

CASO PRÁCTICO

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

Vidal, P.*^{1,2}, De Santis, A.^{3,4}, Pérez, W.^{1,2}, Honeyman, P.⁵

¹ Magíster en Teledetección, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Chile.

² Hémera Centro de Observación de la Tierra, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Chile.

³ HOPE (Humanitarian Operations), 34 rue Breydel, 1040 Bruxelles, Belgium.

⁴ Centro Regional Fundación CEQUA, España 184, Punta Arenas, Chile.

⁵ Oterra Centro de Estudios de Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Mayor, Chile.

Resumen: En Chile, los incendios forestales afectan miles de hectáreas de vegetación cada año, fenómeno que se ha incrementado sostenidamente en el tiempo, tanto en cantidad de incendios como en superficie afectada. Entre los años 1985 y 2016 se han registrado 1.476 incendios de magnitud (mayores a 200 ha), lo que corresponde a un total de 1.243.407 ha de vegetación quemada en el período, y a un promedio de 40.000 ha afectadas por año. Dependiendo del tipo e intensidad del incendio existen diferentes niveles de severidad con la que el fuego afecta la vegetación, variación que es determinante para la estimación de las emisiones de gas de efecto invernadero (GEI) generadas en el evento. Este trabajo tiene como objetivo analizar la severidad del incendio La Rufina, originado a principios del año 1999 en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, mediante el análisis de imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM+, como insumo para lograr una estimación estratificada de los GEI emitidos de acuerdo al tipo de vegetación afectada y el grado de severidad. Se utilizó el *Normalized Burn Ratio (dNBR)* para analizar la severidad del incendio, la ecuación propuesta por el IPCC del año 2006 y los factores de ajuste de eficiencia de la combustión propuestos por De Santis *et al.* (2010) para estimar los GEI emitidos. Los resultados obtenidos muestran que 16.783 ha del área total, fueron afectadas con algún grado de severidad, siendo el bosque nativo y las plantaciones las coberturas afectadas mayormente por la severidad alta. Se estimaron las toneladas de GEI por hectárea emitidas para cada nivel de severidad y tipo de vegetación, siendo el dióxido de carbono (CO₂) el principal GEI emitido a la atmósfera en el incendio. Las mayores emisiones se dieron en las áreas de pastizales y matorrales, afectadas con severidad alta, con valores que oscilan entre los 186 y 170 t/ha respectivamente.

Palabras clave: La Rufina, Landsat, dNBR, NDVI, Severidad del incendio, GEI.

To cite this article: Vidal, P., De Santis, A., Pérez, W., Honeyman, P. 2017. Use of remote sensing tools for severity analysis and greenhouse gases estimation in large forest fires. Case study of La Rufina forest fire, VI Region of L. G. B. O'Higgins, Chile. *Revista de Teledetección*, 50, 59-69. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.8987>

* Autor para la correspondencia: paulina.vidal@umayor.cl

Use of remote sensing tools for severity analysis and greenhouse gases estimation in large forest fires. Case study of La Rufina forest fire, VI Region of L. G. B. O'Higgins, Chile

Abstract: Wildfires destroy thousands of hectares of vegetation every year in Chile, a phenomenon that has steadily increased over time, both in terms of the number of fires and the area affected. Since 1985 until 2016 have occurred 1,476 wildfires severe in intensity (> 200 ha), that burned a total of about 1,243,407 ha of vegetation, and an average of 40,000 ha affected per year. Depending on the type and intensity of the fire, there are different levels of severity with which the fire affects the vegetation, a variation that is crucial for the estimation GEI in the event. The purpose of this research was to analyze the burn severity of Rufina wildfires occurred in 1999, in the VI Region of L. G. B. O'Higgins in Chile, south of the capital Santiago, using Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ imagery, including in the analysis the estimated greenhouse gases emitted in relation to with the vegetation and burn severity. Burn severity was estimated through the Normalized Burn Ratio (dNBR) and GEI with the equation proposed by IPCC in 2006, which was adjusted with the combustion efficiency coefficients proposed by De Santis *et al.* (2010). The results show that around 16,783 ha were affected by fires of different severity and the native forest and tree plantations were affected by high severity. The ton of GEI for each level of burn severity and type of vegetation was estimated, being carbon dioxide (CO₂) the main GEI emitted to the atmosphere in the fire. The highest emissions occurred in the areas of grasslands and scrublands, with high severity, with values ranging between 186 and 170 t/ha respectively.

Key words: La Rufina, Landsat, dNBR, NDVI, burn severity, greenhouse gas.

1. Introducción

Los incendios forestales tienen un gran impacto sobre la dinámica ambiental, ecológica y económica de los países. Según Chuvieco (2009), los incendios a escala global pueden afectar al equilibrio mundial de los gases de efecto invernadero y causar daños a escala local como pérdida de biodiversidad, degradación de los suelos, bosques y además provocar grandes daños a la infraestructura.

En este contexto, el uso de la tecnología satelital y los sistemas de información geográfica (SIG) juegan un papel importante en la evaluación, análisis y cuantificación de los incendios forestales debido a que el rango de técnicas y sensores remotos utilizados en este tipo de aplicaciones es muy amplio (Chuvieco, 2009).

