

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL INCENDIO NILAHUE-BARAHONA MEDIANTE ÍNDICES ESPECTRALES *EX-ANTE* Y *EX-POST*.

ASSESSMENT OF THE NILAHUE-BARAHONA FIRE BY *EX-ANTE* AND *EX-POST* SPECTRAL INDICES.

Sr. Marco A. Peña¹ y Sr. Gonzalo Martínez²

RESUMEN

Este estudio evaluó el impacto del incendio Nilahue-Barahona, ocurrido en el verano de 2017 en la VI Región de Chile, mediante el uso de diferencias de índices espectrales de vegetación derivadas de imágenes óptico-satelitales Sentinel-2, adquiridas en fechas *ex-ante* y *ex-post*. Diferencias de índices de estado vegetal (de vigor, turgor y calcinación) resultantes de restar una imagen adquirida antes del incendio a otra inmediatamente después de ocurrido éste, fueron empleadas como medida de severidad de calcinación de la vegetación, en tanto que diferencias de los mismos índices resultantes de restar la imagen adquirida antes del incendio a otra exactamente un año después, fueron empleados como medida de recuperación de la vegetación calcinada. Luego de transcurrido un año del incendio, los valores de los índices mostraron un alza que dio cuenta de la recuperación experimentada por la biomasa quemada. El mapeo de las diferencias de NDVI obtenidas para las medidas previamente mencionadas, combinadas con otras fuentes cartográficas relevantes, contribuyeron a explicar el impacto de este incendio en atención a la comunidad vegetal pre-existente y su contexto topográfico, proveyendo con ello información útil para orientar posteriores acciones de restauración selectiva de los ecosistemas incendiados.

Palabras clave: Índices espectrales. Incendios forestales. Sentinel-2. Imágenes satelitales.

ABSTRACT

This study assessed the impact of the Nilahue-Barahona fire, occurred during summer 2017, in VI Region of Chile. To do that, differences of vegetation spectral indices were derived from Sentinel-2 optical satellite images, acquired on *ex-ante* and *ex-post* dates. Differences of vegetation state indices (of vigor, turgor and calcination) resulting from subtracting an image acquired before the fire to another one immediately after the fire, were used as a calcination severity measure of the vegetation. Meanwhile, differences of the same indices resulting from subtracting the image acquired before the fire to another one acquired just one year after it, were used as a recovery measure of the calcined vegetation. One year after the fire, the indices' values showed an increase that accounted for the recovery of the burnt biomass. The mapping of the NDVI differentials differences obtained for the previously mentioned measures, combined with other relevant cartographic sources, contribute to explain the impact of this fire by considering the preexisting vegetation communities and their topographic context. This study provides useful information to orientate subsequent selective restoration actions of the burnt ecosystems.

Keywords: Spectral indices. Wild fires. Sentinel-2. Satellite images.

¹ Departamento de Geografía, Universidad Alberto Hurtado. Cienfuegos 41, Santiago, Chile

² Departamento de Geografía, Universidad Alberto Hurtado. Cienfuegos 41, Santiago, Chile

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son unas de las perturbaciones más severas en los ecosistemas y sus ciclos biogeoquímicos, por cuanto destruyen biodiversidad, fragmentan hábitats, erosionan y esterilizan el suelo, disminuyen la calidad de las aguas y de la atmósfera, y liberan dióxido de carbono, entre otros efectos adversos. Si bien los incendios son ocasionados en gran medida por el hombre, el incremento de las temperaturas y la disminución de la humedad propiciadas por el cambio climático global han aumentado su ritmo e intensidad (González *et al.*, 2011; Díaz-Hormazábal *et al.*, 2016), particularmente en territorios caracterizados por veranos secos y cálidos, como aquellos de clima Mediterráneo, donde las variables de la triada del fuego (combustible, clima, topografía) se potencian (Díaz-Delgado, 2000; Font *et al.*, 2016).

Las acciones de restauración de los ecosistemas incendiados son clave para ayudar a su pronta regeneración, en especial si éstos tienen una baja resiliencia. Sin embargo, para que éstas sean llevadas a cabo eficientemente, es necesario en primer lugar, diagnosticar a tiempo la severidad con que la comunidad vegetal fue calcinada, para posteriormente evaluar el ritmo de recuperación de ésta (Díaz-Delgado *et al.*, 2003; Chuvieco y Kasischke, 2007). La teledetección óptica satelital ha sido utilizada ampliamente a este respecto, básicamente mediante la construcción de índices espectrales sensibles al estado físico-químico de la vegetación y su comparación entre fechas *ex-ante* y *ex-post* (Peña y Ulloa, 2017). Unos de los índices más empleados para este propósito, han sido los de verdor o vigor vegetal, como el NDVI (*normalized difference vegetation index*), por lo general construidos con las bandas (registros espectrales) del rojo; sensible a la absorción de clorofila foliar, e infrarrojo cercano; sensible a la abundancia de follaje sano (Hunt *et al.*, 1987; Kushla y Ripple, 1998; Escuín *et al.*, 2008). También destacan el NBR (*normalized burn ratio*) y el NDII (*normalized difference infrared index*), que junto con emplear la banda del infrarrojo cercano en su construcción, añaden una banda del infrarrojo de onda corta; sensible al contenido de agua foliar y por extensión, a la calcinación de la biomasa vegetal (Gao, 1996; Chuvieco *et al.*, 2002; Key y Benson, 2006).

