

Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

**Facultad de Ingeniería
Sede Esquel**



APLICACIÓN DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE COMPORTAMIENTO DEL FUEGO A UN INCENDIO OCURRIDO EN EL OESTE DE CHUBUT.

**Trabajo Final
Requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Forestal**

Alumna: María de las Mercedes Oviedo

Director: Lic. María del Carmen Dentoni

Codirector: Ing. Ftal. Dante Guglielmin

Esquel, Chubut

Febrero 2019

RESUMEN

Diversos sistemas se han desarrollado con el objetivo de evaluar los factores condicionantes de la ocurrencia, el comportamiento y los efectos de los incendios. En Argentina el desarrollo de un sistema de evaluación de peligro de incendios, fue llevado a cabo, en el año 2000, por el Servicio Nacional de Manejo del Fuego (SMNF). El mismo se inició tomando como base el Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales (CFFDRS) desarrollado por el Servicio Forestal de Canadá (CFS). En su primera etapa contempló el ajuste e implementación del Índice Meteorológico de Peligro de Incendios (FWI) que compone el CFFDRS, previendo una etapa posterior de implementación de la componente de Predicción del Comportamiento del Fuego (FBP). El FWI, actualmente implementado en Patagonia y otras regiones del país, es utilizado para fundamentar medidas operativas de prevención y de presupresión. El FBP provee estimaciones cuantitativas de parámetros del comportamiento del fuego, para un momento y lugar determinados para 16 tipos de combustible identificados en Canadá. Luego de la implementación del FWI en Argentina, se dio el primer paso hacia el desarrollo del FBP en junio de 2016, con el primer curso de características y usos operativos de modelos de comportamiento del fuego. Para su utilización, es necesario contar con la clasificación de la vegetación en tipos de combustible. Teniendo en cuenta que en la región patagónica hay zonas donde la vegetación se asemeja a algunos de los modelos descriptos para Canadá, decidí usar este sistema con el objetivo de comparar sus resultados cuando el mismo es aplicado a un incendio ocurrido en el noroeste de Chubut. Para ello realicé una descripción de los sistemas FWI y FBP, analizando las variables de ingreso y las salidas de ambos sistemas. A su vez, realicé una descripción del área de estudio y seleccioné un incendio ocurrido en una zona que contara con información suficiente, para aplicar el modelo de predicción. Los resultados obtenidos corroboran que existe un buen potencial para aplicar el sistema FBP, particularmente en aquellas regiones donde la vegetación se asemeja a algunos de los modelos descriptos por el sistema canadiense original. No obstante, para implementar un sistema más preciso de predicción de comportamiento del fuego, es imprescindible clasificar la vegetación y lograr el modelado del comportamiento de fuego en los distintos tipos de combustible presentes en nuestro territorio.

CONTENIDO

RESUMEN.....	ii
AGRADECIMIENTOS	vi
DEDICACIÓN.....	vii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	3
OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
METODOLOGIA	4
1. Descripción de estructuras de los Subsistemas FWI y FBP	4
1.1 Características del FWI	4
1.2 Características del FBP.....	4
2. Selección de incendios a estudiar	4
2.1 Área de estudio	5
2.2 Fuente de datos de incendios	6
2.3 Fuente de datos meteorológicos.....	6
2.4 Selección del incendio	6
3. Aplicación del Subsistema de Predicción de Comportamiento del Fuego en el incendio seleccionado.....	6
RESULTADOS.....	9
4. Descripción de las estructuras del FWI y del FBP	9
4.1 Características del FWI	10
4.2 Características del FBP.....	14
4.2.1 Variables de Entrada	15
4.2.1.1 Descripción de los tipos de combustibles del Sistema FBP	15
4.2.1.1.1 Grupo de coníferas	15
4.2.1.1.2 Grupo caducifolio.....	17
4.2.1.1.3 Grupo de bosques mixtos	17
4.2.1.1.4 Grupo de desechos	18
4.2.1.1.5 Grupo abierto	19
4.2.1.2 Meteorología, Códigos e Índices.....	19
4.2.1.3 Topografía.....	19
4.2.1.4 Contenido de Humedad Foliar	21
4.2.1.4 Tipo y Duración de la predicción.....	23
4.2.2 Salidas Primarias	23
4.2.2.1 Velocidad de propagación de la cabeza del incendio	23
4.2.2.2 Consumo de Combustible	23
4.2.2.3 Intensidad lineal de la Cabeza.....	24
4.2.2.4 Descripción del tipo de Fuego.....	24
4.2.3 Salidas Secundarias	25
4.2.3.1 Velocidades de propagación de flanco y cola del incendio.....	25

4.2.3.2 Distancia de propagación en la cabeza, cola y flancos.....	25
4.2.3.3 Intensidad de línea del fuego de flancos y de cola.....	26
4.2.3.3 Área elíptica del fuego.....	26
4.2.3.4 Tasa del crecimiento del perímetro.....	27
4.2.3.5 Razón Largo/Ancho (L/B).....	28
5. Selección del incendio a estudiar.....	29
5.1 Características del área de estudio.....	29
5.1.1 Asociaciones vegetales.....	31
5.1.2 Clima de Fuego y ocurrencia de incendios.....	33
5.1.3 Descripción de la topografía.....	35
5.2 Incendio seleccionado.....	35
5.2.1 Topografía.....	36
5.2.2 Combustible afectado.....	36
5.2.3 Condiciones meteorológicas.....	37
5.2.4 Códigos e índices.....	39
5.2.5 Comportamiento del fuego.....	41
6. Aplicación del Subsistema de Predicción de Comportamiento del Fuego en el/los incendios seleccionados.....	41
6.1. Descripción de los resultados de proyección con el tipo de combustible C6.....	44
6.2 Descripción de los resultados de proyección con el tipo de combustible C4.....	46
6.3 Análisis de las proyecciones.....	47
CONCLUSIONES.....	48
ANEXO 1: Proyección con C6.....	50
ANEXO 2: Proyección con C4.....	51
ANEXO 3: Glosario de Siglas.....	56
BIBLIOGRAFIA.....	57

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Descripción del tipo de fuego.....	25
Tabla 2. Datos meteorológicos 03/04/2007.....	37
Tabla 3. Datos meteorológicos horarios 04/04/2007.....	38
Tabla 4. Datos meteorológicos y ajuste horario del FWI 04/03/2007.....	39

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.....	5
Figura 2. Diagrama de procedimientos FBP.....	8
Figura 3. Estructura del Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios (CFFDRS).....	10
Figura 4. Estructura del Índice Meteorológico de Peligro de Incendio (Basado en Van Wagner 1987).	11
Figura 5. Estructura del FBP.....	14

Figura 6. Velocidad del viento equivalente de la pendiente porcentual medida para varios tipos de combustible; FFMC se ha establecido en 89.....	20
Figura 7. Suma de vectores	21
Figura 8. Tendencia estacional del Contenido de Humedad Foliar (CHF) y el Factor de Propagación de la Copa (CSF) resultante para la estación experimental Petawawa Forest, Ontario, Canadá, según lo obtenido por Van Wagner (1978).....	22
Figura 9. Modelo simple de crecimiento elíptico del fuego	27
Figura 10. Modelo de crecimiento elíptico del fuego y los componentes secundarios del FBP.	28
Figura 11. Provincias Fitogeográficas de la República Argentina	29
Figura 12. Provincias Fitogeográficas de la provincia de Chubut.....	29
Figura 13. Fluctuación anual media, de los valores de FWI y BUI para la estación Esquel Aero Tomado de Casas, 2017.	35
Figura 14. Incendio “La Zeta”, 04/03/2007.....	36
Figura 15. Tipos de combustible	37
Figura 16. Nefoanálisis. La cuña se indica con una línea zigzagueante.	39
Figura 17. Tramos de las proyecciones asociados al perfil altitudinal	42
Figura 18. Exposiciones, zona Laguna La Zeta	43
Figura 19. Curvas de nivel, zona Laguna La Zeta, Esquel, Chubut	44
Imagen 20: Relación L/B de cada tramo con la proyección con C6.....	52
Imagen 21: Proyección total con C6.	53
Imagen 22: Relación L/B de cada tramo con la proyección con C4.....	54
Imagen 23: Proyección total con C4	55

AGRADECIMIENTOS

a María por su tiempo y dedicación.

a mis amigos y compañeros por el apoyo y colaboración.

DEDICACIÓN

a mis hijos por su paciencia y comprensión,

a Leo por estar siempre,

a mis padres por su apoyo incondicional y al resto de mi familia por su cooperación.

INTRODUCCIÓN

El inicio de un incendio está condicionado a la presencia de una fuente de ignición, ya sea natural o antropogénica. Dada la fuente de ignición, la ocurrencia de un foco estará supeditada a diversos factores ambientales. Las características de la vegetación y el estado del tiempo, como así también la topografía, serán factores determinantes del posterior comportamiento del fuego. Diversos sistemas se han desarrollado con el objetivo de evaluar los factores condicionantes de la ocurrencia, el comportamiento y los efectos de los incendios. Aquellos sistemas que evalúan la probabilidad de que exista una fuente de ignición, se denominan *Sistemas de Evaluación de Riesgo de Incendio*. Aquellos sistemas que, además del riesgo, toman en cuenta la probabilidad de ignición, las características del comportamiento del fuego, las dificultades para el control y los daños que causaría, se denominan *Sistemas de Evaluación de Peligro de Incendio*. Los sistemas de evaluación de peligro son herramientas imprescindibles para la planificación de actividades de prevención y supresión de incendios (Dentoni y Muñoz, 2012).

A mediados de la década del 20', comenzó la investigación de sistemas de evaluación de peligro de incendios forestales en Canadá. Desde entonces, la evaluación del peligro de incendios se fue perfeccionando a través de la creación de sucesivos índices, que se desarrollaron y mejoraron de forma independiente. El Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales (CFFDRS¹) utilizado actualmente, comenzó a desarrollarse en 1968. Este sistema consiste de cuatro módulos o subsistemas: Índice Meteorológico de Peligro de Incendios (FWI²); Subsistema de Predicción de Comportamiento del Fuego (FBP³); Subsistema de Predicción de Ocurrencia de Fuego (FOP⁴) y Subsistema Accesorio de Humedad de Combustibles. El Índice FWI es el primer subsistema que se completó, extendiéndose por primera vez a todo ese país en 1971, y es actualmente utilizado en todo Canadá y ha sido adaptado a otros países, como, por ejemplo, en Nueva Zelanda (Fogarty et al., 1998). El segundo subsistema del CFFDRS, es el FBP; se concibió como una serie de guías de características de comportamiento del fuego reales, desarrolladas regionalmente para tipos de combustible específicos de importancia local. Estos

¹ Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS)

² Fire Weather Index (FWI)

³ Fire Behavior Prediction (FBP)

⁴ Fire Occurrence Prediction (FOP)

"Índices de incendios" (Kiil, 1971; Lawson, 1972; Van Wagner, 1974a) o "Índice de comportamiento del fuego" (Lawson, 1977; Stocks, 1977; Quintilio, 1978), se desarrollaron durante la década de 1970 y se publicaron como suplementos regionales del Sistema FWI. Estos suplementos, junto con el Sistema FWI, formaron el primer sistema verdaderamente nacional de evaluación de peligro de incendios en Canadá.

En los años siguientes se continuó con el desarrollo del sistema y en 1984, se publicó por primera vez la versión preliminar para pruebas de campo del *Sistema Canadiense de Predicción del Comportamiento de los Incendios Forestales (FBP³)* (Lawson et al., 1985), En dicha versión, solo se emitió el componente de velocidad de propagación para 14 tipos principales de combustible canadiense.

Actualmente, el número de tipos de combustible utilizados por el FBP aumentó a 16, y se incorporaron estimaciones del consumo de combustible y de la intensidad de línea del fuego; además, el subsistema proporciona modelos integrales para incendios de copas y permite estimar el crecimiento del área y del perímetro fuego.

Los dos módulos o subsistemas restantes que conforman el CFFDRS, son el subsistema de Predicción de Ocurrencia de Fuego (FOP) y el subsistema de Accesorio de Humedad de Combustibles, sobre los que no ahondaré aquí ya que no es necesario detallarlos para el desarrollo de este trabajo.

En el año 2000, a través de un proyecto de transferencia de tecnología entre Argentina y la Provincia de British Columbia de Canadá, el entonces Plan Nacional de Manejo del Fuego (PNMF), hoy Servicio Nacional de Manejo del Fuego (SMNF), incorporó el Subsistema de Evaluación de Peligro FWI, el cual provee información general sobre el peligro de incendios forestales, en base a las condiciones meteorológicas. Los códigos de humedad de los combustibles vegetales e índices relativos de comportamiento del fuego que lo componen, indican el potencial de que se inicie un fuego, de que su propagación sea más o menos lenta, de que consuma una mayor o menor cantidad de combustible y de que sea más o menos intenso (Dentoni y Muñoz, 2012).

Luego de la implementación del FWI, se dio el primer paso hacia el desarrollo del FBP en junio de 2016, con el primer curso de características y usos operativos del FBP, destinado a personal especializado de los sistemas de Manejo del Fuego del país.