De hecho, los incendios forestales han sido ampliamente estudiados con técnicas de teledetección por diferentes autores (Bastarrica *et al.*, 2011; Boer *et al.*, 2008; Chuvieco *et al.*, 2002, 2005; De Santis *et al.*, 2007; Epting *et al.*, 2005; Gitas *et al.*, 2009; Ireland y Petropoulos, 2015, entre otros) los cuales han aplicado una gran cantidad de técnicas para identificar, evaluar y cuantificar áreas quemada de incendios forestales en todo el mundo, además de cuantificar las emisiones producidas por estos.

De Santis y Vaughan (2009) señalan que los incendios forestales modifican la cubierta vegetal, reduciendo por ejemplo el contenido de clorofila y humedad de la vegetación. Además, ante un evento de este tipo se incrementa el porcentaje de suelo desnudo, se carboniza y se altera su color y humedad, afectando la respuesta espectral del área quemada. De manera similar, White *et al.* (1996) muestran que la disminución de la clorofila y humedad en la vegetación afectada conducen a un aumento de la reflectividad de las longitudes de onda del visible (VIS) e infrarrojo medio (SWIR) respectivamente, y una pérdida en el infrarrojo cercano (IRC) por el deterioro de la estructura interna de la hoja.

Basándose en la respuesta espectral de la vegetación quemada, algunos autores han desarrollado diversos índices para estimar la severidad de un incendio forestal; *Burned Area Index* (BAI) (Chuvieco *et al.*, 2008), *Normalized Burn Ratio* (dNBR) (Key and Benson, 2005), *Relative delta Normalized Burn Ratio* (RdNBR) (Miller y Thode, 2007), entre otros.

Más en detalle, el dNBR (Key y Benson, 2005) evalúa la severidad de un incendio en términos de magnitud del cambio ecológico causado por el fuego. Este índice calcula mediante datos del satélite Landsat la diferencia temporal entre el conjunto de datos pre y post-incendio para determinar la

extensión y el grado de cambio detectado en un incendio, utilizando la diferencia normalizada de la reflectividad en las bandas del infrarrojo cercano y SWIR.

El U.S. Forest Service (United States Department Agriculture) evalúa la severidad de los incendios (desde el año 1984 al presente) mediante el índice *dNBR* a través del proyecto *Monitoring Trends in Burn Severity* (MTBS) con la finalidad de proveer información necesaria ante la ocurrencia de un incendio forestal, desarrollar planes de manejo y monitorear la recuperación de la vegetación en las áreas afectadas en los Estados Unidos (Eidenshink *et al.*, 2007).

En el ámbito nacional destaca el trabajo de Mattar *et al.* (2012), en donde se estima el área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine (18.059 ha) utilizando datos de teledetección y el índice de la razón normalizado de área quemada *NBR* para estimar el grado de severidad del incendio forestal con imágenes Landsat 7 ETM+.

Por otro lado, varios autores (Conard *et al.*, 2002; De Santis *et al.*, 2010; Mouillot *et al.*, 2014, entre otros) han estudiado metodologías para la estimación de las emisiones producidas en un incendio forestal mediante técnicas de teledetección. Conard *et al.* (2002) señalan que los sensores remotos poseen un alto potencial de ser utilizados en investigaciones relacionadas con el stock de carbono de los ecosistemas debido a que los incendios liberan el carbono que se almacena en la vegetación. De Santis *et al.* (2010) señalan que los mapas de severidad de un incendio pueden utilizarse para mejorar la evaluación de la eficiencia de la combustión y propone un ajuste de dichos valores en función de la severidad del incendio por tipo de vegetación. Chaves (2014) propone una metodología para estimar las emisiones de dos incendios forestales en España mediante técnicas de teledetección. Así entonces, los datos de sensores espaciales y aerotransportados han sido ampliamente utilizados para evaluar las condiciones ambientales antes de un incendio, durante los incendios, y para detectar la respuesta espectral post-incendio (Lentile *et al.*, 2006).

Entre los sensores satelitales disponibles, las imágenes Landsat se han utilizado tradicionalmente para crear índices que clasifican la severidad de un incendio forestal debido a su resolución temporal

(16 días), la facilidad de adquisición de las imágenes, y sus resoluciones espectral y espacial (Chuvienco, 2009).

El objetivo principal de este trabajo consiste en analizar la severidad del incendio La Rufina en Chile y estimar las emisiones de gases de efecto invernadero mediante un análisis de imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM+.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde a la superficie afectada por uno de los incendios forestales más grandes ocurrido en Chile hasta el año 2016, localizado en el sector de La Rufina, a 27 km de la Ciudad de San Fernando, en la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (Figura 1). La superficie quemada según la Corporación Nacional Forestal (CONAF), corresponde a 25.389 ha de bosque nativo, matorral, pastizal y plantaciones, de acuerdo a la clasificación del Catastro de Bosque Nativo (CONAF, 1996).