En Chile este tipo de metodologías ha sido aplicada en incendios como los ocurridos en el Parque Nacional Torres del Paine, XI Región, donde

contribuyó a identificar áreas prioritarias de restauración vegetal (Navarro Cerrillo *et al.*, 2008), así como a mapear tanto la calcinación de la vegetación (Mattar *et al.*, 2012) como su recuperación (Peña y Ulloa, 2017). Asimismo, en La Rufina, VI Región, esta metodología contribuyó a estimar emisiones de gases de invernadero derivadas de la biomasa quemada (Vidal *et al.*, 2017).

Entre Diciembre del 2016 y Febrero del 2017, Chile se vio afectado por centenas de incendios que se extendieron entre las Regiones de Coquimbo y de Los Lagos, propiciados por características atmosféricas inusualmente favorables para su propagación e intensidad (“factor 30 – 30 – 30”, *i.e.*, temperatura sobre 30°, vientos de hasta 30 km/h y humedad por debajo de 30%) (CONAF, 2017; Pérez Mato, 2017). El descontrol de estos incendios derivó en un mega incendio que por su magnitud generó un récord mundial, que dio origen a una nueva categoría de clasificación; el primero de la llamada “sexta generación” (CONAF, 2017). Durante el evento, se produjeron los dos incendios más grandes de la historia de Chile: Las Máquinas (1.839,94 km²) y Nilahue Barahona (489,86 km²), siendo la severidad del primero de éstos evaluada mediante índices espectrales *ex-ante* y *ex-post* extraídos desde imágenes Landsat y Sentinel (CONAF, 2017). Sin embargo, a la fecha el incendio Nilahue Barahona no cuenta con ninguna evaluación sinóptica de este tipo, lo cual va en desmedro de cualquier acción de restauración de la vegetación que desee ser implementada en el corto plazo.

El presente estudio busca aportar a la evaluación del incendio Nilahue-Barahona, ocurrido aproximadamente entre el 17 y 28 de Enero de 2017 (ONEMI, 2017), mediante la estimación de la severidad con que éste afectó a las comunidades vegetales, así como de la recuperación que éstas han experimentado a la fecha, para cual se propuso el uso de diferencias de índices espectrales de estado vegetal, derivadas de imágenes óptico-satelitales Sentinel-2 adquiridas en fechas *ex-ante* y *ex-post*.

MATERIALES Y MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio corresponde a aquella afectada por el incendio Nilahue-Barahona, ubicada en el límite de las Provincias Cardenal Caro y Colchagua, pertenecientes a la VI Región del

Libertador Bernardo O'Higgins. Específicamente, el incendio comprometió a las comunas de Santa Cruz, Pumanque, Paredones, Pichilemu, Pichidegua, Peralillo, Palmilla, Marchigüe, Litueche y La Estrella, alcanzando una superficie de 489,86 km² entre las latitudes 34° 05' S y 34° 75' S.

El clima del área de estudio es de tipo Templado Cálido con lluvias invernales y estación seca prolongada (7 a 8 meses), con una alta nubosidad predominantemente entre las planicies litorales y la Cordillera de La Costa. La temperatura media anual alcanza 12,6° C con una amplitud térmica diaria y anual de 7° C. Las precipitaciones oscilan entre los 500 y los 1.000 mm anuales, concentrándose entre los meses de mayo y agosto. El relieve disminuye de altitud en dirección Este-Oeste, alcanzando para el área de estudio los ~300 msnm, con estribaciones de la Cordillera de La Costa que permiten el acceso de humedad desde la costa, favoreciendo condiciones de estabilidad atmosférica (Santibáñez *et al.*, 2017).

Las formaciones vegetales (agrupaciones de comunidades vegetales con una fisionomía y especie dominante) del área de estudio están compuestas principalmente por bosque esclerófilo y espinoso. Los pisos vegetacionales del primero están constituidos por (a) bosque esclerófilo Mediterráneo costero de Litre (*Lithrea caustica*) y Corcolén (*Azara integrifolia*), (b) bosque esclerófilo Mediterráneo costero de Litre y Peumo (*Cryptocarya alba*), (c) bosque esclerófilo Mediterráneo interior de Litre y Boldo (*Peumus boldus*). El segundo en tanto, corresponde a bosque espinoso Mediterráneo costero de Espino (*Acacia caven*) y Maitén (*Maytenus boaria*). Respecto al área incendiada, la vegetación nativa se presenta heterogéneamente fragmentada a causa de la ocupación de su nicho por plantaciones forestales de Pino (*Pinus radiata*) y Eucalipto (*Eucalyptus globulus*), que se han adaptado tanto al clima, como a la topografía local (Luebert y Pliscoff, 2006).

MATERIALES

El presente trabajo se basó en el uso de imágenes ópticas del área estudio adquiridas por el satélite de observación terrestre Sentinel-2, las que fueron descargadas desde el portal de libre acceso Copernicus, de la Agencia Espacial Europea (ESA, *European Spatial Agency*) (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>). El área incendiada es cubierta por un mosaico de dos imágenes Sentinel-2 pertenecientes a la misma

ruta orbital. El límite del área incendiada fue tomado de la cartografía realizada por el Centro de Información de Crisis basado en Satélites (ZKI, *Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation*), perteneciente a la Agencia Aeroespacial Alemana (DLR, *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*), mediante imágenes ResourceSAT-2 (ZKI, 2018).

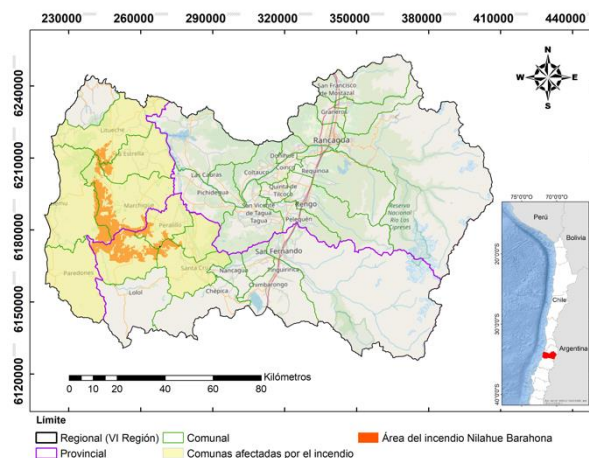


Figura 1. Localización del área de estudio, correspondiente al área afectada por el incendio Nilahue-Barahona, VI Región de Chile.

