



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Estudio de la severidad de un mega incendio forestal y su posterior recuperación en la región mediterránea de Chile a partir de imágenes Sentinel-2

SANTELICES MOYA, R.¹, LÓPEZ FERNÁNDEZ, M.¹ y CABRERA ARIZA, AM.²

¹ Centro de Desarrollo para el Secano Interior. Universidad Católica del Maule.

² Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Maule. Universidad Católica del Maule.

Resumen

En las regiones de ámbito mediterráneo y como consecuencia del cambio climático, se han incrementado los incendios forestales de gran magnitud. En este contexto, en Chile en el verano de 2017 se quemaron en un solo incendio 184.000 ha. Posterior a un disturbio de estas características es necesario tomar decisiones tendientes a la restauración de estos sistemas. Por ello, con el objetivo de entregar herramientas rápidas y seguras para la evaluación inicial de la severidad, se analizó la magnitud de este disturbio usando herramientas de la teledetección. La severidad del fuego fue evaluada con los índices dNBR y RBR, mientras que la recuperación de la vegetación se evaluó mediante el índice NDVI, usando imágenes Sentinel-2. Los resultados muestran que el tipo de vegetación más afectada fueron plantaciones forestales (72%) y el bosque nativo mediterráneo (11%), este último conformado principalmente por especies de *Nothofagus*, el único bosque mediterráneo de estas especies en América. Es destacable que, después de dos periodos de crecimiento vegetativo, a diferencia de otros sistemas, se evidencia una rápida recuperación de estos sistemas nativos. Se esperaba que la exposición fuera un factor importante en la recuperación, pero no hubo diferencias significativas entre las posiciones de solana y umbría.

Palabras clave

Bosque mediterráneo, índices espectrales, restauración post incendio, sensores remotos.

1. Introducción

La zona mediterránea de Chile se caracteriza por tener una gran diversidad de especies endémicas y debido a que su biodiversidad ha disminuido a niveles críticos, fundamentalmente por factores antropogénicos, es considerada un “hotspot” de biodiversidad para la conservación (MYERS *et al.* 2000). Aquí se encuentran bosques caducifolios que están adaptados a los períodos secos prolongados del verano y cumplen un rol muy importante en la conservación del agua y el suelo orgánico, entre otros factores (ARROYO *et al.* 1996). En esta zona, también se concentra la mayor densidad de población de Chile y se genera una fuerte presión sobre los recursos naturales. Un resultado de lo antes señalado es la fuerte disminución de los bosques naturales en esta región debido al establecimiento de plantaciones con especies de rápido crecimiento (DONOSO y LARA 1996).

La amenaza del cambio climático global es una realidad que se cierne sobre los sistemas agroforestales (SANTELICES *et al.* 2018). Con el aumento de periodos prolongados de sequía y el incremento de las temperaturas ambientales, la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales es mayor. En efecto, durante el periodo estival 2016 - 2017 se produjeron los mayores incendios registrados en la zona mediterránea de Chile (DE LA BARRERA y RUIZ

2017), abarcando uno de ellos 184.000 ha en sólo algunos días, afectando distintos sistemas agrícolas y forestales, entre ellos parte importante de los bosques naturales de *Nothofagus glauca* (VALENCIA *et al.* 2018).

Ante un disturbio como un incendio, es necesario tomar medidas tendientes a la restauración de los sistemas afectados. El conocimiento de los niveles de severidad de un incendio forestal sobre un territorio constituye una importante herramienta de apoyo a la restauración post-incendio y la toma de decisiones es más efectiva si se dispone de mapas de rangos de severidad que sean fiables y se ajusten a la realidad (BOTELLA-MARTINEZ y FERNANDEZ-MANSO 2017). En este contexto, la teledetección es una herramienta que sin duda facilita este trabajo. Mediante el uso de imágenes satelitales, utilizando la combinación de diferentes bandas del espectro magnético, se han desarrollado varios índices fiables que permiten evaluar la severidad del incendio.

