imagen de validación RGB. La severidad del incendio se calculó utilizando el método de clasificación de rupturas naturales, que divide la severidad del incendio en 5 clases. Los cálculos del área quemada y no quemada en la imagen de dNBR se procesaron y graficaron para comprender la recuperación. Para validar, se realizó un análisis de detección de cambios desde la fecha del incendio y cada intervalo de tiempo anual utilizando una prueba t emparejada con un valor p de $<0,05$ para significancia respecto a la media. Todas las figuras de los resultados de este informe se produjeron en el DEA Sandbox o ArcGIS.

Debido a la falta de datos de campo para la validación, las imágenes devueltas pueden tener errores en la severidad del incendio y la recuperación. Sin embargo, el mapa inicial de severidad se comparará con el mapa de revisión de los Parques Nacionales de QLD en Hines et al. (2021), ya que es el análisis original de severidad y tiene datos de campo que lo respaldan. Además, los resultados de dNBR se validan con la detección de cambios, lo que proporciona una medida estadística del cambio en el área de interés para el estudio. Debido a las limitaciones de datos, los análisis de detección de cambios se dividieron en secciones norte y sur. Existe una falta de imágenes satelitales de alta calidad y de acceso gratuito disponibles para el área objetivo de este estudio, por lo que las evaluaciones de error deberán basarse en la comparación con las imágenes RGB de Sentinel-2 de 10 m de píxeles de mayor calidad. Comparar con fotografías recientes de áreas afectadas por incendios y artículos de noticias para validación en el terreno también proporcionará validación en áreas específicas del parque. Por último, las áreas de selva tropical tendrán sus resultados de recuperación comparados con otras partes del parque para comprender mejor la recuperación de la selva tropical utilizando *shapefiles* de RE. Si el informe no estuviera limitado por recursos, se utilizarían datos de campo para la validación, similares a los muestreos de Hines et al. (2021), en áreas clave de alto impacto y alta importancia, así como imágenes satelitales de alta calidad para la validación y mapeo de la recuperación.

RESULTADOS

Siguiendo los métodos descritos, se obtuvieron los siguientes resultados. Al calcular el dNBR para el periodo inmediatamente posterior al incendio, se creó el siguiente mapa de severidad del incendio.

Gravedad de los incendios en el Parque Nacional Main Range tras los incendios forestales del verano negro de 2019-2020



Author: Sydney O'Hare
Created using Sentinel 2 Satellite Data and the Normalised Burn Ratio

Spatial Reference
Name: GDA 1994 Australia Albers
Datum: GDA 1994
Projection: Albers

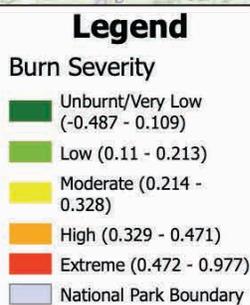


Figura 8. Mapa de la gravedad de los incendios forestales del “Verano Negro” de 2019 en el Parque Nacional Main Range. Fuente: Elaboración propia.

Mediante un análisis raster en la Figura 8, se encontró que la mayor parte del parque nacional fue quemada con una severidad muy baja o baja, totalizando 211,79 km². Esta información se resume en la Tabla 3:

Severidad	Área quemada (km ²)
Muy bajo/sin quemar	99.90
Bajo	111.89
Moderado	85.17
Alto	61.61
Extremo	19.67

Tabla 3. Área quemada (km²) en el Parque Nacional *Main Range* según el nivel de severidad en los incendios forestales del “Verano Negro” de 2019/20. Fuente: Elaboración propia.

