

Influencia de la heterogeneidad del paisaje en la ocurrencia de incendios forestales en Chile Central¹

Adison Altamirano², Christian Salas³, Valeska Yaitul⁴, Cecilia Smith-Ramirez⁵ y Andrés Ávila⁶

RESUMEN

A pesar de la reconocida importancia de los incendios forestales, la investigación sobre modelación de ocurrencia de incendios es escasa en el Hemisferio Sur, y en particular en Chile. Se estudió el efecto de la heterogeneidad del paisaje en la ocurrencia de incendios forestales en Chile Central. Se ajustó un modelo que incluye variables climáticas, topográficas, de actividad humana y cobertura del suelo. La probabilidad de ocurrencia aumentó con una mayor temperatura mínima y estacionalidad de la precipitación, y disminuyó con una mayor distancia a las ciudades. El modelo clasificó correctamente un 65% de los datos de validación. Las predicciones sugieren que un 38% del área de estudio tiene muy alta probabilidad de ocurrencia de incendios, la cual aumenta bajo un simulado escenario futuro. El modelo predictivo debería ser utilizado como una herramienta para orientar aspectos urgentes de protección y prevención, lo cual debe continuar siendo discutido y evaluado.

Palabras clave: Clima, disturbios antrópicos, patrones de paisaje, regresión logística, sensores remotos.

ABSTRACT

Forest fires are recognized as a serious problem. Despite its importance, research into modelling of forest fire occurrence is lacking for the southern hemisphere, in particular for Chile. We investigated how landscape heterogeneity affects the probability of the occurrence of forest fires in Central Chile. We fitted a logistic regression model which included climatic, topographic, human-related and land-cover variables. Estimated probabilities of forest fire occurrence increased positively

¹ Esta investigación fue apoyada por la Dirección de Investigación de la Universidad de La Frontera. Los autores agradecen a José María Rey-Benayas de la Universidad de Alcalá (España) por facilitar la imagen satelital *Landsat* que fue utilizada en esta investigación (REFORLAN Project, INCO Contract CT2006-032132). También se agradece a la Corporación Nacional Forestal (CONAF) por su apoyo en este estudio mediante la facilitación de información de incendios forestales, y a Alejandro Miranda por su apoyo en la elaboración de los mapas finales. Artículo recibido el 4 de abril de 2012, aceptado el 10 de noviembre de 2012 y corregido el 29 de octubre de 2012.

² Laboratorio de Análisis Cuantitativo de Recursos Naturales, Departamento de Ciencias Fo-

restales, Universidad de La Frontera (Chile). E-mail: adison.altamirano@ufrontera.cl;

³ Laboratorio de Análisis Cuantitativo de Recursos Naturales, Departamento de Ciencias Forestales, Universidad de La Frontera (Chile). E-mail: christian.salas@ufrontera.cl

⁴ Laboratorio de Análisis Cuantitativo de Recursos Naturales, Departamento de Ciencias Forestales, Universidad de La Frontera (Chile). E-mail: valeskayaitul@gmail.com

⁵ Instituto de Ecología y Biodiversidad (Chile). E-mail: csmith@willnet.cl

⁶ Centro de Modelación y Computación Científica, Departamento de Ingeniería Matemática, Universidad de La Frontera (Chile). E-mail: andres.avila@ufrontera.cl

with the minimum temperature and precipitation seasonality, and decreased with distance to cities. The model correctly classified 65% of the validation data set. Our predictions suggest that 38% of the study area has a very high probability of forest fire occurrence. Under the assumed future scenario we predict an important increase in the probability of forest fire occurrence. The prediction model should be seen as a tool for addressing urgent protection and prevention issues, which should be discussed and evaluated further.

Key words: Climate, human disturbance, landscape patterns, logistic regression, remote sensing.

Los ecosistemas están sujetos a distintos tipos de disturbios, los cuales ocurren a diferentes escalas espaciales y temporales (Coppin *et al.*, 2004), siendo los incendios forestales uno de los más frecuentes. Los disturbios por incendios forestales son reconocidos como un problema serio debido a sus enormes impactos ecológicos y económicos (Cardille *et al.*, 2001; Gustafson *et al.*, 2004; González *et al.*, 2005; Ryu *et al.*, 2007). Los incendios forestales resultan en enormes pérdidas económicas debido a la quema de madera, disminución de la calidad del bosque, altos costos de supresión, efectos en el medio ambiente y los valores recreacionales, y ocasionalmente causando la pérdida de vidas humanas (Yadav & Kaushik, 2007). El impacto del fuego sobre los procesos ecológicos y la biodiversidad local es altamente variable entre regiones, lo cual a su vez tiene distintas implicancias para el manejo. Mientras en algunas áreas la composición y estructura de la vegetación, así como las características de la historia natural de las plantas son altamente dependientes de la recurrencia de incendios forestales, en otras áreas, el fuego puede ser un agente causante de disturbios, usualmente introducido por el hombre (Keeley, 1989; Lepart & Debuschee, 1992; Cowling *et al.*, 1996; Armesto *et al.*, 2009).

Varios estudios acerca de ecología del fuego han sido realizados, pero la predicción de incendios forestales a nivel de paisaje es aún un desafío reciente. Aspectos relacionados con el fuego, tales como incendios naturales y antrópicos, efectos postincendio sobre la vegetación, manejo forestal y agrícola, historia del fuego y dinámica temporal, han sido importantes temas de estudio en ecología (Armesto y Gutiérrez, 1978; Montenegro *et al.*, 2004; González *et al.*, 2005;

Abarzúa & Moreno, 2008; Beaty & Taylor, 2008; Burrows, 2008). Aunque la investigación en predicción de ocurrencia de incendios forestales a nivel o escala de paisaje (i.e. >100.000 ha) ha sido un tema creciente y reciente en el Hemisferio Norte (Vega-García & Chuvieco, 2006; Schumacher *et al.*, 2006; Lozano *et al.*, 2007; Ryu *et al.*, 2007; Calef *et al.*, 2008; Flatley *et al.*, 2011; Armenteras *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2010), en Sudamérica no ha tenido suficiente atención. Causas atribuibles a esta situación pueden estar relacionadas con la falta de información suficiente y confiable (Castillo *et al.*, 2012). En Chile, recientemente algunos estudios han evaluado áreas de riesgo, propagación y daño potencial de incendios forestales (Muñoz *et al.*, 2007; Castillo, 2012; Castillo *et al.*, 2012), además del monitoreo de combustibles (INFOR, 2008). También fue desarrollado un sistema para predecir la ocurrencia y propagación de incendios forestales (Castillo, 1997). Sin embargo, ninguno de tales estudios ha investigado acerca de los efectos de la heterogeneidad del paisaje como precursores de los incendios forestales.