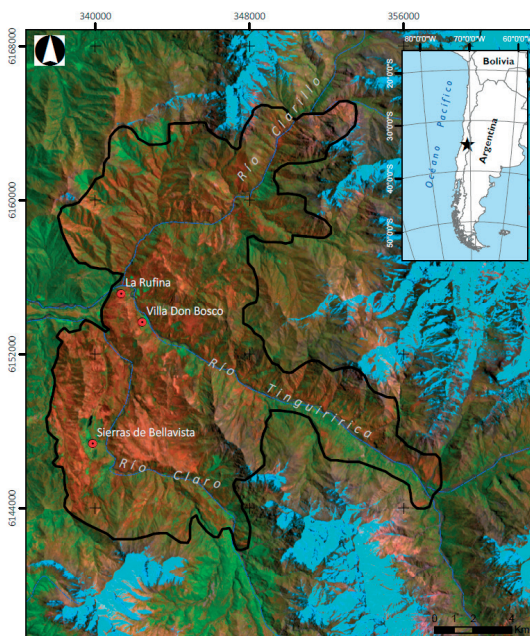


Figura 1. Área de estudio (Imagen Landsat ETM+, 8/11/1999, R: b7, G: b4, B: b1, UTM, WGS 84, zona 19 S). En negro se muestra el perímetro del incendio.

Tabla 1. Imágenes satelitales Landsat utilizadas.

Sensor	Banda	Rango espectral (µm)	Resolución espacial	Fecha captura de la imagen	PATH	ROW
Landsat 5 TM	1 Blue	0,45 - 0,52	30 m	15-12-1998		
	2 Green	0,52 - 0,60				
	3 Red	0,63 - 0,69				
	4 Near-Infrared	0,76 - 0,90	120 m			
	5 Near-Infrared	1,55 - 1,75				
	6 Thermal	10,40 - 12,50				
	7 Mid-Infrared	2,08 - 2,35				
Landsat 7 ETM+	1 Blue	0,45 - 0,52	30 m	08-11-1999	233	84
	2 Green	0,52 - 0,60				
	3 Red	0,63 - 0,69				
	4 Near-Infrared	0,77 - 0,90				
	5 Near-Infrared	1,55 - 1,75				
	6 Thermal	10,40 - 12,50	60 m			
	7 Mid-Infrared	2,08 - 2,35	30 m			
	8 Panchromatic	0,52 - 0,90	15 m			

Bandas consideradas en el estudio

Fuente: Adaptado de landsat.usgs.gov

En el área de estudio se utilizaron datos obtenidos de los sensores 5 TM y 7 ETM+ (Tabla 1) de la serie Landsat en donde se seleccionaron las imágenes que presentaron menor porcentaje de cobertura de nubes, que cubrieran la totalidad de la superficie del incendio y que representaran condiciones fenológicas y de humedad similares. Las imágenes fueron descargadas del servidor gratuito del *United States Geological Survey* (USGS, Estados Unidos).

2.2. Procesamiento de las imágenes

2.2.1. Calibración radiométrica y corrección atmosférica

Los valores originales de las imágenes; Niveles Digitales (*DN*) fueron calibrados a valores de radiancia usando los valores de *gain* (G_b) y *bias* (B_b) para cada banda obtenidos de los archivos de cabecera de las imágenes mediante la ecuación 1:

$$L_i = DN_i \times G_b + B_b \tag{1}$$

Donde L_i es el valor de radiancia espectral medido en valores de $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$; DN_i es el número digital de cada píxel por banda; G_b es la ganancia para cada banda en particular (*gain*) y B_b es el desfase para cada banda en particular (*bias*).

Para efectos de este estudio, se realizó la corrección atmosférica en el módulo FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) en el software ENVI® 5.3 el cual incorpora el código de transferencia radiativa de MODTRAN4.

2.2.2. Corrección topográfica

Una vez corregidas atmosféricamente las imágenes Landsat 5 TM y 7 ETM+, se realizó una corrección topográfica mediante la ecuación 2 (Civco, 1989):

$$ND'_{i,j} = ND_{i,j} + (ND_{i,j} \times (I_x - I_{i,j}) / I_x) \tag{2}$$

Donde $ND'_{i,j}$ son los valores de reflectividad corregidos topográficamente para cada banda; $ND_{i,j}$ son los valores de reflectividad de entrada para cada banda; I_x es la media de la imagen de iluminación para toda la imagen y $I_{i,j}$ es el valor de iluminación por píxel.

Se utilizó para la corrección topográfica el producto ASTER GDEM de 30 metros (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

2.2.3. Co-registro

Para asegurar la perfecta superposición, se realizó un co-registro entre las imágenes Landsat 5 TM

y 7 ETM+. Se utilizó el método del vecino más cercano (RMSE < 0,5) y la imagen Landsat 5 TM (pre-incendio) fue tomada como referencia.

2.3. Severidad del incendio

Para determinar la severidad del incendio se utilizó el NBR *Normalized Burn Ratio* (Key y Benson, 2005), que se muestra en la ecuación 3;

$$NBR = (B_4 - B_7) / (B_4 + B_7) \quad (3)$$

Donde B_4 corresponde a las longitudes de onda de 0,82 μm y B_7 corresponde a las longitudes de onda 2,22 μm .