El índice NBR (*Normalized Burn Ratio*) es un índice espectral normalizado que mediante la combinación de las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo medio, permite evaluar la severidad del fuego en las zonas quemadas. Por otro lado, mediante la comparación de este índice calculado en forma anterior y posterior al incendio (i.e., *differenced Normalized Burn Ratio* (dNBR)), podemos obtener información más precisa y detallada (KEY & BENSON 2006). Tanto el NBR como el dNBR son índices que han sido ampliamente utilizados (ESCUIN *et al.* 2008, KEY & BENSON 2006, MILLER & THODE 2007, Navarro *et al.* 2017). Posteriormente, se han desarrollado otros índices, entre los que se puede mencionar al *Relativized Burn Ratio* (RBR) (PARKS *et al.* 2014) que se desarrolló como una alternativa mejorada respecto del *Relative differenced Normalized Burn Ratio* (RdNBR) (MILLER & THODE 2007), que se caracteriza por presentar algunas dificultades desde un punto de vista matemático. Por otra parte, la relación entre la severidad del fuego y la vegetación post-incendio, junto con la amenaza de especies arbóreas invasoras es un aspecto clave de la restauración (GARCÍA-DURO *et al.* 2016). La recuperación de la vegetación posterior al incendio ha sido ampliamente evaluada utilizando el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) (TORRES *et al.* 2018).

2. Objetivos

Analizar la severidad del fuego causado por un mega incendio forestal en la zona mediterránea de Chile y la posterior recuperación de la vegetación a partir de imágenes SENTINEL-2.

3. Metodología

3.1. Área de estudio

El área de estudio se ubicó en el incendio denominado "Las Máquinas", que fue el más grande registrado en el área mediterránea de Chile cubriendo un área de aproximadamente 184.000 hectáreas de diferentes sistemas agrícolas y forestales. El clima es típicamente mediterráneo, con una temperatura media de 13,7 ° C (máxima en enero 24,8 ° C y mínima en julio 5,9 ° C). La amplitud térmica es inferior a 20 ° C, como consecuencia de la acentuada termorregulación oceánica y la brisa marina fría y húmeda del noroeste en invierno y del suroeste en verano (SAN MARTÍN *et al.* 2013). El año anterior al incendio (2016), la

precipitación media anual varió de 308 a 434 mm, siendo la máxima en julio con 188 mm (DMC 2017). Durante el verano de 2017, hubo un escenario complejo consistente en la sequía acumulada y la alta carga de combustible disponible (CONAF 2017), lo que provocó el gran desarrollo de incendios forestales.

3.2. Imágenes satelitales y su procesamiento.

Las imágenes usadas en este estudio corresponden a imágenes que provienen del satélite Sentinel-2, proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA en inglés) a través del programa Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), que se caracterizan, entre otros aspectos, por tener una resolución de 10 y 20 m en función de la banda espectral. Las imágenes utilizadas se seleccionaron considerando que las fechas fueran lo más cercanas al inicio y al término del incendio, con el propósito de minimizar las diferencias fenológicas y de ángulo solar (Arellano *et al.* 2017). La imagen previa al incendio fue adquirida el 19.01.2017 y la posterior al incendio el 02.02.2017. Se realizó una corrección atmosférica y topográfica y, por otra parte, la influencia de las sombras no se consideró determinante. Una primera aproximación de la superficie alcanzada por el incendio fue determinada mediante la composición de las bandas R (B4 665 nm (rojo)), G (B3 560 nm (verde)), y B (B2 490 nm (azul)) correspondientes a la escena posterior al incendio. En la evaluación del estado y recuperación de la vegetación se utilizaron cuatro imágenes, las mismas que se mencionaron con anterioridad correspondientes al año 2017, de forma previa y posterior al incendio, y otras dos a los años posteriores y consecutivos al evento, con fecha 13/02/2018 y 08/02/2019, respectivamente.

3.3. Cálculo y evaluación de los índices espectrales para evaluar la severidad del fuego.

El índice NBR fue calculado a partir de las bandas del infrarrojo próximo (NIR) y el infrarrojo medio (SWIR) que, en el caso de Sentinel-2, corresponden a las bandas 8a (865 nm) y 12 (2190 nm), respectivamente. De acuerdo con KEY & BENSON (2006), se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$NBR = \frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)} * 1000$$

Los valores de dNBR se basan en el cambio temporal entre las imágenes antes y después del fuego y se obtienen por medio de la siguiente expresión:

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

El dNBR fue calculado utilizando los umbrales de clasificación propuestos por KEY & BENSON (2006). En tanto que el índice RBR fue calculado con la siguiente expresión (PARKS *et al.* 2014):

$$RBR = \frac{dNBR}{NBR \text{ pre incendio} + 1,001}$$

Una vez generado el índice, y al igual que para el dNBR, éste fue clasificado considerando los umbrales propuestos por KEY & BENSON (2006). Mediante el empleo de un

catastro de uso de suelo y vegetación, se estimó la superficie afectada en el área de estudio, clasificando el tipo de vegetación que resultó comprometida según su rango de severidad.