A pesar de su importancia, el conocimiento acerca de la predicción de ocurrencia de incendios forestales a nivel de paisaje en Chile y su relación con la heterogeneidad espacial en ecosistemas afectados por incendios es escaso. El entendimiento de cómo los patrones del paisaje determinan procesos específicos, tales como la ocurrencia de incendios forestales, es de gran importancia para la toma de decisiones en planes de ordenamiento territorial considerando el contexto económico y social. El efecto de los patrones de paisaje en el proceso de toma de decisiones es esencial para entender el impacto de las prácticas de manejo y uso del suelo

(Foster *et al.*, 1997). Ignorar los patrones del paisaje es una de las razones de la baja efectividad que tienen los esfuerzos para reducir las amenazas que representan actualmente los incendios forestales (Platt *et al.*, 2006). El estudio de las relaciones entre la ocurrencia de incendios forestales y la heterogeneidad espacial del paisaje se ve dificultado debido a las complejas interacciones entre los factores que influyen los incendios forestales a través del paisaje. Por ello, la modelación espacial representa una herramienta muy valiosa para entender estas complejas interacciones (Martell *et al.*, 1987; Gustafson *et al.*, 2004, Ryu *et al.*, 2006). A escala de paisaje la probabilidad de grandes incendios es asociada con múltiples factores, incluyendo el clima, actividades humanas, uso y cobertura del suelo, y características fisiográficas (Dickson *et al.*, 2006). De acuerdo a lo señalado por Seidl *et al.* (2011) en varios modelos recientes, la ocurrencia de incendios forestales puede ser modelada a través de interacciones entre clima, vegetación e impactos humanos (e.g., Schumacher *et al.*, 2006: LANDCLIM; Kloster *et al.*, 2010: CLM-CN).

En Chile, la ocurrencia de incendios forestales ha aumentado fuertemente en los últimos años. La frecuencia media es de aproximadamente cinco mil incendios forestales por año, afectando una superficie promedio de cincuenta mil hectáreas al año (Navarro *et al.*, 2008; CONAF, 2010). Las principales causas han sido asociadas con la acción humana (CONAF, 2010). La zona más afectada por incendios forestales es Chile central (33°-34° S), donde existe un clima mediterráneo y domina la vegetación de tipo esclerófila (Luebert y Pliscoff, 2006). En esta zona los incendios forestales tienen un gran impacto económico y social debido a la alta densidad poblacional (INE, 2005). Además, estos ecosistemas son considerados altamente vulnerables a los impactos del cambio climático (IPCC, 2001; González *et al.*, 2011), lo cual incluye cambios en el régimen de incendios forestales y sus impactos (Burrows, 2008).

El propósito de este estudio fue investigar cómo la heterogeneidad del paisaje afecta la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en ecosistemas mediterráneos en Chile Central. Los objetivos específicos

fueron: a) entender la relación entre la ocurrencia de incendios forestales y variables climáticas, topográficas, de actividad humana y cobertura del suelo; b) desarrollar un modelo para estimar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales; y c) aplicar el modelo ajustado para evaluar futuros escenarios de ocurrencia de incendios forestales. Esta investigación representa el primer estudio sobre modelación de ocurrencia de incendios forestales a nivel de paisaje en ecosistemas mediterráneos en Chile Central.

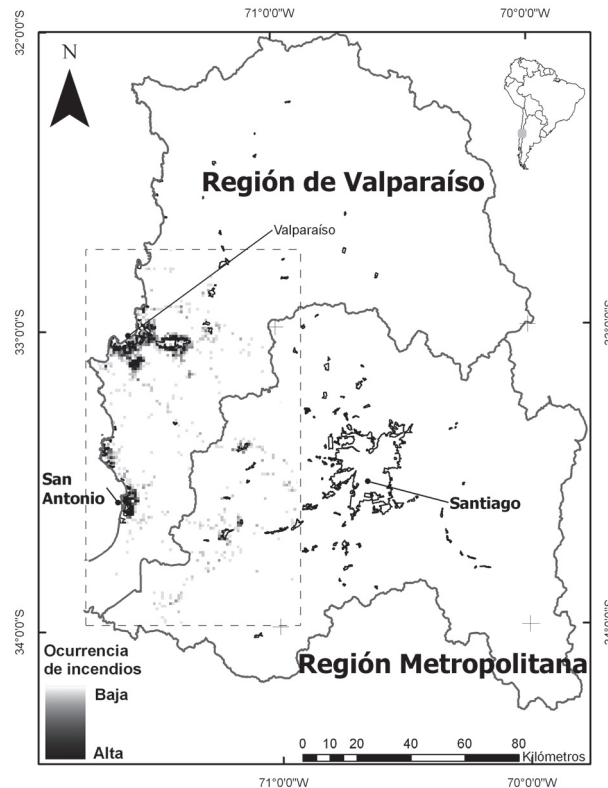
Métodos

Descripción del área de estudio

El área de estudio se ubica en la zona mediterránea de Chile, abarcando parte de la región de Valparaíso y Metropolitana (Figura N° 1). Esta área está localizada entre los 33° y 34° de latitud Sur, cubriendo una superficie de 9.061 km² y elevaciones que varían desde el nivel del mar hasta 1.835 m.s.n.m. El clima predominante es de tipo mediterráneo caracterizado por precipitaciones de 500 mm al año concentradas en invierno (junio-agosto), y temperatura anual promedio de 14,5°C (Di Castri y Hajek, 1976). La vegetación predominante es de tipo esclerófila de costa mediterránea, compuestos principalmente por especies arbóreas como *Cryptocarya alba*, *Peumus boldus* y *Lithraea caustica* (Luebert y Pliscoff, 2006).

La población es de aproximadamente 1,6 millón de habitantes (INE, 2005), lo cual representa alrededor de 11% de la población nacional. Las principales actividades económicas son la producción vinícola, y los cultivos de frutas, maíz, y trigo (Schulz *et al.*, 2010). Los bosques nativos están expuestos a varias amenazas como la extracción para leña, la expansión de la agricultura y los incendios forestales (Lara *et al.*, 1996). Además, se han establecido en los últimos años plantaciones forestales exóticas (principalmente de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*). Debido a su alto grado de endemismo y la presencia de géneros monotípicos (Arroyo *et al.*, 1996) esta zona ha sido clasificada como un "hotspot" de biodiversidad a nivel mundial (Myers *et al.*, 2000).

