

# Herramientas geoespaciales para la gestión de incendios en el Parque Nacional Quebrada del Condorito

---

Por Biol. Laura Zalazar

Presentado ante la Facultad de Matemática, Astronomía y Física y el Instituto de Altos Estudios Espaciales Mario Gulich como parte de los requerimientos para la obtención del grado de

MAGISTER EN APLICACIONES ESPACIALES DE ALERTA Y RESPUESTA  
TEMPRANA A EMERGENCIAS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Agosto, 2014

©IG - CONAE/UNC 2014

© FaMAF - UNC 2014

DIRECTORA

Mgter. Sofía Lanfri

Instituto Mario Gulich. CONAE/UNC.

Falda de Cañete. Córdoba, Argentina.

## **AGRADECIMIENTOS**

---

*A los que hicieron posible la realización de este trabajo y me acompañaron durante este proceso.*

*A Marcelo Scavuzzo, Mario Lanfri y Gabriel Platzeck por confiar en mí dándome esta oportunidad. A Sofía Lanfri por aventurarse a llevar a cabo este proyecto junto conmigo, y por su apoyo y consejos tanto en lo laboral como en lo personal. A todos los docentes de la maestría AEARTE, que aportaron a mi crecimiento profesional.*

*A los integrantes del grupo IGNIS, que me permitieron aprender de sus experiencias y compartir las mías.*

*A la Administración de Parques Nacionales por estar siempre dispuestos a colaborar. En particular a Germán Jaacks, Marcelo Ochoa y Jael Dominino. Gracias por acompañarnos al PNQC cada vez que lo necesitamos y hacernos partícipes de su primera quema prescripta.*

*A mis amigos "Marearte", que gracias a su compañía, bromas, conversaciones y locuras diarias, hicieron que los dos años vividos juntos queden marcados para siempre con una sonrisa.*

*A mi familia y viejos amigos que me escucharon y dieron contención en momentos difíciles y que, sin ser parte de esta maestría, supieron comprender mis ausencias y "rayes" que vinieron de la mano de esta hermosa experiencia AEARTE.*

*Aprendí, crecí, conocí lugares maravillosos, gente increíble, amigos inolvidables y un compañero de ruta excepcional.... No puedo decir otra cosa más que GRACIAS!*

*“... Cada persona brilla con luz propia entre todas las demás.  
No hay dos fuegos iguales. Hay fuegos grandes  
y fuegos chicos y fuegos de todos los colores.  
Hay gente de fuego sereno, que ni se entera del viento,  
y gente de fuego loco, que llena el aire de chispas...”*

*Eduardo Galeano*

*Dedicado a los “fueguitos”  
que me alumbran día a día*

## ÍNDICE

RESUMEN .....	vi
ABSTRACT .....	vii
INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Justificación.....	9
1.3. Objetivos.....	10
1.3.1. Objetivos generales.....	10
1.3.2. Objetivos específicos .....	10
1.4. Estructura de la tesis.....	11
GENERACIÓN DE MAPA DE COBERTURAS.....	12
2.1. Introducción.....	13
2.2. Materiales y Métodos .....	15
2.2.1. Área de estudio .....	15
2.2.2. Conjunto de datos y aplicaciones informáticas.....	17
2.2.2.1. Datos espectrales .....	17
2.2.2.2. Datos topográficos .....	17
2.2.2.3. Datos vectoriales.....	18
2.2.2.4. Software empleado .....	18
2.2.3. Proceso de pre-clasificación .....	19
2.2.3.1 Corrección de sombras topográficas .....	19
2.2.3.2. Selección de bandas auxiliares.....	23
<i>Variables de textura</i> .....	23
<i>Variables topográficas</i> .....	25
<i>Índices de vegetación</i> .....	26
2.2.3.3. Selección de las regiones de interés .....	28
2.2.3.4. Métodos de clasificación.....	32
<i>Redes Neuronales</i> .....	32
<i>Máquina de Soporte Vectorial</i> .....	34
2.3. Resultados.....	36
2.3.1. Proceso de clasificación.....	36
2.3.2. Proceso de post-clasificación.....	39
2.3.2.1. Homogeneizado de clases .....	39
2.3.2.2. Reducción de la clase no combustible.....	40
<i>Aplicación de filtros morfológicos</i> .....	42
<i>Asignación de umbral de combustibilidad</i> .....	43
2.4. Discusión .....	44
GENERACIÓN DE MAPA DE COMBUSTIBLES.....	49
3.1. Introducción.....	50
3.2. Materiales y Métodos .....	58
3.2.1. Sistema de clasificación NFFL (National Forest Fire Laboratory) .....	58
3.2.2. Sistema de clasificación de Scott & Burgan .....	60
3.3. Resultados.....	63

3.4. Discusión .....	67
SIMULACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO EN LA GESTIÓN DE INCENDIOS.....	70
4.1. Introducción.....	71
4.2. Materiales y Métodos .....	73
4.2.1. Metodología de validación de mapas de combustibles.....	74
4.2.1.1. Comparación de predicciones del comportamiento del fuego (velocidad de propagación y longitud de llama) con datos de campo. ....	75
4.2.1.2. Comparación de predicciones de comportamiento (área quemada) con datos de campo.....	76
4.2.2. Empleo de simulaciones en el planeamiento de actividades de control del fuego .....	80
4.2.2.1. Categorización de zonas de un incendio de acuerdo a su posibilidad de ataque. ....	80
4.2.2.2. Barreras cortafuegos: localización y ancho. ....	81
4.3. Resultados.....	88
4.3.1. Metodología de validación de mapas de combustibles.....	88
4.3.1.1. Comparación de predicciones del comportamiento del fuego (velocidad de propagación y longitud de llama) con datos de campo. ....	88
4.3.1.2. Comparación de predicciones de comportamiento (área quemada) con datos de campo. ....	91
<i>Simulación 1: Modelos de Anderson</i> .....	91
<i>Simulación 2: Modelos de Scott &amp; Burgan</i> .....	94
<i>Simulación 3: Adaptación de modelos de Anderson</i> .....	97
4.3.2. Empleo de simulaciones en el planeamiento de actividades de control del fuego .....	100
4.3.2.1. Categorización de zonas de un incendio de acuerdo a su posibilidad de ataque. ....	100
4.3.2.2. Barreras cortafuegos: localización y ancho. ....	102
4.4. Discusión .....	106
CONCLUSIONES.....	110
5.1. Conclusiones generales.....	111
5.2. Aportes del trabajo.....	113
5.3. Consideraciones futuras y sugerencias .....	114
APÉNDICE A.....	116
APÉNDICE B.....	126
APÉNDICE C.....	138
APÉNDICE D.....	163
REFERENCIAS .....	166

## RESUMEN

Los incendios son uno de los disturbios que más afectan a la población humana y los recursos naturales, pudiendo causar impactos a distintas escalas (sistemas terrestre, acuático y atmosférico), como así también pérdidas económicas y de vidas humanas. En Argentina, se queman alrededor de 250 mil ha por año, registrándose en el 2012 a Córdoba dentro de las cuatro provincias con mayor superficie afectada. Por este motivo, mediante el presente trabajo se pretende proporcionar información de utilidad para la prevención de incendios a través de predicciones del comportamiento del fuego y aportando a las tareas de control y vigilancia. Así, se llevó a cabo la construcción de mapas de combustibles a escala local a través de la clasificación de la vegetación mediante la aplicación de técnicas de sensado remoto, como así también la realización de simulaciones del comportamiento del fuego, para un área de alto valor de conservación afectada por incendios.

Se exploraron distintos métodos de clasificación supervisada de imágenes satelitales (clasificadores y variables auxiliares), obteniendo mejores resultados en la clasificación de las coberturas al emplear el clasificador Máquina de Soporte Vectorial (SVM) e incluir variables topográficas como bandas auxiliares. A partir del mapa de coberturas generado se construyeron dos mapas de combustibles (empleando dos sistemas estadounidenses de clasificación): 1) modelos de Anderson y 2) modelos de Scott & Burgan. Resultados de la réplica de un incendio real mediante simulaciones de incendios con el software FARSITE, sugerirían la necesidad de una adaptación de los modelos estadounidenses a la vegetación local.

Este trabajo contribuye al desarrollo e implementación de un sistema integral de prevención y manejo del fuego, considerando las distintas variables dominantes del comportamiento del fuego (clima, topografía y combustibles) en la estimación del riesgo de ignición y propagación de un incendio, e incluyendo a las simulaciones de incendio como una herramienta de utilidad para la gestión de incendios.

**Palabras clave:** incendios forestales, teledetección, clasificación de imágenes, mapeo de coberturas, mapeo de combustibles, simulaciones de incendio, Farsite, prevención y manejo del fuego.

## ABSTRACT

Wildfires are one of the disturbances that more affect the human population and natural resources, which can cause impacts at different scales (terrestrial, aquatic and atmospheric systems), as well as economic and human life losses. In Argentina, around 250000 ha are burned per year, and Cordoba was between the Argentinean provinces with the largest burned surface in 2012. Therefore, the present work is aimed to provide useful information for fire prevention through both predicting fire behavior and helping in control and monitoring tasks. Fuel maps, at local scale, through applying remote sensing techniques in vegetation classification were carried out, as well as simulations of fire behavior, in an area of high conservation value affected by wildfires.

Supervised classification methods of satellite images (classifiers and auxiliary variables) were explored, obtaining better results when the Support Vector Machine classifier (SVM) was used and topographic variables were included as auxiliary bands. From the cover map generated, they were derived two fuel maps (using two U.S. classification systems): 1) Anderson's models 2) Scott & Burgan's models. The comparison between a real wildfire with fire simulations by FARSITE would suggest a further adaptation of U.S models to local vegetation.

This work contribute to the development and implementation of a comprehensive system of fire prevention and management, considering the principal variables influencing of fire behavior (weather, topography and fuels) to ignition and spread risk estimation, and including fire simulations as useful tools for management.

**Key words:** wildfires, remote sensing, image classification, land cover mapping, fuel mapping, fire simulations, Farsite, fire prevention and management.

# CAPÍTULO 1

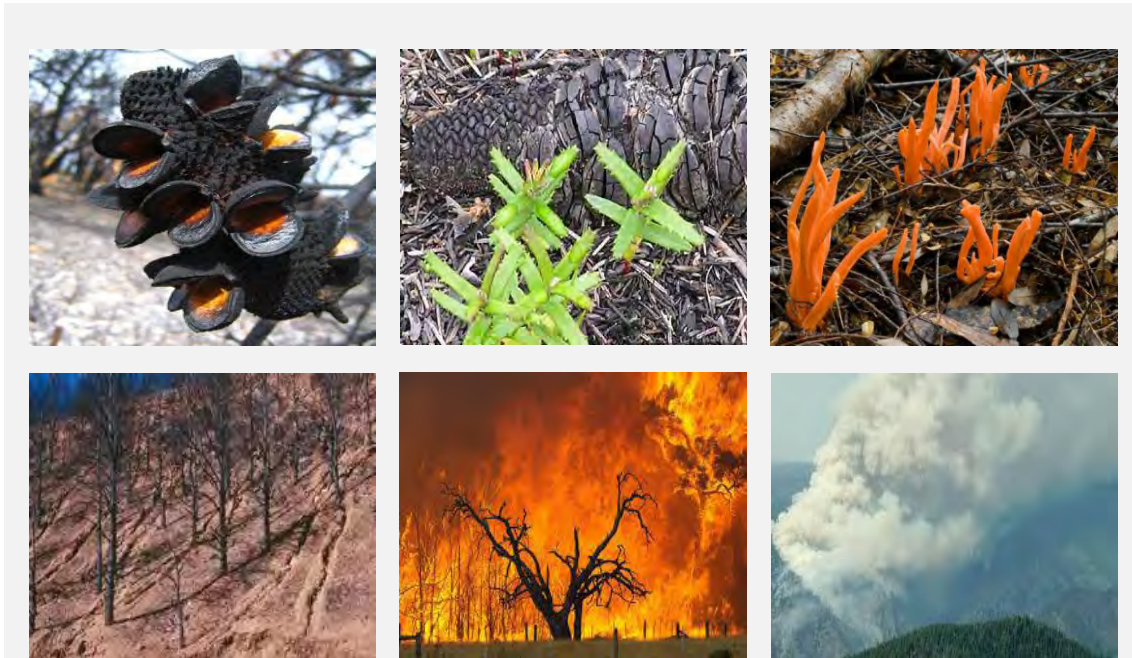
---

## INTRODUCCIÓN GENERAL



### 1.1. Antecedentes

Si bien en algunos ecosistemas el fuego cumple un rol natural manteniendo el mismo tipo de vegetación en el tiempo y en el espacio, favoreciendo la regeneración o la biodiversidad y la creación de hábitat y nichos importantes para la vida silvestre (Rodríguez-Trejo 2001, Keeley & Brennan 2012, van Wilgen *et al.* 2012), los incendios son uno de los disturbios que más afectan a la población humana y los recursos naturales, causando impactos a distintas escalas y pudiendo afectar a los sistemas terrestre, acuático y atmosférico (figura 1.1). A escala local, el fuego puede alterar la estructura y composición del suelo y la vegetación mediante estimulación de procesos microbiales del suelo, promoción de la germinación y de la producción de semillas y eliminación de vegetación por quemado. A escala regional, puede influir sobre los ecosistemas acuáticos, afectando la cantidad y calidad del agua y acelerando la erosión y sedimentación. A escala global, las emisiones generadas por grandes incendios tienen un impacto directo sobre la atmósfera y los ciclos biogeoquímicos de la Tierra. Además, tanto a escala local como regional, las emisiones gaseosas, tales como monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno o dióxido de sulfuro, y de material particulado afectan la calidad del aire, por lo que son considerados un riesgo a la salud humana (Lentile *et al.* 2006).

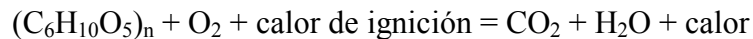


**Figura 1.1.** Efectos del fuego (descripción de izquierda a derecha). Especie nativa de Australia, *Banksia sp.*, en la que sus conos leñosos se abren luego de ser estimulados por el fuego, para liberar las semillas. Plántulas de *Banksia sp.* creciendo en un área quemada. Fructificación de una especie de hongo gracias al cambio en la composición del suelo producida por el paso del fuego. Erosión del suelo acelerada por efecto del fuego. Pérdida de la vegetación en ecosistemas sensibles al fuego. Producción de contaminantes atmosféricos gaseosos y particulados a partir de un incendio.

Un *incendio forestal* es un fuego violento que se desarrolla de forma descontrolada en un espacio abierto con superficie vegetada, siendo habitual actualmente denominar con este nombre a cualquier incendio de vegetación, ya sea bosque, pastizal, matorral, u otro

tipo de combustible. De acuerdo al estrato de vegetación combustible sobre el cual se propaga se diferencian distintos tipos de fuegos (figura 1.2). El *fuego de superficie* es aquel que se propaga a través de combustibles que se encuentran sobre o próximos a la superficie, como pastos, arbustos, árboles caídos, mantillo, etc. Cuando el fuego de superficie se mueve hacia las copas de árboles individuales, de forma puntual sólo en algunos pies y sin propagación del fuego de una copa a otra, se habla de presencia de *antorchas* o *antorcheo*, lo que algunos autores lo consideran como un tipo de fuego de copas. El *fuego de copas* se propaga a través de las copas de los árboles, y generalmente depende del fuego de superficie para iniciarse, pero puede llegar a propagarse de manera independiente al de superficie. El fuego de copas puede dar lugar a nuevos focos de incendio mediante el transporte de partículas sólidas vegetales encendidas, llamadas pavesas, que viajan en la columna de convección causada por el fuego o son empujadas por el viento a cierta distancia del incendio. Los nuevos puntos de ignición se denominan focos secundarios. El *fuego de suelo*, es el fuego que ocurre en combustibles orgánicos sub-superficiales, como las capas de materia orgánica que se encuentra entre la superficie y la capa mineral del suelo y que están compuestas por restos de vegetación en descomposición, raíces, hojarasca, turba, etc. Este tipo de fuego puede arder bajo la superficie (*fuego de suelo subterráneo*) mediante combustión sin llama siendo detectados por la producción de humo (Pyne *et al.* 1996, Arnaldos Viger *et al.* 2004).

El fuego es una manifestación de una reacción química, y en el caso de los incendios forestales implica una rápida liberación en forma de calor de la energía almacenada por la vegetación (combustible) mediante la fotosíntesis.



El proceso de combustión implica cuatro etapas. La pre-ignición, es la fase en que el combustible es llevado a la temperatura de ignición. Generalmente existe una fuente de ignición, aunque también puede darse la ignición espontánea. La ignición es la etapa en que el combustible alcanzó la temperatura necesaria para arder, por lo que ya no se necesita una fuente externa de calor. En la fase de combustión se encienden los compuestos liberados durante la fase de precalentamiento, generando una llama, y el carbono restante arde como un sólido. Y la extinción, se refiere a la finalización de la combustión por ausencia de algunos de los elementos indispensables para que suceda: combustible, oxígeno o calor. La combustión también puede verse limitada por contenido inorgánico o por humedad elevada en los combustibles, afectando ambos a la efectividad del calor disponible para propagar el fuego (Pyne *et al.* 1996).

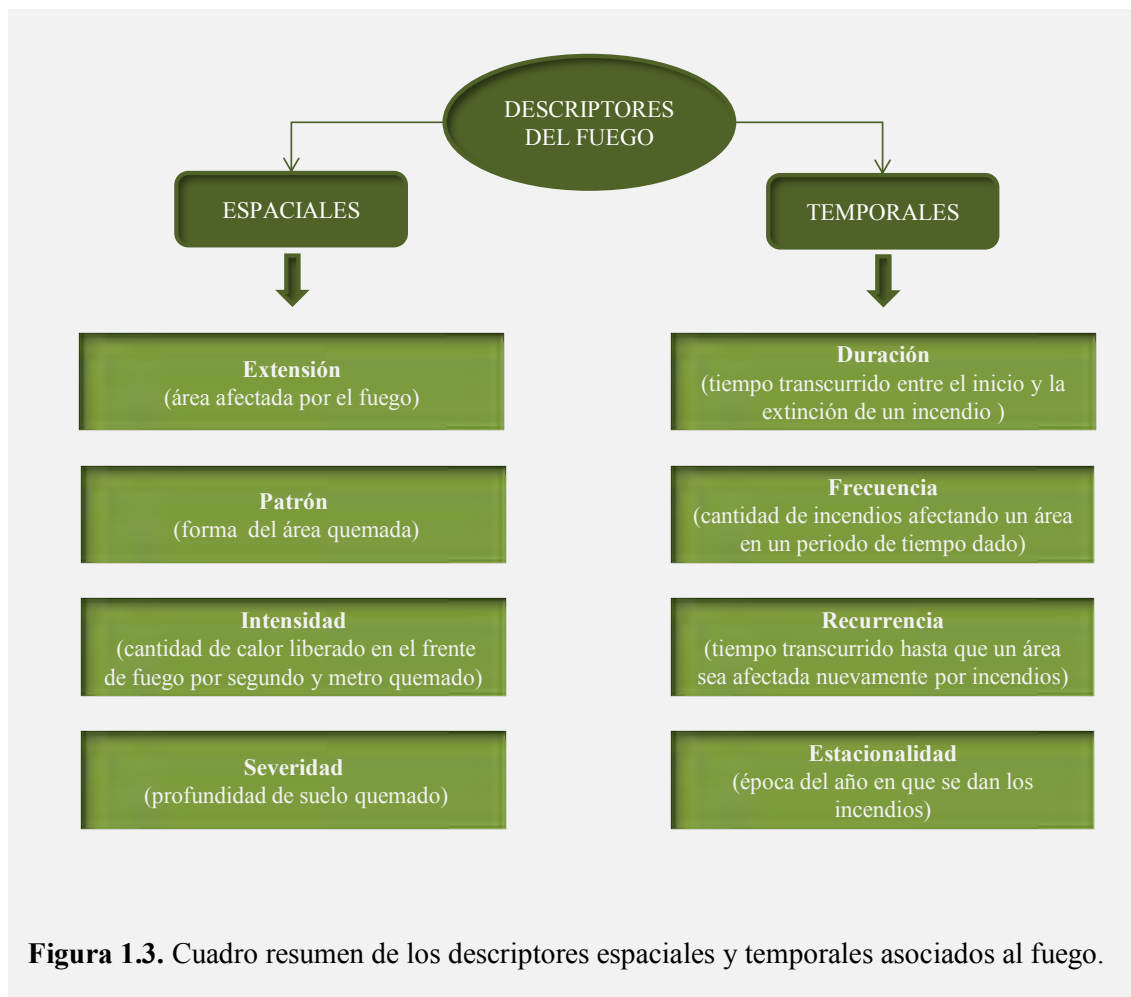
Los efectos del fuego pueden clasificarse como de primer o de segundo orden. Los de primer orden incluyen los resultados directos del proceso de combustión, como daño y muerte de la vegetación, consumo de combustible y producción de humo, siendo buenos como descriptores de las características de un fuego activo. Los de segundo orden, o efectos post-fuego, incluyen consecuencias del fuego identificables a corto o largo plazo, como la dispersión del humo producido, la erosión y la sucesión de la vegetación (Lentile *et al.* 2006).



**Figura 1.2.** Tipo de incendios de acuerdo al estrato de vegetación sobre el cual se propaga el fuego. A la izquierda se muestra una representación esquemática de los mismos, y a la derecha se ejemplifica con imágenes de incendios reales. El incendio o fuego de superficie (fila superior) propaga sobre vegetación ubicada próxima al suelo o sobre el mismo, el incendio de copas (segunda fila) propaga entre las copas de árboles contiguos, y el incendio de suelo o subsuelo (fila inferior) propaga sobre la capa orgánica que se encuentra en la superficie y la capa mineral del suelo, generalmente con producción de humo sin llama debido a la falta de oxígeno.

Existen diferentes descriptores del fuego: los espaciales, como la extensión, patrón, intensidad y severidad, y los temporales, como la frecuencia, duración, periodo de recurrencia y estacionalidad (figura 1.3). La *extensión* se refiere a la superficie afectada por el incendio, y el *patrón* a la forma que toma el mismo, observable fácilmente en el área quemada. La *intensidad del fuego* es un descriptor del comportamiento del fuego, medido generalmente en kilojoules por segundo por metro, que se ve afectado por el tipo de vegetación y el contenido de humedad de la misma, las condiciones atmosféricas y la topografía. La intensidad de un incendio se encuentra relacionada con la velocidad de propagación del mismo y el flujo de energía liberado. La velocidad de propagación es calculada como los metros quemados por segundo, mientras que el flujo de energía es la cantidad de kilowatts generados por metro quemado. La *severidad del fuego* integra las características del fuego activo con los efectos inmediatos post-fuego en el ambiente

local, y tiene que ver con cuánto de la superficie del suelo es dañada (sobre y bajo la superficie). La *severidad de quemado*, a diferencia de la severidad del incendio, considera los efectos post-fuego tanto a largo como a corto plazo, definiendo el grado con el cual un ecosistema cambia debido a un incendio. Este descriptor se define midiendo la profundidad de suelo quemado, pérdida de materia orgánica, alteración en la infiltración y coloración del suelo, y cantidad de vegetación superficial muerta, chamuscada y recuperada. La *frecuencia* es el número de incendios que se producen en un área dada durante un periodo de tiempo determinado, la *estacionalidad* hace referencia a la época del año en que se producen los incendios y el *periodo de recurrencia* es el tiempo necesario para que un área vuelva a ser afectada por un incendio. La *duración del fuego* influye en la cantidad de calor transferido al suelo y la cantidad de vegetación superficial quemada, y tiene mayor efecto que la intensidad del fuego sobre la severidad del fuego (Lloret 2004, Lentile *et al.* 2006).

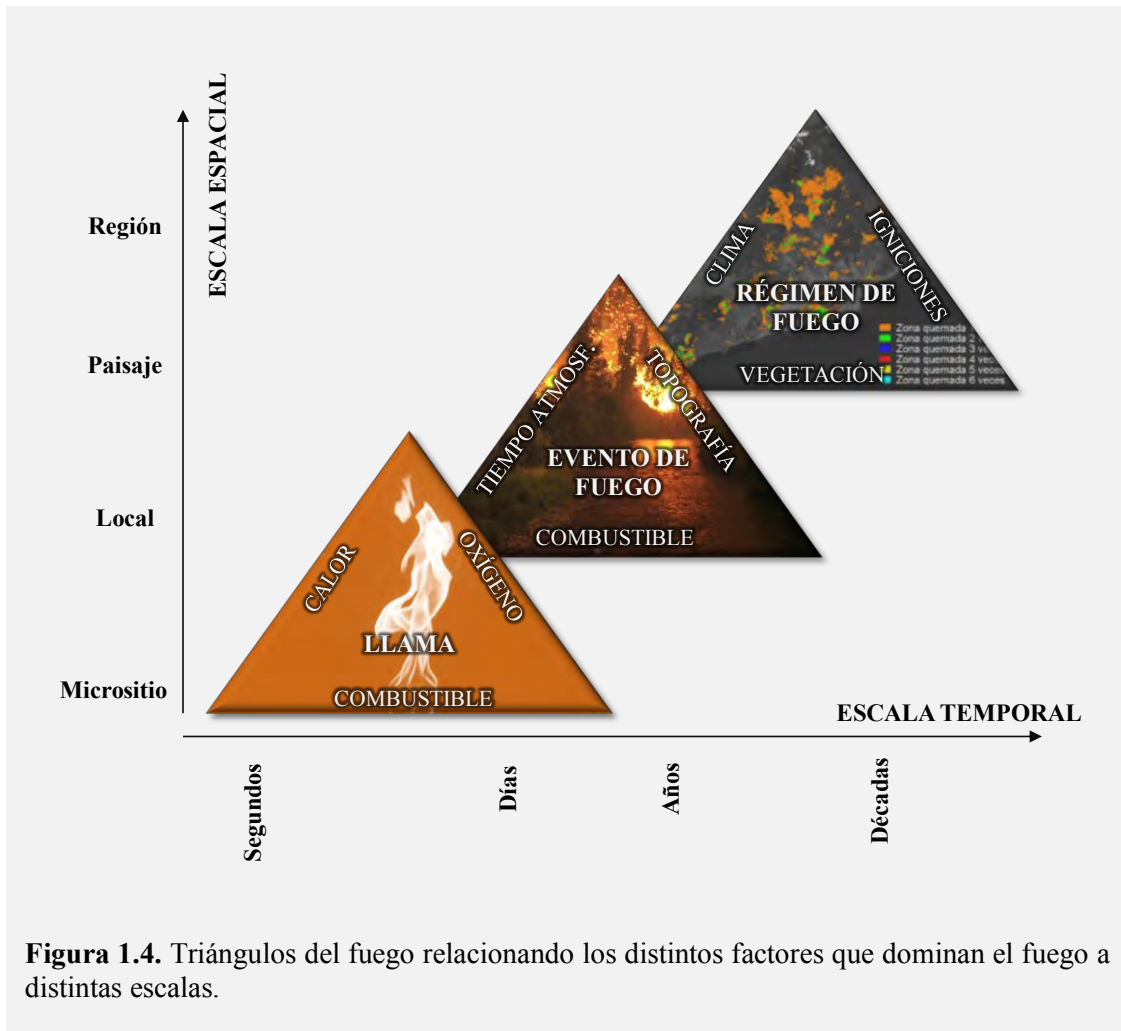


Estos descriptores se ven afectados por distintas variables. Interacciones complejas entre los combustibles, topografía y clima influyen sobre el comportamiento y los efectos de fuegos individuales. En términos generales, las variaciones del clima y del tiempo atmosférico tienen un efecto local en la probabilidad de ignición y en la propagación del fuego, afectando la distribución espacial y temporal del mismo e influyendo en la distribución y frecuencia de incendios, siendo mayor la frecuencia

durante periodos extensos de sequía. Vientos cálidos y secos reducen la humedad relativa, incrementando la transpiración y el déficit hídrico de las plantas. Además, aumenta la cantidad de aire necesaria para el proceso de combustión, inclina las llamas favoreciendo la transferencia de calor a la vegetación, puede acelerar la pérdida de agua de los combustibles, causar focos secundarios mediante el transporte de pavesas y provocar cambios en la velocidad y dirección del fuego, por lo que es considerado un factor dominante en el comportamiento del fuego. La temperatura, humedad relativa y precipitaciones afectan directamente a la humedad de los combustibles. A su vez, la topografía genera variaciones climáticas locales. Las formas orográficas pueden afectar la dirección y velocidad del viento, mientras que la pendiente y la orientación determinan la radiación solar recibida por la superficie, influyendo en consecuencia en la humedad relativa y la temperatura. Por otro lado, a mayor pendiente mayor será la propagación del fuego, ya que interviene en el proceso de transferencia de calor causando un precalentamiento de los combustibles situados delante del frente de incendio pendiente arriba, facilitando así la ignición de los mismos. A nivel de los combustibles, variables como contenido de humedad, condición de vivo o muerto, tipo, tamaño, forma, compactación, continuidad horizontal y vertical, etc., son fundamentales para predecir el comportamiento del fuego. Por ejemplo, los combustibles de superficie afectan la velocidad de propagación y la intensidad del fuego de superficie, mientras que la presencia de vegetación que asegura una continuidad vertical entre la vegetación del estrato inferior y superior, condiciona el inicio y la propagación de fuegos de copa (Pyne *et al.* 1996, Arnaldos Viger *et al.* 2004, Falk *et al.* 2007).

La interacción de las variables afectando la ocurrencia y propagación del fuego son representadas mediante los triángulos del fuego, variando a su vez la importancia relativa de cada factor en función de la escala espacial y temporal de observación (figura 1.4). El triángulo de los fundamentos del fuego se corresponde con una escala espacial a nivel micrositio, y representa los principios básicos para la generación de llama. El triángulo del evento del fuego considera al tiempo atmosférico (temperatura, humedad, velocidad del viento), a la topografía y al combustible (tipo, humedad y continuidad), como las principales variables dominando la probabilidad de ignición, velocidad de propagación y la intensidad del fuego. Por último, el triángulo del régimen de fuego plantea como factores determinantes de la distribución, frecuencia e intensidad del fuego, al clima, a la estructura, organización y composición de la vegetación y a las fuentes de ignición, natural o antrópica (Whitlock *et al.* 2010).

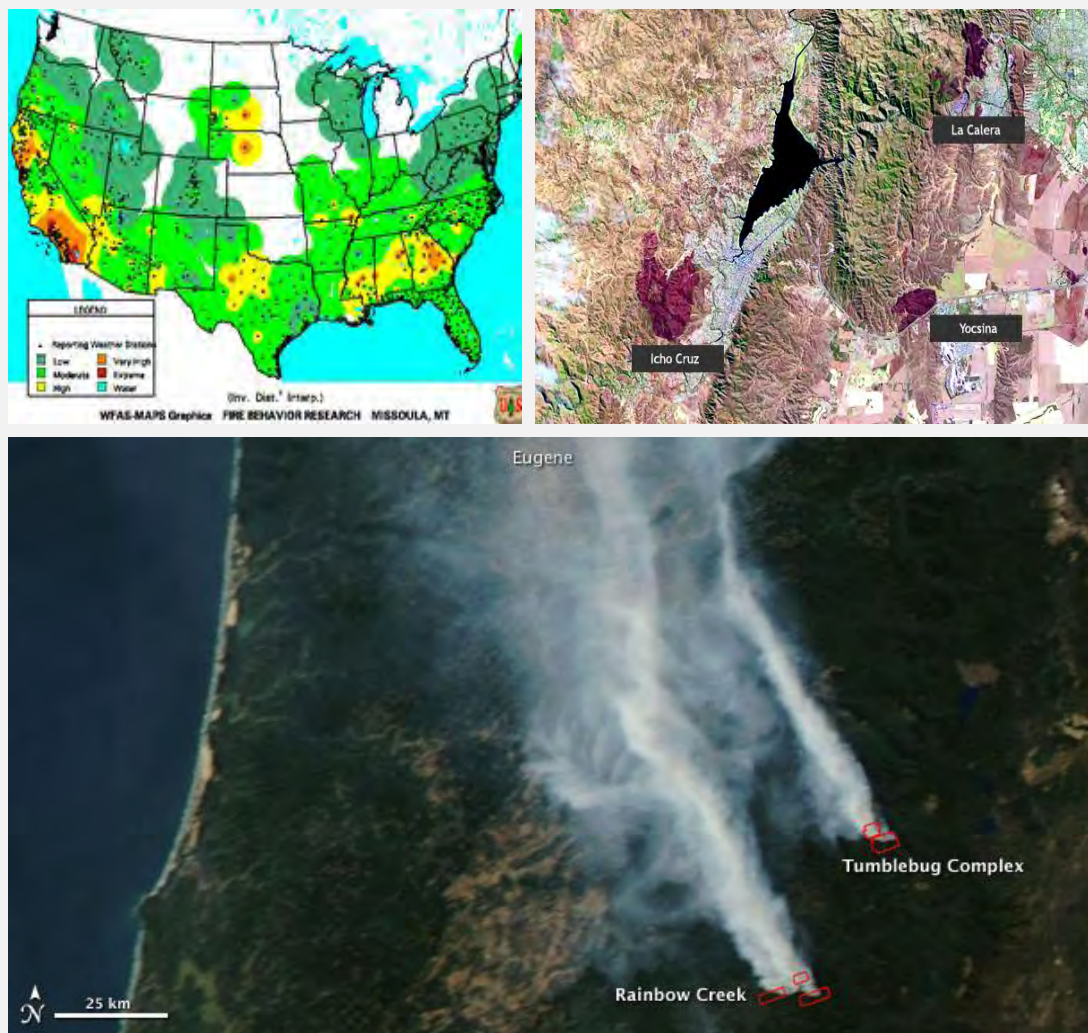




**Figura 1.4.** Triángulos del fuego relacionando los distintos factores que dominan el fuego a distintas escalas.

La probabilidad de ocurrencia de incendios en el espacio y el tiempo puede ser estimada mediante técnicas de teledetección, ya que posibilitan el análisis del material combustible y la determinación del nivel de riesgo de incendio por medio de índices creados a partir del estudio de la vegetación, como el FSI-Fire Susceptibility Index o el FPI-Fire Potential Index (Dasgupta *et al.* 2006, Laneve & Cadau 2007). Estos índices se basan en la determinación del estado del combustible (temperatura, vigor y humedad del combustible) para computar la probabilidad de ignición y también poder comparar el riesgo de incendio entre regiones. Variables como biotipo y distribución de la vegetación, contenido de humedad, estructura y otros, pueden obtenerse a partir de sensores remotos, siendo una herramienta útil para la prevención, el monitoreo y el manejo del fuego (DeFries *et al.* 1996, Maffei *et al.* 2007, Xu & Zhuang 2007, Bergen *et al.* 2009, Wen *et al.* 2010, Gao *et al.* 2011) (figura 1.5). Así mismo, diferentes métodos de clasificación de coberturas en imágenes satelitales son empleados en estrategias de mapeo, como análisis de multiresolución (espectral, espacial y temporal) e información auxiliar como índices espectrales, textura y topografía (Muchoney *et al.* 1998, Friedl *et al.* 2001, Jollineau & Howarth 2002, Wilson *et al.* 2002, Benhadj *et al.* 2007, Wallerman *et al.* 2010). También es posible la detección de un incendio activo, mediante imágenes satelitales provenientes de sensores remotos que detectan la temperatura superficial de la tierra, como es el caso del producto de focos de calor de MODIS (Giglio *et al.* 2003, Hawbaker *et al.* 2008, Chuvieco *et al.* 2012). Este producto

es un mapa de focos de calor, donde se identifican anomalías térmicas que pueden ser originadas por fuentes de alta temperatura, como plantas energéticas o focos de fuego (figura 1.5). Se debe tener en cuenta que la detección de las anomalías térmicas está condicionada por el tamaño y duración del incendio y que si bien la presencia de un incendio implica el registro de un foco de calor en el mapa, la presencia de un foco de calor no representa necesariamente un incendio en curso. Por último, diferentes índices espectrales obtenidos a partir de imágenes, como el NBR-Normalized Burn Ratio, permiten detectar áreas quemadas a través del análisis de las diferencias entre el comportamiento espectral de la superficie quemada y otras cubiertas de una misma imagen, o bien entre la zona quemada y la vegetación previa. Esto posibilita una evaluación de daño a través de la estimación de superficie afectada, ubicación, cantidad de combustible consumido, severidad del incendio y otros (figura 1.5) (García-Haro *et al.* 2001, Miller & Yool 2002, Roy *et al.* 2006, Alonso-Benito *et al.* 2008).



**Figura 1.5.** Utilización de la teledetección en la prevención, monitoreo y estimación de daños causados por incendios. Arriba, a la izquierda, se muestra un mapa de peligro de incendio empleado por el servicio forestal de USA (fuente: USFS). A la derecha, una imagen Landsat evidenciando en color bordó áreas quemadas (fuente: CONAE). Abajo, una imagen satelital con superposición de focos de calor obtenidos del producto MODIS (fuente: NASA).

Así, la teledetección es considerada una herramienta de gran utilidad para la gestión de incendios forestales, ya que contribuye en cada una de las tres etapas relativas al incendio mediante el aporte de información sobre la condición de la vegetación (“pre-fuego”), facilitando la detección de incendios activos (“durante”) y agilizando la discriminación de áreas quemadas y estimación de superficie dañada (“post-fuego”).

En Argentina, alrededor de 250 mil ha se queman en promedio por año, siendo las regiones fitogeográficas correspondientes al Parque Chaqueño, al Espinal y a los Bosques Andino-Patagónicos las que mayor cantidad de incendios y hectáreas quemadas presentan (PNEF 2008-2013). El Plan Nacional del Manejo del Fuego (PNMF) en conjunto con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), confeccionaron en 1998 los primeros pronósticos para incendios. En el año 2000 se inició el denominado Proyecto 2000 de Manejo del Fuego y Transferencia de Tecnología, con financiamiento de la Agencia Canadiense de Desarrollo Internacional (ACDI), obteniendo asistencia técnica para la adaptación a nuestro territorio del Sistema Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios desarrollado en Canadá y utilizado en diversos países, el *Canadian Forest Fire Danger Rating System* (CFFDRS). Se comenzó ajustando el índice meteorológico FWI (Fire Weather Index, subsistema del CFFDRS) en tres áreas pilotos (el Parque Nacional Lanín en Neuquén, la Región Andina de Chubut, y la provincia de Misiones), y para el 2011 el uso de este índice se estaba fortaleciendo en las regiones Patagónica, NEA, NOA y Pampeana, e iniciándose en las regiones Norte y Centro (Dentoni & Marek [s.a] a, b y c). Sin embargo, si bien se espera implementar un sistema integral de prevención y manejo de fuego que considere las distintas variables dominantes del comportamiento del fuego, en la actualidad la evaluación de riesgo de incendio es realizada principalmente mediante indicadores de condiciones atmosféricas, poniendo de manifiesto la necesidad de profundizar en este tema. A pesar de que nuestro país presenta algunos estudios de información relacionada a la susceptibilidad de la vegetación al fuego, no está incluida formalmente dentro de un sistema de alerta temprana de incendios ni se ha registrado validación de dicha información a través de, por ejemplo, comparación entre incendios reales y simulados. Así, mediante el presente trabajo se propone la construcción de mapas de combustibles a escala local a partir de la clasificación de la vegetación mediante la aplicación de técnicas de sensado remoto, como así también la realización del modelado del comportamiento del fuego, para un área con gran valor de conservación afectada por incendios.

### 1.2. Justificación

El presente estudio se enmarca en un equipo de trabajo interinstitucional y multidisciplinario apuntado a fomentar la interacción entre investigadores en el ámbito del desarrollo e implementación de un sistema de alerta temprana y riesgo de incendios. Se constituye así el grupo IGNIS (Sistema Integral Nacional para la Gestión de Incendios), conformado por personal del Instituto de Altos Estudios Espaciales “Mario Gulich” (IG), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Administración de Parques Nacionales (APN), Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Dirección de Producción Forestal-Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca-, Plan Nacional y Plan Provincial del Manejo del Fuego (PNMF y PPMF-Córdoba), Dirección de Defensa Civil de Río Ceballos y Consorcio Delta de Prevención y Lucha contra Incendios Forestales. Cuenta además con el aporte



internacional de la Oficina Técnica de Prevención Municipal de Incendios Forestales-Diputación de Barcelona, España.

Se seleccionó como área de estudio a la Reserva Nacional (RN) y Parque Nacional Quebrada del Condorito (PNQC), basándose dicha elección en el acuerdo marco existente entre el PNQC y el IG (Resolución N 188/00 del año 2000) perteneciente a la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) y a la Facultad de Matemática, Astronomía y Física (FaMAF-UNC).

El PNQC y la RN forman parte, junto con la Reserva Hídrica Provincial Achala, de una Unidad de Conservación de 154875 ha totales, área natural integral en la región de Pampa de Achala creada con los objetivos de conservar los ecosistemas del cordón montañoso de las Sierras Grandes, Cumbres y Pampa de Achala, preservar las cabeceras de cuencas hídricas, y conservar la diversidad biológica regional, entre otros. La relevancia de proteger esta Unidad, se debe a que representa un sistema orográfico y biológico único, se compone de especies animales y vegetales de diferentes corrientes biogeográficas (especies austro-brasileras, chaqueñas de llanura, del Chaco Serrano, pampeanas, andinas patagónicas y magallánicas), reúne cerca de 40 taxones endémicos de flora y fauna y constituye un sitio de especiación y diferenciación. Los incendios son una de las principales fuentes de presión para la conservación de estas áreas, ya que no sólo constituyen un riesgo potencial para la vegetación del lugar, sino que también podrían favorecer el asentamiento de especies exóticas y la susceptibilidad de erosión por lluvias en los casos en que el fuego afecte los primeros centímetros del suelo. Con la creación del PNQC y RN en 1996 (por Ley Nacional 24749), la biomasa disponible para quemarse aumentó considerablemente debido a la exclusión del ganado doméstico, generando así un aumento en el riesgo de incendios (APN 2004).

Considerando las necesidades y objetivos mencionados en el Plan de Manejo del Parque Nacional Quebrada del Condorito y Reserva Hídrica Provincial de Achala, propuesto por la Administración de Parques Nacionales en el 2004, con este trabajo se pretende aportar a las tareas de control y vigilancia para la prevención de incendios, como así también proporcionar información de utilidad para predecir el comportamiento del fuego durante un incendio o realizar estimaciones de daño una vez avanzado el fuego.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivos generales

- Análisis de la vegetación en términos de su combustibilidad a través del uso de la teledetección como una aproximación a la estimación de riesgo de incendio.
- Evaluación del uso del software FARSITE (para simulaciones de incendios) como herramienta de gestión.

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- Discriminación y determinación de parámetros de la vegetación a partir de técnicas clásicas de teledetección (imágenes ópticas).
- Construcción de mapa de coberturas del suelo a escala local, para ser empleado como base en la diferenciación de tipos de combustibles.

- Desarrollo de una metodología de generación de mapas de combustibles a escala local, para ser incluidos en un sistema de alerta temprana.
- Exploración de una metodología de validación de los mapas de combustibles mediante simulaciones de comportamiento del fuego en el software FARSITE.
- Evaluación de la implementación de simulaciones de incendio en actividades de control del fuego.

### 1.4. Estructura de la tesis

La presente tesis se encuentra organizada en cinco capítulos, comenzando con los conceptos básicos relacionados al fuego, expuestos en este capítulo.

En el capítulo 2, se realiza la descripción del área de estudio y el procedimiento llevado a cabo para la obtención del mapa de coberturas correspondiente a la Reserva Nacional (RN) y Parque Nacional Quebrada del Condorito (PNQC). Se detallan las clases de coberturas diferenciadas, las distintas pruebas realizadas para la selección del método de clasificación digital utilizado, las variables auxiliares incluidas en la clasificación y las técnicas de post-clasificación implementadas.

El capítulo 3 incluye una revisión bibliográfica sobre el origen y evolución de los modelos de combustibles, definición de los parámetros asociados y el estado del arte en Argentina. Se describen más en detalle los dos sistemas estadounidenses de clasificación de combustibles empleados en la construcción del mapa de combustibles para el área de estudio, y se discute sobre la factibilidad de emplear estos modelos como descriptores representativos de los combustibles locales.

En el capítulo 4 se presenta a las simulaciones de incendios de superficie como una herramienta más para el manejo y monitoreo de incendios. Se plantean distintas metodologías que las consideran, algunas relacionadas a la validación de mapas de combustibles y otras de utilidad en la gestión de incendios. Las últimas hacen referencia a procedimientos planteados para la definición de zonas seguras de ataque del fuego y para la diferenciación de zonas apropiadas para la localización de barreras cortafuegos y estimación de ancho mínimo de las mismas.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones finales de este trabajo y consideraciones futuras. Por último, al final del documento se incluye una serie de apéndices organizados por temática (implementación de algoritmos, figuras y tablas, manual y comentarios del simulador de incendios forestales FARSITE).

## CAPÍTULO 2

---

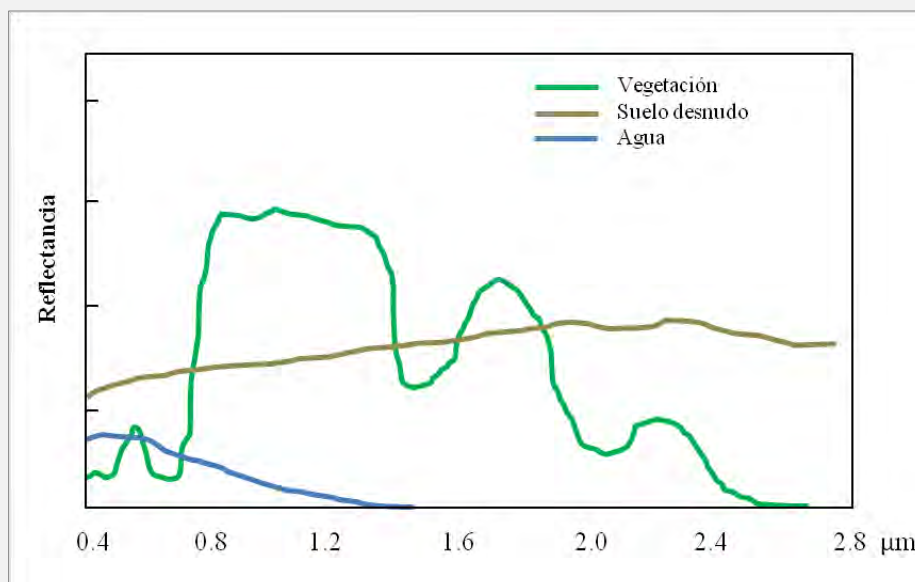
### GENERACIÓN DE MAPA DE COBERTURAS

### 2.1. Introducción

Un *mapa de coberturas* es un mapa temático realizado a partir de una imagen satelital, en donde todos los píxeles de la misma están asociados a una clase temática que representaría la cobertura presente en el terreno; en el caso más simple: agua, vegetación, suelo desnudo. La teledetección es la técnica que nos permite obtener información a distancia de los objetos situados sobre la superficie terrestre y es así como cobra gran importancia en la generación de estos mapas. El principio físico de la teledetección se basa en la interacción que existe entre los objetos y el sensor remoto a través de las ondas electromagnéticas, que son capaces de transmitir información en el vacío mediante este flujo energético. Un sensor remoto puede adquirir esta información por reflexión (el objeto refleja la energía solar), por emisión (registro de la energía emitida por el objeto) o por emisión-reflexión (el sensor emite un flujo energético para luego recoger su reflexión sobre los objetos), siendo la reflexión la forma más importante en teledetección.

La radiación electromagnética se comporta de diferente manera según la longitud de onda de la que se trate. Así, los valores de longitud de onda (intervalo) donde manifiesta un comportamiento similar, se conoce como *banda espectral*. Las frecuentemente empleadas en teledetección son las bandas correspondientes al azul (0.4-0.5  $\mu\text{m}$ ), con aplicación en agua y costas; al verde (0.5-0.6  $\mu\text{m}$ ), para vegetación; al rojo (0.6-0.7  $\mu\text{m}$ ), para discriminación de especies vegetales; al infrarrojo cercano –NIR- (0.7-1.3  $\mu\text{m}$ ), para tipos de vegetación y biomasa; al infrarrojo de onda corta –SWIR- (1.3-2.5  $\mu\text{m}$ ), para estimación del contenido de humedad en vegetación y suelos; infrarrojo medio-MIR- (2.5-8  $\mu\text{m}$ ), útil principalmente en torno a los 3.7  $\mu\text{m}$  para detectar focos de alta temperatura, como incendios o volcanes activos; infrarrojo lejano o térmico –TIR- (8-14  $\mu\text{m}$ ), detecta el calor proveniente de las cubiertas terrestres; y las micro-ondas (>1 mm), importantes por no verse afectadas por la cubierta nubosa.

Debido a que la interacción de la onda electromagnética con el objeto varía según la longitud de onda, también lo hace la reflexión. De esta manera, a cada elemento del paisaje le corresponde una curva espectral que indica cuánto refleja respecto a una longitud de onda (figura 2.1). En general, la vegetación vigorosa muestra una baja reflectividad en el azul y el rojo, un pico relativo en el verde, una alta reflectividad en el NIR y baja, con algunos máximos relativos, en el SWIR. Ya que la reflectividad de la vegetación está relacionada al tipo y cantidad de pigmentos presentes en la hoja, a la estructura celular y al contenido de humedad, como así también a las características geométricas de la planta (área foliar, forma de las hojas, geometría del dosel, etc.), es posible diferenciar tipos de vegetación gracias a sus diversos patrones de reflectividad. En cambio, el suelo desnudo muestra una curva más plana, la cual varía de acuerdo a la composición química del suelo, su textura, estructura y contenido de humedad. En el caso del agua, su reflectividad es mayor cuanto más corta es la longitud de onda, mostrando su pico en el azul. Sin embargo, en aguas turbias o poco profundas se genera un aumento de la reflectividad en todas las bandas del visible, debido al aporte de reflectividad de los sedimentos o materiales del fondo. Así mismo, cuerpos de agua con elevada concentración de algas suelen presentar una disminución de la reflectividad en el azul y un aumento en el verde.



**Figura 2.1.** Curvas espectrales típicas correspondientes a vegetación vigorosa (verde), suelo desnudo (marrón) y agua clara (azul). Se observa como para cada cubierta la reflectividad varía de acuerdo a la longitud de onda.

Estas curvas de reflectividad espectral, son lo que se conocen como *firmas espectrales*, y es el principio elemental para la diferenciación de tipo de coberturas presentes en terreno. Así es como mediante software específicos se pueden realizar clasificaciones digitales de imágenes satelitales, basadas en diferenciar distintas categorías temáticas de acuerdo a un comportamiento espectral similar, esto es lo que se denomina clasificación espectral. Para los casos de coberturas que presentan elevada similitud entre sus firmas espectrales, puede ayudarse a la clasificación incluyendo el contexto espacial en el que se encuentra cada píxel, características de textura o información temporal que aporte datos de la evolución estacional del mismo, entre otros. Además, se espera que también mejore la clasificación el trabajar con datos provenientes de sensores con mayor resolución espacial, donde cada píxel de la imagen se corresponde a una porción más pequeña del terreno, y con mayor resolución espectral, es decir que presenten más cantidad de bandas espectrales, siempre que abarquen las longitudes de onda de mayor interés para la discriminación de las coberturas naturales.

La clasificación digital puede ser no supervisada o supervisada. La *clasificación no supervisada* asume que grupos de píxeles con un comportamiento espectral homogéneo definen clases temáticas de interés, discriminando las diferentes clases espectrales presentes en una imagen, es decir, grupos o conglomerados de píxeles con valores de reflectividad similar. No requiere de un conocimiento previo de la zona de estudio. El problema de este método es la difícil interpretación de los resultados cuando se generan clases que el usuario desconoce su procedencia. Otro inconveniente es que ya que se consigue un buen agrupamiento luego de un alto número de iteraciones, precisa un gran volumen de cálculo, siendo muy lento para la clasificación de imágenes extensas. En los métodos no supervisados, la similitud entre píxeles se mide generalmente a partir de la distancia euclidiana o la distancia de Mahalanobis, y los algoritmos más utilizados para el agrupamiento son el Isodata o el de K-Medias. En cambio, la *clasificación*

*supervisada* requiere de un cierto conocimiento de la zona de estudio, y consiste en delimitar sobre la imagen áreas representativas de cada una de las clases informacionales (las clases de interés que se pretende identificar en la imagen) definidas por el usuario. A partir de estas áreas de entrenamiento se caracterizan cada una de las clases, para que luego se asigne al resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de la similitud de sus valores de reflectividad con los tomados como referencia. Si bien es un método de fácil interpretación, se lo considera subjetivo porque el usuario interviene en la consecución de los resultados. Además, como se mencionó antes, requiere de un conocimiento previo del lugar. Por otro lado, si las áreas de entrenamiento no representan fielmente las distintas categorías, se podría obtener un error de clasificación producto de trabajar con áreas heterogéneas, no abarcar las variaciones espaciales que se presentan en cada categoría, o infravalorar la variabilidad de una categoría al seleccionar pocas áreas de gran tamaño. Así mismo, se deben evitar clases espectrales que no se hayan identificado con ninguna clase de entrenamiento. Existen diferentes algoritmos que permiten realizar clasificaciones supervisadas, los que asumen una distribución gaussiana de las variables a clasificar (paramétricos) como el clasificador de Máxima Verosimilitud, de Mínima Distancia y el de Paralelepípedos, o los que no asumen el tipo de distribución de los datos (no paramétricos), como las Redes Neuronales, la Máquina de Soporte Vectorial y el clasificador Árbol de Decisión (Richards 1993, Chuvieco 2010).

En este capítulo se presenta la metodología que se siguió para la obtención de un mapa de coberturas mediante clasificación supervisada, explorando dos métodos de clasificación no paramétrica y la incorporación de variables auxiliares como apoyo a la clasificación meramente espectral.

## 2.2. Materiales y Métodos

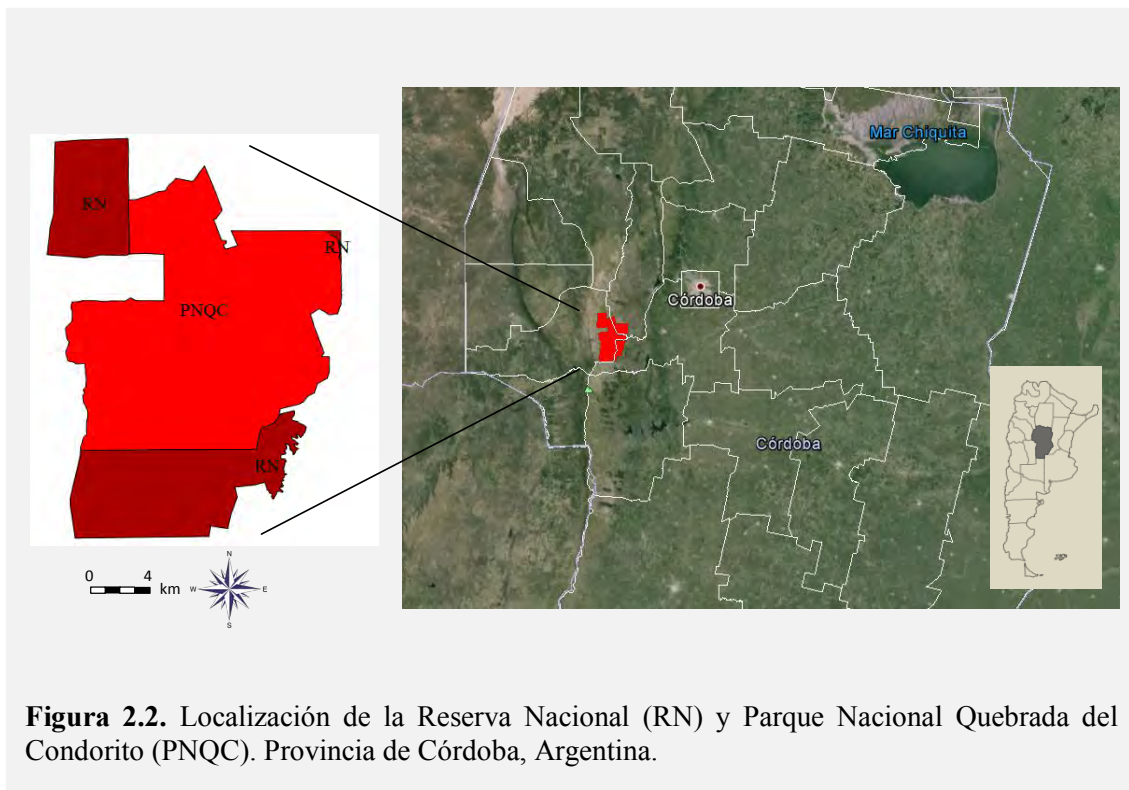
### 2.2.1. Área de estudio

El área correspondiente al PNQC (con 24714 ha) y a la RN (con 12630 ha) se encuentra ubicada en las Sierras Grandes de Córdoba, entre los 31°33' y 31°49' de latitud sur y los 64°52' y 64°40' de longitud oeste, cubriendo parte de los departamentos de San Alberto, Santa María y Punilla (figura 2.2). Ubicada en la eco-región del Chaco Seco, subregión Chaco Serrano, presenta un clima templado con precipitaciones de verano, con temperatura media en el mes más frío de 5° y en el más cálido de 11.4°C (Cingolani *et al.* 2003). Presenta un rango altitudinal alrededor de los 1200 y 2300 msm, variando la vegetación predominante según la altitud.

Cingolani *et al.* (2004), realizaron una descripción de la flora presente en la Unidad de Conservación, definiendo distintas unidades de vegetación, esto es, mosaicos de diferentes comunidades vegetales. La RN y el PNQC se encuentran representados por lo que definieron como “Bosque de tabaquillo” (bosques o matorrales de *Polylepis australis* –tabaquillo- con *Maytenus boaria* –maitén-, generalmente interrumpidos por pequeños afloramientos rocosos de *Berberis hieronymi* o parches de pajonales de distintos tipos), “Pajonal con Matorral y Afloramiento” (mosaico de matorrales y bosques de *Polylepis*, pajonales arbustivos y afloramientos rocosos de *Berberis hieronymi*), “Pajonal grueso con vegas” (se combinan el pajonal de *Poa stuckertii*, las



vegas de *Eleocharis albibracteata* y *Alchemilla pinnata* y pequeños parches de pajonales finos y céspedes), “Pajonal fino” (dominan los pajonales de *Festuca spp.* mayormente en zonas inferiores a 1900 m y de *Deyeuxia hieronymi* en altitudes superiores, en particular sobre los 2300 m), “Césped” (dominan *Alchemilla pinnata* y *Carex fuscata*, a veces mezclados con pequeños parches de pastizales), “Afloramiento con pajonal” (se combinan afloramientos naturales con pajonales de *Festuca tucumanica*, *Deyeuxia* y raramente *Poa*, según la altitud y la posición topográfica), “Afloramiento con roca expuesta” (pedregales o pastizales pedregales de *Sorghastrum pellitum* y *Stipa juncooides* con algunos parches de pajonales y céspedes) y “Pavimento de erosión” (pavimentos de roca expuesta por erosión, intercalada con algunos pedregales de *Sorghastrum pellitum* y *Stipa flexibarbata*). Sin embargo, como se explica en la sección 2.2.3.3., en el presente estudio se trabajó con un sistema de clasificación diferente por considerarlo más apropiado para el análisis del comportamiento del fuego.



**Figura 2.2.** Localización de la Reserva Nacional (RN) y Parque Nacional Quebrada del Condorito (PNQC). Provincia de Córdoba, Argentina.

Como se mencionó anteriormente, los incendios no controlados son una de las principales amenazas para los objetos de conservación del PNQC. De acuerdo a datos compilados por el Guardaparque Germán Jaacks, del Departamento de Conservación del Parque, los principales incendios de superficie ocurridos durante el período 2002-2013 llegaron a la suma de diez (de un total de 29), quemándose una superficie total de 30.4 ha debido a incendios por causa natural (rayos), 1265.8 ha por incendios de origen antrópico y 9 ha durante un incendio de causa desconocida. La localización de los mismos fue coincidente con zonas con carga ganadera nula o muy baja, observándose además que los causados por el hombre suelen presentarse en la temporada seca y estar asociados a la proximidad de caminos.

### 2.2.2. Conjunto de datos y aplicaciones informáticas

#### 2.2.2.1. Datos espectrales

Se trabajó con una imagen adquirida por el satélite SPOT 5-HRG (ver características en tabla 1.1), provista por el Centro Espacial Teófilo Tabanera de Córdoba-CONAE. La escena fue capturada el 26 de junio de 2012, y entregada en formato DIMAP Geotiff con un nivel de procesamiento 2A, el cual incluye una corrección radiométrica de distorsión y una corrección geométrica realizada en la proyección cartográfica UTM zona 20 Sur (Datum WGS84). Se calibró cada banda a valores de reflectancia a tope de la atmósfera.

La resolución espacial ofrecida por el satélite SPOT 5, lo posiciona como una mejor alternativa frente a otros satélites comúnmente empleados en clasificación de cobertura del suelo, tales como Landsat, con píxeles de 30 m, o Modis, con píxeles de 250 a 1000 m. La ventaja radica en que permite realizar una distribución espacial más precisa de los tipos de cobertura presentes, ya que al tratarse de píxeles con mayor resolución espacial disminuye la probabilidad de contar con “píxeles mezcla”, es decir, con porciones del terreno que presentan más de un tipo de cobertura y que generan, por lo tanto, mayor confusión espectral durante el análisis y clasificación de una imagen satelital. Además, esta ganancia en resolución espacial no implica un sacrificio de la resolución espectral que pudiera repercutir en la clasificación de nuestras clases de interés, ya que cuenta con las bandas de principal importancia para caracterizar coberturas vegetales (R, NIR, SWIR). De esta manera, el empleo de imágenes SPOT en el presente trabajo nos permitiría obtener una clasificación de coberturas más detallada, elemento fundamental para la posterior construcción de mapas de combustibles con mayor exactitud a escala local y un monitoreo del avance y comportamiento del fuego más próximo a la realidad.

#### 2.2.2.2. Datos topográficos

El modelo de elevación digital del terreno (DEM) correspondiente a la zona de estudio fue descargado de la página web de ASTER Global Digital Elevation Model (fuente: <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/>), producto que es generado a partir de datos del sensor ASTER y distribuido por la NASA (United States National Aeronautics and Space Administration) y el METI (Ministry of Economy, Trade and Industry of Japan). Se obtuvo la segunda versión de ASTER GDEM (Tachikawa *et al.* 2011), en formato GeoTIFF y con coordenadas geográficas esféricas (lat/long). Este producto presenta una resolución espacial de  $0.000278^\circ$ , equivalente a 30 m en coordenadas planas.

Se proyectó el DEM con igual sistema de coordenadas planas y datum que la imagen espectral y se remuestreó el tamaño del píxel a igual resolución que el de la imagen SPOT (10 m). Luego, se le realizó un filtro de medias (paso bajo) aplicando una ventana de 5x5 para suavizar depresiones artificiales, es decir, cambios bruscos de elevación resultantes de distorsiones o errores durante el proceso de generación del DEM (GISRS Center 2011). Posteriormente se obtuvieron del mismo las variables pendiente y orientación, ambas en grados. Estas variables son relevantes a considerar desde el punto de vista del análisis de la vegetación, como así también en técnicas de pre-procesamiento y, más adelante, en simulaciones de incendio.



### 2.2.2.3. Datos vectoriales

Se contó con vectores provistos por la Administración de Parques Nacionales, Delegación Centro, correspondientes al perímetro del PNQC y RN, y a los caminos, sendas y ríos principales presentes en la zona. Estos datos fueron reproyectados a UTM zona 20 Sur-WGS84.

El vector del perímetro del área de estudio fue utilizado para realizar un recorte sobre la imagen SPOT y las variables derivadas a partir de ésta, como así también sobre el DEM, pendiente y orientación. Los vectores de caminos y ríos se emplearon en procesos de clasificación, postclasificación y análisis visual en Google Earth.

### 2.2.2.4. Software empleado

Se utilizó el software comercial ENVI+IDL versión 4.8 (*ITT Visual Information Solutions*) para el procesamiento digital general de las imágenes (proyección cartográfica, recortes, remuestreos, obtención de variables derivadas de las imágenes, clasificación, etc.) y el desarrollo de script. Para los análisis estadísticos y realización de gráficos asociados a los mismos, se empleó el software libre RStudio versión 0.96.331 (*RStudio Inc.*). La visualización inicial, transformación y otras operaciones con los datos vectoriales (como superposición de distintas capas, exportación a formato kml, reproyección) se realizó en su mayoría mediante el software libre Quantum GIS versión 1.7.4 (*Open Source Geospatial Foundation-OSGeo-*), y en menor medida con ENVI. Los puntos de referencia tomados a campo con GPS (Sistema de Posicionamiento Global) fueron descargados y procesados con el software DNRGarmin (*Garmin Communications*). Por último, se utilizó Google Earth versión 7.1.1.1888 (*Google Inc.*) para la observación del área de estudio con alta resolución espacial, como apoyo en el proceso de clasificación y su posterior evaluación.