El FBP provee estimaciones cuantitativas de parámetros del comportamiento, como la velocidad de propagación de la cabeza del incendio, el consumo de combustibles, la razón de crecimiento del perímetro y la intensidad lineal del fuego, para un momento

y lugar determinados. Esta información está asociada a los valores de FWI, de los combustibles y de la topografía y se basa en la valoración del comportamiento del fuego, a partir de la información de diversos aspectos básicos y del conocimiento del ambiente en el que se desarrolla el incendio (Barrow, 1951). Para correr estos modelos de predicción de comportamiento, este subsistema utiliza una serie de ecuaciones matemáticas que relacionan el comportamiento del fuego con el viento, el contenido de humedad de los combustibles, y las condiciones topográficas para 16 tipos de combustible identificados en Canadá.

Actualmente en Chubut y en gran parte del país, el FWI constituye una herramienta para la toma de decisiones operativas y para la administración de recursos. Además, al contar con un sistema que permita predecir el comportamiento del fuego, favorecerá que las tareas de supresión sean más eficientes.

Teniendo en cuenta que, en nuestro país no existe hasta el momento una clasificación de complejos o tipos de combustible, y entendiendo que esto es una limitante para la aplicación de este sistema, me propongo aplicar el FBP, teniendo en cuenta que hay sectores en la zona Oeste de Chubut donde la vegetación se asemeja a algunos de los modelos descriptos en Canadá.

Los resultados de este trabajo, pueden ser de utilidad a los servicios de manejo de fuego, ya que aporta un conocimiento general de las características del sistema y de cómo es su aplicación.

OBJETIVO GENERAL

Analizar los resultados de la predicción de comportamiento de fuego obtenidos de la aplicación del Subsistema FBP, en relación a un incendio ocurrido en la zona oeste de Chubut, para corroborar si lo descripto por el modelo de predicción se ajusta a lo sucedido en la realidad

OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Describir las estructuras de los Subsistemas FWI y FBP.
2. Seleccionar un incendio que se haya desarrollado en combustibles semejantes a alguno de los modelos descriptos por el sistema FBP y, además, que reúna información necesaria y variables de entrada para aplicar el modelo de predicción.

3. Aplicar el Subsistema de Predicción de Comportamiento del Fuego en el incendio seleccionado y evaluar los resultados.

METODOLOGIA

1. Descripción de estructuras de los Subsistemas FWI y FBP.

1.1 Características del FWI

En primer lugar, realicé una revisión bibliográfica para analizar el significado de las componentes del FWI, y su relación con el contenido de humedad de los combustibles y el comportamiento del fuego.

1.2 Características del FBP

Luego realicé una revisión bibliográfica para describir la estructura del FBP y comprender como se vincula con las tres componentes ambientales que influyen en el comportamiento del fuego: meteorología, topografía y combustibles. Analicé cuáles son las variables de entrada y de salida del sistema, y como se vincula con el sistema FWI. Asimismo, detallé cuales son los procedimientos para su aplicación y como se interpretan los resultados.

2. Selección de incendios a estudiar.

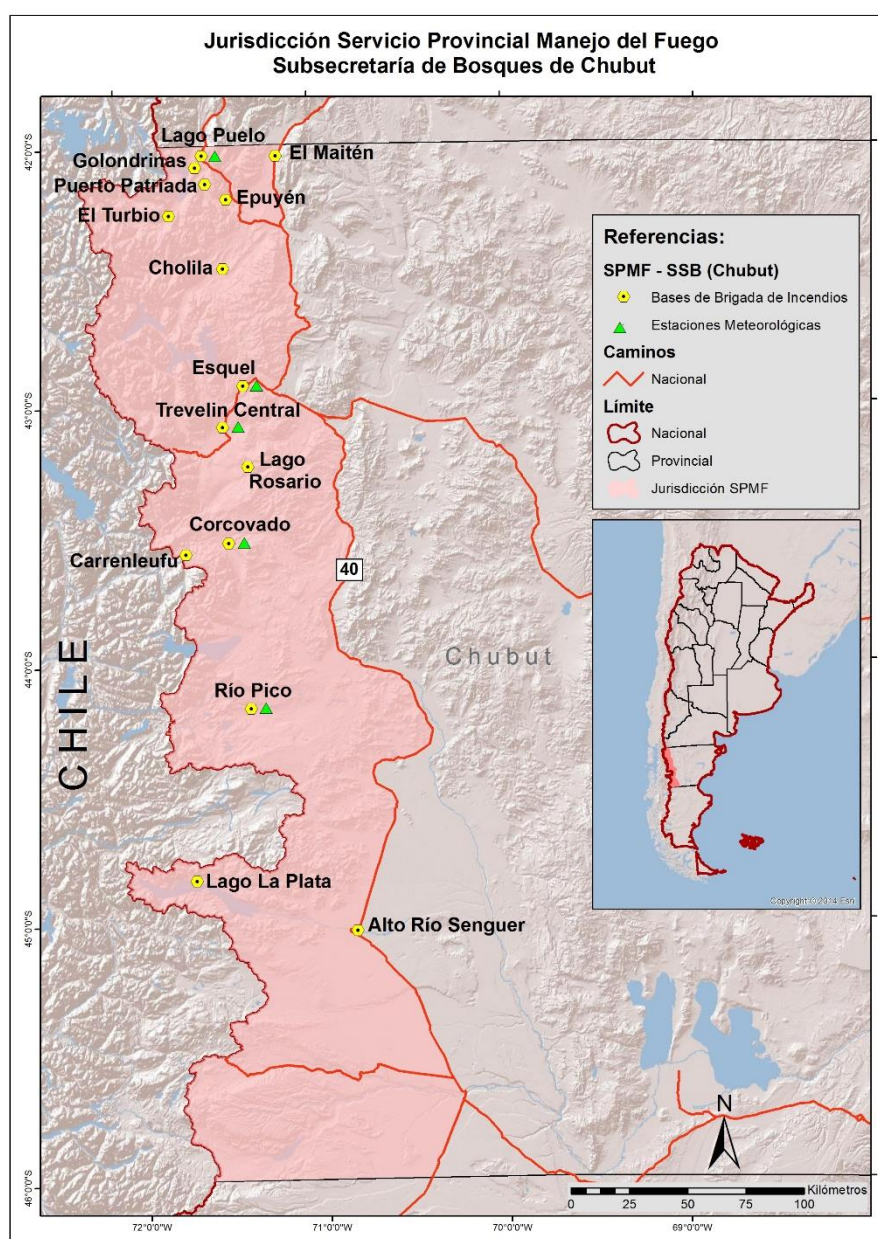
Existen grandes variaciones en los tipos de combustible en Argentina, algunos de ellos razonablemente similares a los utilizados por el sistema canadiense, como por ejemplo pastizales, plantaciones y bosques abiertos de cipreses nativos. La elección del área de estudio la realicé en base a que debía contar con la presencia de combustibles similares a los tipos canadienses, con información de datos de ocurrencia de incendios y con datos meteorológicos para el cálculo de FWI.

Por esto, la elección del incendio al que apliqué la proyección, la realicé principalmente en base a los combustibles afectados, considerando que debían asemejarse a alguno de los tipos de combustibles que se describen en el sistema FBP. Además, el incendio a elegir, debía contar con datos meteorológicos in situ o tener la posibilidad de poder referenciarlo a alguna estación meteorológica.

2.1 Área de estudio

El área de estudio seleccionada para este trabajo, está comprendida en la zona Oeste de la provincia de Chubut, la cual está bajo la jurisdicción del Servicio Provincial de Manejo del Fuego (SPMF), perteneciente a la Subsecretaría de Bosques e Incendios de la provincia de Chubut. El área consta de aproximadamente 3.600.000 ha., y limita hacia el Este con la Ruta 40 y al Oeste con la frontera de Chile y los Parques Nacionales Los Alerces y Lago Puelo. En el extremo Norte y Sur con las provincias de Río Negro y Santa Cruz respectivamente, como se describe en la Figura 1.

Figura 1. Área de estudio



2.2 Fuente de datos de incendios

Solicité al SPMF, información oficial sobre la ocurrencia de incendios e informes de estudios de caso que describan con mayor detalle el combustible afectado, las variables meteorológicas de inicio del fuego, el comportamiento, la superficie afectada, etc. El contar con información de comportamiento del fuego como, por ejemplo, largo de llama, fuego superficial o de copa, comportamiento extremo, etc., fue muy útil para poder comparar con los resultados obtenidos en la proyección. Disponer de dicha información detallada del incendio seleccionado, fue indispensable para poder desarrollar este trabajo.

2.3 Fuente de datos meteorológicos

El área de estudio, cuenta con datos meteorológicos provenientes del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y de estaciones del SPMF. Los datos meteorológicos correspondientes a la estación Esquel Aero del SMN, fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Manejo del Fuego (SNMF) al SPMF. La estación Esquel Aero se encuentra ubicada a 42° 54' 20'' de Latitud Sur; 71° 8' 48'' Longitud Oeste y a 800 msnm. Las estaciones meteorológicas del SPMF, se encuentran distribuidas dentro de su jurisdicción: Subcentral Golondrinas (El Hoyo), Central Trevelin, Base Río Pico y Base Corcovado (Figura 1). Dichas estaciones son las que utilizaré en este trabajo. En estas estaciones se observan y registran los datos necesarios para el cálculo del FWI y las proyecciones del FBP.

2.4 Selección del incendio

Para seleccionar el incendio al que le apliqué la proyección de comportamiento del fuego, tuve en cuenta que contara con datos de fecha y hora de inicio, meteorológicos, de mapas de superficie afectada y de descripción del comportamiento, y principalmente con datos de combustible. Esta última información es esencial para poder aplicar el modelo de comportamiento, ya que es una de las variables de entrada del Sistema FBP.

3. Aplicación del Subsistema de Predicción de Comportamiento del Fuego en el incendio seleccionado.

Para realizar las proyecciones del comportamiento del fuego en el incendio seleccionado, utilicé una guía desarrollada por el Canadian Forest Service Fire Danger

Group, conocida como “Field Guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System” (Taylor et al., 1996). Esta guía se desarrolló para poder tener las primeras aproximaciones a campo de la aplicación del FBP, y es una simplificación de los modelos computacionales de predicción de comportamiento del fuego.

Es importante destacar que las predicciones del Sistema FBP, se hacen en base a dos fuentes de inicio diferente: puntual o lineal, y que existen una serie de supuestos que se deben considerar. Los mismos son:

- Las condiciones de los combustibles son similares a uno de los 16 tipos de combustibles de referencia.
- Los códigos de humedad del combustible utilizados son representativos de las condiciones del sitio.
- Los combustibles son uniformes y continuos, la topografía es simple y homogénea, y el viento es constante y unidireccional.
- El fuego es conducido por viento o por viento y pendiente, y la propagación no es afectada por una columna convectiva. El viento está representado por el viento a 10 m del suelo en terrenos abiertos.
- El fuego no es afectado por actividades de supresión (quema libre).
- Un incendio a partir de una fuente puntual, tendrá una forma elíptica en las condiciones anteriores.
- Se tiene en cuenta el efecto de las pavesas sobre la propagación.

Teniendo en cuenta estos supuestos y, contando con las variables de entrada necesarias para realizar las predicciones en los incendios seleccionados, procedí al uso de la guía. En la Figura 2 se muestra un diagrama de los procedimientos utilizados en la misma.

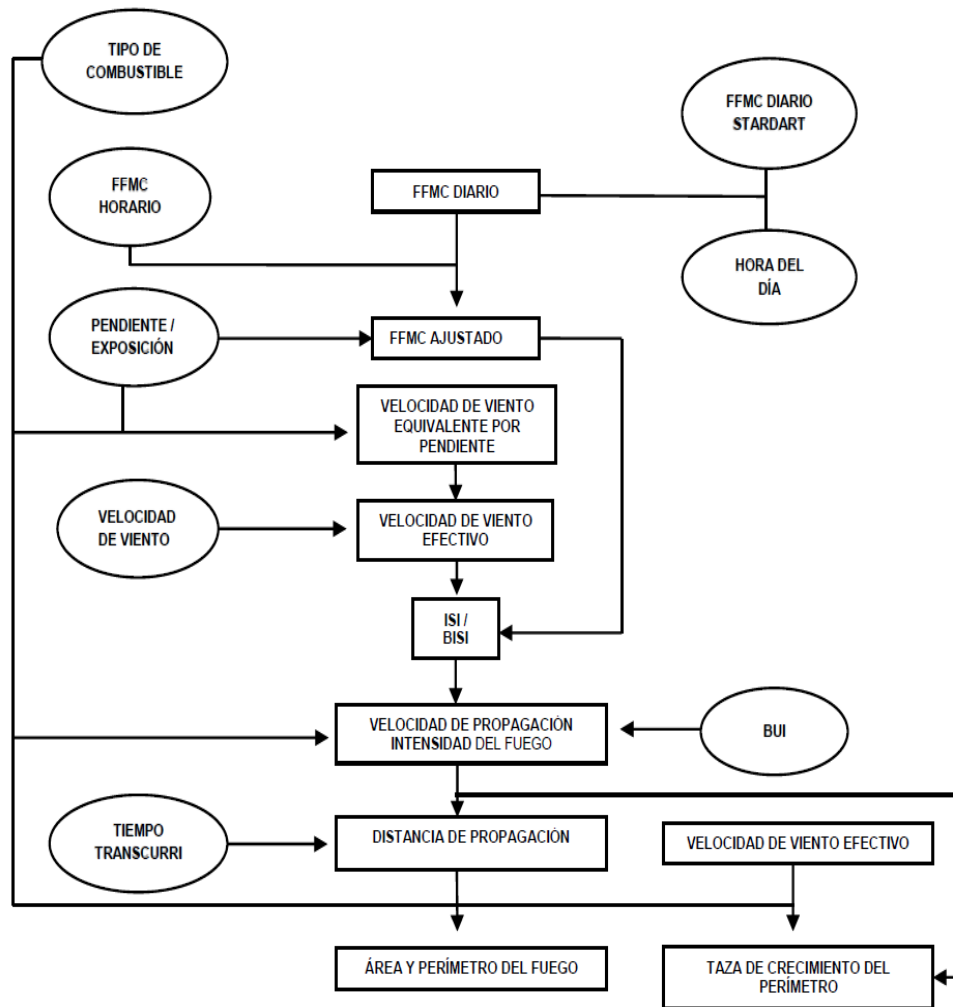


Figura 2. Diagrama de procedimientos FBP

Procedimiento para el uso de la guía.