Figura N° 1
Área de estudio y distribución de ocurrencia de incendios forestales



Fuente: Elaboración propia en base a registros de la Corporación Nacional Forestal (CONAF).

Datos

Se utilizaron registros de incendios forestales que fueron provistos por la Corporación Nacional Forestal (CONAF) para la región mediterránea de Chile. Con el objetivo de establecer un paisaje con estabilidad temporal en términos de su composición a nivel de paisaje (Vega-García & Chuvieco, 2006), se seleccionó un período de cinco años con datos georreferenciados (2004-2008) de ocurrencia de incendios forestales (Figura N° 1). Se utilizó una ventana de 25 x 25 píxeles (750) como resolución espacial para evitar problemas relacionados con el error de localización de los datos. Se eligió este tamaño ya que representa un balance entre los requerimientos de resolución y representación de la variable respuesta. Los datos consisten de

7.210 observaciones, de los cuales 890 corresponden a ocurrencia de incendios.

Diferentes variables fueron obtenidas en múltiples escalas espaciales. Para modelar la ocurrencia de incendios forestales se utilizaron 14 variables predictoras, las cuales se clasificaron como variables climáticas, topográficas, de actividad humana y de cobertura del suelo (Cuadro N° 1).

A continuación se describe cómo se obtuvieron estas variables:

Variables climáticas: se obtuvieron un total de 19 variables climáticas de la base de datos WorldClim (www.worldclim.org). WorldClim contiene variables espacialmente georreferenciadas de temperatura, precipitación y bioclimáticas, estas últimas

Cuadro N° 1
 Variables climáticas, topográficas, de influencia humana y cobertura del suelo, utilizadas para modelar la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el área de estudio
 (Código = abreviación usada, St dev = desviación estándar)

Variable y unidad de medida	Código	Media	St dev	Mín	Máx
Variables climáticas					
Temperatura mínima del mes más frío (°C)	T _{min}	4,3	1,5	3,0	8,2
Temperatura máxima del mes más cálido (°C)	T _{max}	25,5	1,3	22,1	29,5
Precipitación anual (mm)	P _{an}	469,0	93,1	264,0	703,0
Precipitación del mes más seco (mm)	P _{min}	1,3	0,9	0,0	5,0
Estacionalidad de la precipitación (CV x 100)	P _{seas}	109,4	2,8	98,0	117,0
Variables topográficas					
Elevación (m)	ELEV	488,2	330,8	8	1835
Exposición (grados desde el norte)	ASPE	191,3	114,1	0	360
Pendiente (grados)	SLOP	13,5	12,3	0	56
Variables de actividad humana					
Distancia a caminos pavimentados (km)	DPRO	8,4	7,3	0	31,5
Distancia a caminos de tierra (km)	DDRO	2,0	2,0	0	12,7
Distancia a ciudades (km)	DCIT	7,7	4,5	0	21,8
Variables de cobertura del suelo					
Índice de vegetación de diferencia normalizado	NDVI	0,38	0,14	-0,04	0,84
Índice infrarrojo de diferencia normalizado	NDII	-0,03	0,15	-0,44	0,55
Cobertura del suelo ¹	LCOV	n.a	n.a	1	7

Fuente: Elaboración propia.

representan tendencias anuales de factores de estacionalidad y ambientes extremos (Hijmans *et al.*, 2005). Para evitar la redundancia entre estas variables, se realizó un análisis de correlación, así como su relación con la ocurrencia de incendios forestales. Después de este análisis, se eligieron las siguientes variables climáticas para el desarrollo del modelo: temperatura mínima del mes más frío (T_{min}), temperatura máxima del mes más cálido (T_{max}), precipitación anual (P_{an}), precipitación del mes más seco (P_{min}) y estacionalidad de la precipitación (P_{seas}).

Variables topográficas: se utilizó un modelo de elevación digital de 90 m de resolución espacial, derivado del Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), mediante el cual se obtuvieron las variables de elevación, pendiente y exposición para ser incluidas como predictores en el modelo. Los datos de SRTM se obtuvieron desde el sitio web de Global Land Cover Facility (GLCF) (<http://www.landcover.org>).

Variables de actividad humana: se utilizó la distancia más cercana a infraestructura como medida de accesibilidad a los sitios.

¹ Datos categóricos: 7 categorías (1 = matorral abierto, 2 = bosque nativo, 3 = matorral denso, 4 = reno-

val denso, 5 = matorral abierto, 6 = renoval abierto, 7 = plantación forestal).

Para ello se calculó para celdas con y sin incendios la distancia Euclidiana más corta entre su localización y caminos pavimentados, caminos de tierra, y ciudades mayores a 10.000 habitantes.

VARIABLES DE COBERTURA DEL SUELO: se utilizó una imagen satelital Landsat TM (path 233, row 83) para identificar los diferentes tipos de coberturas del suelo y calcular índices espectrales. La imagen utilizada fue obtenida de Schulz *et al.* (2010), incluyendo correcciones de tipo geométrica, atmosférica y topográfica. Se aplicó una clasificación de tipo supervisada usando un algoritmo de máxima verosimilitud (Lillesand *et al.*, 2004). Se identificaron siete categorías de coberturas del suelo: terrenos agrícolas, plantaciones forestales, matorral abierto, matorral denso, renoval abierto, renoval denso, y bosque adulto. Otros tipos de coberturas del suelo fueron excluidas del análisis y las predicciones reportadas en este estudio. Adicionalmente, se calcularon dos índices espectrales: el índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) y el índice infrarrojo de diferencia normalizado (NDII). NDVI fue calculado como la diferencia entre la reflectancia del infrarrojo cercano y el rojo dividido por la suma de ambos, representando una medida del vigor de la vegetación (Turner *et al.*, 2003; Aplin, 2005). NDII se calculó como la diferencia entre la reflectancia del infrarrojo cercano y el infrarrojo medio dividido por la suma de ambos, índice que es relacionado con el estrés hídrico (Bannari *et al.*, 1995; Gao, 1996).

Como se detallará en la siguiente sección, se construirá un modelo estadístico de ocurrencia de incendios forestales mediante regresión logística. Debido a que este tipo de modelos es afectado por una desproporción de las muestras (Maddala, 1996; Prentice, 1986), se utilizó una base de datos balanceada para el ajuste del modelo. De esta manera, se seleccionaron 600 píxeles con ocurrencia de incendios y la misma cantidad de píxeles sin ocurrencia de incendios, obteniendo una muestra total de 1.200 píxeles.