**Tabla 1.** Características espectrales y espaciales del satélite SPOT 5.

Satélite	Canal Espectral	Ancho de Banda ( $\mu\text{m}$ )	Localización Espectral Nominal	Resolución Espacial (m)
Spot 5 Sensor HRG	Band 1	0.5-0.59	Verde (G)	10
	Band 2	0.61-0.68	Rojo (R)	10
	Band 3	0.78-0.89	Infrarrojo cercano (NIR)	10
	Band 4	1.58-1.75	Infrarrojo de onda corta (SWIR)	20*

\*En el producto adquirido ya se encuentra remuestreada a 10 m.

### 2.2.3. Proceso de pre-clasificación

#### 2.2.3.1 Corrección de sombras topográficas

La geometría del terreno (pendiente y orientación) influye en la señal detectada por los sensores ópticos empleados en teledetección, registrándose mayores valores de reflectancia en superficies al pie de pendientes orientadas hacia el sol y bajos valores cuando las pendientes se encuentran opuestas al sol. Se observan así zonas más oscuras (de sombra) y más brillantes (de luz) en comparación a la uniformidad de una geometría horizontal. Si se dispone de un modelo de elevación digital (DEM) de similar resolución espacial que la imagen, se puede estimar la variación introducida en la reflectividad por el efecto topográfico a partir de modelar las condiciones de iluminación en el momento de adquirirse la imagen (Chuvienco 2010).

Existen diferentes métodos de corrección del sombreado topográfico que permitirían reducir el efecto negativo del mismo en la clasificación digital de imágenes. De esta manera, disminuyendo la heterogeneidad espectral extrínseca a las clases de interés, se esperaría conseguir una mayor precisión en los mapas temáticos o de cobertura obtenidos a partir de la clasificación. Dichos métodos se basan en la normalización de la topografía empleando un DEM para la descripción del relieve, compensando así las diferencias de iluminación debido a las variaciones de altura del terreno. A partir de la pendiente del terreno (inclinación del terreno respecto a la horizontal) y sus orientaciones respecto al sol (ángulo entre el vector que señala el norte y la proyección sobre el plano horizontal del vector normal a la superficie en ese punto), el ángulo azimutal solar (dirección del sol respecto al norte) y el ángulo cenital solar (ángulo complementario al de elevación solar) se obtiene la iluminación solar local para cada píxel de una imagen, la cual es tenida en cuenta en los distintos métodos de corrección (Meyer *et al.* 1993, Riaño *et al.* 2003).

Debido a las grandes variaciones del terreno presentes en nuestra zona de estudio, se realizó un script que permitiera implementar un método de corrección de sombras en ENVI (ya que este software no cuenta con un módulo para tal fin). Se programó en IDL un procedimiento para la corrección de sombras producidas por la topografía mediante el método “c-correction” (pseudocódigo 1). El código completo puede verse en el Apéndice A (Código *Corrección de sombras*). Se seleccionó este método debido a que el mismo asume una relación lineal entre la variable iluminación y la reflectancia en superficie inclinada, y permite mediante la incorporación de la constante  $c_k$  evitar la sobrecorrección que se produce en los sectores de la imagen donde los valores de iluminación son bajos. (Richter *et al.* 2009).

A rasgos generales, el procedimiento implica el cálculo de la iluminación para cada píxel de la imagen (ecuación 1), y luego a partir de la iluminación y la reflectancia registrada en terreno (imagen sin corregir) permite obtener la reflectancia horizontal, es decir, la imagen corregida (ecuación 2).

#### Ecuación 1

$$IL = \cos\theta_p \cos\theta_i + \sin\theta_p \sin\theta_i \cos(\phi_a - \phi_o)$$

Donde,

$IL$  = Iluminación (varía entre -1 y1).

$\theta_p$  = Pendiente del terreno.

$\theta_i$  = Ángulo cenital solar.

$\phi_a$  = Ángulo azimutal solar.

$\phi_o$  = Ángulo de orientación.

### Ecuación 2

$$\rho_{H_k} = \rho_{T_k} \left( \frac{\cos\theta_i + c_k}{IL + c_k} \right)$$

Donde,

$\rho_{H_k}$  = Reflectancia en superficie horizontal (por banda  $k$ ).

$\rho_{T_k}$  = Reflectancia en superficie inclinada, también llamada en terreno (por banda  $k$ ).

$c_k$  = Constante  $c$ . Cociente entre la pendiente y el término independiente de la ecuación de regresión entre la reflectancia en terreno y la iluminación (por banda  $k$ ).

Los datos de entrada que requiere el programa son la imagen a corregir, que debe estar en valores de reflectancia, una imagen de pendiente, una imagen de orientación (ambas correspondientes al área de estudio, en grados y con igual resolución espacial que la imagen a corregir), el ángulo de elevación solar y el ángulo azimutal solar (datos de adquisición de la imagen a corregir).

En el código desarrollado se incluyó una modificación del método de corrección que no altera los valores originales de la imagen cuando los valores de la variable iluminación se encuentran por debajo de un umbral determinado. Esta reforma fue necesaria para evitar valores ilógicos de reflectancia horizontal (menores a cero o mayores a 1) cuando el denominador en la ecuación 2 tiene un valor próximo o menor a cero. Se determinó un valor umbral único definido a partir de la banda espectral que presentase el mayor valor de reflectancia (ecuación 3), de manera de que si no se modifica el píxel de una banda determinada, tampoco se corrija el de otra/s banda/s, preservando así la firma espectral del píxel, es decir el patrón que indica cuánto refleja la cobertura presente en ese píxel respecto a cada longitud de onda.

### Ecuación 3

$$Umbral_{IL} = [max\rho_{T_k} * (\cos(sz) + c_k)] - c_k$$

Donde,

$max\rho_k$  = Valor máximo de reflectancia en terreno.

$c_k$  = Constante  $c$  correspondiente a la banda que presenta el mayor valor de reflectancia en terreno.

La ecuación asume que la reflectancia horizontal máxima que puede tomar un píxel es igual a 1.

**Pseudocódigo 1: Módulo Corrección de sombras****INICIO**

**Variables:** Arreglos de puntos flotantes. Fil, col y ban representan la posición en la fila, columna y banda respectivamente para cada variable.

Matriz de reflectancia en terreno:  $Refl(fil, col, ban)$

Matriz de pendiente:  $Slope(fil, col)$

Matriz de orientación:  $Aspect(fil, col)$

Matriz de iluminación:  $IL(fil, col)$

Matriz de reflectancia horizontal:  $Reflh(fil, col, ban)$

Vector pendiente a la recta:  $m(ban)$ : tamaño del vector; cada posición se corresponde a un valor para cada banda)

Vector ordenada al origen:  $b(ban)$ : tamaño del vector; cada posición se corresponde a un valor para cada banda)

Vector constante c:  $c(ban)$ : tamaño del vector; cada posición se corresponde a un valor para cada banda)

Vector valores umbral:  $Umbral(ban)$ : tamaño del vector; cada posición se corresponde a un valor para cada banda)

**Constantes:** números reales, en grados

Ángulo azimutal solar:  $az$

Ángulo cenital solar:  $sz$

**Operaciones:**

Cálculo IL: calcula el valor de iluminación para cada posición de la matriz aplicando operaciones trigonométricas sobre  $Slope$ ,  $Aspect$ ,  $az$  y  $sz$ . Los valores de pendiente y orientación son transformados a radianes.

Cálculo m: calcula la pendiente de la recta de regresión entre  $IL$  y  $Refl$ . Se obtiene un valor  $m$  para cada banda de  $Refl$ .

Cálculo b: calcula la ordenada al origen en la recta de regresión entre  $IL$  y  $Refl$ . Se obtiene un valor  $b$  para cada banda de  $Refl$ .

Cálculo c: calcula el cociente entre la ordenada al origen ( $b$ ) y la pendiente ( $m$ ) de la recta de regresión entre  $IL$  y  $Refl$ . Se obtiene un valor  $c$  para cada banda de  $Refl$ .

Cálculo umbral: calcula un valor umbral a partir de operar con  $sz$ ,  $c$  y el valor máximo de  $Refl$ . Se obtiene un valor  $Umbral$  para cada banda de  $Refl$ .

Cálculo Reflh: calcula el valor de reflectancia horizontal para cada banda y posición de la matriz mediante una ecuación que involucra a  $Refl$ ,  $IL$ ,  $sz$  y  $c$ . Se implementó el método "c-correction".

**Algoritmo:**

Leer  $Refl$ ,  $Slope$ ,  $Aspect$

**Para** cada ban, fil y col **hacer**

**Si**  $Refl(fil, col)$  es un número finito **entonces hacer**

$IL(fil, col) =$  Cálculo IL

$m(ban) =$  Cálculo m

$b(ban) =$  Cálculo b

$c(ban) =$  Cálculo c

$Umbral(ban) =$  Cálculo umbral

**Fin**

**Fin**

**Para** cada ban, fil y col **hacer**

**Si**  $Refl(fil, col, ban)$  es un número finito **entonces hacer**

**Si**  $IL(fil, col)$  es mayor o igual al valor máximo de  $Umbral$  **entonces hacer**

$Reflh(fil, col, ban) =$  Cálculo Reflh

**Sino hacer**

$Reflh(fil, col, ban) = Refl(fil, col, ban)$

**Fin**

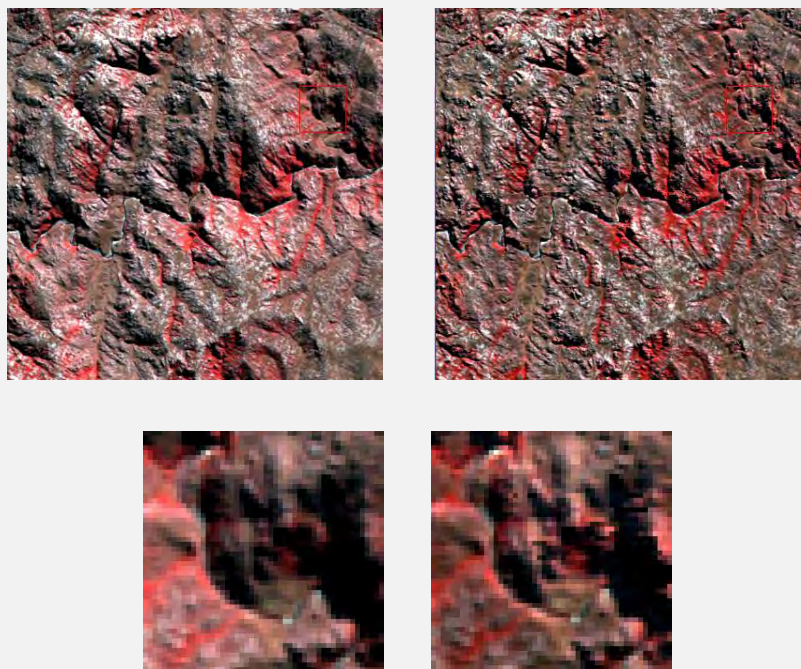
**Fin**

**Fin**

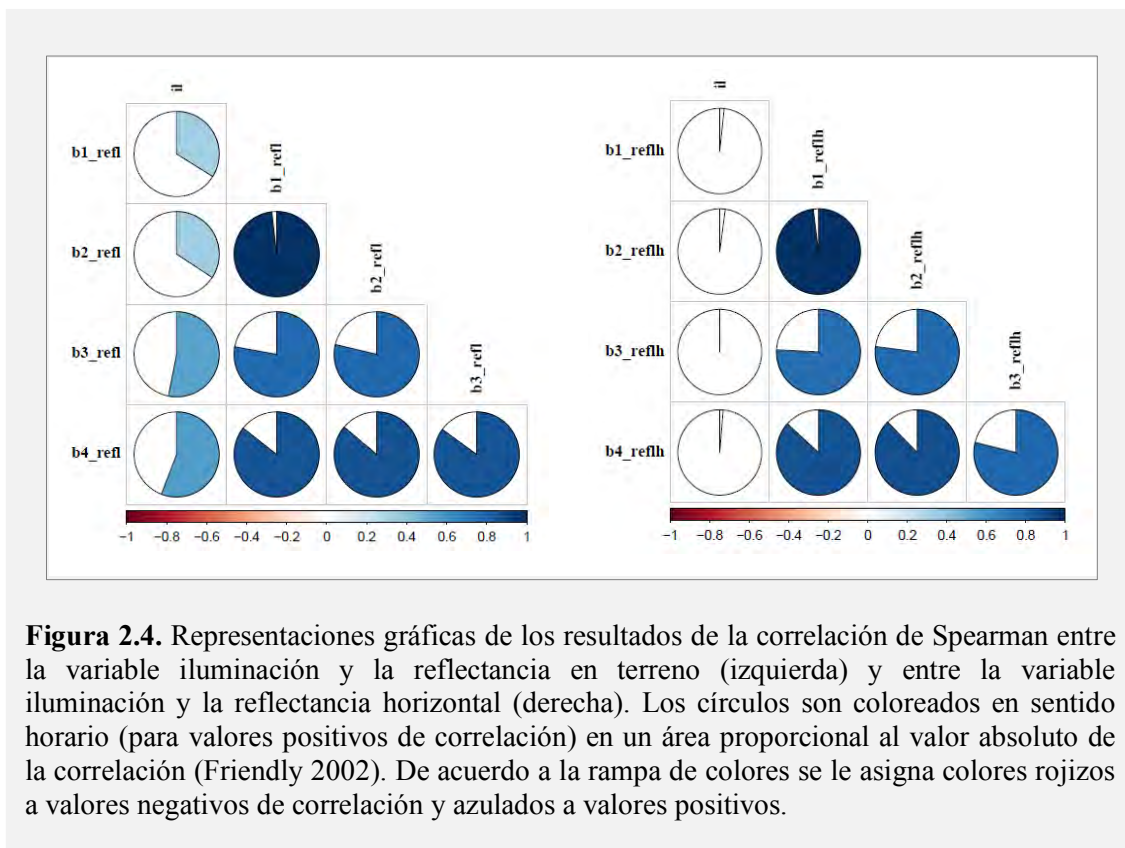
Escribir  $Reflh$

**FIN**

Aproximadamente un 2% de los datos originales quedaron sin modificar debido a que no superaron el umbral establecido. Se compararon visualmente diferentes sectores de la imagen original y la corregida (en figura 2.3 se muestra una zona), notándose la pérdida de la impresión tridimensional en la imagen de reflectancia horizontal. Por otro lado, se realizaron en el software R correlaciones de Spearman entre las variables iluminación, reflectancia en terreno y reflectancia horizontal, determinando que el método de corrección de sombras consiguió la independencia que se espera entre los valores de reflectancia horizontal y el efecto de la topografía representado mediante la iluminación solar local (figura 2.4). La correlación de Spearman mide el grado de asociación lineal que existe entre variables continuas con distribución de datos no paramétrica (no gaussiana), donde valores cercanos a cero (hasta  $\pm 0.25$ ) indican que no hay asociación entre las variables, entre 0.26 y 0.5 indican asociación directa débil, entre 0.51 y 0.75 indican asociación directa moderada y mayores a 0.75 indican una fuerte asociación directa (Martínez Ortega *et al.* 2009). Se realizó este tipo de correlación, en lugar de su alternativa paramétrica de Pearson, porque al realizar la prueba de normalidad a cada una de las variables mediante el test Lilliefors (test de Kolmogorov-Smirnov modificado aplicable para gran cantidad de datos) se determinó que existen evidencias suficientes para rechazar la hipótesis de que los datos presentan una distribución gaussiana ( $p < 0.05$  en todos los casos).



**Figura 2.3.** Comparación de imágenes en reflectancia en terreno y en reflectancia horizontal. A la izquierda se muestra la imagen original con su correspondiente zoom en un área con sombra producto de la topografía. A la derecha la imagen corregida, observándose la zona de sombras (zoom) más iluminada en comparación a la imagen original. Combinación RGB: NIR, R, G (321).



**Figura 2.4.** Representaciones gráficas de los resultados de la correlación de Spearman entre la variable iluminación y la reflectancia en terreno (izquierda) y entre la variable iluminación y la reflectancia horizontal (derecha). Los círculos son coloreados en sentido horario (para valores positivos de correlación) en un área proporcional al valor absoluto de la correlación (Friendly 2002). De acuerdo a la rampa de colores se le asigna colores rojizos a valores negativos de correlación y azulados a valores positivos.

En la figura 2.4 se observa una correlación positiva entre la iluminación y la reflectancia en terreno con una asociación directa moderada, mientras que no existe una asociación entre la iluminación y la reflectancia horizontal. La pequeña variación que se observa en la relación entre las diferentes bandas espectrales se debe a que la transformación que se le aplica a la reflectancia no es lineal.

### 2.2.3.2. Selección de bandas auxiliares

#### *Variables de textura*

Las características texturales de una imagen dan información sobre la distribución espacial de las variaciones de tonos dentro de una banda espectral. La textura es una propiedad intrínseca de las superficies y puede ser fina, gruesa, lisa, rugosa, etc. La información de textura está contenida en la relación espacial que cada píxel tiene con sus vecinos en un entorno llamado ventana, y una de las maneras de obtenerse es a partir del cálculo de la matriz de co-ocurrencia. Los valores de la matriz de co-ocurrencia reflejan la periodicidad con la cual un píxel de valor  $x$  y otro píxel de valor  $y$  ligados a una cierta relación espacial, están presentes en un subespacio de la imagen dentro de una ventana móvil. Para la construcción de esta matriz es necesario fijar tres parámetros: el número de niveles de grises, la dimensión de la ventana móvil de observación, y el vector de dispersión espacial (dirección y valor). Dependiendo de la dirección en la cual los píxeles se confrontarán dentro de la ventana, la matriz de co-

ocurrencia puede ser horizontal, vertical o diagonal. El valor del vector de dispersión hace referencia a la distancia que existe entre la pareja de píxeles, siendo contiguos cuando se lo define como 1. Para cada píxel de la imagen original se construye una ventana entorno a él, y se realizan todas las confrontaciones posibles con los píxeles incluidos en la ventana según la dirección pre-establecida. Una vez definida la matriz, sus elementos se fijan inicialmente en cero y sucesivamente incrementan de a una unidad todas las veces que la pareja de píxeles  $(x,y)$  está presente alrededor de cualquier píxel que se está considerando, siendo así una medida estadística de la ocurrencia de distintas parejas de píxeles.

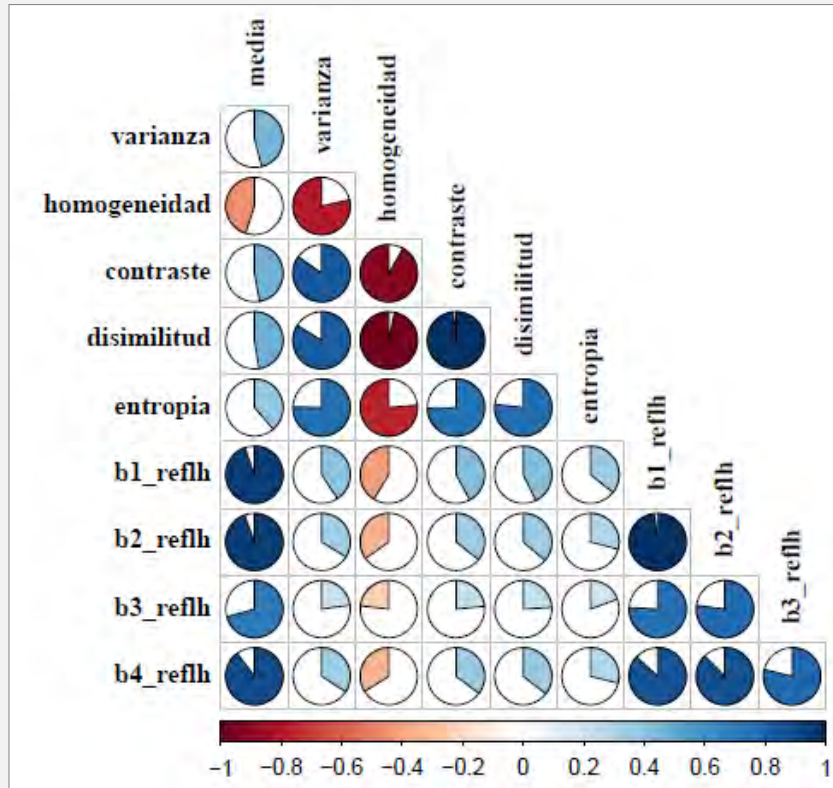
Una vez obtenida la matriz de co-ocurrencia se pueden extraer las características texturales efectuando diferentes cálculos sobre los elementos de la matriz. Dentro de estas características, se pueden calcular la entropía, contraste, media, varianza, correlación, momento segundo, diferencia y homogeneidad. La *entropía* mide el desorden de una imagen. Cuando una imagen no es texturalmente uniforme la entropía es poco elevada y la imagen es oscura. En cambio, si todos los píxeles tienen valores similares de tonos de gris la entropía es máxima y la imagen es blanca. El *contraste* mide la cantidad de variación local presente en la imagen. Se observan manchas blancas cuando hay grandes variaciones locales del tono de gris de los píxeles. La *correlación* mide la dependencia lineal entre los tonos de gris de la imagen. Un alto valor de correlación implica una elevada relación entre el valor de un píxel y su vecino. En la *media* el valor del píxel se corresponde al valor medio de la matriz de co-ocurrencia relativa. La imagen resultante es similar a la original, porque cada píxel es la media de la información que le está alrededor. La *varianza* representa una medida de heterogeneidad y está estrechamente relacionada al desvío estándar. Muestra valores altos (blancos) si existe una elevada variación en los tonos de gris dentro de una pequeña porción de la imagen. En la medida de *disimilitud*, sectores blancos representan zonas donde los píxeles sufren variaciones y por lo tanto son diferentes, mientras que sectores oscuros indican zonas donde los píxeles son similares entre ellos. El *segundo momento* es una medida de la homogeneidad. Las zonas donde los valores de los tonos de gris son uniformes en la imagen original, se muestran con una tonalidad de gris, mientras los píxeles blancos se corresponden con saltos de tono. La *homogeneidad* representa la transición de tonos de gris. En una imagen homogénea hay poca variación en los tonos de gris y la imagen resulta oscura. Donde hay saltos de tonos, la imagen resulta blanca como en el caso del segundo momento (Trianni 2006).

Se calcularon distintas variables de textura mediante medición de co-ocurrencia a partir de la banda espectral 1 de SPOT, configurando 64 niveles de grises y empleando un sentido de confrontación horizontal en la selección de la pareja de píxeles, un valor del vector de dispersión igual a uno y una ventana móvil de 3 x 3. No se realizó el cálculo sobre todas las bandas espectrales para no trabajar con información repetitiva. Se realizó un análisis de correlación entre las distintas medidas de co-ocurrencia obtenidas para seleccionar solo las variables no asociadas entre sí, previa prueba de normalidad para determinar el tipo de correlación a realizar (figura 2.5). Para todas las variables generadas se obtuvo un valor- $p < 0.05$  al realizar la prueba Lilliefors para evaluar el supuesto de normalidad de las mismas, razón por la que se realizó la correlación no paramétrica de Spearman.

El grado de correlación entre las distintas variables de textura fue elevado en todos los casos, excepto para la media. Sin embargo, si bien la media podría haber sido



seleccionada conjuntamente con otra medida de co-ocurrencia, no se la tuvo en cuenta por presentar un alto valor de correlación con las bandas espectrales, decidiendo por lo tanto considerar solo una banda de textura para incluir en pruebas de clasificación. Se eligió trabajar con la variable entropía por ser la que menor asociación lineal presentó con las bandas espectrales (figura 2.5).

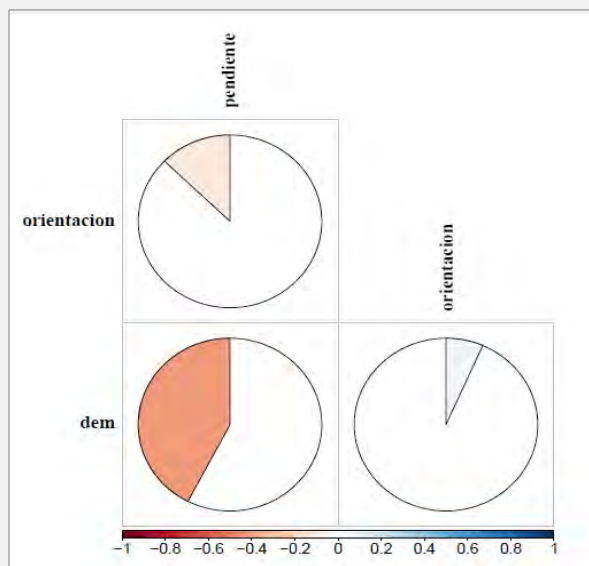


**Figura 2.5.** Representaciones gráficas de los resultados de la correlación de Spearman entre las distintas variables de textura. Los círculos son coloreados en un área proporcional al valor absoluto de la correlación, en sentido horario para valores positivos de correlación y antihorario para negativos (Friendly 2002). De acuerdo a la rampa de colores se le asigna colores rojizos a valores negativos de correlación y azulados a valores positivos.

### *Variables topográficas*

Diferentes estudios han demostrado la influencia que tienen las características topográficas sobre la distribución espacial de la vegetación (Jin *et al.* 2008, Qian *et al.* 2011, Bingwen *et al.* 2013). Por ello, esperando que variables como la elevación, la pendiente y la orientación ayuden en la discriminación de las especies en consideración y que, por lo tanto, influyan positivamente en la precisión de la clasificación de cobertura del suelo, se analizó la posibilidad de incluirlas en el proceso de clasificación mediante análisis del Rho de Spearman (Test Lilliefors  $p < 0.05$ ). Dado que los resultados obtenidos no mostraron una asociación fuerte entre estas variables, se decidió considerarlas como bandas auxiliares (figura 2.6).





**Figura 2.6.** Representaciones gráficas de los resultados de la correlación de Spearman entre el modelo de elevación digital (DEM) y sus variables derivadas, pendiente y orientación. Los círculos son coloreados en un área proporcional al valor absoluto de la correlación, en sentido horario para valores positivos de correlación y antihorario para negativos (Friendly 2002). De acuerdo a la rampa de colores se le asigna colores rojizos a valores negativos de correlación y azulados a valores positivos.

### *Índices de vegetación*

Los índices de vegetación calculados a partir de imágenes satelitales resaltan las características de reflectividad de la misma mediante la diferencia entre las reflectividades de distintas bandas espectrales, disminuyendo la contribución espectral de otras coberturas como el suelo o el agua. Debido a que se basan en la actividad clorofílica de la vegetación se pueden establecer comportamientos espectrales característicos que no sólo permiten estimar el estado de la vegetación o su biomasa, sino que también ayudan a diferenciar la cubierta vegetal de otro tipo de cubiertas, como suelo o agua, o incluso discriminar distintas cubiertas vegetales entre sí (Chuvieco 2010).

Se calcularon tres índices de vegetación que utilizan las bandas del Rojo (R), en donde la reflectividad es baja, y del infrarrojo cercano (NIR), donde la reflectividad es alta. Estos índices fueron el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), el RDVI (Renormalized Difference Vegetation Index) y el SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index).

El índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) es uno de los más empleados, varía entre -1 y 1, y sus valores se asocian a cubiertas vegetales cuando son superiores a 0.2. Debido a que su cálculo se ve afectado por el aporte de la reflectividad del suelo, es más representativo de la realidad en zonas con vegetación densa (Tucker 1979).

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

Para minimizar el efecto del suelo, Roujean & Breon (1995) proponen un nuevo índice, el RDVI o índice de vegetación de diferencia renormalizada. Este índice se basa en las ventajas del NDVI, que se ve poco afectado por las propiedades ópticas y la orientación de las hojas siendo un buen estimador ante cobertura vegetal abundante, y en las del DVI (Difference Vegetation Index), el cual se ve menos afectado por la reflectividad de fondo, siendo por lo tanto preferido ante cobertura vegetal reducida. Varía entre -1 y 1 siempre que se trabaje sobre reflectancia (variación entre 0 y 1).

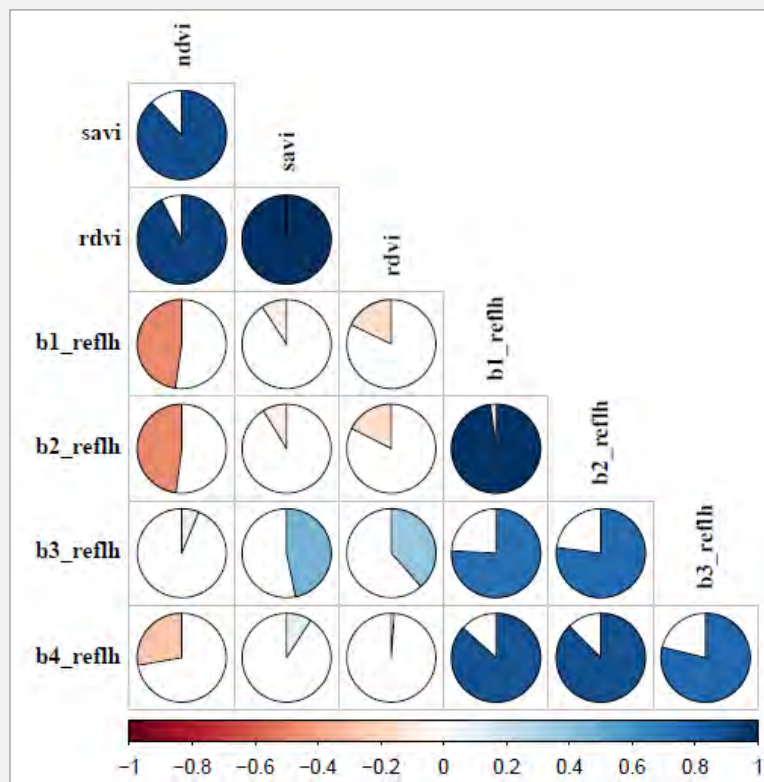
$$RDVI = \frac{NIR - R}{\sqrt{(NIR + R)}}$$

Por su parte, el índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) incorpora en su cálculo un factor de ajuste  $L$  para contrarrestar el aporte del suelo. La constante  $L$  varía entre 0 y 1 y representa el punto en el que la vegetación converge con la línea de suelo. Valores de  $L$  próximos a 1 son recomendados para densidades bajas de vegetación, alrededor de los 0.5 para densidades intermedias y próximos a 0.25 para altas densidades, observando que valores de  $L=0.5$  arrojan mejores resultados que el NDVI ante cualquier densidad y siendo por lo tanto apropiado cuando se desconoce la vegetación presente en la zona de estudio (Huete 1988). Al igual que el NDVI, este índice varía entre -1 y 1.

$$SAVI = \left[ \frac{NIR - R}{NIR + R + L} \right] (1 + L)$$

El SAVI fue calculado con un valor de  $L=0.5$ .

Se correlacionaron las tres bandas artificiales, y debido a que la asociación entre ellas fue elevada sólo se seleccionó para trabajar el índice RDVI por ser el que menores valores de correlación mostró en relación a las bandas espectrales SPOT (figura 2.7).



**Figura 2.7.** Representaciones gráficas de los resultados de la correlación de Spearman entre los distintos índices de vegetación y entre éstos y las bandas espectrales. Los círculos son coloreados en un área proporcional al valor absoluto de la correlación, en sentido horario para valores positivos de correlación y antihorario para negativos (Friendly 2002). De acuerdo a la rampa de colores se le asigna colores rojizos a valores negativos de correlación y azulados a valores positivos.

### 2.2.3.3. Selección de las regiones de interés

Se identificaron siete clases de interés para realizar la clasificación del tipo de cobertura presente en el PNQC y RN: 1-Matorral/Bosque de Tabaquillos (*Polylepis australis*); 2-Pajonal fino (*Festuca spp.*, *Deyeuxia hieronymi*); 3-Pajonal grueso (*Poa stuckertii*); 4-Césped; 5-Pajonal con afloramiento (*Sorghastrum pellitum* asociado a roca); 6-Roca/suelo desnudo; 7-Cuerpos de agua. Se eligió trabajar con estas clases por tratarse de las principales coberturas en las que el comportamiento del fuego varía, de acuerdo a comunicación personal con guardaparques del lugar (tabla 2.2).

La clase “Cuerpos de agua” no fue obtenida mediante clasificación digital de la imagen, sino que se definió a partir del vector de ríos principales y poligonización de lagunas sobre la imagen espectral. El procedimiento consistió en exportar el archivo vectorial de ríos a formato *.roi* y unificarlo con las regiones correspondientes a las lagunas, creando luego una sola clase a partir de éstas. A su vez, esta información también fue utilizada en la construcción de una máscara (imagen binaria asignando 0 a los píxeles correspondientes al agua y 1 al resto de la imagen) para ser incluida durante la clasificación y evitar la asignación de otra clase de interés a estas zonas.

**Tabla 2.2.** Clasificación simplificada de las coberturas presentes en la Reserva Natural y Parque Nacional Quebrada del Condorito, definiendo siete clases de interés de acuerdo a las principales variaciones en el comportamiento del fuego. A la izquierda, una breve descripción de cada clase. A la derecha, fotografía representativa de la clase.

---

### CLASES DE INTERÉS DE RN Y PNQC

---

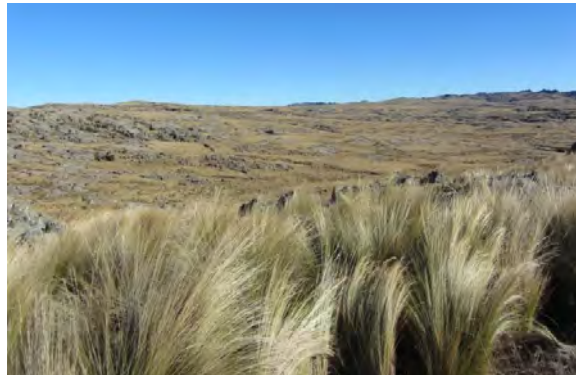
#### 1-Matorral/Bosque de Tabaquillos

Formación de matorral y/o bosque de *Polylepis australis* (de 1-1,5 m de altura), mezclados con pajonales y roca.



#### 2-Pajonal fino

Pastizal predominantemente de *Festuca spp.* y *Deyeuxia hieronymi*, de entre 0.6 a 1.3 m de altura. Se estiman 14-15 t/ha. Generalmente con continuidad horizontal alta.



#### 3-Pajonal grueso

Pastizal dominado por *Poa stuckertii*, de aproximadamente 1-1.5 m. Se estiman 30 t/ha. Generalmente con continuidad horizontal alta.



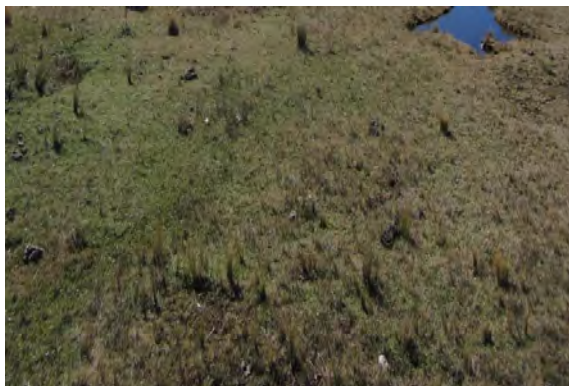


Continuación Tabla 2.2

---

### 4-Césped

Predominan *Alchemilla pinnata*,  
*Carex sp.* y *Muhlenbergia peruviana*.  
Altura menor a 0.10 m. Carga menor  
a 1 t/ha. Generalmente con  
continuidad horizontal alta.



### 5-Pajonal con afloramiento

Pastizal de *Sorghastrum pellitum*, de  
aproximadamente 0.2 m, asociado a  
pedregal. Se calculan 5 t/ha.  
Generalmente con continuidad  
horizontal baja.



### 6-Roca/suelo desnudo

Incluye rocas y caminos o  
explanadas desprovistos de  
vegetación.



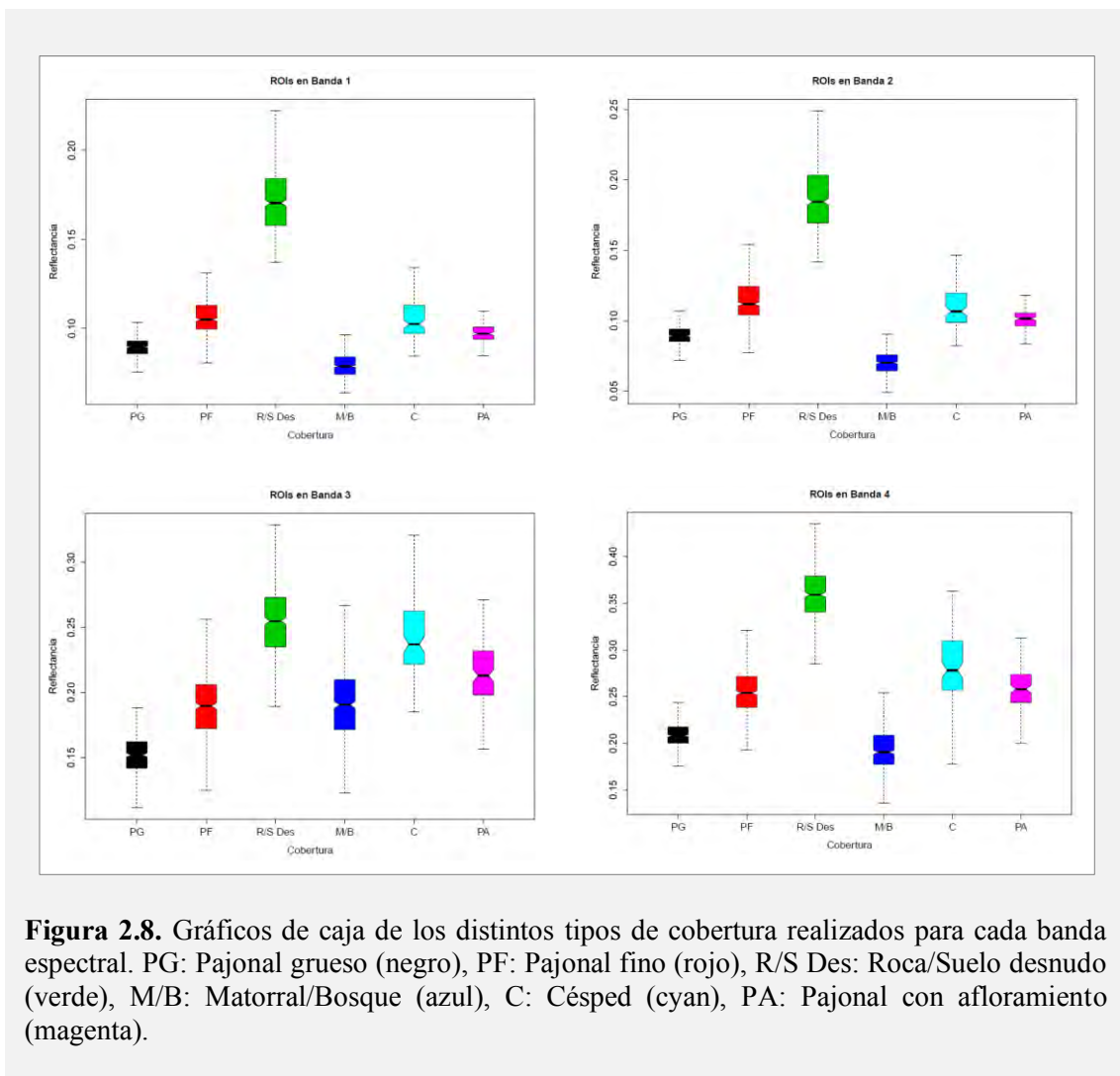
### 7-Cuerpos de agua

Ríos principales y lagunas.



Las regiones de interés (ROIs) tomadas sobre la imagen comprendieron entre 513-523 píxeles para las clases que más representación mostraron en la imagen (clases 1, 2, 3 y 6) y entre 103-123 píxeles para las restantes (clases 4 y 5), cumpliendo así el número de muestras de entrenamiento mínimo necesario por clase, calculado como  $10N$ , siendo  $N$  el número de bandas empleadas (Richards 1993). Las regiones de validación presentaron entre 789-1044 píxeles para las clases 1, 2, 3 y 6, y entre 233-256 para las clases 4 y 5.

El método para seleccionar las regiones de entrenamiento y validación sobre la imagen se basó en la localización en Google Earth de puntos de muestreo tomados a campo mediante GPS y la determinación, a través de análisis visual, del patrón de textura y coloración relacionado a cada clase, el cual fue asociado con lo observado en la imagen SPOT, trabajando sobre la combinación RGB 321. Se complementó además con fotografías de otros puntos que no fueron visitados, pero que contaron con referencia geográfica de los sitios donde fueron tomadas.



Se realizó una evaluación de la separabilidad de las ROIs mediante gráficos de caja para cada banda, observando que solo entre las regiones de entrenamiento correspondientes a

las clases “Pajonal fino” y “Matorral/Bosque” para la banda 3 la confusión espectral fue alta (figura 2.8). No se utilizaron medidas clásicas de distancia como las de Jeffries-Matusita, Divergencia Transformada o Bhattacharyya por ser medidas que asumen distribución gaussiana de los datos. Los gráficos de caja son de utilidad estadística porque trabajan con la mediana y el rango intercuartílico, estimadores de posición y dispersión más robustos que la media y el desvío estándar, ya que no son afectados por valores extremos. La “cintura” de la caja representa el intervalo de confianza, es decir, el intervalo dentro del cual se estima que estará contenida la mediana con una probabilidad de acierto del 95%. En las bandas 1, 2 y 4, dado que las cinturas no se superponen, se puede decir que hay evidencias suficientes de que las medianas de las distintas muestras difieren significativamente entre sí.

### 2.2.3.4. Métodos de clasificación

#### *Redes Neuronales*

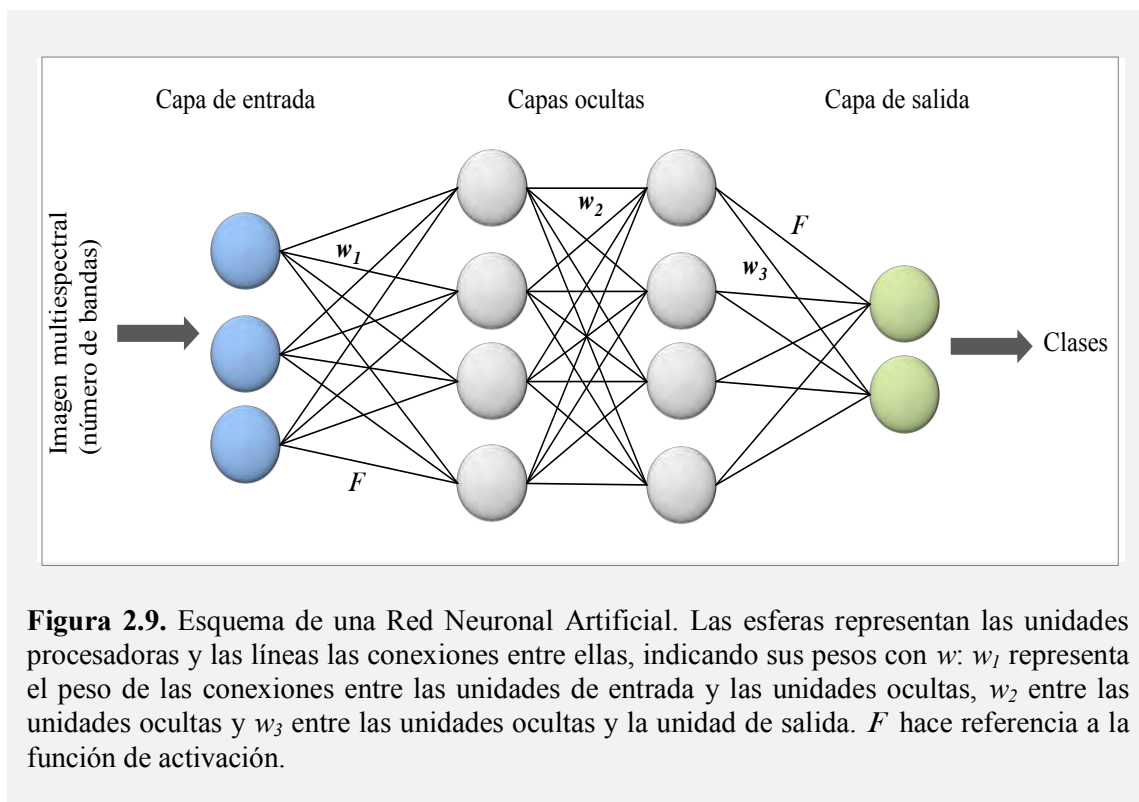
El clasificador Redes Neuronales o ANN (de Artificial Neural Network) está inspirado en el funcionamiento del cerebro humano. Se basa en el entrenamiento de la red neuronal artificial para que en función de un conjunto de datos de entrada se obtenga el conjunto de datos de salida deseado. El aprendizaje de la red es supervisado cuando se establece una relación entre la salida deseada y una entrada determinada, y es no supervisado cuando la salida es evaluada sin una guía relacionada con la entrada.

Una red neuronal artificial consiste de un conjunto de unidades procesadoras (neuronas o células), un estado de activación para cada unidad (lo que equivale a la salida de la unidad), conexiones entre las unidades (generalmente definidas con un peso que determina el efecto que la señal de una unidad tiene sobre otra), una regla de propagación (que determina la fuente efectiva de una unidad a partir de sus fuentes externas), una función de activación, una fuente externa (sesgo) para cada unidad, un método para conseguir la información (regla de aprendizaje) y un ambiente dentro del cual el sistema debe operar (figura 2.9).

Cada *unidad procesadora* recibe una contribución de sus vecinos o de fuentes externas y utiliza esta información para computar una señal de salida que se propagará a otras unidades, teniendo en cuenta el ajuste de los pesos de las conexiones neuronales. Se distinguen tres tipos de unidades: unidades de entrada, que reciben información de fuera de la red neuronal, unidades de salida, que envían información fuera de la red neuronal, y unidades ocultas, en donde las señales de entrada y salida permanecen dentro de la red neuronal. Las *conexiones entre las unidades* llevan a que la información total que recibe una unidad sea una suma ponderada de la información de salida de cada unidad con la que se conecta, más un sesgo. Si la contribución es positiva (dado por un peso  $w$  positivo) se considera excitación y de lo contrario ( $-w$ ), inhibición. En algunos casos se emplean reglas más complejas para la combinación de los datos de entrada, definiendo a estas unidades con una *regla de propagación*.

La *función de activación* toma el total de la información de entrada y la activación actual y genera un nuevo valor de activación de la unidad. Esta función puede ser lineal o utilizar algún tipo de umbral. La función puede tener un umbral limitante bien

marcado, como una función signo, o puede tener un umbral limitante suave, como por ejemplo una función sigmoidea o hiperbólica. A su vez, existen diferentes *topologías de redes neuronales* en función del patrón de conectividad entre las unidades. Por ejemplo, las redes hacia delante son aquellas donde el flujo de datos es estrictamente hacia delante y no existen conexiones desde la salida de unidades hacia la entrada de unidades dentro de una misma capa o en capas previas, mientras que en las redes de retroalimentación las señales actúan en ambas direcciones. En las redes hacia delante, una de las *reglas de aprendizaje* ampliamente usada es la de retro-propagación, donde los errores de las unidades de capas ocultas son determinados mediante retro-propagación de errores de las unidades de la capa de salida, generando un gradiente descendiente del error total. Los valores de activación de los datos de entrada se propagan hacia delante en la red para calcular los valores de cada unidad de salida que luego son comparados con el valor deseado, resultando un error para cada unidad. Una segunda fase involucra un paso hacia atrás en la red en donde el error es pasado a cada unidad en la red y se calculan los cambios de pesos apropiados. Se debe tratar de llevar el error a cero, por lo que se van cambiando las conexiones entre unidades de manera tal que el error tienda a cero para ese patrón en particular (Kröse & van der Smagt, 1996, Liwa 2006).



**Figura 2.9.** Esquema de una Red Neuronal Artificial. Las esferas representan las unidades procesadoras y las líneas las conexiones entre ellas, indicando sus pesos con  $w$ :  $w_1$  representa el peso de las conexiones entre las unidades de entrada y las unidades ocultas,  $w_2$  entre las unidades ocultas y  $w_3$  entre las unidades ocultas y la unidad de salida.  $F$  hace referencia a la función de activación.

Una de las ventajas de las Redes Neuronales es que permiten clasificar variables que presentan una distribución no paramétrica de sus datos, pero tiene la limitación de que la aproximación al error se ve influenciada por el tamaño de las muestras de aprendizaje.



### *Máquina de Soporte Vectorial*

La Máquina de Soporte Vectorial o SVM (de Support Vector Machine) es un algoritmo de aprendizaje supervisado que permite la *separación óptima* de un conjunto de datos, asignando cada uno a una clase de interés o a otra en función de las muestras de entrenamiento ingresadas al clasificador. No trabaja bajo supuestos sobre la distribución de los datos, y si bien es sensible a muestras desbalanceadas, no lo es al tamaño de las mismas, trabajando exitosamente con una cantidad y calidad limitada de información. Esta separación óptima la consigue definiendo un límite de decisión que permite separar los puntos correspondientes a un patrón de entrenamiento del de los correspondientes a otro patrón, con una minimización del error. Este límite es conocido como *hiperplano*, seleccionando entre todos los posibles a aquél que tenga el máximo margen de distancia a los puntos más cercanos, aumentando así la distancia entre los elementos de las distintas categorías. Por lo tanto, en la definición del hiperplano no son utilizados todos los puntos pertenecientes a las clases o patrones de entrenamiento sino sólo el subconjunto de puntos que se encuentra en el margen óptimo, estos son los llamados *vectores de soporte* (Mountrakis *et al.* 2011).

El SVM es un clasificador lineal binario, basado en una función que consiste en el producto escalar de dos vectores ( $\mathbf{w}$ ,  $\mathbf{x}$ ) para encontrar un límite de decisión lineal que divide al plano en dos conjuntos:

$$\mathbf{y} = f(\mathbf{x}) = (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b \qquad \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} = \sum_i w_i x_i$$

Los puntos tales que  $(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b = 0$  definen el hiperplano (figura 2.10).

Donde,

$\mathbf{w}$  es el vector normal a un hiperplano. Llamado vector peso, se emplea en el cálculo del margen de distancia.

$\mathbf{x}$  es el vector patrón de entrenamiento.

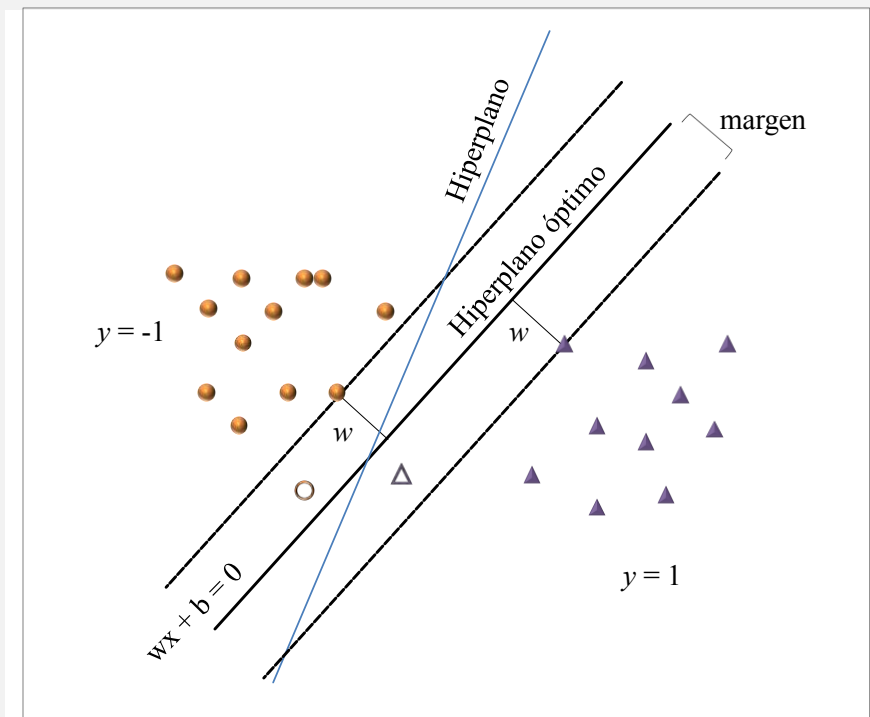
$\mathbf{y}$  es el vector de etiquetas asociado al vector patrón de entrenamiento, asumiendo dos posibles categorías para cada elemento del patrón:  $y=1$  si  $(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b > 0$  ;  $y=-1$  si  $(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b < 0$

$b$  es el sesgo o desvío. Traslada al hiperplano fuera del origen del sistema de coordenadas.

Cuando se trabaja con datos reales, resulta difícil la separación lineal de las diferentes clases de interés con una alta precisión, ya que suelen superponerse entre sí. Por ello, se introducen en el SVM distintos métodos para su optimización, como el de los *márgenes blandos* o el de las *funciones kernel* o *núcleo*.

La técnica de los márgenes blandos se basa en permitir cierta flexibilidad mediante la incorporación del término  $C \sum \xi_i$  en el cálculo del margen óptimo, siendo una medida de los puntos mal clasificados permitidos y haciendo menos sensible el algoritmo a la presencia de datos extremos en las muestras de entrenamiento. La variable de relajación  $\xi$  penaliza los errores de clasificación y los errores de margen o clasificación sub-óptima, midiendo la distancia a los puntos que se encuentran del lado equivocado del hiperplano (figura 2.10). La *constante C* determina la importancia relativa de maximizar el margen y minimizar la relajación, también llamada *costo* o *parámetro de*

*penalización*. Valores pequeños de  $C$  tienden a maximizar la distancia mínima permitida a los vectores soporte, aumentando no solo el margen de distancia óptimo sino también el número de puntos mal clasificados (Pontil & Verri 1998).



**Figura 2.10.** Representación del hiperplano de separación. Línea celeste representa un hiperplano posible, línea sólida negra el hiperplano óptimo. Con  $w$  se indica el vector peso. Líneas de puntos indican los márgenes blandos. Círculos y triángulos simbolizan clases distintas: los ubicados sobre líneas de puntos son los vectores de soporte y aquellos sin rellenar son los errores de margen.

El método de las funciones kernel solucionan el problema realizando una transformación a los datos y proyectando la información a un espacio de mayor dimensión, el *espacio de características*, donde aumenta la capacidad del aprendizaje lineal. El término *característica* en este contexto hace referencia a un atributo transformado, donde el *atributo* es un patrón de entrenamiento o variable predictora. Existen distintos tipos de funciones kernel (Pontil & Verri 1998, Müller *et al.* 2001, Huson 2007, Ben-Hur & Weston 2010), y entre las más comunes podemos mencionar:

*Función Polinomial*

$$K(x, y) = (\gamma xy + b)^d$$

*Función de Base Radial Gaussiana (RBF)*

$$K(x, y) = \exp(-\gamma \|x - y\|^2)$$

*Función Sigmoidea:*

$$K(x, y) = \tanh(\gamma xy + b)$$

Donde,

$K$  es el producto escalar en el espacio de características.

$d$  es el grado del polinomio en la función polinomial. Un mayor grado permite un límite de decisión más flexible (aumenta la curvatura del hiperplano).

$b$  es el sesgo o desvío en las funciones polinomial y sigmoidea.

$\gamma$  se refiere al área de influencia de los vectores soporte, valores elevados usualmente involucran mayor número de vectores soporte. Al igual que el parámetro  $d$ , determina la flexibilidad del límite de decisión controlando la forma del mismo. Valores demasiados grandes de los parámetros  $\gamma$  o  $d$  pueden llevar a un sobre-entrenamiento.

Como el SVM se basa en separar el conjunto de datos en sólo dos categorías posibles, existen dos métodos para resolver el problema de contar con multiclases. La clasificación *una-contra-todas*, donde se construye  $k$  hiperplanos (siendo  $k$  el número de clases) discriminando entre una clase y las  $k-1$  clases restantes, y el método de *una-contra-otra*, que consiste en comparar pares de clases entre sí construyendo  $k(k-1)/2$  hiperplanos (Fukuda & Hirose 2001, Hao *et al.* 2006).

## 2.3. Resultados

### 2.3.1. Proceso de clasificación

En primer lugar se compararon distintas configuraciones paramétricas para cada clasificador utilizando en la clasificación sólo las bandas espectrales. El algoritmo *Support Vector Machine* de ENVI realiza las clasificaciones multiclase con el método *una-contra-otra* y permite seleccionar las funciones Lineal, Polinomial, RBF y Sigmoidea, pudiendo configurar los parámetros  $C$ ,  $\gamma$ ,  $b$  y  $d$ . Por su parte, el algoritmo *Neural Net* emplea la regla de aprendizaje de retropropagación y permite especificar la función de activación, un umbral de entrenamiento (se refiere al peso de las conexiones entre neuronas), la tasa de entrenamiento (determina la magnitud del ajuste de los pesos, es una constante de proporcionalidad), el momento (hace que el cambio del peso sea dependiente del cambio de peso anterior y permite aumentar la tasa de entrenamiento sin que se generen oscilaciones), el RMS de salida (error valor cuadrático medio al cual el entrenamiento es forzado a detenerse, es la diferencia entre el valor de salida deseado y el valor actual de salida para las muestras de entrenamiento), el número de capas ocultas y el número de iteraciones.

La elección de la configuración más apropiada entre las especificadas se basó en el cálculo del índice o coeficiente kappa complementando con comparación visual de la imagen clasificada junto con la imagen SPOT y Google Earth. El índice kappa es una medida de concordancia entre lo observado (regiones de validación) y lo esperado (píxeles clasificados), que da cuenta de la precisión de la clasificación. Es  $k=1$  cuando la precisión es máxima,  $k=0$  cuando la concordancia observada es debida al azar y  $k<0$  cuando es menor a la esperada por azar, considerándose débil una concordancia entre 0.21-0.40, moderada entre 0.41-0.60, buena entre 0.61-0.80 y muy buena entre 0.81-1

(Landis & Koch 1977). En el análisis visual se dio prioridad a que las clases “Roca/Suelo desnudo” y “Matorral/Bosque” estuvieran clasificadas correctamente, la primera por el rol importante que cumple como barrera cortafuego en una simulación de incendios, y la segunda por su valor ecológico y de conservación.

En función de este análisis se seleccionó la configuración 1 tanto para ANN como para SVM (tabla 2.3).

**Tabla 2.3.** Valores del índice kappa arrojados al aplicar distintas configuraciones de los parámetros asociados a los clasificadores Redes Neuronales (ANN) y Máquina de Soporte Vectorial (SVM) al realizar clasificaciones de las bandas SPOT. Para ANN se empleó la función de activación logística en todos los casos.

Configuración		1	2	3	4	5	6
ANN	Umbral de entrenamiento	0.9	0.6	0.3	0.9	0.9	0.9
	Tasa de entrenam.	0.2	0.2	0.2	0.6	0.2	0.2
	Momento	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
	Capas ocultas	1	1	1	1	2	0.1
	Iteraciones	1000	1000	1000	1000	1000	100
	RMS de salida *	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	<b>Kappa</b>	0.866	0.877	0.878	0.866	0.837	0.841
SVM	Función kernel	RBF	RBF	RBF	RBF	Polin	Sigm
	Gamma	1	1	0.5	0.25	0.25	0.25
	C	1000	100	1000	1000	1000	1000
	d	-	-	-	-	3	-
	b	-	-	-	-	1	1
	<b>Kappa</b>	0.893	0.890	0.893	0.893	0.892	0.889

\*En todos los casos el proceso se detuvo antes de alcanzar el error indicado, variando el RMS final entre 0.38 y 0.5.

A posterior, se procedió a realizar las clasificaciones agregando de a una a la vez cada banda auxiliar a las cuatro bandas espectrales y analizando los resultados a través del índice kappa. Luego, aquellas variables que aumentaron el valor del kappa, se adicionaron conjuntamente a las bandas espectrales y se evaluó el índice de concordancia nuevamente. Las bandas auxiliares fueron normalizadas entre 0 y 1 para trabajar con el mismo rango de valores en todas las bandas, evitando que el clasificador invierta más tiempo en aprender sobre una variable que sobre otra (Liwa 2006), ya que se observó que la precisión de la clasificación se ve disminuida al no hacerlo.

Los resultados correspondientes a las clasificaciones con ambos algoritmos se muestran en la tabla 2.4. En función de éstos, se decidió trabajar con la imagen clasificada mediante SVM a partir de las bandas espectrales con inclusión de DEM y pendiente. La precisión del clasificador fue menor en las clases “Césped” y “Pajonal con afloramiento”, registrándose un rendimiento muy bueno del clasificador para el resto de las clases de interés (tabla 2.5).

**Tabla 2.4.** Valores de precisión e índice kappa obtenidos de imágenes clasificadas mediante Redes Neuronales (ANN) y Máquina de Soporte Vectorial (SVM) a partir de bandas SPOT y con inclusión de bandas auxiliares.

	Imagen	Precisión Total %	Índice Kappa
ANN	Bandas espectrales	89.34	0.87
	Bandas espectrales + RDVI	87.39	0.84
	Bandas espectrales + Pendiente	89.88	0.87
	Bandas espectrales + Orientación	86.66	0.83
	Bandas espectrales + DEM	91.36	0.89
	Bandas espectrales + Entropía	89.58	0.87
	Bandas espectrales + Pendiente + DEM	91.98	0.90
SVM	Bandas espectrales	91.55	0.89
	Bandas espectrales + RDVI	91.36	0.89
	Bandas espectrales + Pendiente	92.03	0.90
	Bandas espectrales + Orientación	89.63	0.87
	Bandas espectrales + DEM	93.44	0.92
	Bandas espectrales + Entropía	91.27	0.89
	Bandas espectrales + Pendiente + DEM	94.20	0.92

El grado de confianza de los resultados obtenidos pudo analizarse en detalle mediante el cálculo de los errores de comisión y de omisión, y de la precisión del productor y del usuario. El error de comisión se refiere a los píxeles de otra clase que fueron etiquetados como nuestra clase de interés, mientras que el error de omisión corresponde a los píxeles de la clase de interés que erróneamente fueron etiquetados como de otra clase. La precisión del productor representa la probabilidad de que cierto tipo de cobertura sea clasificado como tal, y la precisión del usuario es la probabilidad de que un píxel etiquetado como de una determinada clase en el mapa, sea realmente esa clase (Richards 1993). Así por ejemplo, el 4.30% de píxeles clasificados como “Pajonal grueso” estarían correspondiendo en realidad a otra clase, y el 5.80 % de los píxeles que en realidad eran “Pajonal grueso” fueron asignados a otra clase. Podemos ver también, que el 93.79% de los píxeles correspondientes a la clase “Pajonal fino” fueron clasificados como tal y que el 89.81% de los píxeles clasificados como “Pajonal fino” fueron etiquetados correctamente (tabla 2.5).

Sólo el clasificador ANN permitió la inclusión de máscara, por lo que debió hacerse un recorte de las zonas correspondientes a cuerpos de agua en la imagen clasificada con SVM. Luego, para incluir la clase cuerpos de agua a la imagen clasificada, se transformó cada una de las clases obtenidas a *.roi* y a posterior se creó una nueva “imagen clasificada” a partir de estas regiones junto con la correspondiente a ríos y lagunas.

**Tabla 2.5.** Porcentaje de error de comisión y omisión y de precisión del productor y del usuario para la imagen clasificada mediante Máquina de Soporte Vectorial (SVM) a partir de bandas SPOT con inclusión de DEM y pendiente.

Clase	Error de Comisión	Error de Omisión	Precisión del Productor	Precisión del Usuario
Pajonal grueso	4.30	5.80	94.20	95.70
Pajonal fino	10.19	6.21	93.79	89.81
Pajonal con afloramiento	25.62	18.36	81.64	74.38
Césped	17.28	32.19	67.81	82.72
Matorral/Bosque	0.68	0.87	99.13	99.32
Roca/Suelo desnudo	1.44	1.44	98.56	98.56

Se realizó una comparación de la imagen clasificada con lo observado en Google Earth, para evaluar los resultados visualmente. Mediante esta revisión, se pudo determinar que en sectores donde la sombra topográfica no pudo ser corregida totalmente, existe una confusión entre las clases bosque y pajonal. En Apéndice B, figura 1, se muestran algunos ejemplos.

### 2.3.2. Proceso de post-clasificación

#### 2.3.2.1. Homogeneizado de clases

Se empleó la función Clump Classes de ENVI, ya que este módulo actúa como un filtro de paso bajo homogeneizando una imagen clasificada mediante la eliminación de píxeles aislados combinando clases adyacentes similares, sin tener problemas con la codificación de las clases, como sucedería al emplear un filtro de media. Se aplicó una ventana de 2x2 y de 3x3, observando mejores resultados para la primera configuración ya que al utilizar una ventana de 3x3 se exagera el homogeneizado de las clases, perdiendo así la ventaja de la resolución espacial de la imagen SPOT (figura 2.11). Por ello, se definió a la imagen obtenida mediante el empleo de la ventana 2x2 como el mapa de coberturas final (figura 2.12).