- 1: Seleccionar el tipo de combustible más apropiado, debemos utilizar el que más se asemeje a alguno de los detallados en el punto 4.2.1.
- 2: Determinar el código de humedad del combustible fino (FFMC) más representativo.
- 3: Estimar la pendiente y determinar la velocidad del viento equivalente a la pendiente para el tipo de combustible seleccionado.
- 4: Determinar la velocidad del viento efectiva.
- 5: Determinar el índice de propagación inicial (ISI) para el FFMC ajustado y la velocidad efectiva del viento. Además, tener en cuenta el índice de propagación inicial en fuego de retroceso (BISI), si el valor de tabla es mayor que cero.

6: Seleccionar el índice de carga disponible (BUI) para el punto de predicción con la estación meteorológica más cercana y representativa. Con el ISI (o BISI) y BUI seleccionados, determinar la velocidad de propagación de equilibrio de la cabeza del incendio (ROS), o, la velocidad de propagación de fuego de retroceso (BROS) para el tipo de combustible seleccionado.

7: Determinar a partir del ROS o BROS de equilibrio, la distancia de propagación del fuego en la cabeza del incendio y la distancia de propagación del fuego de retroceso, para los intervalos de predicción más apropiados.

8: Determinar la superficie y el perímetro del incendio de un fuego puntual para un período de requerido de proyección, utilizando la distancia de propagación total y la velocidad efectiva del viento. El ancho del incendio se puede estimar dividiendo la distancia total de propagación por la relación longitud/ancho (L/B).

Una vez obtenido los resultados de la proyección de los incendios, pude representar esta información en imágenes satelitales, y realizar un mapa con los avances del fuego y las superficies afectadas para cada intervalo proyectado.

Con los resultados obtenidos de la proyección, hice una comparación con la información que contaba del incendio en cuestión.

RESULTADOS

4. Descripción de las estructuras del FWI y del FBP

Como dije, el Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales comenzó a desarrollarse en 1968 y es utilizado actualmente en Canadá y otros países. Consta de cuatro módulos o subsistemas: Índice Meteorológico de Peligro de Incendios (FWI), subsistema de Predicción de Comportamiento del Fuego (FBP), subsistema de Predicción de Ocurrencia de Fuego (FOP) y subsistema de Accesorio de Humedad de Combustibles. Estos dos últimos se encuentran aún en desarrollo.

En el año 2000, se dio inicio al desarrollo e implementación operativa del Sistema Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios (SNEPI), basado en el CFFDRS (Figura 3), (Dentoni et al. 2015). Actualmente, el FWI se encuentra implementado en gran parte de nuestro país.

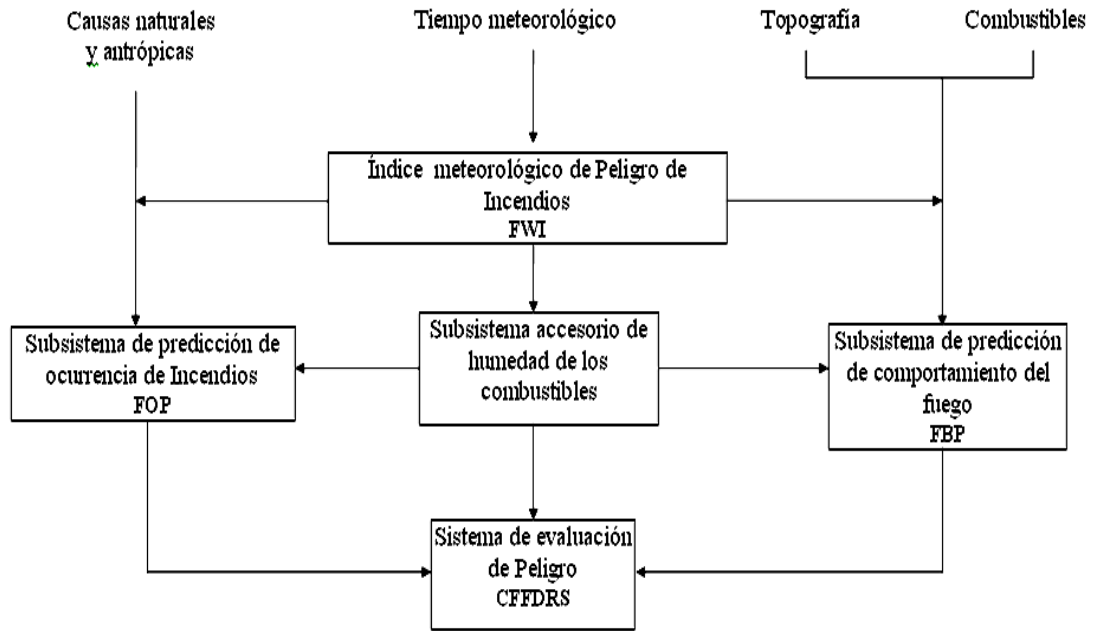


Figura 3. Estructura del Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios (CFFDRS) aplicado actualmente en Argentina.

4.1 Características del FWI

El FWI está compuesto por seis indicadores numéricos, tres códigos que reflejan las fluctuaciones diarias en el contenido de humedad de los combustibles y tres índices relacionados con el comportamiento del fuego que se asocian de manera relativa, no cuantitativa, a aspectos de ocurrencia y comportamiento del fuego (Figura 4). Como los valores alcanzados por estos códigos e índices se asocian al aspecto del comportamiento de fuego que cada uno representa (probabilidad de ocurrencia, propagación, intensidad, etc.), pueden determinarse umbrales a partir de los cuales son esperables determinadas características de los incendios. Los códigos de contenido de humedad, hacen un seguimiento de los cambios diarios en el contenido de humedad de tres clases de combustible: finos (diámetro menor a 0,6 cm), medianos (diámetro entre 0,6 y 5 cm.) y gruesos (diámetro mayor a 5 cm.). Los índices están relacionados con el comportamiento del fuego, representando de manera relativa, no cuantitativa, la velocidad de propagación, la carga de combustible disponible y la intensidad de línea de la cabeza del fuego.

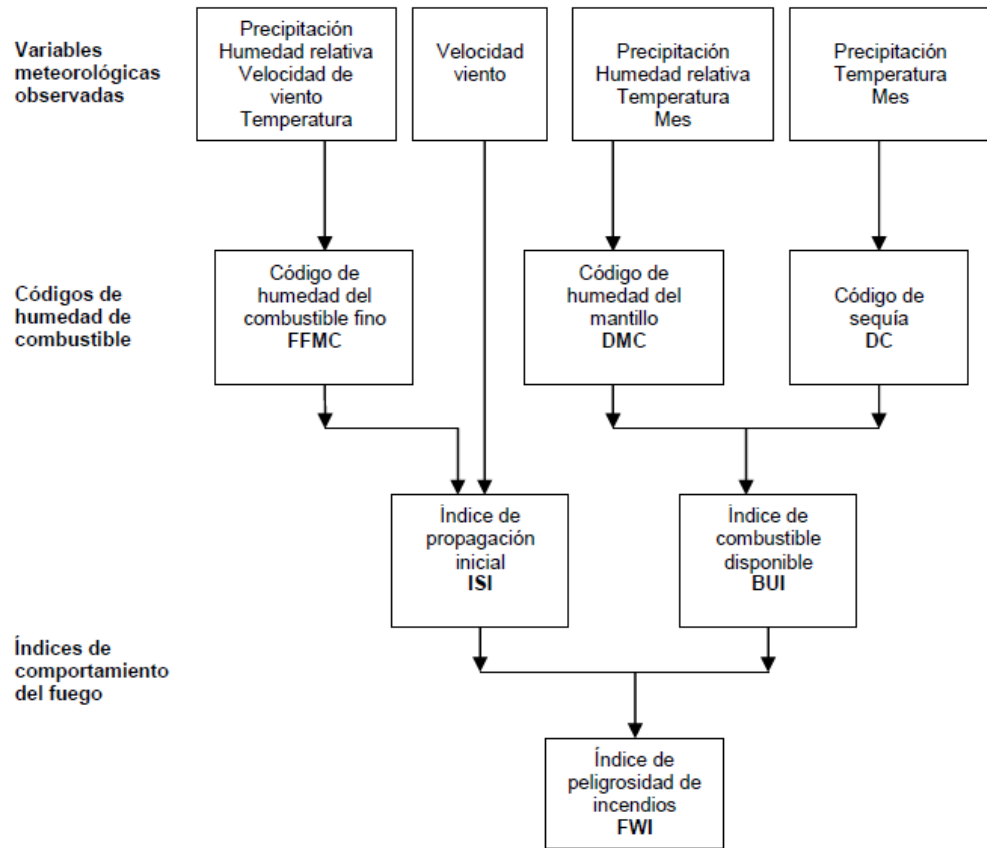


Figura 4. Estructura del Índice Meteorológico de Peligro de Incendio (FWI) (Basado en Van Wagner, 1987).

El sistema depende únicamente de la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento y la precipitación acumulada durante las últimas 24 horas. Los valores que se utilizan de las mencionadas variables, son aquellos que corresponden a las 12:00 hora local. También se tiene en cuenta el mes correspondiente en que se realiza el cálculo. Los valores obtenidos están representando el peligro a las 16:00 h, momento considerado por el sistema como el que presenta las condiciones más críticas para el desarrollo de incendios en un día típico desde el punto de vista meteorológico.

Los tres códigos que se relacionan con el contenido de humedad del combustible son los siguientes:

Código de Humedad del Combustible Fino (FFMC): este código es representativo del contenido de humedad de la hojarasca o mantillo y otros combustibles finos muertos en superficie, considerando un peso seco aproximado de $0,25 \text{ kg/m}^2$. Los valores alcanzados por el mismo varían entre 0 y 101 y son indicadores de la facilidad

relativa de ignición y de la inflamabilidad del combustible fino. El FFMC es un buen indicador de la probabilidad de que fuentes antrópicas generen focos, así como también de que se produzcan focos secundarios en un incendio. La relación entre el FFMC y la inflamabilidad del combustible es no-lineal, ya que pequeñas variaciones del FFMC cerca de los valores máximos, representan variaciones importantes en la inflamabilidad del combustible (Harrington *et al.*, 1983).

Dado su corto tiempo de respuesta, este indicador conocido como FFMC diario estándar, puede ser ajustado a lo largo del día de acuerdo a los cambios que sufren las variables meteorológicas, obteniendo el FFMC horario. Existen tres opciones posibles para hacer el ajuste del FFMC diario estándar, todas ellas usan una velocidad del viento real o pronosticado, para el momento y el lugar de interés en donde se lo necesita conocer.

1. El FFMC diario estándar, se puede ajustar con datos horarios o de viento.
2. El FFMC se ajusta con la utilización de tablas de ajuste horario, que proporcionan un rango más amplio en el período de tiempo para el cual se puede calcular un FFMC ajustado, sin datos meteorológicos adicionales; sin embargo, como estas tablas fueron desarrolladas con la curva de un patrón diario típico de temperatura y humedad relativa, es una restricción a la hora de querer obtener un dato más preciso.
3. El FFMC más representativo es el calculado en base a datos horarios de las variables meteorológicas. Para su cálculo se utiliza un programa de computadora que aún no está disponible en Argentina.

Código de Humedad del Mantillo (DMC): este es un indicador del contenido medio de humedad de una capa orgánica de profundidad moderada y de compactación laxa, cuyo peso seco aproximado se considera de 5 kg/m^2 . Este código es también indicador del consumo de combustibles en la mencionada capa, así como también de los combustibles medios en superficie y presenta buena relación con la probabilidad de que se produzcan focos por rayos. El mínimo valor que alcanza es cero, pudiendo aumentar indefinidamente.

Código de Sequía (DC): este código es representativo del contenido de humedad de la materia orgánica profunda y compacta, cuyo peso seco aproximado se considera de 25 kg/m². Los valores que alcanza el DC, reflejan los efectos de la sequía estacional sobre los combustibles pesados o gruesos y la probabilidad de ocurrencia de fuegos de rescoldo. Un valor de 300 para este código, es generalmente considerado como el punto crítico a partir del cual, debido a la persistencia del fuego en capas profundas, los trabajos de liquidación se hacen dificultosos. Cuando el DC alcanza valores de 500, en las capas profundas el contenido de humedad es lo suficientemente bajo como para que se sostenga la combustión, y se presenten dificultades para el control del incendio.

