



Mapeo de la recuperación de la vegetación quemada mediante la clasificación de índices espectrales pre- y post-incendio

Peña, M.A.*, Ulloa, J.

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

Resumen: Este trabajo analizó el estado de recuperación de la vegetación del Parque Nacional Torres del Paine, incendiada entre diciembre de 2011 y marzo de 2012. El cálculo y comparación del NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) del área afectada a lo largo de una serie temporal de 24 imágenes Landsat adquiridas antes, durante y después del incendio (2009-2015), permitió apreciar la variación temporal en los niveles de biomasa de la vegetación afectada. La posterior clasificación y comparación de los índices espectrales NDVI, NBR (*Normalized Burnt Ratio*) y NDWI (*Normalized Difference Water Index*), en un par de imágenes pre- y post-incendio con disponibilidad de datos completos y fenológicamente compatibles (adquiridas en octubre de 2009 y 2014), permitió analizar y mapear el estado de recuperación de la vegetación afectada. Los resultados muestran que el área de las dos clases inferiores de todos los índices espectrales de la fecha pre-incendio pasó a ser la más dominante en la fecha post-incendio. El cruce de clases de NDVI pre- y post-incendio mediante una matriz de error evidenció que la clase más alta y prevaeciente de NDVI pre-incendio, correspondiente en su mayor parte a bosque higromórfico y matorral preandino, se tornó la clase más baja en 2014. El resto del área de estudio, compuesta principalmente por estepa patagónica, restableció sus niveles de biomasa en 2014, exhibiendo en gran medida las mismas clases de NDVI pre-incendio. Estos resultados podrían proveer directrices para el monitoreo y manejo de la regeneración de la vegetación impactada por este incendio.

Palabras clave: NDVI, Landsat, incendios forestales, series temporales de imágenes, matriz de error.

Mapping the recovery of the burnt vegetation by classifying pre- and post-fire spectral indices

Abstract: This study analyzed the state of recovery of the burnt vegetation in the National Park of Torres del Paine between December, 2011 and March, 2012. The calculation and comparison of the NVDI (*Normalized Difference Vegetation Index*) of the burnt area throughout a time series of 24 Landsat images acquired before, during and after the fire (2009-2015), showed the temporal variation in the biomass levels of the burnt vegetation. The subsequent classification and comparison of the spectral indices: NDVI, NBR (*Normalized Burnt Ratio*) and NDWI (*Normalized Difference Water Index*) on a full-data available and phenologically matched pre- and post-fire image pair (acquired in October 2009 and 2014), enabled to analyze and mapping the state of recovery of the burnt vegetation. The results show that the area of the lowest classes of all the spectral indices of the pre-fire date became the most dominant on the post-fire date. The pre- and post-fire NDVI class crossing by a confusion matrix showed that the highest and most prevailing pre-fire NDVI classes, mostly corresponding to hydromorphic forests and Andean scrubs, turned into the lowest class in 2014. The remaining area, comprising Patagonian steppe, reestablished its biomass levels in 2014, mostly exhibiting the same pre-fire NDVI classes. These results may provide guidelines to monitor and manage the regeneration of the vegetation impacted by this fire.

Key words: NDVI, Landsat, wildfire, image time series, error matrix.

To cite this article: Peña, M.A., Ulloa, J. 2017. Mapping the recovery of the burnt vegetation by classifying pre- and post-fire spectral indices. *Revista de Teledetección*, 50, 37-48. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7931>

* Corresponding author: mapena@uahurtado.cl

1. Introducción

Los incendios son una de las perturbaciones más agresivas y repentinas que pueden afectar a los ecosistemas forestales, llegando a mermar y modificar fuertemente su estructura y composición. Mientras más severa haya sido la calcinación de la biomasa más severo será el impacto sobre la resiliencia del ecosistema, es decir, su capacidad de volver al estado previo a la perturbación (De Santis y Chuvieco 2007; Chen *et al.*, 2011). El monitoreo de la regeneración de la vegetación quemada es una tarea crucial para orientar acciones de restauración sobre sitios específicos. Sin embargo, muchas veces ésta es difícil de abordar mediante mediciones en terreno, debido a la baja accesibilidad y gran magnitud de las áreas incendiadas, así como a la frecuencia temporal que tales mediciones requieren; por lo general dentro de períodos interanuales.

Las imágenes ópticas satelitales han sido recurrentemente usadas para realizar este tipo de monitoreo, por cuanto permiten derivar indicadores fiables acerca del estado de la biomasa calcinada en una fecha de interés. Uno de los más comúnmente empleados a este respecto ha sido el NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, índice de vegetación de diferencia normalizada) (De Santis y Chuvieco 2007; Escuín *et al.*, 2008). Mientras en la región espectral del rojo la vegetación sana absorbe fuertemente la radiación solar, debido a la presencia de clorofila foliar, en la región espectral del infrarrojo cercano (IC) ésta exhibe una alta reflexión de radiación solar, debido a la estructura interna de las hojas sanas. Así, mientras más vigoroso se encuentra un vegetal, más alta es su diferencia de reflexión entre el rojo e IC, cimentando la formulación de gran parte de los índices espectrales de verdor vegetal, incluyendo el NDVI (Jones y Vaughan 2010).

Un método usual para abordar el estado de la recuperación de la vegetación incendiada mediante el uso del NDVI ha sido calcularlo en fechas *ex-ante* y *ex-post*, para así obtener su diferencia (DNDVI) (Kushla y Ripple, 1998, Díaz-Delgado *et al.*, 2003). En tal caso, es necesario tener en cuenta la compatibilidad fenológica entre las fechas de adquisición de las dos imágenes (*i.e.*, fechas de aniversario), a fin de minimizar la ocurrencia de falsos positivos/negativos (Escuín *et al.*, 2008). Por otra parte, debido a la magnitud adimensional

del NDVI, cabe destacar que las interpretaciones de los valores obtenidos de esta sustracción son dependientes de las condiciones de sitio, requiriendo de un modelamiento empírico para su interpretación absoluta (*e.g.*, en unidades de biomasa) (Liang *et al.*, 2012).