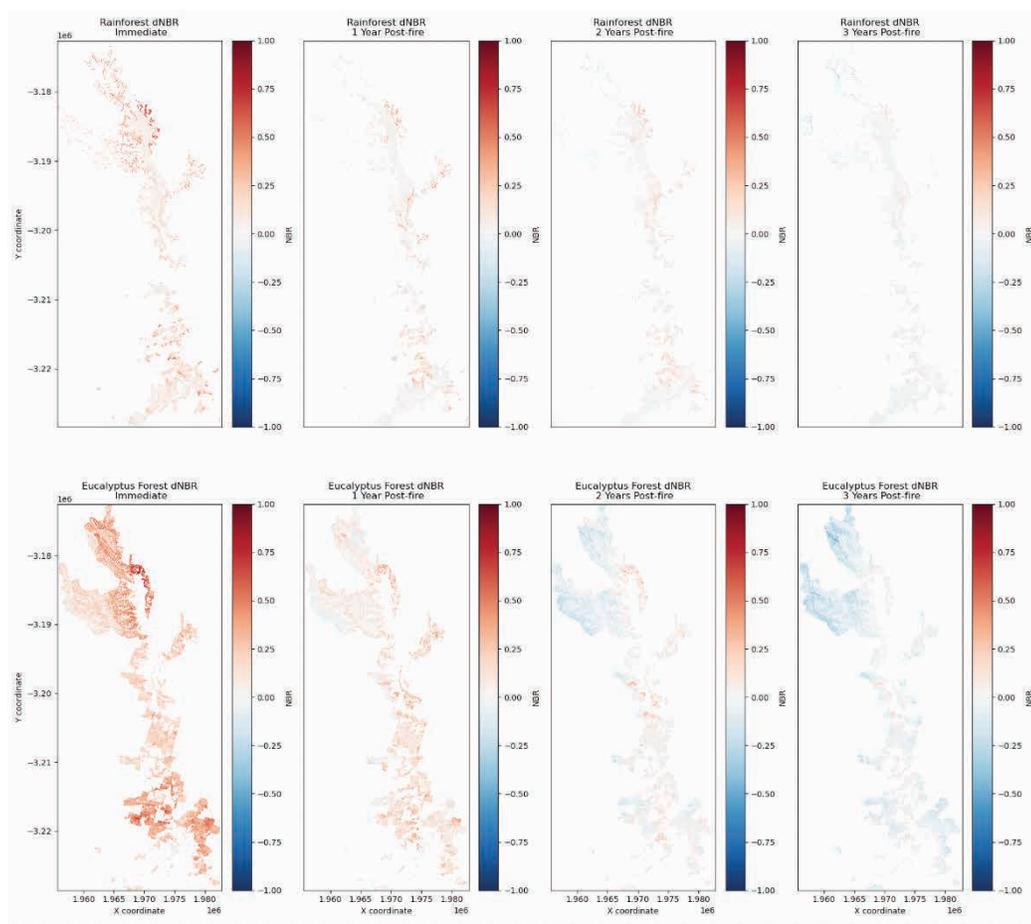


Figura 9. Serie temporal de dNBR para comprender la recuperación de la selva tropical (arriba) y el bosque de eucalipto (abajo) del Parque Nacional *Main Range* desde 2020 hasta 2022, después de los incendios forestales del “Verano Negro” de 2019/20. El rojo indica un cambio negativo con respecto al NBR base y el azul indica un cambio positivo. Cuanto más oscuro es el color, mayor es el cambio. Fuente: Elaboración propia.

Usando la Figura 9, se calcularon las áreas quemadas y la recuperación se resume en la Tabla 4 y la Figura 10.

	Área quemada (km ²)				Área total (km ²)
	Inmediato	1 año	2 años	3 años	
Selva tropical	28.35	8.24	2.98	0.35	128.17
Eucalyptus	150.77	28.69	4.35	0.25	254.68
Total	179.12	36.93	7.33	0.60	382.85

Tabla 4. Área quemada (km²) restante de selva tropical y bosque de eucalipto en los tres años posteriores a los incendios forestales del “Verano Negro” de 2019/20 en el Parque Nacional *Main Range*. Fuente: Elaboración propia.