Además, la recuperación del bosque se estimó utilizando los valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) después del incendio, que se ha utilizado ampliamente para discriminar la dinámica de la vegetación posterior al incendio (GAO et al. 2020, MENG et al. 2015). Se utilizó el valor NDVI de 0,5 como límite inferior.

Con el fin de evaluar la recuperación vegetal asociada al efecto de la exposición del terreno, se superpuso la información correspondiente al NDVI posterior al incendio (febrero, 2017) y al NDVI del año 2019, sobre un modelo digital de elevaciones. La información topográfica para la región de estudio se obtuvo del Modelo de elevación digital global (GDEM) del Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). La versión 2 del producto se obtuvo sin costo de NASA REVERB (<https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp>).

4. Resultados

De acuerdo con los índices evaluados, el área afectada por el incendio corresponde a 193.619 hectáreas y las zonas con mayor severidad fueron las localizadas al norte y al oeste del área afectada por el incendio (Figura 1).

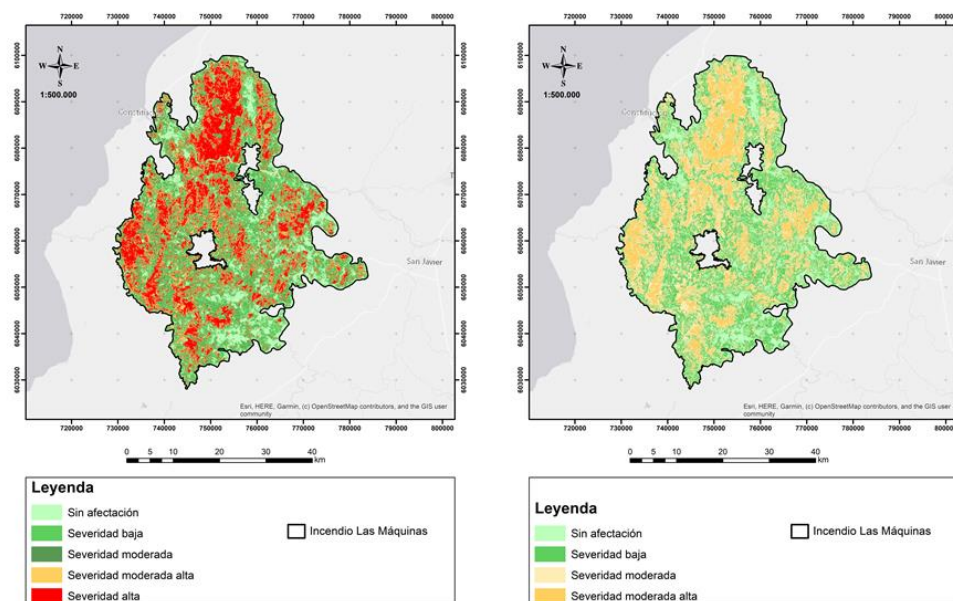


Figura 1: Representación del índice dNBR (izquierda) y RBR (derecha) en el incendio “Las Máquinas”.

En la tabla 1 se presentan los valores de la superficie afectada de acuerdo con la severidad del incendio y tipo de vegetación de los dos índices analizados. Se aprecian bastantes diferencias entre los índices, por ejemplo, en la superficie sin afectación, el índice RBR representa un 25% más que el dNBR, lo mismo ocurre en la superficie afectada con severidad baja y moderada, con un incremento del 52% y 34% respectivamente del RBR respecto al dNBR. Sin embargo, en las categorías más afectadas, la tendencia se invierte, y en la severidad alta, el índice RBR representa un 10% menos que el índice dNBR. Además, los

valores obtenidos con el índice RBR no superaron el umbral de severidad alta (0,66) propuesto por Key y Benson (2006) (Tabla 1).