Entre el 27 de diciembre de 2011 y el 8 de marzo de 2012, ocurrió uno de los incendios más extensos y devastadores en Chile. Este tuvo lugar en la Patagonia, afectando una superficie de 200,57 km², la mayoría (170,54 km²) perteneciente al Área Protegida por el Estado: Parque Nacional Torres del Paine (PNTP). El incendio (conocido como Olguín, por la toponimia del sector donde se originó) calcinó alrededor del 7% de la superficie de este parque, de la cual 59,7% correspondió a estepa patagónica; 28,6% a matorral o estepa arbustiva, 9,7% a bosque nativo y 1,9% a otras coberturas de suelo (IEB, 2012). Los atributos ecológicos de biodiversidad y endemismo, sumados a las singularidades geológicas y geomorfológicas, hacen del PNTP unas de las Áreas Protegidas más importantes del país. Sin embargo, desde 1980 éste se ha visto afectado por 57 incendios de diversa envergadura, que han impactado negativamente en las propiedades y funciones de sus ecosistemas, siendo el incendio Olguín el más extenso y devastador (CEQUA 2014).

Algunos estudios han diagnosticado y evaluado los efectos que han tenido éste y otros incendios en la cobertura vegetal del PNTP, apoyándose para ello en el uso de técnicas de teledetección. Así por ejemplo, Navarro-Cerillo *et al.* (2008) identificaron y cuantificaron las áreas prioritarias de restauración vegetal del parque a causa de un incendio que afectó 155 km² de su superficie entre los meses de febrero y marzo de 2005. Para ello, superpusieron una cartografía de severidad de daño post-incendio a una cartografía de tipos de cobertura vegetal pre-incendio, las que fueron construidas mediante el cálculo del NBR (*Normalized Burnt Ratio*, razón normalizada de área quemada) y la aplicación de clasificaciones supervisadas sobre imágenes satelitales Landsat y ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*). Mattar *et al.* (2012) midieron la severidad del daño causado por el incendio Olguín sobre las principales unidades vegetacionales del parque. Para esto emplearon una imagen Landsat-7 adquirida antes del incendio

(3 de enero de 2005) y otra adquirida durante el incendio (24 de febrero de 2012). Mediante el DNBR calculado desde ambas imágenes obtuvieron el área incendiada, para luego relacionar la escala de valores resultantes de ese diferencial con un mapa general de tipos (fisonómicos) de coberturas vegetales (GLOBCOVER), derivado de imágenes ENVISAT (*Environmental Satellite*).

Más recientemente, el CEQUA (2014) evaluó la severidad de daño causado por el incendio Olgúin con el propósito de actualizar el Plan de Manejo del PNTP y proveer información para el diagnóstico y restauración de sus áreas incendiadas. Para esto, compararon dos imágenes de NDVI promedio construidas a partir de imágenes MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) de NDVI compuesto por valores máximos para intervalos de 16 días (producto con identificador MOD13Q1 y MYD13Q1, según la plataforma satelital del sensor). Así, la primera de estas imágenes resultó de promediar los productos MODIS adquiridos entre 2008-11, en tanto que la segunda resultó de promediar los productos adquiridos entre 2012-14. A pesar de que este estudio consideró imágenes post-incendio, no es posible apreciar con claridad el estado de recuperación de la vegetación quemada, por cuanto no generó una cartografía resultante de la superposición de un NDVI pre-incendio con uno estrictamente post-incendio y representativo de un ciclo vegetativo dado.

Si bien la teledetección óptica ha sido aplicada al estudio de incendios forestales del PNTP, aún no se ha precisado y explicitado el efecto que ha tenido el incendio Olgúin en la vegetación de este parque a lo largo del tiempo. El presente trabajo pretende mejorar la comprensión de la dinámica de la vegetación del PNTP afectada por este incendio, lo que contribuiría a la orientación de acciones de restauración. Para esto analiza desde una perspectiva espacial y temporal el estado de recuperación de la vegetación afectada por este incendio, mediante el diferencial de índices espectrales *ex-ante* y *ex-post* de imágenes fenológicamente compatibles.

2. Métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a toda la superficie del PNTP que fue afectada por el incendio Olgúin,

referido en la introducción de este artículo. El PNTP se ubica en la provincia de Última Esperanza, Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, entre las latitudes 50° 37' y 51° 18' S (Figura 1). Cuenta con una superficie de 2422,42 km² y se inserta en un clima Oceánico Trasandino. La precipitación anual fluctúa entre 400 y 800 mm, y la temperatura media anual es de 7,2 °C. Las precipitaciones asociadas a vientos del Sur-Oeste disminuyen hacia el Este, en tanto que las temperaturas aumentan en esa dirección, al igual que el relieve; donde la Cordillera Paine exhibe macizos del orden de los 3000 m de altitud. La cobertura vegetal ocupa el 41,7% de la superficie del parque, descomponiéndose en bosques higromórficos del género *Nothofagus* (19,2%), matorrales preandinos (16,4%), estepa patagónica (4,2%) y turberas y humedales (1,9%) (IEB 2012, CEQUA 2014).

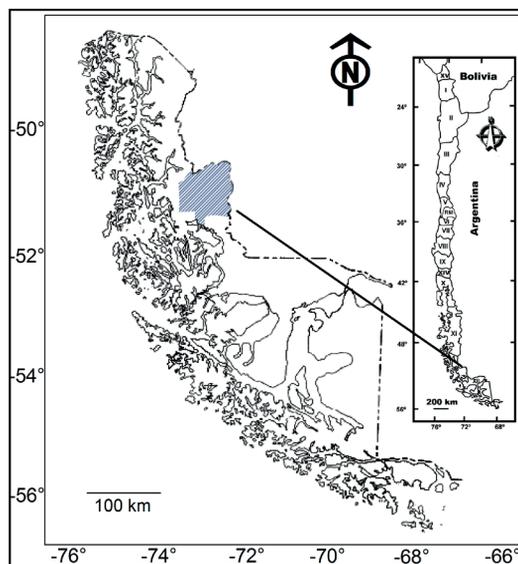


Figura 1. Localización del Parque Nacional Torres del Paine.

El límite del área incendiada considerado en este estudio fue el cartografiado en 2012 por el Centro para la Información de Crisis Basada en Satélites (*Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation*, 2016) de la Agencia Aeroespacial Alemana (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*), a partir de la clasificación supervisada de imágenes satelitales *RapidEye* (5 m de píxel), adquiridas durante la fase tardía del incendio. Este límite abarca 169 km², cifra que es tan sólo 6% inferior al área mapeada por

Mattar *et al.* (2012), también mediante técnicas de teledetección.