El estudio evaluó, por un lado, la severidad con que el incendio afectó a la cobertura vegetal del área de estudio, y por otro, la recuperación que ha experimentado la vegetación incendiada a la fecha. En el primer caso, se empleó un mosaico adquirido días antes del evento (20 de diciembre de 2016) y otro adquirido día después de finalizado éste (18 de febrero de 2017). En el segundo caso, se empleó un mosaico adquirido el 20 de diciembre de 2016 y otro adquirido exactamente un año después.

Las imágenes Sentinel-2 son capturadas por el sensor óptico MSI (*MultiSpectral Instrument*), que muestrea 13 bandas de variable anchura a lo largo del espectro solar, con resoluciones espaciales que van desde los 10 a los 60 m (Tabla 1). Las imágenes son distribuidas en unidades de reflectancia y con coordenadas UTM (Universal Transversal de Mercator), por lo que para los propósitos del presente estudio no requieren correcciones radiométricas y geométricas adicionales, excepto remuestrear los diferentes tamaños de píxel de sus bandas a 10 m.

| Resolución espacial (m) | # banda | Longitud de onda central (nm) | Ancho de banda (nm) |
|-------------------------|---------|-------------------------------|---------------------|
| 10 | 2 | 490 | 65 |
| | 3 | 560 | 35 |
| | 4 | 665 | 30 |
| | 8 | 842 | 115 |
| | 5 | 705 | 15 |
| 20 | 6 | 740 | 15 |
| | 7 | 783 | 20 |
| | 8a | 865 | 20 |
| | 11 | 1,610 | 90 |
| 60 | 12 | 2,190 | 180 |
| | 1 | 443 | 20 |
| | 9 | 945 | 20 |
| | 10 | 1,380 | 30 |

Tabla 1. Principales características técnicas de una imagen Sentinel-2.

CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES

En cada imagen fueron calculados cuatro índices espectrales relativos al estado de verdor, hídrico y de calcinación de la vegetación, cuya formulación es detallada en la Tabla 2.

| Categoría | Nombre | Notación | Fórmula para Sentinel-2 | Autor |
|-----------------------|---|---------------------|---|----------------------------|
| Estado de vigor | Normalized difference vegetation index | NDVI | $(\rho_{842} - \rho_{665}) / (\rho_{842} + \rho_{665})$ | Rouse <i>et al.</i> (1973) |
| | Red edge normalized difference vegetation index | NDVI ₇₀₅ | $(\rho_{740} - \rho_{705}) / (\rho_{740} + \rho_{705})$ | Gitelson y Merzlyak (1994) |
| Estado hídrico | Normalized difference infrared index | NDII | $(\rho_{842} - \rho_{1610}) / (\rho_{842} + \rho_{1610})$ | Hunt y Rock (1989) |
| Estado de calcinación | Normalized burn ratio | NBR | $(\rho_{2190} - \rho_{842}) / (\rho_{2190} + \rho_{842})$ | Key y Benson (2006) |

Tabla 2. Índices espectrales de vegetación empleados en este estudio.

CÁLCULO DE DIFERENCIAS DE ÍNDICES ESPECTRALES

Una vez calculados los índices en cada una de las imágenes anteriormente mencionadas se procedió a normalizarlos con el sentido de modificar sus escalas originales de decimales potencialmente

comprendidos entre -1 a 1, a una de decimales comprendidos entre 0 y 1, favoreciendo así su posterior interpretación entre fechas pre- y post-incendio. Para ello se empleó la siguiente fórmula:

$$X' = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$$

Donde, X es el valor del índice en un píxel dado y X_{\min} y X_{\max} son sus valores mínimo y máximo en la imagen, respectivamente. Una vez normalizadas las escalas de los índices, se procedió a restarlos según las fechas *ex-ante* y *ex-post* comparadas. Así, para evaluar la severidad de calcinación de la vegetación, la resta de índices fue hecha entre las fechas 20 de diciembre de 2016 y 18 de febrero de 2017. Para evaluar la recuperación de la vegetación en tanto, la resta de índices fue hecha entre las fechas 20 de diciembre de 2016 y 20 de diciembre de 2017. Las imágenes de las diferencias resultantes fueron clasificadas a partir de cuatro rangos empleando el criterio de cuantiles, lo cual facilitó su posterior interpretación y análisis.

Adicionalmente, el empleo de un mapa de comunidades vegetales del área de estudio, elaborado por CONAF (2013) mediante la interpretación de imágenes satelitales de moderada resolución espacial (e.g., Landat) y datos de campo, permitió obtener el comportamiento de dichas diferencias de acuerdo a tales unidades.

Por último, un modelo digital de elevación SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) del área de estudio, con una resolución espacial de 90 m, fue descargado desde el portal de libre acceso CGIAR-CSI (*CGIAR Consortium for Spatial Information*) (<http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>). A partir de éste fueron derivadas las variables de pendiente y exposición del terreno, que permitieron orientar de mejor manera la interpretación y análisis de la distribución espacial de la severidad y recuperación de la vegetación incendiada desde un punto de vista topográfico.