Tabla 1: Superficie afectada (hectáreas) de acuerdo con el rango de severidad y el tipo de vegetación en función del índice dNBR y RBR.

Tipo de Vegetación	Sin afectación		Severidad baja		Severidad moderada		Severidad moderada a alta		Severidad alta	
	dNBR	RBR	dNBR	RBR	dNBR	RBR	dNBR	RBR	dNBR	RBR
Praderas y matorrales	7.715	8.158	6.214	7.183	2.324	2.605	1.624	1.055	1.126	-
Terrenos agrícolas	3.264	3.571	2.245	2.540	960	729	357	63	79	-
Plantaciones	14.630	20.202	28.958	48.354	32.664	44.656	30.702	25.228	31.485	-
Bosque mixto	722	1.056	1.293	2.136	1.361	2.262	1.631	2.547	2.995	-
Bosque esclerófilo	3.126	3.540	3.280	3.826	1.519	1.790	1.330	1.205	1.105	-
Bosque Nothofagus	1.059	1.754	1.891	3.005	1.804	2.403	1.857	3.750	4.302	-
Total	30.515	38.282	43.880	67.044	40.631	54.445	37.501	33.848	41.092	-

Según el NDVI, antes de la ocurrencia del incendio la vegetación presente en el área era, en términos de superficie, similar para la vegetación dispersa o poco vigorosa y la vegetación abundante y vigorosa. Después de ocurrido el incendio, y como era de esperar, se puede observar un fuerte incremento de zonas con suelo desnudo o vegetación muerta. La vegetación dispersa o poco vigorosa prácticamente iguala la superficie ocupada por el suelo desnudo. En cuanto a la vegetación abundante y vigorosa, se aprecian pequeñas áreas situadas mayoritariamente en la periferia del área abarcada por el incendio (Figura 2).

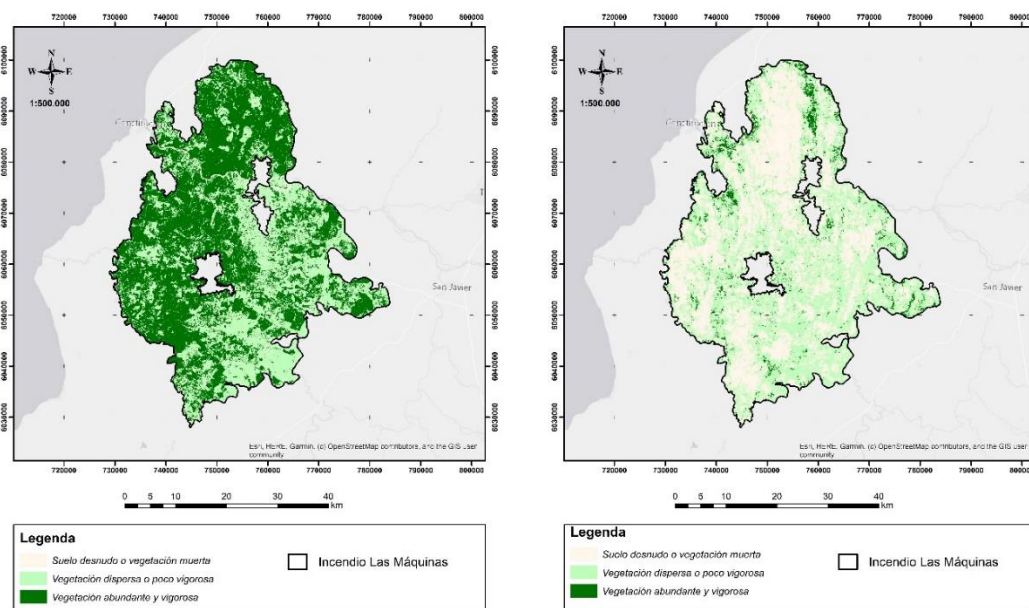


Figura 2: Representación del índice NDVI previo (izquierda) y post (derecha) al incendio “Las Máquinas” (año 2017).