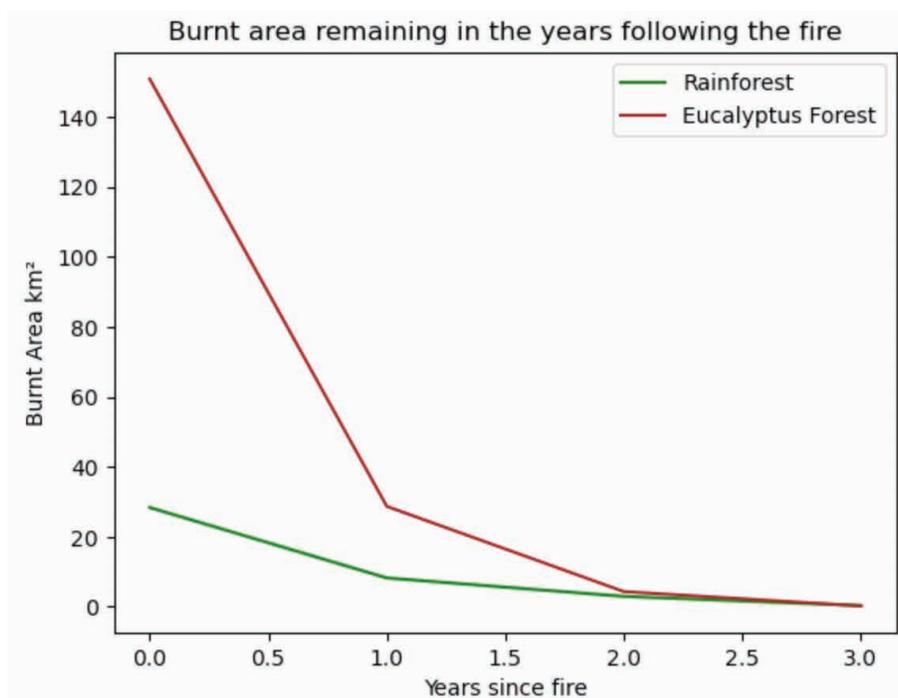


Figura 10. Recuperación de la selva tropical y el bosque de eucalipto en el Parque Nacional *Main Range* después de los incendios forestales del “Verano Negro” de 2019/20. Fuente: Elaboración propia.

Para comprender mejor la recuperación de la selva tropical y cuáles REs fueron más afectados, la recuperación de los REs específicos se resume en la Tabla 5 y la Figura 11.

REs	Área quemada (km ²)				Área total (km ²)	Porcentaje (%)
	Inmediato	1 año	2 años	3 años		
12.8.4	2.40	0.58	0.26	0.02	29.51	8.13
12.8.5	6.78	3.19	0.80	0.12	63.35	10.70
12.8.9	18.88	4.49	1.91	0.21	33.73	55.97
Total	28.06	8.26	2.97	0.35	126.59	22.17

Tabla 5. Área quemada (km²) restante en los RE 12.8.4, 12.8.5 y 12.8.9 en los tres años posteriores a los incendios forestales del “Verano Negro” de 2019/20 en el Parque Nacional *Main Range*. Fuente: Elaboración propia.

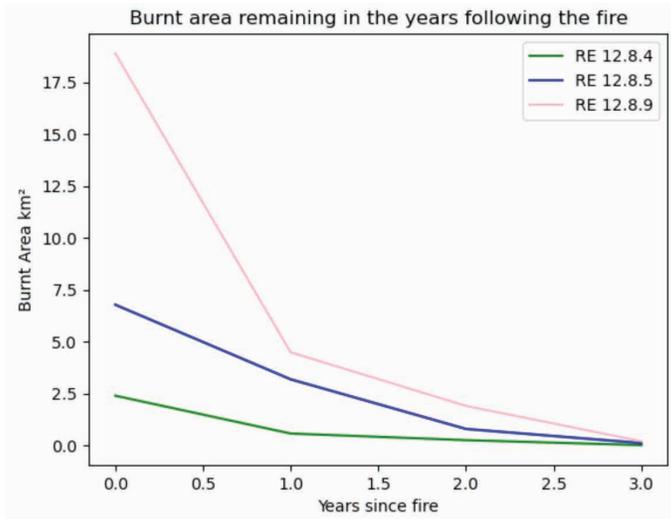


Figura 11. Recuperación de los REs 12.8.4, 12.8.5 y 12.8.9 en el Parque Nacional *Main Range* después de los incendios forestales del “Verano Negro” de 2019/20. Fuente: Elaboración propia.

Una vez recopilados los resultados, se realizó una detección de cambios para validar que realmente ocurrió un cambio en cada año de recuperación. Esto se puede ver en las Figuras 12 y 13, tanto inmediatamente después del incendio como tres años después, donde se observan claras desviaciones de la media que indican el cambio.