RESULTADOS

DIFERENCIA EX-ANTE Y EX-POST SEGÚN ÍNDICES ESPECTRALES

La Tabla 3 permite apreciar que todos los índices espectrales empleados experimentaron un descenso notorio de sus valores promedio luego de ocurrido el incendio, rindiendo las mayores diferencias entre fechas para los casos del NDVI y el NBR.

| Índice espectral | Diciembre 2016 | | Febrero 2017 | | Diferencia | |
|---------------------|----------------|----------|--------------|----------|------------|----------|
| | \bar{x} | σ | \bar{x} | σ | \bar{x} | σ |
| NDVI | 0,65 | 0,14 | 0,42 | 0,11 | 0,24 | 0,16 |
| NDVI ₇₀₅ | 0,63 | 0,13 | 0,47 | 0,08 | 0,17 | 0,13 |
| NDII | 0,5 | 0,15 | 0,4 | 0,11 | 0,11 | 0,13 |
| NBR | 0,61 | 0,17 | 0,37 | 0,15 | 0,24 | 0,18 |

Tabla 3. Media (\bar{x}) y desviación estándar (σ) de los índices espectrales de las fechas de diciembre de 2016 (pre-incendio) y febrero de 2017 (post-incendio), y su diferencia. Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 4 permite apreciar que después de un año de ocurrido el incendio todos los índices espectrales mantuvieron valores promedio por debajo de sus equivalentes de la fecha pre-incendio, sin embargo, sus diferencias fueron menores que en el caso anterior (Tabla 3).

| Índice espectral | Diciembre 2016 | | Diciembre 2017 | | Diferencia | |
|---------------------|----------------|----------|----------------|----------|------------|----------|
| | \bar{x} | σ | \bar{x} | σ | \bar{x} | σ |
| NDVI | 0,65 | 0,14 | 0,56 | 0,09 | 0,09 | 0,14 |
| NDVI ₇₀₅ | 0,63 | 0,13 | 0,52 | 0,08 | 0,11 | 0,13 |
| NDII | 0,5 | 0,15 | 0,43 | 0,1 | 0,08 | 0,16 |
| NBR | 0,61 | 0,17 | 0,45 | 0,12 | 0,16 | 0,2 |

Tabla 4. Media (\bar{x}) y desviación estándar (σ) de los índices espectrales de las fechas de diciembre de 2016 (pre-incendio) y de 2017 (post-incendio), y su diferencia. Fuente: Elaboración propia.

CARTOGRAFÍA DE SEVERIDAD DE CALCINACIÓN DE LA VEGETACIÓN

La Tabla 5 muestra las cuatro clases definidas para cada diferencia de índice resultante de restar las fechas diciembre de 2016 y febrero de 2017 (pre- y post-incendio, respectivamente), el que da cuenta de la severidad con que la vegetación fue calcinada. Cada rango o clase representa una superficie de 122 km², equivalente al 25% del total de ésta.

Una vez clasificadas las imágenes de las diferencias de índices espectrales, fue posible constatar una gran similitud en la distribución

| Índice espectral | Diferencia de diciembre 2016 y febrero 2017 | | |
|---------------------|---|-----------------|-------|
| | #clase | Umbral de rango | |
| | | Mín. | Máx. |
| NDVI | 1 | -0,56 | -0,09 |
| | 2 | -0,09 | 0,22 |
| | 3 | 0,22 | 0,36 |
| | 4 | 0,36 | 0,7 |
| NDVI ₇₀₅ | 1 | -0,48 | 0,04 |
| | 2 | 0,04 | 0,22 |
| | 3 | 0,22 | 0,27 |
| | 4 | 0,27 | 0,59 |
| NDII | 1 | -0,39 | -0 |
| | 2 | -0 | 0,08 |
| | 3 | 0,08 | 0,19 |
| | 4 | 0,19 | 0,69 |
| NBR | 1 | -0,39 | 0,09 |
| | 2 | 0,09 | 0,22 |
| | 3 | 0,22 | 0,37 |
| | 4 | 0,37 | 0,8 |

Tabla 5. Clases definidas para cada diferencia de índice espectral entre las fechas diciembre de 2016 (pre-incendio) y febrero de 2017 (post-incendio). Fuente: Elaboración propia.

espacial de sus clases, de modo que, para efectos de sintetizar los resultados obtenidos, se decidió

presentar sólo la cartografía de la diferencia de NDVI, tanto para el caso de severidad de calcinación como de recuperación de la vegetación incendiada.

La Figura 2 muestra la cartografía de severidad de calcinación de la vegetación empleando la diferencia clasificado de NDVI (resultante de restar las fechas de diciembre de 2016 y febrero de 2017). En color magenta se aprecian las áreas más severamente calcinadas (clase 4 de la Tabla 5).

Tabla 6. Media (\bar{x}) y desviación estándar (σ) de la diferencia de NDVI entre las fechas de diciembre de 2016 (pre-incendio) y febrero de 2017 (post-incendio), según comunidad vegetal. Fuente: Elaboración propia.

| Comunidad vegetal | | Diferencia de NDVI | |
|-------------------------|-------|--------------------|----------|
| Tipo | % | \bar{x} | σ |
| Roble – Hualo | 0,01 | 0,36 | 0,18 |
| Peumo – Quillay - Litre | 14,10 | 0,24 | 0,14 |
| Palma chilena | 0,55 | 0,23 | 0,13 |
| Espino | 20,92 | 0,26 | 0,16 |
| Bosque esclerófilo | 16,04 | 0,25 | 0,14 |
| Plantaciones | 30,53 | 0,29 | 0,16 |
| Uso agrícola | 8,91 | 0,09 | 0,09 |
| Matorrales y praderas | 8,46 | 0,16 | 0,13 |