Por otra parte, un año después de haber transcurrido el incendio (i.e., año 2018), se observa una disminución del suelo desprovisto de vegetación. Contrariamente, se observa un aumento de la vegetación dispersa o poco vigorosa, en casi la totalidad del área ocupada por el incendio. Se puede evidenciar claramente la recuperación vegetal que ha tenido el sector en un año, la cual probablemente corresponda en mayor cantidad a matorrales y sotobosque y, en un menor grado, a especies arbóreas. Después de dos temporadas (i.e., año 2019), se observa un fuerte incremento de la vegetación abundante y vigorosa, lo que indicaría una clara recuperación del sistema. En este mismo sentido, se aprecia una disminución de superficie tanto para el suelo desnudo, como para la vegetación dispersa o poco vigorosa (Figura 3).

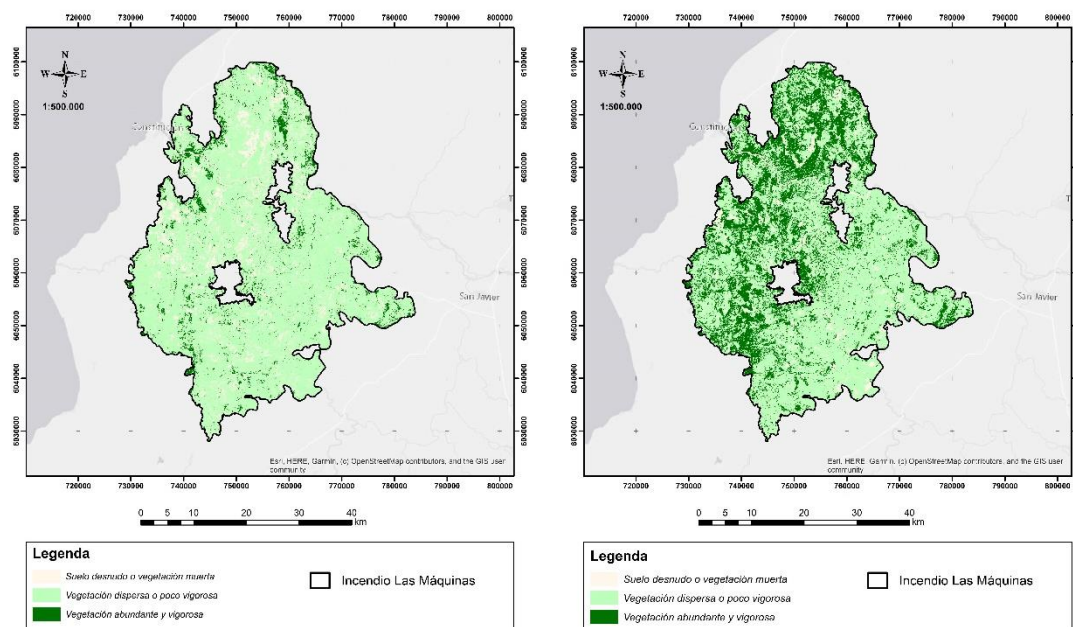


Figura 3: Representación del índice NDVI transcurridos dos años (izquierda, año 2018) y tres años (derecha, año 2019) del incendio "Las Máquinas".

Antes del incendio el suelo desnudo o con vegetación muerta sólo correspondía a 3.070 hectáreas, cifra que aumentó a más de 90.500 hectáreas como efecto inmediato de la combustión de diferentes estratos vegetales. No obstante, se visualiza que en los años 2018 y 2019 la superficie con esta clasificación disminuyó considerablemente llegando a las 9.500 hectáreas, lo que equivale a un 90% menos aproximadamente con respecto a la situación post incendio. En cuanto a la vegetación dispersa o poca vigorosa, la superficie no varió con respecto a la situación previa y posterior al incendio, con 82.000 y 95.800 hectáreas respectivamente. Sin embargo, en el año 2018 la superficie comprendida por esta categoría aumentó a 161.200 hectáreas y disminuyó 30.000 hectáreas en el 2019. La vegetación abundante y vigorosa antes del incendio alcanza una superficie de 110.200 hectáreas, las cuáles disminuyen drásticamente a 8.900 hectáreas luego del evento. Si bien en el 2018 no hubo un aumento significativo de la superficie en esta categoría (12.000 hectáreas), en el año 2019 el área con este tipo de vegetación ocupó 54.500 hectáreas, evidenciando un aumento importante con respecto al año anterior. A su vez se observa una disminución de la vegetación poco abundante y un aumento de la vegetación vigorosa en la zona, en relación con el NDVI del año 2018.