Análisis estadísticos

Se construyó un modelo de regresión logística entre la variable respuesta de tipo binaria (ocurrencia de incendios) y las variables

predictoras. Para evitar la multicolinealidad entre las variables predictoras se calculó el coeficiente de correlación lineal entre las variables de cada grupo (i.e. climáticas, topográficas, actividad humana, cobertura del suelo), descartando aquellas con un valor r mayor a 0,6. Se utilizaron diferentes potenciales variables predictoras para obtener una mayor variedad de modelos, los cuales fueron ajustados mediante máxima verosimilitud. Las comparaciones entre estos modelos fueron realizadas usando índices y pruebas estadísticas basadas en máxima verosimilitud, tales como el índice de Akaike y la prueba de razón log-likelihood. Después de seleccionar el modelo final se evaluó su capacidad predictiva a través de una tabla de contingencia. Esta tabla fue derivada usando un límite de probabilidad de corte de 0,5, y también se calculó el éxito total de la predicción de ocurrencia o no ocurrencia de incendios forestales.

Prioridad de protección y escenario futuro

Para analizar la prioridad de protección se categorizó la actual probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en cuatro niveles: muy alta ($>0,75$), alta (0,75-0,50), baja (0,50-0,25) y muy baja ($<0,25$), lo cual fue hecho para todas las celdas de la imagen (con resolución espacial de 750 m). La probabilidad futura de ocurrencia de incendios forestales fue categorizada usando los mismos criterios anteriores, y los resultados fueron comparados en términos de: (1) área ocupada por cada categoría de protección actual y futura; (2) área total que cambiará a una categoría de protección distinta en el futuro. Para generar el escenario futuro las variables predictoras fueron modificadas para analizar el efecto de este cambio en la ocurrencia de incendios forestales en el área de estudio.

Modelación de ocurrencia de incendios forestales

Dada la alta correlación ($r = 0,93$) entre las variables predictoras T_{\min} y ELEV, fue elegida T_{\min} entre ambas por las siguientes razones: primero, T_{\min} tiene un efecto directo sobre la ocurrencia de incendios forestales debido al desecamiento de la vegetación, en cambio ELEV es una variable sustituta con

una mezcla de influencias; segundo, como se usará el modelo bajo un escenario de cambio climático, T_{min} es una variable más adecuada que ELEV para este propósito.

El modelo seleccionado retuvo tres de las catorce variables explicatorias usadas para ajustar el modelo. Los mejores predictores de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales fueron: la temperatura mínima del mes más frío (T_{min}), la estacionalidad de la precipitación (P_{seas}) y la distancia a ciudades (DCIT), siendo todos los parámetros altamente significativos (Cuadro N° 2).

La probabilidad de ocurrencia de incendios forestales incrementó con el aumento de T_{min} y P_{seas} , y disminuyó con el aumento de DCIT. Los resultados del análisis de regresión logística para predecir la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales demostraron su capacidad para clasificar los píxeles de acuerdo a su potencial de ocurrencia de futuros incendios. El modelo clasificó correctamente 70,3% la ocurrencia de incendios y 59,3% la ausencia de incendios en toda el área de estudio, lo cual equivale a una exactitud global de 64,8% (Cuadro N° 3).

Cuadro N° 2

Modelo de regresión logística de probabilidad de ocurrencia de incendios forestales. D.f. = grados de libertad; Error std = error estándar; p = probabilidad; todas las predicciones son para celdas de 750 x 750 m. Ver Cuadro N° 1 para nombres completos y unidades de variables

Variable	Coeficiente	D.f.	Error std	Valor z	p
Modelo Nulo		1.199			
Intercepto	-8,451		2,678	-3,156	0,00160
T_{min} (°C)	0,002	1	0,005	4,352	0,00001
P_{seas} (mm)	0,007	1	0,024	3,006	0,00264
DCIT (Km)	-0,095	1	0,017	-5,491	0,00000
Modelo total		3			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro N° 3

Tabla de clasificación para número de incendios observados y predichos

	Incendios predichos	Incendios no predichos	Predicción correcta (%)
Incendios observados	422	178	70,3
Incendios no observados	244	356	59,3

Fuente: Elaboración propia.

La probabilidad de ocurrencia de incendios forestales fue predicha para toda el área de estudio usando el modelo final. Aquellas celdas para las cuales se predice una alta

probabilidad de ocurrencia de incendios forestales están concentradas principalmente en la parte oeste del área de estudio, en zonas muy específicas de la parte este, y en zonas

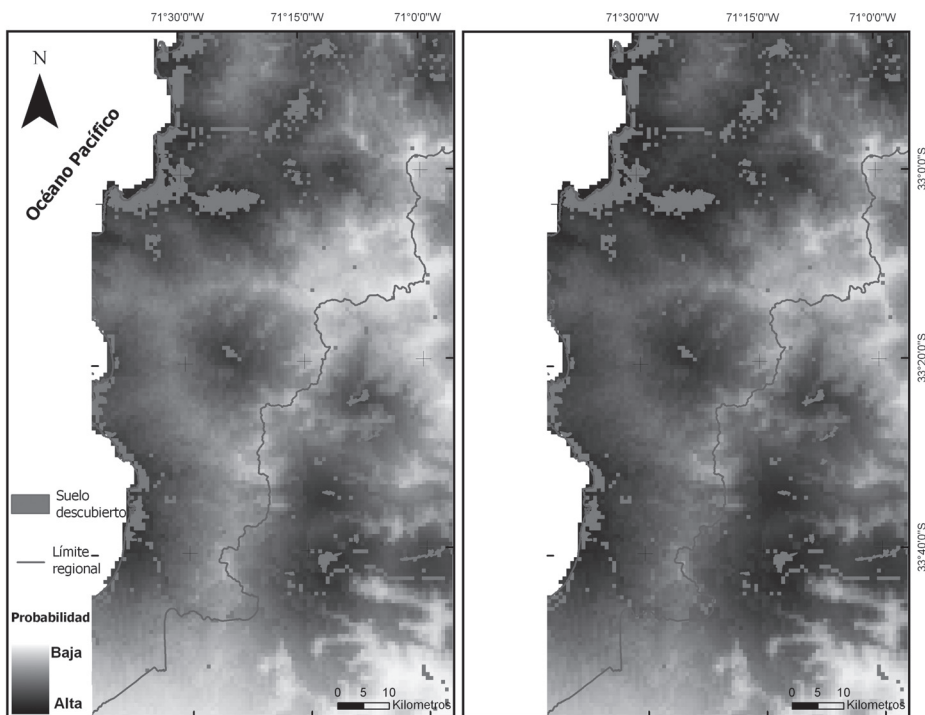
de menor elevación y alta temperatura (Figura N° 2a). Estas zonas son dominadas principalmente por coberturas de matorrales, plantaciones exóticas y terrenos agrícolas. Las predicciones sugieren que actualmente un 40% de las celdas del área de estudio (3.635 km²) presentan una alta o muy alta probabilidad de ocurrencia de incendios forestales (Figura N° 3). Un 38% de estas celdas tendrían una alta prioridad de protección (0,5-0,75), y un 2% muy alta prioridad de protección de acuerdo a las predicciones. La categoría baja prioridad de protección (0.5-0.25) representa un 38% de todas las celdas, y la categoría muy baja (<0.25) un 22% del área de estudio.