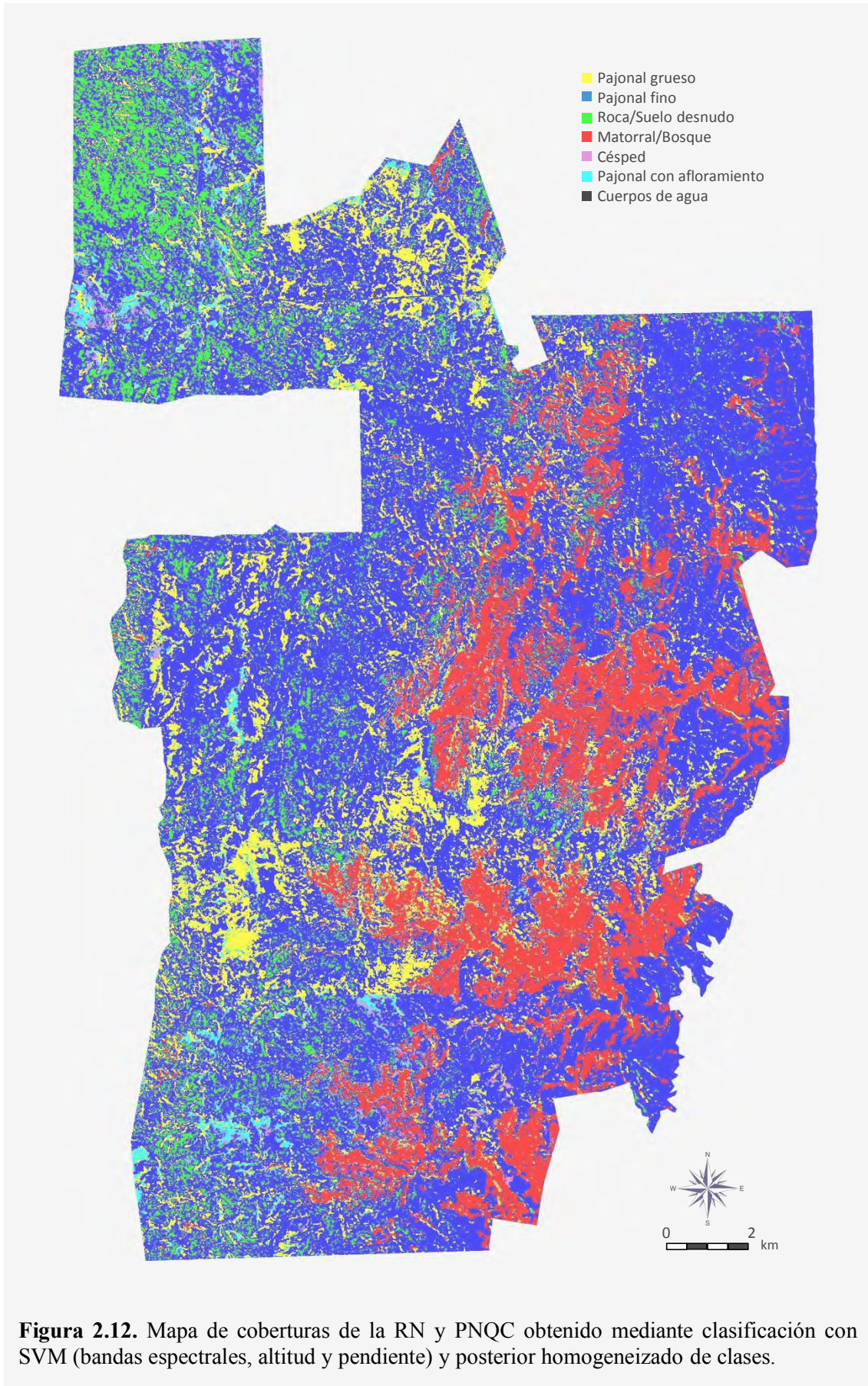


**Figura 2.11.** Comparación de un sector del PNQC (zoom) antes y después del homogeneizado de clases. De izquierda a derecha: imagen clasificada sin filtrar, imagen clasificada filtrada con ventana de 2x2 e imagen clasificada filtrada con ventana de 3x3.

### 2.3.2.2. Reducción de la clase no combustible

Debido a que la cobertura definida para cada píxel resulta del promediado de los tipos de coberturas presentes en terreno en un área de  $100 \text{ m}^2$ , podemos encontrarnos en el mapa de coberturas con áreas donde ciertas clases se vean sobre- o subestimadas de acuerdo a la proporción real en la que se encuentran. Una sobrestimación de la clase “Roca/Suelo desnudo” puede significar un impedimento para el avance de una simulación de incendios o incluso para su inicio, no pudiéndose realizar un análisis del posible comportamiento del fuego. Por otro lado, observaciones a campo indican que en función del viento y la altura de la vegetación, el fuego es capaz de “saltar” la roca cuando se encuentra rodeada de vegetación, no impidiéndose bajo estas circunstancias el avance del mismo. Sin embargo, si durante una simulación el perímetro de avance del fuego se encuentra con un área no combustible, el avance se detendrá o se desviará, modificándose la forma del área quemada resultante y alterando así lo que se vería en la realidad (ver Apéndice B, figura 2). Por estas razones, se diseñaron distintas metodologías para contrarrestar el efecto negativo de la sobrestimación o de la presencia de “islas” de clases no combustibles para ser aplicadas frente a escenarios particulares.

Estas metodologías son abordadas en este capítulo en lugar de hacerlo en el Capítulo 3 (el cual se refiere a los modelos de combustibles), porque consisten en una modificación del mapa de coberturas, ya sea por cambio en la extensión espacial de una o más clases de coberturas o por generación de subcategorías dentro de una clase que permitirá a posterior discriminar diferentes niveles de combustibilidad para una misma cobertura.



**Figura 2.12.** Mapa de coberturas de la RN y PNQC obtenido mediante clasificación con SVM (bandas espectrales, altitud y pendiente) y posterior homogeneizado de clases.

### *Aplicación de filtros morfológicos*

Los filtros morfológicos o filtros de morfología matemática, son el resultado de una o más operaciones de conjuntos, considerando a cada conjunto como las clases de una imagen binaria, y basado en el análisis de una forma geométrica predeterminada (forma y tamaño) conocida como elemento estructurante. La mayoría de los algoritmos morfológicos están basados en operaciones de *dilatación* y *erosión*. La dilatación aumenta el tamaño de los objetos mediante la adición de píxeles marginales, combinando dos conjuntos a través de una suma vectorial. En una imagen binaria, en la que se representa con color negro los datos de fondo y con blanco los datos de interés, un píxel negro pasaría a ser blanco si en su entorno (ventana móvil) existe al menos un píxel blanco. La erosión, en cambio, consiste en la disminución del tamaño del objeto a través de la eliminación de detalles irrelevantes, combinando dos conjuntos mediante una resta vectorial. En este caso, un píxel blanco pasaría a ser negro si existe en su entorno al menos un píxel negro. Normalmente estas operaciones se utilizan de a pares, llamándole operación de *apertura* cuando se aplica erosión y luego dilatación, y operación de *cierre* cuando se usa dilatación seguido de erosión (Ortiz Zamora 2002, Coca *et al.* 2008).

Para conseguir una disminución de las clases no combustibles se realizó un filtro de dilatación seguido de uno de erosión (operación de cierre), ambos con una ventana de 3x3, sobre cada clase combustible tal como se menciona en el pseudocódigo 2. En la figura 2.13 se aprecia cómo la utilización de los filtros morfológicos produce una reducción de la clase no combustible, siendo necesario el empleo del filtro de erosión luego del de dilatación para evitar que las clases combustibles avancen demasiado sobre las no combustibles.

#### **Pseudocódigo 2: Módulo Filtros morfológicos**

##### **INICIO**

**Variables:** Imagen clasificada.

Clases combustibles: pajonales, césped, matorral/bosque.

Clases no combustibles: roca/suelo desnudo, cuerpos de agua.

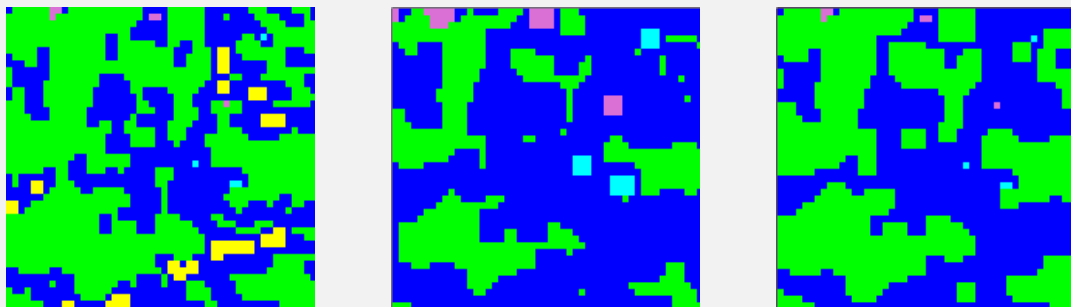
##### **Algoritmo:**

**Si** la clase es combustible **entonces** transformar a clase binaria **y** aplicar filtro DILATE seguido de filtro ERODE

Transformar todas las clases a ROIs

Crear una imagen clasificada a partir de las ROIs.

##### **FIN**



**Figura 2.13.** Comparación de un sector del PNQC (zoom) antes y después de la aplicación de filtros. De izquierda a derecha: imagen clasificada sin transformación, imagen clasificada con filtro de dilatación, imagen clasificada con filtro de dilatación seguido del de erosión. En verde clase “Roca/Suelo desnudo”, en azul “Pajonal fino”, en amarillo “Pajonal grueso”, en celeste “Pajonal con afloramiento” y en rosa “Césped”.

### *Asignación de umbral de combustibilidad*

La finalidad de esta metodología es generar subclases o subcategorías para luego poder asignarle combustibilidad a la clase “Roca/Suelo desnudo” por el motivo mencionado anteriormente (ver sección 2.3.2.2). Para ello se propone definir umbrales de distancia a las clases combustibles, a partir de los cuales la roca tendrá capacidad o no de propagar el fuego. Por ejemplo, a aquellos píxeles clasificados como roca que se encuentren a menos de un píxel de distancia de una clase combustible se les asignará cierto grado de combustibilidad al construir el mapa de combustibles, mientras que si no superan este umbral se mantienen como no combustibles. Esta técnica permite definir distintos umbrales de distancia posibilitando incluso realizar un “degradé” de combustibilidad si se lo considera apropiado, y a diferencia de la técnica anterior no modifica la extensión de las clases combustibles. Los pasos generales para la implementación se mencionan en el pseudocódigo 3.

#### **Pseudocódigo 3: Módulo Asignación de combustibilidad**

##### **INICIO**

**Variables:** Imagen clasificada.

Clases combustibles: pajonales, césped, matorral/bosque.

Clases no combustibles: roca/suelo desnudo, cuerpos de agua.

##### **Algoritmo:**

Transformar cada clase a clase binaria

Transformar clases binarias a ROIs

Realizar imagen de distancia a clases combustibles

Crear imagen binaria con clase roca transformada a combustible (según una distancia definida a la clase combustible)

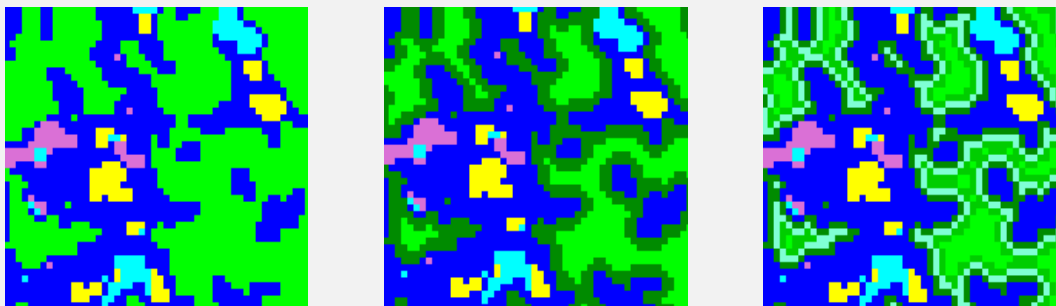
Transformar a ROI la imagen binaria de roca transformada

Crear una imagen clasificada a partir de las ROIs.

##### **FIN**



A modo de ejemplo se realizaron distintas transformaciones, empleando primero un único umbral de dos píxeles de distancia, e incluyendo luego tres umbrales (distancia de uno, dos y tres píxeles) para la asignación de combustibilidad en una misma imagen (figura 2.14). Pudo observarse como únicamente la roca sufre una transformación, no existiendo sobrestimación de las clases combustibles para esta metodología.



**Figura 2.14.** Comparación de un sector del PNQC (zoom) antes y después de la generación de subclases. De izquierda a derecha: imagen clasificada sin transformación, imagen clasificada con asignación de un umbral de combustibilidad (2 píxeles a clase combustible), imagen clasificada con asignación de tres umbrales de combustibilidad (1, 2 y 3 píxeles a clase combustible). En verde clase “Roca/Suelo desnudo” (distintas tonalidades representan diferente asignación de combustibilidad), en azul “Pajonal fino”, en amarillo “Pajonal grueso”, en celeste “Pajonal con afloramiento” y en rosa “Césped”.

### 2.4. Discusión

El clasificador SVM arrojó mejores resultados que el ANN, coincidiendo con lo registrado por Candade (2004), Thiel *et al.* (2009) y Shao & Lunetta (2012). La menor precisión obtenida al clasificar con redes neuronales puede deberse a que el rendimiento de este clasificador es dependiente del tamaño de las muestras (Liwa 2006). Así mismo, entre los factores que influyen en la aproximación del error del clasificador ANN se encuentran el algoritmo de aprendizaje, el número de iteraciones y el número de unidades ocultas, siendo este último un parámetro que no es permitido configurar en ENVI, y que puede producir un sobre-entrenamiento o integrar ruido de las muestras a la clasificación (Kröse & van der Smagt 1996). No se considera que la disminución de la exactitud pueda deberse a la elección del algoritmo de aprendizaje y al número de iteraciones, ya que en pruebas anteriores (no incluidas en este trabajo) se observó que trabajar con la función hiperbólica o utilizar un número de iteraciones superior a 1000 genera una disminución mayor en la precisión de la clasificación. Igualmente, se debe aclarar que en el presente trabajo no se observaron grandes diferencias entre los resultados de los distintos clasificadores, tal como lo registrado por Watanachaturaporn *et al.* (2008).

El coeficiente kappa mostró un valor elevado, incluso superior a lo observado en otras clasificaciones realizadas a partir de imágenes satelitales de resolución media (McNairn *et al.* 2005, Malik & Husain 2006, Ormeci *et al.* 2010), lo cual podría estar relacionado con el tipo de clasificador usado y con la adición de variables auxiliares que

favorecerían la discriminación de las coberturas analizadas. En el análisis de los errores de omisión y comisión, vimos que la confusión entre las clases fue en general baja, excepto para las clases pajonal con afloramiento y césped, probablemente por ser las clases que presentaron menor cantidad de píxeles en sus regiones de entrenamiento. Si bien se considera que el clasificador SVM no es sensible al tamaño de las muestras por arrojar valores de fiabilidad de clasificación superiores en comparación a otros clasificadores cuando se trabaja con muestras pequeñas (Mantero *et al.* 2005, Song *et al.* 2012), la precisión de este clasificador aumenta al hacerlo también la cantidad de píxeles de entrenamiento (Kavzoglu & Colkesen 2012, Myburgh 2012).

Las discrepancias detectadas mediante análisis visual al comparar la imagen clasificada con lo observado en Google Earth, están asociadas principalmente a la asignación errónea de una clase determinada en zonas donde la sombra no pudo ser corregida. Podemos asegurar que esta equivocación se debe a una confusión espectral y no al efecto de la introducción de variables topográficas (las que podrían estar influyendo al definir un patrón según altitud o pendiente), porque dichos errores pudieron apreciarse en la imagen obtenida al clasificar sólo con las 4 bandas espectrales, es decir, sin incluir variables auxiliares. En regiones con sombra los valores de reflectividad son muy bajos en todas las bandas espectrales, por lo que el clasificador asignaría estos píxeles a la clase de interés con la que encuentre mayor cercanía (menor separabilidad) de la firma espectral. Para evitar esto, podría considerarse la utilización de un umbral de probabilidad de clasificación o la realización de una máscara para sombras. Luego, los píxeles no clasificados podrían ser reemplazados por el tipo de cobertura considerada correcta de acuerdo a conocimiento del terreno, análisis visual de imágenes de alta resolución espacial o mediante algoritmos de reparación basados en las clases asignadas a píxeles vecinos como los propuestos por Wu & Bauer (2013), aunque este último caso probablemente tenga más éxito sobre mapas de coberturas de elevada resolución.

Diferentes estudios han demostrado el efecto positivo de realizar corrección de sombras topográficas previo al proceso de clasificación mediante diversos métodos (Karathanassi *et al.* 2000, Dorren *et al.* 2003, Nichol *et al.* 2006, Vanonckelen *et al.* 2013). Si bien en el presente trabajo no se realizaron pruebas de clasificación antes y después de aplicar el módulo de corrección de sombras, dado que se consiguió la independencia entre la reflectividad y el efecto topográfico, asumimos que este pre-procesamiento tuvo implicancia en los buenos resultados obtenidos en la clasificación de coberturas. Así mismo, proponemos investigar otros métodos de corrección de sombras, como el de Minnaert, ya que se ha observado que este método es más efectivo en las bandas del infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR) en comparación al método C-correction (Richter *et al.* 2009). Por otro lado, debemos mencionar que al parecer no existe una técnica que genere un incremento de precisión en la clasificación de todas las coberturas de interés, ya que la corrección de la iluminación sería dependiente del tipo de cobertura (McDonald *et al.* 2000, Riaño *et al.* 2003). Por lo tanto, el método de corrección de sombras a emplear o la manera de implementarlo, dependería de la clase que presente mayor relevancia, ya sea por los objetivos propuestos o por la topografía a la que se asocie.

A pesar de que el beneficio de trabajar con variables de textura durante el proceso de clasificación ha sido previamente documentado (Coulibaly & Goïta 2006, Salas & Chuvieco 1995, Riaño *et al.* 2002a), nuestros resultados no evidenciaron un cambio significativo en la fiabilidad de la clasificación. Esto podría deberse a diferentes factores



que influyen en las características texturales y en la precisión que aportan a la clasificación, tales como el tamaño de la ventana de observación usada y la dirección y valor del vector de dispersión, (Su *et al.* 2008, Pacifici *et al.* 2009, Roberti de Siqueira *et al.* 2013). Por ello, deberían realizarse más pruebas variando los valores de los parámetros mencionados, como así también considerar que la obtención de una variable de textura a partir de una imagen con presencia de sombras podría estar aportando mayor confusión a la separabilidad de las clases.

Contrario a lo esperado, incorporar como banda auxiliar al índice de vegetación RDVI no arrojó mejores resultados en la clasificación. Esto podría deberse al estado de la vegetación en ese momento (estrés o senescencia) posiblemente asociado a la fecha de adquisición de la imagen (otoño). De esta manera, debido a una menor actividad clorofílica podría esperarse una alteración en la reflectividad de cubiertas, generando una mayor confusión entre los patrones espectrales asociados a distintas coberturas vegetales. Para poner a prueba esta hipótesis, se podría calcular este índice a partir de una imagen de verano o realizar un análisis temporal del mismo para operar con valores medios de RDVI. Igualmente, Saha *et al.* (2005) registraron una disminución de la precisión de la clasificación al incluir el índice NDVI como banda auxiliar.

En cuanto a los procedimientos post-clasificatorios, se observó que la utilización de los filtros de dilatación y erosión subestima la clase cuerpos de agua, por lo que sería necesario incluirla como barrera cortafuego durante una simulación, junto con otras barreras como caminos y rutas. Además, mediante esta metodología se sacrifica la transformación de una clase combustible en otra, debido a la expansión de una cualquiera de ellas sobre el resto. Por eso es que se aconseja la utilización de esta técnica sólo cuando es imprescindible y además si se necesita una manera rápida y simple de resolver el problema. La asignación de combustibilidad, en cambio, es una técnica más compleja pero más precisa, ya que no altera la distribución espacial de las clases combustibles (no existe el “avance” de una clase sobre otra) y permite, mediante la definición de valores umbrales, realizar una transformación sobre la clase no combustible que posibilitaría representar de una manera más confiable el comportamiento del fuego bajo ciertas condiciones ambientales, como por ejemplo pajonales altos rodeando a la roca y presencia de viento.

En la figura 2.15 se resumen los pasos metodológicos que se siguieron para obtener el mapa de coberturas a partir del cual se construyó el mapa de combustible.

Existen diversas técnicas y metodologías que no pudieron ser evaluadas en el presente trabajo por razones de tiempo y recursos, y que consideramos que deben ser mencionadas dada su importancia en la obtención de mapas de coberturas. Varios autores han observado que la fusión de datos incrementa la precisión de los mapas obtenidos, ya sea por combinación de una imagen óptica de alta resolución espacial con una de alta resolución espectral o combinado datos de sensores ópticos y radar (Lu *et al.* 2005, Wu & Chen 2007, Huang *et al.* 2007, Battsengel *et al.* 2013). Por otro lado, Riaño *et al.* (2002a) registraron una mejoría del 10% en la discriminación de sus clases de interés al trabajar con datos multitemporales (primavera y verano) de Landsat TM durante la clasificación y de un 2% al incorporar la banda correspondiente al infrarrojo térmico. Otros autores han obtenido similares resultados en relación a la adición de la banda térmica (Southworth 2004, Ehsani & Quiel 2010), ya que la emisión de energía de la superficie terrestre, y por lo tanto las temperaturas medidas, sería dependiente de

la cobertura de la misma. Por último, la implementación del sistema LiDAR (Light Detection And Ranging) en la caracterización de la vegetación ha demostrado presentar un alto potencial debido a que ofrece datos tridimensionales de elevada precisión, pudiendo obtenerse información no sólo del perfil horizontal de la cobertura vegetal sino también del perfil vertical (Lefsky *et al.* 2002). Así, se podrían obtener mapas de coberturas más específicos y apropiados para la construcción de mapas de combustibles, donde características como la altura de la vegetación, distribución vertical de la misma (estratos), cobertura del dosel y volumen de las copas de árboles, son parámetros de interés como predictores del comportamiento de fuego en incendios de superficie o incendios de copas (ver Capítulo 3). Diferentes autores han conseguido con éxito realizar mediciones de altura de los árboles, área basal, biomasa total, biomasa de hojas, volumen del tallo, volumen de la copa y cobertura del dosel, entre otros (Means *et al.* 1999, Means *et al.* 2000, Riaño *et al.* 2002b, Holmgren & Jonsson 2004, Bortolot & Wynne 2005).

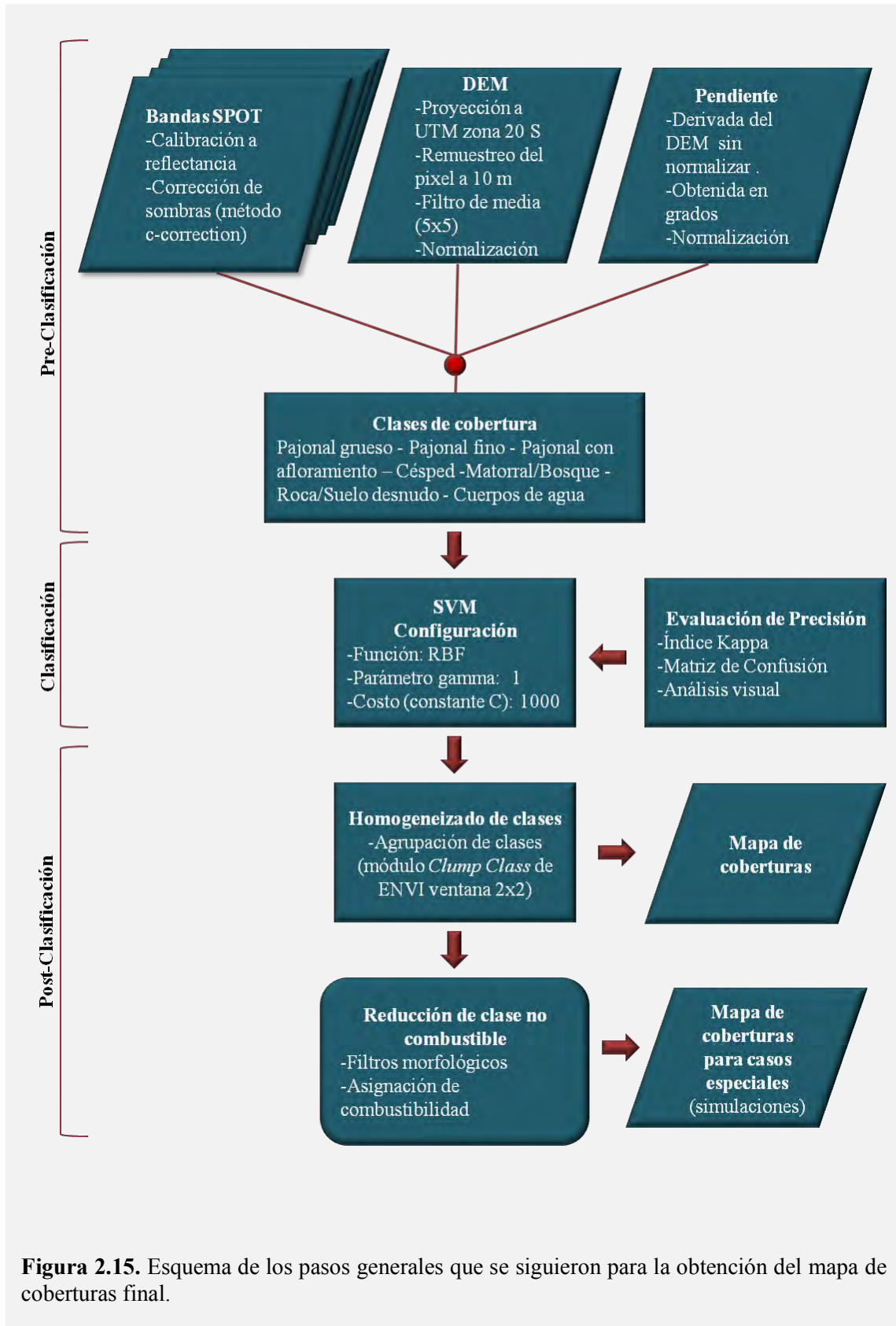


Figura 2.15. Esquema de los pasos generales que se siguieron para la obtención del mapa de coberturas final.

## CAPÍTULO 3

---

### GENERACIÓN DE MAPA DE COMBUSTIBLES

#### 3.1. Introducción

Conocer las características combustibles de la vegetación (parámetros cualitativos y/o cuantitativos) y reunir las en lo que se conoce como *modelo de combustible*, permite predecir tasas de riesgo de incendio, estimar la tasa de propagación del fuego, la altura de la llama, la intensidad y otros parámetros asociados al comportamiento del fuego, como así también evaluar su impacto, todo mediante la utilización de modelos matemáticos de comportamiento del fuego que emplean a los modelos de combustibles como datos de entrada. Así, dividir el territorio por zonas en función de estos modelos, da como resultado un *mapa de combustibles*.

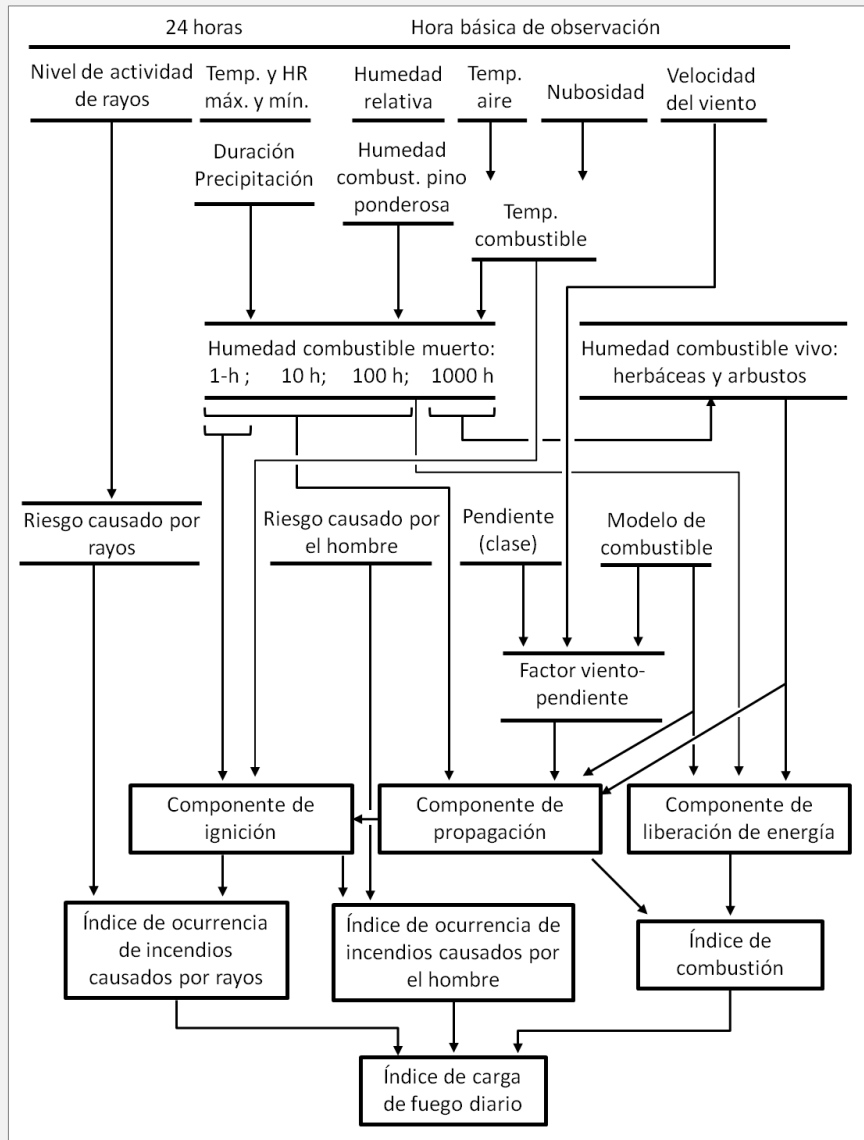
Existen diferentes metodologías para describir la combustibilidad de una cobertura, definiéndose por lo tanto distintos sistemas de clasificación de combustibles. La primera aproximación a una clasificación fue planteada por Dubois (1914), quien consideró que el peligro de incendio dependía de la cantidad de combustible en terreno, la humedad de las coberturas, la pendiente, la facilidad de ignición y la tasa de propagación del fuego, discriminando tres tipos de combustibles: pastizal, arbustal y restos leñosos. En 1929, Shaw & Kotok definieron nueve tipos de cobertura principales para el norte de California (tres especies de pino, coníferas mixtas, abetos, pastizal, arbustal, chaparral y bosques) diferenciándolas por el riesgo de ignición, tasa de propagación del fuego y tipo (fuego de copas, de superficie y de suelo), entre otros. El primer sistema de clasificación de combustibles que formalizó la descripción de la tasa de propagación del fuego en las clases baja, media, alta y extrema, fue el propuesto por Hornby (1935), quien planteó siete modelos de combustibles distinguiendo entre herbáceas, arbustos y distintos tipos de coníferas. En 1972, Deeming *et al.* implementaron el primer sistema nacional de clasificación del peligro de incendio en USA, el NFDRS -National Fire Danger Rating System-, el cual operaba con nueve modelos de combustibles y ofrecía información a rasgos generales sobre el comportamiento de fuego de superficie (ignición, propagación y energía liberada) y la generación de diversos índices. El índice de ocurrencia de incendios (Ocurrence Index-OI), que deriva del riesgo dado por el grado de exposición a fuentes de ignición y la facilidad con la que el combustible puede encenderse (humedad y temperatura). El índice de combustión (Burning Index-BI), que representa el esfuerzo potencial necesario para contener un fuego en un tipo de combustible particular y se obtiene de la combinación de la velocidad de propagación, la tasa de combustión y el ancho del frente de llama. Para el cálculo de la velocidad de propagación se emplea el modelo de Rothermel (1972), donde se integra el viento, la pendiente y humedad del combustible. El índice de carga de fuego diario (Fire Load Index-FLI), que representa el esfuerzo total requerido para contener todos los probables incendios ocurriendo dentro de un área y obtenido por multiplicación del BI y el OI. Y el índice de severidad estacional (Seasonal Severity Index-SSI) obtenido por sumatoria de los FLI de un período de tiempo dado. Este sistema fue mejorado en 1978 (figura 3.1), ampliando los modelos empleados a 20, incluyendo más categorías de pendiente, considerando más clases para el cálculo de humedad de combustibles y, en general, mejorando los índices mencionados previamente (Bradshaw *et al.* 1983). El sistema de peligro de incendio NFDRS sigue utilizándose en la actualidad por agencias federales, estatales y privadas encargadas del control de incendios forestales en Estados Unidos (USFS-WFAS [en línea]).

Sin embargo, los primeros modelos de combustibles documentados (incluyendo explícitamente parámetros cuantitativos) fueron los 11 modelos propuestos por

Rothermel (1972), y en principio fueron utilizados éstos para predicciones más complejas del comportamiento del fuego, es decir, no sólo para evaluación de peligro de incendio. En 1976 Albini mejora este sistema agregando dos modelos más y especificando el contenido de humedad de extinción para cada modelo de combustible, parámetro que Rothermel mantenía constante en sus modelos, siendo este conjunto de modelos conocido como el NFFL-National Forest Fire Laboratory- (Albini 1976). En 1982 Anderson realiza una descripción cualitativa y cuantitativa más clara y detallada de los modelos NFFL e incluye ilustraciones fotográficas de cada uno, razón por la cual también son conocidos como los modelos de Anderson (Anderson 1982). Más recientemente, Scott and Burgan (2005) toman los modelos de Anderson y aumentan el número a 40 modelos, con la intención de mejorar la precisión en el comportamiento del fuego en USA, e incluyendo además modelos dinámicos dentro del conjunto.

El sistema NFFL es utilizado ampliamente en el mundo para estimar el comportamiento del fuego en superficie, ya sea conservando sus parámetros originales o con la implementación de variaciones locales para distintas áreas geográficas. Tal es el caso del sistema de clasificación Prometheus, que adapta los modelos NFFL a los ecosistemas mediterráneos basándose en el tipo y altura del estrato propagador principal del fuego (herbáceas, arbustos, mantillo) describiendo siete modelos de combustibles a partir de la distribución espacial y cobertura de los mismos (Riaño *et al.* 2002a, Lasaponara *et al.* 2006). En Portugal, Cruz (2005) define 14 modelos de combustibles realizando un inventario, mediciones a campo, clave fotográfica y tabla de correspondencia con los modelos NFFL, y diferenciando los grupos en herbáceas, arbustos, pinares, frondosas caducifolias y residuos de actividad forestal. En Barcelona, España, la OTPMIF (Oficina Técnica de Prevención Municipal de Incendios Forestales) realiza una reclasificación de los 13 modelos de combustibles basándose en el grado de continuidad horizontal y vertical y en el comportamiento teórico de velocidad de propagación del fuego, intensidad de calor y altura de la llama presente en sus coberturas. Al no contar con valores derivados de experimentación a campo, utilizaron valores cualitativos como muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto. Para simplificar la interpretación, realizaron una clave fotográfica, reordenaron los modelos, fusionaron los modelos NFFL 1 y 2 por presentar poca variación en la velocidad de propagación del fuego, realizaron modificaciones en cuanto a la altura representativa de los estratos combustibles y crearon nuevos modelos para representar la vegetación de rivera, cultivos, baldíos, áreas urbanas y áreas de baja combustibilidad (Riera 2013 [com.pers.]).





**Figura 3.1.** Esquema de la estructura del Sistema Nacional de Peligro de Incendio (NFDRS) propuesto para Estados Unidos en 1978 (adaptado de Bradshaw *et al.* 1983).

El concepto de modelo de combustible surgió junto con el desarrollo del modelo de propagación de fuego de Rothermel, para hacer referencia al conjunto de datos cuantitativos asociados al material combustible que se ingresaba en dicho modelo de comportamiento del fuego. En general, las características más importantes que definen a cada modelo de combustible son la carga de combustible por tamaño y categoría, la relación superficie de área a volumen, la altura del combustible, el contenido de humedad del combustible, el contenido de humedad de extinción en el combustible muerto y el contenido de calor del combustible vivo y muerto. A continuación se describe cada variable (Allgöwer *et al.* 2007, FUELMAP 2009):

La *carga de combustible* ( $W_0$ ) se refiere al peso seco de combustible por unidad de área, dada en toneladas por cada hectárea (t/ha). Es la cantidad total de combustible

disponible para quemarse y expresa la cantidad total de energía o intensidad potencial que puede ser liberada por un incendio. Permite predecir la posibilidad de ignición, la velocidad de propagación y la intensidad del frente de la llama. Está discriminada por condición o categoría, es decir, carga de combustible vivo o muerto, y por tamaño o clase diamétrica. La clase diamétrica hace referencia al diámetro de la partícula de combustible, que es el elemento más pequeño considerado en la estructura del combustible, como por ejemplo fragmentos de ramas y hojas. A su vez estas clases se corresponden con el tiempo necesario para que la partícula de combustible muerto pierda 2/3 de la diferencia entre su humedad inicial y su humedad de equilibrio, lo que se conoce como “moisture timelag” o tiempo de respuesta o de retardo. De esta manera, se discrimina la clase con tiempo de respuesta de 1 h, correspondiente a material menor a 0.65 cm de diámetro, herbáceas muertas y mantillo; la clase con tiempo de respuesta de 10 hs, con material entre los 0.65 y 2.5 cm de diámetro; la clase con tiempo de respuesta de 100 hs, con material entre 2.5 y 7.5 cm de diámetro; y la clase con tiempo de respuesta de 1000 hs, correspondiente a partículas con un diámetro mayor a 7.5 cm. La clase de 1 hora involucra al combustible fino (pastizales) y es la que responde más rápidamente a cambios climáticos y tiene mayor influencia en la propagación y la intensidad del fuego. En cambio, las clases de los combustibles gruesos (vegetación leñosa) influyen más en la cantidad de calor liberado por unidad de área y en el tiempo de quemado. Los datos de carga de combustible incluidos en los modelos más empleados son la carga de combustible muerto por categoría, excepto la de 1000 h, la carga de combustible del componente herbáceo vivo y la carga de combustible del componente leñoso vivo. Si bien en el sistema NFDRS de 20 modelos se incluye en la descripción la carga de combustible muerto de la clase 1000 h (árboles de gran porte), esta información no es tenida en cuenta en los modelos de predicción del comportamiento del fuego.

La relación *superficie a volumen-SAV* ( $\sigma$ ) es la relación entre el área externa de la partícula de combustible y su respectivo volumen, medida en metros cuadrados cada metro cúbico ( $m^{-1}$ ). Este parámetro influye en la tasa de cambio de la temperatura del combustible y del contenido de humedad, fluctuando más rápidamente cuanto mayor es el *SAV*. Determina por lo tanto las partículas o la superficie que estará disponible para combustión, siendo mayor al aumentar la relación superficie-volumen. En los modelos de combustibles se tiene en cuenta el *SAV* para la clase con tiempo de respuesta de 1 h y para el componente herbáceo y leñoso vivo.

La *altura o profundidad del combustible* ( $\delta$  o  $h_f$ ), expresada en metros (m), es la altura promedio de la capa principal que es capaz de soportar y propagar el fuego dentro del complejo de combustibles. Representa la extensión vertical de la zona de combustión, zona que también es llamada cama de combustibles (“fuelbed”). Para modelos de combustibles con disposición vertical, como pastizal o arbustos, es más apropiado hablar de altura, mientras que en modelos con disposición horizontal, como los que incluyen mantillo, es utilizado el término profundidad. Este parámetro también aporta información sobre la propagación del fuego y la intensidad del frente de la llama, además de ser empleado, junto con la carga de combustible, en la estimación de la densidad de la cama de combustible.

El *contenido de humedad del combustible-FMC* ( $M_f$ ), si bien no es incluido en la descripción de los modelos, es necesario definirlo cuando se quiere estimar el comportamiento del fuego. Influye en la inflamabilidad, combustibilidad, tasa de

propagación del fuego, tasa de liberación de energía, producción de humo y en la posibilidad de que una braza despedida genere un nuevo foco de ignición al caer, razones por las cuales es uno de los parámetros más importantes a tener en cuenta en el comportamiento del fuego. Debe estimarse tanto para el combustible muerto por clase diamétrica como para el vivo, calculando la relación entre el contenido de agua y el peso seco del combustible, y expresándolo en porcentaje (ecuación 3.1). Otros métodos de estimación del *FMC* pueden ser índices meteorológicos, aplicando fórmulas que implican conocer la temperatura y humedad relativa ambiente, o la implementación de teledetección, estimando a partir de índices espectrales de contenido de humedad de la vegetación.

Generalmente, se considera que cuando el combustible muerto tiene más del 30% de contenido de humedad, ya no tiene la capacidad de encenderse, mientras que para el combustible vivo el límite puede ser del 100%, en particular cuando la vegetación contiene aceites volátiles que aportan a la combustibilidad.

#### Ecuación 3.1

$$FMC = \frac{PNH - PNS}{PNS} 100\%$$

*FMC* = Contenido de Humedad del Combustible (%).

*PNH* = Peso neto fresco, *Wf* (g).

*PNS* = Peso neto seco, *Wd* (g).

El *contenido de humedad de extinción del combustible* ( $M_e$  o  $M_x$ ), es un parámetro que representa el contenido de humedad del combustible al cual el fuego ya no puede propagarse, siendo entre el 12 y 40 % para la mayoría de los combustibles muertos, y superior al 120% para los combustibles vivos. Si bien no se explica el mecanismo, en áreas de clima seco la humedad de extinción del combustible muerto tiende a ser menor que en áreas de clima húmedo, variando entre un 15-20% para el primer caso y 30-40% para el segundo (Scott & Burgan 2005). Para obtener este valor se debe realizar experimentos a campo o en laboratorio, quemando partículas de combustibles con diferentes valores de *FMC*.

El *contenido de calor del combustible* ( $h$  o  $\Delta H$ ) o el valor calorífico, es la cantidad total de calor liberado por la combustión completa de una unidad de masa de la partícula de combustible. En los modelos de combustibles este parámetro se mantiene constante, asignándoles el valor de 18608.088 kJ/kg.

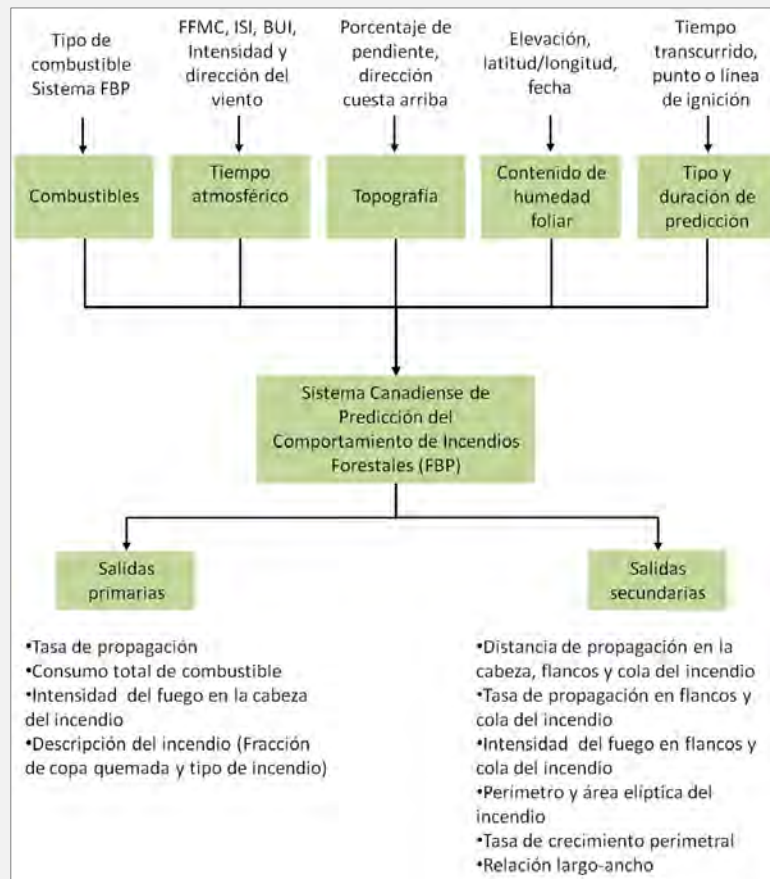
El *contenido mineral total* ( $S_T$ ) y *contenido mineral efectivo* ( $S_e$ ) del combustible son determinados como un porcentaje del peso seco. La importancia de estos parámetros se debe a que algunos minerales presentes en la vegetación pueden afectar su combustibilidad, como es el caso del sodio, potasio y fósforo. El contenido mineral efectivo hace referencia al contenido mineral libre de sílice, debido a que este mineral no influye en los procesos de pirolisis, ignición y combustión. En los modelos de combustibles se les asigna un valor constante, siendo el  $S_T$  igual al 5.55% y el  $S_e$  igual al 1%.

La *densidad de la partícula de combustible* ( $\rho_p$ ) influye en la conductividad térmica y por lo tanto en el tiempo de ignición. Se calcula a partir de la relación entre el peso seco de la partícula y su volumen como material fresco, pero dado a que la variación en la densidad de partículas de distintos combustibles no es tan grande, se le asigna un valor constante para todos los modelos de  $510.912 \text{ kg/m}^3$ .

La *densidad aparente del estrato de combustible* ( $\rho_b$ ), expresa la cantidad de combustible por unidad de volumen de la cama de combustible en kilogramos por cada metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ). Se obtiene de la relación entre el peso seco de una muestra y el volumen de la parcela de muestreo, que suele calcularse a partir del producto de  $1 \text{ m}^2$  y la altura del combustible. Este parámetro es una medida de la compactación de la cama de combustible e influye en la tasa de cambio de humedad del combustible y en la cantidad de oxígeno necesario para la combustión. Al dividir la densidad de la cama de combustible por la densidad de la partícula de combustible, se obtiene la *compactación del combustible* ( $\beta$ ). El parámetro  $\beta$  es necesario en la implementación de los modelos de comportamiento del fuego y representa la fracción del volumen de la cama de combustible que es ocupado por las partículas de combustible.

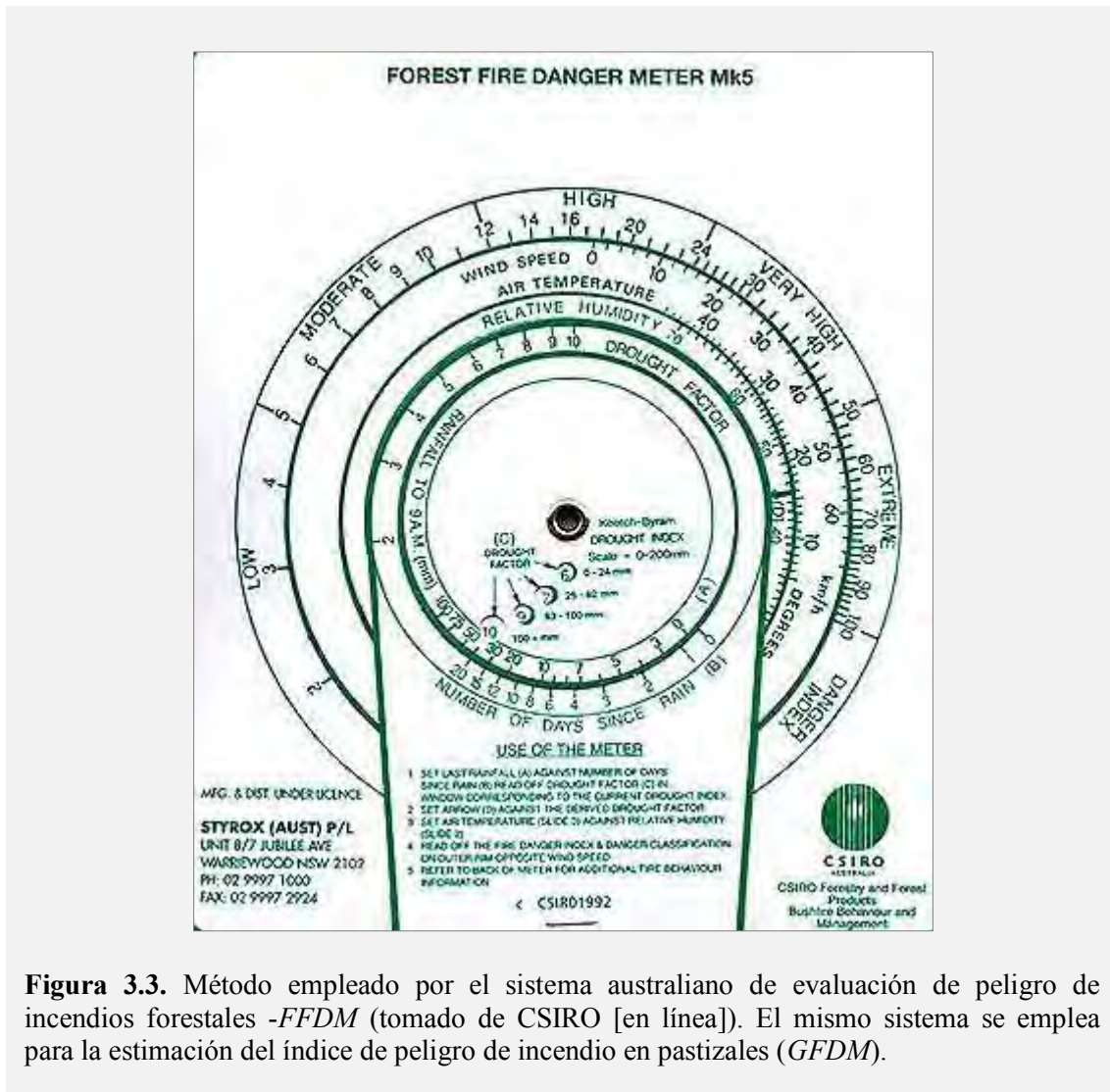
Otro tipo de información que puede ir asociada a los modelos de combustibles son parámetros representativos del comportamiento del fuego, los cuales evidencian cómo varía el comportamiento de acuerdo al estrato sobre el cual se propaga el fuego. Tal es el caso de la *tasa de propagación del fuego* (**ROS**), que es la velocidad de avance del frente de llama medida en metros por cada minuto ( $\text{m/min}$ ), la *longitud de la llama* (**FL**), que es la distancia medida en metros desde el suelo en el frente del fuego hasta la punta de la llama, y la *altura de la llama* (**FH**), que es la altura promedio de las llamas medida verticalmente, en metros.

Así mismo, otros países como Canadá y Australia también han puesto sus esfuerzos en el desarrollo de sistemas de clasificación de combustibles y modelos de predicción del comportamiento del fuego, siendo los más empleados los sistemas *FBP* (Canadian Fire Behavior Prediction System) y *Forest and Grassland fire danger meter*, respectivamente (Arnaldos Viger *et al.* 2004). El sistema *FBP* utiliza un sistema de clasificación de combustibles propio, que consiste en 17 modelos repartidos entre cinco categorías (coníferas, hoja caduca, bosque mixto, pastizal y restos de poda) y diferenciados entre sí por características cualitativas, referidas al tipo de combustible presente en suelo y en superficie, y características cuantitativas categorizadas y definibles visualmente (escaso, abundante, disperso, etc.). Este sistema a la vez forma parte del sistema canadiense de evaluación de riesgo de incendio forestal (CFFDRS), el cual comenzó a desarrollarse en 1968. A partir de los modelos de combustibles y otros datos de entrada (figura 3.2), se realizan predicciones de los principales parámetros del comportamiento del fuego basándose en una serie de expresiones empíricas provenientes de datos de incendios reales y experimentales sucedidos en los diferentes modelos de combustibles (Lawson *et al.* 1985, Hirsch 1993, Arnaldos Viger *et al.* 2004).



**Figura 3.2.** Esquema de la estructura del Sistema *FBP*, sistema canadiense de predicción del comportamiento de incendios forestales (adaptado de CWFIS [en línea]).  
 FFMC: Código de Humedad del Combustible Fino (Fine Fuel Moisture Code). ISI: Índice de Propagación Inicial (Initial Spread Index). BUI: Índice de Combustible Disponible (Buildup Index).

El sistema australiano considera como modelo de combustible a los bosques de eucaliptus, en el caso del Forest Fire Danger Meter (*FFDM*), y a los pastizales y matorrales, en el Grassland Fire Danger Meter (*GFDM*), sin contar con una descripción específica de la estructura o características de dichos combustibles. Diseñados como modelos empíricos en la década del '70, se usan para predecir el riesgo de incendio en un área clasificándolo en bajo, moderado, alto, muy alto y extremo, índice que a su vez se relaciona con el grado de dificultad para extinguir un incendio (figura 3.3). Esta predicción se obtiene a partir del grado de curado o secado del combustible (estimado por un factor o índice de sequía), temperatura, humedad ambiental y velocidad del viento, y da información sobre la posibilidad de que se inicie un fuego, su tasa de propagación, su intensidad y su dificultad de extinción. Valores próximos a 1 significan que no habrá combustión o que de haberla será fácilmente controlable, mientras que valores cercanos a 100 (incluso mayores) representan un comportamiento del fuego extremo que será prácticamente imposible de controlar (CSIRO [en línea], Arnaldos Viger *et al.* 2004).



**Figura 3.3.** Método empleado por el sistema australiano de evaluación de peligro de incendios forestales -FFDM (tomado de CSIRO [en línea]). El mismo sistema se emplea para la estimación del índice de peligro de incendio en pastizales (GFDM).

Para Argentina se han encontrado algunos trabajos realizados en relación a la clasificación de mapas de combustibles. Cuchietti *et al.* [s.a.] definen tres modelos de combustibles para las Sierras Chicas de Córdoba, diferenciados en pastizales, arbustales y bosques, para lo cual realizaron identificación de las especies vegetales predominantes, determinación de cobertura herbácea y su altura, cobertura de copas de árboles y arbustos, densidad de árboles y arbustos y obtención del NDVI típico para cada modelo. Ubiedo Figueroa *et al.* (2008) identificaron cuatro grupos combustibles (pastizal, bosque nativo, forestaciones y acumulación de combustible muerto) para el Valle de Calamuchita, en Córdoba. En este trabajo, si bien no se describe detalladamente cada modelo, indican que mediante observaciones *in situ* diferenciaron en total 22 modelos de combustibles cualitativos: tres modelos de pastizales (según su altura y coexistencia con combustible muerto), siete modelos de bosque (de acuerdo a la altura de árboles, presencia de matas, pastos y coexistencia con material muerto), nueve modelos de forestaciones (de acuerdo a la edad y desarrollo de las mismas, dentro de otras características), y tres modelos de acumulación de combustible muerto (de acuerdo a la presencia de ejemplares forestales en pie, restos de poda o material forestal muerto). Por otra parte, Sione (2006) llevó a cabo una clasificación de combustibles en un área de la provincia de San Luis empleando como base un mapa de unidades fisonómicas de

la vegetación para asignar cada clase a alguno de los 13 modelos NFFL según correspondiera de acuerdo a las descripciones de dichas unidades fisonómicas. En un sector del Delta del Paraná, Kunst *et al.* (2013) definieron dos modelos propios de acuerdo a las especies dominantes propagadoras del fuego, pajonal y juncal, determinando también la dinámica anual de los combustibles finos mediante estimación de acumulación de biomasa aérea. Por otro lado, Gaute *et al.* (2013) trabajaron en la metodología de estimación del contenido de humedad (FMC) para los modelos de combustibles mencionados previamente, para así poder diferenciar la proporción de combustible vivo y muerto. Por último, Barrionuevo & López (2007) determinaron a partir de un ensayo en un área de Santiago del Estero representativa del Chaco Semiárido, a qué clase diamétrica se corresponde la mayor acumulación de combustible (muy fino, fino, medio, grueso) y el total de combustible vegetal presente en el ecosistema (t/ha), aportando así también a información de interés para la predicción del comportamiento del fuego.

A continuación, se describe la metodología empleada para la construcción de mapas de combustibles correspondientes a la RN y PNQC (Córdoba, Argentina) mediante la asociación a modelos de combustibles creados para Estados Unidos.

## 3.2. Materiales y Métodos

Debido a que la selección de los modelos está determinada por las características propias del complejo de combustibles mencionadas previamente y que no hay información de mediciones a campo y experimentaciones disponibles para nuestra zona de estudio, se realizó una asociación aproximada a los modelos de combustible existentes por medio de análisis cualitativo de la vegetación (fisionomía), bibliografía, análisis visual a campo y de fotografías, observación y comparación con las ilustraciones incluidas en los artículos que describen los modelos, e información de personal del PNQC sobre observaciones del comportamiento del fuego en terreno.

Se eligió trabajar con los sistemas estadounidenses de clasificación de combustibles (modelos de Anderson y modelos de Scott & Burgan) por ser los más difundidos, existir precedentes de adaptaciones a otros lugares y, en particular, porque son con los que trabaja FARSITE, simulador de incendios que se propuso para la validación de los modelos de combustibles (ver Capítulo 4).

A partir de las descripciones realizadas por los autores de los modelos, se construyeron reglas de decisión para facilitar la asociación de las coberturas identificadas en la RN y PNQC a los diferentes modelos creados para Estados Unidos, considerando aquellas características que pudieran ser determinadas visualmente o estimadas sin necesidad de experimentación a campo o laboratorio (Apéndice B, figuras 3 y 4).

### 3.2.1. Sistema de clasificación NFFL (National Forest Fire Laboratory)

Anderson (1982) documenta 13 modelos clasificados en cuatro grandes grupos: pastizal, arbustal, mantillo de bosque y residuos de actividad forestal. El mantillo hace referencia al piso del bosque constituido por hojas, espinas, ramitas finas y materia orgánica, pero que no experimenta descomposición, o si presenta es muy poca. Los residuos de



actividad forestal o también llamado combustible de actividad, es el combustible generado como resultado de una actividad forestal, como ramas y troncos que se dejan abandonados durante la extracción de madera por no ser comercializables o restos de poda y raleo. Estos grupos se diferencian entre sí por la distribución de las cargas de combustibles entre las clases diamétricas. La carga viva incluye la carga de combustible menor a 0.6 cm y la carga total incluye el combustible vivo y muerto menor a 7.6 cm (1, 10 y 100 hs). Cada grupo se subdivide en distintos modelos de combustibles que son descritos en términos de características de la vegetación y comportamiento del fuego esperado (tabla 3.1). A diferencia de los modelos de combustible NFDRS, que fueron desarrollados con el fin de predecir el peligro de incendio en función de un conjunto ordenado de registros meteorológicos para establecer las condiciones de la época, el conjunto NFFL fue diseñado para la predicción del comportamiento del fuego teniendo en cuenta las peores condiciones climáticas de la temporada de incendios (FUELMAP 2009).

**Tabla 3.1.** Modelos de combustibles NFFL o de Anderson con los parámetros asociados a cada uno. La estimación de la tasa de propagación del fuego (ROS) y la longitud de la llama (FL) para cada modelo, se realizó asumiendo una velocidad del viento de 8 km/h, un contenido de humedad del combustible muerto y vivo del 8% y 100 % respectivamente, y pendiente de 0°. Datos reunidos de Anderson (1982), con conversión de las unidades métricas, y de Arnaldos Viger *et al.* (2004).

Modelo de combust.	Carga de combustible (t/ha)				SAV (1/m)		Altura (m)	H° de extinción (%)	ROS (m/min)	FL (m)
	1 h	10 h	100 h	Vivo	1 h	Vivo				
<b>Pastizal</b>										
FM 1	1.85	0.00	0.00	0.00	11483	-	0.30	12	25.74	1.22
FM 2	5.00	2.50	1.25	1.25	9483	4921	0.30	15	11.55	1.82
FM 3	7.52	0.00	0.00	0.00	4912	-	0.76	25	34.32	3.66
<b>Arbustal</b>										
FM 4	12.52	10.02	5.00	12.52	562	4921	1.82	20	24.75	5.79
FM 5	2.50	1.25	0.00	5.00	562	4921	0.61	20	5.94	1.22
FM 6	3.75	6.25	5.00	0.00	5741	-	0.76	25	10.56	1.82
FM 7	2.82	4.67	3.75	0.92	5741	5085	0.76	40	6.60	1.52
<b>Mantillo de bosques</b>										
FM 8	3.75	2.5	6.25	0.00	6562	-	0.06	30	0.53	0.30
FM 9	7.30	1.02	0.37	0.00	6562	-	0.06	25	2.48	0.79
FM 10	7.52	5.00	12.52	5.00	6562	4921	0.30	25	2.61	1.46
<b>Residuos de actividad forestal</b>										
FM 11	3.75	11.27	13.77	0.00	4921	-	0.30	15	1.98	1.07
FM 12	10.02	35.07	41.32	0.00	4921	-	0.70	20	4.29	2.44
FM 13	17.52	57.60	70.12	0.00	4921	-	0.91	25	4.46	3.20

#### 3.2.2. Sistema de clasificación de Scott & Burgan

Scott & Burgan (2005) definen un nuevo conjunto de modelos de combustibles donde proponen 40 modelos divididos en 6 grandes grupos: pasturas, pasturas con arbustos, arbustal, mantillo de bosque mezclado con pastos o arbustos (bosque abierto), mantillo de bosque (bosque cerrado) y residuos de actividad forestal o producto del daño por el viento. Las características de cada grupo y sus subgrupos pueden verse en las tablas 3.2.a y 3.2.b. Estos nuevos modelos se desarrollaron para mejorar las predicciones del comportamiento del fuego fuera del período de alto riesgo de incendio, evitando así sobrestimaciones en predicciones de quemas prescriptas por ejemplo. Además, incrementaron el número de modelos aplicables a áreas con elevada humedad, donde el combustible puede arder con una humedad del combustible muerto relativamente alta, y aumentaron el número de modelos relacionados a las camas o capas de combustibles presentes en suelos forestales. Por otro lado, discriminaron entre modelos dinámicos y estáticos, apuntando a una mejor predicción del comportamiento del fuego. Todo modelo que presenta un componente herbáceo vivo es considerado como dinámico.

En los modelos dinámicos, la carga de herbáceas vivas es transferida a muerta en función de su contenido de humedad. Si el contenido de humedad en las herbáceas vivas es igual o mayor a 120%, se mantiene la misma carga de herbáceas vivas. Si el contenido de humedad es igual o menor al 30%, se transfiere toda la carga de herbáceas vivas a herbáceas muertas. Y si el contenido de humedad es mayor al 30% y menor al 120%, se hace una transferencia parcial de la carga desde la clase herbáceas vivas a herbáceas muertas considerando una relación lineal entre este rango de contenido de humedad y la fracción de herbáceas vivas a transferir (figura 3.4). Sin embargo, la carga transferida a clase muerta no es agregada a la categoría de 1 h, sino que se crea una nueva clase de herbáceas muertas. Esta nueva clase mantiene el *SAV* correspondiente al componente herbáceo vivo y el contenido de humedad correspondiente a la clase con tiempo de respuesta de 1 h. Es importante utilizar este tipo de modelos en un sistema de modelado del comportamiento del fuego dinámico, es decir, que tenga la función incorporada para la transferencia de cargas de herbáceas según su contenido de humedad. De lo contrario, independientemente de las condiciones de humedad, la carga de herbáceas vivas permanecerá invariable y el simulador predecirá una baja propagación del fuego, ya que la carga de combustible más propicia a quemarse (herbáceas muertas, que en general presentan mucho menor humedad) se mantendrá baja.

### 3. Generación de mapa de combustibles

**Tabla 3.2.a.** Modelos de combustibles de Scott & Burgan con los parámetros asociados a cada uno. <sup>d</sup> Indica que el modelo es de tipo dinámico. Datos tomados de Scott & Burgan (2005), con conversión de las unidades métricas.