Luego de calcular el NBR para cada imagen se calculó el dNBR, el cual estima la severidad del incendio restando la imagen pre-incendio (Landsat 5 TM) con la imagen post-incendio (Landsat 7 ETM+) tal como se muestra en la ecuación 4:

$$dNBR = NBR_{pre-incendio} - NBR_{post-incendio} \quad (4)$$

A partir del dNBR se clasificó la imagen resultante en los niveles de severidad del incendio que se indican en la Tabla 2; categorización que ha sido utilizada para diferentes tipos de vegetación, incluyendo la vegetación de zonas mediterráneas como la del área de interés (Miller *et al.*, 2007; González y Rios, 2009; Gitas *et al.*, 2009; De Santis *et al.*, 2010) y que concuerda con las inspecciones visuales en terreno realizadas en octubre del año 2016 con el objetivo de identificar zonas con alta y baja afectación.

Tabla 2. Niveles de severidad de un incendio (Key y Benson, 2005).

Nivel de severidad	dNBR
No quemado	-0,1 – 0,1
Área quemada de baja severidad	0,1 – 0,27
Área quemada de severidad media	0,27 – 0,44
Área quemada de severidad media alta	0,44 – 0,66
Área quemada de severidad alta	>0,66

Finalmente se identificó para cada categoría de severidad, el tipo de vegetación afectada según el Catastro de Bosque Nativo del año 1996 de CONAF (bosque nativo, plantación, matorral arborescente denso, matorral arborescente abierto, estepa central andina).

2.4. Estimación de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generados por el incendio

Para estimar las emisiones de gases de efecto invernaderos generados por el incendio La Rufina se utilizó la ecuación 5 propuesta por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2006).

$$L_{fire} = A \times M_B \times C_f \times G_{ef} \times 10^{-3} \quad (5)$$

Donde L_{fire} es el valor de las emisiones de GEI generados por un incendio (toneladas de cada GEI); A es el área quemada (ha); M_B es la biomasa disponible para la combustión ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$). Este factor normalmente incluye la biomasa, la hojarasca molida y madera muerta; C_f es el factor de combustión (adimensional) o eficiencia de la combustión y G_{ef} es el factor de emisión (adimensional), $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ de material seco quemado.

Las variables de la ecuación mencionada anteriormente se obtuvieron de la siguiente manera:

A : El área quemada se delimitó a través de la clasificación de la imagen obtenida del índice NBR para cada nivel de severidad.

M_B : La biomasa disponible para la combustión se obtuvo del modelo de cuantificación de stock de carbono en bosques mediterráneos realizado en el marco del proyecto de Estimación de CO_2 para la jurisdicción mediterránea (Cano *et al.*, 2016).

C_f : El factor de combustión utilizado fue el propuesto por De Santis *et al.* (2010), que se indica en la Tabla 3.

Tabla 3. Valores de eficiencia de la combustión tomado De Santis *et al.* (2010).

Severidad del incendio (tasa de consumo)	Eficiencia de la combustión o Cf ajustado por tipo de vegetación			
	Pasto	Matorral	Coníferas	Bosque
Baja	0,83	0,71	0,25	0,25
Moderada	0,9	0,84	0,47	0,4
Alta	0,98	0,95	0,65	0,56

G_{ef} : El factor de emisión utilizado fue el propuesto por el IPCC (2006), y que se presenta en la Tabla 4.

Se utilizó la categoría de “Extra bosques tropicales” el cual incluye todos los otros tipos de bosque.

Tabla 4. Factores de emisiones IPCC (2006).

Categoría	Factores de emisiones (g·kg ⁻¹ de materia seca quemada)				
	CO ₂	CO	CH ₄	N ₂ O	NO _x
Sabana y pastizales	1613±95	65±20	2,3±0,9	0,21±0,1	3,9±2,4
Residuos agrícolas	1515±177	92±84	2,7	0,07	2,5±1,0
Bosques tropicales	1580±90	104±20	6,8±2,0	0,2	1,6±0,7
Extra bosques tropicales*	1569±131	107±37	4,7±1,9	0,26±0,07	3±1,4
Quema de biocombustibles	1550±95	78±31	6,1±2,2	0,06	1,1±0,6

*La categoría “extra bosque tropicales” incluye todos los otros tipos de bosques.

3. Resultados

3.1. Severidad del incendio

La superficie afectada por el incendio ocurrido el 1 de enero de 1999 en el sector de la Rufina se calculó en 25.674 ha. En la Figura 2 se observa el perímetro del incendio y los diferentes niveles de severidad obtenidos mediante el índice dNBR que afectaron a la vegetación en los 20 días que se propagó en el sector.

Existen diferentes niveles de severidad en el área siniestrada lo que puede responder a las diferentes variables geomorfológicas presentes en el lugar (altitud, pendiente y exposición) y a las variables climáticas (humedad de la vegetación, temperatura, dirección y velocidad del viento).

En relación a la superficie quemada, el 34,1% corresponde a la severidad media; el 24,8% a severidad baja y el 6,5% a severidad alta. Los niveles de severidad por hectárea se pueden observar en la Tabla 5.