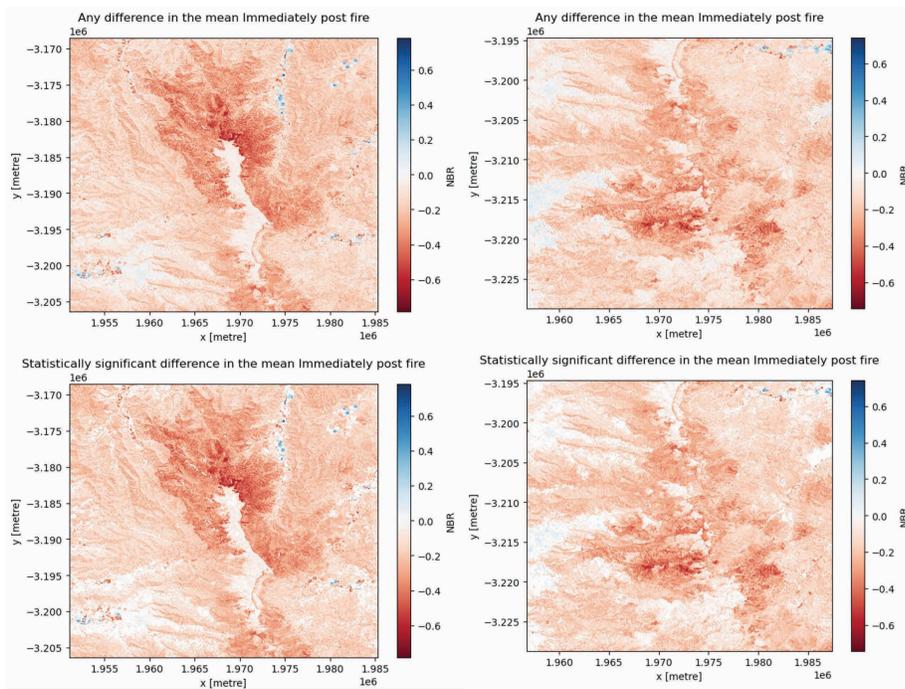


Figura 12. Validación de la detección de cambios dNBR para las secciones norte (izquierda) y sur (derecha) del Parque Nacional *Main Range*, inmediatamente después del incendio. El rojo indica cambio negativo, el azul indica cambio positivo, y cuanto más oscuro es el color, mayor es el cambio. En la parte superior izquierda y superior derecha se muestra cualquier diferencia en la media, mientras que en la parte inferior izquierda e inferior derecha se muestran los cambios estadísticamente significativos en la media. Fuente: Elaboración propia.

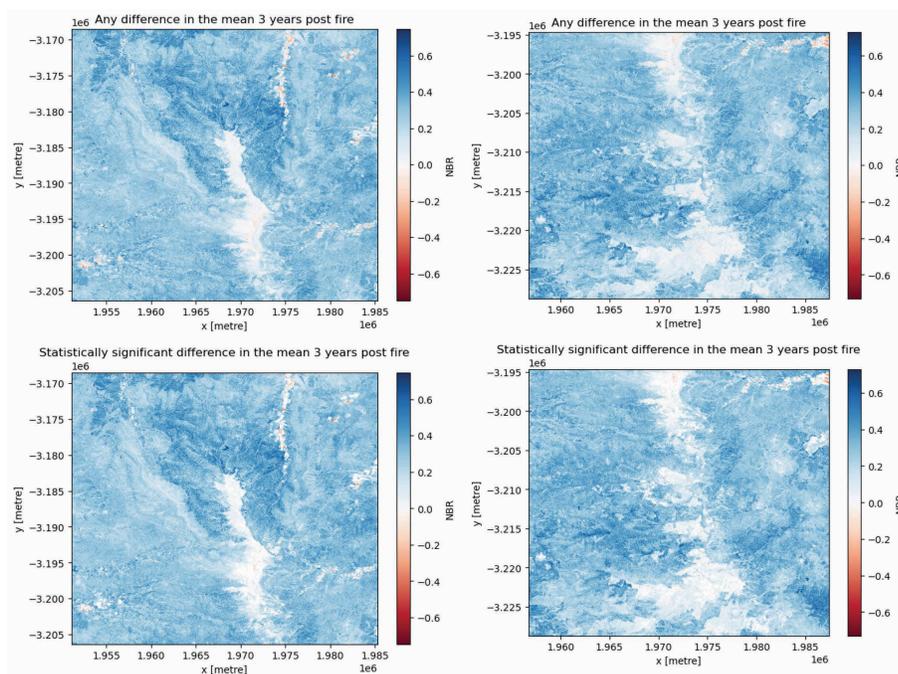


Figura 13. Validación de la detección de cambios dNBR para las secciones norte (izquierda) y sur (derecha), tres años después del incendio. El rojo indica cambio negativo, el azul indica cambio positivo, y cuanto más oscuro es el color, mayor es el cambio. En la parte superior izquierda y superior derecha se muestra cualquier diferencia en la media, mientras que en la parte inferior izquierda e inferior derecha se muestran los cambios estadísticamente significativos en la media. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN

Como se puede ver en las Figuras 9 y 10, el incendio que afectó al MRNP fue un evento destructivo, con una severidad de quema particularmente alta en las secciones más al norte y al sur. Estos resultados son validados eficazmente por la detección de cambios en la Figura 12, que muestra un cambio estadísticamente significativo respecto al valor base. En general, las áreas que más se quemaron y con mayor intensidad fueron las de bosque de eucalipto, como se observa al comparar la Figura 8 con la Figura 9. La Tabla 2 muestra que 150,77 km² de bosque de eucalipto fueron quemados, en comparación con solo 28,35 km² de selva tropical. Asimismo, el área que se quemó con los valores más altos de dNBR en la Figura 9, en el gráfico inmediatamente posterior al incendio, es la misma que registró los valores más altos de severidad de quema de dNBR de 0,977 en la Figura 8, en la sección más al norte. Esto es consistente con lo encontrado por Hines et al. (2021), Gibson y Hislop (2022) y Thorley et al. (2023), quienes establecieron que el eucalipto fue el que más se quemó y con mayor intensidad. Además, se recuperó más rápido que la selva tropical, como se ve en la Figura 10, dejando solo 0,25 km² de área quemada después de tres años, en comparación con 0,35 km² de selva tropical.

La selva tropical se recuperó a un ritmo más lento, ya que aún existen áreas rojas en la Figura 9 para todos los períodos de tiempo. Esto se respalda con la Figura 10, donde el área quemada regresa más rápido para el eucalipto en comparación con la selva tropical, y en la Figura 13, donde las diferencias son más significativas en las áreas de eucalipto. A pesar de ser más lenta que la recuperación del bosque de eucalipto, la selva tropical comenzó a recuperarse en el primer año, alcanzando aproximadamente el 60%, lo que contradice a Gibson y Hislop (2022), quienes encontraron poca recuperación en la selva tropical. Esto puede deberse a que Gibson y Hislop (2022) analizaron un tipo diferente de selva tropical en los Alpes Australianos. Sin embargo, las áreas que se quemaron con niveles altos y extremadamente altos carecen de recuperación y siguen apareciendo como quemadas en el gráfico de dNBR tres años después del incendio en ambas áreas. Esto se debe a que se pierde una mayor parte del ecosistema, lo que significa que hay más por recuperar para volver a los niveles previos a la perturbación (Gorta et al., 2023). Para la selva tropical, esto toma más tiempo, ya que no está adaptada al fuego, lo cual se observa en la velocidad de recuperación más lenta en las Figuras 9 y 10, y es respaldado por Gibson y Hislop (2022) y Knox y Clarke (2012).

Cuando se calculó el dNBR para cada RE, los resultados de la Tabla 4 mostraron que el RE 12.8.9 fue, el que más se quemó, con 18,88 km², en comparación con solo 9,18 km² para los RE 12.8.4 y 12.8.5 combinados. Esto probablemente se debe a que el RE 12.8.9 se encuentra en barrancos y orillas de arroyos adyacentes a áreas de eucalipto, lo que facilita que los incendios lo afecten (Queensland Government, 2023b). Como se ve en la Figura 11, a los tres años, cada ecosistema se había recuperado a niveles muy bajos de áreas quemadas; sin embargo, las velocidades de recuperación fueron diferentes. El RE 12.8.9 pudo recuperar más área más rápido que el RE 12.8.5 en el primer año y el RE 12.8.4 durante los tres años completos. Por tanto, a pesar de haber tenido áreas quemadas extensas y de alta intensidad, se encontró que el RE 12.8.9 pudo recuperarse rápidamente de incendios intensos, lo que está respaldado por las pautas de gestión del Gobierno de Queensland, que indican que este RE responde a incendios de alta intensidad y severidad poco frecuentes (Queensland Government, 2023b). Mientras tanto, el RE 12.8.4 repeló la mayoría de los incendios, pero no se había recuperado completamente para 2022, particularmente en el norte más alejado. A pesar de que solo quedaban 0,25 km² quemados en 2022, esta área fue clasificada en su mayoría como de severidad moderada. Esta falta de recuperación podría representar la transición del RE a un nuevo estado comunitario, lo cual es una posibilidad para las selvas tropicales después de quemas extremas (Knox & Clarke, 2012). Por lo tanto, se considera que el RE 12.8.4 tiene el mayor riesgo de incendio forestal, ya que es extremadamente sensible al fuego y es propenso a la invasión de especies y a la transición comunitaria cuando se quema con demasiada intensidad (Queensland Government, 2023b).