Modelo de combust.	Carga de combustible (t/ha)					SAV (1/m)			Altura (m)	H° de extinción (%)
	1 h	10 h	100 h	Vivo H.	Vivo L.	1 h	Vivo H.	Vivo L.		
<b>Pastizal</b>										
<sup>d</sup> GR 1	0.25	0.00	0.00	0.75	0.00	7326	6660	-	0.12	15
<sup>d</sup> GR 2	0.25	0.00	0.00	2.50	0.00	6660	5994	-	0.30	15
<sup>d</sup> GR 3	0.25	1.00	0.00	3.75	0.00	4995	4329	-	0.61	30
<sup>d</sup> GR 4	0.63	0.00	0.00	4.75	0.00	6660	5994	-	0.61	15
<sup>d</sup> GR 5	1.00	0.00	0.00	6.25	0.00	5994	5328	-	0.45	40
<sup>d</sup> GR 6	0.25	0.00	0.00	8.50	0.00	7326	6660	-	0.45	40
<sup>d</sup> GR 7	2.50	0.00	0.00	13.50	0.00	6660	5994	-	0.91	15
<sup>d</sup> GR 8	1.25	2.50	0.00	18.25	0.00	4995	4329	-	1.21	30
<sup>d</sup> GR 9	2.50	2.50	0.00	22.50	0.00	5994	5328	-	1.52	40
<b>Pastizal-Arbustal</b>										
<sup>d</sup> GS 1	0.50	0.00	0.00	1.25	1.63	6660	5994	5994	0.27	15
<sup>d</sup> GS 2	1.25	1.25	0.00	1.50	2.50	6660	5994	5994	0.45	15
<sup>d</sup> GS 3	0.75	0.63	0.00	3.63	3.13	5994	5328	5328	0.55	40
<sup>d</sup> GS 4	4.75	0.75	0.25	8.50	17.75	5994	5328	5328	0.64	40
<b>Arbustal</b>										
SH 1	0.63	0.63	0.00	0.38	3.25	6660	5994	5328	0.30	15
SH 2	3.38	6.00	1.88	0.00	9.63	6660	-	5328	0.30	15
SH 3	1.13	7.50	0.00	0.00	15.50	5328	-	4662	0.73	40
SH 4	2.13	2.88	0.50	0.00	6.38	6660	5994	5328	0.91	30
SH 5	9.00	5.25	0.00	0.00	7.25	2497.5	-	5328	1.82	15
SH 6	7.25	3.63	0.00	0.00	3.50	2497.5	-	5328	0.61	30
SH 7	8.75	13.25	5.50	0.00	8.50	2497.5	-	5328	1.82	15
SH 8	5.13	8.50	2.13	0.00	10.88	2497.5	-	5328	0.91	40
<sup>d</sup> SH 9	11.25	6.13	0.00	3.88	17.50	2497.5	-	5328	1.34	40
<b>Mantillo de bosque cerrado</b>										
<sup>d</sup> TU 1	0.50	2.25	3.75	0.50	2.25	6660	5994	5328	0.18	20
TU 2	2.38	4.50	3.13	0.00	0.50	6660	-	5328	0.30	30
<sup>d</sup> TU 3	2.75	0.38	0.63	1.63	2.75	5994	5328	4662	0.39	30
TU 4	11.25	0.00	0.00	0.00	5.00	7659	-	6660	0.15	12
TU 5	10.00	10.00	7.50	0.00	7.50	4995	-	2497.5	0.30	25
<b>Mantillo de bosque abierto</b>										
TL 1	2.50	5.50	9.00	0.00	0.00	6660	-	-	0.06	30
TL 2	3.50	5.75	5.50	0.00	0.00	6660	-	-	0.06	25
TL 3	1.25	5.50	7.00	0.00	0.00	6660	-	-	0.09	20
TL 4	1.25	3.75	10.50	0.00	0.00	6660	-	-	0.12	25
TL 5	2.88	6.25	11.00	0.00	0.00	6660	-	-	0.18	25
TL 6	6.00	3.00	3.00	0.00	0.00	6660	-	-	0.09	25
TL 7	0.75	3.50	20.25	0.00	0.00	6660	-	-	0.12	25
TL 8	14.50	3.50	2.75	0.00	0.00	5994	-	-	0.09	35
TL 9	16.63	8.25	10.38	0.00	0.00	5994	-	-	0.18	35

### 3. Generación de mapa de combustibles

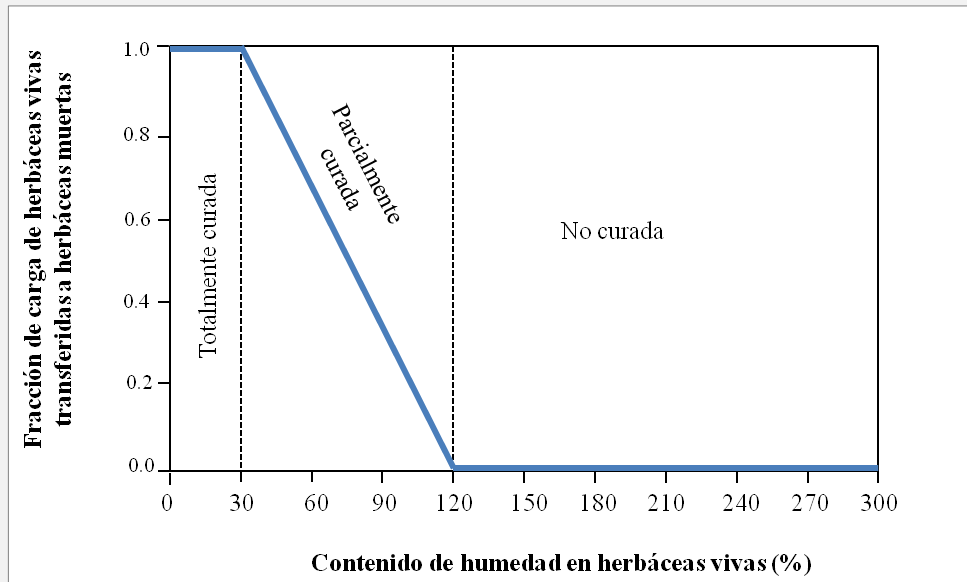
Continuación Tabla 3.2a

Modelo de combust.	Carga de combustible (t/ha)					SAV (1/m)			Altura (m)	H° de extinción (%)
	1 h	10 h	100 h	Vivo H.	Vivo L.	1 h	Vivo H.	Vivo L.		
Residuos forestales										
SB 1	3.75	2.75	27.50	0.00	0.00	6660	-	-	0.30	25
SB 2	11.25	10.63	10.00	0.00	0.00	6660	-	-	0.30	25
SB 3	13.75	6.88	7.50	0.00	0.00	6660	-	-	0.36	25
SB 4	13.13	8.75	13.13	0.00	0.00	6660	-	-	0.82	25

**Tabla 3.2.b.** Modelos de combustibles de Scott & Burgan con los parámetros asociados a cada uno. La estimación de la tasa de propagación del fuego (ROS) y la longitud de la llama (FL) para cada modelo, se realizó asumiendo una velocidad del viento de 8 km/h, un contenido de humedad del combustible muerto de 6%, 7% y 8% para las clases de 1 h, 10 hs y 100 hs, un contenido de humedad del combustible herbáceo y leñoso vivo del 60% y 90 % respectivamente, y pendiente de 0°. Datos tomados de Scott & Burgan (2005) con conversión de las unidades métricas.

Modelo de combustible	*ROS (m/min)	*FL (m)	Modelo de combustible	*ROS (m/min)	*FL (m)
GR 1	1.65-6.60	0.30-1.20	SH 8	6.60-16.50	2.40-3.60
GR 2	6.60-16.50	1.20-2.40	SH 9	6.60-16.50	3.60-7.50
GR 3	6.60-16.50	1.20-2.40	TU 1	0.66-1.65	0.30-1.20
GR 4	16.50-49.50	2.40-3.60	TU 2	1.65-6.60	0.30-1.20
GR 5	16.50-49.50	2.40-3.60	TU 3	6.60-16.50	1.20-2.40
GR 6	16.50-49.50	3.60-7.50	TU 4	1.65-6.60	1.20-2.40
GR 7	16.50-49.50	3.60-7.50	TU 5	1.65-6.60	1.20-2.40
GR 8	16.50-49.50	3.60-7.50	TL 1	0.00-0.66	0.00-0.30
GR 9	>49.50	>7.50	TL 2	0.00-0.66	0.00-0.30
GS 1	1.65-6.60	0.30-1.20	TL 3	0.00-0.66	0.30-1.20
GS 2	6.60-16.50	1.20-2.40	TL 4	0.66-1.65	0.30-1.20
GS 3	6.60-16.50	1.20-2.40	TL 5	0.66-1.65	0.30-1.20
GS 4	6.60-16.50	3.60-7.50	TL 6	1.65-6.60	0.30-1.20
SH 1	0.00-0.66	0.00-0.30	TL 7	0.66-1.65	0.30-1.20
SH 2	0.66-1.65	0.30-1.20	TL 8	1.65-6.60	0.30-1.20
SH 3	0.66-1.65	0.30-1.20	TL 9	1.65-6.60	1.20-2.40
SH 4	6.60-16.50	1.20-2.40	SB 1	1.65-6.60	0.30-1.20
SH 5	16.50-49.5	3.60-7.50	SB 2	1.65-6.60	1.20-2.40
SH 6	6.60-16.50	2.40-3.60	SB 3	6.60-16.50	2.40-3.60
SH 7	6.60-16.50	3.60-7.50	SB 4	16.50-49.50	3.60-7.50

\* ROS de 0.00-0.66 y FL de 0.00-0.30 se considera un valor Muy Bajo. ROS de 0.66-1.65 y FL de 0.30-1.20 se considera Bajo. ROS de 1.65-6.60 y FL de 1.20-2.40 se considera Moderado. ROS de 6.60-16.50 y FL de 2.40-3.60 se considera Alto. ROS de 16.50-49.50 y FL de 3.60-7.50 se considera Muy Alto. ROS mayor a 49.50 y FL mayor a 7.50 se considera Extremo.



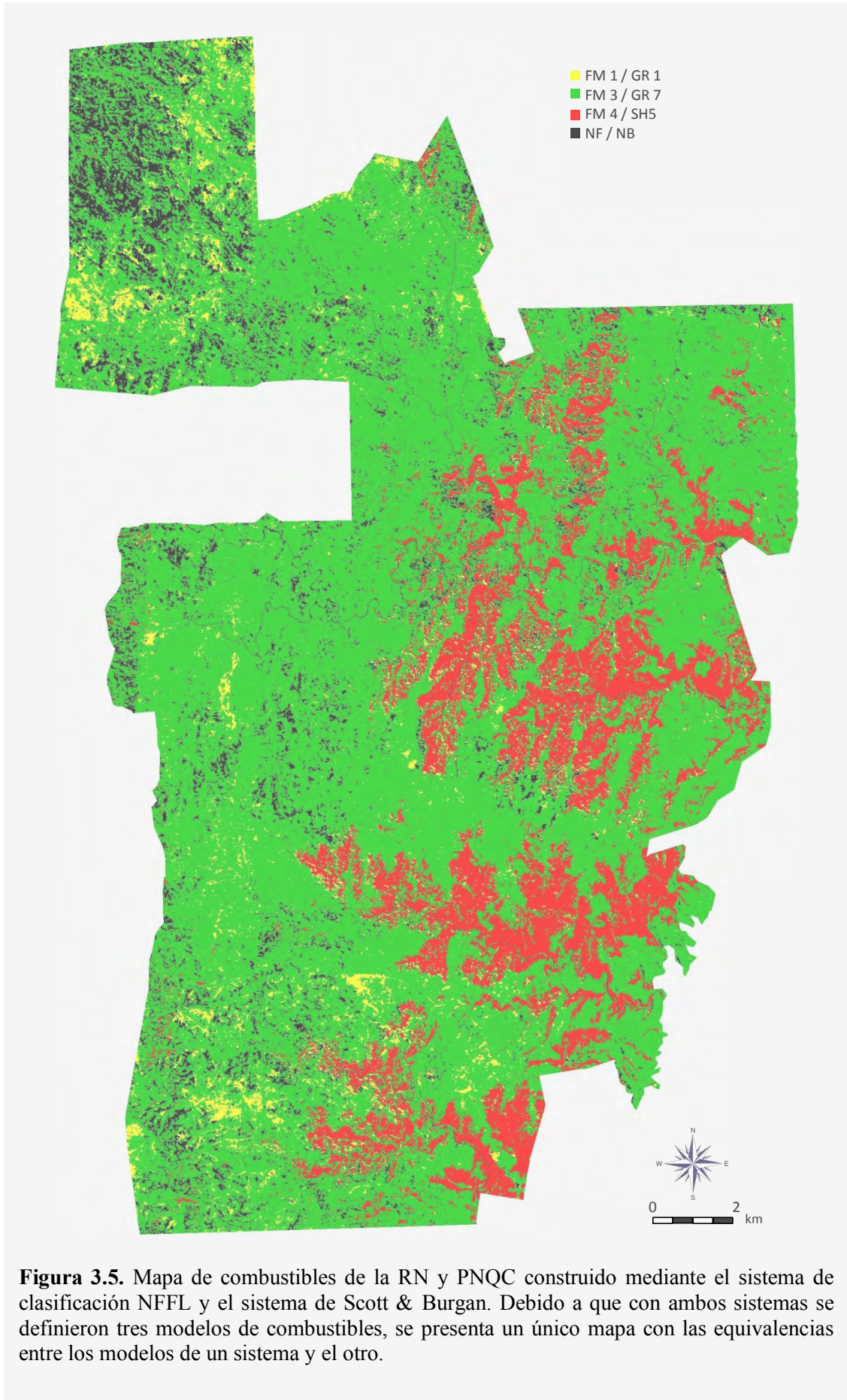
**Figura 3.4.** Representación del sistema de transferencia de la carga de herbáceas vivas a herbáceas muertas empleado en los modelos dinámicos (adaptado de Scott & Burgan 2005).

### 3.3. Resultados

Tanto mediante el sistema de clasificación de Anderson como mediante el sistema de Scott & Burgan, se identificaron tres modelos de combustibles presentes (figura 3.5). En la tabla 3.3 se muestra la asociación de los tipos de coberturas a los modelos de combustibles según el sistema de clasificación de combustibles empleado.

**Tabla 3.3.** Asociación de las clases de cobertura de interés presentes en la RN y PNQC a los modelos de combustibles correspondientes según el sistema de clasificación de combustibles empleado.

Clase de cobertura	Sistema NFFL (Anderson)	Sistema de Scott & Burgan
Matorral/Bosque de Tabaquillos	FM 4	SH5
Pajonal fino	FM 3	GR 7
Pajonal grueso	FM 3	GR 7
Césped	FM 1	GR 1
Pajonal con afloramiento	FM 1	GR 1
Roca/suelo desnudo	NF (no combustible)	NB (no combustible)
Cuerpos de agua	NF (no combustible)	NB (no combustible)



**Figura 3.5.** Mapa de combustibles de la RN y PNQC construido mediante el sistema de clasificación NFFL y el sistema de Scott & Burgan. Debido a que con ambos sistemas se definieron tres modelos de combustibles, se presenta un único mapa con las equivalencias entre los modelos de un sistema y el otro.

La asociación empleando la regla de decisión para los modelos de Anderson fue fácilmente aplicable, sin embargo, clases que por sus características cualitativas encuadran dentro de un mismo modelo, como el pajonal fino y el grueso, según observaciones de campo indican que el fuego se comporta distinto en estas coberturas, tanto en velocidad de propagación como en altura de la llama. Por otro lado, con las clases césped y pajonal con afloramiento no sólo sucede lo mencionado anteriormente, sino que también se cuenta con información de que el fuego avanza en ambas coberturas a una velocidad mucho menor (no supera los 10 m/min) que la registrada en el modelo FM 1 de Anderson, además de que la longitud de la llama definida para este modelo no estaría representando correctamente al césped como modelo de combustible, el cual no suele presentar una llama mayor a 0.50 m.

La adaptación a los modelos de Scott & Burgan fue más complicada, ya que la diferencia entre algunos de sus modelos es muy fina y a nivel de parámetros cuantitativos no detectables a simple vista (como la carga del combustible y datos del comportamiento del fuego), y por lo tanto, no incluidos en las reglas de decisión. En este caso fue más importante el apoyo con las fotografías presentadas para cada modelo de combustible. Además, como ayuda en la elección y también confirmación de los modelos seleccionados del nuevo sistema, se utilizó la tabla de equivalencias propuesta por Scott & Burgan (2005), donde se indica la correspondencia entre los 40 modelos del nuevo conjunto propuesto por ellos y los 13 modelos del sistema NFFL. De esta manera, se tomaron como base los modelos de Anderson que se asignaron previamente a cada clase de interés (asumiéndolos como correctos), para a partir de éstos considerar cuál de los nuevos modelos correspondientes al sistema de Scott & Burgan sería aconsejable seleccionar. En la tabla 3.4 se muestra únicamente el sector de la tabla original necesario para el presente trabajo.

La asociación más simple fue la de las clases pajonal grueso y pajonal fino, ubicando a ambas dentro del modelo con mayor altura del combustible entre los posibles modelos de pastizales presentes en clima árido y semiárido. Como los modelos de Scott & Burgan registran un rango en los parámetros de comportamiento del fuego, y no un valor único como los modelos de Anderson, ambas clases podrían encuadrar bien respecto a la ROS y FL descriptas para el modelo en comparación a las observaciones a campo sobre estas coberturas. Por lo tanto, de acuerdo al criterio de este sistema podría ser correcto incluir los dos tipos de pastizales dentro del mismo modelo. Además, al analizar la tabla de correspondencia entre los modelos de Anderson y los de Scott & Burgan, el único modelo que no pertenece a clima húmedo que puede compararse con el modelo FM 3 es el GR 7 (tabla 3.4).



**Tabla 3.4.** Tabla de correspondencia entre los modelos de Anderson y los de Scott & Burgan. Resumen de la tabla original presentando todos los modelos del nuevo sistema pertenecientes a clima árido-semiárido que pueden equivaler a los modelos del sistema NFFL asignados a las clases de interés. En las celdas se indica el porcentaje de cambio de los modelos originales que puede observarse en los nuevos modelos en cuanto a la velocidad de propagación (ROS) y longitud de la llama (FL).

Modelo de combustible	FM 1	FM 3	FM 4
GR 1	ROS y FL un 50-100% menor. Usar GR 1 si ROS=0-12 m/min y FL= 0-0.6 m.		
GR 2	ROS un 15-50% menor. FL un 0-15% menor o mayor. Usar GR 2 si ROS=13-22 m/min y FL=1-1.4 m.		
GR 4	ROS un 15-50% menor. FL un 100-200% mayor. Usar GR 4 si ROS=13-22 m/min y FL=2.44-3.66 m.		
GR 7	ROS un 0-15% menor o mayor. FL mayor a un 200% más. Usar GR 7 si ROS=21.88-29.60 m/min y FL >3.66 m.	ROS un 0-15% menor o mayor. FL un 15-50% mayor. Usar GR 7 si ROS=29.18-39.46 m/min y FL=4.20-5.50 m.	
SH 5			ROS y FL un 15-50% menor. Usar SH 5 si ROS=12.38-21 m/min y FL= 3.04-4.93 m.
SH 7			ROS y FL un 15-50% menor. Usar SH 7 si ROS=12.38-21 m/min y FL= 3.04-4.93 m.

Uno de los nuevos grupos definidos como principal estrato propagador del fuego en este sistema es el Pastizal-Arbustal, el cual podría representar a la clase matorral/bosque de tabaquillos. Sin embargo, dada la altura de la cama de combustibles asignada a los modelos que abarca y a la comparación con las fotografías representativas de dichos modelos, se decidió asignar este tipo de cobertura a los modelos de arbustal. En función de la regla de decisión creada para el grupo Arbustal, la clase puede ser asociada tanto al modelo SH 5 como al SH 7, con una inclinación hacia el SH 5 (vegetación menos densa) por comparación con las ilustraciones. Al no contar con características determinantes, se recurrió nuevamente a la tabla de correspondencia de modelos observando que ambos, SH 5 y SH 7, pueden ser comparables con el modelo FM 4 de

Anderson aceptando además el mismo porcentaje de cambio (tabla 3.4). Esto implicaría que los dos modelos contengan dentro de su rango de valores de ROS y FL los parámetros descritos para el FM 4, por lo tanto, a partir de este análisis se mantiene la dicotomía. Pero si se compara con el valor puntual de ROS definido para el modelo de Anderson, es decir, sin aceptar un porcentaje de cambio, sería el SH 5 el modelo que mejor se correspondería con el FM 4, ya que dicho valor puntual está incluido dentro del rango de velocidad de propagación estimado para el SH 5. Finalmente, a partir de este último análisis sumado al de las fotografías, se decidió asignar la clase matorral/bosque de tabaquillos al modelo SH 5.

Las clases césped y pajonal con afloramiento tampoco fueron fácilmente asignadas a un modelo por medio de la regla de decisión creada. Esto se debe a que el césped se asociaría el modelo GR1 por la altura, pero no así por la continuidad horizontal que generalmente es alta, mientras que el pajonal con afloramiento se asociaría adecuadamente al GR2 por su altura, pero sin embargo su continuidad horizontal normalmente es baja. Se recurrió entonces a evaluar los parámetros del comportamiento del fuego registrados para los modelos GR 1 y GR 2, y dado que las observaciones de campo para ambas clases se encuentran representadas dentro del rango descrito para el modelo GR1, se asignó a ambas clases a dicho modelo. El análisis de la tabla de equivalencias de modelos confirmó la elección realizada, ya que aún con el porcentaje de cambio aceptable para la ROS y FL de los modelos de Scott & Burgan, la velocidad de propagación del modelo GR 2 sigue siendo muy superior a lo observado a campo (tabla 3.4).

#### 3.4. Discusión

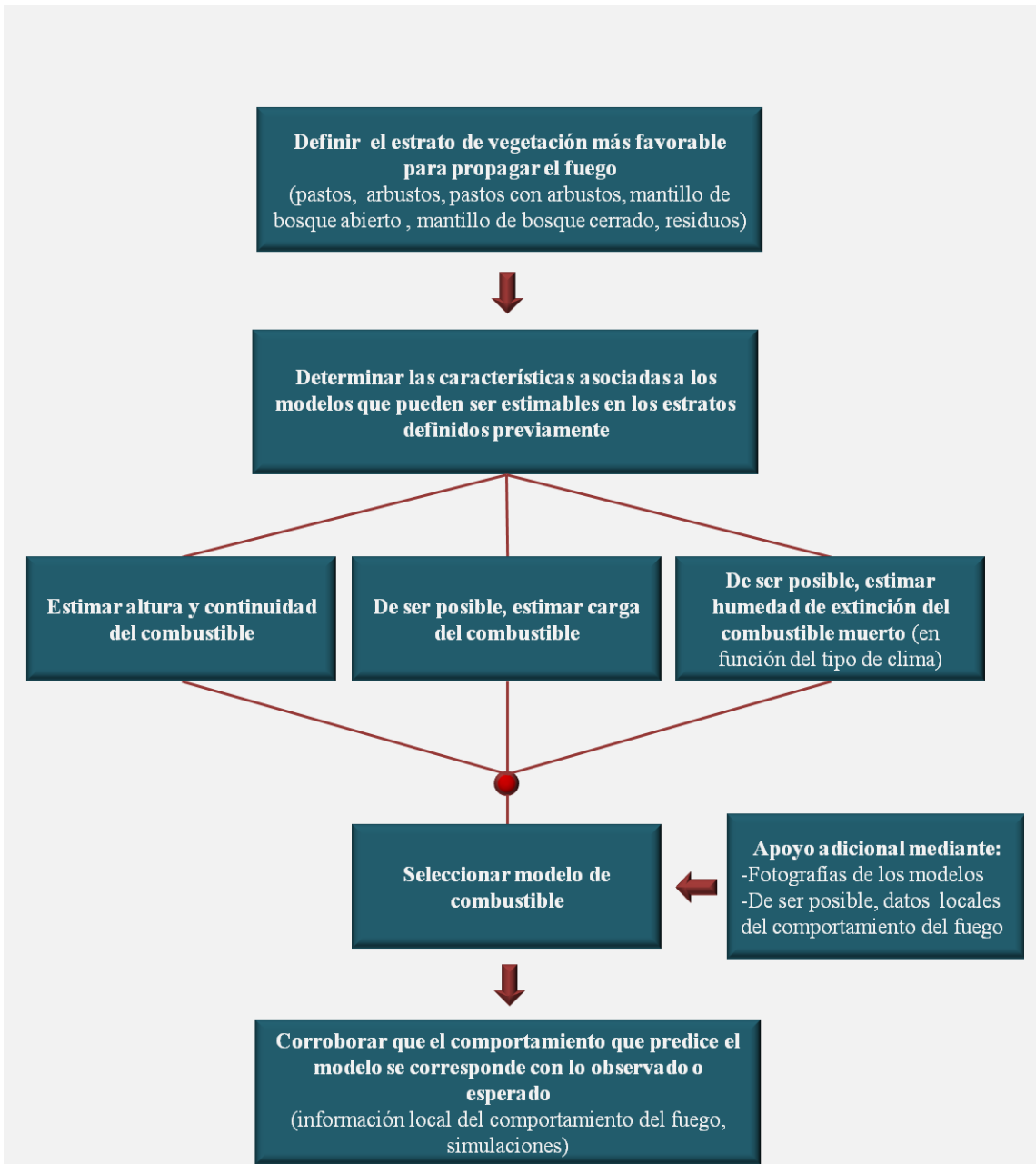
La aproximación a los modelos de Anderson resultó más fácil de realizar mediante reglas de decisión simples basadas en características determinables visualmente, mientras que al emplear el sistema de clasificación de combustibles de Scott & Burgan fue más difícil encuadrar las coberturas a sus modelos, en particular por no contar con información sobre parámetros específicos que los autores asocian y utilizan para diferenciar entre un modelo y otro (para aquellos que no se discriminan mediante variables como altura o continuidad). Así mismo, independientemente del sistema de clasificación empleado, debido a las aparentes diferencias entre los datos de comportamiento del fuego descritos en los modelos seleccionados y las observaciones a campo sobre las coberturas asociadas a dichos modelos, se considera que la asociación a los modelos de combustibles no debería realizarse sólo en función del tipo de vegetación, su altura y continuidad, ya que variables como la humedad del combustible muerto y la distribución de cargas entre combustible vivo y muerto, tienen una fuerte influencia sobre el comportamiento del fuego. Esto queda evidenciado en el momento en que distintas coberturas en las que el fuego se propaga de diferente manera, se corresponden con un mismo modelo, o cuando una cobertura puede ser asignada tanto a un modelo como al otro a partir de las características diferenciables sin relevamiento de campo o experimentación en laboratorio. Por lo tanto, se considera necesario contar al menos con información sobre cómo se comporta el fuego en la vegetación que se desea asociar a un modelo de combustible definido para otra zona. Esta información no sólo podría ayudar en la definición del modelo de combustible más apropiado, sino que también podría alertarnos ante un posible margen de error en estimaciones de comportamiento del fuego (mediante simulaciones por ejemplo) al disponer del

conocimiento previo de que clases donde la velocidad de propagación del fuego difiere, fueron incluidas en un mismo modelo.

Contrario a lo esperado, si bien el sistema de Scott & Burgan presenta una mayor discriminación de modelos, esto no simplificó la asociación de las clases de coberturas a los mimos. Sin embargo, si se dispone de datos de comportamiento del fuego del tipo de vegetación que se quiere asociar a un modelo, la flexibilidad dada por la definición de un rango de valores para la velocidad de propagación y la longitud de la llama podría facilitar la adaptación a estos modelos, en comparación con los valores discretos definidos por el sistema NFFL. Más allá de la complejidad de este sistema de clasificación de combustibles, en el caso de que los modelos de Scott & Burgan sean más representativos de la realidad, si no se dispone de datos cuantitativos, se recomienda utilizar el sistema NFFL para realizar una primera aproximación y luego utilizar la tabla de correspondencias entre los modelos de Anderson y los de Scott & Burgan como apoyo en la selección de los modelos.

En la figura 2.6 se resumen los pasos recomendados a seguir para asociar una cobertura de interés dada a un modelo de combustible ya existente.

A partir de la experiencia obtenida en el presente trabajo, se demuestra que la adaptación de la vegetación local a modelos de combustibles definidos para otras áreas geográficas, no es algo trivial. En la bibliografía consultada en este capítulo, no se han señalado dificultades en las asociaciones a los modelos estadounidenses, pero es necesario tener en cuenta que tampoco se han observado comparaciones entre datos de comportamiento del fuego a campo (locales) y datos definidos en los modelos existentes o la implementación de alguna metodología de validación. Por otro lado, cabe aclarar que en general los modelos de combustibles modificados y adaptados para otras zonas, han sido realizados con el objetivo de incluirlos en índices de riesgo de incendio, por lo que al trabajar con variables categóricas del comportamiento del fuego que apuntan a predecir el riesgo de incendio como bajo, medio o alto, permite una clasificación menos específica y detallada de los combustibles en comparación a lo necesario para la realización de simulaciones de incendios de superficies.



**Figura 3.6.** Metodología recomendada para llevar a cabo la asociación de vegetación local a modelos de combustibles existentes definidos para Estados Unidos.

## CAPÍTULO 4

---

# SIMULACIONES DEL COMPORTAMIENTO DEL FUEGO EN LA GESTIÓN DE INCENDIOS

### 4.1. Introducción

Las simulaciones de incendios forestales son modelos que intentan representar la propagación del fuego en función de las condiciones presentes donde se desarrolla el mismo. Los sistemas de cálculo de incendios incluyen un modelo predictivo del comportamiento del fuego y, en muchos casos, una técnica de simulación que representa la propagación del fuego en terreno. Los modelos del comportamiento del fuego pueden ser físicos (teóricos), físico-estadísticos (semiempíricos), estadísticos (empíricos) o probabilísticos. Los modelos físicos se basan en las características físicas de la combustión y debido a la gran cantidad de datos que requieren, suelen ser complicados de implementar. Los modelos físico-estadísticos, se basan en fórmulas generadas por combinación de la teoría física con datos estadísticos derivados de experimentación, mientras que los modelos estadísticos se basan en su totalidad en ecuaciones armadas a partir de información de campo obtenida durante observaciones de incendios reales o experimentación en laboratorio. Por último, los modelos probabilísticos se basan en tablas de contingencia que permiten simular la probabilidad de propagación del fuego desde un punto a otro. Este modelo, debido a que no se basa en las características del proceso físico de combustión, sólo es aplicable bajo condiciones similares para las que fue desarrollado. Entre los modelos de comportamiento del fuego de superficie de mayor difusión y operatividad, se encuentran el modelo semiempírico de Rothermel, desarrollado en Estados Unidos en 1972, el modelo empírico de McArthur, desarrollado en Australia en 1965, y el modelo empírico del Fire Danger Group, desarrollado en Canadá en 1992. Por otro lado, existen diferentes técnicas de simulación, aquellas que consideran al terreno como una grilla y donde el fuego propaga de una celda a otra de acuerdo a una serie de reglas o probabilidad de ocurrencia (técnica de percolación, técnica de autómatas celulares), y aquellas que consideran al terreno como un medio continuo y emplean funciones matemáticas para modelar la línea de avance del frente de fuego (técnica de propagación elíptica) (Arnaldos Viger *et al.* 2004, Denham 2009).

Existen distintos programas informáticos para el cálculo de la predicción del comportamiento del fuego. Algunos incluyen sólo los modelos matemáticos para la predicción de las características del incendio, como velocidad de propagación del fuego, intensidad del frente de fuego, etc., y otros que, además, incluyen técnicas de simulación numérica que permite representar el avance del frente del fuego sobre el terreno. En la tabla 4.1 se muestran las características generales de los programas informáticos más empleados.

Mediante las simulaciones de incendio es posible predecir el comportamiento de un incendio bajo ciertas características, identificar zonas de mayor riesgo de incendio, predecir los efectos del fuego y priorizar áreas afectadas, constituyéndose así parte de un sistema de soporte de decisión del manejo del fuego. Disponer de un sistema de gestión de incendios contribuye en la mejora de la prevención de incendios y en la toma de decisiones en caso de un incendio real, permite identificar zonas prioritarias de contención, planificar localización y dirección óptima para la construcción de barreras, desarrollar un plan óptimo para la extinción del fuego, y estimar el trabajo que tendrá el cuerpo de bomberos luego de la finalización de la estación de incendios (Bovio *et al.* 2004, Romanovsky *et al.* 2004).

#### 4. Simulaciones del comportamiento del fuego en la gestión de incendios

**Tabla 4.1.** Características generales de algunos programas informáticos desarrollados para el cálculo del comportamiento del fuego de superficie.

Nombre	Modelo matemático	Técnica de simulación	Procedencia
Behave	Semiempírico (Rothermel)	No	Estados Unidos
Cardin	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	España
Csiro Fire Calculation	Empírico (McArthur)	No	Australia
Dynafire	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Estados Unidos
Embyr	Probabilístico (Hargrove)	Percolación	Estados Unidos
Farsite	Semiempírico (Rothermel)	Propagación elíptica	Estados Unidos
FBP	Empírico (Fire Danger Group)	No	Canadá
Firemap	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Estados Unidos
Firestation	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Portugal
Geofogo	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Portugal
Nexus	Semiempírico (Rothermel)	No	Estados Unidos
SiroFire	Empírico (McArthur)	Propagación elíptica	Australia
Sparks	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Suiza
Pfas	Empírico (Fire Danger Group)	Autómata celular	Canadá
Pyrocart	Semiempírico (Rothermel)	Autómata celular	Nueva Zelanda
Wildfire	Empírico (Fire Danger Group)	Propagación elíptica	Canadá

En este capítulo se presentan diferentes metodologías basadas en simulaciones de incendios de superficie, que aportarían en la construcción y definición de planes de gestión de incendios, como así también en etapas de validación de mapas de combustibles.

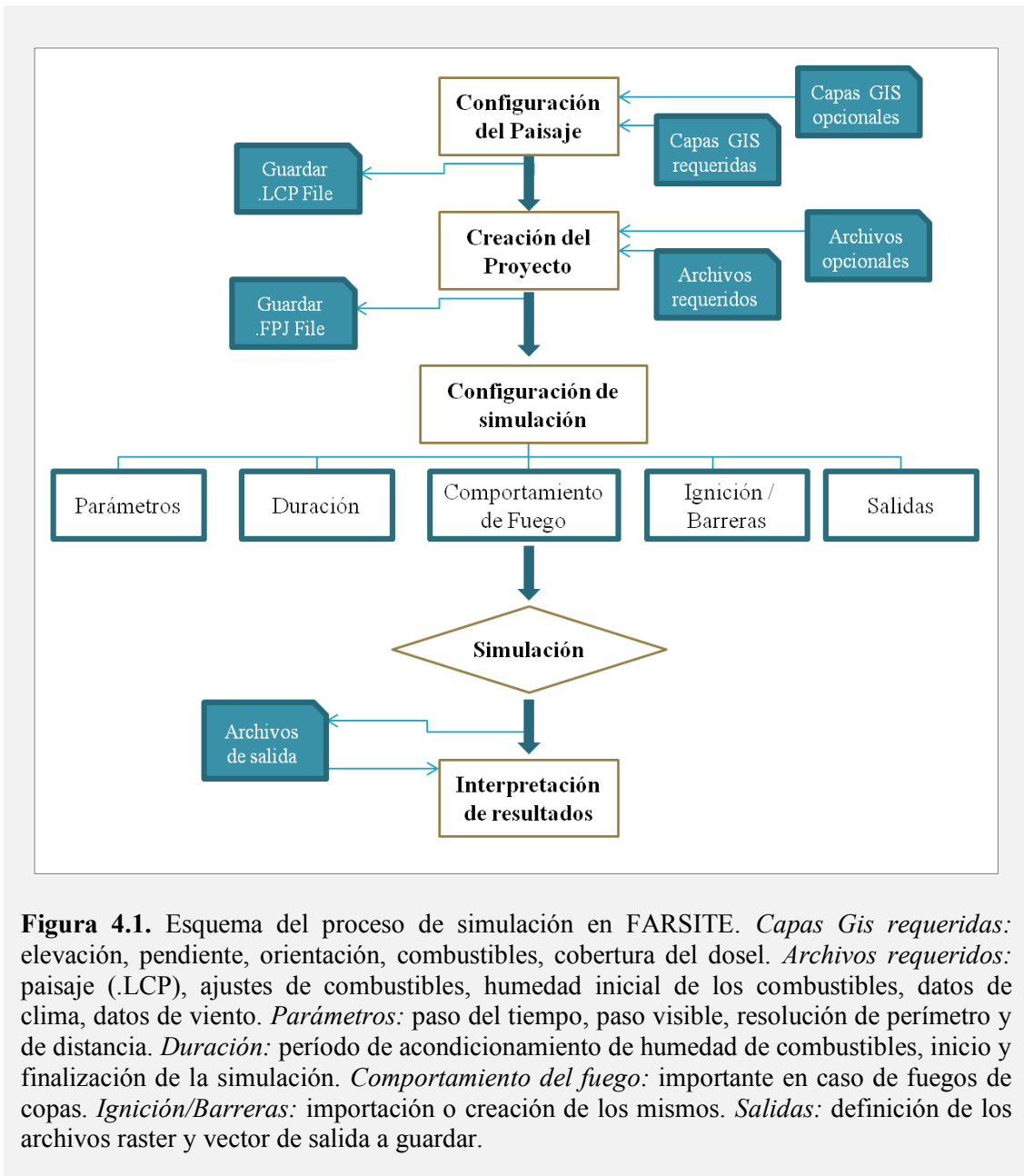


### 4.2. Materiales y Métodos

Se seleccionó el software FARSITE para la realización de simulaciones de incendios de superficie por tratarse de un simulador que ha sido empleado en distintas áreas geográficas, ser versátil a realizar adaptaciones locales debido a que se basa en un modelo semiempírico (la parte teórica del modelo le da cierta flexibilidad) y ser de libre acceso. FARSITE modela el comportamiento y el crecimiento del fuego, asociado a distintos tipos de incendios, mediante la incorporación de información espacial y temporal relacionada al clima, combustibles y topografía, mostrando una progresión animada del fuego sobre el paisaje (Finney 1998). Utiliza el principio de Huygens como modelo de crecimiento del fuego, empleando la técnica de propagación elíptica de Richards (1990) para describir la expansión de una onda elíptica del frente a partir de una serie de vértices que definen el perímetro de un fuego. El modelo de propagación de fuego de superficie que emplea se basa en la ecuación de propagación de Rothermel (1972), la cual computa la tasa de propagación del fuego en un plano paralelo a la superficie del terreno en cada vértice. El modelo de fuego de copas incorporado en el software es el desarrollado por Van Wagner (1977), y determina si el fuego permanecerá ardiendo en los combustibles superficiales o si hará una transición a los combustibles de copa, y en este último caso, si propaga activamente entre las copas de los árboles o si permanece en árboles individuales como antorchas. El modelo de simulación de focos secundarios (spotting) se basa en las ecuaciones de Albini (1979), desarrolladas para árboles ardiendo como antorchas, ya que son una fuente importante de pavesas. Este modelo determina la distancia y localización a donde pueden llegar las pavesas, pero no propaga el fuego que podría desarrollarse en los supuestos focos secundarios.

Si bien FARSITE es capaz de modelar fuegos de superficie, fuegos de copa, focos secundarios y consumo de combustible, este trabajo sólo se enfoca en el modelado de fuego de superficie. Las simulaciones de incendios de superficie arrojan datos de velocidad de propagación del fuego (m/min), longitud de la llama (m), intensidad del frente del fuego (kW/m), intensidad de reacción (kW/m<sup>2</sup>), calor liberado por área (kJ/m<sup>2</sup>), tiempo de arribo del fuego (hs), mapas de humedad del combustible por clase diamétrica, mapas de variables climáticas (temperatura, humedad, intensidad del viento a mitad de la llama y radiación solar) y mapas de combustión post-frontal (debe activarse este modelado).

Uno de los requerimientos básicos para el uso del FARSITE, es que las imágenes correspondientes al paisaje (topografía, combustibles) sean de igual dimensión, presenten la misma resolución espacial y estén proyectadas en coordenadas planas (UTM). El formato de archivo puede ser .asc o .txt. Además precisa al menos un archivo de clima y un archivo de viento (aún cuando se le indique mediante este archivo la ausencia de viento). A continuación se presenta un cuadro resumen de los pasos a seguir para la ejecución de una simulación en el software FARSITE (figura 4.1), pero más especificaciones se detallan en el manual de procedimientos colocado en el Apéndice C al final del documento. En las páginas siguientes se mencionarán conceptos relacionados a la configuración de las simulaciones y, si se lo desea, se puede consultar una descripción más amplia en el manual de procedimientos. Por otro lado, en el Apéndice D, se incluyen las dificultades observadas durante el empleo del software.



#### 4.2.1. Metodología de validación de mapas de combustibles

La construcción de un mapa de combustible precisa de una validación, en particular cuando los combustibles han sido determinados en función a una asociación a modelos de combustibles definidos para otra región. Así, es posible evaluar si el comportamiento del fuego que predicen los modelos está representando fielmente la realidad. Dicha validación puede realizarse mediante simulaciones de dos maneras distintas. La primera aproximación, y más simple, comparando datos conocidos de campo de la velocidad de propagación y longitud de la llama alcanzada por el fuego sobre una cobertura particular con los resultados de simulaciones sobre dicha cobertura. La otra aproximación, aplicable fundamentalmente cuando no se cuenta con datos precisos del comportamiento del fuego a campo, es realizando réplicas de incendios reales mediante software de simulación de comportamiento del fuego y comparando los resultados de

simulaciones en relación a la duración del incendio real y del simulado y al tamaño (superficie afectada) y forma del área quemada. Para este último caso es indispensable disponer de datos precisos de las condiciones meteorológicas durante el desarrollo del incendio real, el punto de ignición del incendio y, en el caso de que haya existido intervención humana para ataque del fuego, conocer el momento (día y hora) y el lugar en donde se hizo presente el grupo de combate del fuego, debiendo considerar la simulación hasta el momento anterior a la intervención humana. En general, la dificultad de contar con todos los datos necesarios mencionados anteriormente, lleva a que la implementación de esta metodología de validación de combustibles sea más complicada de realizar con un alto grado de confiabilidad.

Como se detalla a continuación, en este trabajo se ejemplificó acerca de posibles implementaciones de ambas metodologías, ya que no se contó con la información necesaria para realizar la validación real de los mapas de combustibles construidos.

##### 4.2.1.1. Comparación de predicciones del comportamiento del fuego (velocidad de propagación y longitud de llama) con datos de campo.

En el caso de conocer cuál es el comportamiento del fuego en las distintas coberturas presentes en el área de interés, el procedimiento consiste en evaluar un modelo de combustible a la vez, respetando las condiciones climáticas, la humedad del combustible y las características del terreno asociadas al momento y lugar donde se registraron los datos reales. La condición ideal es disponer de datos tomados en terreno plano o pendiente constante y ausencia de viento o viento con intensidad y dirección constante. Si no se conoce la humedad del combustible, se puede trabajar con porcentajes estimados de humedad utilizando las tablas de escenarios propuestas por Scott & Burgan (2005). Dado que no se dispone de información de campo, se plantearon datos ficticios sobre la velocidad de propagación del fuego y altura de la llama sobre una cobertura particular.

A modo de ejemplo, se evaluó el modelo de combustibles FM 1 correspondiente al sistema de clasificación de Anderson. En la tabla 4.2 se describen las condiciones ficticias bajo las cuales se habrían registrado los datos de campo. A su vez, se plantearon dos maneras de realizar la corroboración de los modelos mediante esta metodología. La primera consistió en llevar a cabo una simulación y analizar sus resultados, mientras que la segunda se basó en el cálculo que permite efectuar el módulo **Custom Surface Fuel Models** de FARSITE.

#### 4. Simulaciones del comportamiento del fuego en la gestión de incendios

**Tabla 4.2.** Datos de campo (ficticios) del comportamiento del fuego asociado a un tipo de cobertura presente en la RN y PNQC. La columna “Condiciones de campo” indica información (ficticia) de pendiente, humedad de la vegetación y viento, presentes al momento del registro de los datos de campo.

Cobertura	ROS	FL	Condiciones de campo	Modelo asociado
Pajonal con afloramiento	5 m/min	1 m	Sin pendiente. Viento de 8 km/h, procedencia sur. Humedad de combustibles correspondiente a escenario de clima seco	FM 1

Para determinar qué diferencia es aceptable entre el dato del comportamiento del fuego observado a campo y el predicho por el modelo, se realizaron dos propuestas. La primera se basa en la tabla de clasificación del comportamiento del fuego planteada por Scott & Burgan (2005) y presentada abajo (tabla 4.3). Para este caso, si tanto el valor observado como el predicho pertenecen a una misma clase, entonces puede considerarse que la asociación modelo-cobertura es adecuada. La segunda propuesta, consiste en trabajar con un valor medio y un rango de variación posible de ROS y FL, con el objetivo de tener una visión más acorde con la realidad. Si el valor observado/predicho se encuentra dentro de este rango (considerado como dos desvíos estándar), el modelo estaría prediciendo el comportamiento del fuego en la vegetación local. La desviación estándar es una medida de cuánto se desvían los datos de su valor medio, y el empleo de dos desvíos estándar como límite refleja la dispersión aceptada respecto a la media, dando una confianza de que el 95% de los datos que se encuentren dentro de ese rango de valores pertenecen realmente a esa clase.

**Tabla 4.3.** Categorización del comportamiento del fuego según su velocidad de propagación y la longitud de su llama (Scott & Burgan 2005).

Clase	ROS (m/min)	FL (m)
Muy bajo	0.00-0.66	0.00-0.30
Bajo	0.66-1.65	0.30-1.20
Moderado	1.65-6.60	1.20-2.40
Alto	6.60-16.50	2.40-3.60
Muy alto	16.50-49.50	3.60-7.50
Extremo	>49.50	>7.50

#### 4.2.1.2. Comparación de predicciones de comportamiento (área quemada) con datos de campo.

Se realizó una réplica del incendio ocurrido el 12 de julio del 2009 en el PNQC, mediante simulaciones en el software FARSITE, por tratarse del incendio del cual se consiguió una imagen real del área afectada. La información relacionada al mismo fue proporcionada por el Guardaparque Germán Jaacks, del Departamento de Conservación del PNQC (tablas 4.4 y 4.5). La figura 4.2 muestra la imagen de la superficie afectada por el fuego y la localización del punto de ignición.

#### 4. Simulaciones del comportamiento del fuego en la gestión de incendios

**Tabla 4.4.** Características del incendio ocurrido en Ensenadas, área al norte del PNQC, el día 12 de julio del 2009. Fuente: archivo de incendios del PNQC, datos compilados por Germán Jaacks, Departamento de Conservación del PNQC.

Causa	Coordenadas del punto de ignición	Inicio/Extinción	Intervención humana	Área Quemada
Humana	Lat 31°36'44.09''S Lon 64°48'12.29''O	12/07/09 a las 15 hs al 14/07/09 a las 18 hs	12/07/09 a las 15:45 hs. Sin información sobre la ubicación.	1142 ha. Aproximadamente el 80% se quemó durante el primer día.

**Tabla 4.5.** Datos meteorológicos registrados a las 12 hs durante los tres días que duró el incendio. Se indica también la hora en que se registró rotación del viento y su nueva dirección de procedencia. Registro meteorológico del PNQC.

	Día 1	Día 2	Día 3
<b>Temperatura (°C)</b>	14.40	11.3	12
<b>Humedad (%)</b>	12	28	30
<b>Precipitaciones (mm)</b>	0	0	0
<b>Intensidad del viento (km/h)</b>	21	0	35
<b>Procedencia del viento</b>	Norte	-	Noroeste
<b>Registro de rotación del viento</b>	18 hs - Suroeste	2 hs - Sur	7 hs - Noreste

Durante el primer día del incendio se registró una altura de la llama mayor a 15 m, y la velocidad de propagación observada antes de la supresión fue de 30 m/min. Los días siguientes, el avance del fuego fue muy lento. Las tareas de supresión implicaron un ataque inicial con equipo de agua slip-on de 500lts, bombas de espalda, chicotes y pulasky. En ataque ampliado se utilizaron contrafuegos, quemas de ensanche, líneas húmedas y líneas con herramientas de zapa.

Debido a que los datos meteorológicos locales fueron insuficientes como para armar los archivos de clima a ingresar en la simulación (carencia de datos de temperatura y humedad mínimas y de registro del viento con alta periodicidad diaria), se empleó información meteorológica proveniente del modelo en cadena GFS-WRF (Global Forecast System - Weather Research and Forecasting), implementado en el Instituto Gulich por el Lic. Andrés Lighezzolo como parte de la Tesis de Maestría "Integración de modelos numéricos de predicción meteorológica en sistemas de alerta temprana a emergencias". Las variables generadas fueron intensidad y dirección del viento (a 10m de altura), cobertura nubosa, precipitación, temperatura y humedad. Los datos presentan una resolución de 30 km y se obtiene un valor por hora.



**Figura 4.2.** Recorte de imagen obtenida de Google Earth correspondiente al 23 de agosto del 2009, donde se aprecia el área afectada (color gris oscuro a negro) por el incendio del 12 de julio del 2009. Zoom del área quemada indicando con un ícono el punto de inicio del fuego. En la esquina superior izquierda se muestra una imagen con la localización del incendio dentro del PNQC, definiéndose el perímetro del Parque mediante la línea roja .

Los datos del WRF ingresados en los archivos relacionados al clima pueden observarse en las tablas 4.6 y 4.7. Se introdujeron datos desde un día previo al inicio del incendio para poder realizar el período de acondicionamiento de la humedad de los combustibles. Los datos de viento fueron ingresados en un período que varió entre 1 y 4 hs.

**Tabla 4.6.** Configuración del archivo .wtr de FARSITE. Datos de clima obtenidos del WRF correspondientes a un día antes al inicio del incendio y hasta la extinción del mismo. Hs mín. / máx. se refiere a la hora en que se registró la temperatura mínima y la máxima, respectivamente.

Día	Pp	Hs mín./ máx.	T° mín. / máx.	H° máx./ mín.	Elevación
11/07	0 mm	2hs /16hs	-2°C / 07°C	73% / 30%	0 m
12/07	0 mm	2hs /15hs	2°C / 12°C	57% / 19%	0 m
13/07	0 mm	8hs /12hs	-1°C / 5°C	84% / 34%	0 m
14/07	0 mm	1hs /13hs	-2°C / 5°C	58% / 35%	0 m

#### 4. Simulaciones del comportamiento del fuego en la gestión de incendios

**Tabla 4.7.** Configuración del archivo .wnd de FARSITE. Datos de viento y nubosidad obtenidos del WRF correspondientes a un día antes al inicio del incendio y hasta la extinción del mismo.

Día	Hora (h)	Intensidad del viento (km/h)	Dirección del viento (°)	Nubosidad (%)
<b>11/07</b>	00	18	203	0
	04	22	217	0
	08	20	212	0
	12	16	223	0
	16	10	249	0
	20	09	222	0
<b>12/07</b>	00	05	250	0
	04	11	266	0
	08	20	271	0
	12	30	278	0
	14	29	278	0
	15	27	278	0
	16	25	278	0
	18	14	268	0
	20	19	246	0
	22	17	222	0
<b>13/07</b>	00	16	190	0
	04	33	155	0
	08	21	162	0
	10	19	168	0
	12	19	184	0
	14	18	209	0
	16	17	208	0
	18	09	189	0
	20	03	197	0
	22	05	216	0
<b>14/07</b>	00	06	231	0
	04	11	228	0
	08	08	224	0
	10	09	235	5
	12	06	306	12
	14	05	080	17
	16	07	069	26
	18	05	046	31
	20	09	015	23

Una vez realizadas las simulaciones como réplicas del incendio real, se pueden contrastar los resultados analizando las diferencias mediante comparación visual de las áreas quemadas y el nivel de concordancia de píxeles quemados y no quemados entre la imagen resultante de la simulación y la imagen del área quemada real, similar a lo propuesto por Salis (2008) y por De Abelleira *et al.* (2009). La metodología consiste en clasificar ambas imágenes en “quemado” y “no quemado”, para lo cual las imágenes deben presentar el mismo tamaño (igual número de filas y columnas). A las imágenes obtenidas de las clasificaciones realizadas en ENVI, se le aplicó el módulo de control de cambios de este mismo software. Como resultado de esto, se puede disponer de imágenes que indican zonas de cambio, es decir, diferencias de área quemada y no



quemada entre el incendio real y el simulado, y una tabla o matriz donde se registra el acuerdo existente entre las clases, ya sea en número de píxeles, en porcentaje o en área. Como medida estadística para validar los resultados, se empleó la precisión total, conocida también como fiabilidad global (ecuación 4.1).

**Ecuación 4.1**

$$FG = \frac{\sum_{i=1,n} x_{ii}}{\sum_{i=1,n} \sum_{j=1,n} x_{ij}}$$

Donde,

$x_{ii}$  = Elementos de la diagonal principal de la matriz

$x_{ij}$  = Cada elemento de la matriz

**4.2.2. Empleo de simulaciones en el planeamiento de actividades de control del fuego**

**4.2.2.1. Categorización de zonas de un incendio de acuerdo a su posibilidad de ataque.**

Andrews & Rothermel (1982) interpretan, de acuerdo a la longitud de la llama y a la intensidad del frente de fuego, el tipo de supresión que se consideraría adecuada para un incendio particular (tabla 4.8). En base a esta información, se propone clasificar el resultado de simulaciones de incendios de superficie para identificar áreas de menor riesgo para combatir el fuego.

Se simularon dos escenarios distintos para observar cómo puede variar el tipo de ataque posible y las zonas seguras para la localización del grupo de combate de acuerdo a las condiciones en las que se presenta el incendio. En ambos casos las simulaciones tuvieron el mismo punto de ignición, igual humedad inicial de los combustibles, y temperatura y humedad ambiente. La diferencia radicó en que en la segunda simulación se consideró un viento de procedencia Este de 10 km/h.

**Tabla 4.8.** Interpretación de la supresión del fuego en función de la longitud de la llama (FL) y la intensidad del frente de fuego (Andrews & Rothermel 1982).

FL (m)	Intensidad (kW/m)	Interpretación
<1.22	<345.9	El fuego generalmente puede ser atacado por el frente o los flancos usando herramientas de mano (Ataque directo).
1.22-2.44	345.9-1729.5	El fuego es muy intenso para realizar ataque directo por el frente. Se recomienda emplear arado, topadora, autobomba, retardantes (Ataque indirecto).
2.44-3.35	1729.5-3459	El fuego puede presentar serios problemas de control, como spotting, antorcheo o fuego de copas. Se recomienda ataque aéreo.
>3.35	>3459	Los esfuerzos de control en el frente de fuego son inefectivos.

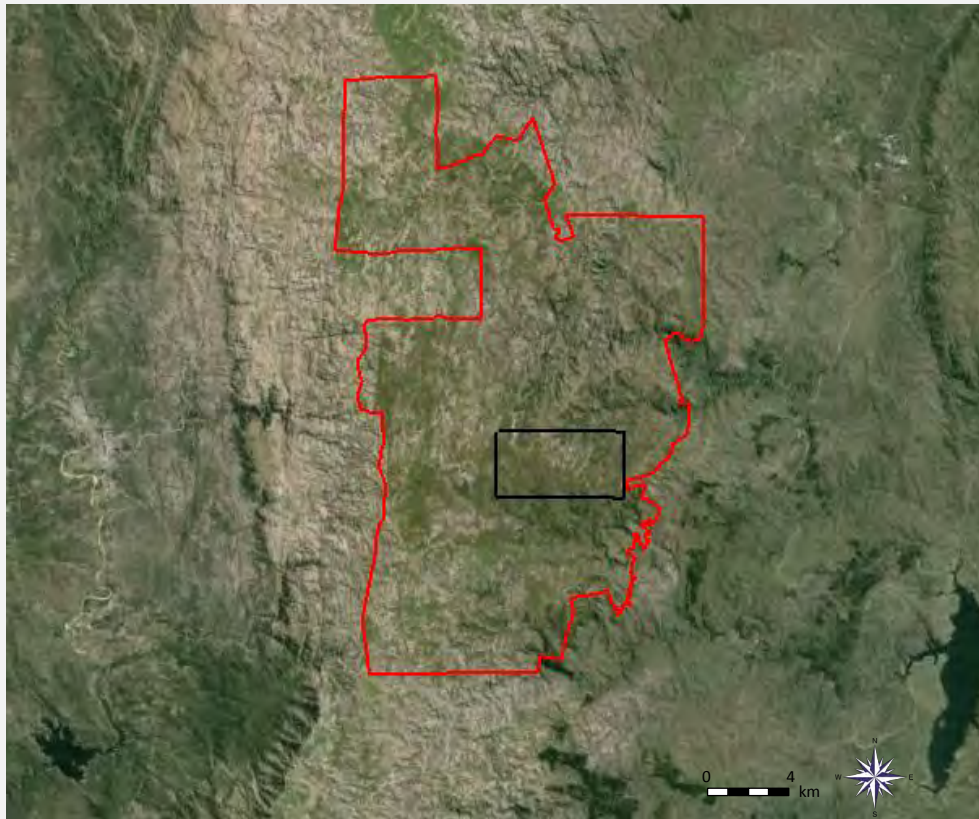
Siguiendo esta misma metodología, es posible realizar simulaciones de prueba para determinar cuáles serían las condiciones ideales para la realización de quemas prescritas sin someterse a un alto riesgo, tanto para el cuerpo de bomberos como para el ambiente. Evaluar los escenarios bajo los cuales el fuego puede ser mantenido fácilmente bajo control, implica determinar las condiciones meteorológicas y condiciones del combustible recomendables (intensidad y dirección del viento, humedad y temperatura ambiente, tipo y humedad de los combustibles) en el momento de la quema, como así también la topografía del área sobre la cual se lleve a cabo el proceso.

##### 4.2.2.2. Barreras cortafuegos: localización y ancho.

Las barreras cortafuegos cumplen un rol muy importante en el manejo del fuego, ya que proveen una zona segura para efectuar procedimientos de supresión de un incendio, como así también pueden actuar por sí mismas como un limitante para el avance del fuego en superficie. La ubicación de estas barreras debe realizarse en los lugares de mayor riesgo o con mayor ocurrencia de incendios, por lo cual deberá considerarse el tipo de combustible presente en el lugar, las características del terreno, las condiciones climáticas de la época de incendios y las causas más frecuentes del origen de incendios (Rodríguez 2003). El ancho del cortafuego influye en la factibilidad de que las llamas pasen de un bloque de vegetación a otro, y algunos de los métodos empleados para la determinación del ancho apropiado se encuentran en función del terreno, definiendo el ancho de acuerdo a una categorización de la pendiente (Rodríguez 2003), o en función a la altura del combustible, aplicándole a la misma un factor multiplicativo de 1.5 (Mari 2014 [com.pers.]).

Disponiendo de información sobre las condiciones climáticas típicas durante la estación de fuego de un área de interés (temperatura, humedad, dirección de procedencia del viento) y contando con un mapa de riesgo de ignición, se pueden emplear las simulaciones de incendios para determinar zonas propicias de localización de barreras cortafuegos. La metodología consiste en realizar simulaciones a partir de cada punto de ignición presente en el mapa de riesgo de ignición, para luego determinar las zonas comunes a todas las simulaciones generadas en donde el comportamiento del fuego fue más peligroso, es decir, donde representaría una amenaza de no poder ser contenido por personal en terreno. Los sitios en donde el incendio es siempre más peligroso, independientemente de la ubicación de la fuente de ignición, serán los más apropiados para la ubicación de barreras cortafuegos.

El área seleccionada para ejemplificar esta metodología, se correspondió a una zona de alto valor ecológico del PNQC debido a la presencia de bosques y matorrales de tabaquillos (figura 4.3). Ya que lo que se pretende es proponer una metodología, se trabajó con datos ficticios sobre las condiciones climáticas del área y mapa de riesgo de ignición.



**Figura 4.3.** Área seleccionada para evaluar la localización óptima de una barrera cortafuego mediante simulaciones de incendio. El rectángulo negro indica una zona de bosque de tabaquillos (*Polylepis australis*) dentro del PNQC, importante por su elevado valor de conservación.

Para la estimación del ancho mínimo que debe tener una barrera cortafuego para asegurar su efectividad, se aplicó un método basado en la transferencia de calor por radiación de un frente de fuego, empleando el modelo del cuerpo sólido, y desarrollando un código en IDL para su implementación (ver Apéndice A, Código *Estimación ancho mínimo de barrera*). El método consiste en determinar si el calor transmitido por radiación de un frente de fuego iguala o supera el calor de ignición del combustible que se encuentra al otro lado de la barrera. Si esto sucede, se considera que el ancho de la barrera no es efectivo, ya que el combustible alcanzará su temperatura de ignición y entrará en combustión.

El mecanismo de radiación, junto con el de convección, son los responsables de transmitir la mayor parte de energía calorífica generada en un incendio, interviniendo en el proceso de precalentamiento de los combustibles aumentando su energía térmica. De acuerdo a lo citado por Arnaldos Viger (2004), el modelo de radiación del cuerpo sólido considera la fuente de radiación como un cuerpo de geometría determinada que emite radiación uniformemente por toda la superficie. El flujo de calor incidente sobre un receptor situado a una cierta distancia de la llama se calcula mediante la ecuación 4.2.

##### Ecuación 4.2

$$Q_r = E_p \tau F$$

Donde,

$E_p$  = Poder emisor medio de la llama (kW/m<sup>2</sup>)

$\tau$  = Transmisividad atmosférica (adimensional)

$F$  = Factor de vista (adimensional)

El *poder emisor medio de la llama* se calcula en función de la emisividad y temperatura de la llama (ecuación 4.3), considerándose el poder emisor medio de la llama de un incendio forestal entre 25 y 100 kW/m<sup>2</sup> (Arnaldos Viger 2004).

##### Ecuación 4.3

$$E_p = \sigma \varepsilon T_f^4$$

Donde,

$\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann (5.67 x 10<sup>-11</sup> kW.m<sup>-2</sup>.K<sup>-4</sup>)

$\varepsilon$  = Emisividad (adimensional). Suele situarse en 0.8 ± 0.2

$T_f$  = Temperatura de la llama (°K). Suele situarse entre 1073 y 1373°K (800 y 1100°C)

La *transmisividad atmosférica* es la fracción de energía emitida por la llama que no es absorbida o dispersada por la atmósfera. Para su cálculo, se empleó la ecuación 4.4, la cual incluye el efecto de la variación de la humedad ambiente.

##### Ecuación 4.4

$$\tau = 2.02 (\bar{p}_w x)^{-0.09}$$

Donde,

$\bar{p}_w$  = Presión parcial del vapor de agua (Pa)

$x$  = Distancia entre la fuente emisora y el receptor (m)

La presión parcial del vapor de agua se calcula como se indica en la ecuación 4.5.

##### Ecuación 4.5

$$\bar{p}_w = \frac{p_w^0 H_R}{100}$$

Donde,

$p_w^0$  = Presión de vapor de agua a la temperatura del aire ambiente (Pa).

$H_R$  = Humedad relativa del aire ambiente (%)

Para el cálculo de la presión de vapor de agua a la temperatura ambiente se empleó la ecuación 4.6.

##### Ecuación 4.6

$$p_w^0 = \left( 10^{8.07131 - \left( \frac{1730.63 B}{233.426 + T} \right)} \right) 133.322$$

Donde,

$T$  = temperatura del aire ambiente (°C)

El *factor de vista* se define como la fracción del flujo de energía total emitida por la superficie de un cuerpo radiante, que incide directamente la superficie de un receptor ubicado a una cierta distancia. Depende de la forma geométrica del emisor, de la distancia entre emisor y receptor y de la orientación del receptor. En este trabajo se consideró el frente del fuego como una superficie rectangular y al objeto receptor (combustible) como una superficie vertical, por lo que el cálculo del factor de vista se realizó mediante la ecuación 4.7.

##### Ecuación 4.7

$$F = \frac{1}{2\pi} \left[ h_r A \arctg A + \frac{B}{h_r} \arctg B \right]$$

El cálculo de  $h_r$ ,  $A$  y  $B$ , se indican en las ecuaciones 4.8, 4.10 y 4.11 respectivamente.

##### Ecuación 4.8

$$h_r = \frac{L \cos \Phi}{b}$$

Donde,

$L$  = Longitud de la llama (m)

$\Phi$  = Ángulo de inclinación de las llamas respecto al eje vertical (radianes)

$b$  = Ancho del frente del fuego (m)

En el cálculo es considerado el ángulo de inclinación de la llama, porque esto afectaría la distancia existente entre el emisor (frente de fuego) y el receptor (combustible al otro lado). Este fenómeno se observa en presencia de viento, donde aumenta la inclinación de la llama, y por lo tanto disminuye la distancia emisor-receptor, a medida que

aumenta la velocidad del viento. El cálculo del ángulo de inclinación de la llama en función de la velocidad del viento se indica mediante la ecuación 4.9, donde el ángulo es considerado en relación a la horizontal, por lo que  $\Phi$  sería el complementario de  $\psi$ .

**Ecuación 4.9**

$$\psi = \arctg \left[ 2.24 \left( \frac{L}{v_w^2} \right)^{0.5} \right]$$

Donde,

$v_w$  = Velocidad del viento (m/s)

**Ecuación 4.10**

$$A = \frac{1}{\sqrt{h_r^2 + x_r^2}}$$

Donde,

$$x_r = \frac{x - (L \text{ sen } \Phi)}{b}$$

**Ecuación 4.11**

$$B = \frac{h_r}{\sqrt{1 + x_r}}$$

El calor de ignición  $Q_{ig}$  de un combustible (kJ/kg), es definido por Rothermel (1972) como la cantidad de calor requerido por unidad de masa de combustible para generar su ignición (ecuación 4.12). Dado que es necesario conocer cuál sería el calor de ignición para el combustible presente por unidad de área, se construyó la ecuación 4.13, donde el  $Q_{ig}$  es multiplicado por la carga de combustible para obtener la variable  $Q_{igA}$  (kJ/m<sup>2</sup>). Esto sería la cantidad de calor necesario por unidad de área para que un combustible con una determinada carga entre en ignición.

**Ecuación 4.12**

$$Q_{ig} = (250 + 1.16 M_f) 2.3259$$

Donde,

$M_f$  = Humedad del combustible muerto (adimensional).

**Ecuación 4.13**

$$Q_{igA} = Q_{ig} W_0^{1h}$$

Donde,

$W_0^{1h}$  = Carga de combustible muerto de la clase 1h (kg/m<sup>2</sup>).

Para la estimación de cuánto tiempo se encontrará el frente de fuego radiando calor, se empleó el concepto de tiempo de residencia de la llama en la partícula de combustible,  $t_R$  (Arnaldos Viger 2004). Este concepto se aplica cuando el combustible es homogéneo (como sucede para cada píxel del mapa de combustibles) y se refiere al tiempo durante el cual el combustible se mantiene ardiendo con presencia de llama. Está relacionado con las características físicas del combustible, como el diámetro medio de la partícula y la relación superficie-volumen. Así, se generó una nueva variable,  $Q_{rT}$  (kJ/m<sup>2</sup>), que representa el calor total radiado por un frente de fuego (ecuación 4.14).