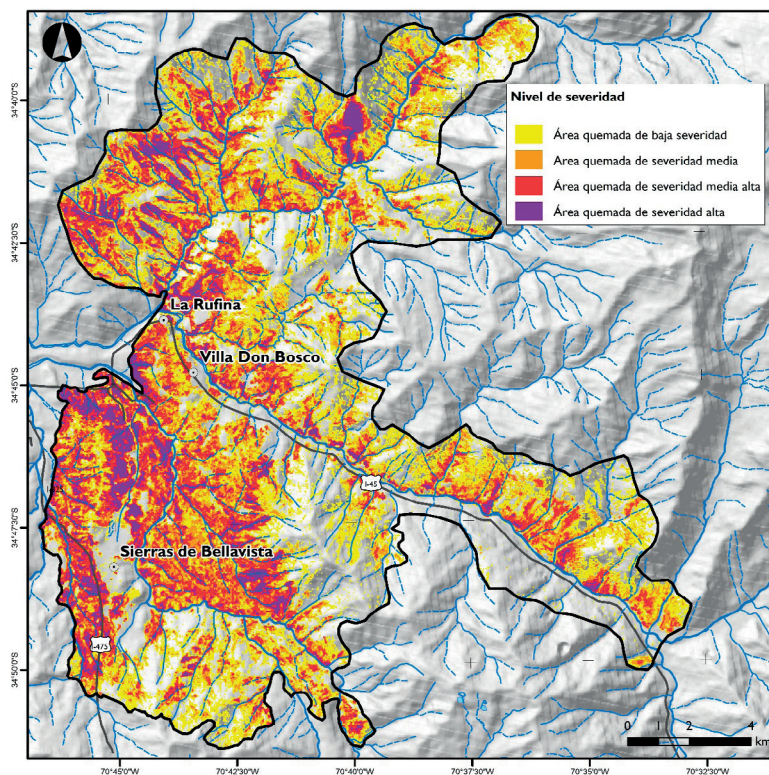


Figura 2. Niveles de severidad incendio La Rufina, 1999.

Tabla 5. Superficie quemada (ha) y porcentaje por nivel de severidad.

Nivel de severidad	Superficie quemada (ha)	Superficie quemada (%)
No quemado	8.891,6	34,6
Severidad baja	6.365,8	24,8
Severidad media	4.946,5	19,3
Severidad media alta	3.810,2	14,8
Severidad alta	1.660,4	6,5
Total	25.675	100

De acuerdo al Catastro de Bosque Nativo de la Región de O'Higgins del año 1996 de CONAF (catastro previo al incendio) la superficie correspondiente a vegetación es de 23.260 ha. La superficie de bosque nativo corresponde a 1.263 ha, de las cuales 186 ha fueron incendiadas con severidad alta y 596 ha con severidad media.

La mayor superficie en el área afectada por el incendio corresponde a matorral (14.719 ha) de las

cuales 508 ha se quemaron con severidad alta y 5.078 ha con severidad media.

En la Tabla 6 se observa la superficie en hectáreas y porcentaje de acuerdo a tipo de vegetación según Catastro de Bosque Nativo y nivel de severidad.

3.2. Emisiones GEI

En el incendio La Rufina se consumieron 78 t/ha de biomasa la que incluye todos los tipos de vegetación (tipos de combustible) presentes en el área de estudio al momento del incendio. A pesar de que la superficie de bosque nativo (1.042 ha) es la que presenta menor cantidad de superficie con respecto al área total, es la que posee los valores más altos de biomasa (387.267,8 toneladas; incluye bosque nativo y renoval) y fue el tipo de vegetación (junto con las plantaciones) que fueron afectados por el nivel de severidad más alto.

Tabla 6. Nivel de severidad de acuerdo a tipo de vegetación.

Uso de suelo según Catastro de bosque Nativo (1996)	Nivel de severidad *	Superficie (ha)	Superficie (%)	
Bosque exóticas asilvestradas	Severidad alta	6,83	0,03	
Bosque Nativo	Severidad alta	185,89	0,80	
Bosque nativo exóticas asilvestradas	Severidad alta	112,01	0,48	
Estepa Andina Central	Severidad alta	9,47	0,04	
Matorral	Severidad alta	507,69	2,19	1624,4 ha
Plantación Joven-Recién Cosechada	Severidad alta	10,31	0,04	
Plantación	Severidad alta	286,53	1,23	
Renoval	Severidad alta	505,69	2,18	
<hr/>				
Bosque exóticas asilvestradas	Severidad baja	7,15	0,03	
Bosque Nativo	Severidad baja	261,17	1,12	
Bosque nativo exóticas asilvestradas	Severidad baja	68,41	0,29	
Estepa Andina Central	Severidad baja	709,88	3,06	
Matorral	Severidad baja	3.937,55	16,96	5704,6 ha
Plantación Joven-Recién Cosechada	Severidad baja	4,87	0,02	
Plantación	Severidad baja	75,33	0,32	
Renoval	Severidad baja	640,22	2,76	
<hr/>				
Bosque exóticas asilvestradas	Severidad Media	21,3	0,09	
Bosque Nativo	Severidad Media	595,81	2,57	
Bosque nativo exóticas asilvestradas	Severidad Media	363,96	1,57	
Estepa Andina Central	Severidad Media	328,38	1,41	
Matorral	Severidad Media	5.077,84	21,87	8536,3 ha
Plantación Joven-Recién Cosechada	Severidad Media	9,3	0,04	
Plantación	Severidad Media	287,12	1,24	
Renoval	Severidad Media	1.852,63	7,98	
Total			68,32	16.783 ha

En la Tabla 7 se señala la cantidad de biomasa total (t/ha) disponible para la combustión.