En la figura 4, se presentan los gráficos correspondientes al índice NDVI post incendio y en el año 2019, considerando cada punto de orientación geográfica.

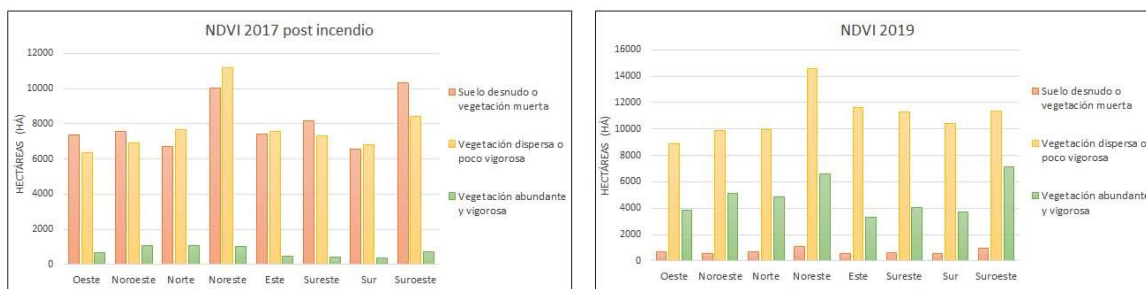


Figura 4: Efecto de la orientación geográfica de las laderas sobre la recuperación de la vegetación, usando como indicador el NDVI, después del incendio (izquierda, año 2017) y tras dos años de la ocurrencia del incendio Las Máquinas (derecha, año 2019).

En cuanto al comportamiento de las categorías de vegetación dispersa y vegetación abundante respecto a la orientación de la ladera, éstas presentaron la misma conducta, aumentando su superficie de Oeste a Noreste, disminuyendo de Noreste a Sur, y volviendo a incrementar en el Suroeste. No se aprecia un efecto de la exposición de ladera sobre la recuperación de la vegetación (Figura 4).

5. Discusión

El trabajo de gabinete para evaluar la severidad del incendio debe ser cotejado con mediciones en terreno, más aún con las diferencias registradas entre los dos índices utilizados en este trabajo (dNBR y RBR). Si no hay mediciones en terreno, los índices sólo podrán ser utilizados como indicadores de la cantidad relativa de vegetación presente. No obstante, se pueden considerar como una herramienta útil para la toma de decisiones en términos generales.

Además de los dos índices antes señalados, también se evaluó el RdNBR. No obstante, fue descartado debido a que los valores obtenidos fueron extremadamente bajos y altos (variaron entre -12 y 27 aproximadamente), y se encuentran por fuera de los rangos de severidad propuestos por KEY & BENSON (2006). Es probable que sea producto de fallas asociadas a la dificultad del desarrollo del denominador de la ecuación del RdNBR, tal como se mencionan PARKS *et al.* (2014) y BOTELLA-MARTINEZ y FERNANDEZ-MANSO 2017, razón por la cual PARKS *et al.* (2014) desarrollaron una nueva métrica (el RBR).

En cuanto a la superficie afectada, la vegetación dispersa o poco vigorosa aumentó en el año 2018 y disminuyó en el 2019. Esto se explica por el proceso de recuperación de la vegetación que se inicia en las comunidades luego del incendio, específicamente en zonas mediterráneas en donde suele comenzar el rebrote de plantas activadas por la humedad de la neblina costera, tal como lo mencionan QUINTANILLA y CASTRO (1998).

En cuanto a la vegetación abundante y vigorosa, en el primer año post incendio no hubo un aumento significativo, pero si lo hubo en el año 2019 (54.500 ha). Esto indica que se visualiza un beneficioso escenario para la recuperación vegetal en el área afectada por el incendio forestal “Las Máquinas”. Esta recuperación contribuirá en la dinámica hidrológica y erosiva del lugar, debido a que la presencia de vegetación en situación post fuego, ayuda a incrementar la humedad ambiental y, en consecuencia, controla la proporción de escorrentía y los efectos de erosión.