**Ecuación 4.14**

$$Q_{rT} = Q_r t_{Rc}$$

Donde,

$t_{Rc}$  = Tiempo de residencia de la llama en la partícula de combustible, correspondiente a un modelo de combustible particular (s).

Los valores que se emplearon para el tiempo de residencia fueron los determinados por Fahnestock (1970) en función del diámetro de la partícula de combustible (en Arnaldos Viger 2004). A cada modelo de combustible se le asignó un tiempo de residencia calculado como la sumatoria de los tiempos de residencia de cada clase diamétrica presente en el modelo, ponderando cada clase con su carga de combustible asociada (ecuación 4.15).

**Ecuación 4.15**

$$t_{Rc} = \sum_i t_{Ri} \frac{W_{0i}}{W_{0T}}$$

Donde,

$i$  = Clases diamétricas presentes en el modelo de combustible

$t_{Ri}$  = Tiempo de residencia de la llama en la partícula de combustible, según clase diamétrica (s).

$W_{0i}$  = Carga de combustible por clase diamétrica (kg/m<sup>2</sup>).

$W_{0T}$  = Carga de combustible muerto total en el modelo de combustible (kg/m<sup>2</sup>).



Las consideraciones del método propuesto se mencionan a continuación:

- Sólo tiene en cuenta el calor transmitido por radiación por parte del frente de fuego (emisor).
- No considera la posibilidad de nuevos focos de ignición producto de generación de pavesas por el frente de fuego.
- El frente de fuego se considera como una superficie rectangular.
- Dado que se evalúa al frente de fuego al llegar a una barrera cortafuego, en este punto se considera que permanece estacionario.
- El tiempo que se considera que el frente de fuego permanece transmitiendo calor, es igual al tiempo de residencia de la llama en la partícula de combustible. Este último se encuentra determinado en función de la carga de las clases diamétricas del combustible que se encuentra ardiendo.
- El ancho del frente del fuego es considerado igual a la resolución espacial del mapa de combustibles, y por lo tanto, a la resolución espacial de las simulaciones de incendios de superficie.
- Considera el efecto del viento sobre la distancia emisor-receptor.
- No incluye la fórmula para el cálculo del poder emisor medio de la llama. Esta información debe ser ingresada como un valor conocido o estimado.
- El combustible (receptor) que se somete al calor transmitido por el frente de fuego, se encuentra orientado en línea perpendicular a la línea del frente de fuego.
- El combustible que recibe el calor radiado es asumido como una superficie vertical.
- El combustible más fino será el que menor calor requiera para encenderse. Por esta razón, se considera la carga de combustible y la humedad de combustible correspondiente a la clase diamétrica con tiempo de respuesta de 1h (menor 0.65 cm de diámetro) para el cálculo del  $Q_{igA}$ .
- La información relacionada a los combustibles (carga por clase diamétrica y humedad) se basa en los modelos descritos por Anderson. Sin embargo, no implica complicaciones modificar estos valores por datos locales provenientes de modelos personalizados.
- Las condiciones dentro de un píxel se consideran homogéneas, tanto para las variables asociadas al combustible como para las asociadas al comportamiento del fuego.
- La estimación del calor radiado y el calor recibido se realizan ambos sobre el área (píxel) por el cual pasa la barrera. Se considera que la barrera se ubica en el centroide del píxel al cual arriba el frente del fuego.
- La distancia entre emisor-receptor no supera la resolución espacial del mapa de combustibles, siendo aplicable el método a nivel subpíxel. De lo contrario, determinar cuál sería el píxel que se encuentra perpendicular a la línea del frente de fuego, implicaría cálculos más complejos. Sin embargo, el método puede aplicarse en la evaluación de distancias mayores a la resolución del píxel cuando el área es homogénea (combustible homogéneo y topografía poco accidentada).
- La implementación se llevó a cabo asumiendo el empleo de resultados de simulaciones de incendio como datos de entrada (longitud de la llama y humedad del combustible), pero el método también admitiría trabajar con datos registrados a campo.
- El método permite estimar cuál es el ancho mínimo recomendable de una barrera ubicada (o a ubicar) dentro del área comprendida por un píxel, considerando las características de un fuego que arde sobre el combustible presente en ese píxel y las características propias de ese combustible.

### 4.3. Resultados

#### 4.3.1. Metodología de validación de mapas de combustibles

##### 4.3.1.1. Comparación de predicciones del comportamiento del fuego (velocidad de propagación y longitud de llama) con datos de campo.

Se generaron en ENVI las variables elevación, pendiente y orientación asumiendo un terreno plano. Los archivos fueron exportados a formato ESRI ASCII GRID para ser leídos en FARSITE. El archivo de combustible y de cobertura del dosel fue indicado como constante durante la construcción del paisaje en FARSITE.

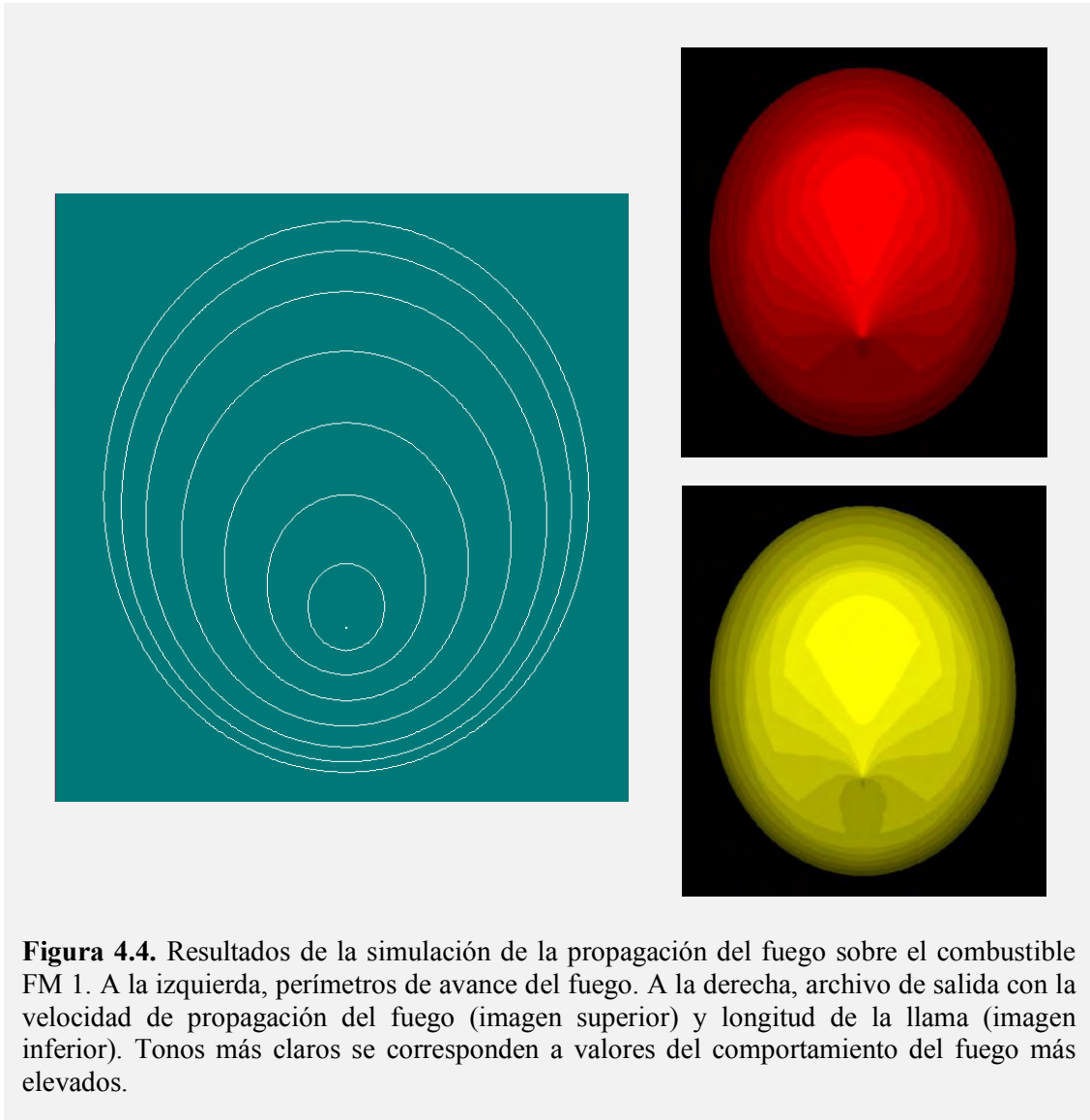
La simulación fue configurada como se muestra en la tabla 4.9.

**Tabla 4.9.** Configuración de la simulación y variables de entrada para la ejecución de la misma. Los datos ingresados de intensidad y dirección de procedencia del viento, son considerados por FARSITE como medidos a 10 m de altura. Los valores de temperatura y humedad corresponden a los mínimos y máximos promedios para agosto en la zona de estudio. La humedad inicial del combustible se corresponde a un escenario de humedad bajo, de acuerdo a lo definido por Scott & Burgan (2005).

Variables del Paisaje				
Elevación	Pendiente	Orientación	Combustible	Cobertura del dosel
0 m	0°	0°	FM 1	0%
Variables climáticas				
Viento	Hs mín. /Hs máx.	T° mín. /T° máx.	H° máx. / H° mín.	Precipitación
8 km/h - 180° (sur)	5 hs / 15 hs	-2°C / 15°C	60% / 20%	0 mm
Humedad inicial del combustible				
1 h	10 h	100 h	Herbáceo vivo	Leñoso vivo
6 %	7%	8%	60%	90%
Simulación				
Día/Mes	Inicio/Fin	Período de Acondicionam.	Paso de tiempo/visible	Resol. Perim./Dist.
13/08	7hs / 21 hs	Activado	20 min/ 2hs	30 m/30m

Una vez realizada la simulación, se visualizaron en FARSITE los archivos de salida referidos a información sobre el comportamiento del fuego. Si bien es posible analizar datos de velocidad de propagación, longitud de la llama, intensidad del frente de fuego, tiempo de arribo y calor liberado por unidad de área, en este caso se trabajó sólo con la velocidad de propagación y la longitud de la llama (figura 4.4). Consultando sobre la

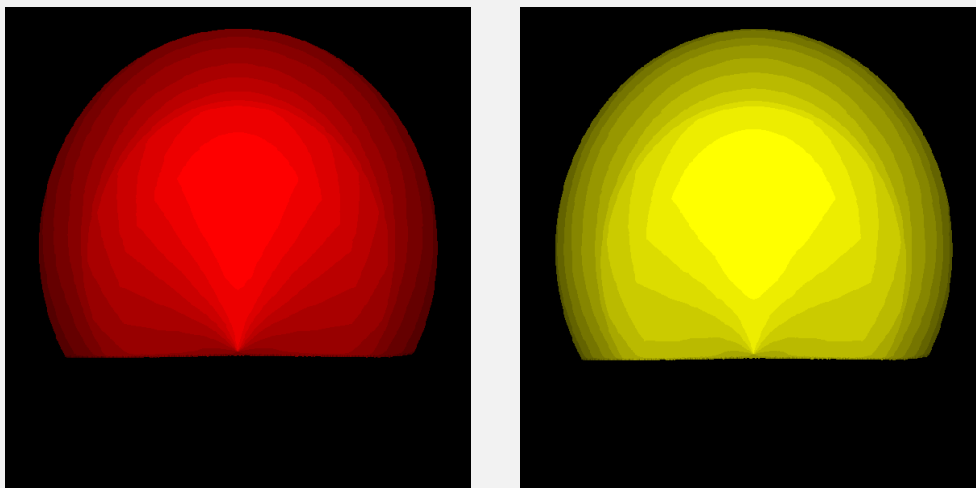
imagen u observando la categorización de colores en los archivos de salida, se evidencia que el comportamiento del fuego no es constante a lo largo de la simulación, y esto se debe a que el software realiza un ajuste de la humedad del combustible a través del día y el paisaje en función de las variables atmosféricas definidas, humedad inicial del combustible y topografía. De esta forma, se puede obtener un rango de variación del comportamiento del fuego esperado para un combustible particular, de acuerdo a la variación diaria de temperatura y humedad estimada para el día en que se registraron los datos de campo.



Para obtener un valor promedio de la información generada, se cargaron en ENVI dichos archivos y se calcularon los valores mínimos, máximos, medios y el desvío estándar de la zona simulada mediante la construcción de una región de interés (roi). En este caso, en que la simulación fue realizada con viento, se presentan valores del comportamiento del fuego asociados también al fuego que avanza en retroceso (fuego de cola), lo que podría disminuir el promedio general con el aporte de valores más bajos

correspondientes al avance del fuego en sentido contrario a la dirección del viento. Si se quiere evitar estos datos, puede agregarse una barrera a la simulación como se muestra en la figura 4.5. Los resultados finales comparativos se muestran en la tabla 4.10.

La visualización de los archivos de salida de FARSITE en ENVI, requirió generar un script en IDL. El mismo se adjunta en el Apéndice A (Código *Conversión ASCII FARSITE*).



**Figura 4.5.** Resultados de la simulación de la propagación del fuego sobre el combustible FM 1, colocando una barrera cortafuego para evitar el avance del fuego en retroceso. A la izquierda velocidad de propagación del fuego, y a la derecha longitud de la llama.

Así mismo, la evaluación del modelo también se realizó a través de la calculadora presente dentro del módulo **Custom Surface Fuel Models** de FARSITE (Input>Project Inputs>Custom Models .FMD). En este caso, la intensidad del viento a introducir es la correspondiente a la altura a mitad de la llama, la que se define en FARSITE como la intensidad de viento promedio desde la parte superior de la cama de combustibles hasta dos veces más la altura de la cama (Andrews 2012). Por esta razón, al dato de viento registrado a la altura de 10 m (introducido en el archivo de viento en la simulación anterior) se le aplicó un factor multiplicativo de ajuste igual a 0.4. En las tablas 1 y 2 del Apéndice B, se indican los factores de ajustes del viento recomendados de acuerdo al modelo de combustible y porcentaje de cobertura del dosel presente.

A posterior, el nuevo valor de intensidad de viento (se modificó de 8 km/h a 3.2 km/h) fue transformado a millas por hora (unidad obligatoria en la calculadora), se definió la pendiente como 0% y se indicó la humedad del combustible como moderada (valores considerados similares al escenario de humedad baja utilizado previamente). En la tabla 4.10 se muestran los resultados del cálculo de la velocidad de propagación del fuego y la longitud de la llama mediante este método.

#### 4. Simulaciones del comportamiento del fuego en la gestión de incendios

**Tabla 4.10.** Comparación de valores de velocidad de propagación del fuego (ROS) y longitud de la llama (FL) para una cobertura particular y su modelo de combustible asociado. Los datos registrados a campo se refieren a la propagación del fuego sobre la cobertura pajonal con afloramiento y los obtenidos mediante simulación y calculadora a la propagación del fuego sobre el modelo de Anderson FM 1. Los datos producto de la simulación no tienen en cuenta los datos asociados al avance del fuego en retroceso.

	Datos de campo	Datos de simulación			Datos de calculadora	
		Promedio	Mínimo	Máximo		
ROS (m/min)	5	4.10	0.36	6.69	1.49	5.5
FL (m)	1	0.58	0.15	0.79	0.15	0.6 m

En función de los resultados observados se considera que el modelo FM 1 predice adecuadamente el comportamiento del fuego propagando sobre el pajonal con afloramiento, ya que tanto los valores observados como los predichos de ROS y de FL entran en la misma clase de comportamiento del fuego (moderado según la velocidad de propagación y bajo según la altura de la llama). Reafirmando esta conclusión, se puede ver que los valores de campo de ambas variables de comportamiento del fuego se encuentran dentro del rango abarcado por su valor predicho promedio  $\pm$  dos desvíos estándar.

##### 4.3.1.2. Comparación de predicciones de comportamiento (área quemada) con datos de campo.

Se realizaron distintas simulaciones, variando los archivos de entrada para observar si existían diferencias, y de ser así cuáles. A continuación se detalla cada una de las simulaciones ejecutadas.

Dado que durante el primer día se quemaron alrededor del 80% de las ha totales, y que durante el segundo y tercer día del incendio el avance del fuego fue muy lento (por la intervención humana), se decidió realizar la simulación sólo para el primer día, tratando así de disminuir el error en los resultados por sobreestimación de la propagación del fuego.

##### *Simulación 1: Modelos de Anderson*

La configuración de la simulación se presenta en la tabla 4.11.

El resultado de esta simulación mostró que el fuego se propaga más rápido que lo observado en terreno (figura 4.6). A las 3 hs se quemaron alrededor de 900 ha, (más del 80% de la superficie real afectada), y el área total quemada superó las 1500 ha en las 10 hs simuladas. De contar con un mapa de combustibles más allá del límite del PNQC, el fuego habría seguido avanzando fuera del Parque hasta completar el tiempo de simulación. La velocidad de propagación del frente del fuego superó en algunos sectores los 50 m/min y la longitud de la llama alcanzó valores de hasta 7 m. Las coincidencias entre la imagen de área quemada real y simulada se muestran en la tabla

#### 4. Simulaciones del comportamiento del fuego en la gestión de incendios

4.12, obteniendo una precisión total de la clasificación del 81%. Se observa que un 21% del área quemada resultante de la simulación se corresponde con superficie no quemada en la realidad, y que un 7% del área quemada en la realidad permaneció sin quemarse en la simulación. Estas diferencias pueden apreciarse en la figura 4.7.

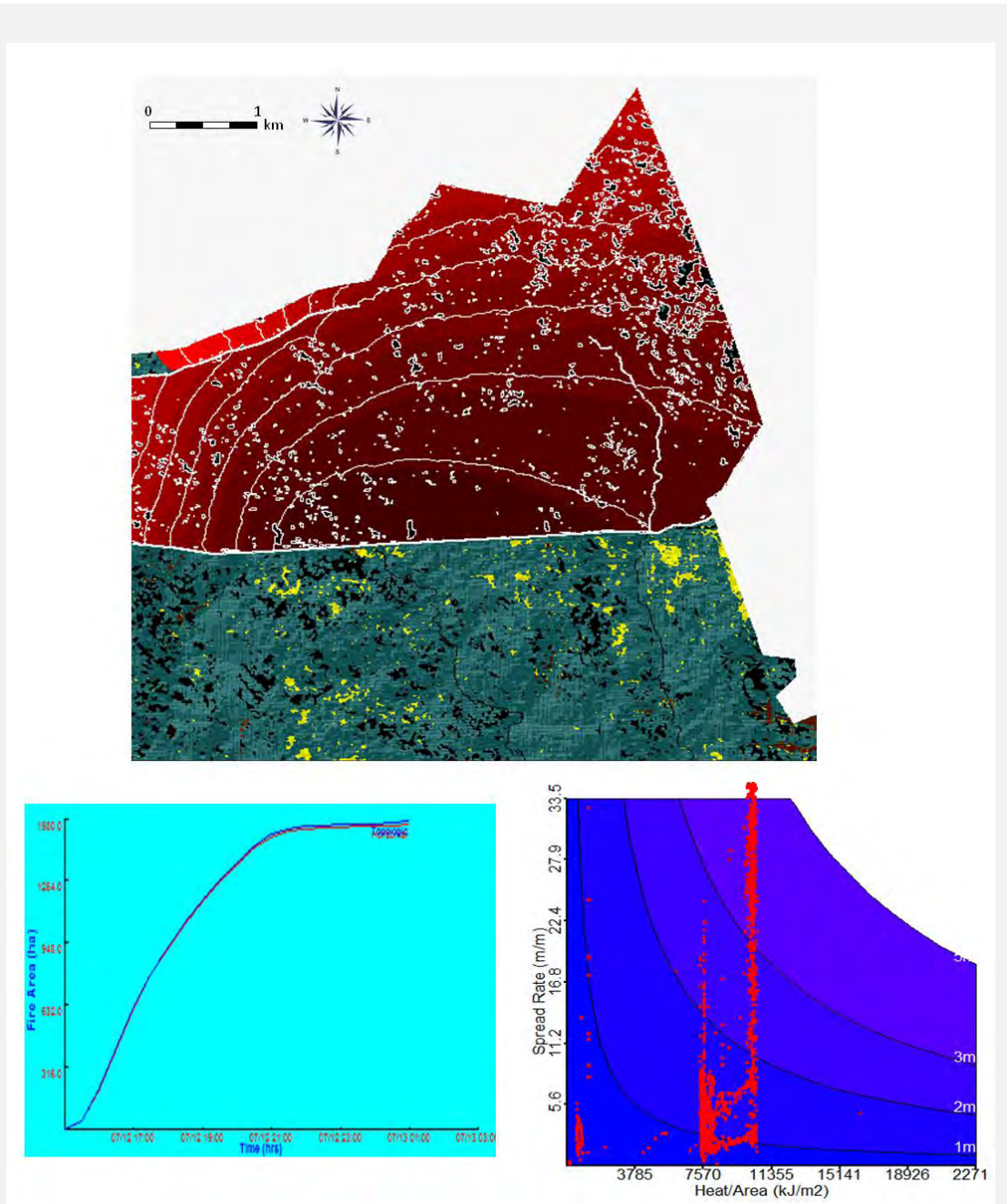
**Tabla 4.11.** Variables de entrada y configuración de los parámetros necesarios para la realización de la simulación 1.

Configuración del proyecto	
<b>Mapa de combustibles</b>	Modelos de Anderson Modelos presentes: FM1,FM3,FM4
<b>Ajustes en combustibles</b>	No
<b>Cobertura del dosel</b>	0%
<b>Humedad inicial de los combustibles</b>	Escenario de humedad baja (6, 7, 8, 60, 90)
<b>Archivos de clima y vientos</b>	Datos WRF
<b>Período de quema</b>	No
Configuración de simulación	
<b>Paso del tiempo</b>	30 min
<b>Paso visible</b>	1 h
<b>Resolución de perímetro y de distancia</b>	10 m
<b>Duración</b>	12 de julio 15 hs a 13 de julio 01 hs
<b>Período de acondicionamiento de humedad</b>	Activado
Shapes adjuntos	
<b>Punto de ignición</b>	Sí (en coord. definidas previamente)
<b>Barrera</b>	Sí (ruta y camino)

La tabla indica para cada clase (columna) del estado inicial (incendio real) cuántos píxeles se corresponden a cada clase (fila) del estado final (incendio simulado), razón por la cual el 100% es determinado sólo para cada clase del estado inicial.

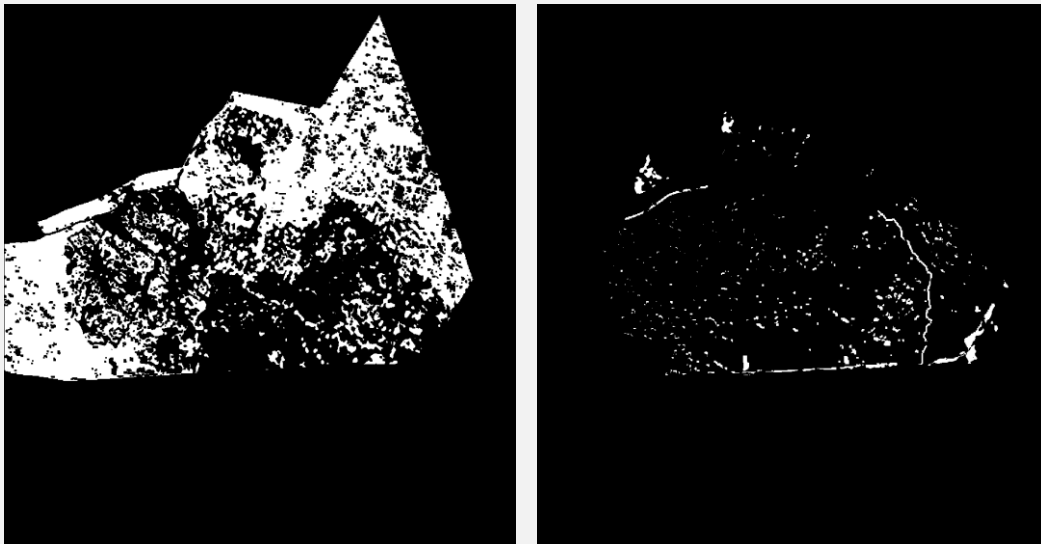
**Tabla 4.12.** Nivel de acuerdo entre el incendio real y el simulado en cuanto a la clasificación de área quemada y no quemada, y las hectáreas afectadas en cada caso. En rojo se resalta el porcentaje de acierto de área quemada, en celeste lo que no se quemó en la simulación pero sí en la realidad, en azul lo que se quemó en la simulación pero no en la realidad, y en amarillo el porcentaje de acierto de área no quemada. Simulación empleando los modelos de Anderson.

	Quemado real	No quemado real	Área por clase
Quemado simulado	92.680 %	20.992 %	1253 ha
No quemado simulado	7.320 %	79.008 %	2593 ha
Área por clase	622 ha	3224 ha	3846 ha
Fiabilidad global	81%		



**Figura 4.6.** Resultados de la simulación 1, en la que se empleó el mapa de combustibles realizado con el sistema de clasificación de Anderson. Arriba, imagen con los perímetros de frente de fuego. Abajo, gráfico de área quemada (izquierda) e intensidad de frente del fuego (derecha).





**Figura 4.7.** Representación de cambios existentes entre el incendio real y el simulado, utilizando el mapa de combustibles de los modelos de Anderson. A la izquierda, en blanco, se observa el área no afectada por el fuego en la realidad, pero sí en la simulación. A la derecha, en blanco, se observa la superficie afectada en la realidad pero no en la simulación. En ambas imágenes, el color negro representa zonas sin cambio entre la imagen real y la generada por simulación.

#### *Simulación 2: Modelos de Scott & Burgan*

La configuración de la simulación fue la misma que la realizada en la simulación 1, con excepción de que el mapa de combustibles fue el construido a partir del sistema de clasificación de Scott & Burgan (tabla 4.13).

Al igual que en la simulación anterior, la superficie afectada por el incendio simulado fue mayor que la afectada por el incendio real (figura 4.8). Sin embargo, la velocidad de propagación del fuego sobre los modelos de Scott & Burgan fue inferior a la observada en los modelos de Anderson, y la intensidad del frente del fuego es mayor para este caso (figura 4.9). A las 3 hs de simulación se presentaron 760 ha quemadas, y a las 7 hs el área quemada rondó en las 1450 ha. En cambio, con los modelos de Anderson, a igual cantidad de horas simuladas, la superficie afectada superó las 1500 ha. Las diferencias en el comportamiento del fuego ocurridas con los distintos sistemas de clasificación de combustibles, pueden verse en la tabla 4.14. Ya que la superficie final quemada fue igual en este caso que en la simulación con los modelos de Anderson, los resultados de la comparación de las clasificaciones del área quemada y no quemada, real y simulada, fueron los mismos.

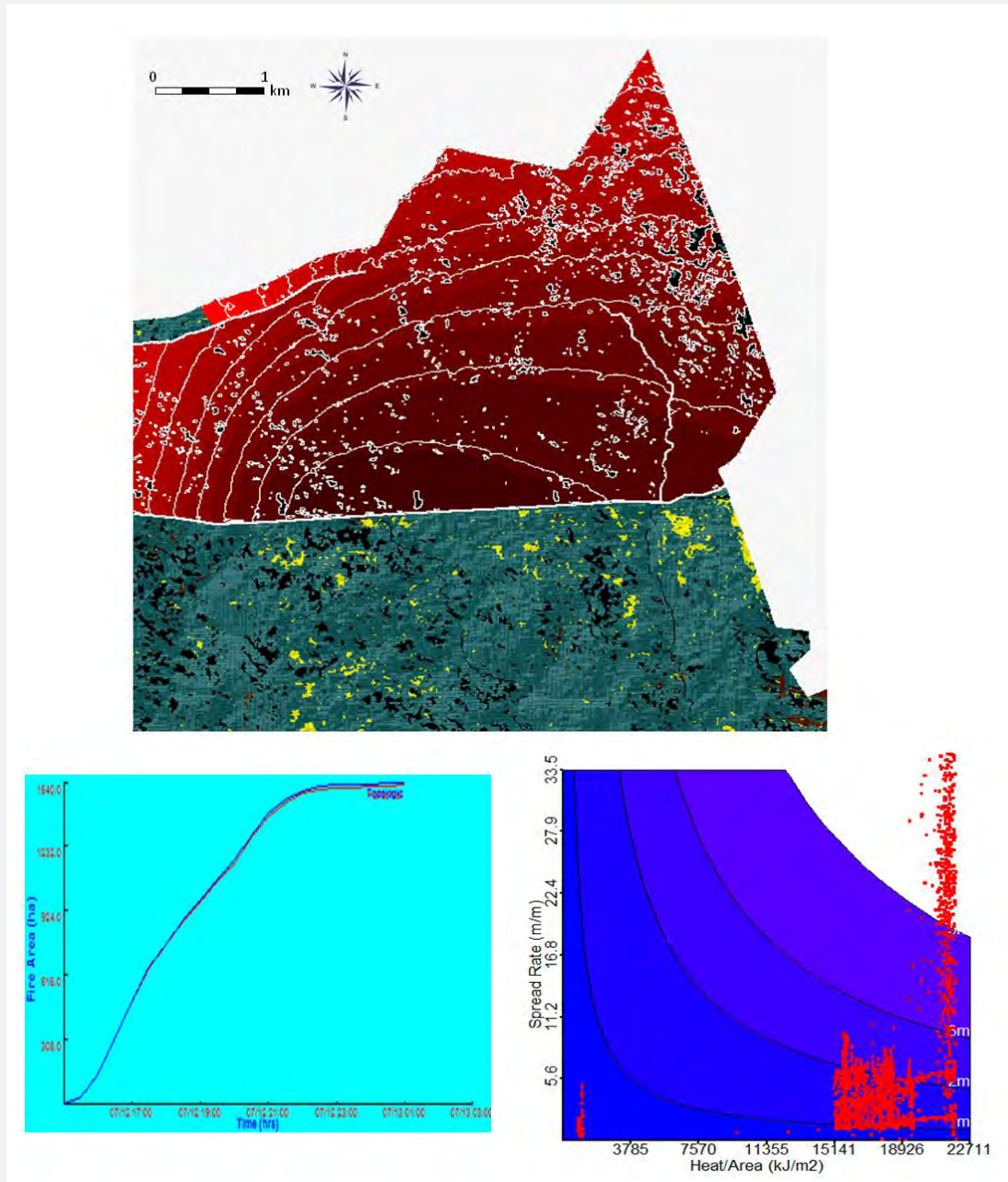
#### 4. Simulaciones del comportamiento del fuego en la gestión de incendios

**Tabla 4.13.** Variables de entrada y configuración de los parámetros necesarios para la realización de la simulación 2.

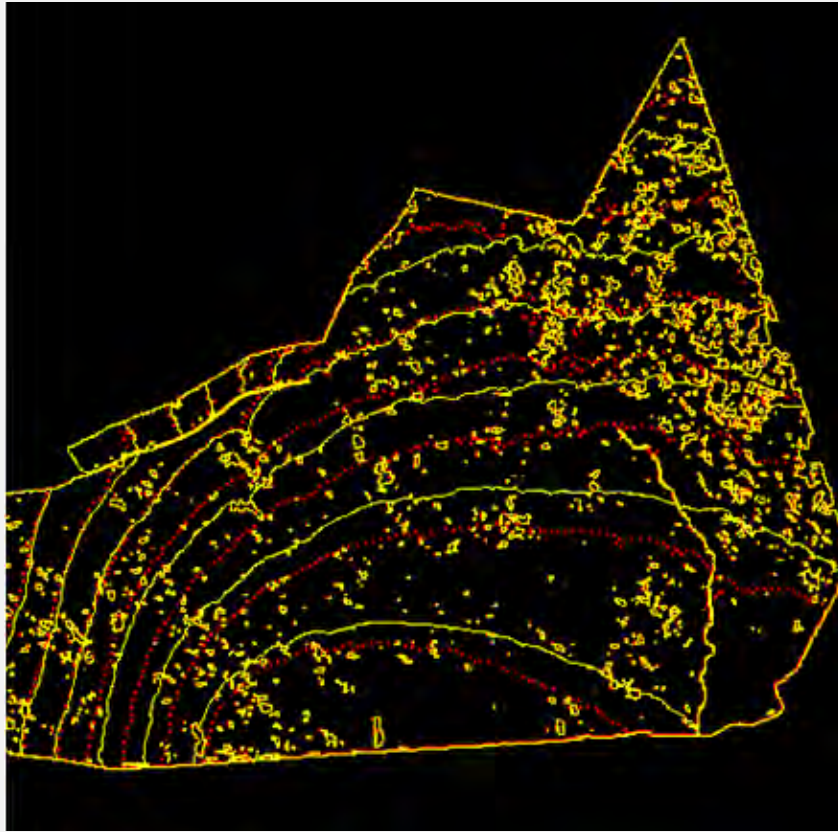
Configuración del proyecto	
Mapa de combustibles	Modelos de Scott & Burgan Modelos presentes: GR1,GR7,SH5
Ajustes en combustibles	No
Cobertura del dosel	0%
Humedad inicial de los combustibles	Escenario de humedad baja (6, 7, 8, 60, 90)
Archivos de clima y vientos	Datos WRF
Período de quema	No
Configuración de simulación	
Paso del tiempo	30 min
Paso visible	1 h
Resolución de perímetro y de distancia	10 m
Duración	12 de julio 15 hs a 13 de julio 01 hs
Período de acondicionamiento de humedad	Activado
Shapes adjuntos	
Punto de ignición	Sí (en coord. definidas previamente)
Barrera	Sí (ruta y camino)

**Tabla 4.14.** Valores de velocidad de propagación (ROS) y longitud de la llama (FL) registrados a lo largo de la simulaciones realizadas con distintos mapas de combustibles.

	Simulación 1 (modelos de Anderson)	Simulación 2 (modelos de Scott & Burgan)
ROS	Mínimo: 0.06	Mínimo: 0.2
	Máximo: 67.26	Máximo: 57.26
	Media: 12.7	Media: 11.05
FL	Mínimo: 0.08	Mínimo: 0.13
	Máximo: 7.43	Máximo: 7.5
	Media: 2.37	Media: 3.08



**Figura 4.8.** Resultados de la simulación 2, en la que se empleó el mapa de combustibles realizado con el sistema de clasificación de Scott & Burgan. Arriba, imagen con los perímetros de frente de fuego. Abajo, gráfico de área quemada (izquierda) e intensidad de frente del fuego (derecha).



**Figura 4.9.** Perímetros de avance del fuego obtenidos durante la simulación empleando el mapa de combustibles con los modelos de Anderson (línea continua amarilla) y los modelos de Scott & Burgan (línea de puntos roja).

#### *Simulación 3: Adaptación de modelos de Anderson*

La configuración de esta simulación se presenta en la tabla 4.15. En función de los resultados obtenidos en las simulaciones previas, y observaciones en Google Earth sobre la forma que tomó el incendio real, se decidió trabajar con el mapa de coberturas en lugar del mapa de combustibles, para así asignar una combustibilidad según la clase de cobertura evitando que un modelo de combustible represente el mismo comportamiento del fuego sobre distintos tipos de vegetación. La nueva asignación de modelos de combustibles a las coberturas implicó separar la clase “Pajonal fino” de la clase “Pajonal grueso”, asignándole a la primera el modelo FM2. El resto de coberturas preservó la asignación original de los modelos. Esta modificación fue considerada una adaptación de los modelos de combustibles, en lugar de una asociación como lo realizado anteriormente, porque se le está asignando a una clase un modelo diferente al que debería emplearse según el sistema de clasificación de combustibles utilizado. A modo de ejemplo y como primera evaluación de si la sobrestimación en las simulaciones podría estar debiéndose a la asignación de dos coberturas distintas a un mismo modelo de combustible, se probó realizar la adaptación solo para los modelos de Anderson, incluyéndose además ajustes en la combustibilidad de los mismos.

#### 4. Simulaciones del comportamiento del fuego en la gestión de incendios

**Tabla 4.15.** Variables de entrada y configuración de los parámetros necesarios para la realización de la simulación 4.

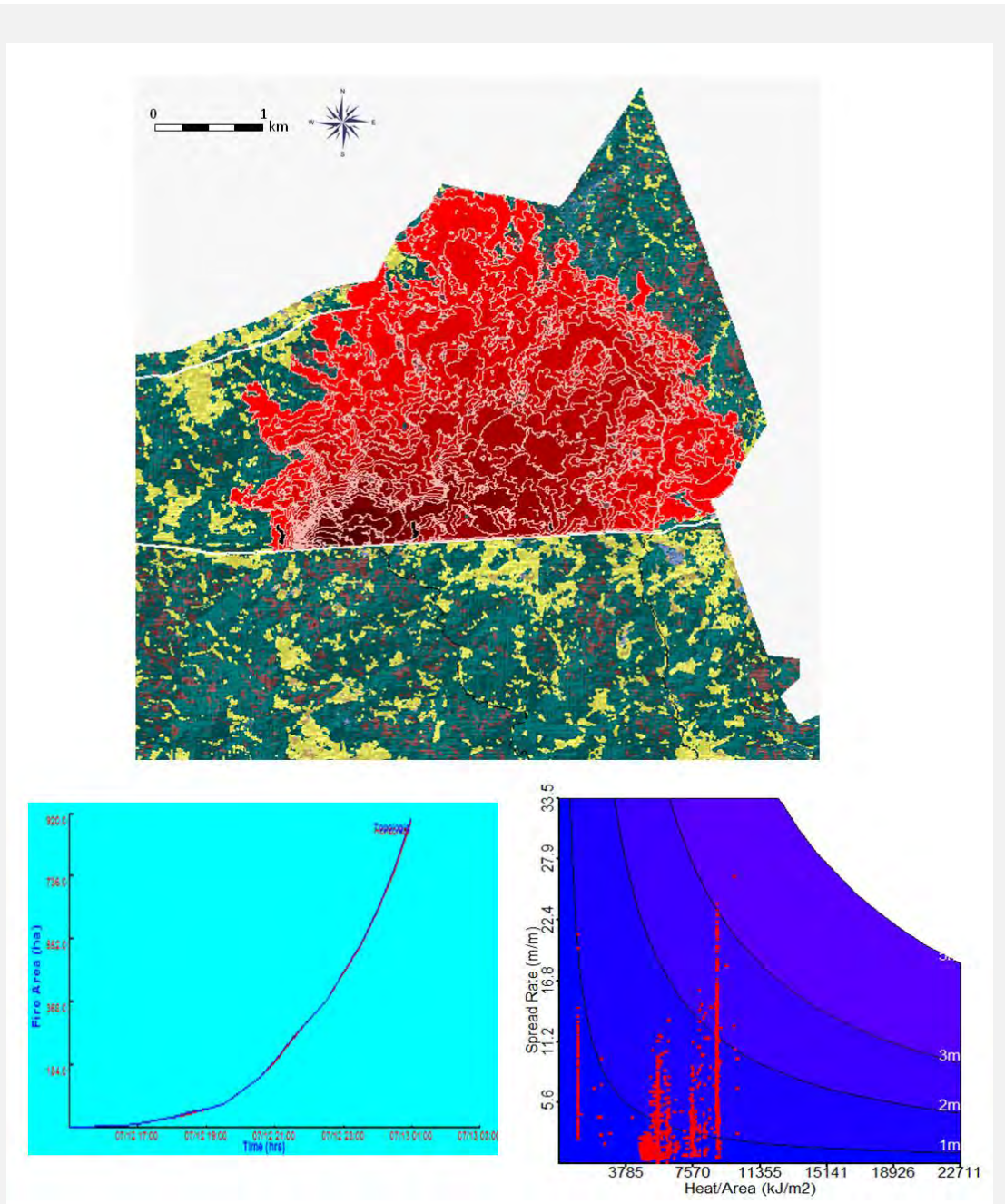
Configuración del proyecto	
Mapa de combustibles	Adaptación de modelos de Anderson. Modelos presentes: FM1, FM2, FM3, FM4
Ajustes en combustibles	Factor 0.5 para FM1 y 0.35 para FM2
Cobertura del dosel	0%
Humedad inicial de los combustibles	Escenario de humedad baja (6, 7, 8, 60, 90)
Archivos de clima y vientos	Datos WRF
Período de quema	No
Configuración de simulación	
Paso del tiempo	30 min
Paso visible	30 min
Resolución de perímetro y de distancia	10 m
Duración	12 de julio 15 hs a 13 de julio 01 hs
Período de acondicionamiento de humedad	Activado
Shapes adjuntos	
Punto de ignición	Sí (en coord. definidas previamente)
Barrera	Sí (ruta y camino)

En este caso se obtuvo un resultado mucho más acorde a la realidad (figura 4.10). El área quemada durante las primeras siete horas comprendió aproximadamente 900 ha. La velocidad de propagación del frente de fuego alcanzó valores próximos a los 30 m/min y la longitud de la llama llegó a los 5 m. El nivel de concordancia de las áreas clasificadas como quemada y no quemada, entre la imagen real y la simulada, fue superior al 80% para ambos casos, obteniendo una fiabilidad global del 88% (tabla 4.16). En la figura 4.11 se muestran las zonas donde hubo diferencias entre el incendio real y el simulado.

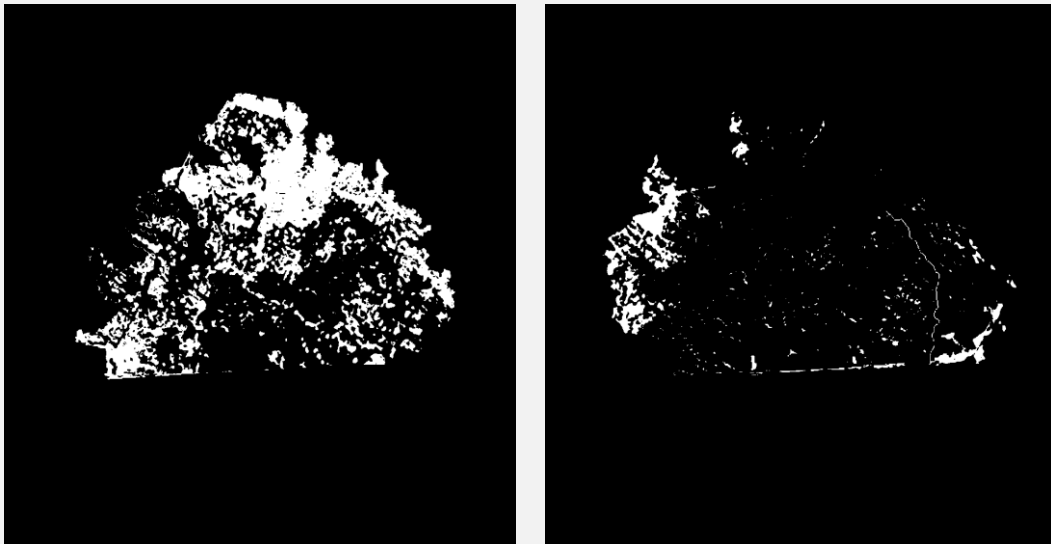
**Tabla 4.16.** Nivel de acuerdo entre el incendio real y el simulado en cuanto a la clasificación de área quemada y no quemada, y las hectáreas afectadas en cada caso. En rojo se resalta el porcentaje de acierto de área quemada, en celeste lo que no se quemó en la simulación pero sí en la realidad, en azul lo que se quemó en la simulación pero no en la realidad, y en amarillo el porcentaje de acierto de área no quemada. Simulación empleando una adaptación de los modelos de Anderson.

	Quemado real	No quemado real	Área por clase
Quemado simulado	86.668 %	11.151 %	899 ha
No quemado simulado	13.332 %	88.849 %	2974 ha
Área por clase	622 ha	3224 ha	3846 ha
Fiabilidad global	88%		





**Figura 4.10.** Resultados de la simulación 3, en la que se empleó el mapa de combustibles que consistió en la adaptación de los modelos de Anderson. Arriba, imagen con los perímetros de frente de fuego. Abajo, gráfico de área quemada (izquierda) e intensidad de frente del fuego (derecha).



**Figura 4.11.** Representación de cambios existentes entre el incendio real y el simulado, utilizando el mapa de combustibles creado mediante adaptación de los modelos de Anderson. A la izquierda, en blanco, se observa el área no afectada por el fuego en la realidad, pero sí en la simulación. A la derecha, en blanco, se observa la superficie afectada en la realidad pero no en la simulación. En ambas imágenes, el color negro representa zonas sin cambio entre la imagen real y la generada por simulación.

### 4.3.2. Empleo de simulaciones en el planeamiento de actividades de control del fuego

#### 4.3.2.1. Categorización de zonas de un incendio de acuerdo a su posibilidad de ataque.

Las características de las simulaciones realizadas se muestran en la tabla 4.17.

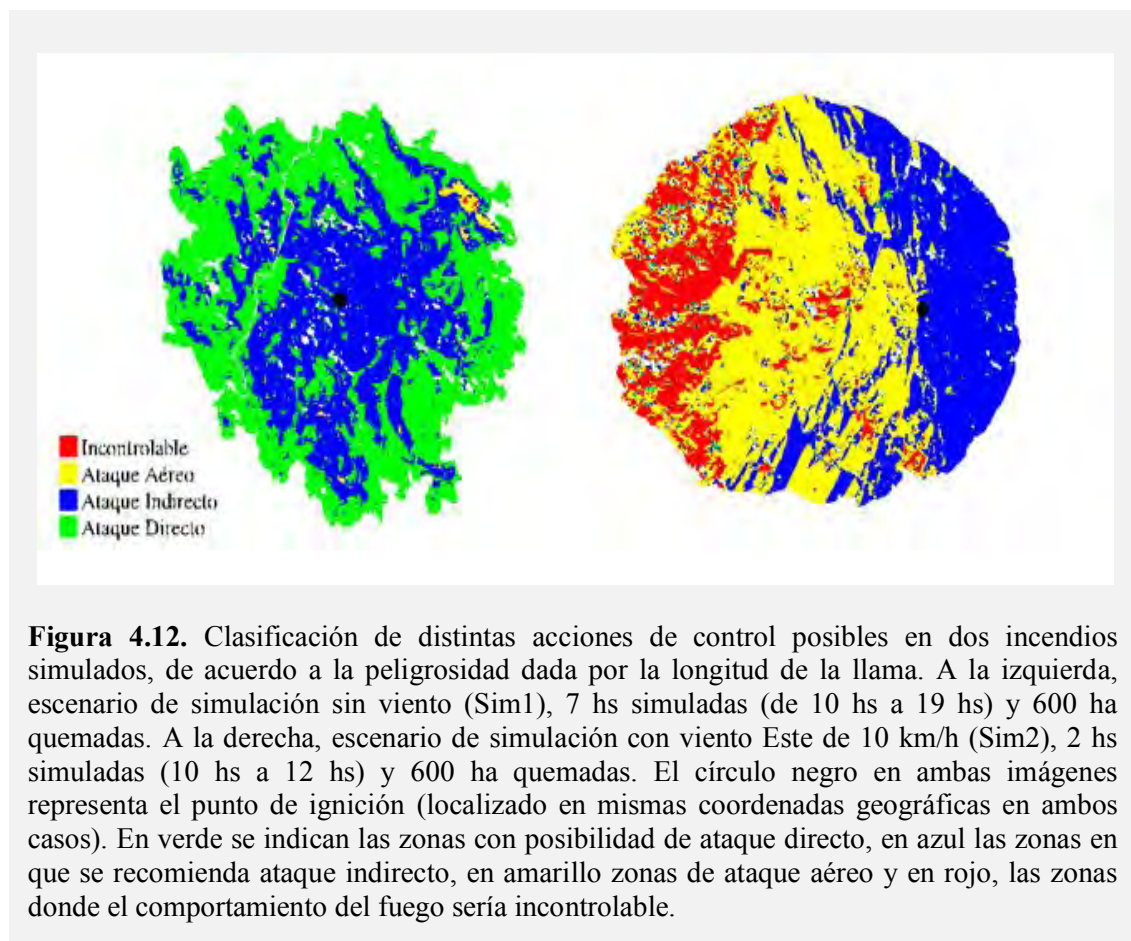
El resultado de las simulaciones fue cargado en ENVI, trabajando sólo con los raster de longitud de la llama. Se realizó una clasificación mediante un árbol de decisión, definiendo al incendio por zonas de ataques posibles en las clases “ataque directo”, “ataque indirecto”, “ataque aéreo” e “incontrolable”. En la simulación en ausencia de viento, si nos enfocamos en el perímetro externo del fuego, se observa que el incendio puede ser atacado por personal con herramientas de mano en prácticamente el frente de fuego completo (figura 4.12, izquierda). En cambio, al adicionar el factor viento en este escenario simulado, deja de ser recomendable la realización de un ataque directo, presentándose como viable un ataque por tierra mediante topadora o autobomba en la cola del incendio y un ataque aéreo para detener el avance del frente del fuego. En este incendio simulado se evidencian zonas donde el comportamiento del fuego sería extremo, tendiendo a ser inefectivas las estrategias de control típicas (figura 4.12., derecha). Se debe tener en cuenta que las imágenes de la figura 4.12 muestran la evolución del incendio, pudiendo identificar cómo se van modificando las distintas posibilidades de ataques a lo largo del tiempo. Si se desea consultar para un momento particular, se debe simular hasta ese momento.



#### 4. Simulaciones del comportamiento del fuego en la gestión de incendios

**Tabla 4.17.** Variables ingresadas en la configuración del paisaje de FARSITE para simulaciones de evaluación de supresión del fuego. Sim1 y Sim2, simulación 1 y simulación 2 respectivamente.

Variables del Paisaje				
Elevación	Pendiente	Orientación	Combustible	Cobertura del dosel
Si (DEM)	Si	Si	Modelos de Anderson	0%
Variables climáticas				
Viento	Hs mín. /Hs máx.	T° mín. /T° máx.	H° máx. / H° mín.	Precipitación
Sin viento (Sim1)	5 hs / 15 hs	10°C / 28°C	70% / 30%	0 mm
10 km/h 90° -Este- (Sim2)	5 hs / 15 hs	10°C / 28°C	70% / 30%	0 mm
Humedad inicial del combustible				
1 h	10 h	100 h	Herbáceo vivo	Leñoso vivo
5 %	8%	12%	100%	100%



**Figura 4.12.** Clasificación de distintas acciones de control posibles en dos incendios simulados, de acuerdo a la peligrosidad dada por la longitud de la llama. A la izquierda, escenario de simulación sin viento (Sim1), 7 hs simuladas (de 10 hs a 19 hs) y 600 ha quemadas. A la derecha, escenario de simulación con viento Este de 10 km/h (Sim2), 2 hs simuladas (10 hs a 12 hs) y 600 ha quemadas. El círculo negro en ambas imágenes representa el punto de ignición (localizado en mismas coordenadas geográficas en ambos casos). En verde se indican las zonas con posibilidad de ataque directo, en azul las zonas en que se recomienda ataque indirecto, en amarillo zonas de ataque aéreo y en rojo, las zonas donde el comportamiento del fuego sería incontrolable.

#### 4. Simulaciones del comportamiento del fuego en la gestión de incendios

De igual manera, podría evaluarse la seguridad de áreas seleccionadas para quemas prescriptas. Una vez asegurado que el parche seleccionado para la quema no presentará problemas de control a lo largo de la duración de la misma debido al tipo de combustible presente y a la topografía, se pueden estimar las condiciones de humedad inicial de los combustibles y clima a partir de las cuales la quema podría presentar riesgos de control.

##### 4.3.2.2. Barreras cortafuegos: localización y ancho.

Se realizaron simulaciones de incendio a partir de un mapa de riesgo de ignición supuesto, con cinco puntos de ignición dispersos dentro del área de interés. Las condiciones climáticas asumidas se presentan en la tabla 4.17, ingresando el período 02 al 4 de Agosto para la simulación. Las simulaciones se dejaron correr hasta quemar el área completamente.

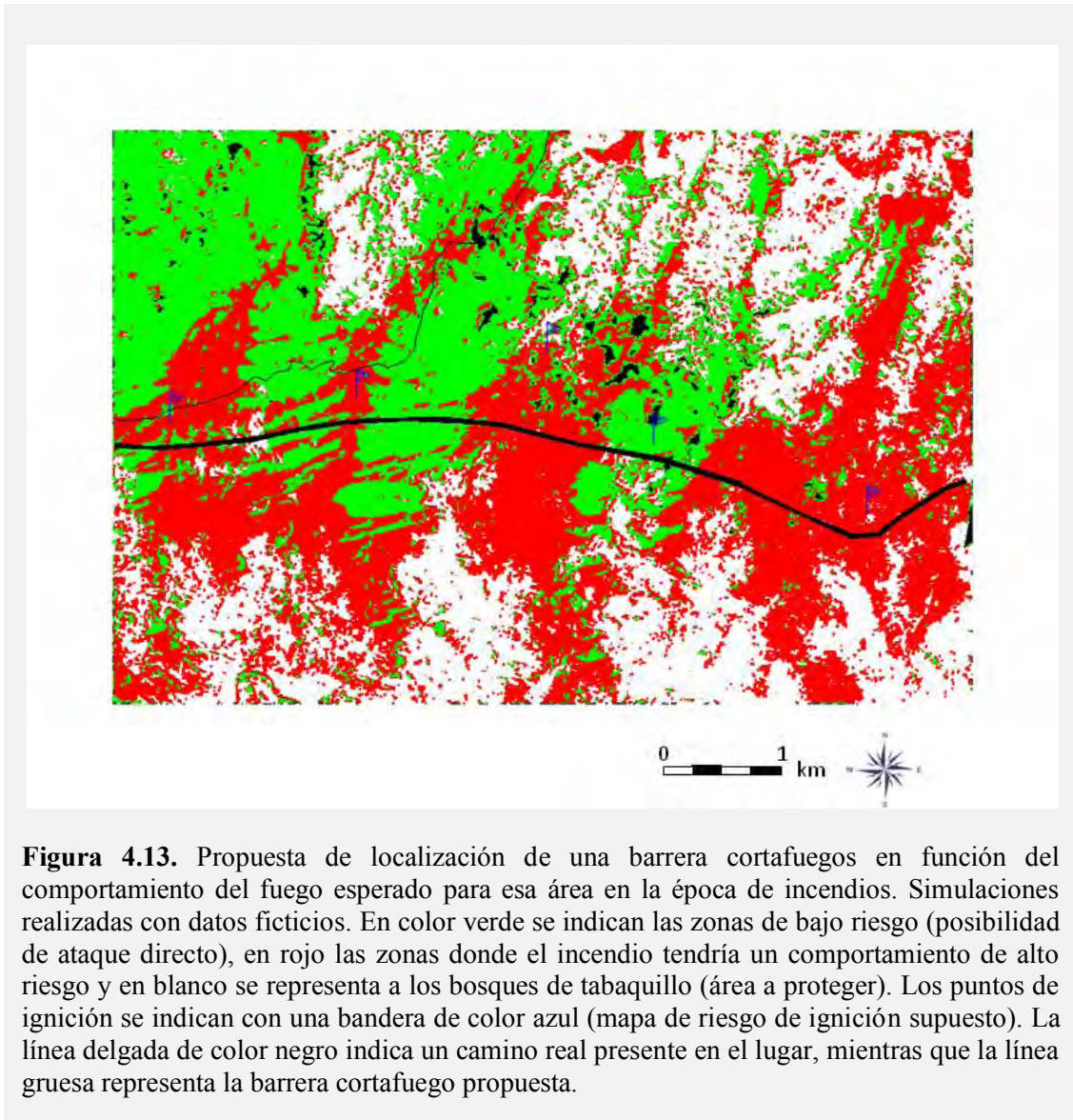
**Tabla 4.17.** Variables ingresadas en la configuración del paisaje de FARSITE para simulaciones de evaluación de localización de barreras cortafuego.

Variables del Paisaje				
<b>Elevación</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Orientación</b>	<b>Combustible</b>	<b>Cobertura del dosel</b>
Si (DEM)	Si	Si	Modelos de Anderson	0%
Variables climáticas				
<b>Viento</b>	<b>Hs mín. /Hs máx.</b>	<b>T° mín. /T° máx.</b>	<b>H° máx. / H° mín.</b>	<b>Precipitación</b>
7 km/h - 315° (noroeste)	5 hs / 15 hs	0°C / 20°C	40% / 20%	0 mm
Humedad inicial del combustible				
<b>1 h</b>	<b>10 h</b>	<b>100 h</b>	<b>Herbáceo vivo</b>	<b>Leñoso vivo</b>
5 %	8%	12%	100%	100%

En ENVI, se importaron los resultados de la intensidad del frente de fuego producto de cada simulación, y se realizaron clasificaciones en árbol. La clasificación consistió en determinar las zonas en donde las cinco simulaciones presentaron un comportamiento del fuego de alto riesgo, definido por valores de intensidad del frente de fuego superiores a 346 kW/m (Andrews & Rothermel 1982).

En la figura 4.13 se observa cuál podría ser una ubicación recomendable para una barrera cortafuegos en función del comportamiento del fuego en el lugar. El resultado muestra que con un viento NO de 7 km/h, independientemente de la localización del punto de ignición, el comportamiento esperado para el fuego puede ser considerado de alto riesgo para casi todo el perímetro del área que interesa proteger. Por esta razón, y dado al patrón desagregado del mapa de riesgo de ignición asumido, sería necesaria una

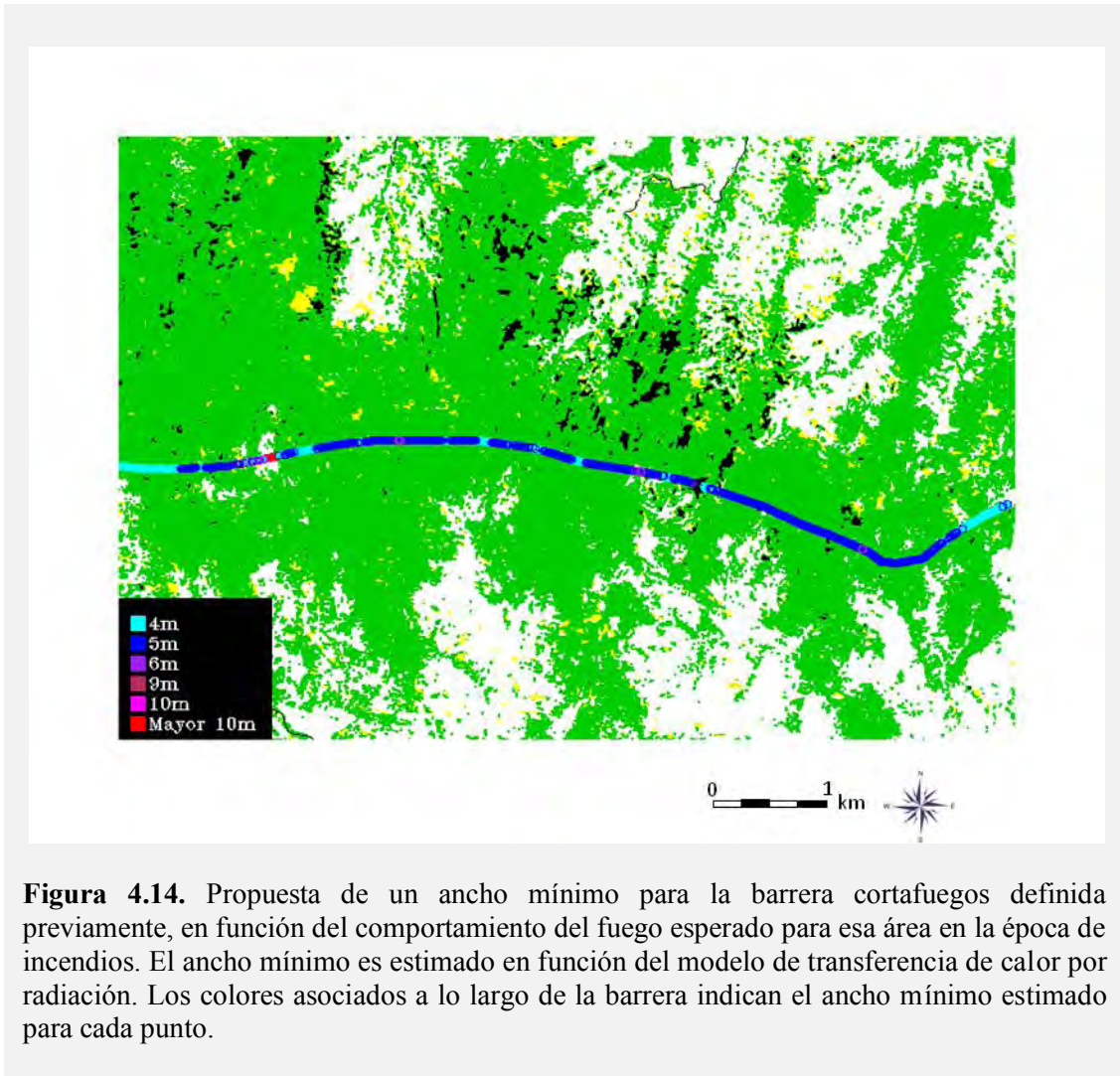
barrera cortafuegos en dirección perpendicular al camino, trazándose hacia el sur de los focos de ignición debido a que la dirección predominante del viento en la época de incendios se asumió como Noroeste.



**Figura 4.13.** Propuesta de localización de una barrera cortafuegos en función del comportamiento del fuego esperado para esa área en la época de incendios. Simulaciones realizadas con datos ficticios. En color verde se indican las zonas de bajo riesgo (posibilidad de ataque directo), en rojo las zonas donde el incendio tendría un comportamiento de alto riesgo y en blanco se representa a los bosques de tabaquillo (área a proteger). Los puntos de ignición se indican con una bandera de color azul (mapa de riesgo de ignición supuesto). La línea delgada de color negro indica un camino real presente en el lugar, mientras que la línea gruesa representa la barrera cortafuego propuesta.

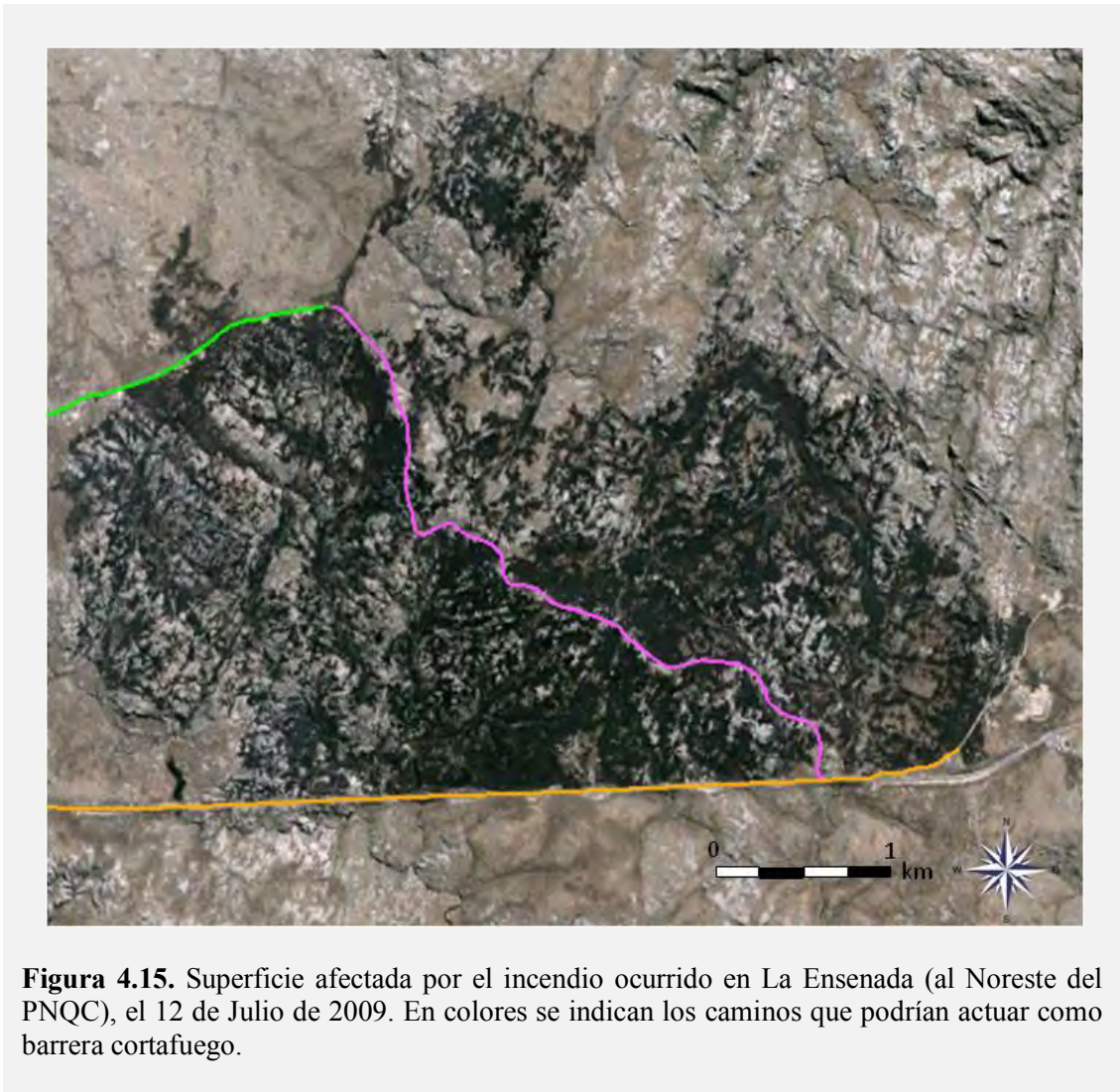
Se aplicó el código desarrollado para estimar cuál sería el ancho mínimo apropiado para que la barrera cortafuego evite que se encienda el combustible al otro lado debido a la transferencia de calor por radiación. El poder emisor medio del incendio se asumió como de  $30 \text{ kW/m}^2$  y no se tuvo en cuenta el efecto del viento. En función de los resultados obtenidos, el ancho de barrera mínimo recomendado se encontraría, en general, entre los 4 y 5 metros (figura 4.14).