2.2. Selección de imágenes satelitales

Se seleccionaron 24 imágenes satelitales Landsat del área de estudio, adquiridas entre 2009 y 2015 (Tabla 1), que fueron descargadas desde el buscador en línea *Global Visualization Viewer* (<http://glovis.usgs.gov/>) del Servicio Geológico de Estados Unidos (*United States Geological Survey, USGS*). La selección se limitó a aquellas imágenes libres de nubosidad, nieve y sombras intensas (que prevalecen en invierno a esas latitudes, debido al bajo ángulo solar). Además, dado que hay dos rutas orbitales Landsat que cubren íntegramente el área de estudio, se evitó la selección redundante de imágenes (*i.e.*, adquiridas en fechas distanciadas en menos de 16 días, que es el período de revisita del satélite Landsat).

Tabla 1. Fecha de adquisición de las imágenes Landsat empleadas en este estudio.

Evento	#	Imagen	
		#Misión Landsat	Fecha de adquisición
Pre-incendio	1	7	abril 20, 2009
	2	5	octubre 5, 2009
	3	5	diciembre 8, 2009
	4	5	septiembre 29, 2010
	5	7	octubre 16, 2010
	6	5	septiembre 11, 2010
	7	5	febrero 20, 2011
	8	5	octubre 11, 2011
Incendio	9	7	enero 7, 2012
	10	7	febrero 24, 2012
Post-incendio	11	7	octubre 21, 2012
	12	7	diciembre 31, 2012
	13	7	enero 16, 2013
	14	7	marzo 14, 2013
	15	8	abril 23, 2013
	16	7	septiembre 13, 2013
	17	7	octubre 24, 2013
	18	8	diciembre 19, 2013
	19	7	febrero 13, 2014
	20	7	marzo 24, 2014
	21	7	septiembre 9, 2014
	22	8	octubre 19, 2014
	23	8	enero 23, 2015
	24	8	abril 13, 2015

Todas las imágenes empleadas corresponden a productos sujetos a una corrección geométrica estándar (*Level 1T, Standard Terrain Correction*) por parte del USGS. El procedimiento comprende el remuestreo del campo de visión instantáneo en

tierra del sensor a 30 metros de píxel, empleando el método de convolución cúbica y la selección de puntos de control basados en un DEM (*Digital Elevation Model*), tomando la proyección UTM (Universal Transversal de Mercator) y el elipsoide WGS84 (*World Geodetic System 1984*) como base geométrica. La inspección visual de algunos puntos en común entre imágenes confirmó la adecuada correspondencia espacial entre píxeles de la serie temporal (< 15 m).

2.3. Corrección Radiométrica de las Imágenes Satelitales

Los números digitales (bits) almacenados en los píxeles de las imágenes fueron convertidos a radiancias exo-atmosféricas mediante la aplicación de los parámetros de calibración de cada sensor Landsat, disponibles en el programa ENVI© (*Environment for Visualizing Images*) (Exelis Visual Information Solutions, Inc., Boulder, USA). Luego, mediante estas radiancias fueron derivadas reflectancias aparentes de superficie usando el corrector atmosférico FLAASH (*Fast Line-of-Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*), disponible en el mismo programa. Esta herramienta se basa en el modelo MODTRAN (*Moderate Resolution Atmospheric Transmission*) para derivar la irradiancia y radiancia de superficie, para lo cual requiere un conjunto de parámetros dependientes de la escena y del área de estudio (*e.g.* fecha y hora de adquisición de la imagen, localización geográfica, elevación del terreno, visibilidad atmosférica, tipo y composición de aerosoles, entre otros).

2.4. Construcción de la serie temporal de NDSI

En cada imagen de la serie temporal fueron removidos (enmascarados) aquellos píxeles correspondientes a cuerpos de agua y sombras intensas, así como a pequeñas nubes y remanentes de nieve (que por su escasa presencia no justificaron excluir la imagen de la serie temporal). Para esto fue calculado sobre cada imagen el NDSI (*Normalized Difference Snow Index*, índice de nieve de diferencia normalizada) (ecuación 1):

$$NDSI = (\rho_{verde} - \rho_{IOC1}) / (\rho_{verde} + \rho_{IOC1}) \quad (1)$$

Donde, ρ_{verde} = reflectancia en la banda del verde de una imagen Landsat.

ρ_{IOCI} = reflectancia en la primera banda del infrarrojo de onda corta de una imagen Landsat.

Todos los valores positivos arrojados por este índice fueron enmascarados, pues resultan del comportamiento espectral característico de los materiales mencionados en esas longitudes de onda espectral. Posteriormente, fue calculado el NDVI en cada imagen de la serie temporal, enmascarando luego los valores negativos de su escala; correspondientes a suelos desprovistos de vegetación (ecuación 2).

$$\text{NDVI} = (\rho_{\text{IC}} - \rho_{\text{rojo}}) / (\rho_{\text{IC}} + \rho_{\text{rojo}}) \quad (2)$$

Donde, ρ_{IC} = reflectancia en la banda del infrarrojo cercano de una imagen Landsat.

ρ_{rojo} = reflectancia en la banda del rojo de una imagen Landsat.

En el caso de las imágenes de NDVI del Landsat-7, el área de estudio se vio sujeta a una reducción adicional, pues presentan líneas de píxeles sistemáticamente perdidas debido al fallo del corrector del escáner de escobilla ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*) desde mayo de 2003. Si bien este fallo ha limitado muchos usos de estas imágenes, se estimó que no fue el caso del presente estudio, pues éstas sólo fueron empleadas para obtener estadísticos de media y desviación estándar (DE) del NDVI del área incendiada (ver el próximo acápite), que se vieron mínimamente impactados por tal reducción de datos. Lo anterior se comprobó calculando ambos estadísticos sobre una selección aleatoria de imágenes Landsat-5 y -8 de NDVI, antes y después de aplicarles una máscara correspondiente a las líneas perdidas del Landsat-7 sobre el área de estudio. Las diferencias obtenidas entre los estadísticos calculados en ambas imágenes fueron inferiores a dos cifras decimales (datos no presentados).

2.5. Definición de subgrupos de imágenes

La media y la DE fueron calculadas sobre cada imagen de NDVI con el propósito de apreciar la variación temporal de la biomasa de la vegetación afectada a lo largo del período de interés. Luego,

a partir de compatibilidad fenológica de fechas observada a lo largo de la serie temporal, se definieron tres subgrupos de imágenes: (1) meses de octubre pre- y post-incendio, (2) meses de abril pre- y post-incendio y (3) meses de enero-marzo pre-, post- y durante el incendio.