Los tres índices relacionados con el comportamiento son los siguientes:

Índice de Propagación Inicial (ISI): este índice es el resultado de la combinación de la velocidad del viento y el FFMC, representa la velocidad de propagación inicial sin la influencia de variables cuantitativas de combustible y topografía.

Al igual que el FFMC, puede ajustarse a lo largo del día con datos actualizados de viento. Se considera que valores mayores o iguales a 10, indican una rápida propagación del fuego, para valores de ISI mayores 20 se puede esperar comportamiento extremo, mientras que un ISI mayor a 70 se asocia a la ocurrencia de conflagraciones.

Índice de Carga Disponible (BUI): a través de este índice se combinan el DMC y el DC, representando la carga de combustibles medios y gruesos disponible para que el fuego pueda propagarse. Se considera que para valores de BUI mayores a 30, comienzan a involucrarse combustibles más pesados en la línea de avance del fuego, mientras que 60 es considerado el límite a partir del cual puede producirse comportamiento extremo; valores de BUI mayores 90 se asocian con comportamiento muy severo y errático.

Índice Meteorológico de Peligro de Incendios (FWI): índice obtenido como resultado de combinar el ISI y el BUI, representa la intensidad del fuego como tasa de energía liberada por unidad de distancia en la cabeza del fuego. De acuerdo a las observaciones efectuadas en áreas de Canadá, valores mayores a 24 indican dificultad de control de la cabeza, ocurrencia de coronamientos y la posibilidad de ocurrencia de

comportamiento extremo. Cuando el FWI supera el valor de 50, pueden producirse fuegos extremadamente severos.

4.2 Características del FBP

El FBP es el resultado de una amplia investigación llevada a cabo por el Servicio Forestal de Canadá, sobre el comportamiento del fuego en incendios y quemas prescritas. Estructuralmente, las entradas del sistema FBP provienen de los tres grupos principales de variables que afectan el comportamiento del fuego: combustibles, meteorología y topografía. Las salidas primarias del sistema, consisten en cuatro componentes del comportamiento del fuego: la velocidad de propagación, el consumo de combustible, la intensidad de línea en la cabeza del incendio y la descripción del fuego (superficial o de copa). Los componentes de las salidas secundarias, consisten en la distancia de propagación en la cabeza, flanco y cola del incendio, las velocidades de propagación e intensidades en los flancos y cola del incendio, el área elíptica del fuego, la tasa de crecimiento del perímetro y la razón L/B (Figura 5).

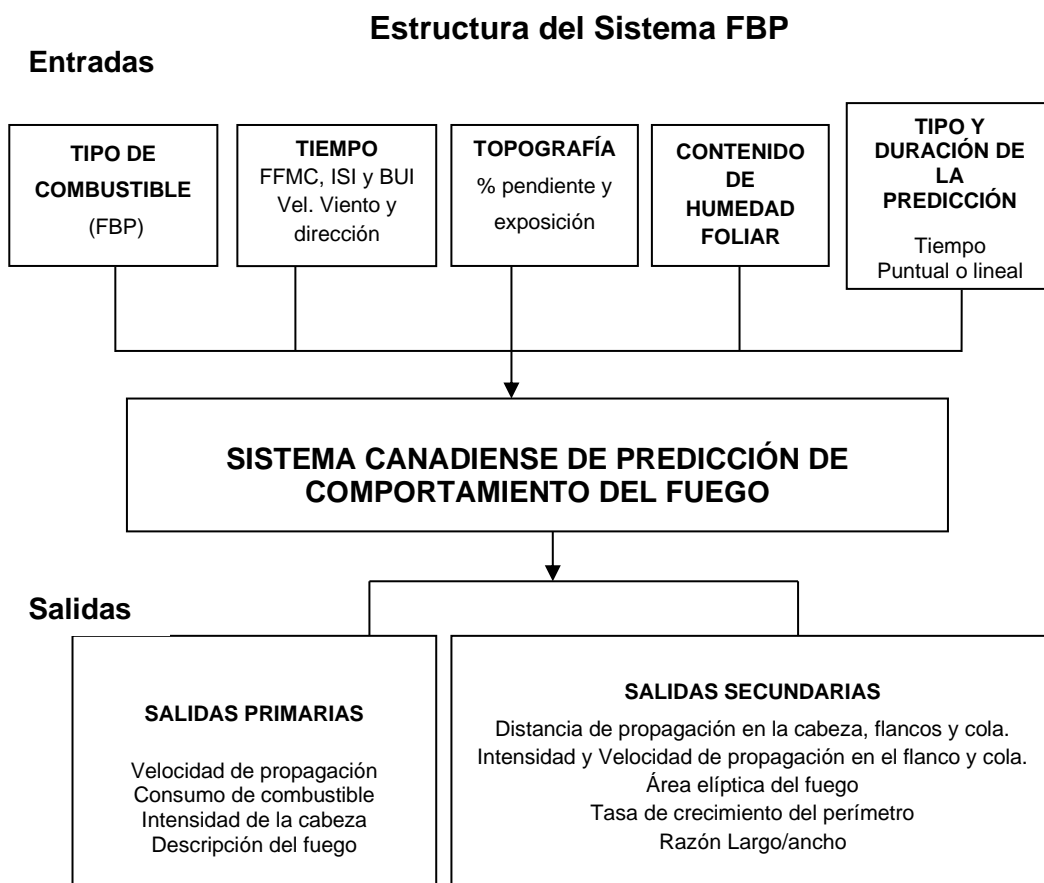


Figura 5. Estructura del FBP

4.2.1 Variables de Entrada

4.2.1.1 Descripción de los tipos de combustibles del Sistema FBP

Un tipo de combustible se define como "*una asociación identificable de elementos combustibles de especies distintivas, forma, tamaño, disposición y continuidad que mostrarán un comportamiento característico del fuego en condiciones de quema definidas*" (Merryll y Alexander, 1987). Más específicamente, un tipo de combustible es un complejo de combustible de suficiente homogeneidad, y se extiende sobre un área de tamaño suficiente para que el comportamiento de equilibrio de fuego se pueda mantener durante un período de tiempo considerable. El sistema FBP organiza los tipos de combustible en cinco grupos principales, con un total de 16 tipos de combustible reconocidos actualmente (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992).

4.2.1.1.1 Grupo de coníferas

Combustible tipo C-1 (bosque de abetos y líquenes): Este tipo de combustible se caracteriza por bosques de abetos negros, abierto y parecido a un parque (*Picea mariana*) que ocupa tierras altas bien drenadas en la zona subártica del oeste y norte de Canadá. La cubierta forestal se presenta como individuos ampliamente espaciados y grupos densos. La altura de los árboles varía considerablemente, pero las ramas de los troncos (vivos y muertos), se extienden uniformemente al suelo del bosque y el desarrollo de estratificación es extenso. La acumulación de combustible leñoso en la superficie es muy ligera y dispersa. La cobertura de arbustos es muy escasa y la superficie del suelo está completamente expuesta al sol y cubierta por una capa casi continua de líquenes, con un promedio de 3-4 cm de profundidad sobre el suelo mineral.

Combustible C-2 (abeto boreal): este tipo de combustible se caracteriza por estar compuesto por piceas negras puras, moderadamente bien distribuidas, ubicadas en tierras bajas y en sitios de tierras altas. Las copas de los árboles se extienden hasta o cerca del suelo y las ramas muertas suelen estar cubiertas con líquenes (*Usnea sp.*). Están presentes volúmenes bajos a moderados de material leñoso en el suelo, y es dominado por una alfombra de musgos y/o líquenes. Una capa orgánica compactada comúnmente excede una profundidad de 20-30 cm.

Combustible C-3 (Jack maduro o pino lodgepole): Este tipo de combustible se caracteriza por rodales puros de pino piñonero (*P. banksiana Lamb.*) o pino contorta

(*P. contorta Dougl.*), completamente densos (1000-2000 plantas / ha), que han madurado hasta el cierre completo de la copa. La base de la copa viva está muy por encima del suelo. Los combustibles muertos de la superficie son ligeros y dispersos y, la cubierta es de musgos, sobre una capa orgánica compactada moderadamente profunda (aproximadamente 10 cm). Un sotobosque de coníferas dispersas puede estar presente.

Combustible tipo C-4 (Jack inmaduros o pino lodgepole): Este tipo de combustible se caracteriza por rodales puros de pino piñonero (*Pinus banksiana*) o pino contorta (*P. contorta*); son densos (10 000-30 000 plantas / ha). Tiene una elevada mortalidad natural, que resulta en una gran cantidad de combustible leñoso muerto, la continuidad vertical y horizontal es característica de este tipo de combustible. Las cargas de combustible en la superficie son mayores que en el tipo de combustible C-3, y las capas orgánicas son menos profundas y menos compactas. La cobertura del suelo es principalmente de hojarasca y suspendida dentro de una capa baja de arbustos.

Combustible C-5 (pino rojo y blanco): este tipo de combustible se caracteriza por rodales maduros de diversas proporciones de pino rojo (*P. resinosa*) y pino blanco oriental (*P. strobus*), a veces con pequeños componentes de abeto blanco (*Picea glauca*), y abedul blanco o álamo temblón (*Populus sp.*). El sotobosque es de densidad moderada, generalmente arce rojo (*Acer rubrum*) o abeto balsámico (*Abies balsamea*), una capa de arbustos puede estar presente en proporciones moderadas. La cubierta de la superficie del suelo es una combinación de pastos y restos de pino, y la capa orgánica es generalmente de 5-10 cm de profundidad.

Combustible tipo C-6 (plantación de coníferas): Este tipo de combustible se caracteriza por plantaciones de coníferas puras, densas con copas cerradas y sin capa de sotobosque o arbusto presente. El suelo del bosque está cubierto por acículas con una capa de mantillo subyacente de hasta 10 cm de profundidad. La altura de la base de la copa se tiene en cuenta al predecir la velocidad de propagación del fuego y la coronación.

En este tipo de combustible, la guía de campo “Field Guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction” (FBP), distingue dos variantes: C6 Plantación de Coníferas con base de la copa a 2 y a 7 m.

Combustible tipo C-7 (pino ponderosa-abeto de Douglas): este tipo de combustible se caracteriza por rodales de pino ponderosa de edades desiguales (*Pinus ponderosa*) y abeto de Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) en varias proporciones. El alerce occidental (*Larix occidentalis*) y el pino contorta pueden ser componentes importantes del rodal en algunos sitios y elevaciones. Los rodales están abiertos con matorrales agrupados ocasionales de abeto de Douglas y/o alerce como un sotobosque discontinuo. El cierre del dosel es menos del 50% en general, aunque los matorrales están cerrados y a menudo son densos. Las acumulaciones de combustible leñoso superficial son ligeras y dispersas, dentro de los matorrales, la capa de acículas es el combustible predominante en la superficie. Las capas de mantillo son inexistentes a superficiales (<3 cm).

4.2.1.1.2 Grupo caducifolio

Combustible tipo D-1 (álamo temblón sin hojas): Este tipo de combustible se caracteriza por el álamo temblón puro y semimaduro (*Populus tremuloides*), antes de la brotación en primavera o después de la caída de la hoja y el secado de la vegetación menor en otoño. Un sotobosque de coníferas está notablemente ausente, pero típicamente está presente una capa mediana a alta de arbustos bien desarrollada. El principal combustible de la superficie que propaga el fuego consiste principalmente en hojarasca y material herbáceo seco, que está directamente expuestos a la radiación solar y al viento. En la primavera, el mantillo rara vez contribuye al combustible disponible para la combustión, debido a su alto contenido de humedad.

4.2.1.1.3 Grupo de bosques mixtos

Combustible M-1 (Bosque mixto boreal-sin hojas) y M-2 (bosque mixto boreal-verde): Este tipo de combustible se caracteriza por mezclas consistentes de las siguientes especies de coníferas y caducifolias en proporciones variables: abeto negro, abeto blanco, bálsamo abeto, abeto subalpino (*Abies lasiocarpa*), álamo temblón y abedul blanco. Además de la diversidad en la composición de las especies, las mezclas de rodales exhiben una gran variabilidad en la estructura y el desarrollo del rodal. Se reconocen dos fases asociadas con la variación estacional en la inflamabilidad del bosque mixto boreal: la etapa sin hojas que ocurre durante la primavera y el otoño (tipo de combustible M-1) y la etapa verde (tipo de combustible M-2). El índice de

propagación en ambos tipos de combustible se pondera según la proporción (expresada en porcentaje) de componentes de madera blanda y madera dura.

Combustible M-3 (abeto balsámico sin hojas) y M-4 (abeto balsámico muerto/verde): Este tipo de combustible se caracteriza por rodales de bosques mixtos en los que crece el abeto balsámico, a menudo como especie de sotobosque, en una mezcla heterogénea con picea, pino y abedul. La defoliación anual repetida (debido al ataque de la mariposa de la yema) causa mortalidad del abeto, seguido de corteza descascarada, desarrollo de líquenes, rotura superior y enrollamiento. El volumen de material leñoso caído es inicialmente bajo, pero aumenta sustancialmente con la descomposición progresiva del rodal después de la mortalidad. El suelo del bosque es una mezcla de musgos, acículas de coníferas y hojas de latifoliadas. La capa orgánica está moderadamente compactada y tiene una profundidad de 8-10 cm.