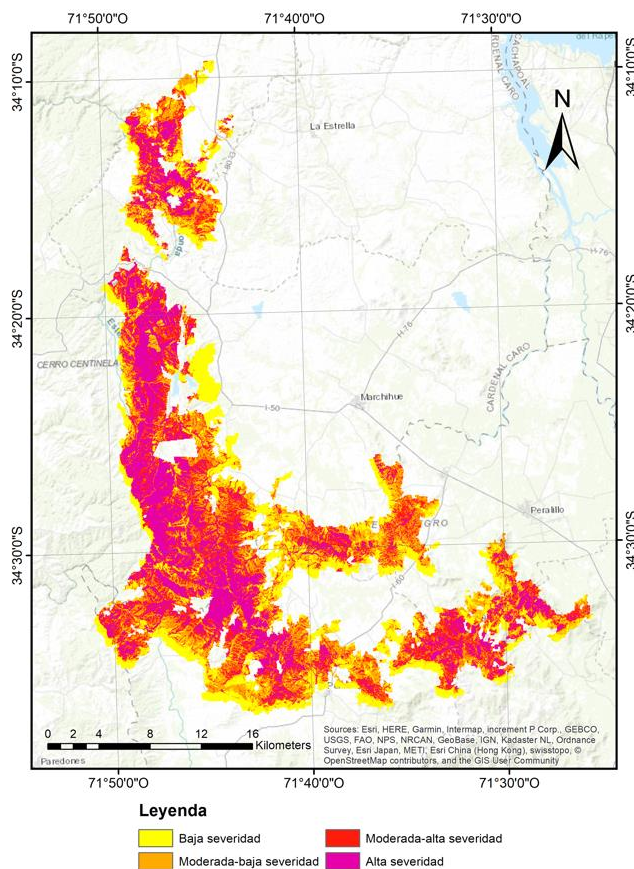


Figura 2. Cartografía de severidad del incendio derivada de la diferencia de NDVI entre las fechas de diciembre de 2016 y febrero de 2017. Fuente: Elaboración propia.

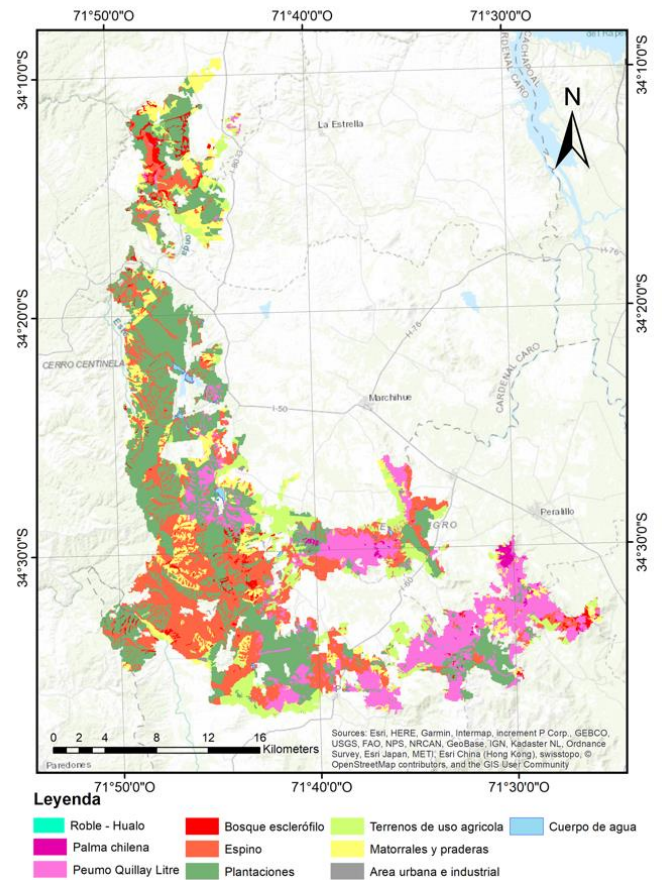
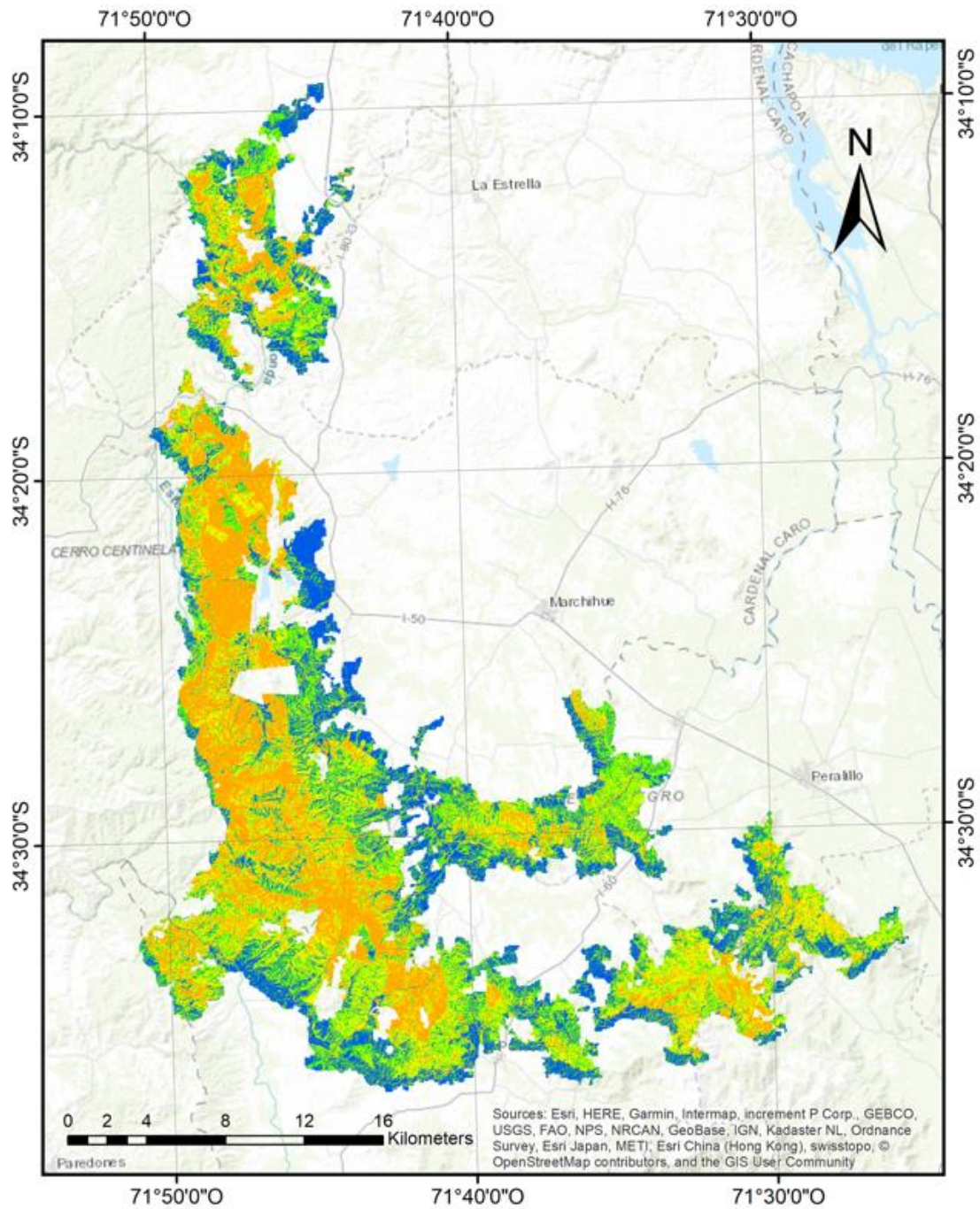