Para generar el escenario futuro se utilizaron las variables T_{\min} y DCIT del modelo final. Las predicciones asumen que no hay cambio en la cobertura del suelo. Para T_{\min} se utilizaron datos proyectados para el año 2050 a partir del modelo de clima del Centro Hadley (HadCM3) (Zhang y Nearing, 2005),

además de información sobre variabilidad climática futura para Chile (CONAMA y Universidad de Chile, 2007). Basados en estos modelos se decidió como un escenario plausible un incremento promedio de 1°C de T_{\min} para el año 2050. El escenario futuro también consideró la variable relacionada con actividad humana DCIT. Para ello, se revisaron estudios realizados en Chile que han analizado los patrones espaciales del crecimiento de ciudades de tamaño medio en los últimos cincuenta años (Azócar *et al.*, 2007; Azócar *et al.*, 2003). Estos resultados muestran que las tasas de crecimiento promedio varían entre 2,4% y 5,2% por año en términos de área urbana. De acuerdo a estos estudios, se consideró una disminución en la distancia a las ciudades de 1 km para el año 2050.

Las predicciones futuras (Figura N° 2b) sugieren que la ocurrencia de incendios forestales incrementará mayormente en la parte

Figura N° 2.
Probabilidad estimada actual (A) y futura (B) de ocurrencia de incendios forestales en el área de estudio

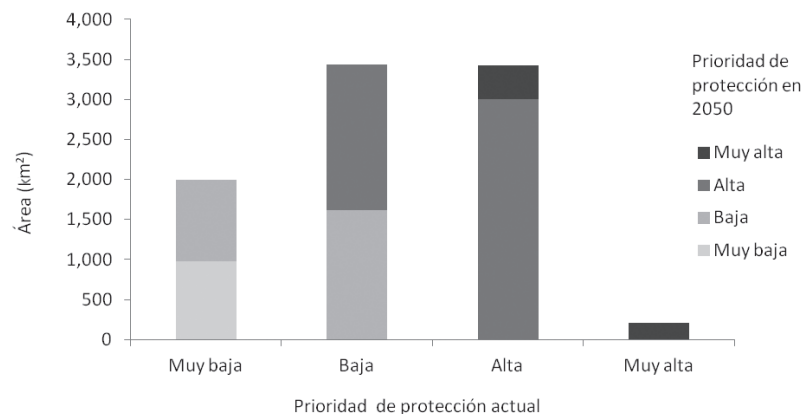


Fuente: Elaboración propia.

oeste y norte del área de estudio. De esta forma, se espera que el gradiente de ocurrencia de incendios forestales persista través del área de estudio, pero la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales aumente en la mayoría de los lugares. En términos generales, de los 9.061 km² de superficie para los cuales se hicieron las predicciones futuras, se espera un incremento neto de la probabilidad de

ocurrencia de incendios forestales para 3.258 km² (36%), manteniéndose la restante superficie relativamente constante (Figura N° 3). De los píxeles que se predicen cambios para el año 2050, 11% de ellos cambiarán desde muy baja a baja prioridad de protección, 20% de baja a alta prioridad de protección, y 5% de alta a muy alta prioridad de protección (Figura N° 3).

Figura N° 3
Área actual por categoría (eje horizontal) de prioridad de protección (valor), y cómo estas cambiarán el año 2050 (sombreado) de acuerdo a las predicciones del modelo en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Discusión y conclusiones

Las principales variables asociadas con la ocurrencia de incendios forestales son T_{min} , P_{seas} y distancia a ciudades de acuerdo al modelo final. Esto indica que tanto el clima como las actividades humanas son los principales factores que facilitan la ocurrencia de incendios forestales en el área de estudio. Existe clara evidencia que el clima define las condiciones que limitan el fuego. El rol dominante del clima es demostrado por la marcada diferencia en los regímenes de fuego, siendo ejemplos de esto las regiones húmedas del norte de Europa y oeste de la Amazonía, en contraposición a regiones mediterráneas y la sabana subtropical de África y Sudamérica, estas últimas con distinto régimen en la estación seca (Dube, 2009). En el área de estudio, la importancia de T_{min} es muy relevante

debido a que un incremento en T_{min} favorecería el desecamiento de la biomasa, facilitando la ignición (Prasad *et al.*, 2008). Una mayor P_{seas} indica una mayor variabilidad de la precipitación durante el año con una menor precipitación en verano. Esto también contribuye a la ignición debido a que la mayoría de los incendios forestales que ocurren en Chile Central se concentran en la estación de verano (diciembre a marzo).

La distancia a las ciudades se asocia negativamente con la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales, mostrando la fuerte influencia que tienen las actividades humanas en la ocurrencia de incendios en Chile Central. Esta relación muestra que las áreas con una mayor probabilidad de ocurrencia están localizadas preferentemente en la zona oeste del área de estudio. Esto se ex-

plica porque en esta zona se concentran las ciudades con mayor cantidad de población, infraestructura y carreteras, lo cual se asocia con un alto nivel de actividad humana. Adicionalmente, la zona oeste del área de estudio es una de las áreas más turísticas en Chile, recibiendo un alto número de visitantes cada año, especialmente en verano, lo cual coincide con la mayor ocurrencia de incendios forestales. Tendencias similares han sido reportadas por otros estudios (Pew & Larsen, 2001; Bonazountas *et al.*, 2007; Calef *et al.*, 2008; Zhang *et al.*, 2010), donde la actividad humana es uno de los principales precursores de la ocurrencia de incendios forestales. Algunos puntos específicos del área oriental también muestran una alta probabilidad de ocurrencia de incendios, siendo estas áreas caracterizadas por una menor elevación, alta temperatura y la presencia de ciudades de tamaño mediano, condiciones que contribuye a una mayor probabilidad de ocurrencia de incendios.