4.2.1.1.4 Grupo de desechos

Combustible tipo S-1 (desechos de pino lodgepole): Este tipo de combustible se caracteriza por ser los desechos resultantes de la tala rasa con utilización de tractores en pino maduro o pino lodgepole. Los desechos suelen tener una o dos temporadas de antigüedad, y retiene hasta el 50% del follaje, especialmente en las ramas más cercanas al suelo. Las partes superiores y las ramas que quedan en el sitio, resultan en cargas y profundidades moderadas de combustible. La cubierta del suelo es musgo continuo, mezclado con una capa de acículas discontinua, la capa orgánica es moderadamente profunda y bastante compacta.

Combustible S-2 (desechos de picea-bálsamo): se caracteriza por ser los desechos resultantes de la tala con tractor o skidder, de troncos maduros a sobremaduros de abeto blanco y abeto subalpino o abeto balsámico. Los desechos son típicamente de una a dos temporadas de antigüedad, reteniendo del 10% al 50% del follaje en las ramas. Las cantidades de combustibles leñosos descompuestos grandes y podridos pueden ser importantes. La cubierta del suelo es de musgo con una considerable capa de acículas. Las capas orgánicas son moderadamente profundas y compactas.

Combustible tipo S-3 (desechos de cedro costero-cicuta-Douglas-abeto): se caracteriza por ser los desechos resultantes de la tala rasa de coníferas mixtas maduras a sobremaduras de la Columbia Británica. Las especies predominantes son el cedro

rojo occidental (*Thuja plicata*), la Cicuta Occidental o pino de Alaska (*Tsuga heterophylla*) y el abeto de Douglas. Los desechos son típicamente de una temporada, con el componente de cedro conservando todo su follaje en las ramas en estado seco, mientras que los componentes de cicuta y abeto de Douglas habrán bajado hasta el 50% de su follaje. Pueden existir cargas muy grandes de material no aprovechable roto y podrido, donde las profundidades del combustible de desecho pueden variar de 0.5 a 2.0 m, las capas orgánicas son de moderadamente profundas a profundas y compactas.

4.2.1.1.5 Grupo abierto

Combustible 0-1 (pasto): este tipo de combustible se caracteriza por una cubierta de pasto continua, con ocasionales arboledas o matas de arbustos que no afectan apreciablemente el comportamiento del fuego. Hay dos subtipos de pastizales; uno es el pasto verde, común después del deshielo o en la primavera (0-1a), y el otro, el pasto muerto en pie común entre fines del verano y principios del otoño (0-1b). El porcentaje de secado tiene un marcado efecto sobre la propagación del fuego y debe estimarse con cuidado.

4.2.1.2 Meteorología, Códigos e Índices

Como se muestra en la Figura 4, las entradas basadas en las condiciones meteorológicas para el Sistema FBP, son la velocidad y dirección del viento como factor de propagación, y el FFMC, el ISI y el BUI del Sistema FWI.

El FFMC utilizado en este trabajo, es el ajustado según la opción 2 detallada en la sección 4.1, el valor de ISI va a responder al ajuste del FFMC y el BUI, es el estándar calculado con las variables registradas a medio día.

4.2.1.3 Topografía

La topografía es uno de los componentes clave que debe evaluarse cuando se analiza el potencial de propagación del fuego, ya sea para actividades de extinción de incendios o para fines de planificación como, por ejemplo, la preparación o la identificación de espacios defendibles adecuados en zonas de interfase.

Otros efectos de la topografía sobre el comportamiento del fuego, dependen en gran medida de como la topografía altera los componentes meteorológicos, tanto de la

meso-escala como de la micro-escala (tales como viento, temperatura y humedad relativa), y como éstos afectan el contenido de humedad del combustible.

La elevación, la exposición y la pendiente también afectan el régimen de humedad del sitio, y las especies que allí crecen, lo que resulta en diferentes tipos de combustible. Por lo tanto, aunque la topografía afecta indirectamente el comportamiento del fuego, el efecto de la pendiente es el único efecto primario sobre la velocidad de propagación del fuego.

En el sistema FBP, se utilizan vectores para determinar la velocidad y la dirección de propagación. Básicamente, las influencias del viento y de la pendiente sobre la velocidad de propagación se suman. Para agregar las influencias equitativamente, la pendiente se convierte en una "velocidad de viento equivalente".

El primer paso para calcular la velocidad de viento equivalente, es determinar el porcentaje de la pendiente del terreno:

$$\% \text{ pendiente del terreno} = \frac{\text{Aumento de Elevación}}{\text{Distancia horizontal del suelo}} \times 100$$

En el sistema FBP, se desarrollaron curvas de velocidad de viento equivalente para los diferentes tipos de combustible, en rangos de % de pendiente como se muestra en Figura 6.

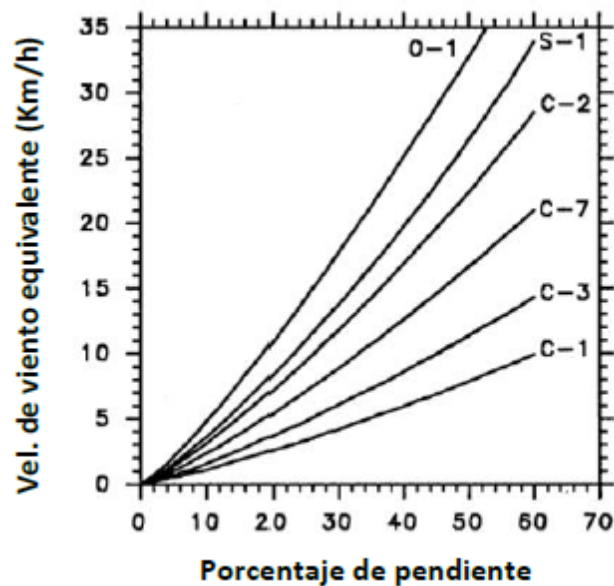


Figura 6. Velocidad del viento equivalente de la pendiente porcentual medida para varios tipos de combustible; FFMC se ha establecido en 89.

Una vez obtenida la velocidad del viento equivalente para el tipo de combustible seleccionado, se suma a la velocidad del viento "observada" en el terreno, usando el método de suma de vectores; de esta forma, se toman en cuenta las diferencias en las direcciones, el resultado obtenido es la velocidad y dirección del "viento efectivo neto" (Figura 7).

El viento efectivo neto se utiliza luego para todos los cálculos posteriores, incluido el cálculo del ISI y la relación de longitud de largo y ancho (L/B).

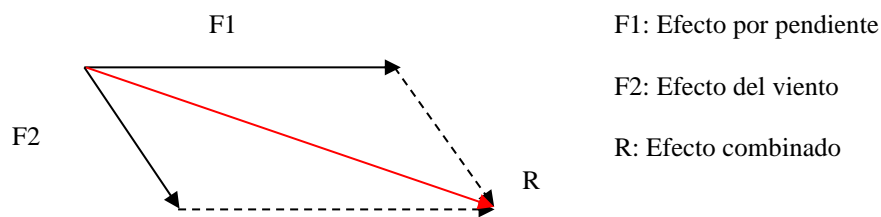


Figura 7. Suma de vectores

En cuanto a la exposición, las variaciones influyen en la disposición, en el contenido de humedad y en el tipo de combustible. Las exposiciones Norte y Oeste reciben mayor cantidad de radiación solar, por lo que hay mayor derretimiento de nieve, la temperatura es más elevada, la humedad relativa es más baja y los combustibles son más secos y se encuentran más espaciados.

Debido a estas diferencias, se debe realizar ajuste del FFMC por exposición para combustibles abiertos o de desechos, conociendo previamente la pendiente.

4.2.1.4 Contenido de Humedad Foliar

Para todos los tipos de combustible (excepto C-6), el efecto del CHF en la velocidad de propagación de incendios de copa, no se tiene en cuenta debido a la naturaleza estadística de los modelos. El inicio de la coronación y la velocidad de propagación del fuego de copa en plantaciones de coníferas, requieren una estimación del CHF. El muestreo repetido de CHF de árboles de coníferas en varios lugares en Canadá, ha revelado un patrón o ciclo común durante la temporada de incendios (Figura 8). Es decir, un período de valores relativamente bajos en primavera y principios del verano antes de la aparición de nuevas acículas (Van Wagner 1967, 1974, Linzon 1969, Little 1970, Fuglem y Murphy 1980, Springer y Van Wagner 1984, Chrosciewicz 1986). El CHF varía de un mínimo de 85% a un máximo de 120%, dependiendo de la temporada. Este fenómeno se conoce comúnmente como la "depresión de primavera" (Van

Wagner 1974, Archibald et al., 1994). Este descenso es principalmente fisiológico, como resultado de un aumento temporal en el peso seco, en lugar de una disminución real en el contenido de agua celular (Little 1970b, Gary 1971). A efectos prácticos, se considera que su fecha de ocurrencia es regionalmente constante de un año a otro y que no se ve afectada por las diferencias anuales en el clima.

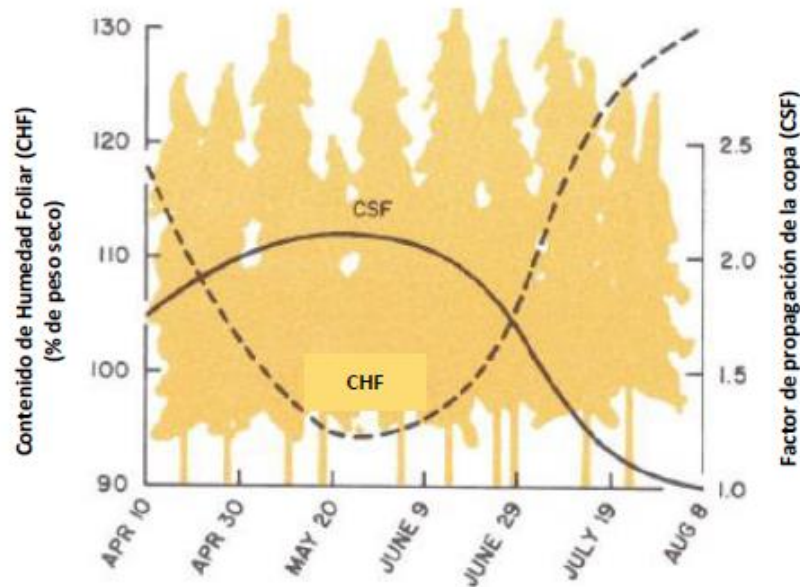


Figura 8. Tendencia estacional del Contenido de Humedad Foliar (CHF) y el Factor de Propagación de la Copa (CSF) resultante para la estación experimental Petawawa Forest, Ontario, Canadá, según lo obtenido por Van Wagner (1978).

Van Wagner (1989) ideó un método simple y empírico, para estimar el CHF para su uso dentro del sistema FBP, estrictamente aplicable solo a los bosques canadienses. Para regiones fuera de Canadá, donde comienza a implementarse el sistema FBP, es necesario una estimación del CHF (Tymstra et al. 2010), debido a que hay mucha incertidumbre sobre la dinámica estacional en coníferas con respecto a características geográficas, de sitio y climáticas. Mientras tanto, y a falta de una investigación definitiva que brinde resultados, se recomendó que los usuarios del Sistema FBP fuera de Canadá: (i) seleccionen un valor nominal de CHF para usar durante toda la temporada de incendios o (ii) adopten una tendencia estacional particular en CHF.

La primera opción mencionada anteriormente fue utilizada en la Guía de Campo del Sistema FBP (Taylor et al. 1997), definiendo un CHF del 97% para la construcción de tablas de: velocidad de propagación, de clase de intensidad de fuego y tipo de incendios. El CHF definido, representó el valor promedio asociado con las velocidades de propagación de fuego de copa, encontradas en la base de datos utilizada en el desarrollo del Sistema FBP (Forestry Canada Fire Danger Group 1992).

4.2.1.4 Tipo y Duración de la predicción

Los fuegos se originan básicamente de dos formas, de una base puntual o de una base lineal. Los fuegos que se originan de una fuente puntual, como un fosforo, un fogón, o un rayo; se aceleran con el transcurso del tiempo hasta alcanzar una velocidad de propagación de equilibrio. El tiempo necesario para alcanzar la velocidad de propagación de equilibrio, depende de una cantidad de factores del entorno del fuego, como por ejemplo la humedad del combustible, el terreno y la exposición al viento.

Los fuegos que se originan de fuentes lineales, como el caso de los flancos que se convierten en frentes debido a un cambio en la dirección del viento, alcanzan la velocidad de propagación de equilibrio casi inmediatamente. Por lo tanto, un fuego originado de una fuente lineal va a avanzar más que uno originado de una fuente puntual en el mismo lapso de tiempo, y bajo las mismas condiciones.

Con respecto a la duración de la proyección, hace referencia al lapso de tiempo para el cual se hace la proyección de crecimiento del fuego.

4.2.2 Salidas Primarias

4.2.2.1 Velocidad de propagación de la cabeza del incendio

La velocidad de propagación en la cabeza del incendio (ROS), se define como el movimiento hacia delante del frente de fuego por unidad de tiempo después de haber alcanzado el equilibrio. Se mide en m/min y se expresa como resultado de la acción combinada de los factores del comportamiento, siendo los más relevantes la dirección y velocidad del viento, la inclinación y orientación de la pendiente, la temperatura y la cantidad, continuidad, distribución y calidad de la vegetación (Hepp y Vial, 1979).