A pesar de los resultados obtenidos, existen limitaciones, principalmente en la validación de datos. En primer lugar, el mapa de severidad del incendio en la Figura 8 no coincide en varios lugares con el mapa de severidad del Gobierno de Queensland presentado por Hines et al. (2021), que en algunos casos no detectó áreas quemadas y en otros encontró

zonas donde no las había. El mapa de Hines et al. (2021) se muestra en el Apéndice 11, y la probable razón de la diferencia es su acceso a datos de campo confiables y estratégicamente ubicados para la validación, utilizando además solo cuatro clases. La falta de datos de campo para la validación es una limitación clave en este informe, ya que sin esos datos no se pueden confirmar posibles cambios en el ecosistema. Los datos de campo también permitirían validar y ayudarían a modelar el dNBR del resto del parque. Por lo tanto, la selva tropical puede haber perdido su sotobosque desde el incendio, pero parecería haberse recuperado, ya que el dosel sigue siendo el mismo. Esto es crucial, ya que la pérdida del sotobosque representa un cambio en el RE o la comunidad (Knox & Clarke, 2012), y debido a la naturaleza de este estudio, tales cambios son desconocidos.

También hubo limitaciones en el cálculo de áreas quemadas al enmascarar la imagen según los límites de los *shapefiles* del parque nacional, la selva tropical y el bosque de eucalipto. Por lo tanto, la evaluación del error en las áreas quemadas se limitó por la falta de conocimiento sobre la superficie real de NAN. Además, aunque solo quedaban 0,35 km² de área quemada de selva tropical para el tercer año, aún existen áreas rojas en la Figura 9. Estos datos se calcularon con un umbral de 0,2 para el dNBR, lo que significa que el área quemada restante podría haber necesitado un umbral más bajo para ser detectada.

CONCLUSIONES

La selva tropical del MRNP pudo recuperarse en los tres años posteriores al incendio; sin embargo, no fue tan rápida como la del bosque de eucalipto, y los diferentes REs se recuperaron a distintas velocidades. Debido a la presencia de áreas quemadas tres años después del incendio, la recuperación puede ocurrir o tardar más debido a la alta severidad de los incendios en las áreas de eucalipto y selva tropical. A pesar de que el RE 12.8.9 es el RE más susceptible al fuego, el RE 12.8.4 es el que tiene mayor riesgo de incendio debido al potencial de transiciones comunitarias tras el fuego y su lenta tasa de recuperación. Esto es fundamental para reducir el riesgo de futuros incendios forestales, ya que cualquier evento futuro en el MRNP podrá ser planificado de manera efectiva, centrándose en las áreas en las que se debe enfocar la protección y la rehabilitación. Cuanto más se sepa sobre el riesgo de incendios forestales y los impactos de los eventos históricos, mejor será la reducción de riesgos y la planificación futura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcaras, E., Costantino, D., Guastaferrero, F., Parente, C., & Pepe, M. (2022). Normalized Burn Ratio Plus (NBR+): A new index for Sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 14(7), 1727.

Australian Government. (2023). World Heritage places - Gondwana Rainforests of Australia. Retrieved August 15, 2023, from <https://www.dcceew.gov.au/parks-heritage/heritage/places/world/gondwana#resources>

Bonney, M. T., He, Y., & Myint, S. W. (2020). Contextualizing the 2019–2020 Kangaroo Island Bushfires: Quantifying landscape-level influences on past severity and recovery with Landsat and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 12(23), 3942.