**Figura 4.14.** Propuesta de un ancho mínimo para la barrera cortafuegos definida previamente, en función del comportamiento del fuego esperado para esa área en la época de incendios. El ancho mínimo es estimado en función del modelo de transferencia de calor por radiación. Los colores asociados a lo largo de la barrera indican el ancho mínimo estimado para cada punto.

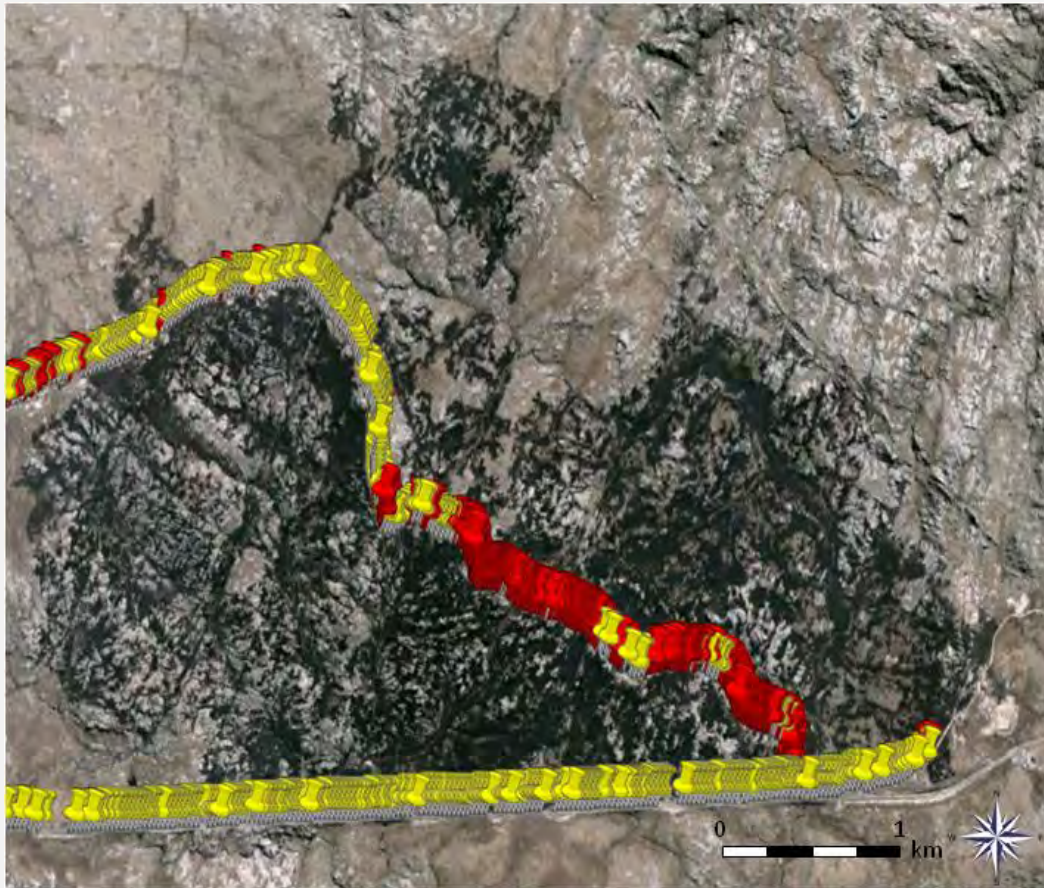
El método desarrollado en el presente trabajo para la estimación del ancho mínimo de una barrera cortafuego o para evaluación de la efectividad esperada de una barrera existente ante un incendio en curso, fue evaluado a través del caso del incendio sucedido en La Ensenada en el 2009. En la figura 4.15 se muestra la imagen de la superficie afectada por el incendio, indicando los caminos que se evaluaron como barrera. Se determinó en Google Earth que el ancho medio de los caminos es de 5 m, para el camino ubicado al Norte (verde), 4 m el camino ubicado al Este (magenta) y 8 m la ruta ubicada al Sur de la zona de incendio (naranja). Los resultados arrojados por el método de estimación del ancho mínimo de barrera se muestran en la figura 4.16, en donde puntos de color rojo indican que el ancho de la barrera existente no sería suficiente para evitar que el calor generado por el incendio lleve a su punto de ignición, y por lo tanto a arder, al combustible situado al otro lado de la barrera.



**Figura 4.15.** Superficie afectada por el incendio ocurrido en La Ensenada (al Noreste del PNQC), el 12 de Julio de 2009. En colores se indican los caminos que podrían actuar como barrera cortafuego.

Puede observarse que se estimó que, en general, el ancho del camino Norte es suficiente para actuar como barrera ante un incendio de las características del ocurrido, tal como sucedió en la realidad. Lo mismo se observa para la ruta ubicada al sur del área de interés. En el caso del camino ubicado al Este, el método predijo que bajo las condiciones simuladas, su ancho no sería suficiente para detener el fuego, en particular en los dos tercios inferiores del camino (figura 4.16). Esto puede confirmarse al observar la imagen del área quemada.





**Figura 4.16.** Representación del ancho mínimo de los caminos necesario para actuar como barrera cortafuego ante las características de un incendio como el ocurrido en La Ensenada, en el 2009. En amarillo se indican los puntos donde se estima que el ancho del camino sería suficiente para detener el fuego, y en rojo donde el ancho no bastaría.

#### 4.4. Discusión

El éxito del empleo de simulaciones de incendios de superficie como metodología de validación de modelos de combustibles, se encuentra supeditado a la disposición de datos conocidos de campo del comportamiento del fuego sobre las coberturas vegetales, o a datos precisos de las condiciones climáticas y estrategias de supresión llevadas a cabo durante un incendio real. De las dos metodologías planteadas basadas en la comparación con datos de velocidad de propagación del fuego y longitud de la llama registrados en terreno, el empleo de la calculadora de FARSITE es más simple y rápido. Sin embargo, realizar una simulación permite obtener un rango de variación para cada parámetro del comportamiento del fuego, considerando la diferencia espacial y temporal de la humedad del combustible debido a la topografía, ángulo de incidencia del sol y variables climáticas. Así, esta última metodología resulta ser más flexible en la comparación de la información arrojada por el simulador y la observada a campo, dando probablemente resultados más acordes a la realidad.

La metodología de validación mediante réplica de un incendio real fue de elevada complejidad para el caso estudiado en este trabajo, ya que varios factores podrían estar afectando la fiabilidad de los resultados. La intervención humana, que no fue considerada en la simulación, podría ser causante de una sobrestimación de la propagación del fuego, en particular porque ocurrió a tan sólo 45 min de iniciado el incendio. La información relacionada al viento, el cual cumple un rol fundamental en la velocidad de propagación y dirección del frente de avance del fuego, fue obtenida con una resolución de 30 km. Esta resolución es superior a la extensión de la escena simulada, razón por la cual no se pudo considerar la variación espacial que puede presentar el viento. Se ha determinado previamente que el rendimiento del simulador FARSITE es afectado por la resolución y precisión de los datos de viento, considerándose además fundamental contar con modelos de combustibles propios del lugar (Wehmeyer 2012). Además, debido a la accidentada topografía del área de estudio, es frecuente la existencia de vientos cambiantes, corrientes convectivas y efecto venturi, lo cual no puede ser simulado por FARSITE. Otros factores podrían estar relacionados al mapa de combustibles. El área en el cual se produjo el incendio presenta una proporción elevada de roca expuesta y roca asociada a vegetación dispersa, entremezclada con pajonal fino y grueso. Si bien la resolución espacial empleada para la construcción del mapa no fue baja, el tipo de distribución de las coberturas de este sector no se ve representado fielmente en el mapa de coberturas construido, debido a que para conseguirlo sería necesario contar con imágenes satelitales de alta resolución espacial (píxeles de 5 m<sup>2</sup> o menos), impactando por lo tanto en el mapa de combustibles derivado del de coberturas. Así, zonas con un porcentaje considerable de cobertura no combustible fue definida en la clasificación digital de la imagen satelital como combustible, razón por la cual el fuego no presenta dificultades en su propagación durante la simulación. Por otro lado, la imagen satelital SPOT a partir de la cual se construyó el mapa de combustibles se corresponde a tres años después que el momento del incendio, razón por la cual podrían existir diferencias entre la composición vegetal, estado y distribución de las coberturas de aquel momento y del registrado en la imagen satelital, dado por ejemplo por modificaciones en las actividades de pastoreo, ocurrencia de incendios o variaciones climáticas.

Asimismo, a pesar de lo mencionado anteriormente, fueron notorias las diferencias observadas al simular empleando el mapa de combustibles generado por asociación o por adaptación a los modelos. Aunque no tan evidentes, las variaciones existentes en la velocidad del frente de fuego al simular con el mapa definido por los modelos de Anderson y por los modelos de Scott & Burgan, pone de manifiesto que de realizarse una asociación a modelos existentes, la elección del sistema de clasificación de combustibles no debería ser al azar, sino que requeriría de un estudio comparativo, exploración y análisis a conciencia. Cuando se trabajó con el mapa en donde las clases pajonal fino y pajonal grueso se asignaron a distintos modelos de combustibles, los resultados obtenidos al comparar con el área real quemada fueron mucho más acordes, tanto en superficie afectada como en la forma de la mancha. Teniendo en cuenta estas observaciones y los resultados obtenidos a través de la metodología de comparación entre área quemada real y simulada, se podría considerar útil la técnica de análisis propuesta. Si bien al emplear el mapa con los modelos de Anderson y con los de Scott & Burgan la coincidencia entre área quemada simulada y real fue elevada, esto se debió a que se quemó toda la zona simulada, aumentando así la concordancia entre píxeles reales quemados y simulados. Por esto, sería más apropiado enfocarse en los desacuerdos entre clases (observaciones marginales) y en el resultado de fiabilidad



global. Emplear otros análisis estadísticos, como el coeficiente Kappa, el índice de Sorensen y un test de significancia estadística de las diferencias entre los resultados, podría mejorar la confiabilidad del método (Arca *et al.* 2007). Igualmente, los resultados de las simulaciones no pueden considerarse concluyentes en relación a cómo deberían asignarse los modelos de combustibles a las coberturas, sino sólo ejemplificaciones de metodologías y aproximaciones a lo que podría estar sucediendo. Para poder sugerir una adaptación formal de los modelos y una modificación definitiva del mapa de combustibles completo, sería necesario repetir esta misma metodología con varios incendios ubicados en distintas zonas del Parque para así contar con diferentes coberturas. Esto no fue posible en el presente trabajo porque no se contó con más datos que tuvieran el mínimo de precisión necesaria para ser utilizados, como así tampoco con imágenes del área quemada real para ser contrastada con los resultados de las simulaciones.

El empleo de simulaciones en la determinación de zonas seguras y/o zonas de ataques posibles de acuerdo al comportamiento del fuego, es de suma relevancia para la planificación de estrategias de control, tanto en incendios intencionales como en naturales o en quemas controladas (prescriptas). Sin embargo, esta metodología debería ser evaluada a campo mediante registro de observaciones del personal interviniente durante el manejo y control de incendios. Además, un estudio más exhaustivo del simulador FARSITE, permitiría evaluar la utilidad de incluir contrafuegos y diferentes tipos de ataques como parte de esta metodología.

La metodología para localización de barreras cortafuegos, no parecería tener grandes inconvenientes, excepto por la posibilidad de contar con un mapa de riesgo de ignición. El mapa de riesgo de ignición debería basarse principalmente en destacar aquellas zonas en donde la ocurrencia de incendios es alta o en donde la probabilidad de que exista un foco de ignición (caída de rayos o presencia del hombre) es elevada. Mediante la técnica propuesta se identificaron zonas donde el fuego presentaría un comportamiento de alto riesgo independientemente de la localización del punto de ignición. El criterio utilizado consistió en la concordancia de los resultados de las distintas simulaciones respecto a las zonas definibles como de alto riesgo. Sin embargo, al pretender la coincidencia en el total de simulaciones generadas a partir del mapa de ignición, se podría estar subestimando las áreas de mayor riesgo. Por esto se propone introducir una modificación a la metodología en la cual se tenga en cuenta la coincidencia en un determinado porcentaje de simulaciones, por ejemplo, en el 80%.

El método y código desarrollado para la estimación del ancho mínimo de una barrera cortafuegos, aunque es un modelo físico simplificado, tiene un alto valor como primera aproximación. Si bien deberían realizarse más pruebas para su validación, la evaluación realizada en el presente trabajo mostró resultados satisfactorios. Mediante esta metodología es posible estimar cuál debería ser el ancho mínimo de una barrera a emplazar en una determinada zona, identificar áreas “débiles” de una barrera existente para aumentar los recursos de combate en ese lugar, o dado un incendio en curso, predecir si una barrera de cierto ancho será efectiva o no, evitando así por ejemplo utilizarla como una vía segura de acceso. Modificaciones futuras para esta técnica implican combinar el modelo físico de transferencia de calor por radiación con el de transferencia de calor por convección, evaluar la incorporación de un factor de ajuste al modelo físico, definido en función de observaciones de campo, afinar la localización de la barrera dentro del pixel, estimar mediante cálculos vectoriales cuál sería el píxel que

se encuentra en línea perpendicular a la línea de frente del fuego dependiendo de la dirección de avance del mismo e incorporar datos relacionados a modelos de combustibles definidos localmente.

No se puede dejar de mencionar que el software FARSITE opera con un modelo de propagación de fuego de superficie desarrollado para otra área geográfica. La ecuación diseñada por Rothermel implica valores de coeficientes y relaciones entre variables que fueron determinadas de manera semiempírica, llevando a cabo experimentos de laboratorio con los combustibles del lugar. Asumir, sin una validación previa, que las características de nuestros combustibles son tales que los coeficientes y relaciones responderán al mismo patrón observado por Rothermel, puede llevar a errores de cálculo, generado subestimación o sobrestimación en el comportamiento del fuego en la vegetación local. Determinar cuál sería el error evaluando mediante resultados de simulaciones, depende de disponer de mapas de combustibles validados para la zona, es decir, asegurarse que la asociación, adaptación o personalización de los modelos de combustibles se corresponden con lo observado en la realidad, aunque lo más adecuado sería evaluar la ecuación de la propagación del fuego mediante observaciones empíricas a campo o laboratorio. Por otro lado, el modelo de crecimiento del fuego (técnica de propagación elíptica) no incluye la propagación de posibles focos secundarios, produciéndose la detención de simulaciones con ciertos escenarios que en la realidad podrían permitir el avance del fuego debido a la liberación de pavesas.

La ventaja de las metodologías planteadas en este capítulo, es que se refieren al uso, en general, de simulaciones en la gestión de incendios. Esto significa que las metodologías deberían poder ser empleadas con simulaciones provenientes de otro simulador, siempre que genere las variables de entrada necesarias para desarrollar las técnicas aquí propuestas. Además, el valor agregado del método del ancho mínimo de barrera es que, si no se dispone de un simulador validado para el área de estudio, se pueden realizar las estimaciones ingresando datos conocidos de campo.

## CAPÍTULO 5

---

### CONCLUSIONES

### 5.1. Conclusiones generales

- ❖ El clasificador Máquina de Soporte Vectorial mostró una alta precisión, basada en el índice Kappa, en la clasificación realizada para la obtención del mapa de coberturas, a pesar de trabajar con un número de muestras de entrenamiento desbalanceado.
- ❖ Las variables topográficas, elevación y pendiente, constituyeron un aporte positivo en la diferenciación espacial de las coberturas vegetales. Los resultados sugerirían que el patrón de distribución de las coberturas analizadas no estaría influenciado por la orientación del terreno.
- ❖ La incorporación de variables de textura (entropía) e índices de vegetación (RDVI) como bandas auxiliares en la clasificación, no generaron un incremento de la precisión de los resultados. Sin embargo, trabajos de otros autores han demostrado lo contrario, por lo que se podría evaluar en futuros trabajos la incorporación de estas bandas variando las condiciones asociadas al cálculo de las mismas. Es decir, variando el tamaño de la ventana de observación y configuración del vector de dispersión para el cálculo de las variables de textura, y la fecha de adquisición de la imagen satelital a partir de la cual se deriva el índice de vegetación, entre otras.
- ❖ La implementación del sistema de clasificación de combustibles de Anderson (1982) resultó más conveniente que la del sistema de Scott & Burgan (2005) ya que se simplifica la diferenciación cualitativa (tipo de vegetación, altura y continuidad) entre modelos de combustibles. Si se contara con información del comportamiento del fuego sobre cada cobertura, se habría simplificado la asociación a un modelo según el sistema de Scott & Burgan.
- ❖ A pesar de que los mapas de combustibles construidos a partir de los diferentes sistemas de clasificación se apoyaron en la tabla de correspondencias entre los modelos originales de Anderson (1982) y los del nuevo conjunto de Scott & Burgan (2005), se observaron diferencias en los resultados de las simulaciones al utilizar uno u otro mapa. Así, se evidencia la necesidad de evaluar qué sistema de clasificación de combustibles sería más adecuado utilizar.
- ❖ La modificación del mapa de combustibles, asignándole diferente combustibilidad a dos coberturas vegetales que de acuerdo a los sistemas de clasificación empleados deberían ser asociadas a un mismo modelo de combustible, arrojó resultados más acordes a la realidad al realizar una réplica de un incendio real mediante simulaciones.
- ❖ De los dos puntos anteriores, se concluye que la asociación de una cobertura a un modelo de combustible definido para otra área geográfica no es algo trivial, y necesita de una validación más rigurosa.
- ❖ La validación de los modelos de combustibles requiere contar con información acerca de cómo se comporta el fuego al propagarse sobre las distintas coberturas (velocidad de propagación, altura y/o longitud de la llama, intensidad del frente de fuego). Por otro lado, para simular adecuadamente un incendio real es necesario disponer de datos precisos (espacial y temporalmente) de las condiciones climáticas

(temperatura y humedad ambiente, dirección e intensidad del viento, precipitaciones), del momento y lugar de la intervención humana en el caso que la hubiere, y de un mapa de combustibles que represente correctamente las características de combustibilidad de la vegetación local.

- ❖ La metodología de control de cambios y cálculo de fiabilidad global para comparar los resultados de distintas simulaciones mediante análisis de área quemada real y simulada, demostró ser una técnica útil que aporta valor estadístico a la validación de los resultados.
- ❖ Los resultados arrojados por FARSITE al realizar simulaciones de incendios de superficie, permiten categorizar el riesgo de incendio delimitando las zonas posibles de ataque de un incendio en curso o un incendio potencial de acuerdo a la longitud de la llama predicha para un área particular. También sería posible realizar la categorización en función de la intensidad del frente de fuego, ya que es otro de los raster generados como producto de una simulación en dicho software.
- ❖ Se mostró la utilidad de las simulaciones de incendio como parte del método propuesto para determinar dónde sería más propicio emplazar una barrera cortafuegos. Este método requiere de un mapa de riesgo de ignición y de conocer las condiciones climáticas típicas durante la temporada de incendios.
- ❖ El algoritmo implementado para la estimación del ancho mínimo de una barrera cortafuegos, arrojó resultados satisfactorios durante la evaluación que se le realizó en este trabajo. Igualmente, se recomienda efectuar más pruebas para una validación consistente. Si bien este método se trata de una primera aproximación, tiene un elevado valor por su aplicabilidad en la gestión de incendios, pudiendo predecir condiciones umbrales bajo las cuales una barrera será efectiva, diseñar estrategias de combate teniendo en cuenta las zonas donde las barreras no podrán contener el fuego o planificar vías seguras de acceso o escape durante un incendio.
- ❖ Se pudo indagar en profundidad el funcionamiento del software FARSITE, el cual permite simular con modelos de combustibles personalizados. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el modelo matemático de predicción que emplea es semiempírico, construido, en parte, a partir de datos experimentales registrados en combustibles de otra área geográfica, razón por la cual podría no representar adecuadamente el comportamiento del fuego en el área de estudio.
- ❖ Las metodologías propuestas como herramienta para la gestión de incendios, cuentan con la flexibilidad de poder aplicarse independientemente del software utilizado para generar información sobre el comportamiento del fuego. Si bien se las propuso con la idea de incorporar simulaciones para agilizar y facilitar la interpretación espacial de la información, en la mayoría de los casos puede trabajarse también realizando cálculos con datos puntuales proveniente de software sin técnicas de simulación incorporadas o incluso trabajando con datos de campo.

## 5.2. Aportes del trabajo

- ❖ Se generó un mapa de coberturas de la RN y PNQC actualizado a la fecha 26 de junio de 2012 y con una resolución espacial superior a lo que se puede obtener al trabajar con imágenes satelitales de libre acceso como Landsat o Modis. Se emplearon datos de campo para la construcción del mapa. Las clases de interés se definieron en función de los complejos de vegetación que podrían representar un comportamiento diferencial respecto al fuego. Esto le confiere al mapa de coberturas la adaptabilidad necesaria para poder construir a partir de éste, mapas de combustibles basados en diferentes sistemas de clasificación de combustibles o en modelos personalizados.
- ❖ Se definió un método basado en determinación de umbrales, que permite asignar o modificar la combustibilidad de una cobertura dada, para la utilización de mapas de combustibles más precisos durante una simulación de incendios. Esto es útil cuando el mapa de coberturas no representa fielmente la realidad debido a, por ejemplo, el efecto promedio del píxel, en particular cuando la resolución de un mapa no es elevada.
- ❖ Se realizó una reseña bibliográfica sobre los sistemas de clasificación de combustibles y una definición de los conceptos asociados a los modelos. Además, se llevó a cabo una recopilación de los estudios encontrados sobre la temática en Argentina.
- ❖ Se armaron claves (reglas de decisión) basadas en características determinables o estimables visualmente para la asociación de una cobertura particular a los modelos de combustibles estadounidenses de Anderson y de Scott & Burgan. Estas claves facilitan la asociación, fundamentalmente cuando no se dispone de información cuantitativa asociada a cada cobertura, lo cual es la realidad para la mayoría de las coberturas de nuestro país.
- ❖ Se construyeron mapas de combustibles empleando dos sistemas de clasificación de combustibles diferentes. Estos mapas no pudieron ser validados de manera estándar, por lo que se sugiere recabar la información necesaria para poder realizar una evaluación de cuál sería el mapa adecuado a utilizar y/o definir si es necesaria una modificación del mapa o adaptación de los modelos.
- ❖ Se propusieron alternativas de metodologías para la validación de combustibles.
- ❖ Se propusieron diferentes metodologías de relevancia para la planificación de estrategias de control y manejo de incendios. Una primera metodología, para la determinación de zonas seguras o zonas de ataque del fuego, diferenciando entre los tipos de ataques posibles o recomendados. Una segunda metodología, para localización óptima de barreras cortafuegos, basada en diferenciar las zonas donde el fuego tiende a tener un comportamiento de riesgo elevado independientemente del punto de ignición. Y una tercera metodología, para la estimación del ancho mínimo adecuado para una barrera cortafuegos, diseñada a partir del modelo físico de transferencia de calor por radiación.

- ❖ Se realizó un manual de procedimientos para la realización de simulaciones mediante el software FARSITE, registrando además los inconvenientes presentados durante la ejecución de las mismas.
- ❖ Se implementó el método de corrección de sombras C-correction en un código para ser ejecutado en el software ENVI, de manera de automatizar este pre-procesamiento.
- ❖ Por último, en cuanto concierne a mi formación de postgrado, este trabajo me permitió profundizar y fortalecer los conocimientos adquiridos durante el cursado de la maestría, relacionados al procesamiento de imágenes satelitales, manejo de SIG, programación y empleo de distintos programas informáticos.

### 5.3. Consideraciones futuras y sugerencias

- ❖ Investigar otros métodos de corrección o eliminación de sombras, para así reducir el efecto negativo de las mismas en la clasificación debido a la confusión que generan entre clases.
- ❖ Explorar otras técnicas de clasificación que permitan mejorar la separabilidad entre clases de interés, tales como combinación de imágenes ópticas, combinación de imágenes ópticas y radar, análisis multitemporal, inclusión de infrarrojo térmico e implementación del sistema LiDAR.
- ❖ Apuntar a la construcción de mapas de coberturas más específicos mediante la caracterización del perfil horizontal y vertical de la vegetación. Este tipo de mapas de coberturas sería más apropiado para la construcción de mapas de combustibles.
- ❖ Realizar experimentaciones a campo o llevar a cabo registros completos de datos del comportamiento del fuego durante quemas prescriptas o incendios no controlados. Esto sería fundamental para la definición de modelos de combustibles locales y evaluación o puesta a punto de las metodologías propuestas. Los datos de interés a registrar incluirían: tipo de cobertura sobre la cual propaga el fuego, y sus características (continuidad horizontal, altura, contenido de humedad); localización del foco de ignición; velocidad de avance del frente de fuego; temperatura e intensidad del frente; longitud y altura de la llama; área y perímetro de la superficie quemada; condiciones meteorológicas durante el incendio, medidos de ser posible cada 30' o menos y en distintos sectores (dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa), y actividad de grupos de combate del fuego (cuándo, dónde y tipo de actividad).
- ❖ Enfocar a los modelos de combustibles como coberturas que, al menos en principio, permitan categorizar el comportamiento del fuego. Esto aumentaría la factibilidad de contar con modelos propios para todo el territorio nacional, que aportarían al desarrollo de un índice de riesgo de incendios más acorde a la realidad por ser sitio-específico. Si bien no se podría utilizar un simulador de incendios como FARSITE, se podría emplear otro tipo de programa informático que emplee un modelo de predicción diferente del comportamiento del fuego (creado a partir de datos empíricos locales).



- ❖ Evaluar a campo si los umbrales de longitud de la llama e intensidad del frente de fuego propuestos por Andrews & Rothermel (1982) para la definición de zonas de ataque posible del fuego, se corresponden con lo observado en incendios ocurridos en la vegetación local (particularmente para el caso de incendios de pastizales).
- ❖ Trabajar en la metodología propuesta para localización de barreras cortafuegos, incluyendo un umbral en el número de simulaciones que deben coincidir en el comportamiento del fuego de alto riesgo, para así evitar posibles subestimaciones de áreas de mayor riesgo.
- ❖ Avanzar en la metodología propuesta para estimación de ancho mínimo de una barrera cortafuegos, incluyendo modificaciones que permitan reducir las simplificaciones del método físico propuesto. Entre ellas se pueden mencionar, la incorporación del modelo de transferencia de calor por convección, trabajar con datos asociados a modelos de combustibles locales, posibilitar el cálculo del ancho de barrera más allá de la resolución del píxel.
- ❖ Se debe considerar que las metodologías planteadas que incluyen el uso de simulaciones, asumen que se cuenta con un mapa de combustibles acorde a la realidad, con datos climáticos conocidos, y que el comportamiento del fuego predicho por el simulador se corresponde con lo observado a campo. Este último punto lleva a la necesidad de validar la implementación local del software FARSITE o desarrollar un simulador local basado en datos experimentales realizados en el área geográfica donde se lo quiere utilizar.
- ❖ Unificar las líneas de investigación y esfuerzos relacionadas al control, monitoreo y manejo del fuego, fomentando y manteniendo la interacción entre distintas instituciones participantes en la gestión de incendios, comunicando y discutiendo los avances y resultados obtenidos en el tema y recopilando experiencias de campo. La implementación exitosa de un sistema integral y nacional de prevención y manejo del fuego, dependerá de la existencia de un compromiso a largo plazo de las líneas investigativas y de que los requerimientos del sistema propuesto sean acordes a los recursos económicos y tecnológicos de las agencias de investigación y de los organismos encargados del manejo del fuego.

# APÉNDICE A

---

## Implementación de algoritmos

### Código Corrección de sombras

```
;Autor: Laura Zalazar
;Fecha de última modificación: 20 de mayo 2013
;Corrección de sombras producidas por la topografía
;Se trabaja con la imagen en reflectancia, pendiente y orientación
(ambas en grados). Valores "No dato" = NaN.
;Deben ser archivos en formato envi
;El directorio de trabajo de IDL debe ser el mismo en el que se
encuentran guardadas las imágenes.
```

```
th=completar ;th=ángulo de elevación solar
az=completar ;az=ángulo azimutal solar
sz=90.-th ;sz=ángulo cenital solar (complementario al ángulo de
elevación)
```

```
ENVI_OPEN_FILE, 'Nombre_imagen_reflectancia', r_fid=fid, no_realize=1
ENVI_FILE_QUERY, fid, pos=pos, ns=ns, nl=nl, nb=nb, dims=dims,
interleave=interleave, sensor_type=sensor_type, wl=wl, xstart=xstart,
ystart=ystart;proj = ENVI_GET_PROJECTION(fid=fid)
map_info=envi_get_map_info(fid=fid)
pos=lindgen(nb)
```

```
refl=fltarr(ns,nl,nb) ;se crea la imagen vacía donde se cargarán los
datos leídos
maximos=fltarr(nb) ;se crea el vector donde se guardarán los valores
máximos para cada banda
```

```
for i=0, nb-1 do begin
```

```
refl(*,*,i)=ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=i)
maximos(i)=max(refl(*,*,i))
```

```
endfor
```

```
ENVI_OPEN_FILE, 'Nombre_imagen_pendiente', r_fid=fid, no_realize=1
ENVI_FILE_QUERY, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, dims=dims,
interleave=interleave
slope=ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0)
```

```
ENVI_OPEN_FILE, 'Nombre_imagen_orientacion', r_fid=fid, no_realize=1
ENVI_FILE_QUERY, fid, ns=ns, nl=nl, nb=nb, dims=dims,
interleave=interleave
aspect=ENVI_GET_DATA(fid=fid, dims=dims, pos=0)
```

```
;Creación de variables:
```

```
dim=size(refl) ;toma las dimensiones de la matriz de reflectancia
cols=dim[1] ;guarda número de columnas
rows=dim[2] ;guarda número de filas
bands=dim[3] ;guarda número de bandas
```

```
il=temporary(fltarr(cols,rows)) ;matriz para guardar valores de
iluminación
```

```
;se crean los vectores donde se cargarán los datos para cada banda:
reflmed=fltarr(bands) ;guarda la media de cada banda
m=fltarr(bands) ;pendiente de la recta de regresión
b=fltarr(bands) ;ordenada al origen en la recta de regresión
```

```

c=fltarr(bands) ;cociente entre el término independiente (b) y la
pendiente (m) de la recta de regresión entre la reflectancia en
terreno y la iluminación
cont=fltarr(bands) ;contador de valores finitos
acum_refl=fltarr(bands) ;acumulador de valores de reflectancia
(sumatoria)
num=fltarr(bands) ;para el cálculo de m
acum_num=fltarr(bands) ;para el cálculo de m
denom=fltarr(bands) ;para el cálculo de m
acum_denom=fltarr(bands) ;para el cálculo de m
umbral=fltarr(bands) ;guarda los valores umbrales de iluminación
que determinan si se realiza o no el cálculo de la reflectancia
horizontal.
ilmasc=temporary(fltarr(cols,rows,bands)) ;guarda valores de il + c
reflh=temporary(fltarr(cols,rows,bands)) ;matriz para reflectancia
horizontal

;PARA CALCULAR PROMEDIO POR BANDAS. Las imágenes tienen valores NaN
fuera del área de interés (de no ser así, utilizar una máscara)
for k=0, bands-1 do begin
  for i=0, cols-1 do begin
    for j=0, rows-1 do begin

      if (finite(refl(i,j,k)) eq 1) then begin

        cont(k)=cont(k)+1
        acum_refl(k)=acum_refl(k)+refl(i,j,k)

      endif
    endfor
  endfor
endfor

;PARA OBTENER LA ILUMINACIÓN:

for i=0, cols-1 do begin
  for j=0, rows-1 do begin

    if (finite(refl(i,j,0)) eq 1) then begin

      il(i,j)=temporary((cos((!pi*slope(i,j))/180.)*cos((!pi*sz)/180.))+(sin
      ((!pi*slope(i,j))/180.)*sin((!pi*sz)/180.)*cos((!pi*(az-
      aspect(i,j)))/180.)))

    endif

  endfor
endfor

ilmed=total(il)/cont(0) ;cálculo de la media de la variable
iluminación
ilm=il-ilmed ;a cada valor de la variable iluminación se
le resta la media de la variable

```

```

for k=0, bands-1 do begin

  reflmed(k)=acum_refl(k)/cont(k) ;cálculo de la media para cada banda
  de reflectancia

  for i=0, cols-1 do begin
    for j=0, rows-1 do begin

      if (finite(refl(i,j,k)) eq 1) then begin ;solo tiene en
  cuenta valores finitos

;PARA OBTENER LOS COEFICIENTES B Y M PARA CALCULAR LA CONSTANTE C:
  num(k)=ilm(i,j)*(refl(i,j,k)-reflmed(k))
  acum_num(k)=acum_num(k)+num(k)

  denom(k)=ilm(i,j)^2
  acum_denom(k)=acum_denom(k)+denom(k)

  endif
  endfor
endfor
  m(k)=acum_num(k)/acum_denom(k)
  b(k)=reflmed(k)-(m(k)*ilmed)
  c(k)=b(k)/m(k)
  umbral(k)=(maximos(k)*(cos((!pi*sz)/180.)+c(k)))-c(k)
endfor

for k=0, bands-1 do begin
  for i=0, cols-1 do begin
    for j=0, rows-1 do begin

      if (finite(refl(i,j,k)) eq 1) then begin

        ilmasc(i,j,k)=il(i,j)+c(k)

        if (il(i,j) ge max(umbral)) then begin ;

;PARA OBTENER LA REFLECTANCIA HORIZONTAL (REFLH):
  reflh(i,j,k)=temporary(refl(i,j,k)*((cos((!pi*sz)/180.)+c(k))/ilmasc(i
  ,j,k)))

        endif else if (il(i,j) lt max(umbral)) then begin

          reflh(i,j,k)=temporary(refl(i,j,k))

        endif

      endif
    endfor
  endfor
  reflh(*,*,k)=temporary(reflh(*,*,k)*masknan_pque)
endfor

contil=where(refl eq reflh, count) ;indica la cantidad de píxeles que
no fueron transformados a reflectancia horizontal
;count=la cantidad - contil=las posiciones

```

```
ENVI_WRITE_ENVI_FILE,                                reflh,  
out_name='Nombre_imagen_reflectancia_horiz.img',  
interleave=interleave, wl=wl, sensor_type=sensor_type, xstart=xstart,  
ystart=ystart, map_info=map_info  
  
end
```

### Código Conversión ASCII FARSITE

```
;Autor: Laura Zalazar
;Fecha de última modificación: 17 de febrero 2013
;Transforma el archivo ascii obtenido como salida de una simulación en
FARSITE por el formato ascii legible por ENVI. Se accede a este módulo
desde ENVI mediante File > Open External File > Generic Formats >
ASCII Farsite (copiar el archivo IDL en la carpeta Save_add)
```

```
PRO modificacion_ascii_define_buttons, buttonInfo
  ENVI_DEFINE_MENU_BUTTON, buttonInfo, $
    VALUE = 'ASCII Farsite', $
    REF_VALUE = 'ASCII', $
    EVENT_PRO = 'modificacion_ascii', $
    UVALUE = 'ASCII Farsite', $
    POSITION = 'after'
END

pro modificacion_ascii, event

catch, theError
if theError ne 0 then begin
  void = Dialog_Message(!Error_State.Msg, /error)
  return
endif

filters=['*.ros;*.toa;*.fli;*.fml;*.hpa;*.rci;*.cfr;*.sdr']
file_in= ENVI_PICKFILE(title='Enter ASCII Farsite filename',
filter=filters)

dim=read_ascii(file_in, num_records=2)
cols=dim.field1[1,0]
rows=dim.field1[1,1]

v_data=read_ascii(file_in, data_start=6)
m_data=reform(v_data.field1,cols,rows)

base = widget_auto_base(title='Enter output filename')
wo = widget_outf(base, uvalue='outf', /auto)
result = auto_wid_mng(base)
if (result.accept eq 0) then return
print, 'Selected File', result.outf

ENVI_WRITE_ENVI_FILE, m_data, out_name=result.outf

end
```



**Código** *Estimación ancho mínimo de barrera*

```

;Autor: Laura Zalazar
;Fecha de última modificación: 2 de marzo 2014
;Calcula el ancho mínimo apropiado que debería tener una barrera
cortafuegos. Basado en el modelo de transferencia radiativa de calor,
modelo del cuerpo sólido.
;Necesita exportar a IDL los resultados de longitud de la llama (fl)
de simulaciones, resultado de humedad de combustibles de simulaciones,
máscara de la barrera, mapa de combustibles.

;Matrices de entrada:
;"llama"=archivo con longitud de la llama (farsite), cada simulación
es una banda, en m.
;"humedad"=archivo de humedad de combustibles de farsite.
;"mask"=máscara con la barrera cortafuego.
;"comb"=archivo de mapa de combustibles.

;Determinación de dimensiones para construir nuevas matrices:
dim=size(llama)
arr=dim[0]
cols=dim[1]
rows=dim[2]
bands=dim[3]

;RUTINA PARA DETERMINAR EL VALOR DE FL (longitud de la llama)del
frente de fuego que alcanza la barrera, determinado a partir de todas
las simulaciones generadas de un mapa de riesgo de ignición

fl=fltarr(cols,rows) ;matriz construida para guardar los resultados de
valor de FL máximos, en metros

if (arr eq 2) then begin ;si la simulación es sólo una

    for j=0, rows-1 do begin
        for i=0, cols-1 do begin

            if (mask(i,j) eq 1) then begin ;se leerán los resultados
correspondientes a los píxeles donde iría la barrera
                fl(i,j)=(llama(i,j))
            endif
        endfor
    endfor

endif else if (arr eq 3) then begin ;se buscará el máximo FL entre
todas las simulaciones (bandas)realizadas

    for j=0, rows-1 do begin
        for i=0, cols-1 do begin
            for k=0, bands-1 do begin

                if (mask(i,j) eq 1) then begin ;Se leerán los resultados
correspondientes a los píxeles donde iría la barrera

                    if (fl(i,j) lt llama(i,j,k)) then begin
                        fl(i,j)=(llama(i,j,k)) ;si el valor en la nueva banda es
mayor que el anterior, será reemplazado
                    endif else if (fl(i,j) ge llama(i,j,k)) then begin
                        fl(i,j)=fl(i,j)
                    endif
                endif
            endfor
        endfor
    endfor

```

```

    endfor
  endfor
endfor
endif

```

;RUTINA PARA EL CÁLCULO DE VARIABLES ASOCIADAS AL COMBUSTIBLE:

```

mf=fltarr(cols,rows) ;matriz construida para guardar los valores de
humedad de combustible muerto de lh leídos del archivo farsite
wo=fltarr(cols,rows) ;matriz construida para guardar la carga de
combustible de lh según el modelo presente
trp=fltarr(cols,rows) ;matriz construida para guardar el tiempo de
residencia por pixel según el modelo presente
carga=[0.185, 0.5, 0.752, 1.252, 0.250, 0.375, 0.282, 0.375, 0.730,
0.752, 0.375, 1.002,1.752] ;vector con los valores de carga de
combustible de la clase lh para cada modelo de Anderson, en kg/m^2
trc=[119.07, 406.79, 119.07, 485.63, 237.00, 701.85, 701.85, 851.82,
210.43, 847.02, 879.59, 896.41, 892.80] ;vector con los valores de
tiempo de residencia por combustible para cada modelo de Anderson, en
segundos

```

```

for j=0, rows-1 do begin
  for i=0, cols-1 do begin

    if (mask(i,j) eq 1) then begin

      mf(i,j)=humedad(i,j)

      if (comb(i,j) eq 1) then begin
        wo(i,j)=carga(0)
        trp(i,j)=trc(0)
      endif else if (comb(i,j) eq 2) then begin
        wo(i,j)=carga(1)
        trp(i,j)=trc(1)
      endif else if (comb(i,j) eq 3) then begin
        wo(i,j)=carga(2)
        trp(i,j)=trc(2)
      endif else if (comb(i,j) eq 4) then begin
        wo(i,j)=carga(3)
        trp(i,j)=trc(3)
      endif else if (comb(i,j) eq 5) then begin
        wo(i,j)=carga(4)
        trp(i,j)=trc(4)
      endif else if (comb(i,j) eq 6) then begin
        wo(i,j)=carga(5)
        trp(i,j)=trc(5)
      endif else if (comb(i,j) eq 7) then begin
        wo(i,j)=carga(6)
        trp(i,j)=trc(6)
      endif else if (comb(i,j) eq 8) then begin
        wo(i,j)=carga(7)
        trp(i,j)=trc(7)
      endif else if (comb(i,j) eq 9) then begin
        wo(i,j)=carga(8)
        trp(i,j)=trc(8)
      endif else if (comb(i,j) eq 10) then begin
        wo(i,j)=carga(9)
        trp(i,j)=trc(9)
      endif else if (comb(i,j) eq 11) then begin
        wo(i,j)=carga(10)
        trp(i,j)=trc(10)
      endif
    endif
  endfor
endfor

```

```

endif else if (comb(i,j) eq 12) then begin
  wo(i,j)=carga(11)
  trp(i,j)=trc(11)
endif else if (comb(i,j) eq 13) then begin
  wo(i,j)=carga(12)
  trp(i,j)=trc(12)
endif else begin
  wo(i,j)=0
  trp(i,j)=0
endelse
endif
endfor
endfor

;Definición y cálculo de variables para determinar el Qr (calor
transferido por radiación) y otras:
;Qr: calor transmitido por radiación, en kW/m^2
;Qig: calor de ignición del combustible, en kJ/kg
;Qrt: calor total radiado, en kJ/m^2
;Qiga: calor de ignición por área, en en kJ/m^2

Hr=completar ;humedad ambiente, en %
T=completar ;temperatura ambiente, en °C
pow=(10^(8.07131-(1730.63/(233.426+T))))*133.322 ;presión del vapor de
agua a la temperatura ambiente, en Pa
pw=(pow*Hr)/100. ;presión parcial del vapor de agua, en Pa
Ep=completar ;poder emisor, en kW/m^2
vw=completar ;velocidad del viento, en m/s
resol=completar ;resolución espacial, en metros
x=1 ;distancia entre el emisor y el receptor, en metros

anchom=fltarr(cols,rows) ;matriz para el ancho de barrera

;RUTINA PARA DETERMINAR EL Qr (calor radiado), Qig (calor de
ignición), Qrt, Qiga Y ANCHO MÍNIMO DE LA BARRERA.

for j=0, rows-1 do begin
  for i=0, cols-1 do begin
    x=1
    if (mask(i,j) eq 1) and (wo(i,j) gt 0) then begin

      if (vw ne 0) then begin
        psi=atan(2.24*((fl(i,j)/vw^2)^0.5)) ;ángulo de inclinación
de las llamas respecto a la horizontal, en radianes
      endif else begin
        psi=(90*!pi)/180.
      endelse

      fi=(!pi/2)-psi ;ángulo de inclinación de las llamas
respecto al eje vertical, en radianes
      hr=(fl(i,j)*cos(fi))/resol
      xr=(x-(fl(i,j)*sin(fi)))/resol
      A=1/sqrt(hr^2+xr^2)
      B=hr/sqrt(1+xr^2)

      tao=2.02*(pw*x)^(-0.09) ;tao:transmisividad atmosférica,
adimensional
      F=(1/(2*!pi))*(hr*A*atan(A)+(B/hr)*atan(B)) ;F:factor vista,
adimensional
    endif
  endfor
endfor

```

```

    Qr=Ep*tao*F           ;Ecuación de transferencia de calor por
radiación (modelo del cuerpo sólido), en kW/m^2
    Qrt=Qr*trp(i,j)      ;Qrt: calor total radiado, en kJ/m^2

    Qig=(250+1.116*mf(i,j))*2.3259 ;Ecuación de Rothermel para el
calor de ignición, en kJ/kg - Cte 2.3259 transforma las unidades de
Btu/lb a kJ/kg
    Qiga=Qig*wo(i,j)     ;Qia: calor de ignición
por área, en kJ/m^2

    anchom(i,j)=x

    while (Qrt ge Qiga)and (x le resol) do begin ;se
recalculará incrementando la distancia de a un metro hasta que
Qrt<Qiga. El proceso se detiene cuando la distancia es mayor a la
resolución, dejando registro de que se necesitó superarla.
        x=x+1
        xr=(x-(fl(i,j)*sin(fi)))/resol
        A=1/sqrt(hr^2+xr^2)
        B=hr/sqrt(1+xr^2)

        tao=2.02*(pw*x)^(-0.09)
        F=(1/(2*pi))* (hr*A*atan(A)+(B/hr)*atan(B))
        Qr=Ep*tao*F
        Qrt=Qr*trp(i,j)

        Qig=(250+1.116*mf(i,j))*2.3259
        Qiga=Qig*wo(i,j)

        anchom(i,j)=x

    endwhile

    endif else if (mask(i,j) eq 1) and (wo(i,j) eq 0) then begin

        anchom(i,j)=0 ;indica zonas de la barrera en donde no hay
combustible

    endif

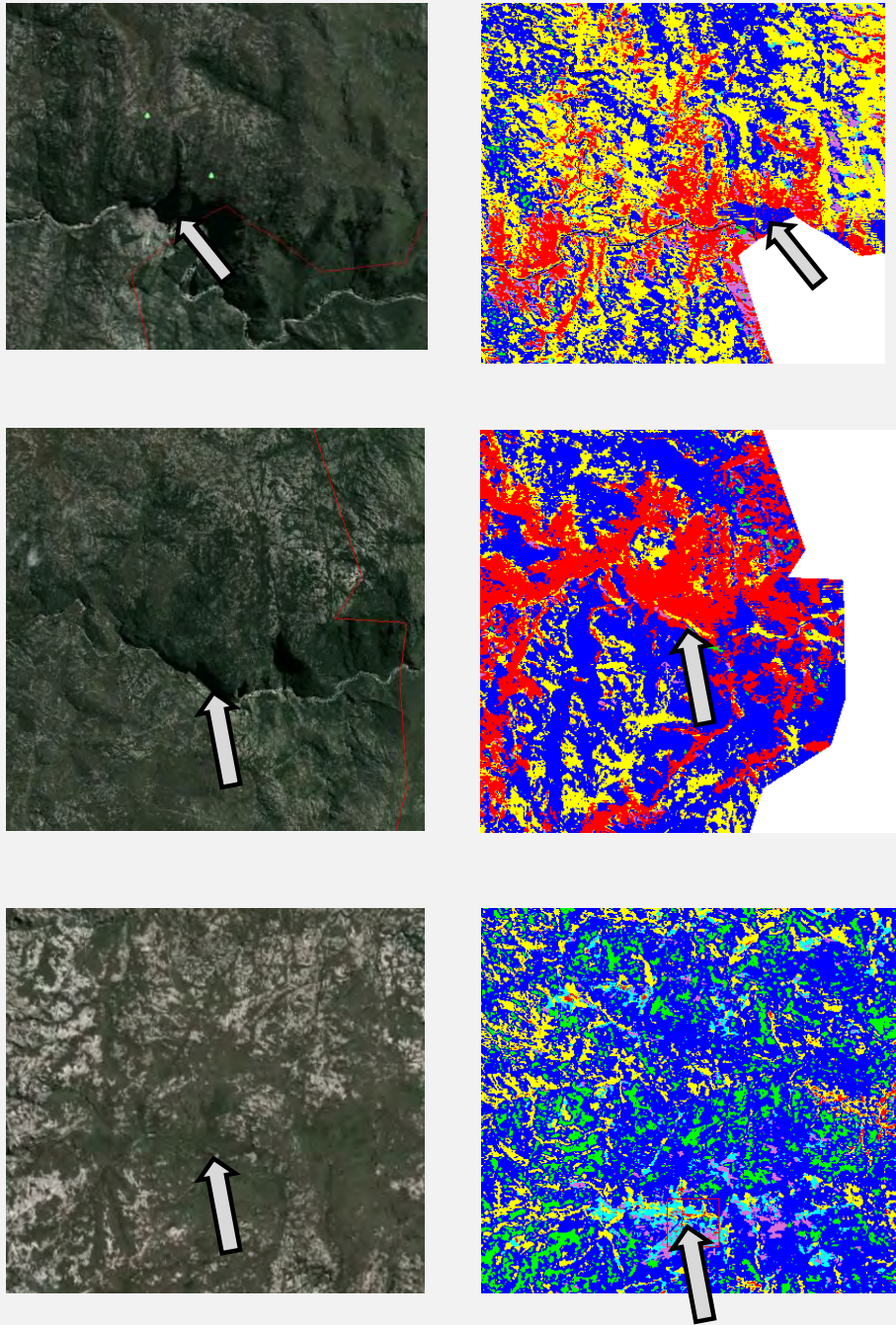
endfor
endfor
end

```

## APÉNDICE B

---

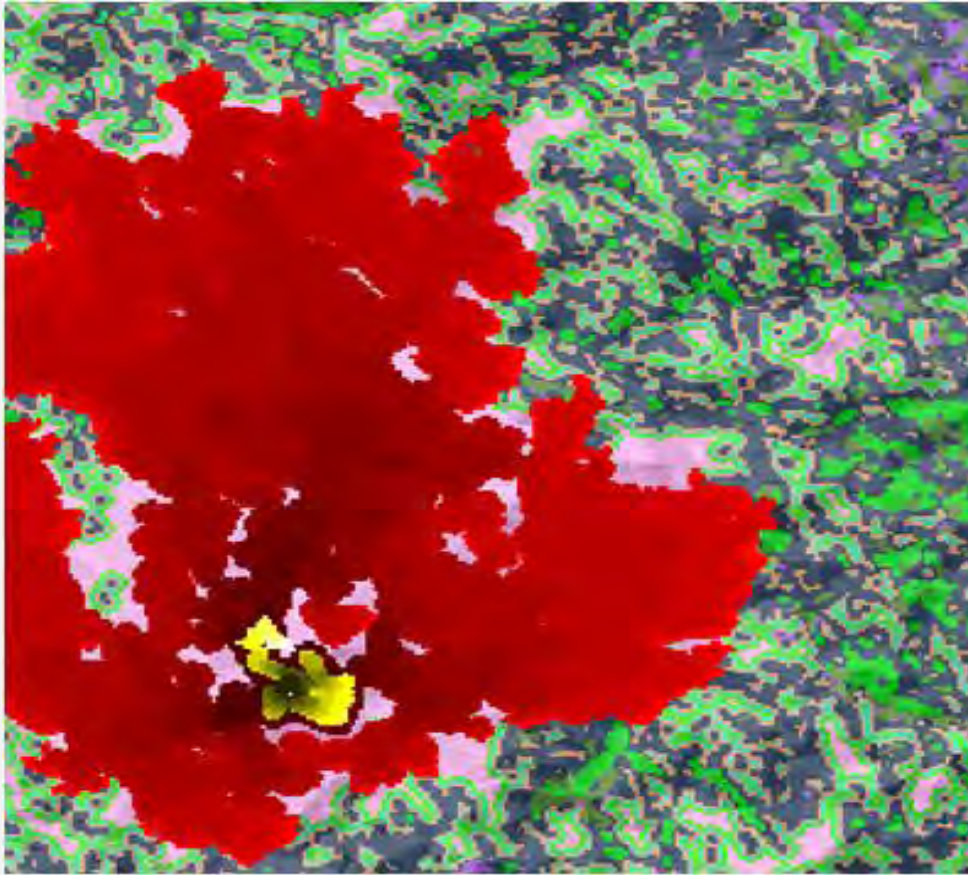
Figuras y tablas



**Figura 1.** Comparación de distintos sectores del PNQC mediante observación de Google Earth (izquierda) y de la imagen clasificada (derecha). Las flechas ejemplifican coberturas clasificadas erróneamente. Primera y segunda fila se corresponden a zonas del NE del Parque mientras que la tercera fila al SO.

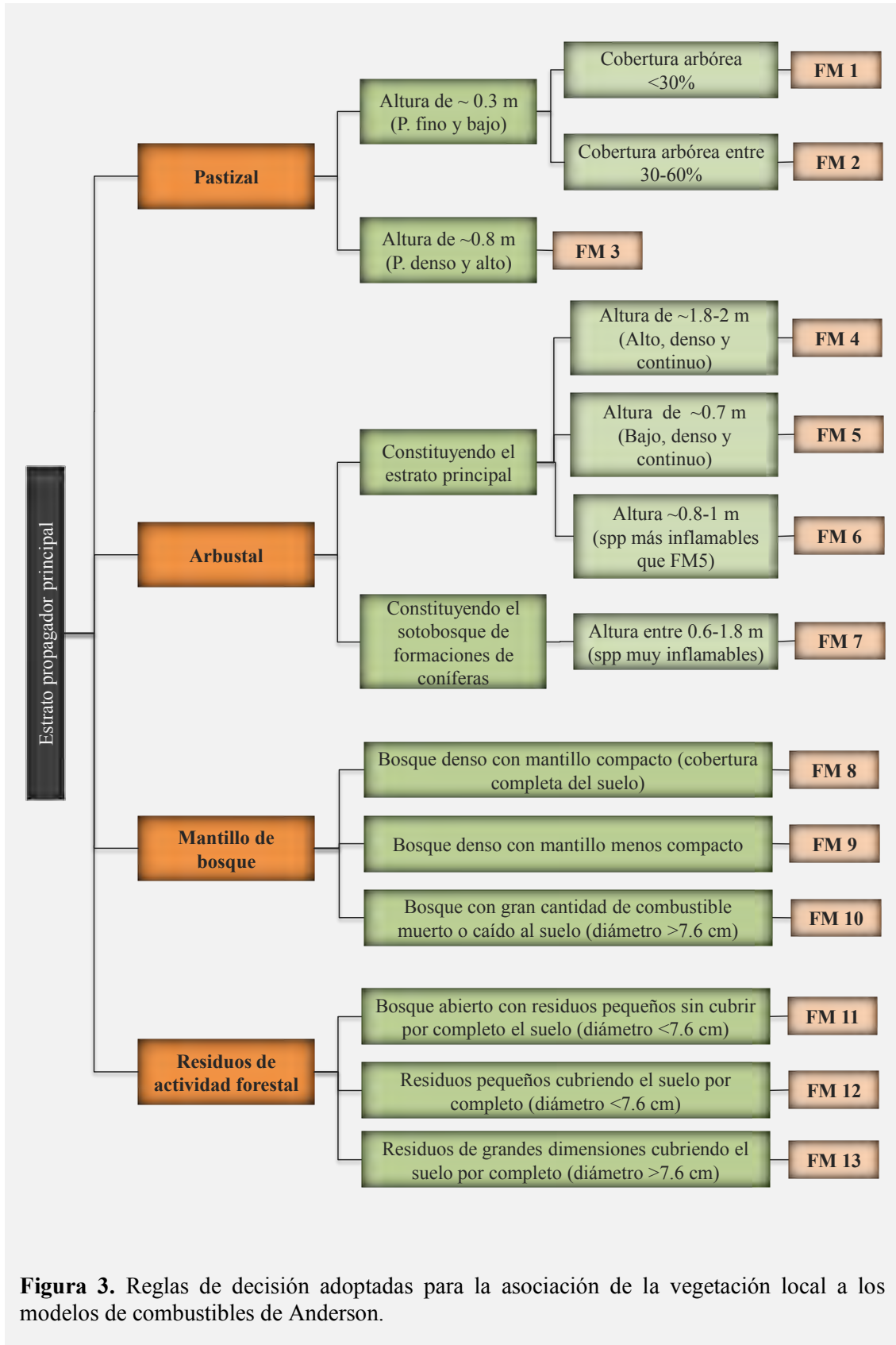
Se indican en la primera y segunda fila áreas que debieran haber sido clasificadas como “Matorral/Bosque” (en rojo) y en cambio se clasificaron como “Pajonal fino” (en azul) y “Pajonal grueso” (en amarillo), mientras que en la tercer fila se indica un área que se corresponde con la clase “Pajonal grueso” y fue clasificada como “Matorral/Bosque”



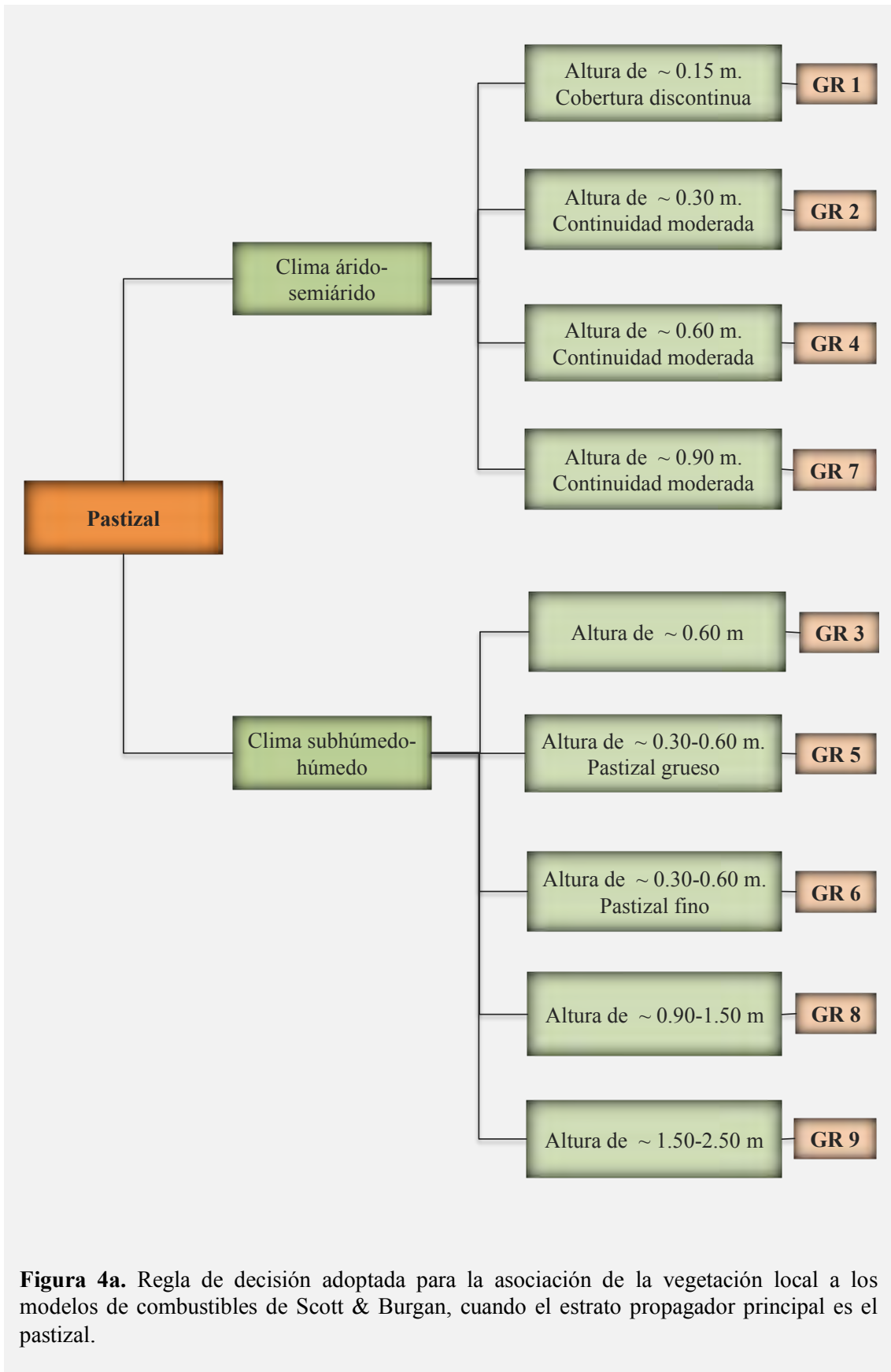


**Figura 2.** Superposición de simulaciones de incendios realizadas con FARSITE. En amarillo, área afectada por el fuego al simular con el mapa de coberturas sin modificaciones. En rojo, área afectada por el fuego al simular con el mapa de coberturas luego de aplicarle el algoritmo de asignación de combustibilidad a la roca. Ambas simulaciones se realizaron bajo iguales condiciones, excepto por el mapa de coberturas empleado a modo de mapa de combustibles.

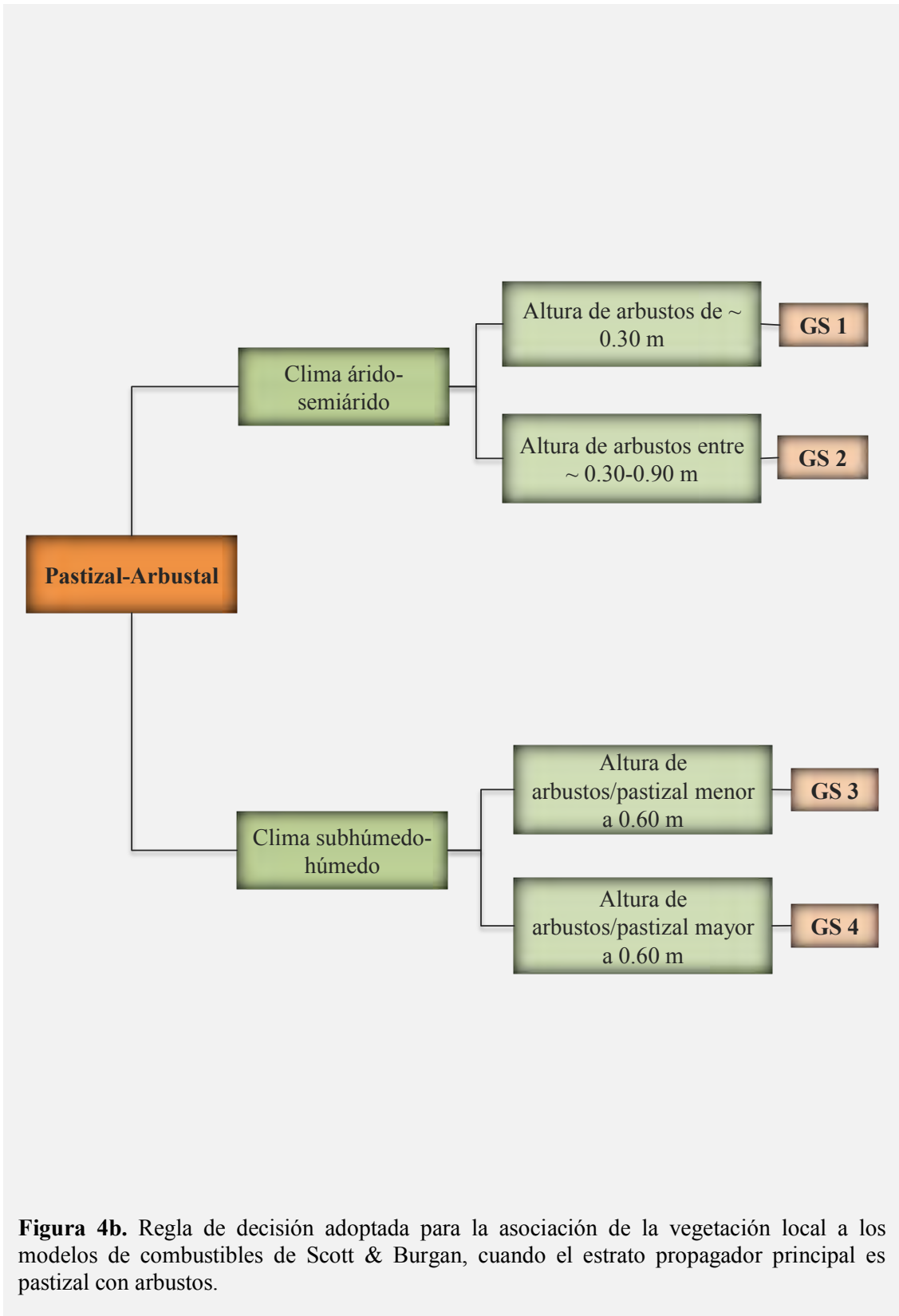




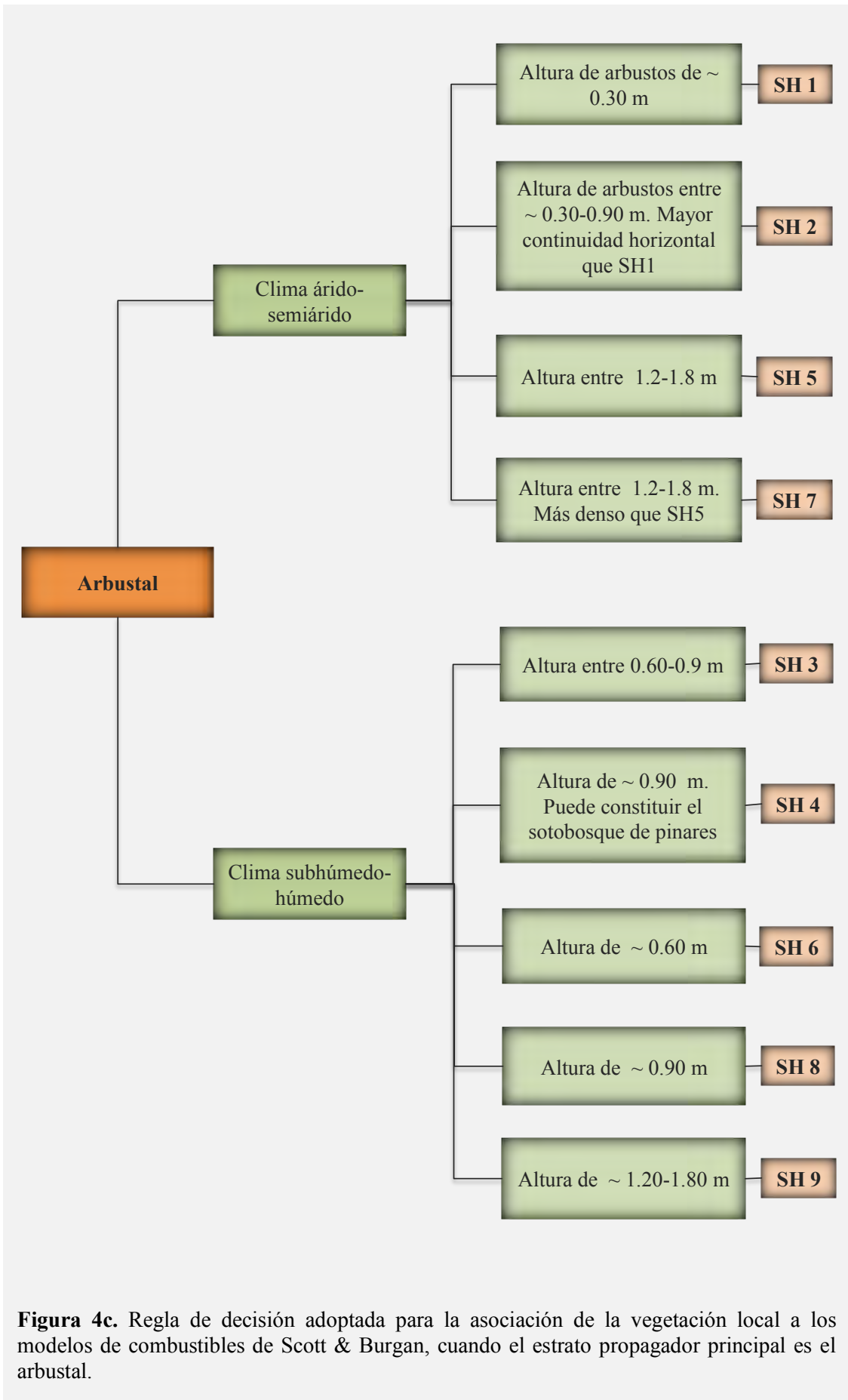
**Figura 3.** Reglas de decisión adoptadas para la asociación de la vegetación local a los modelos de combustibles de Anderson.