4.2.2.2 Consumo de Combustible

El consumo de combustible se divide en una componente de consumo de combustible de superficie y otra de copas. Si se determina que existe una participación del combustible de la copa, el combustible consumido en las copas de los árboles debe sumarse al consumo de combustible de la superficie, para obtener el consumo total. Sin embargo, si el fuego se clasifica como superficial, entonces el consumo de combustible en la superficie se convierte en el consumo de combustible total. Por lo tanto, el consumo total de combustible (TFC) es el peso previsto del combustible consumido por el fuego, tanto en superficie como en las copas de los árboles. Se mide en kilogramos por metro cuadrado de superficie del suelo y se basa en el contenido de

humedad foliar, el consumo de combustible en la superficie y la velocidad de propagación.

4.2.2.3 Intensidad lineal de la Cabeza

La intensidad de línea en la cabeza del incendio, es un indicador por el cual el personal operativo de lucha contra incendios, estima la dificultad de control y selecciona la acción de supresión más adecuada. Byram (1959) originalmente definió la intensidad del fuego relacionándola con el calor generado por el peso del combustible consumido, y la velocidad de propagación para proporcionar una medida de liberación de energía por unidad de tiempo, representándola como:

$$I = H * W * R$$

siendo **I** es la intensidad de línea del fuego (kW/m); **H** es el combustible de bajo calor de combustión (kJ/kg); **W** es el peso del combustible consumido por unidad de área en el frente de fuego activo (kg/m²); y **R** es la velocidad de propagación directa (m/s).

El sistema FBP para predecir la intensidad de línea en el incendio, transforma la ecuación original de Byram como:

$$FI = 300 * FC * ROS$$

siendo **FI** es la intensidad de línea de fuego pronosticada (kW/m); **FC** es el consumo de combustible previsto (superficie o total) (kg/m²); y **ROS** es la velocidad de propagación pronosticada del fuego (m/min). El factor 18 000 kJ/kg se ha dividido por 60 para cambiar el **ROS** predicho de metros por minuto a metros por segundo.

4.2.2.4 Descripción del tipo de Fuego

Inicialmente, en el sistema FBP, se clasificaban los tipos de fuego como de superficie o de copa; actualmente, se consideró que una predicción del grado de coronación es más realista que tratar de identificar cada fuego como simplemente de superficie o de copa. Por lo tanto, se describe el fuego, basándose en la fracción de la copa quemada (CFB), esta indica la proporción de copas arbóreas involucradas en el incendio. Los valores de la fracción de copa quemada van desde 0.0 (fuego de

superficie sin afectación de la copa) hasta 1.0 (implica 100% de la copa quemada). Este rango se puede dividir en categorías de descripción del fuego (Tabla 1).

Tabla 1: Descripción del tipo de fuego

Fracción de copa quemada	Tipo de fuego
< 0.1	fuego de superficie
0.1 - 0.89	fuego intermitente de copa
≥ 0.9	fuego continuo de copa

Los límites quemados por fracción de copa y las categorías de descripción de fuego, suponen que cuando menos del 10% de los árboles se incendian, el fuego puede considerarse fuego de superficie.

4.2.3 Salidas Secundarias

4.2.3.1 Velocidades de propagación de flanco y cola del incendio

La velocidad de propagación en la cola del incendio (BROS), se define como el movimiento hacia atrás de la cola de fuego por unidad de tiempo (m/min), después de haber alcanzado el equilibrio. Las velocidades pronosticadas de velocidad de propagación en la cola del incendio, son posibles por debajo de 0.025 m / min; sin embargo, es probable que el fuego de cola se autoextinga por debajo de estos valores.

La velocidad de propagación del fuego de flanco (en el punto más ancho de la elipse), se define como:

$$FRS = \frac{ROS + BROS}{LB \times 2}$$

siendo **FRS** es la velocidad de propagación del fuego de flanco (m / min); **ROS** es la velocidad de propagación en la cabeza del fuego (m / min); **BROS** es la velocidad de propagación de fuego en retroceso (m / min); y **LB** es la relación de longitud y ancho del fuego (Figura 10).

4.2.3.2 Distancia de propagación en la cabeza, cola y flancos

Para proyectar el avance de la cabeza del fuego, hay que calcular la distancia de propagación en la cabeza del incendio (**DH**), se calcula de la siguiente manera:

$$\mathbf{DH = ROS * ET}$$

siendo **ROS** es la velocidad de propagación de equilibrio (m/min), y **ET** es el tiempo transcurrido (min); mientras que, para proyectar el avance en la cola del incendio se calcula de la siguiente manera:

$$\mathbf{DB = BROS * ET}$$

siendo **DB** es igual a la distancia de propagación de la cola del incendio (m), **BROS** es la velocidad de propagación de fuego de retroceso (m/min), y **ET** es el tiempo transcurrido (min).

Para proyectar el avance en los flancos del fuego, y obtener la distancia de propagación de los flancos del fuego, se debe calcular de la siguiente manera:

$$\mathbf{DF = FRS * ET}$$

siendo **DF** es igual a la distancia de propagación de los flancos del incendio (m), **FRS** es la velocidad de propagación de los flancos del fuego (m/min), y **ET** es el tiempo transcurrido (min), Figura 10.

4.2.3.3 Intensidad de línea del fuego de flancos y de cola

Una vez que hayamos determinado las velocidades de propagación de incendios de flanco y cola, la intensidad del fuego de flancos (**FFI**) y la intensidad de línea del fuego de cola (**BFI**), se calcula de igual manera que la intensidad de línea en la cabeza del incendio. Se sustituye en la fórmula de Byram utilizada por el FBP, la velocidad de propagación en la cabeza del incendio por la velocidad de propagación de flanco o la velocidad de propagación de cola, como se explicó en 4.2.2.3, (Figura 10).

4.2.3.3 Área elíptica del fuego

El patrón de crecimiento o la forma general de un incendio forestal que se desarrolla a partir de una sola fuente de ignición, es en gran parte una función de la velocidad del viento en la superficie. Siempre que la dirección del viento permanezca relativamente constante, los incendios impulsados por el viento típicamente adoptan una forma aproximadamente elíptica u oval (Figura 9), aunque se han defendido otras formas similares (Anderson, 1983; Deacon, 1986). Para los propósitos del Sistema FBP, se ha

adoptado un modelo de crecimiento de fuego elíptico simple (Van Wagner, 1969), que permite estimar el tamaño del incendio (área y perímetro) sobre la base de la distancia de propagación del incendio y la velocidad del viento. Además de una dirección de viento constante, se supone que el fuego se propaga a través de un único tipo de combustible, a través de una pendiente uniforme, y que no se ve afectado por ninguna actividad de supresión.

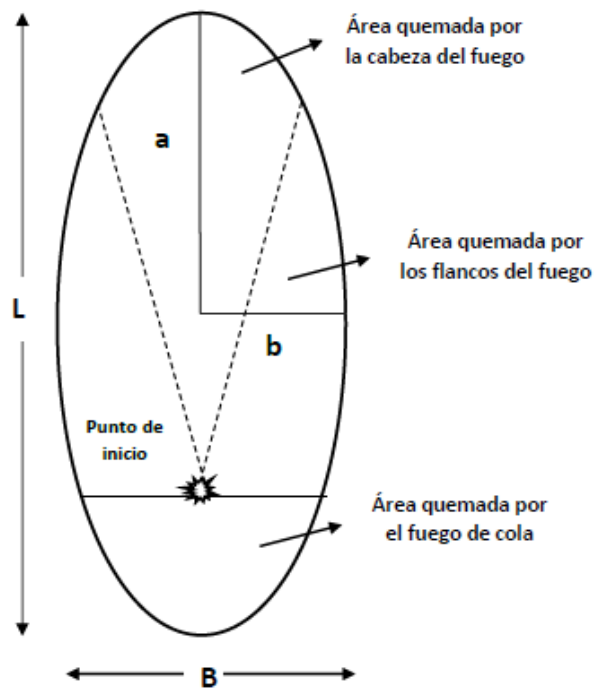


Figura 9. Modelo simple de crecimiento elíptico del fuego

Se puede hacer una estimación del área y el perímetro de un fuego con forma elíptica sobre la base de la relación L/B y las velocidades de propagación en la cabeza y cola del incendio. Siempre que los combustibles sean continuos y las actividades de supresión no hayan restringido de alguna manera el crecimiento del fuego, la velocidad del viento predominante a menudo se puede inferir a partir de la proporción de L/B observada (Cruz et al. 2015)

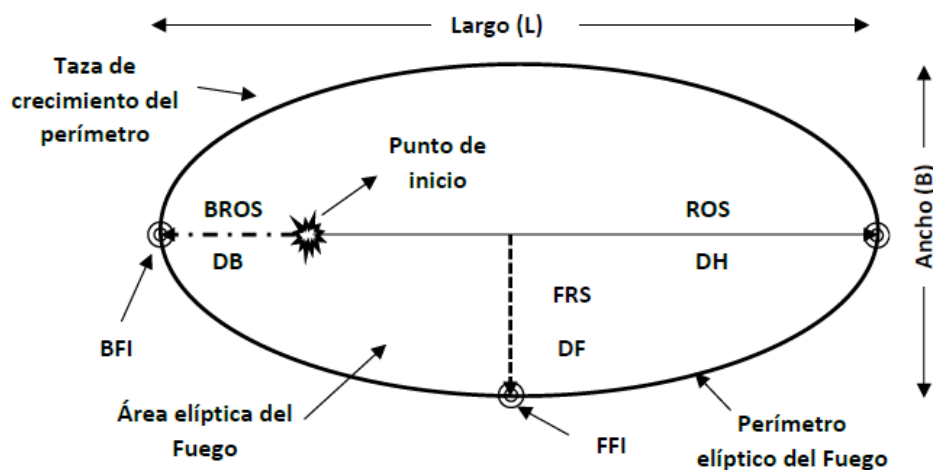
4.2.3.4 Tasa del crecimiento del perímetro

La tasa de crecimiento del perímetro (Merrill y Alexander, 1987) se mantiene constante con el tiempo siempre que la velocidad de propagación en la cabeza del incendio permanezca sin cambios (Van Wagner, 1965), en contraste con la tasa de crecimiento del área. Aunque el patrón general de un incendio de combustión libre

generalmente puede representarse mediante una elipse lisa, la longitud real del perímetro tiende a subestimarse, porque las irregularidades naturales en el borde del fuego no se consideran en el simple modelo de crecimiento de fuego elíptico (Figura 10).

4.2.3.5 Razón Largo/Ancho (L/B)

La propiedad más fundamental de un fuego de forma elíptica es su relación largo-ancho (L/B) (Alexander, 1985) que se obtiene simplemente dividiendo el largo total del fuego por su ancho máximo. Por ejemplo, el fuego de forma elíptica representado en la Figura b1, tiene una relación de largo a ancho de aproximadamente 2,0:1. En el sistema FBP, esta relación se dará como igual a 2.0. Esto significa que el fuego es el doble de largo que ancho. Una relación de largo a ancho igual a 1.0 representa un fuego circular.



- ROS: velocidad de propagación en la cabeza del fuego (m/min)
- BROS: velocidad de propagación en la cola del fuego (m/min)
- FRS: velocidad de propagación en los flancos del fuego (m/min)
- DH: distancia de propagación en la cabeza del fuego (m)
- DB: distancia de propagación en la cola del fuego (m)
- DF: distancia de propagación en los flancos del fuego (m)
- BFI: intensidad del fuego de cola (Kw/m)
- FFI: intensidad del fuego de flancos (Kw/m)

Figura 10. Modelo de crecimiento elíptico del fuego y los componentes secundarios del FBP.

5. Selección del incendio a estudiar

5.1 Características del área de estudio

La zona bajo estudio abarca en su gran mayoría hacia el Oeste la cordillera de los Andes, donde crece el denso bosque andino patagónico, mientras que, en menor medida hacia el Este, abarca un sector de la estepa patagónica, formándose entre ambas zonas un ecotono o zona de transición de características muy particulares.

Según la clasificación fitogeográfica de Cabrera (1971) (Figura 11), la zona bajo estudio, está representada por tres provincias fitogeográficas (Figura 12), de las cuales caractericé con más detalle las que consideré de mayor relevancia para este trabajo:

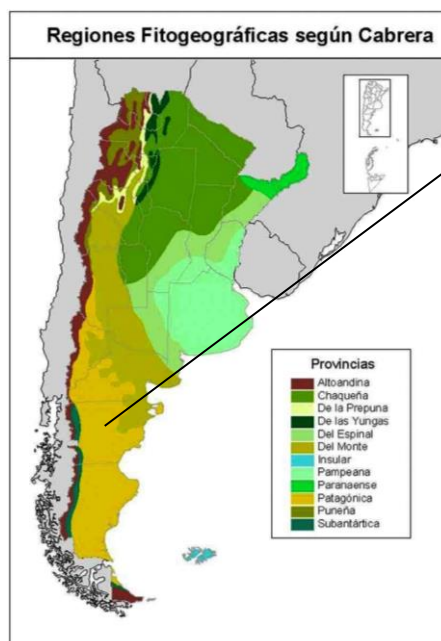


Figura 11. Provincias Fitogeográficas de la República Argentina



Figura 12. Provincias Fitogeográficas de la provincia de Chubut

Provincia Patagónica:

A lo largo de esta provincia se encuentran mesetas y montañas bajas con suelos arenosos-pedregosos, bajo un clima seco y frío con vientos intensos, fuertes nevadas durante el invierno y heladas casi todo el año. La temperatura media varía desde los 13, 4° C en el extremo Norte de la Provincia, hasta los 5° C en el extremo Sur. La precipitación oscila entre los 100 y 270 mm según sentido norte sur y llegando a 500 mm en el borde occidental. La vegetación dominante es la arbustiva, con hojas reducidas o espinosas. Entre los arbustos crecen gramíneas y dicotiledóneas herbáceas muy apetecidas por el ganado.