Para cada imagen post-incendio de estos subgrupos se calculó la tasa de variación relativa (TVR) y el coeficiente de variación (CV). La TVR fue calculada mediante la siguiente fórmula (ecuación 3):

$$\text{tvNDVI}_{\text{ex-post}} = 100 \times \left(\frac{(\bar{\text{xNDVI}}_{\text{ex-ante}} - \bar{\text{xNDVI}}_{\text{ex-post}})}{\bar{\text{xNDVI}}_{\text{ex-ante}}} \right) \quad (3)$$

Donde, $\bar{\text{xNDVI}}_{\text{ex-post}}$ = Promedio del índice en una fecha post-incendio.

$\bar{\text{xNDVI}}_{\text{ex-ante}}$ = Promedio de los índices de las fechas pre-incendio.

De la fórmula se desprende que es necesario generar previamente un promedio de NDVIs pre-incendio de meses equivalentes, que sirva de situación base para restarle el NDVI promedio post-incendio de un mes equivalente. CV fue calculado mediante la siguiente fórmula (ecuación 4):

$$\text{cvNDVI}_{\text{ex-post}} = 100 \times (\sigma_{\text{NDVI}}_{\text{ex-post}} / \bar{\text{xNDVI}}_{\text{ex-ante}}) \quad (4)$$

Donde, $\sigma_{\text{NDVI}}_{\text{ex-post}}$ = Desviación estándar del índice en una fecha post-incendio.

$\bar{\text{xNDVI}}_{\text{ex-ante}}$ = Promedio de los índices de las fechas pre-incendio.

Se puede observar que este cálculo también requiere el promedio de NDVIs pre-incendio de meses equivalentes, que en este caso divide a la desviación estándar del NDVI post-incendio de meses equivalentes.

2.6. Clasificación y cruce de imágenes de índices espectrales

Este punto comprendió la clasificación y superposición de los índices espectrales NDVI, NBR y NDWI (*Normalized Difference Water Index*, índice de contenido de agua de diferencia normalizada), en un par de imágenes pre- y post-incendio fenológicamente compatibles (adquiridas en octubre de 2009 y 2014), con el fin de analizar y mapear el estado de recuperación de la vegetación quemada al interior del parque mediante diversos

indicadores de estado vegetal. Los índices NDWI y NBR se formulan de forma idéntica al NDVI, pero la banda del rojo es sustituida por la primera banda (Landsat) del IOC en el caso del NDWI, y por la segunda banda (Landsat) del IOC en el caso del NBR. No se realizaron comparaciones entre imágenes de índices espectrales pertenecientes a los dos subgrupos restantes debido a que involucran adquisiciones del sensor Landsat-7, cuyos datos perdidos generarían discontinuidades espaciales en la cartografía de interés.

A los índices espectrales se les aplicaron los enmascaramientos de datos previamente referidos, para luego clasificarlos a partir de un número manejable e interpretable de rangos, cuyos umbrales fueron definidos a partir de sumar y restar la DE a la media de sus valores, un simple y conocido método de clasificación de variables continuas que ha sido aplicado a índices espectrales en general (Peña, 2008) y al NDVI en el contexto de estudios de incendios forestales en particular (Escuín *et al.*, 2008). De lo anterior resultaron cuatro intervalos definidos a partir de la fecha pre-incendio y aplicados de igual forma a la fecha post-incendio, con objeto de poder compararlos. Finalmente, las dos imágenes de NDVI clasificado en cuatro rangos comunes fueron superpuestas, con el propósito de observar la variación temporal de la biomasa de la vegetación afectada entre octubre de 2009 y 2014. La variación de estas clases en el período de interés fue analizada mediante una matriz de error, que consideró el NDVI pre-incendio como imagen base o verdad de terreno, y una cartografía síntesis del cruce de clases.

2.7. Variación del NDVI pre- y post-incendio según formaciones vegetales

Este estudio no abordó la recuperación de la vegetación quemada en términos de formación vegetal, principalmente porque no existe una fuente cartográfica actualizada y detallada a este respecto (ver Discusión), y porque el levantamiento de esta información mediante trabajo de terreno estuvo fuera de nuestros alcances, en atención a los costos de visitar un área relativamente remota y vasta.

No obstante, con el propósito de interpretar el comportamiento de los valores de NDVI octubre de 2009 y 2014 según la formación vegetal

afectada fue calculada la media y DE de sitios representativos de cada una de éstas, localizados tanto dentro como fuera del área incendiada. Esta metodología se basa en el índice de regeneración propuesto por Díaz-Delgado (1998), que establece una razón entre el NDVI de sitios incendiados y de control localizados dentro de una misma imagen. De acuerdo a Pisano (1974), las principales formaciones vegetales del área de estudio son: bosque higromórfico, matorral preandino y estepa patagónica. La cantidad de sitios definidos sobre cada una de éstas varió en función de su interpretación en las imágenes satelitales, sumando en todos los casos un área de entre 0,5 y 0,9 km², ya sea dentro o fuera del área incendiada.

3. Resultados

3.1. Comportamiento temporal del NDVI

Los valores de NDVI calculados a lo largo de la serie temporal (Tabla 2), permiten apreciar los meses de febrero y abril presentaron los mayores promedios del índice (0,69 y 0,65, respectivamente), en tanto que en los meses de septiembre y octubre éstos fueron algo menores (entre 0,51-0,57). Como cabría esperar, en las fechas del incendio los promedios de NDVI descendieron abruptamente (promediando 0,29). A lo largo de los fechas post-incendio en tanto, los valores mostraron una tendencia ascendente desde septiembre hasta abril, sin embargo, incluso en 2015, éstos no lograron equipararse a los de meses equivalentes de pre-incendio.

Al organizar la serie temporal en tres subgrupos de imágenes correspondientes a los meses de (1) octubre, (2) abril y (3) de verano en general, se aprecia que los promedios de NDVI post-incendio de las fechas de octubre de 2012, 2013 y 2014, fueron menores que los correspondientes al mismo mes pre-incendio, 2009 y 2010. Como cabría esperar, este valor fue el más bajo en la fecha de octubre de 2012 (0,34) y si bien en 2013 éste mostró un alza (0,48), en 2014 descendió nuevamente (0,40). Un comportamiento similar se evidencia en las fechas de abril 2013 y 2015, si bien ambas exhibieron los promedios más altos de NDVI post-incendio (0,59), éstos claramente disminuyeron en relación con el valor perteneciente al mismo mes pre-incendio (0,69). Todas las fechas post-incendio restantes

Tabla 2. Media y desviación estándar (DE) del NDVI de la serie temporal del área de estudio.