Figura 3. Mapa de comunidades vegetales del área incendiada. Fuente: CONAF (2013).

La superposición del mapa de comunidades vegetales del área de estudio (Figura 4) a la diferencia de NDVI entre las fechas de diciembre de 2016 y febrero de 2017, permite apreciar que, una vez finalizado el incendio, la calcinación del bosque fue particularmente alta en el caso de las comunidades de Roble-Hualo, mientras que fue la más baja en el caso de Matorrales y Praderas. El resto de las unidades sufrieron una similar calcinación.

CARTOGRAFÍA DE RECUPERACIÓN DE LA VEGETACIÓN CALCINADA

La Tabla 7 muestra las cuatro clases definidas para cada diferencia de índice espectral resultante de restar las fechas diciembre de 2016 y de 2017 (pre- y post-incendio, respectivamente), dando cuenta de la recuperación de la vegetación incendiada.



Legenda

- | | |
|--|--|
|  Alta recuperación |  Moderada-baja recuperación |
|  Moderada-alta recuperación |  Baja recuperación |

Figura 4. Cartografía de recuperación de la vegetación calcinada derivada de la diferencia de NDVI entre las fechas de diciembre de 2016 y diciembre de 2017. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra la cartografía de recuperación de la vegetación calcinada empleando la diferencia clasificada de NDVI (resultante de restar las fechas de diciembre de 2016 y de 2017). En color naranja se aprecian las áreas menos recuperadas (clase 4 Tabla de la Tabla 6).

| Índice espectral | Diferencia de diciembre 2016 y 2017 | | |
|---------------------|--|--------------------|-------|
| | #clase | Umbral de rango | |
| | | Mín. | Máx. |
| NDVI | 1 | -0,69 | 0,02 |
| | 2 | 0,02 | 0,07 |
| | 3 | 0,07 | 0,20 |
| | 4 | 0,20 | 0,70 |
| NDVI705 | 1 | -0,66 | 0,01 |
| | 2 | 0,01 | 0,08 |
| | 3 | 0,08 | 0,20 |
| | 4 | 0,20 | 0,64 |
| NDII | 1 | -0,85 | -0,04 |
| | 2 | -0,04 | 0,04 |
| | 3 | 0,04 | 0,18 |
| | 4 | 0,18 | 0,67 |
| NBR | 1 | -0,80 | -0 |
| | 2 | -0 | 0,12 |
| | 3 | 0,12 | 0,31 |
| | 4 | 0,31 | 0,86 |

Tabla 7. Clases definidas para cada diferencia de índice espectral entre las fechas diciembre de 2016 (pre-incendio) y de 2017 (post-incendio). Fuente: Elaboración propia.

La superposición del mapa de comunidades vegetales del área de estudio (Figura 4) a la diferencia de NDVI entre las fechas de diciembre de 2016 y 2017, permite apreciar que luego de un año de ocurrido el incendio los bosques plantados y nativo de Roble-Hualo presentaron la menor recuperación de biomasa, mientras que Matorrales y Praderas experimentaron la mayor. El resto de las unidades exhibieron una similar recuperación.

| Comunidad vegetal | Diferencia de NDVI | | | |
|-------------------------|--------------------|-------|-----------|----------|
| | Tipo | % | \bar{x} | σ |
| Roble – Hualo | | 0,01 | 0,17 | 0,14 |
| Peumo – Quillay - Litre | | 14,10 | 0,07 | 0,12 |
| Palma chilena | | 0,55 | 0,08 | 0,11 |
| Espino | | 20,92 | 0,10 | 0,13 |
| Bosque esclerófilo | | 16,04 | 0,08 | 0,12 |
| Plantaciones | | 30,53 | 0,15 | 0,15 |
| Uso agrícola | | 8,91 | 0 | 0,10 |
| Matorrales y praderas | | 8,46 | 0,02 | 0,11 |