La cobertura del suelo ha sido señalada como un importante factor que explica la ocurrencia de incendios forestales (Nunes *et al.*, 2005; Vega-García & Chuvieco, 2006; Dube, 2009). Sin embargo, nuestro mejor modelo no incluye esta variable. Esto se explica porque los disturbios por fuego son altamente sensibles al clima, y su frecuencia e intensidad son más a menudo explicados por variaciones climáticas que por actividades humanas (Dube, 2009). Esta explicación no implica que la cobertura del suelo no sea un factor importante en la ocurrencia de incendios forestales. Por ejemplo, en el estudio de Vega-García y Chuvieco (2006) la ocurrencia de incendios aumentó en área de una mayor homogeneidad del paisaje. Nunes *et al.* (2005) encontraron una marcada preferencia de los incendios forestales en coberturas tipo matorral. En este estudio, cuando se analizó la relación entre la cobertura del suelo y la ocurrencia de incendios, las coberturas de matorral, plantaciones forestales y terrenos agrícolas mostraron positiva influencia en la ocurrencia de incendios.

Habitualmente el desarrollo de modelos logísticos se ve limitado principalmente por la alta correlación entre las variables y la falta de ajuste a una distribución normal (Vega-García y Chuvieco, 2006). El criterio primario

para la selección del modelo fue basado en plausibilidad teórica y simplicidad. A pesar de las limitaciones de este tipo de modelos, el modelo final es robusto desde un punto de vista estadístico. Todos los parámetros son estadísticamente significativos y cuentan con pocas variables explicatorias, reduciendo la aparición de artefactos, lo cual es de particular importancia cuando se requiere predecir escenarios futuros. El modelo reúne los supuestos de homocedasticidad y normalidad de los residuos. La capacidad predictiva del modelo alcanzó un 64,7% de correcta clasificación de las respuestas observadas y predichas por el modelo sobre los píxeles con y sin presencia de incendios, lo cual es bastante típico en estudios en este tipo de escalas similares (Pew & Larsen, 2001; Vega-García & Chuvieco, 2006; Lozano *et al.*, 2007; Zhang *et al.*, 2010). Sin embargo, la mayoría de estos estudios han producido modelos complejos, lo cual puede afectar la confianza en la robustez y aplicabilidad de los resultados.

Bajo el escenario futuro asumido se predice un importante aumento de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en el área de estudio, haciendo las áreas adyacentes aún más vulnerables. Este resultado es de gran relevancia, dado que estos ecosistemas han sido considerados vulnerables a los impactos del cambio climático (IPCC, 2001; González *et al.*, 2011) y la dinámica del paisaje (Schultz *et al.*, 2010). Además, el área de estudio es la zona más afectada debido a la alta frecuencia de incendios forestales en comparación a otros lugares de Chile (CONAF, 2010). El fuego es un proceso de disturbio clave con fuerte influencia en la estructura, composición y dinámica forestal (Armesto *et al.*, 2009). El modelo predictivo debe ser considerado como una herramienta para orientar aspectos urgentes de protección y prevención de incendios forestales, lo cual además debe continuar siendo discutido y evaluado. Los resultados pueden ser de gran utilidad para la planificación del territorio de acuerdo a la probabilidad de ocurrencia de incendios y las prioridades de protección actuales y futuras, proporcionando apoyo a la toma de decisiones y a los planes de protección y prevención de incendios.

En Chile se requiere más investigación sobre modelación de ocurrencia de incendios

forestales. El modelo desarrollado presenta algunas limitaciones que se reconocen. Por ejemplo, el estudio consideró variables climáticas, topográficas, de actividad humana y de cobertura del suelo. Sin embargo, variables socioeconómicas como tamaño de propiedad e ingresos, las cuales no fueron estimadas, deberían mejorar las predicciones. Otros factores que también deberían ayudar a mejorar el modelo como prácticas de manejo (e.g. uso del fuego) aplicados en la agricultura y silvicultura no estuvieron disponibles para este estudio. Es muy importante no solo estimar cuáles son las áreas más susceptibles a incendios forestales, sino también conocer las causas y la relación entre los incendios forestales con procesos ecológicos o estados sucesionales de los bosques, de manera de proveer una base adecuada para establecer prioridades de protección.