Tabla 7. Biomasa pre existente disponible para la combustión en el incendio.

Biomasa total	2.013.784 t		100%
Biomasa total área quemada	1.348.284 t	78 t/ha	67%

En relación a los gases de efecto invernadero (GEI) emitidos a la atmósfera (Tabla 8) el principal es el dióxido de carbono (CO₂) con 88 t/ha lo que equivale al 93% de los GEI emitidos. Lo sigue el monóxido de carbono (CO) con 6 t/ha, el metano (CH₄) con 0,2 t/ha, y en último lugar el óxido nitroso (N₂O) con 0,015 t/ha respectivamente.

Tabla 8. Emisiones de GEI en el área incendiada con algún nivel de severidad.

	t	t/ha	kg/ha	%
CO ₂	1.402.195	88,381	88.381	93,33
CO	95.624,5	6,027	6.027	6,37
CH ₄	4.200,3	0,265	265	0,28
N ₂ O	232,4	0,015	15	0,02
Total	1.502.252	95	94.688	100

En la Tabla 9 se observan las toneladas de dióxido de carbono (CO₂) por hectárea emitidas a la

atmósfera por nivel de severidad y tipo de vegetación, y en la Figura 3 se muestra la distribución espacial de las emisiones de CO₂.

Tabla 9. Emisiones de CO₂ por nivel de severidad y tipo de vegetación.

Nivel de severidad	Tipo de vegetación	t totales	t/ha
Severidad alta	Bosque	82.731,2	102,1
Severidad alta	Coníferas	35.880,2	120,9
Severidad alta	Matorral	86.783,7	170,9
Severidad alta	Herbáceas	1.761,9	186,1
Severidad baja	Bosque	32.510,3	33,3
Severidad baja	Conífera	1.972,5	24,6
Severidad baja	Matorral	30.7367,8	78,1
Severidad baja	Herbáceas	68.779,7	96,9
Severidad Media	Bosque	165.699,9	58,5
Severidad Media	Conífera	18.655,2	62,9
Severidad Media	Matorral	558.437,3	109,9
Severidad Media	Herbáceas	41.637,5	126,8

El tipo de combustible que liberó mayor cantidad de dióxido de carbono (CO₂) fue el de los matorrales que emitieron 558,437 toneladas y que fue afectado por una severidad media. El tipo de vegetación correspondiente a bosque nativo y afectado por una alta severidad emitió 82,731 toneladas.

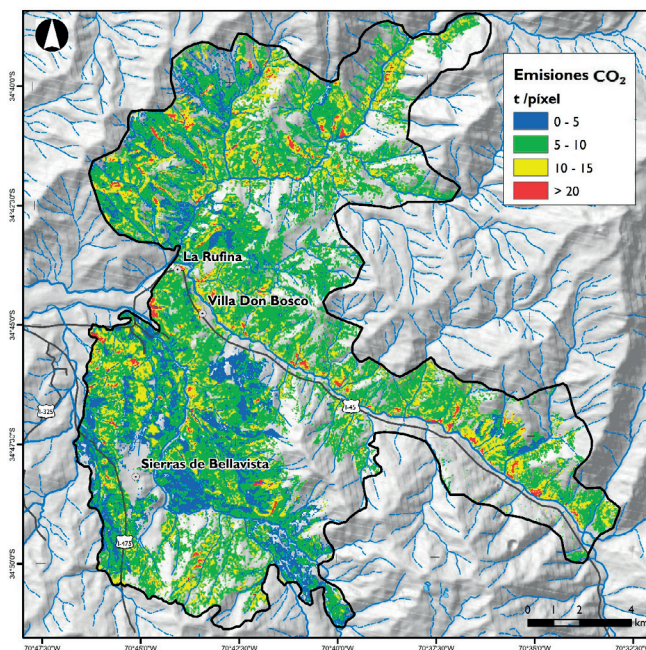


Figura 3. Emisiones de CO₂ en el incendio La Rufina.

Discusión y conclusión

La superficie del incendio forestal La Rufina, calculada mediante interpretación visual de la imagen de satélite pre y post-incendio, presenta un aumento de 285 ha (9,9%) con respecto al dato oficial de CONAF (diferencia que puede deberse a que el cálculo de superficie puede haberse estimado mediante puntos GPS en terreno o desde un helicóptero), sin embargo, de acuerdo a los diferentes estudios revisados (Eidenshink *et al.*, 2007; Chuvieco, 2009; De Santis *et al.*, 2010) la utilización de imágenes para calcular y delimitar superficies incendiadas son ampliamente utilizadas y validadas.

En relación a la superficie quemada, el 34,1% corresponde a la severidad media; el 24,8% a severidad baja y el 6,5% a severidad alta, siendo la severidad alta la que presenta el menor porcentaje de superficie afectada en relación a la superficie total. El tipo de vegetación afectada corresponde a bosque nativo y plantaciones, que para el caso de bosque nativo es la que mayor tiempo demora en recuperarse.