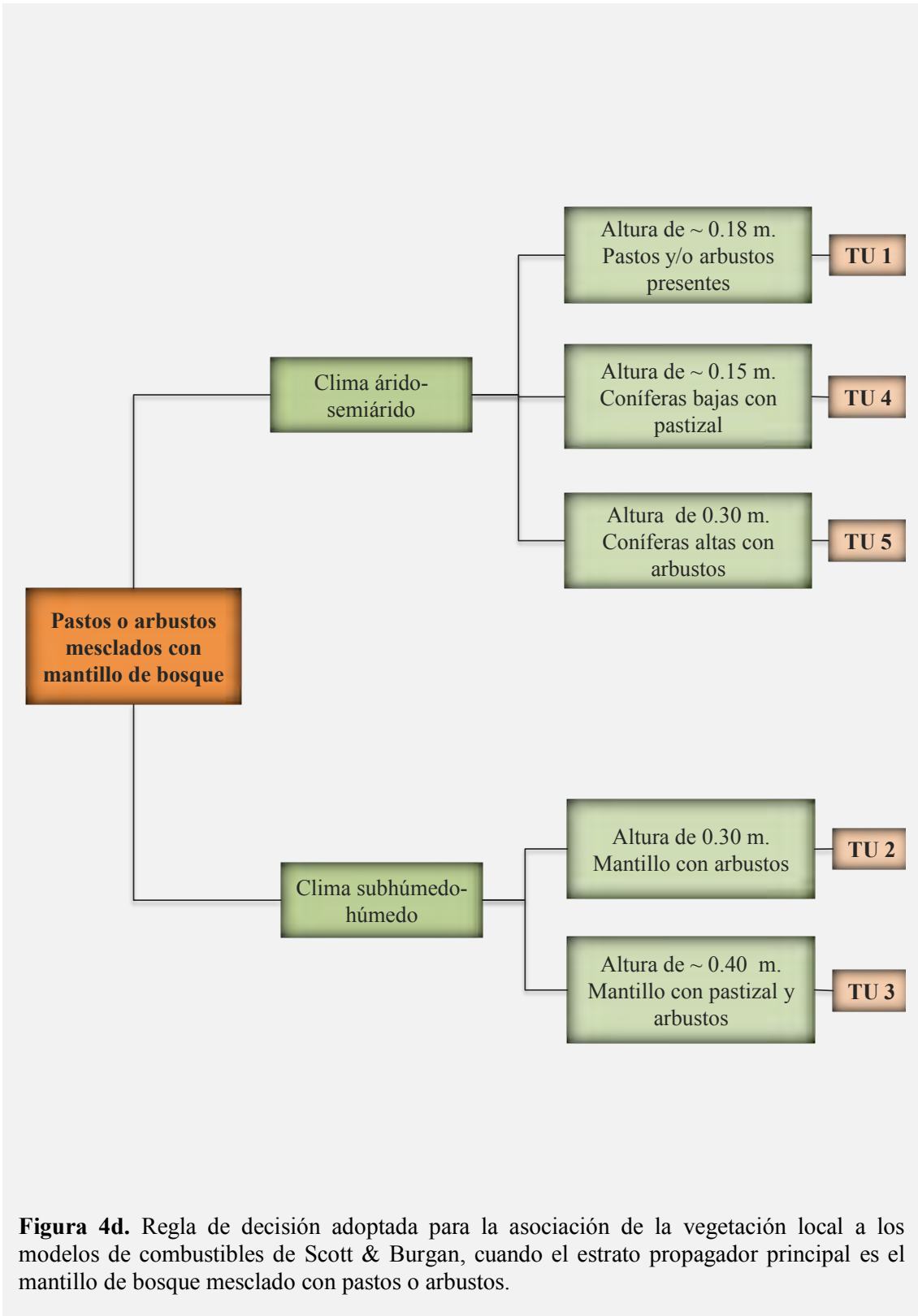
**Figura 4a.** Regla de decisión adoptada para la asociación de la vegetación local a los modelos de combustibles de Scott & Burgan, cuando el estrato propagador principal es el pastizal.



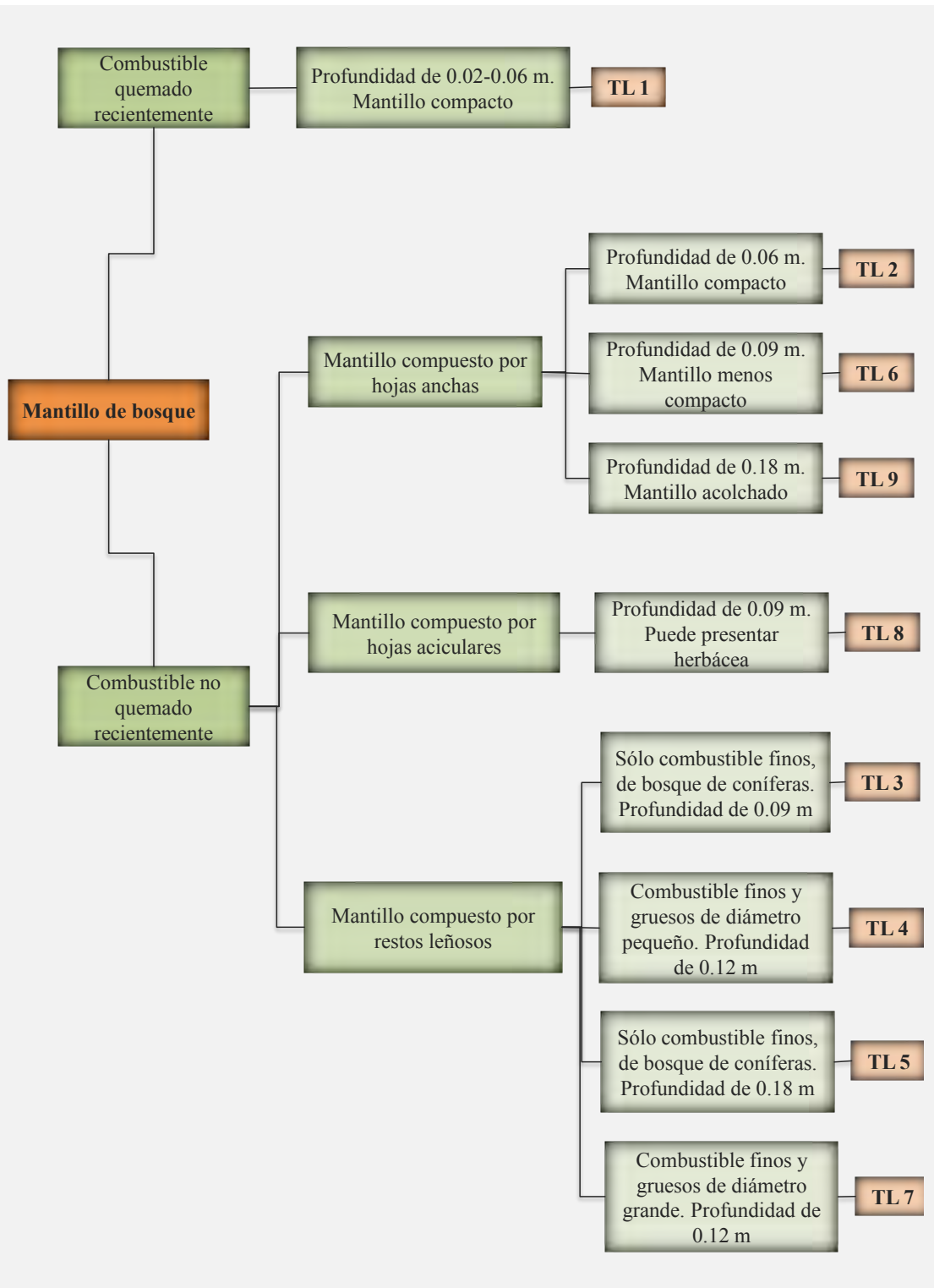
**Figura 4b.** Regla de decisión adoptada para la asociación de la vegetación local a los modelos de combustibles de Scott & Burgan, cuando el estrato propagador principal es pastizal con arbustos.



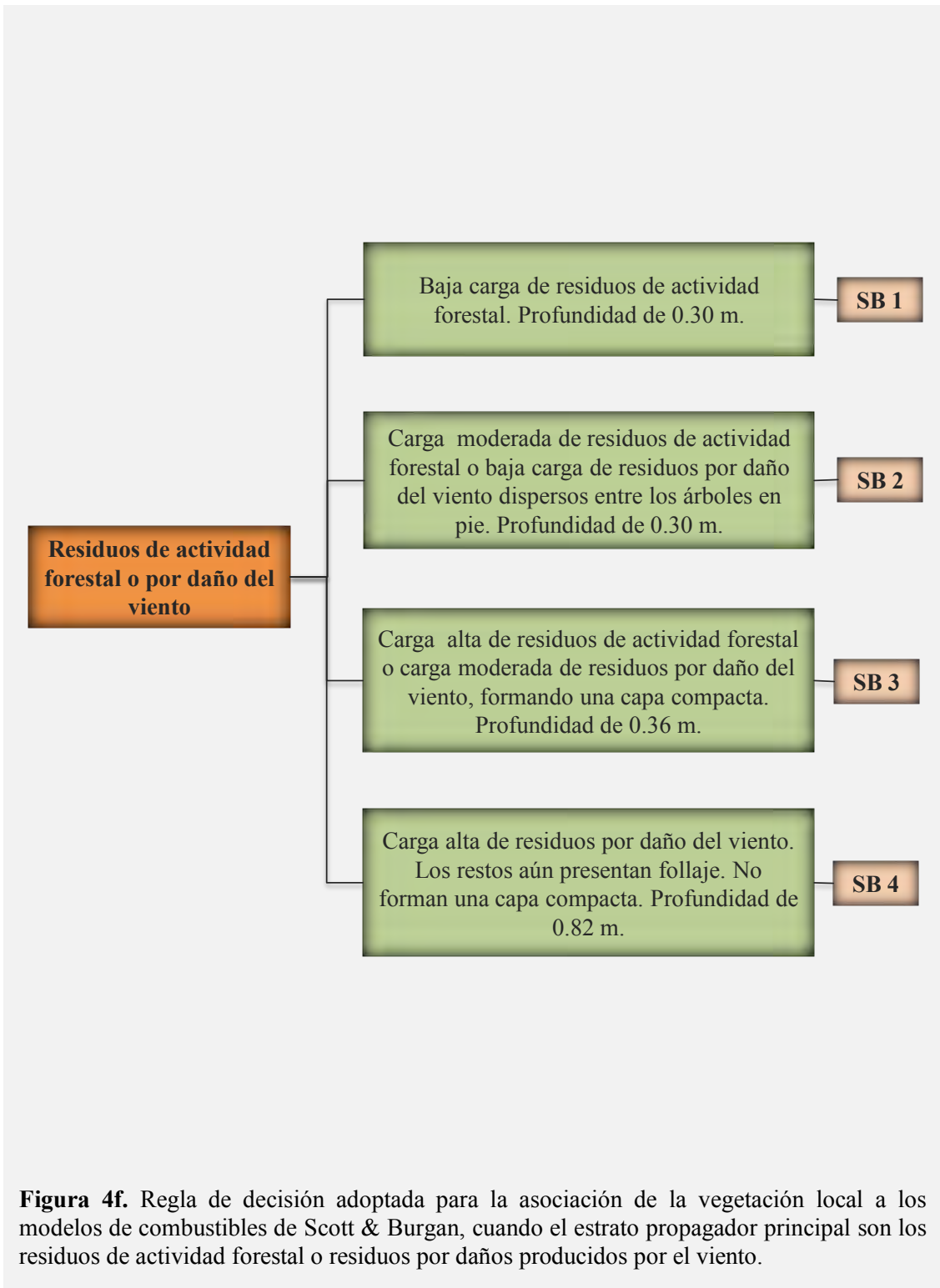
**Figura 4c.** Regla de decisión adoptada para la asociación de la vegetación local a los modelos de combustibles de Scott & Burgan, cuando el estrato propagador principal es el arbustal.



**Figura 4d.** Regla de decisión adoptada para la asociación de la vegetación local a los modelos de combustibles de Scott & Burgan, cuando el estrato propagador principal es el mantillo de bosque mezclado con pastos o arbustos.



**Figura 4e.** Regla de decisión adoptada para la asociación de la vegetación local a los modelos de combustibles de Scott & Burgan, cuando el estrato propagador principal es el mantillo de bosque.



**Figura 4f.** Regla de decisión adoptada para la asociación de la vegetación local a los modelos de combustibles de Scott & Burgan, cuando el estrato propagador principal son los residuos de actividad forestal o residuos por daños producidos por el viento.



**Tabla 1.** Factores de ajustes del viento (WAF) recomendados de acuerdo al modelo de combustible y a su grado de exposición. Tabla del sistema de ayuda del software BehavePlus (tomado de Andrews 2012).

GRADO DE EXPOSICIÓN	WAF	MODELO DE COMBUSTIBLE
<b>Expuesto</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Combustibles no protegidos del viento</li> <li>• Sin estratos superiores</li> <li>• Estrato superior disperso</li> <li>• Árboles que perdieron su follaje</li> <li>• Árboles que ofrecen poca cobertura</li> </ul>	0.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 4, 13</li> <li>• GR7, GR8, GR9</li> <li>• SH4, SH5, SH7, SH8, SH9</li> </ul>
	0.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1, 2, 3, 5, 6, 7, 10, 11, 12</li> <li>• GR2, GR3, GR4, GR5, GR6</li> <li>• GS1, GS2, GS3, GS4</li> <li>• SH1, SH2, SH3, SH6</li> <li>• TU2, TU3, TU5</li> <li>• SB1, SB2, SB3, SB4</li> </ul>
	0.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 8, 9</li> <li>• GR1</li> <li>• TU1, TU4</li> <li>• TL1, TL2, TL3, TL4, TL5, TL6, TL7, TL8, TL9</li> </ul>
<b>Cubierto parcialmente</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Árboles en parches</li> <li>• Árboles a mitad de la pendiente o más arriba, con viento soplando directamente a la pendiente</li> </ul>	0.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Todos los modelos</li> </ul>
<b>Cubierto totalmente</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Árboles en terreno plano o pendientes suaves</li> <li>• Árboles próximos a la base de montañas con pendiente escalonada</li> </ul>	0.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cobertura abierta: todos los modelos</li> </ul>
	0.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cobertura cerrada: todos los modelos</li> </ul>

**Tabla 2.** Factores de ajustes del viento (WAF) recomendados de acuerdo al porcentaje de cobertura del dosel (tomado de Andrews 2012).

<b>COBERTURA DEL DOSEL (CD)</b>	<b>WAF</b>
$5 < CD \leq 10$	0.30
$10 < CD \leq 15$	0.25
$15 < CD \leq 30$	0.20
$30 < CD \leq 50$	0.15
$CD > 50$	0.10

## APÉNDICE C

---

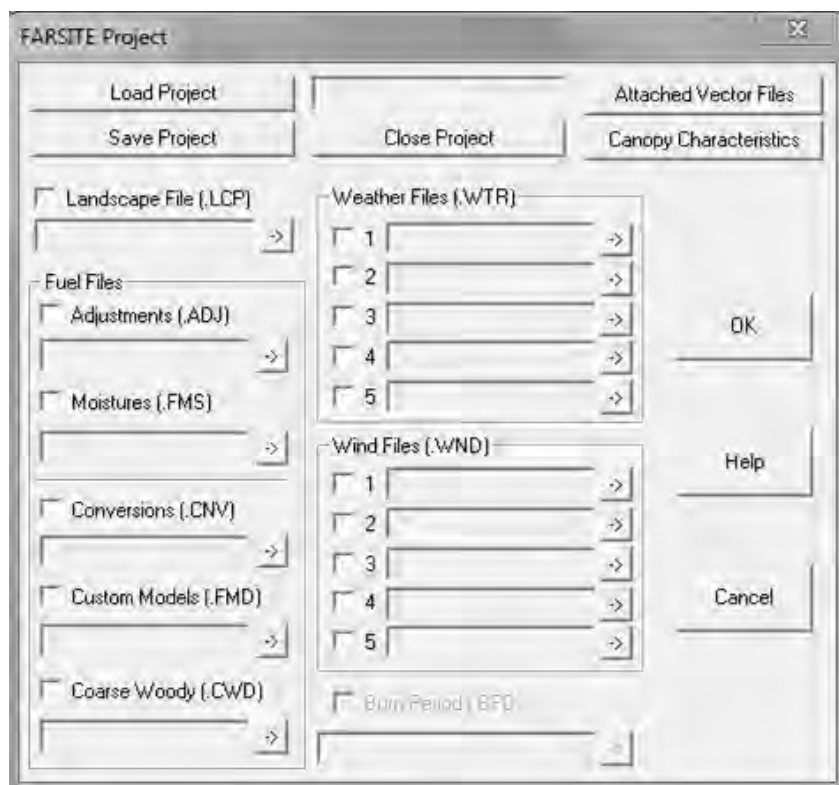
### Manual de procedimientos FARSITE

## MANUAL DE PROCEDIMIENTOS

### Indicaciones generales para la realización de simulaciones de incendio de superficie con el simulador FARSITE v.4.1.055.

Una simulación de incendios realizada mediante el software FARSITE implica esencialmente cuatro etapas:

#### 1. Construcción del proyecto (Farsite Project .FPJ)



Esta etapa consiste en el ingreso de datos de entrada para la realización de las simulaciones. Algunos datos deben ingresarse obligatoriamente para que el software inicie la simulación, mientras que otros son opcionales.

*Se debe ingresar obligatoriamente:*

- Archivo del paisaje: Landscape file (.LCP)
- Archivos asociados al combustible: Fuel files
  - \*Archivo de ajustes: Adjustments file (.ADJ)
  - \*Archivo de humedad inicial del combustible: Moistures file (.FMS)
- Archivos de clima (al menos uno): Weather files (.WTR)
- Archivos de viento (al menos uno): Wind files (.WND)

*Se puede ingresar opcionalmente:*

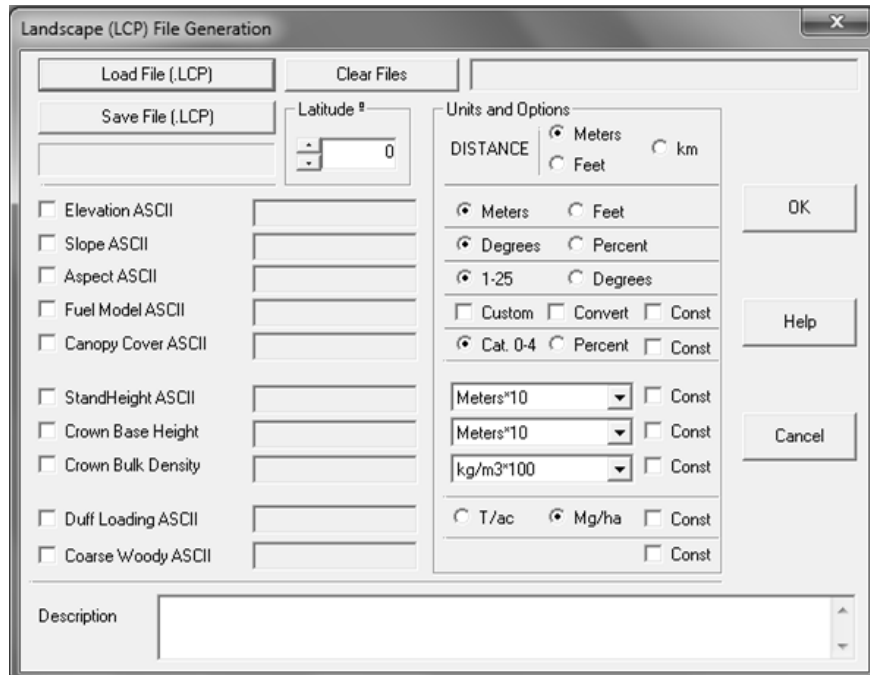
- Archivos asociados al combustible: Fuel files
  - \*Archivo de conversiones: Conversions (.CNV)

- \*Modelos personalizados: Custom Models (.FMD)
- \*Árboles muertos y residuos leñosos: Coarse Woody (.CWD)
- Período de quema: Burn Period (.BPD)
- Características del dosel: Canopy Characteristics
- Archivos vectoriales adjuntos: Attached Vector Files

Una vez cargados todos los archivos necesarios, debe guardarse el proyecto .FPJ creado con **Save Project**. Lo mismo sucede con cada uno de los otros archivos que se configuren. Para cargar archivos ya creados y guardados previamente se deben tildar las casillas blancas a la izquierda de cada nombre de archivo. Si se quiere crear un archivo nuevo, se debe clicar en las flechas a la derecha de cada nombre de archivo.

Para acceder a la ventana de configuración del proyecto se debe ir a *File>New Project (.FPJ)*. Y si ya se dispone de un proyecto guardado a *File>Load Project (.FPJ)*.

### 1.1 Archivo del paisaje (Landscape File .LCP)



Durante la configuración del archivo del paisaje se ingresan datos espaciales del tipo raster guardados en formato ASCII (GRID o GRASS), presentándose también archivos obligatorios y opcionales para la realización de la simulación. Las matrices (raster) correspondientes a los distintos archivos cargados deben tener igual dimensión (filas y columnas), misma resolución espacial (tamaño de píxel), mismo encabezado (formato y datos), y estar en coordenadas planas (UTM). El encabezado presenta información sobre número de filas y columnas, coordenadas xy de la esquina inferior izquierda y tamaño del píxel. Los raster pueden ser generados en ENVI, GRASS, ArcGis o ArcView.

En la casilla **Latitude** debe colocarse la latitud del área de estudio, ya que es utilizada para el cálculo del ángulo de incidencia solar, junto con otras variables. Usar signo

menos para indicar un área en el hemisferio sur. En la casilla **Distance** se debe indicar el tipo de unidad métrica empleada.

**1.1.1 Elevación (Elevation).** Archivo *obligatorio* utilizado para el ajuste adiabático de la temperatura y la humedad. Debe indicarse si su unidad es el metro o el pie.

**1.1.2 Pendiente (Slope).** Archivo *obligatorio* usado para computar el efecto directo sobre la propagación del fuego y determinar, junto con la **Orientación**, el ángulo de radiación solar incidente y transformar la velocidad de propagación y la dirección a partir de una superficie con coordenadas horizontales. Debe indicarse si se calculó en grados o en porcentaje.

**1.1.3 Orientación (Aspect).** Archivo *obligatorio*. Debe indicarse si se calculó en grados o por categorías, donde las categorías van de 1 a 25 aumentando de a 15°. La categoría 1 representa 15° y la categoría 25, terreno plano.

**1.1.4 Modelos de combustibles (Fuel model).** Archivo *obligatorio*. Da una descripción física del complejo de combustibles para así determinar el comportamiento del fuego superficial. Si se utilizan modelos de combustibles personalizados o se realizan conversiones de los números asociados a cada modelo, se debe tildar la casilla **Custom** en el primer caso o **Convert** en el segundo. También, en lugar de ingresar un mapa de combustibles, se puede indicar un combustible homogéneo para toda el área mediante la casilla **Const**. Los valores constantes que pueden ingresarse mediante esta última opción van desde el 0 (no combustible) al 50, y el 98 (agua). Si se desea indicar como combustible contaste un modelo perteneciente al sistema de Scott & Burgan, es necesario usar un archivo de conversión de índices, ya que no se incluye entre las categorías disponibles los números asociados a este sistema de clasificación de combustibles (excepto el 98). Para el sistema NFFL (Anderson) se utiliza del 1-13, correspondiéndose la codificación del FARSITE con el número de modelo de combustible. En la tabla a continuación se muestra el número asociado a cada modelo de combustible del sistema de clasificación de Scott & Burgan.

Modelo de combustible	Código en FARSITE
NB 1 a NB 3, NB 8 y NB 9	91 a 93, 98 y 99
GR 1 a GR 9	101 a 109
GS 1 a GS 4	121 a 124
SH 1 a SH 9	141 a 149
TU 1 a TU 5	161 a 165
TL 1 a TL 9	181 a 189
SB 1 a SB 4	201 a 204

Los números no empleados por los sistemas de clasificación de combustibles mencionados, pueden ser asignados a modelos personalizados.

**1.1.5 Cobertura del dosel (Canopy Cover).** Archivo *obligatorio*. Empleado para determinar la sombra promedio sobre los combustibles, que afecta sobre el cálculo de la humedad de los mismos, y determinar el factor de reducción del viento, ya que la

cobertura arbórea disminuiría su intensidad. La cobertura del dosel es el porcentaje horizontal de superficie que es cubierta por la copa de los árboles. Debe indicarse si se calculó en porcentaje o por categorías, existiendo cuatro posibles. La categoría 1 representa entre 1-20%, la categoría 2 entre 21-50%, la categoría 3 entre 50-80% y la categoría 4 entre 81-100%, utilizando el 0 o el 99 para definir un 0% de cobertura. Si no se cuenta con un raster de cobertura del dosel, puede determinarse como constante en todo el paisaje tildando la casilla **Const**, la cual permite seleccionar entre 0 y 100%.

Si el valor del pixel es 0, el software asume que no hay cobertura de árboles en esa celda e ignora, para ese pixel, los valores de otros raster que tienen relación con la cobertura de árboles (altura de árboles, altura a la base de la copa, volumen de copa).

**1.1.6 Altura del grupo de árboles (Stand Height).** Archivo *opcional*. Se utiliza para calcular el factor de reducción del viento y la distancia a la que pueden llegar las pavesas (brazas) que son generadas por el fuego y transportadas por el viento, y que podrían generar nuevos focos de ignición (spotting). El raster puede contener valores enteros o decimales. Debe indicarse la unidad utilizada. También se puede definir una altura constante entre 2 y 100 metros, variando de a 0.1 m.

**1.1.7 Altura a la base de la copa (Crown Base Height).** Archivo *opcional*. Utilizado para determinar la posibilidad de transición de un fuego de superficie a un fuego de copas. No es necesario si lo que interesa es la simulación de un fuego de superficie.

**1.1.8 Volumen de la copa (Crown Bulk Density).** Archivo *opcional*. Empleado para determinar la velocidad de propagación de un fuego de copas. No es necesario si lo que interesa es la simulación de un fuego de superficie.

**1.1.9 Carga de materia orgánica (Duff Loading).** Archivo *opcional*. Necesario para simulación de un modelo de combustión post-frontal. El modelo de combustión post-frontal simula no sólo el frente de fuego sino también la actividad del fuego detrás del frente. Esto permite calcular el flujo de calor y las emisiones, por lo tanto se pueden luego simular la producción de humo y el calentamiento del suelo (no se realizó en el presente trabajo)

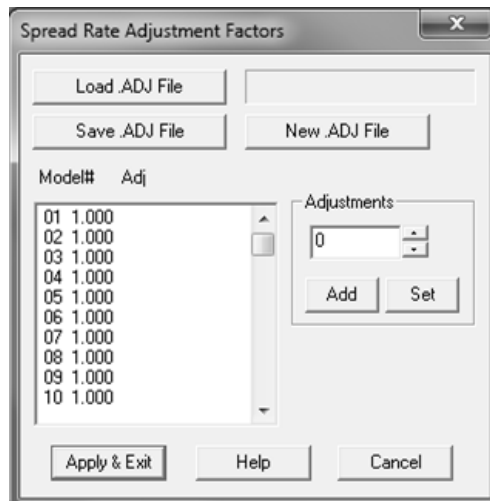
**1.1.10 Árboles muertos y residuos leñosos (Coarse Woody).** Archivo *opcional*. Necesario para simulación de un modelo de combustión post-frontal (no se realizó en el presente trabajo).

## **1.2 Archivo de ajustes (Adjustments .ADJ).**

Es un archivo de texto *obligatorio* asociado al combustible (Fuel Files). Permite aplicarle un factor de ajuste a la velocidad de propagación de los distintos modelos de combustibles según el criterio experimentado del usuario o datos locales. Un factor de 0.5 en un combustible dado reduciría la ROS del mismo a la mitad de lo determinado para ese modelo de combustible. Un factor de 1 conserva el valor de velocidad de propagación definida para el modelo, y es el factor definido por defecto. Si se desea aplicar el mismo factor de ajuste a varios modelos, pueden ser seleccionados juntos e



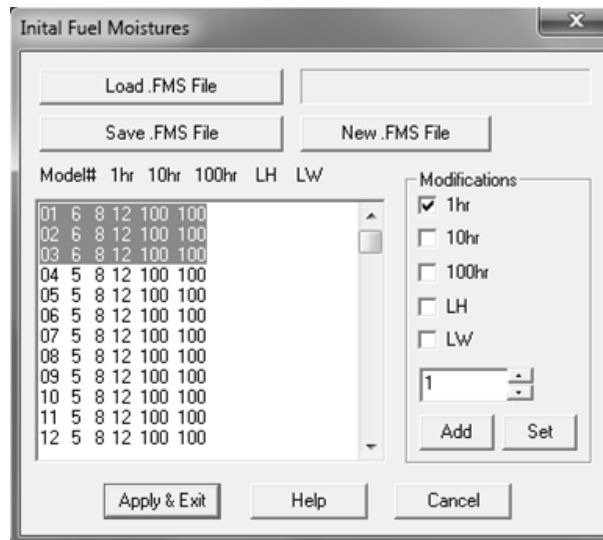
indicar en la casilla **Adjustments** el valor necesario a sumarle (**Add**) al valor por defecto (anteponer el signo menos al valor si se desea reducir la velocidad).



### 1.3 Humedad inicial del combustible (Moistures .FMS).

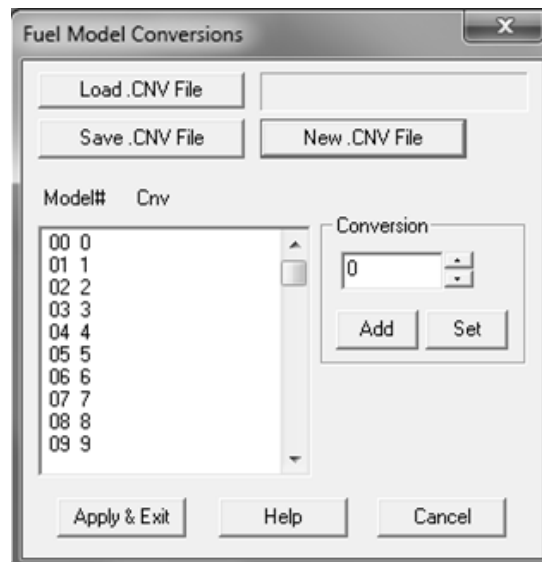
Es un archivo de texto *obligatorio* asociado al combustible (Fuel Files). Se refiere a la configuración de la humedad del combustible al inicio de la simulación, definida en porcentaje y pudiendo exceder del 100%. Este archivo es necesario para iniciar el proceso de cálculo sitio-específico de la humedad del combustible en cada paso del tiempo durante la simulación.

Al activar la casilla **New .FMS File** se cargarán 256 modelos de combustibles con una serie de valores de humedad de los combustibles por defecto, idénticos para los diferentes modelos. La primera columna (de izquierda a derecha) se corresponde con el número de modelo de combustible, de la segunda a cuarta columna se corresponde con la humedad del combustible muerto para las clases con tiempo de respuesta de 1h, 10 h y 100 h, la quinta columna representa la humedad del combustible herbáceo vivo (LH) y la última columna la humedad del combustible leñoso vivo (LW). La humedad de los combustibles vivos permanece constante a lo largo de la simulación (a menos que se ingresen los datos manualmente), mientras que no es así para los combustibles muertos. De igual manera que con el archivo de ajustes, es posible seleccionar uno o varios modelos de combustibles y realizar modificaciones de sus humedades asociadas, en la categoría que se desee, mediante las opciones **Modifications** y **Add**.



#### 1.4 Archivo de conversiones (Conversions .CNV).

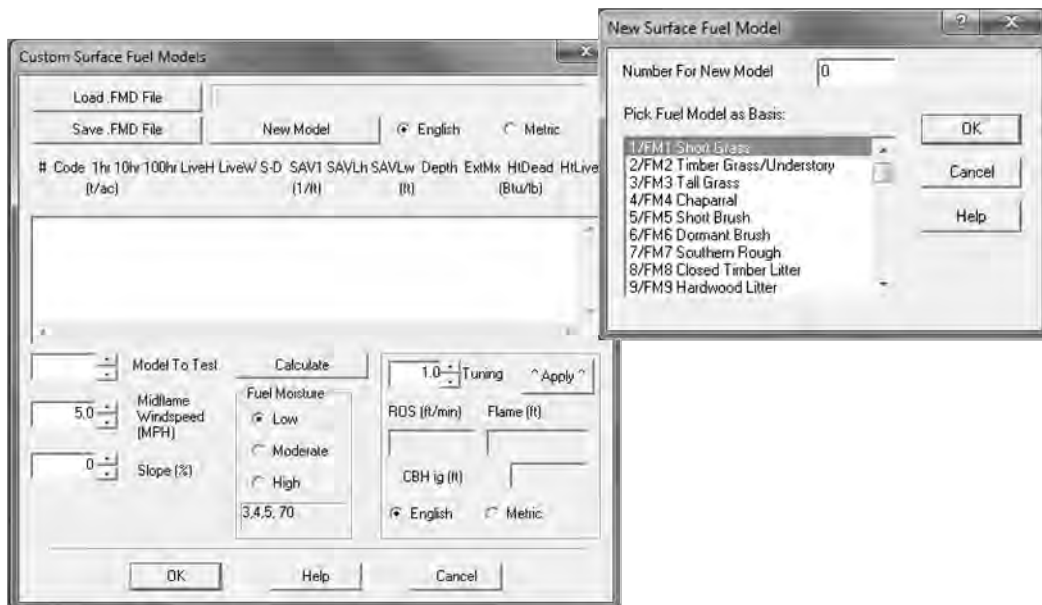
Es un archivo de texto *opcional* asociado al combustible (Fuel Files). Permite cambiar el número presente en un mapa de combustibles, por el número correcto según el código utilizado por FARSITE (de acuerdo al sistema de clasificación de combustibles utilizado o a modelos personalizados).



En la columna de la izquierda se encuentran los números presentes en el mapa que uno ingresa y que serán leídos por FARSITE, y en la columna de la derecha se indica el número por el cual el software deberá reemplazar lo registrado en el mapa.

### 1.5 Modelos personalizados (Custom Models .FMD).

Es un archivo de texto *opcional* asociado al combustible (Fuel Files). Permite crear modelos de combustibles personalizados. Al activar la casilla **New Model** se debe indicar el número que se le asignará a este nuevo modelo, el cual no puede ser igual a ninguno de los asociados a los modelos que aparecen en la lista que se despliega. A posterior se deben definir las características cuantitativas que se asocian al tipo de modelo con los cuales funciona FARSITE, y que se detallaron en el Capítulo 2 (como carga de combustible por clase, SAV, altura del combustible, etc.). En primer lugar el nuevo modelo se carga por defecto con ciertos valores definidos. Luego puede probarse cómo funciona este nuevo modelo bajo diferentes condiciones de velocidad de viento, pendiente, humedad de combustibles, etc., y activando la casilla **Calculate** se obtiene la velocidad de propagación (**ROS**) y la longitud de la llama (**Flame**) correspondientes.



### 1.6 Árboles muertos y residuos leñosos (Coarse Woody .CWD).

Es un archivo de texto *opcional* asociado al combustible (Fuel Files), necesario para simulación de un modelo de combustión post-frontal (no se realizó en el presente trabajo). Permite crear o modificar archivos con información sobre la clase diamétrica, carga de combustible, humedad de la clase y otros datos relacionados a la madera muerta presente en el área de interés.

### 1.7 Archivos de clima (Weather Files .WTR).

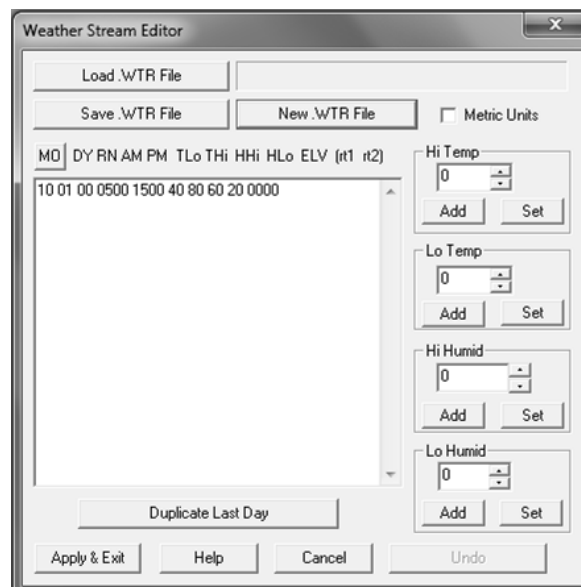
Es un archivo de texto, siendo *obligatorio* ingresar al menos uno (de los cinco posibles). Los datos de clima son usados para modelar la variación en la humedad del combustible muerto debido a la topografía y a las sombras.

Al clicar en **New .WTR File**, FARSITE carga automáticamente valores de precipitación, temperatura y humedad ambiente para un día. Mediante **Duplicate Last Day** se duplica el último día, conservando los mismos valores, excepto el día, que pasa a ser uno posterior al indicado previamente.

De izquierda a derecha, la primer columna del archivo corresponde al mes (MO), y le siguen el día (DY), las precipitaciones diarias (RN), la hora en la que se registró la mínima temperatura (AM), la hora en la que se registró la máxima temperatura (PM), la temperatura mínima (TLo), la temperatura máxima (THi), la humedad máxima (HHi), la humedad mínima (HLo) y la elevación (ELV). La temperatura y la humedad por hora son interpoladas a partir de las mínimas y máximas diarias, generando un patrón de clima diario. Opcionalmente se pueden agregar dos columnas más, las rt1 y rt2, empleadas para ingresar la hora de inicio y finalización de la lluvia (0000-2400 hs), si estos datos no son ingresados la precipitación será distribuida en el período de 24 hs.

Los valores definidos por defecto se pueden cambiar directamente sobre el archivo o seleccionando la/s fila/s deseada/s y sumándole el número indicado mediante **Add** al establecido previamente. Esto último es posible para el caso de la temperatura máxima (**Hi Temp**), temperatura mínima (**Lo Temp**), humedad máxima (**Hi Humid**) y humedad mínima (**Lo Humid**). Por otro lado, el mes puede ser modificado cliqueando sobre **MO**. Debe indicarse que las unidades son métricas, ya que por defecto carga los datos en unidades inglesas.

La cantidad de días definidos en el archivo de clima debe ser la misma que los definidos en el archivo de viento para evitar confusiones (ver Definición de duración). Poner al menos uno día extra anterior a la fecha planeada para el inicio de la simulación.



### 1.8 Archivos de viento (Wind Files .WND).

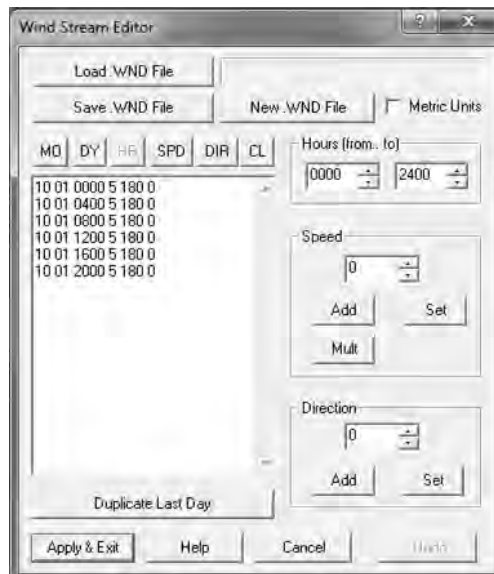
Es un archivo de texto, siendo *obligatorio* ingresar al menos uno (de los cinco posibles). Los datos de viento son empleados para la estimación del comportamiento del fuego (dirección y velocidad de propagación). Se considera que los datos ingresados fueron

registrados a 10 m de altura, pero la simulación es realizada con información del viento a mitad de la llama para lo cual el software computa esa transformación.

Al clicar en **New .WND File**, se cargan automáticamente valores para un día, definidos cada cuatro horas. Al igual que con el archivo de clima, **Duplicate Last Day** duplica el último día, conservando los mismos valores y período de definición de los mismos. El período de tiempo ante el cual se definen los datos del viento, puede ser desde cada 15 minutos hasta cada 6 horas, pudiendo a su vez ser variable el intervalo de definición a lo largo del día (por ejemplo, en las primeras horas cada 30 minutos y en las últimas cada 5 horas). Recordar que la cantidad de días definidos en el archivo de viento debe ser la misma que los definidos en el archivo de clima.

En el archivo de texto se pueden ver varias columnas. De izquierda a derecha, la primera representa el mes, la segunda el día, la tercera la hora (de 0000 hs a 2359 hs), la cuarta la intensidad del viento, la quinta la dirección de procedencia del viento, y la última columna la cobertura nubosa (de 0 a 100%). La intensidad del viento es considerada a 10m de altura y varía entre 0-300 km/h. La dirección de procedencia del viento está definida en sentido horario desde el norte, va de 0-360° azimut. Por ejemplo, si la dirección es 0° el viento será norte, con 180° será sur y con 45° será noreste.

La edición del mes, día y cobertura nubosa puede realizarse indicando el número deseado al clicar en **MO**, **DY** y **CL**, respectivamente. La intensidad y dirección del viento puede modificarse de igual manera mediante **SPD** y **DIR** o utilizando los botones **Add** y **Mult** que sumarán o multiplicarán el valor indicado en **Speed** al presente en el archivo de texto para el caso de la intensidad. En el caso de la dirección, se puede mediante **Add** sumarle al valor por defecto o cargado previamente, el número indicado en la casilla **Direction**.



FARSITE permite simular variaciones espaciales del viento (y clima), pudiendo ingresar hasta 5 archivos para un proyecto (.FPJ) dado. Esto es lo que se llama personalización de la grilla de clima y vientos. Para ello es necesario contar con la

misma cantidad de archivos de clima y de vientos, y que éstos sean cargados al proyecto (.FPJ) previamente a hacer la personalización de la grilla.

Una vez configurado y guardado el proyecto, ir primero a *Simulate>Initiate/Terminate*, para desplegar el proyecto cargado, y luego *Simulate>Modify Map>Weather Monitoring and Grid*, lo que abrirá una nueva ventana donde se hará el grillado. Cliqueando con el botón derecho del ratón sobre el borde superior o borde derecho de la imagen, se trazarán las líneas en sentido horizontal y vertical respectivamente que delimitarán las zonas en donde los datos de clima y viento son constantes. Cliqueando sobre el borde inferior de la imagen se eliminará la última línea horizontal creada, mientras que haciéndolo sobre el borde izquierdo, se eliminará la última línea vertical. Por defecto, en cada nueva celda aparecerá el número 1 (correspondiente al primer archivo que fue cargado durante la configuración del proyecto). Con el botón izquierdo del ratón sobre este número, se lo puede modificar asignándole el número de archivo de clima-viento deseado. Tener en cuenta que el número que se indique será el número de archivo tanto de viento como de clima, es decir, no se puede indicar en una misma celda que utilice el archivo de viento número 2 y el archivo de clima número 1.

Una vez terminada esta configuración, se debe guardar el proyecto en *Input>Save Project*.

### 1.9 Período de quema (Burn Period .BPD)

Es un archivo de texto *opcional* que especifica el período de quemado diario. Se utiliza para detener la simulación durante períodos de baja actividad, como las noches frías y húmedas. Corrige la tendencia a sobrepredecir en condiciones ambientales que detendrían el crecimiento del fuego. Estos períodos podrían darse durante la noche o con clima nublado o neblinoso. En este archivo se observan cuatro columnas: la correspondiente al mes (MO), al día (DY), a la hora del día en que empieza a quemarse (StartHr) y a la hora del día en que se considera que merma el incendio (EndHr).

### 1.10 Características del dosel (Canopy Characteristics)

Es un archivo *opcional* donde se pueden modificar los parámetros asociados a la cobertura de árboles. Es importante para el estudio de simulaciones de incendio de copas, por lo que no se lo vio en detalle en este trabajo.

### 1.11 Archivos vectoriales adjuntos (Attached Vector Files)

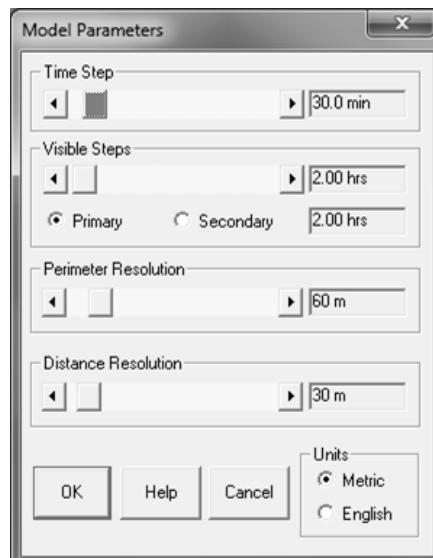
Permite adjuntar al proyecto archivos vectoriales para ser visualizados en la ventana de imagen desplegada al iniciar la simulación (*Simulate>Initiate/Terminate*). Los archivos son cargados automáticamente en la ventana FARSITE Simulation Legend (desplegada junto con la anterior), y para visualizarlos deben activarse cliqueando en la casilla correspondiente a los mismos.

## 2. Configuración de simulación

Esta etapa consiste en la configuración de determinados parámetros que permiten el inicio de la simulación y que definen las condiciones de simulación. Algunas configuraciones son obligatorias y otras opcionales.

### 2.1. Definición de parámetros (Model Parameters)

Mediante *Model>Parameters* se accede a la configuración de cuatro parámetros obligatorios para que inicie la simulación. Aún cuando no se hagan cambios en los valores definidos por defecto, se debe ingresar y dar **OK**.

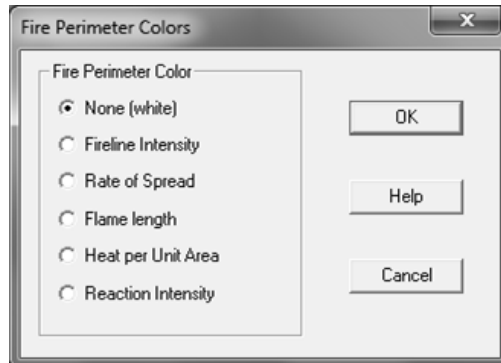


**2.1.1 Paso de tiempo (Time Step).** Es la cantidad máxima de tiempo en que las condiciones en un punto dado se asumen constantes y así la posición del frente de fuego puede ser proyectada. Cuando la ROS esperada es elevada conviene usar un paso de tiempo corto. FARSITE recomienda utilizar un paso de tiempo de 30 a 120 minutos para combustibles leñosos, entre 10 y 20 minutos para pastos secos y entre 5 y 10 minutos para el caso de fuegos superficiales extremos, independientemente del tipo de combustible, o fuegos de copa. También debe ser menor cuando hay varios incendios próximos o cuando hay alta posibilidad de spotting.

**2.1.2 Paso visible (Visible Steps).** Define cada cuanto tiempo se mostrará en pantalla los perímetros de avance del fuego. No puede ser menor al paso del tiempo. Para simulaciones largas (varias semanas), puede bastar con tener un perímetro de fuego por día, pero si queremos observar patrones diurnos el paso visible deberá ser de horas. El paso visible primario debe configurarse siempre. El paso secundario es opcional, y es útil para distinguir el crecimiento del fuego a dos períodos de tiempo significativos, por ejemplo horas y días. Por defecto ambos están configurados para visualizarse cada dos horas, por lo que para activar ambos pasos visibles se debe primero configurar el paso primario y luego el paso secundario. El paso visible secundario se muestra por defecto en color rojo y el primario en color blanco.

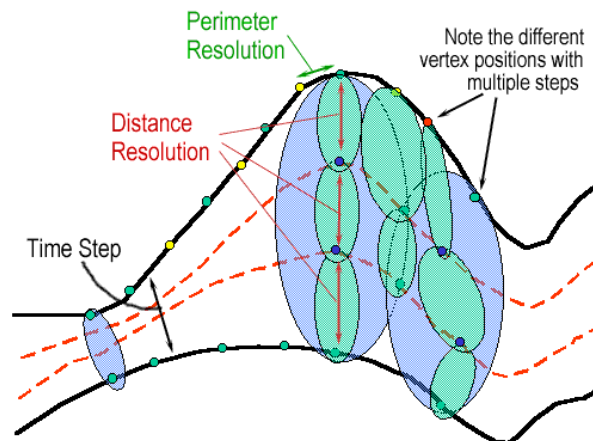


También se puede indicar que los perímetros tengan distinto color de acuerdo a la velocidad de propagación, longitud de la llama y otros. Esto es aplicable a los pasos primarios, a través de *Output>Fire Perimeter Colors*.



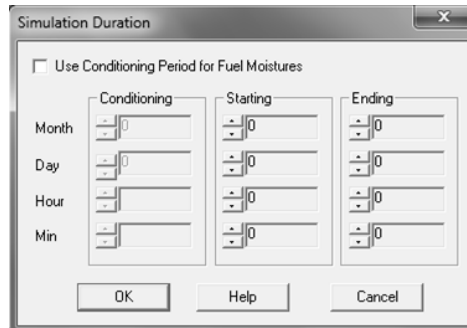
**2.1.3 Resolución de perímetro (Perimeter Resolution).** Determina la máxima distancia entre puntos utilizada para definir el perímetro de fuego. Define el detalle del frente de fuego, tanto en la curvatura como en la capacidad de responder a una heterogeneidad de baja escala. También determina la cantidad de información del paisaje usada en la simulación. No tiene sentido que sea menor a la resolución de los raster, porque no contaría con mayor información para tomar. Si se emplea una resolución perimetral mucho mayor a la del raster, se estaría perdiendo información del paisaje. FARSITE considera que un valor lógico no debería ser dos veces mayor a la resolución del raster.

**2.1.4 Resolución de distancia (Distance Resolution).** Es la máxima distancia de propagación proyectada para un punto dado del perímetro. Es la resolución en la dirección de propagación o radial. No puede ser mayor a la resolución perimetral, y si es menor a ésta, da mayor resolución radial más que tangencial. FARSITE considera un valor lógico a aquel que sea aproximado a la resolución de perímetro.



## 2.2. Definición de duración (Simulation Duration)

Una vez que ya está configurado y cargado el proyecto de FARSITE, para poder iniciar la simulación debe indicarse antes la duración de la misma, es decir el inicio y finalización. No podrá accederse a *Simulate>Duration* si previamente no fue cargado el proyecto (.FPJ).



En **Starting** y **Ending** debe indicarse la fecha y hora de inicio y finalización respectivamente de la simulación, completando las filas correspondientes al mes (**Month**), día (**Day**), hora (**Hour**) y minutos (**Min**). La definición de hora y minutos no es obligatoria, por defecto quedará configurado las 0000 hs como inicio y finalización. El primer día disponible que aparecerá, será el segundo indicado en el archivo de clima o de viento, tomando como referencia al archivo que presente como primer día el valor más grande.

Si se selecciona la casilla **Use Conditioning Period for Fuel Moistures** se activa el período de acondicionamiento para el cálculo de la humedad del combustible. En este caso, el software toma los datos del archivo de humedad inicial de combustibles (.FMS) y calcula la humedad de los mismos a través del paisaje basándose en la pendiente, la orientación, la elevación y las sombras. Es decir que comienza la simulación con un valor de humedad de combustible ya ajustado para cada pixel según sus características topográficas. De lo contrario, FARSITE inicia la simulación tomando el valor de humedad del archivo .FMS en todos los pixeles y luego, durante la simulación, se realiza el ajuste por topografía y sombreado. El período de acondicionamiento se lo define en la casilla **Conditioning**, es mínimamente de un día completo. Si se activa el acondicionamiento el primer día disponible para iniciar la simulación no podrá ser menor al indicado en esta casilla.

## 2.3. Localización del punto de ignición

Definir el foco de ignición es indispensable para el inicio de la simulación. Antes de empezar, se debe desplegar la ventana del paisaje con *Simulate>Initiate/Terminate*. La localización del mismo puede realizarse definiéndolo en FARSITE sobre la imagen o cargando un archivo vectorial (.vct) o shape (.shp) creado previamente o con un software diferente al FARSITE. En el último caso, se debe acceder a *Simulate>Modify Map>Import Ignition File*.

Cuando se crea un foco de ignición en FARSITE, este puede definirse como punto, polígono o línea. El punto se crea cliqueando, sobre la zona deseada de la imagen, el botón izquierdo del ratón seguido del botón derecho, sin mover el cursor. En realidad el “punto” creado es un polígono formado por diez puntos. Para crear un foco de tipo polígono, se debe delimitar el área mediante clicks con el botón izquierdo y cerrándola luego cliqueando el botón derecho. Si lo que se quiere es una línea, ésta se traza con clicks izquierdos y se finaliza con un doble click izquierdo. Si se comete un error al definir el punto de ignición, activando cualquier otro botón de herramientas o del menú y comenzando otra vez la definición del punto, el que se estaba creando anteriormente es coloreado de gris representando que ha sido inactivado. Una vez creado el archivo, para guardarlo se debe ir a *Simulate>Modify map>Export Current File Perimeters*.

## 2.4. Opciones de simulación

El software permite agregar barreras cortafuegos creándolas mediante *Simulate>Modify map>Add Barrier(s)* o importando un archivo que se quiera incorporar como barrera (por ejemplo archivo vectorial o shape de ríos o caminos) mediante *Simulate>Modify map>Import Barrier File*. Para crear una barrera en FARSITE se deben realizar clicks con el botón izquierdo del ratón y se finaliza con el botón derecho, pudiendo crear más de una barrera para la misma simulación. Se puede guardar la barrera creada en formato .shp o .bar (formato propio de FARSITE) a través de *Simulate>Modify map>Export Barriers*. Una barrera cortafuego limitará el avance del fuego durante la simulación, en el área donde se encuentra ubicada la barrera. Sin embargo, dependiendo el tamaño y la forma de la barrera y el comportamiento del fuego (de acuerdo a las condiciones de clima, viento, topografía, etc.), el incendio puede seguir avanzando si logra rodear la barrera cortafuego. Además, si bien una barrera es impermeable al fuego, no lo es al efecto de spotting.

Existen otras opciones de simulación que facilitarían al usuario la realización de simulaciones consecutivas. Por ejemplo, en *Simulate>Options* si se marca la casilla de **Restore Ignition at Restart** evita tener que cargar nuevamente el archivo del punto de ignición cada vez que se inicia una nueva simulación (siempre y cuando no se cierre la ventana de la simulación). Dejar sin marcar la casilla de **Reset Duration at Restart** evita tener que cargar los datos de la duración de la simulación cada vez que se inicia una nueva.

## 3. Simulación

Una vez completadas las etapas anteriores se puede dar inicio a la simulación con *Simulate>Start/Restart*. Una vez finalizada la simulación, se puede iniciar una nueva simulación empleando el mismo proyecto (.FPJ) con *>Start/Restart*. Si se desea cambiar de proyecto, entonces debe indicarse *Simulate>Initiate/Terminate*, cargar un nuevo proyecto y repetir la segunda etapa (Configuración de la simulación).

También puede iniciarse la simulación mediante *Simulate>Step Through*. Esta opción permite ir viendo la simulación paso a paso, consiguiendo que avance con cada click sobre el comando.

Una simulación en curso puede ser detenida y reiniciada con *Simulate>Resume/Suspend*. Mientras la simulación está suspendida, pueden agregarse oros puntos de ignición, barreras cortafuegos, cambiar la fecha y/u hora de finalización o hacer consultas sobre la imagen, entre otros. También se pueden indicar puntos en la imagen donde el usuario quiere que la simulación se detenga, con la opción *Simulate>Modify map>Set Stop Location*. Cuando el frente de fuego se tope con estos puntos, FARSITE preguntará si se desea suspender la simulación. Para que no sigan activos estos puntos de detención al reiniciar la simulación, deben ser eliminados yendo a *Simulate>Modify map>Edit Stop Locations*. Al desplegarse la ventana, se deben seleccionar las coordenadas del punto y clicar **Delet Stop Location**.

Con *Output>Elapsed Time* puede verse el tiempo computacional que va llevando la simulación, expresado en día, hora y minuto, mientras que con *Output>Current Time* se observa el tiempo transcurrido de acuerdo a la fecha y hora indicados durante la configuración de la duración de la simulación (tiempo del incendio real).

#### 4. Visualización y análisis de resultados

La visualización en pantalla del resultado de la simulación permite ver la forma del área quemada, distinguir zonas en donde el fuego avanzó más rápido (en función de la distancia entre los pasos visibles), observar si las barreras cortafuegos fueron efectivas, si existe la posibilidad de spotting, etc. Pero además, puede consultarse otro tipo de información, como se describe a continuación.

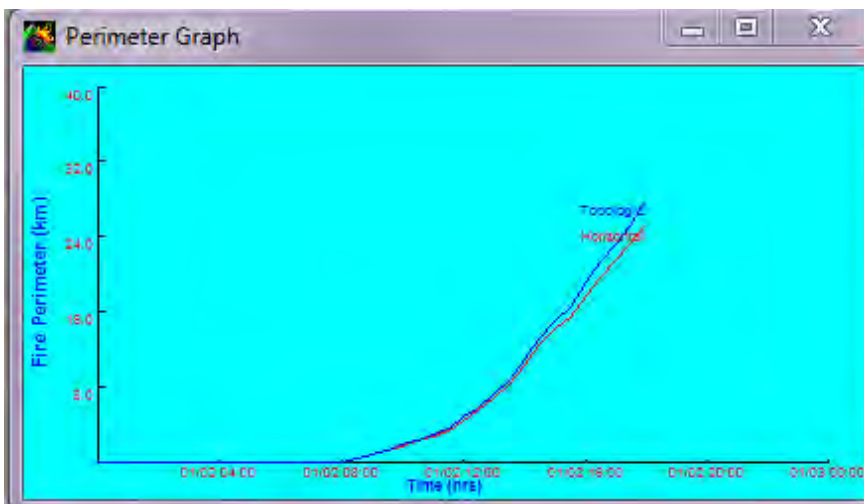
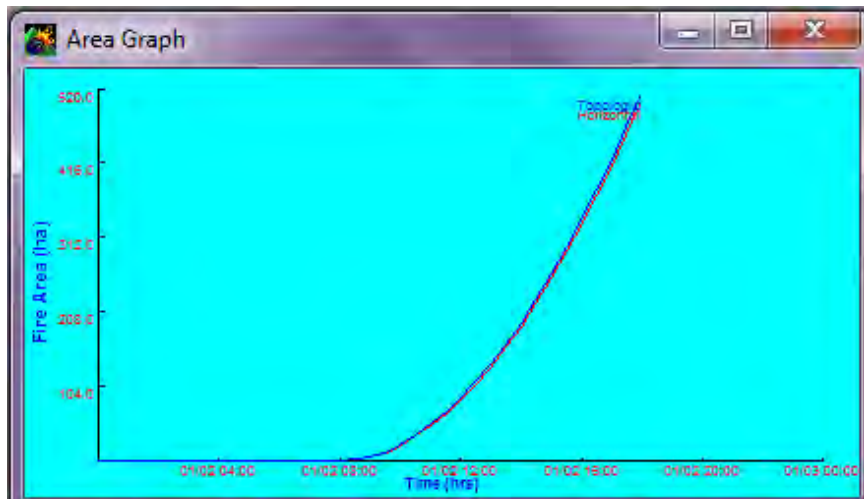
##### 4.1 Salidas de tablas y gráficas

Algunas de las salidas que genera FARSITE son tablas que permiten consultar el área quemada (*Output>Data Tables>Area Table*) y el perímetro del fuego (*Output>Data Tables>Perimeter Table*) a lo largo de la simulación. El cálculo es realizado teniendo en cuenta tanto la topografía como la proyección sobre superficie plana.

Elapsed	Current	Horiz	Slope
00 00:00	07/12 11:00	0.0	0.0
00 00:30	07/12 11:30	0.2	0.2
00 01:00	07/12 12:00	1.1	1.1
00 01:30	07/12 12:30	2.8	2.8
00 02:00	07/12 13:00	6.6	6.6
00 02:30	07/12 13:30	12.8	12.9
00 03:00	07/12 14:00	21.2	21.4
00 03:30	07/12 14:30	33.2	33.5
00 04:00	07/12 15:00	50.5	51.0
00 04:30	07/12 15:30	69.2	69.9
00 05:00	07/12 16:00	92.1	93.0
00 05:30	07/12 16:30	116.0	116.1

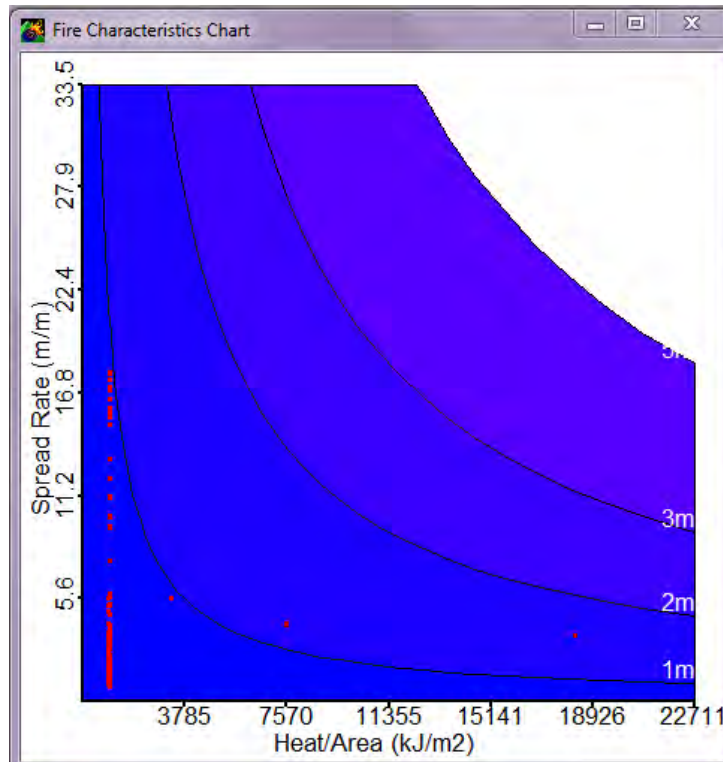
Elapsed	Current	Horiz	Slope
00 00:00	07/12 11:00	0.0	0.0
00 00:30	07/12 11:30	0.2	0.2
00 01:00	07/12 12:00	0.4	0.4
00 01:30	07/12 12:30	0.7	0.7
00 02:00	07/12 13:00	1.2	1.2
00 02:30	07/12 13:30	1.6	1.6
00 03:00	07/12 14:00	2.0	2.0
00 03:30	07/12 14:30	2.8	2.8
00 04:00	07/12 15:00	3.8	3.8
00 04:30	07/12 15:30	4.7	4.7
00 05:00	07/12 16:00	5.8	5.8
00 05:30	07/12 16:30	6.0	6.0

También genera salidas gráficas, como los gráficos de área (*Output>Graphs>Area Graph*) y perímetro (*Output>Graphs>Perimeter Graph*) de fuego que muestran el crecimiento del fuego en el tiempo, tanto en proyección horizontal como con corrección de la topografía.