Referencias bibliográficas

- ABARZÚA, A. & MORENO, P. Changing fire regimes in the temperate rainforest region of southern Chile over the last 16,000 yr. *Quaternary Research*, 2008, N° 69, p. 62–71.
- APLIN, P. Remote sensing: ecology. *Progress in Physical Geography*, 2005, N° 29, p. 104–113.
- ARMENTERAS-PASCUAL, D.; RETANA-ALUMBREROS, J.; MOLOWNY-HORAS, R.; ROMAN-CUESTA, R.M.; GONZALEZ-ALONSO, F. & MORALES-RIVAS, M. Characterizing fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, N° 151, p. 279-289.
- ARMESTO, J.J. y GUTIÉRREZ, J.R. El efecto del fuego en la estructura de la vegetación de Chile central. *Anales del Museo de Historia Natural*, 1978, N° 11, p. 43-48.
- ARMESTO J.J.; BUSTAMANTE-SÁNCHEZ, M.A.; DÍAZ, M.F.; GONZÁLEZ, M.E.; HOLTZ, A.; NÚÑEZ-AVILA, M. & SMITH-RAMÍREZ, C. Fire disturbance regimes, ecosystem recovery and restoration strategies in mediterranean and temperate regions of Chile. In: CERDA, A.; ROBICHAUD, P. & PRIMLANI, R. (editors). *Restoration strategies after forest fire*. USA: Science Publishers, 2009, p. 537-567.
- ARROYO, M.T.K.; CAVIERES, L.; PEÑAZOLA, A.; RIVEROS, M. y FAGGI, A.M. Relaciones fitogeográficas y patrones regionales de riqueza de especies en la flora del bosque lluvioso templado de Sudamérica. En: ARMESTO, J.; VILLAGRÁN, C. y ARROYO, M.T.K. (editores). *Ecología de los Bosques Nativos de Chile*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria, 1996, p. 71-99.
- AZÓCAR, G.; SANHUEZA, R. y HENRÍQUEZ, C. Cambio en los patrones de crecimiento en una ciudad intermedia: el caso de Chillán en Chile Central. *EURE*, 2003, N° 87, p. 79-92.
- AZÓCAR, G.; ROMERO, H.; SANHUEZA, R.; VEGA, C.; AGUAYO, M. & MUÑOZ, M.D. Urbanization patterns and their impacts on social restructuring of urban space in Chilean mid-cities: The case of Los Angeles, Central Chile. *Land Use Policy*, 2007, N° 24, p. 199–211.
- BANNARI, A.; MORIN, D.; BONN, F. & HUETE, A.R. A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, 1995, N°13, p. 95–120.
- BEATY, R.M. & TAYLOR, A.H. Fire history and the structure and dynamics of a mixed conifer forest landscape in the northern Sierra Nevada, Lake Tahoe Basin, California, USA. *Forest Ecology and Management*, 2008, N° 255, p. 707–719.
- BONAZOUNTAS, M.; KALLIDROMITOU, D.; KASSOMENOSC, P. & PASSAS, N. A decision support system for managing forest fire casualties. *Journal of Environmental Management*, 2007, N° 84, p. 412–418.
- BURROWS, N.D. Linking fire ecology and fire management in south-west Australian forest landscapes. *Forest Ecology and Management*, 2008, N° 255, p. 2394–2406.
- CALEF, M.P.; MCGUIRE, A.D. & CHAPIN, F.S. Human Influences on Wildfire in Alaska from 1988 through 2005: An Analysis of the Spatial Patterns of Human Impacts. *Earth Interactions*, 2008, N° 12, p. 1–17.
- CARDILLE, J.A.; VENTURA, S.J. & TURNER, M.G. Environmental and social factors

influencing wildfires in the Upper Midwest, United States. *Ecological Applications*, 2001, N° 11, p. 111–127.

CASTILLO, M. *Método de validación del simulador de incendios del sistema Kitral*. Santiago de Chile: Tesis de grado Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile, 1997.

CASTILLO, M. The identification and assessment of areas at risk of forest fire using fuzzy methodology. *Applied Geography*, 2012, N° 35, p. 199–207.

CASTILLO, M.; MOLINA-MARTÍNEZ, J.; RODRÍGUEZ SILVA, F. & JULIO, G. A territorial fire vulnerability model for Mediterranean ecosystems in South America. *Ecological Informatics*, 2012.

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). *Corporación Nacional Forestal. Recursos Forestales. Protección contra incendios forestales*. 2010. Disponible en internet: <http://www.conaf.cl/proteccion/seccion-estadisticas-historicas.html>

COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE (CONAMA) y UNIVERSIDAD DE CHILE. *Estudio de variabilidad climática en Chile para el siglo XXI*. 2007. Disponible en internet: <http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS>

COPPIN, P.; JONCKHEERE, I.; NACKAERTS, K. & MUYS, B. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, N° 25, p. 1565–1596.

COWLING, R.M.; RUNDEL, P.W.; LAMONT, B.B.; ARROYO, M.K. & ARIANOUTSOU, M. Plant diversity in mediterranean-climate regions. *Trends in Ecology and Evolution*, 1996, N° 11, p. 363–366.

DI CASTRI, F. y HAJEK, E. *Bioclimatología de Chile*. Santiago de Chile: Editorial Universidad Católica de Chile, 1976.

DICKSON, B.; PRATHER, J.W.; XU, Y.; HAMPTON, H.M.; AUMACK, E.N. & SISK, T.D. Mapping the probability of large fire occurrence in northern Arizona, USA. *Landscape Ecology*, 2006, N° 21, p. 747–761.

DUBE, O.P. Linking fire and climate: interactions with land use, vegetation, and soil. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2009, N° 1, p. 161–169.

FLATLEY, W.; LAFON, C.W. & GRISSINO-MAYER, H.D. Climatic and topographic controls on patterns of fire in the southern and central Appalachian Mountains, USA. *Landscape Ecology*, 2011, N° 26, p. 195–209.

FOSTER, D.R.; ABER, J.D.; MELILLO, J.M.; BOWDEN, R.D. & BAZZAZ, F.A. Forest response to disturbance and anthropogenic stress. *Bioscience*, 1997, N° 47, p. 437–445.

GAO, B.C. NDWI-A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 1996, N° 58, p. 257–266.

GONZÁLEZ, M.; LARA, A.; URRUTIA, R. & BOSNICH, J. Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42° S). *Bosque*, 2011, N° 32, p. 215–219.

GONZÁLEZ, M.; VEBLEN, T.T. & SIBOLD, J.S., 2005. Fire history of Araucaria–Nothofagus forests in Villarrica National Park, Chile. *Journal of Biogeography*, 2005, N° 32, p. 1.187–1.202.

GUSTAFSON, E.J.; ZOLLNER, P.A.; STURTEVANT, B.R.; HE, H.S. & MLADENOFF, D.J.; Influence of forest management alternatives and land type on susceptibility to fire in northern Wisconsin, USA. *Landscape Ecology*, 2004, N° 19, p. 327–341.

HIJMANS, R.J.; CAMERON, S.E.; PARRA, J.L.; JONES, P.G. & JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2005, N° 25, p. 1965–1978.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS (INE). *Chile: Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos*. Santiago de Chile: Instituto Nacional de Estadísticas, 2005.

INSTITUTO FORESTAL (INFOR). *Proyectos. Redes Inalámbricas de Sensores para la Detección de Incendios Forestales y Monitoreo de Variables de Estado de Combustibles*.

Proyecto Innova región Valparaíso, 2005-2008. Disponible en Internet: <http://www.infor.cl/es/series-y-estadisticas/136/526-redesinalambricas-de-sensores-para-la-deteccion-de-incendios-forestales.html>

IPCC. *Climate Change 2001: Synthesis Report* (editores R. Watson and IPCC core writing team). 2001. Disponible en Internet: http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/vol4/english/027.htm.

KEELEY, J.E. (editor). *California Chaparral: Paradigms Re-examined*. Los Angeles: Museum of Natural History, 1989.

KLOSTER, S.; MAHOWALD, N. M.; RANDERSON, J. T.; THORNTON, P. E.; HOFFMAN, F. M.; LEVIS, S.; LAWRENCE, P. J.; FEDDEMA, J. J.; OLESON, K. W. & LAWRENCE, D. M. Fire dynamics during the 20th century simulated by the Community Land Model. *Biogeosciences*, 2010, N° 7, p. 1877–1902.