Evento	#Imagen	Fecha de adquisición	NDVI	
			Media	DE
Pre-incendio	1	abril 20, 2009	0,69	0,15
	2	octubre 5, 2009	0,54	0,14
	3	diciembre 8, 2009	0,59	0,14
	4	septiembre 29, 2010	0,55	0,16
	5	octubre 16, 2010	0,51	0,12
	6	septiembre 11, 2010	0,57	0,15
	7	febrero 20, 2011	0,65	0,15
	8	octubre 11, 2011	0,51	0,13
Incendio	9	enero 7, 2012	0,28	0,12
	10	febrero 24, 2012	0,30	0,12
Post-incendio	11	octubre 21, 2012	0,34	0,13
	12	diciembre 31, 2012	0,47	0,16
	13	enero 16, 2013	0,46	0,15
	14	marzo 14, 2013	0,52	0,12
	15	abril 23, 2013	0,59	0,14
	16	septiembre 13, 2013	0,48	0,16
	17	octubre 24, 2013	0,48	0,12
	18	diciembre 19, 2013	0,51	0,14
	19	febrero 13, 2014	0,53	0,12
	20	marzo 24, 2014	0,55	0,14
	21	septiembre 9, 2014	0,53	0,14
	22	octubre 19, 2014	0,40	0,10
	23	enero 23, 2015	0,51	0,13
	24	abril 13, 2015	0,59	0,13

(correspondientes a verano y una correspondiente a fines de invierno: 9 de septiembre, 2014) mostraron un promedio de NDVI muy estable, en torno a 0,52, valor que también estuvo por debajo de sus meses equivalentes de pre-incendio (diciembre 2009: 0,59 y febrero 2011: 0,65).

Tabla 3. Tasa de variación (TV) y coeficiente de variación (CV) del NDVI de los tres subgrupos de imágenes definidos dentro de la serie temporal.

Subgrupo de imágenes #	Evento	Fecha de adquisición de la imagen	NDVI	
			TV (%)	CV (%)
1	Pre-incendio*	octubre 5, 2009	-	-
		octubre 16, 2010	-	-
		octubre 11, 2011	-	-
	Post-incendio	octubre 21, 2012	34,62	25
		octubre 24, 2013	7,69	23,08
		octubre 19, 2014	23,08	19,23
2	Pre-incendio	abril 20, 2009	-	-
	Post-incendio	abril 23, 2013	14,49	20,29
		abril 13, 2015	14,49	18,84
3	Pre-incendio	febrero 20, 2011	-	-
	Incendio	enero 7, 2012	56,92	53,57
		enero 24, 2012	53,85	50
		Post-incendio	enero 16, 2013	29,23
		enero 13, 2014	18,46	28,30
		enero 23, 2015	20	28,85

*Las tres imágenes pre-incendio fueron promediadas.

La Tabla 3 muestra que la TVR y el CV del NDVI de los meses de enero correspondientes al incendio fueron los más altos de todos los subgrupos ($\geq 50\%$), seguidos de los pertenecientes a la fecha de octubre de 2012, alrededor de 7 meses después de finalizado el incendio (34,62 y 25%, respectivamente). En el año 2013, la TVR del NDVI del mes de enero (29,23%) mostró un marcado descenso con respecto a los mismos meses durante el incendio, en tanto que el CV (46,43%) fue ligeramente inferior al de esos meses durante el incendio. En el mes de octubre del mismo año, la TVR del NDVI fue la menor de todos los subgrupos (7,69%), sin embargo, el CV (23,08%) fue similar al de su mes equivalente en los años 2012 y 2104. En los meses de enero de los años post-incendio en tanto, ambos parámetros mostraron un descenso en relación con el mismo mes del año del incendio.

3.2. Variación de los índices espectrales NDVI, NDWI y NBR pre- y post-incendio

La clasificación de los índices espectrales de octubre de 2009 y 2014 de acuerdo a cuatro rangos (Tabla 4), revela la distribución normal de sus valores con anterioridad al incendio, observándose un equilibrio entre las áreas de las clases centrales dominantes (clase 2 y 3) y entre las áreas de las clases extremas menos dominantes. Los índices espectrales post-incendio sin embargo, confirman un desplazamiento de valores hacia las clases 1 y 2, en tanto que la clase 4 se tornó casi inexistente.

Tabla 4. Comparación entre clases de NDVI, NDWI y NBR de octubre, 2009 (pre-incendio) y 2014 (post-incendio).

Índice espectral	Clase	Umbral de rango		Fecha de la imagen			
				octubre 2009		octubre 2014	
				Área			
#	Mínimo	Máximo	km ²	%	km ²	%	
NDVI	1	0	0,4	28,09	17,53	73,82	44,19
	2	0,4	0,54	51,18	31,93	77,89	46,62
	3	0,54	0,68	51,97	32,43	15,12	9,05
	4	0,68	1	29,03	18,11	0,23	0,14
	Total			160,27	100	167,06	100
NDWI	1	0	0,03	13,58	13,27	23,53	18,23
	2	0,03	0,14	43,02	42,03	82,06	63,55
	3	0,14	0,25	30,14	29,44	22,28	17,26
	4	0,25	1	15,62	15,26	1,24	0,96
	Total			102,36	100	129,11	100
NBR	1	0	0,13	24,98	15,1	17,48	10,48
	2	0,13	0,30	60,5	36,6	96,1	57,62
	3	0,30	0,47	54,71	33,1	52,05	31,21
	4	0,47	1	25,15	15,2	1,14	0,68
	Total			165,34	100	166,77	100

3.3. Mapeo de la variación del NDVI pre- y post-incendio

La comparación de los mapas de NDVI clasificado de ambas fechas de octubre (Figura 2) otorga una dimensión espacial a lo expresado anteriormente. Las clases 3 y 4 presentes en 2009; ubicadas hacia el Oeste del área incendiada, en torno al lago Pehoé, se vieron fuertemente reemplazadas por las clases 1 y 2 en 2014.