Las tasas de dinámica de recuperación vegetal post incendio son variables y dependientes de una serie de factores, como parámetros climáticos y del terreno. En regiones mediterráneas el crecimiento vegetal se ve afectado tanto por la topografía como la exposición geográfica del área (PETROPOULOS *et al.* 2014). En el hemisferio sur, las laderas orientadas al Norte y al Oeste (posición de solana) experimentan una mayor insolación y evapotranspiración con respecto a las laderas orientadas al Sur y al Este (posición de umbría). Por ello, en las exposiciones de umbría la vegetación tiende a recuperarse más rápidamente, debido a que poseen condiciones de humedad más favorables (PETROPOULOS *et al.* 2014). No obstante, los resultados de este estudio muestran que no hay un efecto producto de la exposición de la ladera en la recuperación de la vegetación.

Sin duda que el mayor impacto del incendio Las Máquinas se concentró en las plantaciones forestales, ocupando un 72% de la superficie total siniestrada. Esto se puede explicar debido a la sustitución que hubo de bosque nativo con el fin de establecer plantaciones de rápido crecimiento (SANTELICES *et al.* 2013). Si bien el grado de afectación es relativamente similar en términos de superficie, más de 60 mil ha fueron objeto de una severidad moderada a alta y alta, con el consiguiente detrimento ecológico y económico. Por otra parte, las coníferas son más inflamables debido a una mayor concentración de terpenos (DELLA ROCCA *et al.* 2017), lo que podría explicar, además de las condiciones meteorológicas favorables para un siniestro de esta naturaleza, la gran superficie quemada.

6. Conclusiones

Los resultados de este trabajo indican que el cálculo de índices como el dNBR pueden ser útiles como una primera aproximación en el cálculo de la severidad de un incendio, lo que puede facilitar la gestión y toma de decisiones tendientes a restaurar el sistema agrícola o forestal afectado por un incendio. Además, el uso de imágenes satelitales de libre acceso representa una ventaja a la hora de evaluar grandes superficies, disminuyendo el coste económico y temporal que supondría evaluar la severidad de un incendio de forma tradicional con campañas de terreno.

Por otro lado, el patrón espacial del NDVI tras el incendio muestra una regeneración relativamente rápida a los dos años del incendio, especialmente en aquellos sectores en los que la severidad del incendio fue alta, aunque hay que considerar que la regeneración posiblemente haya sido sólo por monte baja producto de los rebrotes.

7. Bibliografía

ARELLANO S, JA VEGA, FRY SILVA, C FERNANDEZ, D VEGA-NIEVA, JG ALVAREZ-GONZALEZ, AD RUIZ-GONZALEZ. 2017. Validation of the remote sensing indices dNBR and RdNBR to assess fire severity in the Oia-O Rosal (Pontevedra) wildfire in 2013. *Revista De Teledeteccion*:49-61.

ARROYO MTK, M RIVEROS, A PEÑALOZA, L CAVIERES, AM FAGGI. 1996. Phytogeographic relationships and regional richness patterns of the cool temperate rainforest flora of southern South America. In Lawford RG, PB Alaback, E Fuentes eds. High-Latitude rainforests and associated ecosystems of the west Coasts of the Americas: climate, hydrology, ecology and conservation. New York. Springer. p. 134-172.

BOTELLA-MARTINEZ MA, A FERNANDEZ-MANSO. 2017. Study of post-fire severity in the Valencia region comparing the NBR, RdNBR and RBR indexes derived from Landsat 8 images. *Revista De Teledeteccion* 49:33-47.

CONAF. 2017. Análisis del impacto de los incendios forestales ocurridos en enero y febrero de 2017 sobre los ecosistemas naturales presentes entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos de Chile. Informe Técnico. Santiago, Chile. 50 p.

DE LA BARRERA F, V RUIZ. 2017. Evaluación del impacto de los incendios de Chile Centro-Sur en el verano del año 2017. Primera entrega. Chile. International Association of Landscape Ecology (IALE) - Chile. 6 p.

DELLA ROCCA G, J MADRIGAL, E MARCHI, M MICHELOZZI, B MOYA, R DANTI. 2017. Relevance of terpenoids on flammability of Mediterranean species: an experimental approach at a low radiant heat flux. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 10:766-775.

DMC. 2017. Anuario Meteorológico 2016. Santiago, Chile. Dirección Meteorológica de Chile. 104 p.