Provincia Subantártica.

El clima es templado y húmedo, con temperatura media entre 5, 4° C y 9, 5° C. La precipitación supera los 2000 mm anuales en el límite con Chile, disminuyendo rápidamente hacia el este, hasta unos 700 mm anuales. El tipo de vegetación predominante es el bosque caducifolio o perennifolio, existen también praderas y turberas. Dentro de Chubut se encuentran los Distritos del Bosque Caducifolio y Valdiviano.

- El Distrito de Bosque Caducifolio ocupa todo el borde oriental de la provincia Subantártica desde Neuquén hasta Tierra del Fuego, es la zona algo más seca que el resto de la región. Caracterizan a la región tres especies que pueden formar bosques mixtos: la lenga (*Nothofagus pumilio*) más tolerante al frío, adquiere a partir de los 1.400 metros de altitud forma achaparrada e incluso rastrera, el ñire (*Nothofagus antarctica*), que se encuentra con mayor frecuencia en lugares más bajos y húmedos y una conífera, el ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis*), que forma bosques sólo en la parte norte. Se encuentran además el radal (*Lomatia hirsuta*), el raulí (*Nothofagus alpina*) y el roble pellín (*Nothofagus obliqua*).

Estos tipos de bosque suelen tener un estrato arbustivo y hierbas. Además, hay matorrales de chacay (*Chacaya trinervis*) y maitén (*Maytenus boaria*) en las orillas de los ríos y juncales en las playas de los lagos.

- El Distrito de Bosque Valdiviano ocupa una estrecha y discontinua faja en las zonas más húmedas y occidentales inmediata al límite con Chile, en Neuquén, Río Negro y Chubut. La especie característica es el coihue (*Nothofagus dombeyi*), asociado al alerce (*Fitzroya cupressoides*), el avellano (*Gevuina avellana*), el ulmo (*Eucryphia cordifolia*), el ciprés de las guaytecas (*Pilgerodendrum uviferum*), mañiu macho (*Podocarpus nubigenus*) y mañiu hembra (*Saxegothaea conspicua*). En el sotobosque crecen arbustos, numerosos helechos y diversas enredaderas. También líquenes, musgos y hongos, en particular el llao-llao (*Cyttaria darwinii*) que produce tumores en los troncos y ramas del género *Nothofagus*.

Provincia Altoandina

Se extiende por las altas montañas del oeste del país, desde el límite con Bolivia hasta la Tierra del Fuego. En Neuquén y Río Negro, Distrito Austral, se halla aproximadamente por encima de los 1600 m de altura. Ocupa las laderas suaves o escarpadas de las montañas, las altas mesetas, etc. con suelos inmaduros, rocosos o arenosos, bajo un clima de alta montaña, frío y seco, con precipitaciones en forma de nieve o de granizo en cualquier época del año. La temperatura media es muy baja, inferior a 8 grados centígrados. La vegetación es muy pobre y está formada por estepas gramíneas o estepas de caméfitos en cojín, y las comunidades de este distrito son muy heterogéneas.

5.1.1 Asociaciones vegetales

En cada una de las situaciones donde están presentes los materiales forestales, el comportamiento de un posible fuego variará según la asociación vegetal involucrada. Cada una de dichas asociaciones mostrará una reacción específica en lo que respecta al comportamiento del fuego, o al conjunto de fenómenos físicos, mecánicos y químicos que se observan en el ambiente donde se desarrolla un incendio forestal (Burgan, 1987).

En la zona bajo estudio se identificaron las asociaciones de vegetación de mayor importancia, que se caracterizan por modificar su contenido de humedad de diferente manera ante variaciones meteorológicas y, por presentar diferencias en el comportamiento del fuego en cada una de ellas ante iguales condiciones climáticas y/o topográficas. Se clasificaron como Pastizal, Arbustal/Matorral, Bosque A (cerrado), Bosque B (abierto) y Plantaciones. Se destaca que estas grandes asociaciones “no” constituyen “modelos de combustibles”, sino que son grupos más amplios, clasificados para proveer una base inicial con la cual diseñar y calibrar el Sistema de Evaluación de Peligro de Incendios para hacer frente a los problemas de fuego en campos y bosques. Con el tiempo se desea lograr identificaciones más específicas de los tipos de combustibles y, a través del uso de quemas, analizar cómo se correlacionan los componentes del FWI con las variables del comportamiento del fuego.

Teniendo diferenciados estos cinco grandes grupos de combustible, se pueden relacionar los códigos e índices que comprenden el Subsistema FWI de diferente manera para cada uno de ellos.

Pastizal: El tipo de combustible tipo pastizal comprende aquella vegetación con combustibles herbáceos muy finos. Este tipo de combustible seca rápidamente y pueden tornarse altamente inflamable, haciendo suponer la ocurrencia de fuegos de rápida propagación con la existencia de vientos moderados. Esto resulta en fuegos de alta intensidad que son de difícil control (Cheney y Sullivan, 1997).

Se considera que gran parte de los incendios se inician en este tipo de combustibles.

Arbustal/Matorral: Este tipo de combustible presenta alta inflamabilidad, debido a la altura, cantidad de material fino y muerto en pie, y a la gran exposición al viento, una vez iniciado el fuego, resulta de gran intensidad y difícil control. En el sistema FBP, no describe modelos de predicción de comportamiento para este tipo de combustible, debido a que no presenta superficies significativas en Canadá.

En las provincias de Río Negro, Chubut y Santa Cruz, se efectuaron investigaciones a través del proyecto PICTO 2006 FORESTAL, “Elaboración de modelos de combustible para arbustales de la Región Andina de las Provincias de Río Negro, Chubut y Santa Cruz” (Dentoni, 2011), donde se caracterizaron como modelos de combustible a asociaciones arbustivas de las Provincias involucradas, en las que el fuego presentaría comportamiento similar ante iguales condiciones meteorológicas y topográficas.

Estas asociaciones pueden estar conformadas por arbustales con alturas promedio de entre 4,5-5 m y una alta densidad de copas, hasta estratos subarbustivos o leñosas bajas de altura promedio de 0,5 m y escasa cobertura, describiéndose un total de 6 asociaciones.

Bosque A (cerrado): Se dio la denominación de bosque Tipo A, a un bosque húmedo, cerrado, con poca influencia del viento en su interior, con presencia de capa orgánica profunda y gran cantidad de combustible medio y pesado en superficie. La caída de hojas incrementa la acumulación de material combustible fino en la superficie, creando condiciones de mayor inflamabilidad. Debido a la lenta propagación que presentan los fuegos que ocurren en este tipo de áreas, las tareas de control suelen ser más efectivas. Sin embargo, estos bosques raramente se queman; cuando ocurre, el impacto ecológico y económico puede ser severo aún con condiciones de intensidad baja, ya que las especies que se encuentran no toleran el

fuego y mueren fácilmente provocando pérdida de biodiversidad. El bosque representativo de esta clase es, en la región andina de Chubut, el bosque de lenga.

Bosque B (abierto): Este tipo de combustible corresponde a un bosque con un dosel abierto, típico del bosque de Ciprés en la región cordillerana de Chubut. La apertura del dosel es una característica importante en términos de comportamiento del fuego ya que la radiación solar que llega al suelo del bosque y el efecto del viento tienen gran influencia sobre la tasa de secado y la inflamabilidad del sotobosque. La capa orgánica es escasa y poco profunda o ausente; y hay abundante combustible muerto mediano y pesado en superficie. La apertura del dosel puede variar dependiendo del estado sanitario y madurez, generándose claros en el bosque que permiten el desarrollo de estratos arbustivos.

Plantaciones: Este tipo de combustible corresponde a plantaciones maduras de pino, pudiendo ser puras o mixtas, con copas cerradas y escaso sotobosque. El suelo está cubierto por una capa de hojarasca de poca profundidad y descomposición poco avanzada. Por lo general poseen podas de alrededor de 2 m de altura, aunque pueden existir rodales con podas más altas o en algunos casos sin poda.

Del mismo modo puede diferenciarse rodales de distinta edad, donde el comportamiento del fuego también será diferente.

Para el caso de rodales jóvenes o maduros raleados, donde las copas se mantienen abiertas y existe un estrato arbustivo podría utilizarse el modelo de bosque abierto o inclusive el de matorral.

5.1.2 Clima de Fuego y ocurrencia de incendios

El régimen de fuego propio de cada ecosistema, está estrechamente asociado con el clima. La frecuencia de ocurrencia de focos naturales, los tipos de fuegos y su intensidad, se relacionan con ciertas características climáticas propias de cada ambiente, que afectan a los fuegos en forma indirecta a través de su influencia en la vegetación y en forma directa al actuar sobre las variables del comportamiento del fuego (Dentoni, inédito)

El FWI y sus componentes, integran los efectos de las distintas variables meteorológicas, sobre el contenido de humedad de los combustibles muertos y sobre el comportamiento del fuego. La evolución promedio de estos indicadores, durante la

época de incendios y los extremos que alcanzan, son una herramienta muy útil para interpretar los efectos del clima sobre los regímenes del fuego.

Por otra parte, el estudio de los patrones meteorológicos asociado a grandes incendios, permite identificar las situaciones más críticas para el fuego.

El clima de fuego del oeste de Chubut, y la Patagonia en general, se caracteriza por concentrar la mayor peligrosidad de incendios entre los meses de diciembre a marzo. Las condiciones de peligro de cada temporada, están altamente influenciadas por las condiciones meteorológicas durante su transcurso, siendo la condición general: Alto peligro por vientos intensos, por gran disponibilidad del combustible o ambas situaciones en forma simultánea.

Para analizar la evolución anual media del FWI y BUI, usé como referencia la estación Esquel Aero, ya que cuenta con mayor cantidad de datos meteorológicos (Figura 13). Se observa que, para el caso del primer indicador, durante los meses de diciembre y enero toma los valores promedios más altos. Esto es consecuencia de una alta disponibilidad del combustible y presencia casi constante de viento intenso. En tanto que, para el caso de BUI, este indicador alcanza los valores máximos en los meses de febrero y marzo, periodo en el cual la sequía del combustible es la más elevada.

Al hablar de clima de fuego, existe otro fenómeno climático que debe mencionarse y que merece especial atención, ya que no se ve reflejado en las curvas mencionadas anteriormente, como lo son los Sistemas Frontales. Al evaluar el peligro con datos de la hora 12, el sistema FWI estima el posible comportamiento que puede desarrollar un incendio, a la hora más crítica de la tarde de un día típico de verano. Sin embargo, el ingreso de un frente posterior a la hora de evaluación del peligro, puede cambiar drásticamente los patrones normales de variación diaria de la temperatura, humedad relativa y modificar las condiciones de peligro por aumento del viento o precipitación (Dentoni *et al.* 2015).

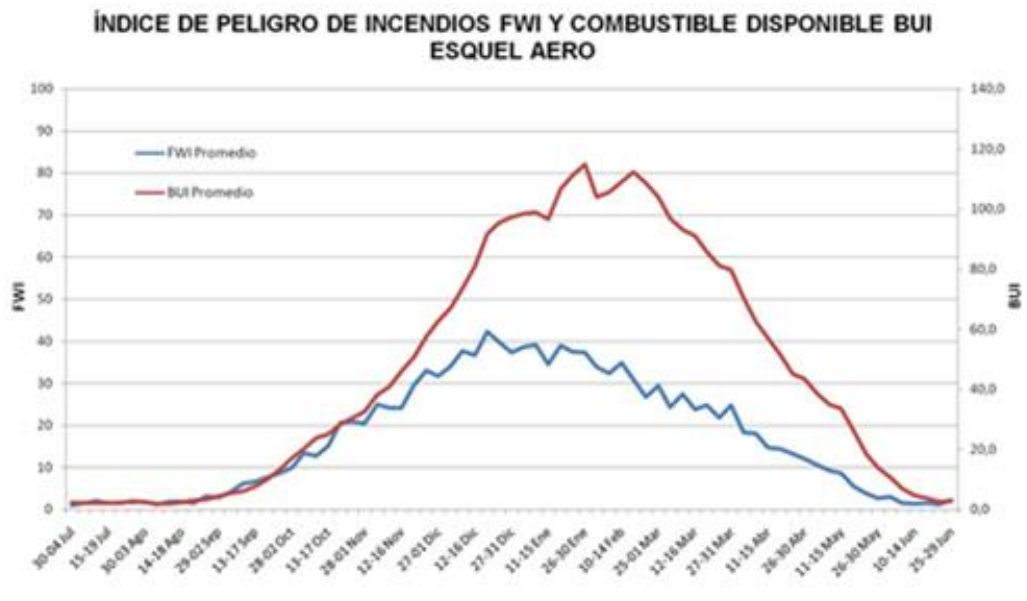


Figura 13. Fluctuación anual media, de los valores de FWI y BUI para la estación Esquel Aero. Tomado de Casas, 2017.