Tabla 8. Media (\bar{x}) y desviación estándar (σ) de la diferencia de NDVI entre las fechas de diciembre de 2016 (pre-incendio) y 2017 (post-incendio), según comunidad vegetal. Fuente: Elaboración propia.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La distribución espacial de la severidad y recuperación de la vegetación incendiada del área de estudio, muestra una relación con variables bióticas (e.g., tipo de comunidad vegetal) y abióticas (e.g., pendiente, altitud y exposición del terreno), que pudo ser vislumbrada al superponer sus respectivas diferencias de NDVI al mapa de comunidades vegetales, elaborado por CONAF (2013), y al modelo digital de elevación, elaborado por CGIAR-CSI (2018). A este respecto, la severidad más baja se presentó en suelos agrícolas (0,09), seguido de praderas y matorral abierto (0,16), sirviendo ambas unidades como medio de unión entre los distintos focos que presentó el incendio (Rinconada Yáquil 2, Nilahue-Barahona y Las Garzas). Los bosques esclerófilos y espinosos en tanto, presentaron mayor severidad, de acuerdo a cómo se combinaron sus distintas densidades y asociaciones de especies con la exposición al fuego (5 a 10 días para algunos focos), y con la magnitud y velocidad de propagación de éste, lo cual a su vez dependió de la pendiente; capaz de determinar la altura y velocidad de avance de las llamas (Díaz-Delgado *et al.*, 2003).

En laderas de exposición Norte y Oeste, es decir solanas, y por lo tanto con vegetación menos densa, la severidad observada fue heterogénea. En cambio, en laderas de exposición Sur y Este, es decir umbrías, y por lo tanto con vegetación más densa, la severidad observada fue relativamente alta, a causa de la mayor abundancia de biomasa y por lo tanto, de combustible.

En cuanto a la recuperación de la vegetación, las plantaciones forestales mostraron la mayor diferencia promedio, es decir, la más baja recuperación, mientras que el bosque nativo exhibió valores heterogéneos que se explicarían no sólo por su densidad, sino además por su composición y estructura. Así, la baja recuperación mostrada por las comunidades de Roble-Hualo se explicaría por su menor capacidad de regeneración, sumada a la baja presencia de especies secundarias. Las áreas cercanas a quebradas en tanto, correspondieron más bien con una alta recuperación, como consecuencia de la mayor disponibilidad de agua. En términos de exposición, la vegetación de solana exhibió mayor recuperación que la de umbría, debido a la relativa menor abundancia de biomasa existente en estas laderas antes del incendio.

Como cabría esperar, los valores de los índices espectrales de diciembre de 2017 (después de un año de ocurrido el incendio) fueron claramente mayores que aquellos de febrero de 2016 (recién finalizado el incendio). Sin embargo, éstos aún se distanciaron de aquellos *ex-ante*, denotando lo reciente de la perturbación. A este respecto, la inclusión de al menos una nueva imagen *ex-post*, idealmente adquirida en diciembre de 2018, contribuiría a precisar el ritmo de recuperación de la vegetación incendiada, así como a proyectar su tiempo de retorno a la situación preexistente (resiliencia).

Los índices espectrales de estado vegetal son sensibles a cambios en la variable que relacionan sobre la cobertura vegetal en su conjunto, mostrando limitaciones para discriminar tales cambios de acuerdo a atributos referidos a la composición y estructura de la vegetación objetivo (Peña y Ulloa, 2017). Sin embargo, estos atributos son de gran valor para evaluar la condición de la cobertura vegetal recuperada, por cuanto ésta podría albergar una composición distinta a la preexistente, incorporando especies con mayor adaptabilidad a las condiciones de sitio *ex-post* en los nichos otrora ocupados por especies nativas (Quintanilla y Castro, 1998). Por otro lado, las especies colonizadoras pueden presentar un

variable potencial biológico de desarrollo dependiendo de si se regeneran por rebrote o semillas o de que tan resistentes fueron al fuego, condicionando de este modo la sucesión ecológica *ex-post*.

Lo anterior pone de relieve la importancia de modelar empíricamente los índices espectrales aquí empleados, de manera de relacionar sus unidades adimensionales con datos continuos (unidades físicas) o categóricos de variables referidas a la estructura y composición de la vegetación impactada, facultando la comparación de rendimiento entre índices.

Debido a la alta concordancia espacial encontrada entre las clases de los índices empleados, únicamente el típico NDVI fue considerado para propósitos de mapeo. Si bien ha sido consignado que este índice presenta un rendimiento algo inferior que el NBR, también ha sido destacada su mayor versatilidad para mapear la recuperación de la vegetación incendiada en distintos tipos de regiones bioclimáticas (Chuvieco y Martín 2002; Escuín *et al.*, 2006), mostrando además buenos resultados para modelar la severidad de la vegetación calcinada usando datos de campo de las especies afectadas (Díaz-Delgado *et al.*, 2003). Al comparar las características del incendio Nilahue-Barahona con el de Las Máquinas (el mayor de la cadena de incendios registrada en el verano de 2017), es posible notar que a diferencia del primero, éste último consumió principalmente plantaciones forestales, caracterizadas por un mayor potencial de inflamación, y en menor medida coberturas de bosque nativo, lo que contribuiría a explicar su mayor severidad y extensión.