La generación de mapas de la severidad del incendio mediante el índice dNBR es una herramienta sencilla que apoya a la gestión de los planes de manejo, reforestación y monitoreo de las áreas incendiadas. En este sentido, la captura de datos en terreno mediante índices de campo como CBI (Key y Benson, 2005) o GeoCBI (De Santis *et al.*, 2009) son de suma importancia para la validación de la información entregada por los índices que estiman la severidad del incendio. Para el caso analizado no se contó con validación en campo por la fecha del incendio (1999). La disponibilidad de datos como líneas base de biomasa en los inventarios forestales y datos de severidad obtenidos en campo es una limitante al momento de desarrollar estudios de este tipo.

El dióxido de carbono (CO₂) liberado a la atmósfera durante el incendio se estimó en 88 t/ha lo que equivale al 93% de los GEI emitidos (con respecto a los GEI analizados). Un estudio en la región valenciana mediterránea en España (Chaves, 2014) estimó la emisión de CO₂ en una superficie de 20.945 ha de 36 t/ha, valor que se calculó mediante la ecuación de Wiedinmyer *et al.* (2006). Para este trabajo, la emisión de CO₂ se calculó mediante la ecuación propuesta por el

IPCC (2006). La emisión de los diferentes GEI estimados, muestran una relación en los porcentajes de GEI liberados a la atmósfera con respecto al trabajo de Chaves (2014).

Se utilizaron los valores de eficiencia de la combustión propuestos por De Santis *et al.* (2010) que ajustan mediante datos obtenidos por sensores remotos el valor de eficiencia de la combustión propuestos en la literatura. Estos valores tienen en cuenta la variabilidad espacial demostrando consistencia y aplicabilidad en los ecosistemas mediterráneos. En relación a lo anterior, el ajuste del factor de combustión en un incendio forestal relacionado con la severidad del incendio adquiere gran importancia, ya que mejoran las estimaciones de las emisiones de GEI a la atmósfera, debido a que generalmente se utiliza un valor estándar del 100% para realizar este tipo de cálculo, lo que aumenta la incertidumbre en los estudios realizados en esta temática.

En Chile, de acuerdo al último informe del Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero, serie temporal 1990-2010 (MMA, 2014), las emisiones generadas por los incendios forestales son contabilizadas dentro del sector uso de la tierra y silvicultura (es el único sector que absorbe CO₂ y que las variaciones interanuales se deben principalmente a incendios forestales de bosque nativo y plantaciones forestales). Sin embargo, debido a la gran cantidad de incendios forestales de magnitud (>200 ha) ocurridos en los últimos años, se propone que sean contabilizados por separado, ya que la reducción de GEI está contemplada dentro de los compromisos actuales y futuros del Gobierno de Chile (reducir el 20% de las emisiones al año 2020; compromiso suscrito en la XV Conferencia sobre el Cambio Climático de la ONU 2009 en Copenhague y ratificado ante Naciones Unidas en el año 2010).

En este contexto, las imágenes de satélite de la serie Landsat son una herramienta de gran utilidad para delimitar el área quemada, determinar la severidad del incendio y estimar GEI, debido a que su disponibilidad es gratuita y además a la gran cantidad de bibliografía que existe referente a la temática, aún más en el caso particular de Chile en que los incendios forestales han pasado a ser una problemática crítica a nivel país.

Agradecimientos

Este artículo se ha realizado en el contexto de fin de grado del Magíster en Teledetección, Facultad de Ciencias de la Universidad Mayor. La autora principal agradece a la Universidad Mayor por la oportunidad de desarrollar esta investigación, en especial a mi profesora guía Ángela de Santis, Waldo Pérez, Pablo Honeyman y Alejandro Bascuñán por sus observaciones y apoyo en el desarrollo del trabajo y a mis compañeros de Magíster Carolina Barrientos y Jorge Saavedra por orientarme en algunas temáticas referente a los incendios forestales.