El cambio experimentado entre las clases de ambos mapas de NDVI puede ser mejor comprendido mediante una matriz de error, tomando como verdad de terreno la fecha de 2009 (Tabla

5). En ésta se observa que las precisiones del productor fueron las más bajas para las clases 3 y 4 (15,62 y 0,41%, respectivamente), lo que significa que en 2014 ambas clases de NDVI se redujeron fuertemente en comparación con 2009. Mientras la clase 3 de 2009 fue sustituida principalmente por las clases 2 y 1 en 2014 (31 680 y 16 931 píxeles, respectivamente), la clase 4 de 2009 fue sustituida principalmente por las clases 2 y 1 en 2014 (16 813 y 11 052 píxeles, respectivamente).}

En tanto, las precisiones del usuario fueron las menores para las clases 1 y 2 (33,09 y 38,22%, respectivamente), lo que significa que en

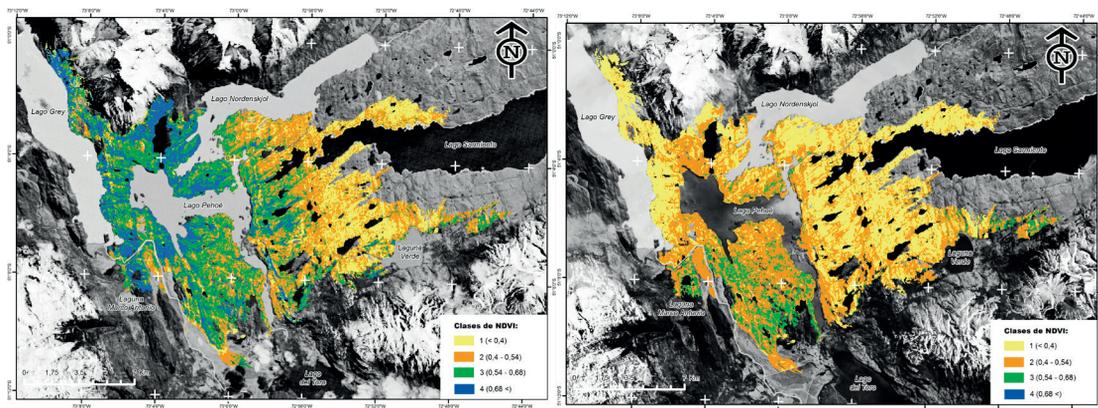


Figura 2. Mapas de clases de NDVI de octubre, 2009 (pre-incendio), imagen izquierda, y 2014 (post-incendio).

Tabla 5. Matriz de error del NDVI clasificado entre las fechas de octubre, 2009 (fila principal) y 2014 (columna principal).

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Total	Precisión del usuario (%)	Precisión general (%)
Clase 1	27683	4969	42	1	32695	84,67	
Clase 2	27982	33079	2460	7	63528	52,07	
Clase 3	16931	31680	9018	111	57740	15,62	
Clase 4	11052	16813	5282	138	33285	0,41	
Total	83648	86541	16802	257	187248		
Precisión del productor (%)	33,09	38,22	53,67	53,70			
Precisión general (%)							37,34

2014 ambas clases de NDVI aumentaron notablemente en comparación con 2009. Mientras la clase 1 de 2014 se extendió principalmente hacia las clases 2 y 3 en 2009 (27982 y 16931 píxeles, respectivamente), la clase 2 de 2014 se extendió principalmente hacia las clases 3 y 4 en 2009 (31680 y 16813 píxeles, respectivamente).

La Figura 3 presenta una síntesis cartográfica del cruce entre las clases de los mapas de NDVI de octubre de 2009 y 2014. Para hacer legible el resultado del cruce, la cartografía muestra las clases que desde 2009 a 2014 ascendieron, descendieron o se mantuvieron. Es evidente el dominio de la clase descendente (58,61%), correspondiente a

las clases 3 y 4 de 2009 que fueron reemplazadas por las clases 1 y 2 en 2014. La clase sin cambio en tanto (37,34%), corresponde a las clases 1 y 2 en su mayoría, mientras que la clase ascendente es muy exigua (4,05%).

Como cabría esperar, la media de NDVI pre-incendio de acuerdo al tipo de formación vegetal (Tabla 6) fue muy similar dentro y fuera del área incendiada. Sin embargo, en la fecha post-incendio, la media del índice presentó claras diferencias dentro y fuera del área incendiada, particularmente en el caso del bosque higromórfico.

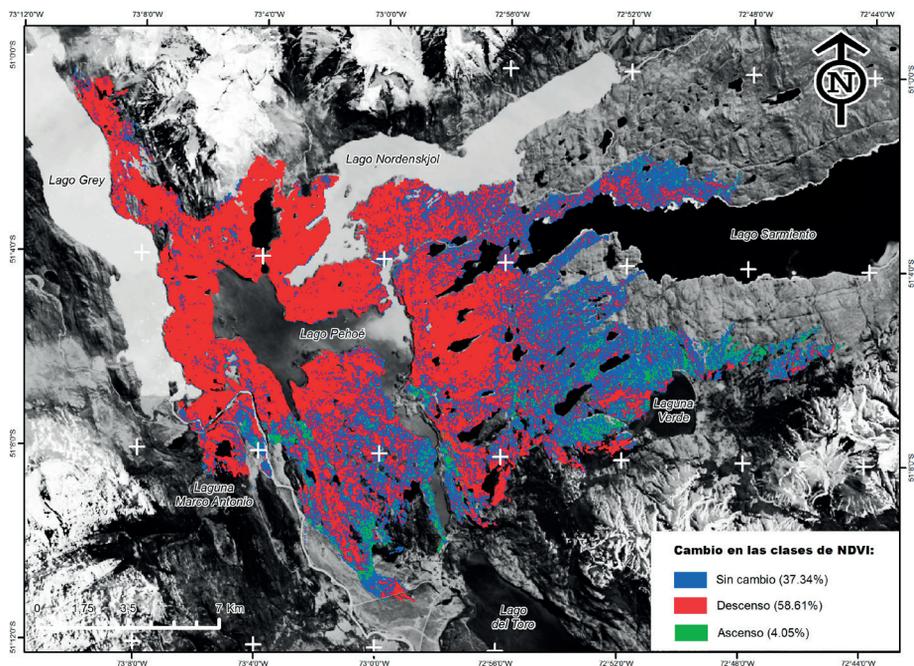


Figura 3. Mapa síntesis resultante del cruce entre clases de NDVI de octubre, 2009 (pre-incendio) y 2014 (post-incendio).

Tabla 6. Media y DE del NDVI de octubre, 2009 (pre-incendio) y 2014 (post-incendio) según formación vegetal, dentro y fuera del área incendiada.