Este estudio empleó diferencias de índices espectrales de estado vegetal (de vigor, turgor y calcinación) derivados de imágenes óptico-satelitales Sentinel-2 adquiridas en fechas *ex-ante* y *ex-post*, para evaluar y mapear el impacto del incendio Nilahue-Barahona en las comunidades vegetales, proveyendo información útil para el posterior encausamiento de acciones de restauración. El uso de la teledetección óptico-satelital para estudiar los efectos de éste y otros incendios en el país, plantea la necesidad de seleccionar imágenes adquiridas en ventanas de tiempo *ex-ante* y *ex-post* fenológicamente compatibles, y que cuenten con la resolución espacial y espectral adecuadas como para retratar las variables de estado vegetal de interés a la escala espacial apropiada.

REFERENCIAS

- Chuvieco, E., Kasischke, E.S. 2007. Remote sensing information for fire management and fire effects assessment. *Journal of Geophysical Research*, 112, G01S90.
- Chuvieco, E., Martín, M.P., Palacios, A. 2002. Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*, 23: 5103-5110.
- CGIAR-CSI. 2018. The CGIAR Consortium for Spatial Information [en línea] [fecha de consulta: 3 Julio de 2018]. Disponible en: <http://srtm.csi.cgiar.org/SELECTION/inputCoord.asp>
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2013. Sistema de Información Territorial [en línea] [fecha de consulta: 3 Julio de 2018]. Disponible en: <https://sit.conaf.cl/>
- CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2017. Análisis de la afectación y severidad de los incendios forestales ocurridos en enero y febrero de 2017 sobre los usos de suelo y los ecosistemas naturales presente entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos de Chile. Informe técnico 5. Santiago, Chile, 56 pp.
- Díaz-Delgado, R. 2000. Caracterización por medio teledetección del régimen de incendios forestales en Cataluña (período 1975 - 98) y su influencia en los procesos de regeneración. Tesis Doctoral, Universitat Autònoma de Barcelona, España. 276 pp.
- Díaz-Delgado, R., Lloret, F., Pons, X. 2003. Influence of fire severity on plant regeneration by means of remote sensing imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 1751-1763.
- Díaz-Hormazábal, I., González, M.E. 2016. Análisis espacio-temporal de incendios forestales en la región del Maule, Chile. *Bosque*: 37(1): 147-158.
- Escuín, S., Navarro, R., Fernández, P. 2006. Assessment of post fire vegetation cover using spectral mixture analysis. Application and comparison of different endmember characterization methods. *Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales*, 15(1): 107-119.
- Escuín, S., Navarro, R., Fernández, P. 2008. Fire severity assessment by using NBR (normalized burn ratio) and NDVI (normalized difference vegetation index) derived from Landsat TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 1053-1073.
- Font, M., Serra, M., Borrás, M., Vilalta, O., Plana, E. 2016. El fuego y los incendios forestales en el Mediterráneo; la historia de una relación entre bosques y sociedad. Cinco mitos y realidades para saber más. Cataluña: Ediciones CTFC, 36 pp.
- Gao, B. 1996. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3): 257-266.
- Gitelson, A., Merzlyak, M. N. 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer okatabiudes* L. leaves, Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143(3): 286-292.
- González, M.E., Lara, A., Urrutia, R., Bosnich, J. 2011. Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42° S). *Bosque*, 32(3): 215-219.
- Hunt, E.R., Rock, B.N., Nobel, P.S. 1987. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 22: 429-435.
- Key, C.H., Benson, N.C. 2006. Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index; and Remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In: D.C. Lutes, R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson and L.J. Gangi, eds. FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System, pp- LA 1-51). Ogden: USDA Forest Service.
- Kushla, J., Ripple, W. 1998. Assessing wildfire effects with Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 19: 2493-2507.

Luebert, F., Pliscoff, P. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. Santiago: Editorial Universitaria, 296 pp.

Mattar C., Santamaría-Artigas, A., Durán-Alarcón, C. 2012. Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección. Revista de Teledetección, 38: 36-50.

Navarro Cerrillo, R.M., Hayas, A., García-Ferrer, A., Hernández Clemente, R., Duhalde, P., González, L. 2008. Caracterización de la situación posincendio en el área afectada por el incendio de 2005 en el Parque Nacional de Torres del Paine (Chile) a partir de imágenes multiespectrales. Revista Chilena de Historia Natural, 81: 95-110.

ONEMI (Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública). 2017. Resumen Nacional de incendios forestales [en línea] [fecha de consulta: 3 Julio de 2018]. Disponible en: <http://www.onemi.cl/alerta/resumen-nacional-de-incendios-forestales-3/>

Peña, M., Ulloa, J. 2017. Mapeo de la recuperación de la vegetación quemada mediante la clasificación de índices espectrales pre- y post-incendio. Revista de Teledetección, 50: 37-48.

Pérez Mato, J. 2017. Autonomous wildfire geolocation system based on thermographic and synthetic vision techniques. Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España. 160 pp.

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

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In 3rd ERTS Symposium, NASA SP-351 I, pp. 309–317.

Santibañez, F., Santibañez, P., Caroca, C., Gonzalez, P. 2017. Atlas Agroclimático de Chile, Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule. Santiago: Universidad de Chile y AGRIDMED, 208 pp.

Vidal, P., De Santis, A., Pérez, W., Honeyman, P. 2017. Uso de herramientas de teledetección para el análisis de la severidad y estimación de gases de efecto invernadero (GEI) en incendios forestales de gran magnitud. Estudio de caso incendio La Rufina, VI Región del L, G, B, O'Higgins, Chile. Revista de Teledetección, 50: 59-69.

ZKI (Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation). 2018. Disaster Extent Map - Overview - Chile - Torres del Paine National Park. [en línea] [fecha de consulta: 3 Julio de 2018]. Disponible en: <https://www.zki.dlr.de/map/2165>