LARA, A.; DONOSO, C. y ARAVENA, J.C. La conservación del bosque nativo en Chile: Problemas y desafíos. En: ARMESTO, J.; VILLAGRÁN, C. y ARROYO, M.T.K. (editores). *Ecología de los Bosques Nativos de Chile*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria, 1996, p. 335-362.

LEPART, J. & DEBUSCHE, M. Human impact on landscape patterning: Mediterranean examples. In: HANSEN, A.J. & DI CASTRI, F. (editores). *Landscape boundaries consequences for biotic diversity and ecological flows*. New York: Springer-Verlag, 1992.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. & CHIPMAN, J. *Remote Sensing and image interpretation*. New York: John Wiley & Sons, 2004.

LOZANO, F.J.; SUÁREZ-SEOANE, S. & DE LUIS, E. Assessment of several spectral indices derived from multi-temporal Landsat data for fire occurrence probability modelling. *Remote Sensing of Environment*, 2007, N° 107, p. 533–544.

LUEBERT, F. y PLISCOFF, P. *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile*. Santiago de Chile: Editorial Universitaria, 2006.

MADDALA, G.S. *Introduction to econometrics*. New York: Macmillan, 1988.

MADDALA, G. *Introducción a la Econometría*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, 1996.

MARTELL, D. L.; OTUKOL, S. & STOCKS, B. J. A logistic model for predicting daily people-caused forest fire occurrence in Ontario. *Canadian Journal of Forest Research*, 1987, N° 17, p. 394-401.

MONTENEGRO, G.; GINOCCHIO, R.; SEGURA, A.; KEELEY, J.E. & GOMEZ, M. Fire regimes and vegetation responses in two Mediterranean-climate regions. *Revista Chilena de Historia Natural*, 2004, N° 77, p. 455-464.

MUÑOZ, C.; ACEVEDO, P.; SALVO, C.; FAGALDE, G. & VARGAS, F. Detección de incendios forestales utilizando imágenes NOAA/16-LAC en la Región de La Araucanía, Chile. *Bosque*, 2007, N° 28, p. 119-128.

MYERS, N.; MITTERMELER, R.A.; MITTERMELER, C.G.; DA FONSECA, G.A. & KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 2000, N° 403, p. 853–858.

NAVARRO, R.M.; HAYAS, A.; GARCÍA-FERRER, A.; HERNÁNDEZ, R.; DUHALDE, P. y GONZÁLEZ, L. 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*, 2008, N° 81, p. 95-110.

NUNES, M.C.S.; VASCONCELOS, M.J.; PEREIRA, J.M.C.; DASGUPTA, N.; ALLDREDGE, R.J. & REGO, F.C. Land cover type and fire in Portugal: Do fires burn land cover selectively? *Landscape Ecology*, 2005, N° 20, p. 661–673.

PEW, K.L. & LARSEN, C.P. GIS analysis of spatial and temporal patterns of human-caused wildfires in the temperate rain forest of Vancouver Island, Canada. *Forest Ecology and Management*, 2001, N° 140, p. 1-18.

PLATT, R.V.; VEBLEN, T.T. & SHERRIFF, R.L. Are wildfire mitigation and restoration of

historic forest structure compatible? A spatial modeling assessment. *Annals of the Association of American Geographers*, 2006, N° 96, p. 455–470.

PRASSAD, V.K.; BADARINATH, K.V.S. & EATURU, A. Biophysical and anthropogenic controls of forest fires in the Deccan Plateau, India. *Journal of Environmental Management*, 2008, N° 86, p. 1–13.

PRENTICE, R.L. A case-cohort design for epidemiologic cohort studies and disease prevention trials. *Biometrika*, 1986, N° 73, p. 1–11.

RYU, S.; CHEN, J.; ZHENG, D. & LACROIX, J.J. Relating surface fire spread to landscape structure: An application of FARSITE in a managed forest landscape. *Landscape and Urban Planning*, 2007, N° 83, p. 275–283.

RYU, S.; CHEN, J.; ZHENG, D.; BRESEE, M.K. & CROW, T.R. Simulating the effects of prescribed burning on fuel loading and timber production (EcoFL) in managed northern Wisconsin forests. *Ecological Modelling*, 2006, N° 196, p. 395–406.

SCHULZ, J.J.; CAYUELA, L.; ECHEVERRIA, C.; SALAS, J. & REY BENAYAS, J.M. Monitoring land cover change of the dryland forest landscape of Central Chile (1975–2008). *Applied Geography*, 2010, N° 30, p. 436–447.

SCHUMACHER, S.; REINEKING, B.; SIBOLD, J. & BUGMANN, H., 2006. Modelling the impact of climate and vegetation on fire regimes in mountain landscapes. *Landscape Ecology*, 2006, N° 21, p. 539–554.

SEIDL, R.; FERNANDES, P.M.; FONSECA, T.F.; GILLET, F.; JONSSON, A.M.; MERGANICOVA, K.; NETHERER, S.; ARPACI, A.; BONTEMPS, J.D.; BUGMANN, H.; GONZÁLEZ-OLABARRÍA, J.R.; LASCH, P.; MEREDIEU, C.; MOREIRA, F.; SCHELHAAS, M.J. & MOHREN, F. Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. *Ecological Modelling*, 2011, N° 222, p. 903–924.

TURNER, W.; SPECTOR, S.; GARDINER, N.; FLADELAND, M.; STERLING, E. & STEININGER, M. Remote sensing for biodiversity science and conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, N° 18, p. 306–314.

VEGA-GARCÍA, C. & CHUVIECO, E. Applying local measures of spatial heterogeneity to Landsat-TM images for predicting wildfire occurrence in Mediterranean landscapes. *Landscape Ecology*, 2006, N° 21, p. 595–605.

YADAV, B.S. & KAUSHIK, R. Forest fire and its impacts. *Plant Archives*, 2007, N° 7, p. 33–37.

ZHANG, X.C. & NEARING, M.A. Impact of climate change on soil erosion, runoff, and wheat productivity in central Oklahoma. *Catena*, 2005, N° 61, p. 185–195.

ZHANG, Z.X.; ZHANG, H.Y. & ZHOU, D.W. Using GIS spatial analysis and logistic regression to predict the probabilities of human-caused grassland fires. *Journal of Arid Environments*, 2010, N° 74, p. 386–393.