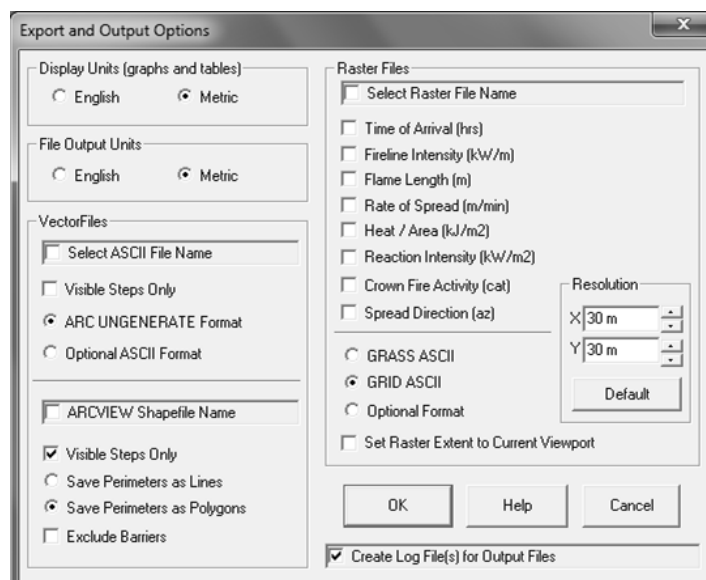
Otro de los gráficos es el que representa las características del frente del fuego en cuanto a velocidad de propagación y densidad de calor (*Output>Graphs>Fire Characteristics Chart*). La relación entre estos ejes da una idea de la intensidad del frente de fuego, la cual a su vez se encuentra relacionada a la longitud de la llama (curvas en el gráfico). Los valores del comportamiento de uno o más fuegos activos son representados en rojo, y a medida que pasa el tiempo, pasan a ser amarillos. Este tipo de gráfico permite analizar la severidad de un incendio, y en general, será más severo cuanto más lejos se encuentren los puntos del origen. Si se toma como medida de severidad la velocidad de propagación, será más severo a medida que los valores asciendan en el eje vertical, mientras que si se utiliza la densidad de calor, será más severo al ir hacia la derecha del eje horizontal. Las curvas de intensidad del frente del fuego y altura de la llama, pueden ser interpretadas como grado de dificultad de control del incendio. Bajo la primera curva (FL < 1m), el fuego puede ser atacado generalmente por el frente y los lados con herramientas de mano. Entre la primera y segunda curva (FL 1-2 m), el fuego es muy intenso para ataque directo, pudiendo usarse topadoras, autobombas o retardantes aplicados con aviones. Entre la segunda y tercer curva (FL 2-3 m), el fuego puede presentar serios problemas de control, por lo que se recomienda

ataque aéreo. Más allá de la tercer curva (FL >3m) los esfuerzos de control en el frente del fuego son inefectivos.



#### 4.2 Exportación de raster y perímetros de fuego

Esta opción debe ser configurada previa al inicio de la simulación, en *Output>Export and Output*.



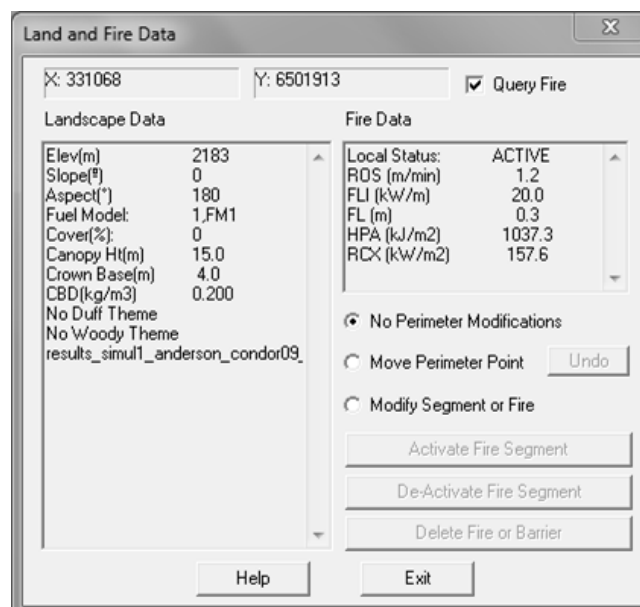


FARSITE permite guardar como raster la información del comportamiento del fuego durante la simulación (se debe indicar la resolución espacial de los datos con los que se trabaja). Estos raster diferencian por colores zonas donde los diferentes parámetros de comportamiento del fuego muestran un rango de valores igual. Pueden ser visualizados en el mismo FARSITE con *View>View Raster Files* o en un GIS (aplicarle pseudocolor en el último caso para que se aprecien visualmente las diferencias).

También permite guardar los perímetros de fuego, ya sea en formato .vct o .shp. Al igual que con los raster, pueden visualizarse en FARSITE con *View>View Vector Files* o en un GIS. Una vez cargados en la ventana **Farsite Simulation Legend** se les puede cambiar el color con el botón izquierdo del ratón y el grosor con el botón derecho.

### 4.3 Consulta sobre la imagen

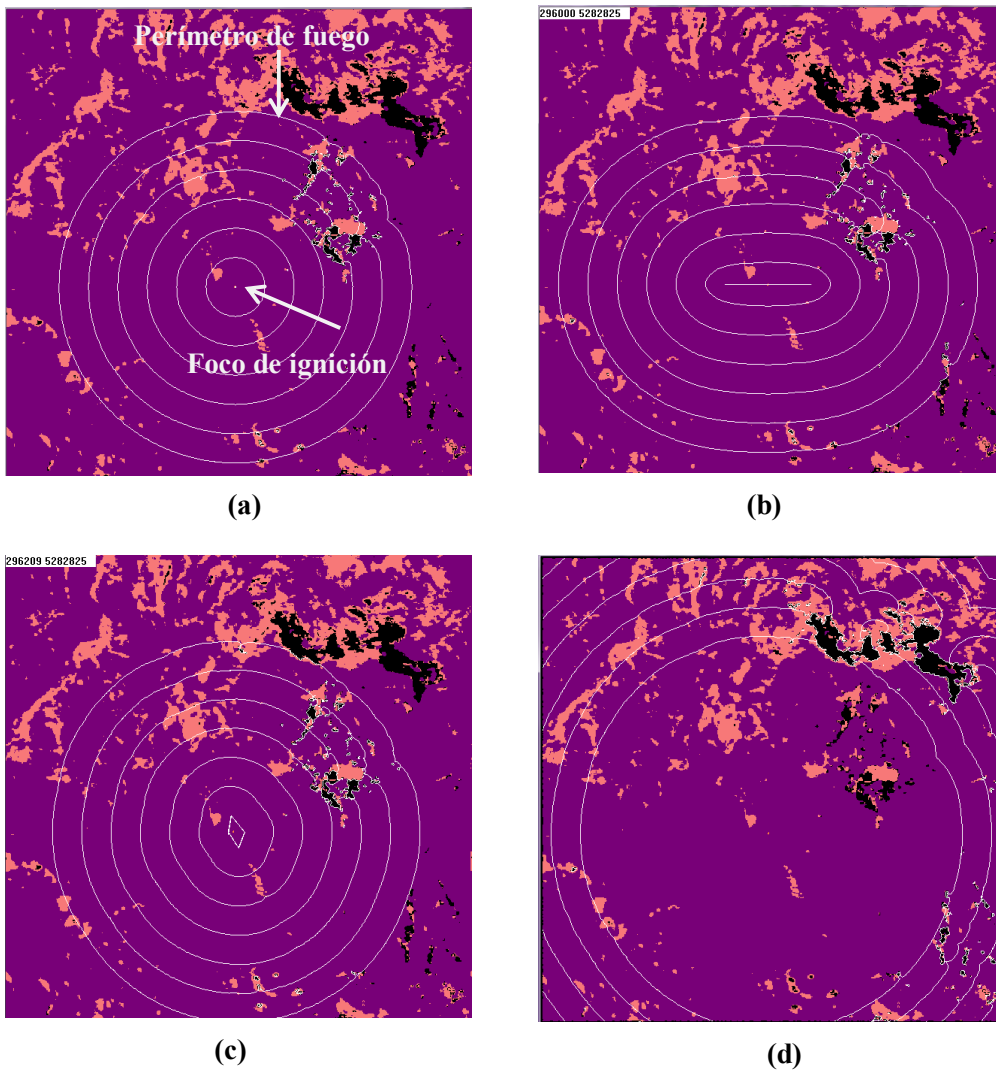
Otra funcionalidad del FARSITE es la posibilidad de realizar consultas sobre la imagen con *Output>Fire Data Query*. Esta opción permite obtener información sobre el comportamiento del fuego asociado al último perímetro de fuego, junto con las características del paisaje presentes en el punto consultado.



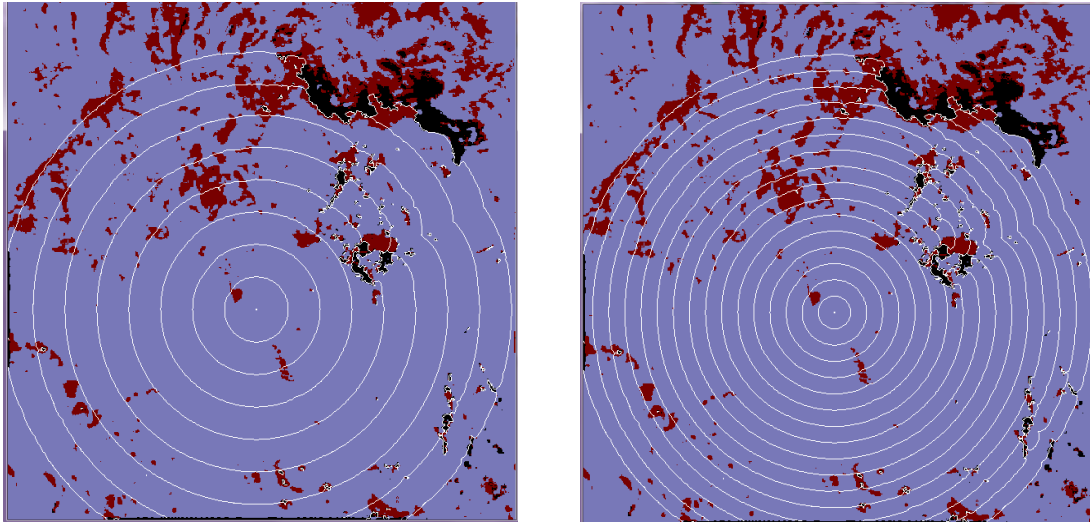
Si bien no se describe aquí, FARSITE también genera tablas, gráficos y mapas como resultado de aplicar el modelo de combustión post-frontal. Además, permite obtener mapas de humedad de los combustibles a lo largo del paisaje en un momento dado. Por otro lado, FARSITE cuenta con un módulo destinado a los ataques directos e indirectos por tierra y también por aire, sección que no fue incluida en el presente instructivo.



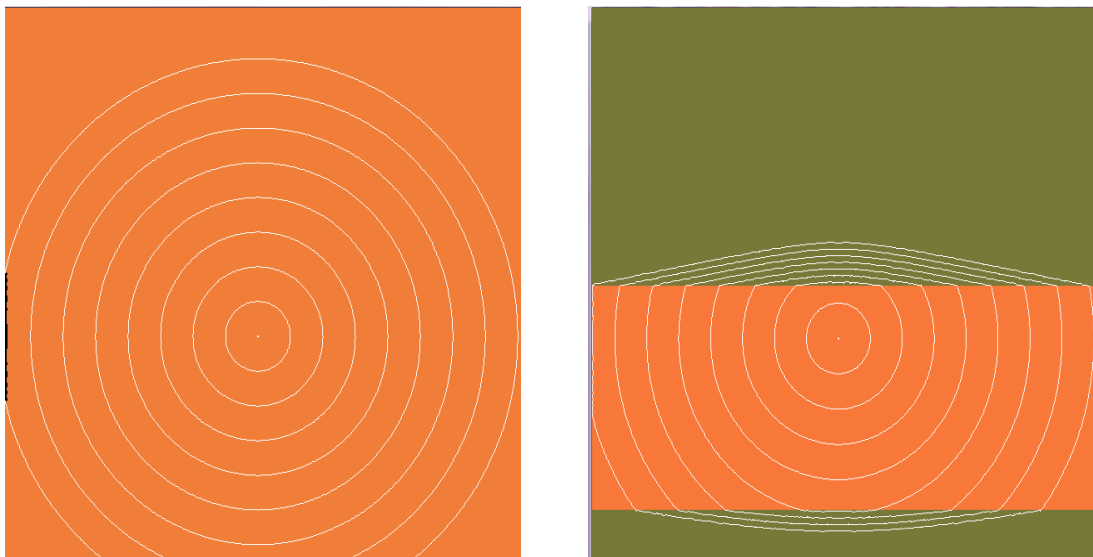
5. Ejemplificaciones



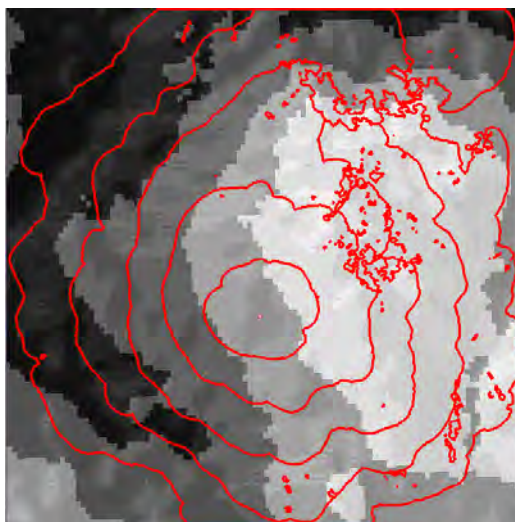
**Figura 1.** Definición de focos de ignición. (a) Punto; (b) Línea; (c) Polígono; (d) Importación de un polígono de fuego resultante de una simulación anterior para ser utilizado como foco de ignición en una nueva simulación. Se ve como la forma del área quemada puede variar en función de la definición del punto de ignición. Simulación realizada sin viento y en terreno plano.



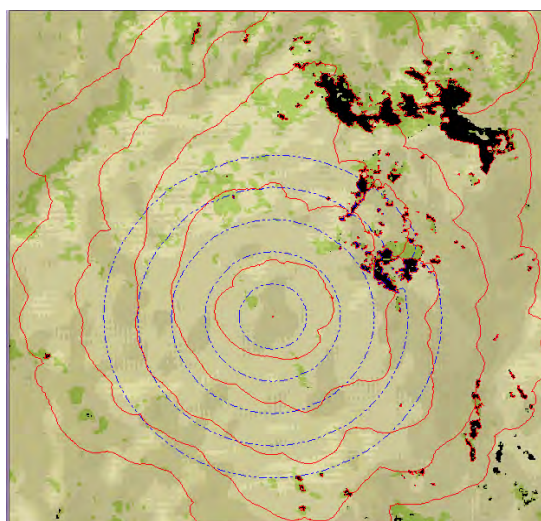
**Figura 2.** Efecto de la definición del paso visible en la simulación. A la izquierda con paso visible de 2 hs, a la derecha paso visible de 1 h. En este caso, al tratarse de un paisaje con un combustible en su mayoría homogéneo (azul), puede observarse en general la misma distancia entre un perímetro de fuego y el siguiente, es decir, sin cambios notorios en la velocidad de propagación del fuego. Simulación realizada sin viento y en terreno plano.



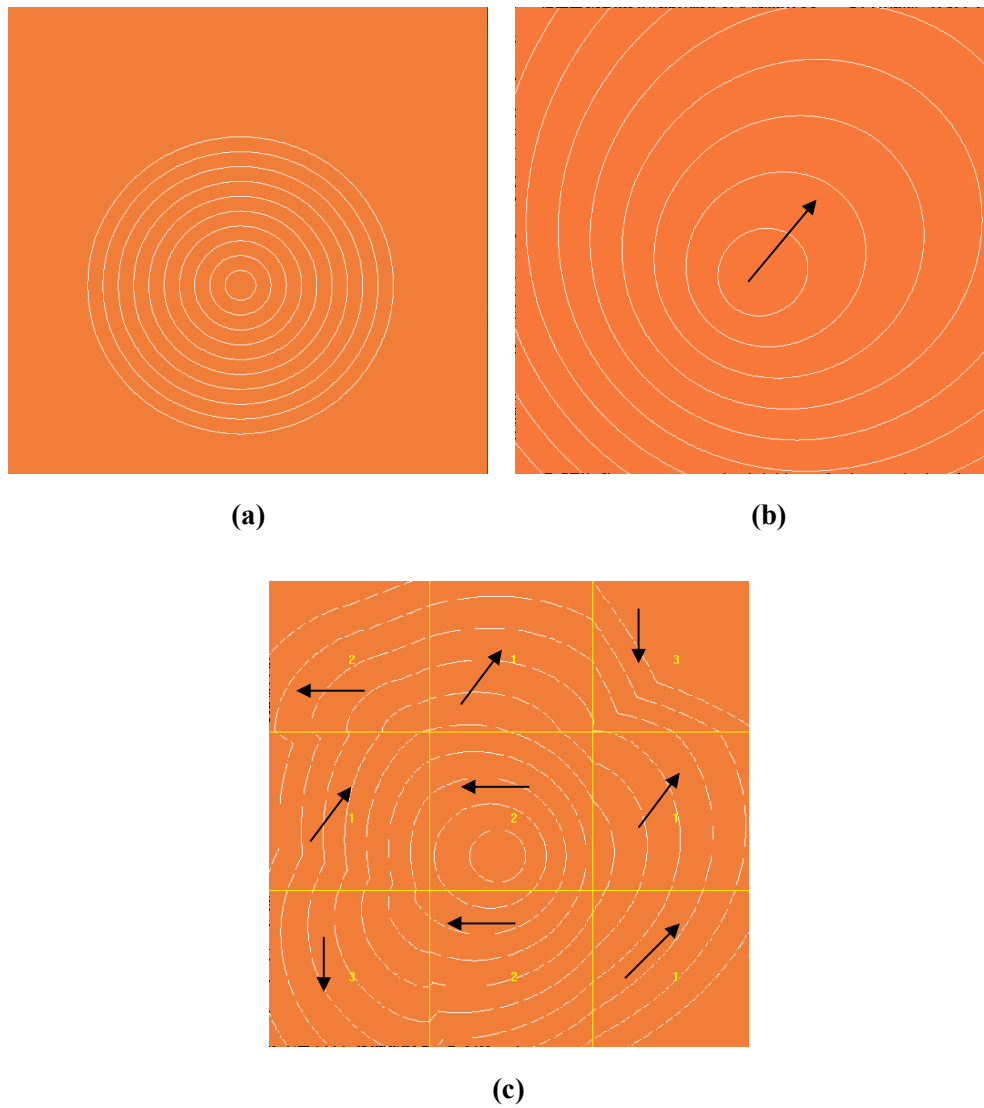
**Figura 3.** Efecto de la variación en los combustibles. A la izquierda FM 3 (naranja) con ROS de 1.3 m/min. A la derecha FM 9 (verde), con ROS de 0.2 m/min, y FM 3 (naranja). Simulaciones realizadas sin viento, en terreno plano y con un paso visible de 2 hs. En la figura de la derecha puede verse como el fuego avanza más lento en el FM 9, ya que al estar más próximos los perímetros de avance entre sí, significaría que en el mismo tiempo (2 hs) el fuego recorre menos área en este modelo de combustible en relación al FM 3. Así mismo, se observa como altera la forma del área quemada la variación espacial del combustible.



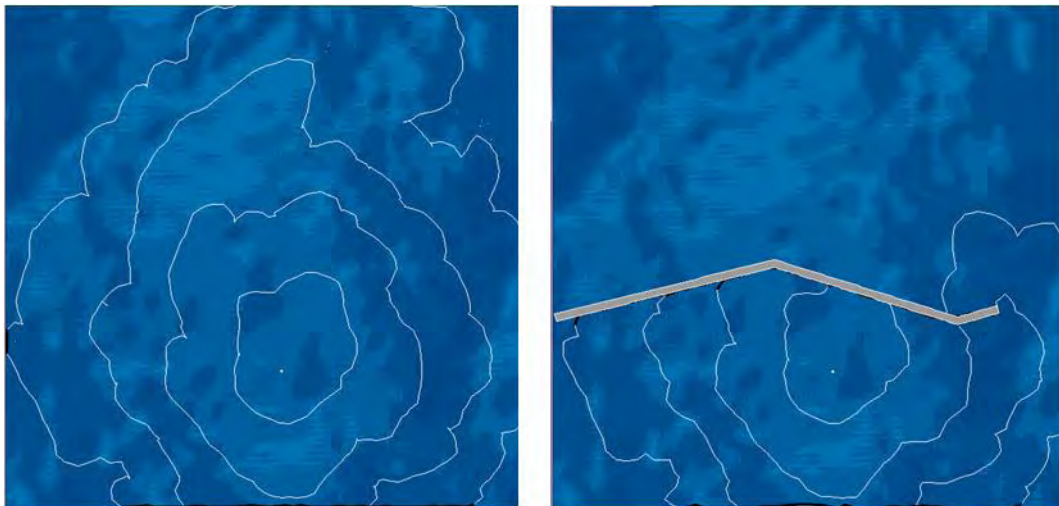
**Figura 4.** Efecto de la topografía. Simulación sin viento. Se visualiza el avance de fuego utilizando el modelo de elevación digital (DEM) como capa visible en la simulación. En el DEM, colores más claros indican mayor altitud. Puede verse analizando la distancia entre perímetros y la forma, que el fuego avanza más rápido donde la altitud es mayor, y así la pendiente.



**Figura 5.** Efecto de la topografía. Simulación sin viento. Se observa el mismo resultado (perímetros como líneas rojas) pero con el mapa de combustibles como capa visible. Al resultado de la simulación anterior, se le superpuso los perímetros de fuego obtenidos durante una simulación con iguales condiciones, excepto que se realizó en terreno plano (perímetros como líneas azules). Puede observarse como al incluir la topografía, el comportamiento del fuego es variable, perdiendo la forma concéntrica en sus perímetros de avance.

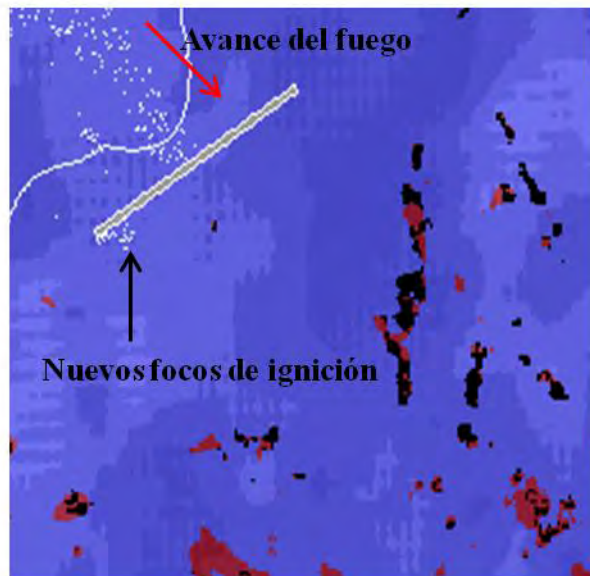


**Figura 6.** Efecto del viento. (a) Sin viento; (b) Viento de origen Suroeste; (c) Vientos variables en el espacio (procedencia suroeste, este y norte). Simulaciones realizadas en combustible homogéneo y terreno plano. Se observa como el viento influye en la dirección de propagación del fuego. En ausencia de viento el fuego crece homogéneamente de manera circular, con un viento constante tenderá a avanzar más rápido hacia donde se dirige el viento (en este caso noreste), mientras que con vientos variando en el espacio, la forma que adoptará el incendio dependerá de los mismos.



(a)

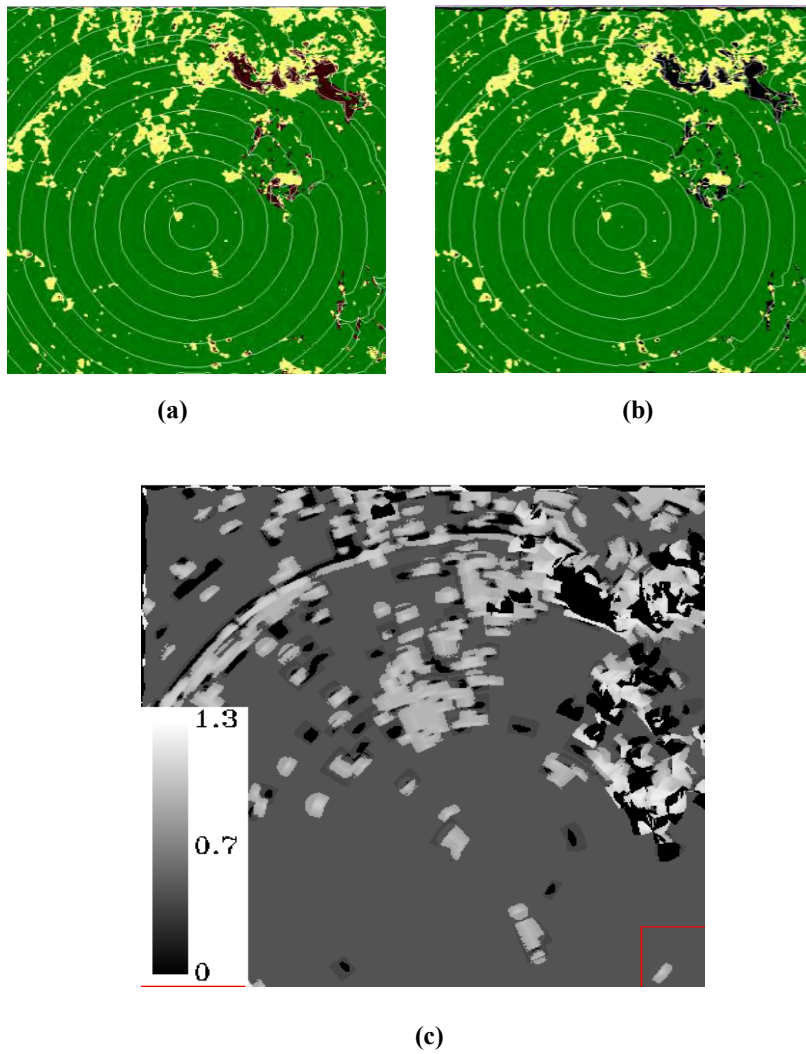
(b)



(c)

**Figura 7.** Efecto de barreras cortafuegos y spotting. Figura (a), simulación sin utilización de barrera cortafuegos. En la figura (b) se observa como una barrera es impermeable al fuego, pero sin embargo puede ser rodeada por este. En la figura (c) se muestra una simulación diferente, donde se puede apreciar como aún en presencia de una barrera cortafuego podrían iniciarse nuevos focos de ignición del otro lado de la barrera por el efecto spotting (pavesas transportadas por el viento). Si bien esta versión de FARSITE indica la posibilidad de generación de nuevos focos de incendio, no realiza simulaciones a partir de estos puntos.





**Figura 8.** Evaluación de raster fuera de FARSITE. Se realizaron simulaciones comparando el efecto de la cobertura de árboles en la velocidad de propagación del fuego. Figura (a) cobertura del 0% y (b) cobertura del 20%. Debido a que no era evidente el cambio al visualizar los resultados, las matrices *.ros* generadas como salida en FARSITE fueron cargadas en ENVI para ser restadas. Tonos grises en la imagen (c) indican que el resultado de la diferencia de ambas matrices fue distinto a cero, es decir, que hubo un efecto del dosel sobre el comportamiento del fuego.

## APÉNDICE D

---

### FARSITE - Inconvenientes observados



## INCONVENIENTES OBSERVADOS EN FARSITE

El software fue ejecutado en un equipo con sistema operativo Windows7 de 64 bits.

### 1. Modificación de información ingresada de clima y vientos.

A pesar de guardar el proyecto (.FPJ) con los datos indicados mediante los módulos de edición de clima y viento de FARSITE (Weather Stream Editor y Wind Stream Editor), cuando se carga nuevamente el proyecto para realizar una simulación, los datos ingresados aparecen modificados. Para evitar esto, se recomienda no utilizar los editores de FARSITE, sino armar archivos de texto plano con la información requerida empleando un editor de texto como Notepad, guardarlos, cambiarles la extensión a .wtr o .wnd según corresponda, y cargar estos archivos en Weather Files (.WTR) y Wind Files (.WND) en la ventana FARSITE Project. De lo contrario, asegurarse antes de iniciar una simulación que los datos de clima y viento sean los indicados.

### 2. Inconsistencias en la definición del período de duración del incendio.

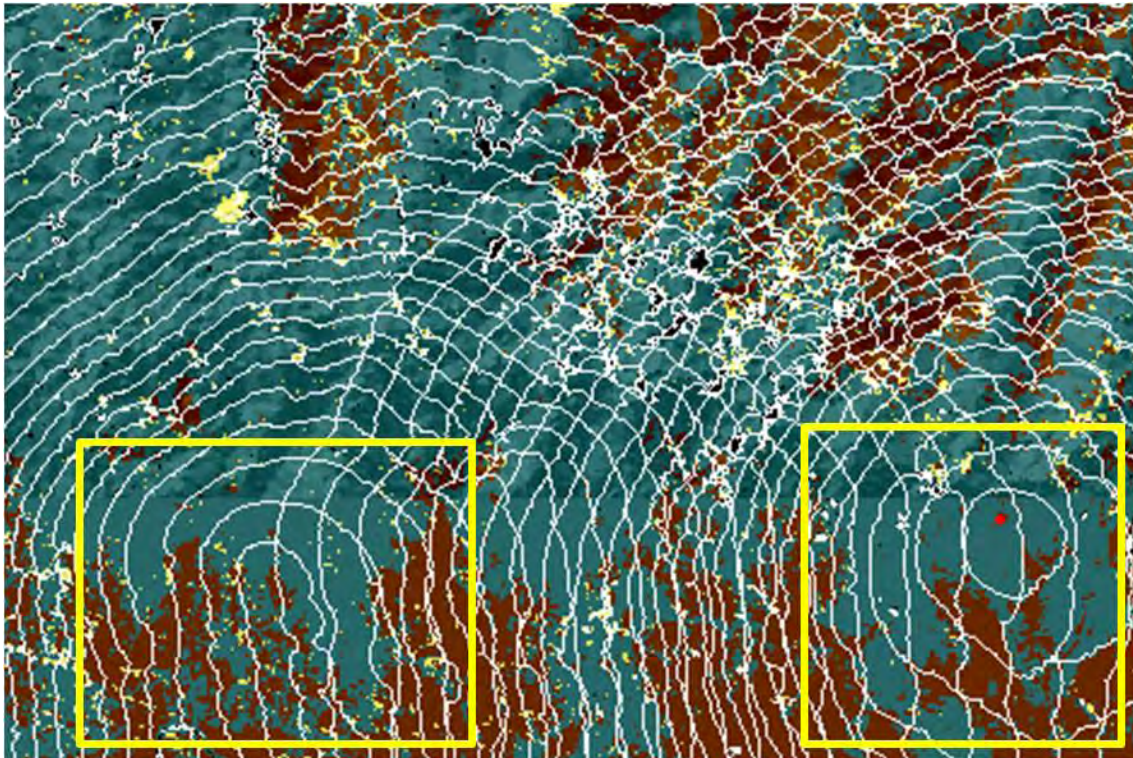
Aún cuando no se active el período de acondicionamiento de humedad de los combustibles, no es posible indicar como día de inicio de la simulación el primer día ingresado en los archivos de clima y viento. Sin embargo, es posible indicar como inicio el mismo día ingresado para utilizar en el período de acondicionamiento de humedad cuando éste ha sido activado. Además, no permite indicar como día de finalización de la simulación el último día ingresado en los archivos de clima y viento. Por otro lado, al realizar pruebas con otras simulaciones, ha ocurrido que en escenarios donde se definieron sólo dos días en los archivos de clima y viento, FARSITE permitió indicar el primer día registrado en los archivos .wtr y .wnd como fecha de inicio cuando se activó el acondicionamiento de humedad de combustibles. Para este caso, tampoco permitió usar el último día registrado en los archivos como fecha de finalización de la simulación, excepto cuando no fue activado el acondicionamiento permitiendo ingresar el último día cargado en los archivos de clima y viento como fecha de inicio y finalización. No hay explicación para este comportamiento, por lo que se recomienda que una vez configurada la duración de la simulación y haya sido aceptada por el software a través de dar OK, se vuelva a abrir la casilla en la que se definen los parámetros de duración para controlar que FARSITE guardó los cambios introducidos correctamente.

### 3. Alteración de los raster ingresados

Al cargar los archivos con información espacial (combustible, elevación, pendiente, orientación), FARSITE transfiere las dos primeras columnas de la imagen (margen izquierdo) a posterior de la última columna de la imagen original (margen derecho). Por lo tanto, los archivos de salida producto de una simulación, presentarán igual número de columnas y filas que los archivos de entrada, pero no coincidirán punto a punto espacialmente. Se recomienda dejarle un margen de no dato alrededor de la información de interés (combustible y topografía) y luego ingresar estos raster modificados en el archivo de paisaje de FARSITE. Igualmente, si después se desea trabajar en otro software con los archivos de salida del simulador, previamente se deben realizar los recortes necesarios para lograr la coincidencia geográfica entre los píxeles de las distintas imágenes.

#### 4. Detección de problemas en el modelo de propagación elíptico

En la imagen colocada abajo se muestra el resultado de una simulación en la que se empleó un viento de 5 km/h, con un único foco de ignición, indicado con un punto rojo (a la derecha de la imagen). Las líneas blancas representan los perímetros de avance del fuego. Observando estos perímetros, se distingue la presencia de dos frentes de fuego distintos, el originado a partir del punto de ignición ingresado y otro originado de la mitad de la imagen hacia la izquierda. Notoriamente, no existió otro punto de ignición para justificar la propagación de este segundo frente de fuego.



Con los recuadros amarillos se indican los primeros perímetros de avance del fuego. A la derecha de la imagen se observa el fuego propagado a partir del punto de ignición, mientras que a la izquierda de la imagen, se ven nuevos perímetros de avance correspondientes a un fuego distinto al inicial.

Se repitió nuevamente la simulación y se obtuvo el mismo resultado. Sin embargo, al replicarla nuevamente días después para observar si la falla continuaba, no se volvió a registrar el mismo resultado. Esto podría sugerir que el funcionamiento del software podría verse afectado por las condiciones de la máquina en la cual se encuentre instalado.

## REFERENCIAS

---

- Albini, F. A. 1976. Estimating wildfire behavior and effects. United States Department of Agriculture. Forest Service. General Technical Report. INT-30. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden, Utah. 100p.
- Albini, F.A. 1979. Spot fire distance from burning trees - A predictive model. United States Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Research Station. General Technical Report INT-56. 80p.
- Allgöwer, B., D. Calogine, A. Camia, P. Cuiñas, P. Fernandes, A. Francesetti, C. Hernando, B. Koetz, N. Koutsias, H. Lindberg, R. Marzano, D. Molina, F. Morsdorf, L.M Ribeiro, E. Rigolot & O. Séro-Guillaume. 2007. Methods for Wildland Fuel Description and Modelling: Final Version of the State of the Art. EUFIRELAB Project (Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory). Deliverable D-02-06. 57p.
- Alonso-Benito, A., P.A. Hernández-Leal, A. González-Calvo, M. Arbelo & A. Barreto. 2008. Analysis of different methods for burnt area estimation using remote sensing and ground truth data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2008. *IEEE International*. 828-831.
- Andrews, P.L. 2012. Modeling wind adjustment factor and midflame wind speed for Rothermel's surface fire spread model. United States Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Research Station. General Technical Report RMRS-GTR-266. 48p.
- Andrews, P.L. & R.C. Rothermel. 1982. Charts for interpreting wildland fire behavior characteristics. United States Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Research Station. General Technical Report INT-131. 22p.
- Anderson, H.E. 1982. Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. General Technical Report INT-122. United States Department of Agriculture. Forest Service. 28p.
- Arca, B., P. Duce, M. Laconi, G. Pellizzaro, M. Salis & D. Spano. 2007. Evaluation of Farsite Simulator in Mediterranean maquis. *International Journal of Wildland Fire* 16(5): 563–572.
- Arnaldos Viger, J., X. Navalón Nonell, E. Pastor Ferrer, E. Planas Cuchi & L. Zárata López. 2004. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Institut d'Edicions de la Diputació de Barcelona. Ed. Mundi-Prensa, Madrid, 414p.
- APN 2004. Plan de Manejo Parque Nacional Quebrada de Condorito y Reserva Hídrica Provincial Achala. Administración de Parques Nacionales. Consultores: Rodríguez Groves V. & G Peyroti. 197p.
- Barrionuevo, S.A. & J.A. López. 2007. Evaluación de las propiedades de los combustibles vegetales como indicadores de áreas críticas de incendios forestales en Santiago del Estero (Argentina). *Revista Forestal Venezolana*. 51(2): 147-152.
- Battsengel, V., D. Amarsaikhan, T. Bat-Erdene, E. Egshiglen, A. Munkh-Erdene & M. Ganzorig. 2013. Advanced classification of Landsat TM and Envisat images of Mongolia. *Advances in Remote Sensing*. 2: 102-110.
- Ben-Hur, A., & J. Weston. 2010. A user's guide to support vector machines. En: *Data mining techniques for the life sciences*. Serie *Methods in Molecular Biology*. Humana Press. 609: 223-239.
- Benhadj, I., B. Duchemin, V. Simonneaux, P. Maisongrande, S. Khabbat & A.G. Chehbouni. 2007. Combined use of NDVI time courses at low and high spatial resolution to estimate land cover and crop evapotranspiration in semi-arid areas. En: *4th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images*, July 18-20. Leuven, Belgium.

- Bergen, K.M, S.J. Goetz, R.O. Dubayah, G.M. Henebry, C.T. Hunsaker, M.L. Imhoff, R.F. Nelson, G.G. Parker & V.C. Radeloff. 2009. Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for Lidar and Radar spaceborne missions. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 114. G00E06. 13p.
- Bingwen, Q., Z. Canying, C. Chongcheng, Z. Chungui & Z. Ming. 2013. Vegetation distribution pattern along altitudinal gradient in subtropical mountainous and hilly river basin, China. *Journal of Geographical Sciences*. 23(2): 247-257.
- Bortolot, Z.J. & R.H. Wynne. 2005. Estimating forest biomass using small footprint LiDAR data: An individual tree-based approach that incorporates training data. *Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 59: 342-360.
- Bovio, G., E. Guglielmet & A. Camia. 2004. Plan de gestión de incendios a escala regional en una zona proclive a los incendios (Región del Valle d'Aosta - Italia). Memorias del Segundo Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global. Córdoba, España. 477-484.
- Bradshaw, L.S., J. E. Deeming, R.E. Burgan & J.D. Cohen. 1983. The 1978 National Fire-Danger Rating System: Technical Documentation. General Technical Report INT-169. United States Department of Agriculture. Forest Service. 49p.
- Candade, N. 2004. Multispectral classification on Landsat images: a comparison of Support Vector Machine and Neural Networks classifiers. ASPRS Annual Conference Proceedings. Denver, Colorado. 12p.
- Chuvieco, E. 2010. Teledetección Ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio. Nueva edición actualizada. Editorial Planeta, S.A. Barcelona. 590p.
- Chuvieco, E., Y. Cifuentes, S. Hantson, A. Agustín López, R. Ramo & J. Torres. 2012. Comparación entre focos de calor MODIS y perímetros de área quemada en incendios mediterráneos. Asociación Española de Teledetección. *Revista de Teledetección*. 37: 9-22.
- Cingolani, A.M., D. Renison, M.R. Zak & M.R. Cabido. 2004. Mapping vegetation in a heterogeneous mountain rangeland using landsat data: an alternative method to define and classify land-cover units. *Remote Sensing of Environment*. 92: 84-97.
- Cingolani, A.M., M.R. Cabido, D. Renison & V. Solís Neffa. 2003. Combined effects of environment and grazing on vegetation structure in Argentine granite grasslands. *Journal of Vegetation Science*. 14: 223-232.
- Coca, L., Z. Franco & A. Pateti. 2008. Implementation of morphological filters used in the processing of digital images in a programmable logic device. *Universidad, Ciencia y Tecnología*. 12(48): 171-182.
- Coulibaly, L. & K. Goïta. 2006. Evaluation of the potential of various spectral indices and textural features derived from satellite images for surficial deposits mapping. *International Journal of Remote Sensing*. 27(20): 4567-4584.
- Cruz, M.G. 2005. Guia fotográfico para identificação de combustíveis florestais. Região Centro de Portugal. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais - ADAI, Coimbra. 38 p.
- CSIRO. [En línea]. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. Agencia científica nacional de Australia. Citado el 06 de diciembre de 2013. Disponible en: <<http://www.csiro.au/Outcomes/Safeguarding-Australia/Mk5ForestfireDangerMeter.aspx>>
- Cuchietti, A., H.M. Beccacece, S. Naretto, N. Soria & S. Zeballos. [s.a]. Modelos de combustibles para predicción y control del fuego en las Sierras Chicas de Córdoba.

- Gobierno de Córdoba. Plan Provincial de Manejo de Fuego Secretaría de Ambiente de la Provincia de Córdoba. F.C.E.FyN. Universidad Nacional De Córdoba. 18 p.
- CWFIS. [En línea]. Canadian Wildland Fire Information System. Canadian Forest Service. Natural Resources Canada. Citado el 06 de diciembre de 2013. Disponible en: <[http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/en\\_CA/background/summary/fbp](http://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/en_CA/background/summary/fbp)>.
  - Dasgupta, S., J.J. Qu & X. Hao. 2006. Design of a susceptibility index for fire risk monitoring. *Geoscience and Remote Sensing Letters*. 3(1): 140-144.
  - De Abelleira, D., N.A. Mari & M. Gaute. 2009. Evaluación del uso de imágenes de radar en banda L para la identificación de daño por fuego en el delta del río Paraná (Argentina). En: Dámaso Ponvert-Delisle Batista - Compiladora: Julieta Straschnoy. Seminario Internacional “La tecnología satelital de observación de la tierra en la evaluación, monitoreo y manejo de desastres naturales en la agricultura. Retos y perspectivas”, 1ª Ed., Buenos Aires. Ediciones INTA. ISBN 978-987-1623-05-1. 12p.
  - DeFries, R., M. Hansen, & J. Townshend. 1996. Proportional estimation of land cover characteristics from satellite data. En: *International Geoscience Remote Sensing Symposium*. 1: 535-537.
  - Deeming, J.E., J.W. Lancaster, M. A. Fosberg, R.W. Furman & M.J. Schroeder. 1972. The National Fire-Danger Rating System. United States Department of Agriculture. Forest Service. Research Paper. RM-184. 165p.
  - Denham, M.M. 2009. Predicción de la evolución de los incendios forestales guiada dinámicamente por los datos. Tesis Doctoral. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria. Universitat Autònoma de Barcelona. 163p.
  - Dentoni, M.C. & D. Marek. [s.a]a. Antecedentes 1998-2003. Programa Nacional de Evaluación de Peligro de Incendio y Alerta Temprana. Plan Nacional de Manejo del Fuego, SAyDS (Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación)-Servicio de Protección de la Columbia Británica. 9p.
  - Dentoni, M.C. & D. Marek. [s.a]b. Antecedentes 2003-2010. Programa Nacional de Evaluación de Peligro de Incendio y Alerta Temprana. Plan Nacional de Manejo del Fuego, SAyDS - Servicio de Protección de la Columbia Británica. 12p.
  - Dentoni, M.C. & D. Marek. [s.a]c. Antecedentes 2011. Programa Nacional de Evaluación de Peligro de Incendio y Alerta Temprana. Plan Nacional de Manejo del Fuego, SAyDS - Servicio de Protección de la Columbia Británica. 7p.
  - Dorren, L.K.A., B. Maier & A.C. Seijmonsbergen. 2003. Improved Landsat-based forest mapping in steep mountainous terrain using object-based classification. *Forest Ecology and Management*. 183: 31-46.
  - Dubois, C.1914. Systematic fire protection in the California forests. United States Department of Agriculture. Forest Service. Washington, D.C. 99p.
  - Ehsani, A.H & F. Quiel. 2010. Efficiency of Landsat ETM+ Thermal band for land cover classification of the Biosphere Reserve “Eastern Carpathians” (Central Europe) using SMAP and ML algorithms. *International Journal of Environmental Research*. 4(4): 741-750.
  - Falk, D.A., C. Miller, D. McKenzie & A.E. Black. 2007. Cross-scale analysis of fire regimes. *Ecosystems*. 10: 809-823.
  - Finney, M.A. 1998. FARSITE: Fire Area Simulator-Model Development and Evaluation. Research Paper RMRS-RP-4 Revised. United States Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Research Station. Research Paper RMRS-RP-4 Revised. 52p.

- Friedl, M.A., D.K. McIver, X.Y. Zhang, J.C.F. Hodges, A. Schnieder, A. Bacinni, A.H. Strahler, A. Cooper, F. Gao, C. Schaaf & W. Liu. 2001. Global land cover classification results from MODIS. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2001 *IEEE International* (Sidney, Australia). 733-735.
- Friendly, M. 2002. Corrgrams: Exploratory displays for correlation matrices. *The American Statistician*.56: 316-324.
- Fukuda, S. & H. Hirosawa. 2001. Support Vector Machine Classification of Land Cover: Application to Polarimetric SAR Data. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2001. *IEEE International*. 1:187-189.
- FUELMAP. 2009. Development of a European Fuel Map based on a novel classification suited to Eu environments. The Fuelmap Project. State of the art review. Draft fuel classification for Europe. Deliverable 1.v.4. Financed by European Commission JRC- ITT/RFQ. Reference 2008/S 116-153998. 108p.
- Gao, X., X. Fei & H. Xie. 2011. Forest fire risk zone evaluation based on high spatial resolution RS image in Liangyungang Huaguo Mountain Scenic SPOT. En: *International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services*. 593-596.
- García-Haro, F.J., M.A. Gilabert & J. Meliá. 2001. Monitoring fire-affected areas using Thematic Mapper data. *International Journal of Remote Sensing*. 22(4): 533-549.
- Gaute, M.C., C. Kunst, J.M. García Conde, G. Defossé, J. Casillo, P. Bellomo, C.M. Di Bella & M.E. Beget. 2013. Gestión del fuego en plantaciones del Delta: Integración de información de sensores remotos y de muestreos a campo para estimar peligro de ignición. En: *Proyectos de Investigación Aplicada (PIA)*, financiados por el Componente Plantaciones Forestales Sustentables del Proyecto Manejo Sustentable de los Recursos Naturales BIRF 7520, ejecutado por la UCAR. Jornadas PIAs. 27 y 28 de junio de 2013. Buenos Aires. 11p.
- Giglio, L., J. Desloires, C.O. Justice & Y.J. Kaufman. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 87: 273-282.
- GISRS Center. 2011. Hydrological Drainage Delineation for use in the CAPRA model – Theory. The Florida International University Board of Trustees. 39p.
- Hawbaker, T.J., V.C. Radeloff, A.D. Syphard, Z. Zhu & S.I. Stewart. 2008. Detection rates of the MODIS active fire product in the United States. *Remote Sensing of Environment*. 112: 2656-2664.
- Hao, Z., b. Liu & X. Yang. 2006. A comparison of multiclass support vector machine algorithms. *Proceedings of the Fifth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. *IEEE*. Dalian. 4221-4226.
- Hirsch, K.G. 1993. A brief overview of the Canadian Forest fire behavior prediction (FBP) system. En: *HotSheet* (eds.). The International Association of Wildland Fire. USA. Vol. 2, nº 2 y 3. 31p.
- Holmgren, J. & T. Jonsson. 2004. Large scale airborne laser scanning of forest resources in Sweden. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 36: 157-160.
- Hornby, L. G.1935. Fuel type mapping in Region One. *Journal of Forestry*. 33(1): 67-72.
- Huang, H., J. Legarsky & M. Othman. 2007. Land-cover Classification Using Radarsat and Landsat Imagery for St. Louis, Missouri. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 73(1): 37-43.



- Huete, A. 1988. A soil adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25: 295-309.
- Huson, D. 2007. Algorithms in Bioinformatics II. SoSe'07, ZBIT. 263-280.
- Jin, X.M, Y.K. Zhang, M.E. Schaepman, J.G.P.W. Clevers & Z. Su. 2008. Impact of elevation and aspect on the spatial distribution of vegetation in the Qilian mountain area with remote sensing data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 37:1385-1390.
- Jollineau, M. & P. Howarth. 2002. Use of high-resolution imagery to map wetland environments in south-central Ontario, Canada. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2002. *IEEE International*. 3089- 3091.
- Karathanassi, V., V. Andronis & D. Rokos. 2000. Evaluation of the topographic normalization methods for a mediterranean forest area. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. 33: 654-661
- Kavzoglu, T. & I. Colkesen. 2012. The effects of training set size for performance of support vector machines and decision trees. *Proceeding of the 10th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Florianopolis-SC, Brazil, July 10-13, 2012.
- Keeley, J.E. & T.J. Brennan. 2012. Fire-driven alien invasion in a fire-adapted ecosystem. *Oecologia*. 169: 1043-1052.
- Kröse, B. & P. van der Smagt. 1996. An introduction to neural networks. University of Amsterdam. 8ª Ed. 135p.
- Kunst, C., M. Gaute, J.M. García Conde, G. Defossé, J. Casillo, P. Bellomo, R. Ledesma & S. Bravo. 2013. Gestión del fuego en plantaciones del Delta: Acumulación de combustible en pajonales y juncales. En: *Proyectos de Investigación Aplicada (PIA)*, financiados por el Componente Plantaciones Forestales Sustentables del Proyecto Manejo Sustentable de los Recursos Naturales BIRF 7520, ejecutado por la UCAR. Jornadas PIAs. 27 y 28 de junio de 2013. Buenos Aires. PIA 10028. 7p.
- Landis, R.J. & G. G. Koch. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*. 33(1): 159-174.
- Laneve, G. & E.G. Cadau. 2007. Quality assessment of the fire hazard forecast based on a fire potential index for the Mediterranean area by using a MSG/SEVIRI based fire detection system. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2007. *IEEE International*. 2447-2450.
- Lasaponara, R., A. Lanorte & S. Pignatti. 2006. Characterization and Mapping of Fuel Types for the Mediterranean Ecosystems of Pollino National Park in Southern Italy by Using Hyperspectral MIVIS Data. *Earth Interactions*. 10 (13): 1-11.
- Lawson, B.D., B.J. Stocks, M.E. Alexander & C.E. Van Wagner. 1985. A system for predicting fire behavior in Canadian forests. Reprinted from the Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology. Society of American Foresters. 11p.
- Lefsky, M.A., W.B. Cohen, G.G. Parker & D.J. Harding. 2002. Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*. 52 (1): 19-30.
- Lentile, L.B., Z.A. Holden, A.M.S. Smith, M.J. Falkowski, A.T. Hudak, P. Morgan, S.A. Lewis, P.E. Gessler & N.C. Benson. 2006. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*. 15: 319-345.
- Liwa, E.J. 2006. A neural network model for classification of coastal Wetlands vegetation structure with moderate resolution imaging spectro-radiometer (MODIS)

- data. A Dissertation. Department of Oceanography and Coastal Sciences. Faculty of the Louisiana State University. 157p.
- Lloret, F. 2004. Régimen de incendios y regeneración. En: Valladares, F. 2004. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Capítulo 4: 101-126. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid.
  - Lu, D., M. Batistella, E.F. Moran & E.E. de Miranda. 2005. A comparative study of Terra ASTER, Landsat TM, and SPOT HRG data for land cover classification in the Brazilian Amazon. *The 9th World multi-Conference on systematics, Cybernetics, and informatics (WmsCi 2005)*. Orlando. International Institute of Informatics and Systematics. 411-416.
  - Maffei, C., A.P. Leone, M. Vella, G. Meoli, M. Tosca & M. Menenti. 2007. Retrieval of vegetation moisture indicators for dynamic fire risk assessment with simulated MODIS radiance. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2007. IEEE International*. 4648-4651.
  - Malik, R.N. & S.Z. Husain. 2006. Spatial distribution of ecological communities using remotely sensed data. *Pakistan Journal of Botany*. 38(3): 571-582.
  - Mantero, P., G. Moser & S.B. Serpico. 2005. Partially supervised classification of remote sensing images through SVM-based probability density estimation. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 43(3): 559-570.
  - Martínez Ortega, R.M., L.C. Tuya Pendás, M. Martínez Ortega, A. Pérez Abreu & A.M. Cánovas. 2009. El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*. Vol. 8, N°2. 19p.
  - McDonald, E.R., X. Wu, P.A. Caccetta & N.A. Campbell. 2000. Illumination correction of Landsat TM data in South East NSW. En: *Proceedings of the Tenth Australasian Remote Sensing and Photogrammetry Conference*. Adelaide, Australia. 21–25 August 2000.
  - McNairn, H., J. Shang, C. Champagne, E. Huffman, A. Smith & T. Fiset. 2005. *31st International Symposium on Remote Sensing of the Environment*. 4p.
  - Means, J.E., S.A. Acker, D.J. Harding, J.B. Blair, M.A. Lefsky, W.B. Cohen, M.E. Harmon & W.A. McKee. 1999. Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the Western Cascades of Oregon. *Remote Sensing and Environment*. 67: 298-3308.
  - Means, J.E., S.A. Acker, B.J. Fitt, M. Renslow, L. Emerson & C.J. Hendrix. 2000. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 66 (11): 1367-1371.
  - Meyer, P., K.I. Itten, T. Kellenberger, S. Sandmeier & R. Sandmeier. 1993. Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in an alpine environment. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 48(4): 17-24.
  - Miller, J.D. & S.R. Yool. 2002. Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. *Remote Sensing of Environment*. 82: 481–496.
  - Mountrakis, G., J. Im & C. Ogole. 2011. Support vector machines in remote sensing: A review. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 66: 247-259.
  - Muchoney, D.M. & A.H. Strahler. 1998. Developing vegetation and land surface parameters using classification approaches. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings. IGARSS 1998. IEEE International*. 2112-2114.
  - Müller, K., S. Mika, G. Ratsch, K. Tsuda & B. Scholkopf. 2001. An introduction to kernel-based learning algorithms, Neural Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*. 12(2): 181-201.

- Myburgh, G. 2012. The impact of training set size and feature dimensionality on supervised object-based classification: a comparison of three classifiers. Thesis (MSc)--Stellenbosch University. 86p.
- Nichol, J., L.K. Hang & W.M. Sing. 2006. Empirical correction of low Sun angle images in steeply sloping terrain: a slope-matching technique. *International Journal of Remote Sensing*. 27 (3): 629-635.
- Ormeci, C., U. Alganci & E. Sertel. 2010. Identification of crop areas using SPOT-5 data. FIG Congress 2010. Sydney, Australia, 11-16 April 2010. 12p.
- Ortiz Zamora, F.G. 2002. Procesamiento morfológico de imágenes en color. Aplicación a la reconstrucción geodésica. Tesis Doctoral. Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal. Universidad de Alicante. 25p.
- Pacifici, F., M. Chini & W.J. Emery. 2009. A neural network approach using multi-scale textural metrics from very high-resolution panchromatic imagery for urban land-use classification. *Remote Sensing of Environment*. 113(6): 1276-1292.
- PNEF (Programa Nacional de Estadística Forestal). 2008. Estadística de Incendios Forestales 2007. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 126p.
- PNEF (Programa Nacional de Estadística Forestal). 2009. Estadística de Incendios Forestales 2008. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 108p.
- PNEF (Programa Nacional de Estadística Forestal). 2010. Estadística de Incendios Forestales 2009. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 118p.
- PNEF (Programa Nacional de Estadística Forestal). 2011. Estadística de Incendios Forestales 2010. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 103p.
- PNEF (Programa Nacional de Estadística Forestal). 2012. Estadística de Incendios Forestales 2011. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 102p.
- PNEF (Programa Nacional de Estadística Forestal). 2013. Estadística de Incendios Forestales 2012. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación. 117p.
- Pontil, M. & A. Verri. 1998. Properties of Support Vector Machines. *Neural Computation*. 10: 955-974.
- Pyne, S.J., P.L. Andrews & R.D. Laven. 1996. Introduction to Wildland Fire. 2º Ed. John Wiley & Sons, Inc. 102p.
- Qian Y., H. Zhang, Z. Wu & Z. Wang. Vegetation composition and distribution on the northern slope of Karlik Mountain to Naomaohu basin, East Tianshan Mountains. 2011. *Journal of Arid Land*. 3(1): 15-24.
- Riaño, D., E. Chuvieco, J. Salas, A. Palacios-Orueta & A. Bastarrika. 2002a. Generation of fuel type maps from Landsat TM images and ancillary data in Mediterranean ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research*. 32: 1301-1315.
- Riaño, D., E. Meier, B. Allgöwer & E. Chuvieco. 2002b. Generation of vegetation height, vegetation cover and crown bulk density from airborne laser scanning data. Forest Fire Research & Wildland Fire Safety, Viegas (eds.). Millpress, Rotterdam, ISBN 90-77017-72-0. 8p.
- Riaño, D., E. Chuvieco, J. Salas & I. Aguado. 2003. Assessment of different topographic corrections in Landsat TM data for mapping vegetation types. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 41: 1056-1061.

- Richards, G.D. 1990. An elliptical growth model of forest fire fronts and its numerical solution. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 30(6): 1163-1179.
- Richards, J.A. 1993. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction. Second, Revised and Enlarged Edition. Ed Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 340p.
- Richter, R., T. Kellenberger & H. Kaufmann. 2009. Comparison of topographic correction methods. *Remote Sensing*. 1:184-196.
- Riera, R. 2013. Reclassificació dels models de combustible utilitzats per a la OTPMIF. [Comunicación personal]. Datos no publicados.
- Roberti de Siqueira, F., W.R. Schwartz & H. Pedrini. 2013. Multi-scale gray level co-occurrence matrices for texture description. *Neurocomputing*. 120: 336-345.
- Rodríguez, N.F. 2003. Cortafuegos y cortacombustibles en plantaciones de coníferas. *Patagonia Forestal*. 9(4): 9-12.
- Rodríguez Trejo, D.A. 2001. Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindl. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 7(2): 145-151.
- Romanovsky, J., V. Shikin & Y. Shur. 2004. Simulación de la propagación de incendios forestales. Memorias del Segundo Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección Contra Incendios Forestales: Una Visión Global. Córdoba, España. 439-450.
- Rothermel, R.C. 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. United States Department of Agriculture. Forest Service. Research Paper. INT-115. Intermountain Forest and Range Experiment Station. Ogden, Utah. 50p.
- Roujean, J.L. & F.M. Breon. 1995. Estimation PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*. 51: 375-384.
- Roy, D.P., L. Boschetti & S.N. Trigg. 2006. Remote Sensing of Fire Severity: Assessing the performance of the Normalized Burn Ratio. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 3(1): 112-116.
- Saha, A.K., M.K. Arora, E. Csaplovics & R.P. Gupta. 2005. Land cover classification using IRS LISS III image and DEM in a rugged terrain: A case study in Himalayas. *Geocarto International*. 20(2): 33-40.
- Salas, F.J. & E. Chuvieco. 1995. Aplicación de imágenes Landsat-TM a la cartografía de modelos de combustibles. *Revista de Teledetección*. 5: 1-12.
- Salis, M. 2008. Fire behaviour simulation in Mediterranean maquis using FARSITE (fire area simulator). Tesis Doctoral. Universita' degli studi di Sassari. 176p.
- Scott, J.H. & R.E. Burgan. 2005. Standard fire behavior fuel models: A comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. General Technical Report RMRS-GTR-153. United States Department of Agriculture. Forest Service. Rocky Mountain Research Station. 80p.
- Shao, Y. & R.S. Lunetta. 2012. Comparison of support vector machine, neural network, and CART algorithms for the land-cover classification using limited training data points. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 70: 78-87.
- Show, S.B. & E.I. Kotok. 1929. Cover type and fire control in the National Forests of Northern California. United States Department of Agriculture. Forest Service. Bulletin No 1495. 35p.

- Sione, W. 2006. La Teleobservación como herramienta para la generación de mapas de riesgo de incendio y monitoreo de zonas incendiadas. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Luján. 142p.
- Song, X., D. Zheng & X. Jiang. 2012. Comparison of artificial neural networks and support vector machine classifiers for land cover classification in Northern China using a SPOT-5 HRG image. *International Journal of Remote Sensing*. 33(10): 3301-3320.
- Southworth, J. 2004. An assessment of Landsat TM band 6 thermal data for analyzing land cover in tropical dry forest regions. *International Journal of Remote Sensing*. 25(4): 689-706.
- Su, W., L. Jing, C. Yunhao, L. Zhigang, Z. Jinshui, L. Tsuey Miin, S. Inbaraj & M. H. Siti Atikah. 2008. Textural and local spatial statistics for the object-oriented classification of urban areas using high resolution imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 29(11): 3105–3117.
- Tachikawa, T., M. Hato, M. Kaku & A. Iwasaki. 2011. The characteristics of ASTER GDEM version 2. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2011. *IEEE International*. 1-4.
- Thiel, C., F. Giacco, F. Schwenker & G. Palm. 2009. Comparison of Neural Classification Algorithms Applied to Land Cover Mapping. *Proceedings of the 2009 conference on New Directions in Neural Networks*. 18th Italian Workshop on Neural Networks. 254-263.
- Trianni, G. 2006. Introduzione al telerilevamento per l'osservazione della terra. Università degli Studi di Pavia. 250p.
- Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combination for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 8: 127-150.
- Ubiedo Figueroa, V.M, E.G. Abril & A.C. Ravelo. 2008. Caracterización de modelos de combustible a partir de estructuras vegetales en Calamuchita, Córdoba. *Congreso Argentino de Agrometeorología*. 8 al 10 de octubre de 2008. San Salvador de Jujuy. 273-274.
- USFS-WFAS. [En línea]. United State Forest Service-Wildland Fire Assessment System. Citado el 06 de diciembre de 2013. Disponible en: <<http://www.wfas.net/index.php/fire-danger-rating-fire-potential--danger-32>>.
- Vanonckelen, S., S. Lhermitte & A. Van Rompaey. 2013. The effect of atmospheric and topographic correction methods on land cover classification accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 24: 9-21.
- van Wagner, C.E. 1977. Conditions for the start and spread of crownfire. *Canadian Journal of Forest Research*. 7: 23-34.
- van Wilgen, B.W., G.G. Forsyth & P. Prins. 2012. The management of fire-adapted ecosystems in an urban setting: the case of Table Mountain National Park, South Africa. *Ecology and Society*. 17(1): 8.
- Wallerman, J., J.E.S. Fransson, J. Bohlin, H. Reese & H. Olsson. 2010. Forest mapping using 3D data from SPOT-5 HRS and Z/I DMC. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2010. *IEEE International*. 64-67.
- Watanachaturaporn, P., M.K. Arora & P.K. Varshney. 2008. Multisource classification using Support Vector Machines: An empirical comparison with Decision Tree and Neural Network classifiers. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 74(2): 239-246.
- Wehmeyer, G. 2012. Simulations and Analysis of a 2012 Kansas Wildland Fire Using FARSITE. ME 374F: *Fire Science*. 25p.

- Wen, Q., Z. Zhang, S. Liu, X. Wang & C. Wang. 2010. Classification of grassland types by MODIS time-series images in Tibet, China. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 3(3): 404-409.
- Whitlock, C., P.E. Higuera, D.B. McWethy & C.E. Briles. 2010. Paleocological perspectives on fire ecology: Revisiting the fire-regime concept. *The Open Ecology Journal*. 3: 6-23.
- Wilson, H.G. & P.J. Howarth. 2002. Use of remote sensing data to examine spatial pattern measurement for improved forest management practices. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2002. *IEEE International*. 1082-1084.
- Wu, M. & K. Chen. 2007. Fusion of SPOT and SAR Images for land cover classification. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 12(1): 59-72.
- Wu, J. & M.E. Bauer. 2013. Evaluating the effects of shadow detection on Quickbird image classification and spectroradiometric restoration. *Remote Sensing*. 5: 4450-4469.
- Xu, Z. & D. Zhuang. 2007. The methodology of detailed vegetation classification based on environmental knowledge and remote sensing images. En: *Geoscience and Remote Sensing Symposium*. IGARSS 2007. *IEEE International*. 2074-2077.