Gibson, R. K., & Hislop, S. (2022). Signs of resilience in resprouting Eucalyptus forests, but areas of concern: 1 year of post-fire recovery from Australia's Black Summer of 2019–2020. *International Journal of Wildland Fire*, 31(5), 545-557.

Gorta, S. B., Callaghan, C. T., Samonte, F., Ooi, M. K., Mesaglio, T., Laffan, S. W., & Cornwell, W. K. (2023). Multi-taxon biodiversity responses to the 2019–2020 Australian megafires. *Global Change Biology*, 29(23), 6727-6740.

Hines, H. B., Levy, S., Laidlaw, M. J., Midtaune, K., Finlayson, S., & Meiklejohn, A. (2021). Post-fire assessment report—Natural values: 2019 bushfire complex, Main Range National Park and adjacent QPWS estate, South West Queensland Region. Brisbane: Queensland Government.

Knox, K., & Clarke, P. (2012). Fire severity, feedback effects and resilience to alternative community states in forest assemblages. *Forest Ecology and Management*, 265, 47-54.

Krause, C., Dunn, B., Bishop-Taylor, R., Adams, C., Burton, C., Alger, M., ... & DEA Notebooks Contributors. (2021). Digital Earth Australia notebooks and tools repository. Canberra: Geoscience Australia.

Laidlaw, M. J., Hines, H. B., Melzer, R. I., & Churchill, T. B. (2022). Beyond bushfire severity: Mapping the ecological impact of bushfires on the Gondwana Rainforests of Australia World Heritage Area. *Australian Zoologist*, 42(2), 502-513.

Qi, F., Zhou, Y., & Feng, S. (2021). Strengthening destinations' resilience from bushfires - A study of Eastern Australia. *Journal of Management and Sustainability*, 11(2), 43-56.

Queensland Department of Environment and Science. (2013a). Main Range National Park—Facts and maps, WetlandInfo Website. Retrieved August 15, 2023, from <https://wetlandinfo.des.qld.gov.au/wetlands/facts-maps/national-park-main-range/>

Queensland Department of Environment and Science. (2013b). Plants of Main Range National Park, WetlandInfo website. Retrieved August 18, 2023, from <https://wetlandinfo.des.qld.gov.au/wetlands/facts-maps/wildlife/?ArealD=national-park-main-range&Kingdom=plants>

Queensland Government. (2013). Rainforests. Retrieved September 1, 2023, from <https://www.qld.gov.au/environment/plants-animals/habitats/rainforests#:~:text=Rainforests%20in%20South%20East%20Queensland,covered%20tree%20trunks%20are%20typical.>

Queensland Government. (2023a). Biodiversity status of 2021 remnant regional ecosystems - Queensland. Retrieved October 6, 2023, from <https://qldspatial.information.qld.gov.au/catalogue/custom/detail.page?fid={8FDF54D2-654C-4822-8295-1D8E8E772373}>

Queensland Government. (2023b). Search regional ecosystem descriptions. Retrieved October 9, 2023, from <https://apps.des.qld.gov.au/regional-ecosystems/>

Saunders, M. E., Barton, P. S., Bickerstaff, J. R., Frost, L., Latty, T., Lessard, B. D., ... & Umbers, K. D. (2021). Limited understanding of bushfire impacts on Australian invertebrates. *Insect Conservation and Diversity*, 14(3), 285-293.

Smith, I., Velasquez, E., & Pickering, C. (2021). Quantifying potential effect of 2019 fires on national parks and vegetation in South-East Queensland. *Ecological Management and Restoration*, 22(2), 160-170.

Tanner-Macallister, S. L., Rhodes, J. R., & Hockings, M. (2018). A comparison of climate change impacts on park values on four Queensland World Heritage National Parks in Australia. *Australasian Journal of Environmental Management*, 25(3), 267-284.

Thorley, J., Srivastava, S. K., & Shapcott, A. (2023). What type of rainforest burnt in the South East Queensland's 2019/20 bushfires and how might this impact biodiversity. *Austral Ecology*, 48(3), 616-642.

Zhang, H., Hagan, D. F., Dalagnol, R., & Liu, Y. (2021). Forest canopy changes in the southern Amazon during the 2019 fire season based on passive microwave and optical satellite observations. *Remote Sensing*, 13(12), 2238.