Referencias

- Bastarrika, A., Chuvieco, E., Martín, M. P. 2011. Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors. *Remote Sensing of Environment*, 115(4), 1003-1012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.005>
- Boer, M. M., Macfarlane, C., Norris, J., Sadler, R. J., Wallace, J., Grierson, P. F. 2008. Mapping burned areas and burn severity patterns in SW Australian eucalypt forest using remotely-sensed changes in leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 112(12), 4358-4369. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.08.005>
- Cano, J., Sartori, A., Quintanilla, O., Oyarzún, V., Sidman, G., Casarim, F., MacMurray, A., Pearson, T., Gayoso, J., Sandoval, V., Almonacid, N., Bahamondez, C., Rojas, Y., Sagardia, Y., Honeyman, P. 2016. Nivel de Referencia de Emisiones Forestales/Nivel de Referencia Forestal del Bosque Nativo de Chile. Documento Preliminar. Santiago de Chile: CONAF.
- Chaves, J. 2014. *Incendios Forestales y Cambio Climático. Estimación de Emisiones en los Incendios de Andilla y Cortes de Pallás*. Trabajo de fin de máster. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- 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(23), 5103-5110. <https://doi.org/10.1080/01431160210153129>
- Chuvieco, E., Ventura, G., Martín, M. P., Gómez, I. 2005. Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 450-462. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.006>
- Chuvieco, E., Opazo, S., Sione, W., Valle, H.d, Anaya, J., Bella, C.D, Cruz, I., Manzo, L., López, G., Mari, N., González-Alonso, F., Morelli, F., Setzer, A., Csiszar, I., Kanpandegi, J.A., Bastarrika, A. and Libonati, R., 2008. Global burned-land estimation in Latin America using MODIS Composite Data. *Ecological Applications*, 18(1), 64-79. <https://doi.org/10.1890/06-2148.1>
- Chuvieco, E. 2009. *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Berlin, Heidelberg: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01754-4>
- Civco, D. L. 1989. Topographic Normalization of Landsat Thematic Mapper Digital Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55(9), 1303-1309.
- CONAF, 1996. Catastro y Evaluación de Recursos Vegetacionales Nativos de Chile. Catastro de Bosque Nativo de la Región de O'Higgins. Disponible en <https://sit.conaf.cl/> [Último acceso el 11 de noviembre de 2016].
- Conard, S. G., Sukhinin, A. I., Stocks, B. J., Cahoon, D. R., Davidenko, E. P., Ivanova, G. A. 2002. Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia. *Climatic Change*, 55(1-2), 197-211. <https://doi.org/10.1023/A:1020207710195>
- De Santis, A., Chuvieco, E. 2007. Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*, 108(4), 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.022>
- De Santis, A. y Vaughan, P. 2009. Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas. *Recursos Rurais*, 5, 93-100.
- De Santis, A., Chuvieco, E. 2009. GeoCBI: a modified version of the Composite Burn Index for the initial assessment of the short-term burn severity from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 113(3), 554-562. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.011>
- De Santis, A., Asner, G. P., Vaughan, P. J., Knapp, D. E. 2010. Mapping burn severity and burning efficiency in California using simulation models and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114(7), 1535-1545. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.008>
- Eidenshink, J., Schwind, B., Brewer, K., Zhu, Z., Quayle, B., Howard, S. 2007. A Project for Monitoring Trends in Burn Severity. *Fire Ecology*, 3(1), 3-21. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0301003>
- Epting, J., Verbyla, D., Sorbel, B. 2005. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+. *Remote Sensing of Environment*, 96(3-4), 328-339. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.002>

- González, D. C., Rios, R. C. 2009. Fire Danger, Fire Detection, Quantification of Burned Areas and Description of Post-Fire Vegetation in the Central Area of Chile. In: Chuvieco E. (eds) *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01754-4_5
- Gitas, I. Z., De Santis, A., Mitri, G. H. 2009. Remote Sensing of Burn Severity. In: Chuvieco E. (eds) *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystems*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01754-4_10
- IPCC, 2006. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. Harald Aalde (Norway), Patrick Gonzalez (USA), Michael Gytarsky (Russian Federation), Thelma Krug (Brazil), Werner A. Kurz (Canada), Rodel D. Lasco (Philippines), Daniel L. Martino (Uruguay), Brian G. McConkey (Canada), Stephen Ogle (USA), Keith Paustian (USA), John Raison (Australia), N.H. Ravindranath (India), Dieter Schoene (FAO).
- Ireland, G., Petropoulos, G. P. 2015. Exploring the relationships between post-fire vegetation regeneration dynamics, topography and burn severity: A case study from the Montane Cordillera Ecozones of Western Canada. *Applied Geography*, 56, 232-248. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.016>
- Key, C. H., Benson, N. 2005. 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 & L.J. Gangi (Eds.), *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System* (pp. CD:LA1-LA51). Ogden, UT: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164.
- Lentile, L.B., Holden, Z. A., Smith, A. M. S., Falkowski, M. J., Hudak, A. T., Morgan, P., Lewis, S. A., Gessler, P. E., Benson, N. C. 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, 15(3), 319-345. <https://doi.org/10.1071/WF05097>
- 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.
- Miller, J. D., Thode, A. E. 2007. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta normalized burn ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 66-80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>
- MMA, 2014. Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero de Chile. Serie temporal 1990-2010. Chile: Oficina de Cambio Climático, Ministerio del Medio Ambiente.
- Mouillot, F., Schultz M. G., Yue, C., Cadule, P., Tansey, K., Ciais, P., Chuvieco, E. 2014. Ten years of global burned area products from spaceborne remote sensing-A review: Analysis of user needs and recommendations for future developments. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 26, 64-79. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.014>
- United States Geological Survey (USGS). Último acceso: 11 noviembre de 2016, de <http://glovis.usgs.gov/>
- White, J. D., Ryan, K. C., Key, C. C., Running, S. W. 1996. Remote sensing of forest fire severity and vegetation recovery. *International Journal of Wildland Fire*, 6(3), 125-136. <https://doi.org/10.1071/WF9960125>
- Wiedinmyer, C., Quayle, B., Geron, C., Belote, A., McKenzie, D., Zhang, X., O'Neill, S., Wynne, K.K., 2006. Estimating emissions from fires in North America for air quality modeling. *Atmospheric Environment*, 40(19), 3419-3432. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.02.010>