DONOSO C, A LARA. 1996. Utilización de los bosques nativos en Chile: pasado, presente y futuro. In Armesto JJ, C Villagrán, MK Arroyo eds. Ecología de los bosques nativos de Chile. Santiago, Chile. Editorial Universitaria. p. 363-388.

ESCUIN S, R NAVARRO, P FERNANDEZ. 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing* 29:1053-1073.

GAO L, XF WANG, BA JOHNSON, QJ TIAN, Y WANG, J VERRELST, XH MU, XF GU. 2020. Remote sensing algorithms for estimation of fractional vegetation cover using pure vegetation index values: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 159:364-377.

GARCÍA-DURO J, A MANSO, O CRUZ, M BASANTA, M CASAL, O REYES. 2016. Regeneración post-fuego en relación con la severidad del incendio en un área atlántica de Galicia. Bases para la restauración. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 42:129-140.

KEY C, N BENSON. 2006. Landscape Assessment (LA). General Technical Report RMRS-GTR-164-CD. In Lutes D, R Keane, J Carati, C Key, N Benson, L Gangi eds. FIREMON: Fire Effects

Monitoring and Inventory System. Fort Collins, CO. USDA Forest Service, Rocky Mountains Research Station. p. 1-55.

MENG R, PE DENNISON, C HUANG, MA MORITZ, C D'ANTONIO. 2015. Effects of fire severity and post-fire climate on short-term vegetation recovery of mixed-conifer and red fir forests in the Sierra Nevada Mountains of California. *Remote Sensing of Environment* 171:311-325.

MILLER JD, AE THODE. 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment* 109:66-80.

MYERS N, RA MITTERMEIER, CG MITTERMEIER, GAB DA FONSECA, J KENT. 2000. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature* 403:853-858.

NAVARRO G, I CABALLERO, G SILVA, PC PARRA, A VAZQUEZ, R CALDEIRA. 2017. Evaluation of forest fire on Madeira Island using Sentinel-2A MSI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 58:97-106.

PARKS SA, GK DILLON, C MILLER. 2014. A New Metric for Quantifying Burn Severity: The Relativized Burn Ratio. *Remote Sensing* 6:1827-1844.

PETROPOULOS GP, HM GRIFFITHS, DP KALIVAS. 2014. Quantifying spatial and temporal vegetation recovery dynamics following a wildfire event in a Mediterranean landscape using EO data and GIS. *Applied Geography* 50:120-131.

QUINTANILLA V, R CASTRO. 1998. Seguimiento de las cubiertas vegetales post-incendios forestales en la zona mediterránea costera de Chile. *Serie Geográfica 1997-1998* 7:147-154.

SAN MARTÍN J, R SANTELICES, R HENRÍQUEZ. 2013. *Nothofagus alessandrii* Espinosa, Ruil. Familia: *Nothofagaceae*. In Donoso C ed. Las Especies Arbóreas de los Bosques Templados de Chile y Argentina: Autoecología. Valdivia, Chile. Marisa Cuneo Ediciones. p. 391-401.

SANTELICES R, C DONOSO, A CABELLO. 2013. *Nothofagus glauca* (Phil.) Krasser, Hualo, Roble maulino, Roble colorado (Maule). Familia: *Nothofagaceae*. In Donoso C ed. Las Especies Arbóreas de los Bosques Templados de Chile y Argentina: Autoecología. Valdivia, Chile. Marisa Cuneo Ediciones. p. 433-442.

SANTELICES R, S ESPINOZA, A CABRERA, C MAGNI. 2018. Gestión de riesgo como herramienta para la conservación de los bosques de *Nothofagus alessandrii*, una especie en peligro de extinción de Chile central. *Interciencia* 43:144-150.

TORRES J, J GONÇALVES, M MARCOS, J HONRADO. 2018. Indicator-based assessment of post-fire recovery dynamics using satellite NDVI time-series. *Ecological Indicators* 89:199-212.

VALENCIA D, J SAAVEDRA, J BRULL, R SANTELICES. 2018. Severidad del daño causado por los incendios forestales en los bosques remanentes de *Nothofagus alessandrii* Espinosa en la región del Maule de Chile. *Gayana botánica* 75:531-534.