		NDVI según formación vegetal y ubicación en el área incendiada											
		Bosque higromórfico				Matorral preandino				Estepa patagónica			
		Dentro		Fuera		Dentro		Fuera		Dentro		Fuera	
		Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE	Media	DE
Fecha	2009	0,84	0,07	0,83	0,07	0,72	0,12	0,71	0,11	0,67	0,14	0,57	0,18
	2014	0,29	0,07	0,67	0,23	0,43	0,17	0,52	0,18	0,49	0,18	0,45	0,16

4. Discusión y conclusiones

4.1. Seguimiento de la recuperación de la vegetación quemada mediante el NDVI

Este estudio empleó el NDVI como un indicador capaz de identificar diferencias en el estado vegetal (en términos de abundancia de biomasa) entre fechas pre- y post-incendio, una aproximación metodológica frecuentemente aplicada en el contexto de la valoración de la severidad de daño y la recuperación de la vegetación quemada (Viedma *et al.*, 1997; De Santis y Chuvieco *et al.*, 2007). Como es destacado por Bastos *et al.* (2011), el concepto de recuperación de la vegetación empleado aquí se refiere únicamente a la capacidad de una cubierta vegetal de restablecer sus niveles de biomasa anteriores al incendio, por lo que no alude a la recuperación de las funciones y biodiversidad del ecosistema afectado. Si bien ha sido reconocido que el NDVI podría ofrecer la capacidad de distinguir diferencias de biomasa calcinada según tipos vegetacionales (Abdel Malak y Pausas, 2006), es necesario destacar que para esto sería necesario contar con datos confiables acerca de la distribución de esta variable antes de que fuera afectada por el incendio, permitiendo así establecer su relación empírica con el índice en cuestión. Si la relación estadística entre ambas variables es consistente, entonces sería posible modelar la biomasa según tipo vegetacional para las fechas post-incendio de interés.

A este respecto, la cartografía más completa de las unidades vegetacionales del área de estudio corresponde a la elaborada por Pisano (1974). Sin embargo, como es destacado por el CEQUA (2014), se trata de una fuente cartográfica antigua (que no incorpora los efectos producidos en la cobertura vegetal por numerosos incendios, ocurridos incluso antes de su confección), basada en una clasificación taxonómica obsoleta y que adolece de las imprecisiones propias de los métodos de

mapeo de la época, por lo que su utilidad para fines de un modelamiento como el previamente descrito es limitada. Al respecto, el IEB (2012) destaca que si bien existen cartografías de tipos vegetacionales más actuales del área de estudio (*e.g.*, Garay y Guineo, 1995; Villa-Martínez y Moreno, 2007), éstas igualmente se basan en alguna medida en la realizada por Pisano (1974). Por otra parte, aunque existen otras fuentes cartográficas derivadas de imágenes satelitales, como el mapa mundial de coberturas vegetales GLOBCOVER empleado por Mattar *et al.* (2012) para cartografiar el área afectada por el incendio Olguín, éste es de gruesa resolución espacial (300 metros de píxel) y no ha sido debidamente validado para el área de estudio.

Chen *et al.* (2011) analizaron la severidad de daño y la recuperación de un bosque de pino ponderosa (*Pinus ponderosa* Dougl. Ex Laws.) incendiado usando diferenciales pre- y post-incendio de los índices espectrales NDVI, EVI (*enhanced vegetation index*) y NBR. Dentro de sus resultados, obtuvieron similares correlaciones entre los índices espectrales y la biomasa calcinada medida en terreno. Este similar rendimiento entre índices espectrales normalizados indica una equivalencia entre sus escalas valores, lo que concuerda con las similitudes encontradas entre las distribuciones de clases de los índices espectrales pre- y post-incendio empleados en nuestro trabajo. Además, Chen *et al.* (2011) encontraron que a partir del tercer año post-incendio las correlaciones entre DNDVI y biomasa calcinada comenzaron a descender fuertemente en comparación con los diferenciales de los otros índices mencionados, sugiriendo con ello la limitación del NDVI para rastrear cambios de biomasa cuando la vegetación está próxima a alcanzar su estado previo a la perturbación. Al contrastar esto con hallazgos previos (*e.g.*, Escuin *et al.*, 2008), los autores sugirieron que el mapeo de severidad de un incendio debería realizarse dentro de los primeros dos años de ocurrido éste, cuando el efecto de la

calcinación original de la biomasa aún se mantiene. En tanto, advirtieron que períodos más extensos de rastreo pueden ser requeridos para observar la recuperación total de la vegetación quemada. Así, cabe advertir que aunque en nuestra área de estudio el NDWI y NBR mostraron similitudes con el NDVI, éstos y otros índices espectrales podrían ser apropiados de evaluar en el rastreo de la recuperación de la vegetación quemada durante períodos más extensos que el aquí abordado.

Por último, Chen *et al.* (2011) observaron que dentro de los siete años post-incendio estudiados la vegetación no fue capaz de restablecer los valores de NDVI pre-incendio, aunque a partir del tercer año éstos se aproximaron mucho. En nuestro estudio los menores promedios de NDVI post-incendio se observan dentro de un año y 10 meses después de ocurrido el incendio (i.e., fines de 2013). Esta situación también es discernible en el estudio realizado por el CEQUA (2012), que basado en imágenes MODIS de NDVI compuesto, permitió observar que los valores del índice durante 2013 fueron claramente menores que durante 2014. Con posterioridad a 2013, en nuestro estudio los promedios de NDVI muestran una tendencia ascendente, pero sin lograr restablecerse a la situación pre-incendio. A pesar de las dificultades que supone transferir los resultados de un estudio a otro, debido principalmente al tipo de cobertura vegetal afectada y la severidad con que la biomasa fue calcinada, como Chen *et al.* (2011) sugieren, cabría esperar que en fechas posteriores a la serie temporal aquí analizada, los valores de NDVI se aproximen más claramente a aquellos pre-incendio de fechas equivalentes.

4.2. Variación del NDVI pre- y post-incendio según formaciones vegetales

El mapa de cruce de clases de NDVI pre- y post-incendio (Figura 2) permite apreciar que las áreas que experimentaron un descenso de biomasa hacia 2014 (58,61%) se distribuyen principalmente desde la rivera Este del lago Grey hasta la rivera Este del lago Pehoé, donde precisamente se originaron los principales focos de fuego (sector Olguín). De acuerdo a Pisano (1974), la cubierta vegetal de esas áreas se componía principalmente de matorrales xerófitos y mesófitos pre-andinos, y de bosques higromórficos en menor medida. Según el mapa pre-incendio del presente estudio (imagen superior de la Figura 2), estas áreas estaban comprendidas

por las dos clases más altas de NDVI, pero en 2014 (imagen inferior de la Figura 2) descendieron en su mayoría a las dos clases más bajas del índice (Tabla 5). La merma en los niveles de biomasa de estas formaciones calcinadas es evidenciada al comparar las medias de NDVI post-incendio de sus sitios localizados dentro y fuera del área incendiada (Tabla 6). Por otra parte, el mapa de cruces (Figura 3) muestra que las áreas que restablecieron sus niveles originales de biomasa hacia 2014 se localizan principalmente hacia el Este del área de estudio, donde luego el fuego se propagó y donde la estepa patagónica que imperaba (Pisano 1974), supuso una menor combustión. En efecto, las medias de NDVI post-incendio de los sitios de estepa patagónica localizados dentro y fuera del área incendiada (Tabla 6), son las menores dentro del área de estudio, exhibiendo principalmente las dos clases más bajas en el mapa de NDVI post-incendio (imagen inferior de la Figura 2).

De lo anterior, se desprende que la recuperación de vegetación siguió hacia 2014 un gradiente Oeste Este, coincidente con la distribución de la abundancia de biomasa, determinada a su vez por el gradiente de precipitaciones propio de la Región (IEB 2012). Como es destacado en los trabajos de Escuín *et al.* (2008) y Chen *et al.* (2011), son precisamente las coberturas vegetales con mayor biomasa (en esos casos arbóreas) las que presentan mayor severidad de daño y una recuperación más lenta. Si bien la severidad de daño puede explicarse por la mayor disponibilidad de biomasa y la permanencia e intensidad del fuego, la recuperación de la cobertura vegetal puede atender a una combinatoria de variables, tales como: tipo de vegetación (*e.g.*, fisonomía), tolerancia al fuego de las especies, propiedades físico-químicas del suelo, abundancia de precipitaciones, entre otras. Así por ejemplo, Goevia *et al.* (2010) encontraron que los bosques de Eucaliptos (*Eucalyptus globulus* Labill.) presentaron una recuperación post-incendio más rápida que aquellos de coníferas (*Pinus pinaster* Ait.), debido a que la regeneración de la primera especie depende de brotes que pudieron protegerse del daño del fuego, en tanto que la regeneración de la segunda especie depende de semillas que en gran medida se destruyeron al calcinarse el suelo. Tales nociones podrían ser incorporadas en futuros trabajos centrados en el seguimiento de la regeneración de las especies vegetales afectadas por el incendio Olguín.

Referencias

- Abdel Malak, D., Pausas, J.G. 2006. Fire regime and post-fire Normalized Difference Vegetation Index changes in the eastern Iberian peninsula (Mediterranean basin). *International Journal of Wildland Fire*, 15, 407-413. <https://doi.org/10.1071/WF05052>
- Bastos, A., Gouveia, C.M., DaCamara, C.C., Trigo, R.M. 2011. Modelling post-fire vegetation recovery in Portugal. *Biogeosciences*, 8, 3593-3607. <https://doi.org/10.5194/bg-8-3593-2011>
- CEQUA (Centro de Estudios del Cuaternario Fuego-Patagonia y Antártica). 2014. *Difusión cartográfica digital a escala local Parque Nacional Torres del Paine*. Punta Arenas: CEQUA.
- Chen, X., Vogelmann, J.E., Rollins, M., Ohlen, D., Key, C.H., Yang, L., Chengquan, H., Shi, H. 2011. Detecting post-fire burn severity and vegetation recovery using multitemporal remote sensing spectral indices and field-collected composite burn index data in a ponderosa pine forest. *International Journal of Remote Sensing*, 32(23), 7905-7927. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.524678>
- De Santis A., Chuvieco, E. 2007. Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*, 108, 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.022>
- 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. <https://doi.org/10.1080/01431160210144732>
- Díaz-Delgado, R., Salvador, R., Pons, X. 1998. Monitoring of plant community regeneration after fire by remote sensing. En: L. Traboud (Ed.), *Fire management and landscape ecology* (pp. 315-324). Fairfield, WA: International Association of Wildland Fire.
- 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. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- Garay, G., Guineo, O. 1995. *Conociendo la flora y montaña de "Torres del Paine"*. Punta Arenas: Impresiones Don Bosco.
- Gouveia, C., DaCamara, C.C., Trigo, R.M. 2010. Post-fire recovery in Portugal based on spot/vegetation data. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10, 673-684. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-673-2010>
- IEB (Instituto de Ecología y Biodiversidad, CL). 2012. *Plan de Restauración Ecológica del Parque Nacional Torres del Paine afectado por incendio 2011-2012*. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente.
- Jones, H., Vaughan, R. 2010. *Remote sensing of vegetation: Principles, techniques and applications*. New York: Oxford University Press.
- Kushla, J., Ripple, W. 1998. Assessing wildfire effects with Landsat Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*, 19, 2493-2507. <https://doi.org/10.1080/014311698214587>
- Liang, S., Li, X., Wang, J. 2012. *Advanced remote sensing: Terrestrial information extraction and applications*. Oxford: Academic Press.
- 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. Disponible en http://www.aet.org.es/revistas/revista38/Numero38_04.pdf (Último acceso: diciembre de 2017).
- Navarro Cerrillo, RM., 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 multispectrales. *Revista Chilena de Historia Natural*, 81, 95-110. <https://doi.org/10.4067/S0716-078X2008000100008>
- Peña, M. 2008. Relationships between remotely sensed surface parameters associated with the urban heat sink formation in Santiago, Chile. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5), 4385-4404.
- USGS (United States Geological Survey). USGS Global Visualization Viewer. Earth Resources Observation and Science Center (EROS). <http://glovis.usgs.gov/>. (Consultado el 10 de noviembre de 2015).
- Viedma, O., Meliá, J., Segarra, D., García-Haro, J. 1997. Modelling rates of ecosystem recovery after fires using Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 61, 383-398. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00048-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00048-5)
- Villa-Martínez, R., Moreno, P. 2007. Pollen evidence for variations in the southern margin of the westerly winds in SW Patagonia over the last 12,600 years. *Quaternary Research*, 68, 400-409. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2007.07.003>
- Zentrum für Satellitengestützte Kriseninformation (ZKI). Disaster Extent Map - Overview - Chile - Torres del Paine National Park. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). <https://www.zki.dlr.de/map/2165>. (Consultado el 2 de febrero de 2016).