5.1.3 Descripción de la topografía

Topográficamente la región está marcada por la presencia de los Andes. En la cordillera predominan elevados cordones montañosos con orientación Norte-Sur, separados por valles paralelos y transversales. Los puntos más altos de la provincia están ubicados en el noroeste. Al oeste del lago Cholila, se ubican los cerros Dos Picos (2515 msnm), Anexo (2498 msnm) y Tres Picos (2492 msnm) también se destaca el cerro Situación (2307 msnm), en el Parque Nacional Los Alerces.

5.2 Incendio seleccionado

Del resultado de la revisión de la base de datos de ocurrencia con la que contaba, utilicé para la proyección de comportamiento el incendio “La Zeta”, ocurrido el 04 de marzo de 2007 en cercanías de la ciudad de Esquel (Figura 14). Lo seleccioné debido a que contaba con registros de datos meteorológicos previos y durante el incendio, además, contaba con datos de combustible afectado y con información de comportamiento del fuego detallados en Estudio de caso n°1 Incendio La Zeta, Bianchi y Withington, inédito.

patagonicus), Espino Negro (*Colletia hystrix*), Chacay (*Discaria sp.*), Palo piche (*Fabiana imbricata*) y Calafate (*Berberis buxifolia*). También subarbustos y herbáceas como Neneo (*Mulinum spinosum*), Pimpinela (*Acaena pinnatifida*) y varias especies de coirones (*Stipa sp.* y *Poa sp.*) entre otras.

Si bien existen variaciones en la distribución de las diferentes especies, la conformación general de la vegetación se observa en forma de parches de plantaciones forestales, unidos por “entreparches” de pastizales y arbustales que corresponde a áreas de cortafuegos sin mantenimiento (Figura 15).



Figura 15. Tipos de combustible

5.2.3 Condiciones meteorológicas

En la Tabla 2, se muestran los datos meteorológicos de las 12:00 HOA (Hora Local Argentina) proporcionados por la estación meteorológica Esquel Aero y, los códigos e índices correspondientes al día previo al incendio.

Tabla 2. Datos meteorológicos 03/04/2007

Fecha	Hora	Temp. (°C)	HR (%)	Vel. Viento (km/h)	Pp. (mm)	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI
3/3/07	12hs	15	41	0	0	88	145	564	3	182	17

En la Tabla 3, se muestran los datos meteorológicos horarios a partir de las 06:00 HOA del día 04/03/2007, correspondiente a la estación Esquel Aero.

Tabla 3. Datos meteorológicos horarios 04/04/2007

Hora	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Velocidad del viento (km/h)	Dirección del Viento
6	14	8	22	Oeste
7	14	7	19	OSO
8	13.4	9	13	OSO
9	13.3	11	15	SO
10	13.5	10	15	SO
11	13.6	15	7	SO
12	15	14	18	OSO
13	15.7	14	20	Oeste
14	17.2	25	28	OSO
15	17.3	31	35	Oeste
16	17.3	35	33	Oeste
17	17.1	34	36	ONO
18	15.2	33	36	Oeste

Estos registros tienen la particularidad de no seguir las variaciones de temperatura y humedad relativa de un día típico, donde la temperatura tiene un mínimo en las primeras horas de la mañana y aumenta hasta las 16:00 h aproximadamente y, la humedad relativa tiene su máximo a primeras horas de la mañana y luego disminuye acompañando el aumento de temperatura. Los valores de baja humedad tienen relación con una “cuña” de alta presión, observada en el gráfico de nefoanálisis (Imagen 16), ubicada sobre la zona del incendio, sumado a la entrada de un frente frío, que generalmente en las horas previas a su ingreso produce un descenso de la humedad relativa y aumento de la intensidad del viento.

Las velocidades del viento registradas en la estación meteorológica Esquel Aero, son menores y de direcciones diferentes que las estimadas por testigos en el lugar del incendio; en particular, en horas de la mañana hasta el mediodía.

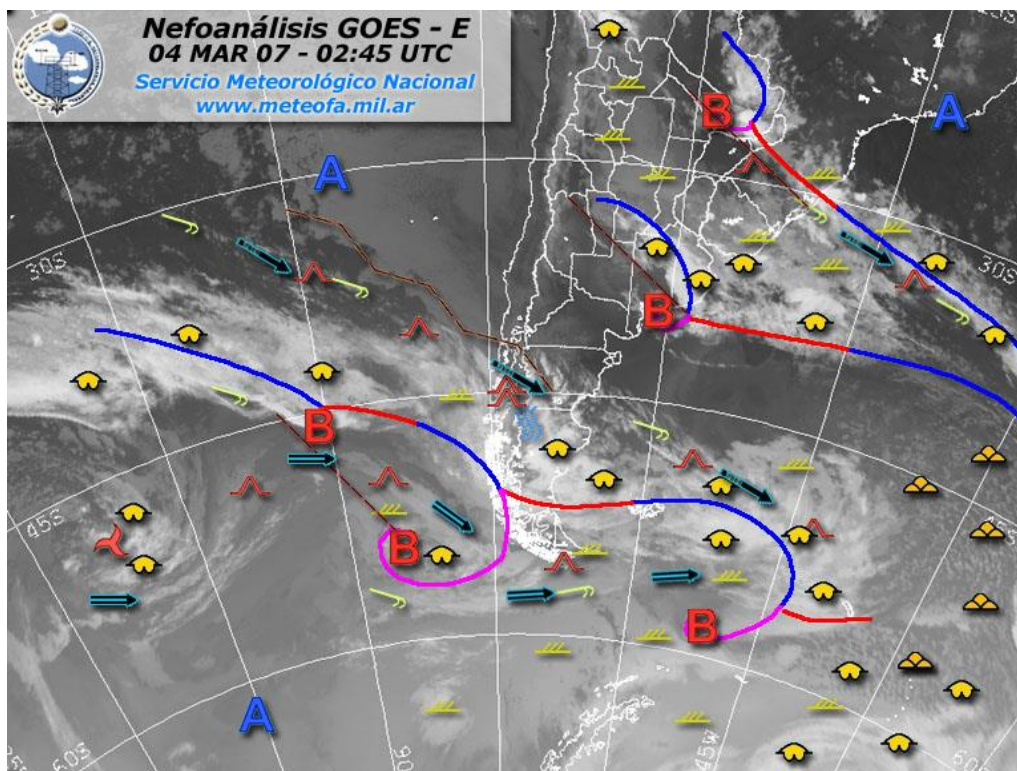


Figura 16. Nefoanálisis. La cuña se indica con una línea zigzagante.

El incendio contó con informes de pronósticos meteorológicos especiales para incendios, el primero fue emitido el mismo día de inicio a las 11:30 h de la mañana. Los pronósticos meteorológicos a los que se hace referencia, fueron provistos por el SMN y el entonces PNMF, a través del Programa de Apoyo Meteorológico al Manejo del Fuego que ambos organismos llevan a cabo en forma conjunta. No los utilicé en este trabajo, debido a que el primer pronóstico estaba disponible a las 11:30 h, momento en el cual la mayor actividad del fuego ya había comenzado.

5.2.4 Códigos e índices

En la Tabla 4 se detallan los datos del índice meteorológico de peligro de incendios forestales (FWI), calculados ajustando el FFMC de manera horaria y con datos de viento correspondientes a cada hora.

Tabla 4. Datos meteorológicos y ajuste horario del FWI correspondientes al día 04/03/2007. * Corrección del cálculo con el viento a esa hora.

Hora	T (°C)	HR (%)	Viento (Km/h)	FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI
6	14	8	22	76	145	564	2.5	182	15
7	14	7	19	78	145	564	2,5	182	15
8	13.4	9	13	80	145	564	2	182	12
9	13.3	11	15	83	145	564	3	182	17
10	13.5	10	15	86	145	564	5	182	24

11	13.6	15	7	90	145	564	6	182	28
12	15	14	18	90	148	568	11	182	41
13	15.7	14	20	90	148	568	12	182	44
14	17.2	25	28	91	148	568	20	182	59
15	17.3	31	35	92	148	568	33	182	82
16*	17.3	35	33	92	148	568	30	182	78
17	17.1	34	36	92	148	568	35	182	82

FFMC: los valores altos para las primeras horas de la mañana, permiten pensar que la ignición y la propagación son posibles. Para las horas del mediodía el valor ya supera los 90 lo cual indica fácil propagación e ignición y también la posibilidad de ocurrencia de focos secundarios. Sin embargo, los valores de FFMC no representan la baja humedad relativa registrada a las 6:00hs, 7:00hs y 8:00hs, debido a que las tablas de ajuste horario para las primeras horas de la mañana, utiliza amplios rangos de humedad relativa y no se ven reflejados valores tan bajos como los registrados en dichas horas. Por otro lado, y como se menciona en el punto 5.2.3 de *Condiciones Meteorológicas*, los valores de viento registrados por la estación del aeropuerto no son coincidentes con las observadas por el personal en el incendio.

DMC: este código indica que los combustibles medios, están próximos a los valores de contenido mínimo de humedad (150).

DC: este código demuestra que estos combustibles se encuentran con poca humedad, manteniendo su combustión y por consiguiente complicando las tareas de liquidación.

ISI: los valores de este índice no son significativamente elevados hasta el registro de las 12:00 h. Los valores bajos registrados por la mañana no concuerdan con lo observado en el lugar; ya que en ese rango horario se observó una rápida propagación. A partir del mediodía, el ISI alcanza un valor en que la propagación es rápida.

BUI: el valor alcanzado por este índice en los días previos al incendio, indicaban que la carga disponible de combustibles iba a influir significativamente en el desarrollo del incendio. Se podría esperar en este estado condiciones para el comportamiento extremo y conflagraciones.

FWI: se puede observar que a las 10 h el valor alcanzado es 24, lo cual indica que habrá dificultad para el control en la cabeza del incendio. Para las 12 h el valor supera el valor 34, lo cual indica una alta probabilidad de comportamiento extremo. Cabe aclarar que de todas formas los valores alcanzados antes de las 10 horas ya eran altos.

5.2.5 Comportamiento del fuego

El incendio se detectó a las 07:45 h, en cercanías a la Laguna La Zeta, llegando al lugar del incendio la primera cuadrilla de personal de la brigada Esquel aproximadamente a las 08:30 h. Según personal del SPMF, a las 08:30 h, la dirección del viento en el lugar, era OSO y la velocidad de aproximadamente 20 km/h. Se observaban variaciones en esta dirección del viento, en intervalos aproximados de 20 minutos, rotando hacia el ONO. Además, dicha velocidad del viento fue aumentando gradualmente alcanzando valores superiores a los 30 km/h a las 13:00 h.

Exceptuando la pendiente inicial del incendio y parte del flanco izquierdo (subiendo al Cerro El Tero, ver Figura 14), el fuego avanzó sobre una inclinación leve. Sobre las bardas, avanzó por una pendiente negativa, es decir descendiendo por ellas, lo cual desfavorece la propagación del fuego (ver Figura 14). Es importante resaltar que la primera hora del incendio la dirección del viento coincidía con la dirección de pendiente.

El incendio se logra controlar a las 17:00 h, presentando su mayor actividad entre las 11:30 y 13:00 h. A partir de las 16:00 h solo quedaban algunos puntos calientes con poca actividad dentro del perímetro.

6. Aplicación del Subsistema de Predicción de Comportamiento del Fuego en el/los incendios seleccionados.

Habiendo detallado la estructura del sistema FBP y seleccionado el incendio y la estación meteorológica a la cual referenciarlo, continué con la obtención de las variables de entrada para la aplicación de la proyección. Con respecto al tipo de combustible, seleccioné el tipo C6 descrito en el Sistema FBP, con la base de la copa a 2 m del suelo, debido a que es el tipo de combustible que más se asemeja al afectado por el incendio y que se presentaba en mayor proporción. Asimismo, como se menciona anteriormente, las plantaciones presentaban espacios abiertos ocupados por pastizal de la zona, por esta razón, como se aclaró en el punto 5.1.1 de Asociaciones Vegetales, en Plantaciones, para el caso de rodales jóvenes o maduros raleados, donde

las copas se mantienen abiertas y existe un estrato arbustivo, podría utilizarse también el modelo de bosque abierto. Este tipo de combustible se corresponde al clasificado en el sistema FBP como C4. Por esto, decidí hacer dos proyecciones utilizando los dos modelos de combustible descritos en el sistema FBP que, a mi parecer, son los que más se ajustan al combustible afectado.

Para realizar la proyección, supuse que solo contaba con el dato del punto de inicio, tal como sucedería en un caso real. Teniendo en cuenta la topografía del lugar y las direcciones generales de viento en la zona, tracé una posible trayectoria del fuego, para analizar los cambios de pendiente. El resultado fue una transecta desde el punto de inicio del fuego, hasta la parte más alta del Cerro El Tero, con tres diferencias importantes de pendiente. Por esto, dividí la proyección en tres tramos, tomando como punto final el sitio donde el combustible cambiaba de plantaciones a pastizal ralo. Los tres tramos sumaron una distancia total de 2060 m (Figura 17). Para cada tramo, realicé proyecciones horarias hasta que la distancia recorrida por el fuego proyectado, coincidiera con la distancia de cada uno de ellos.

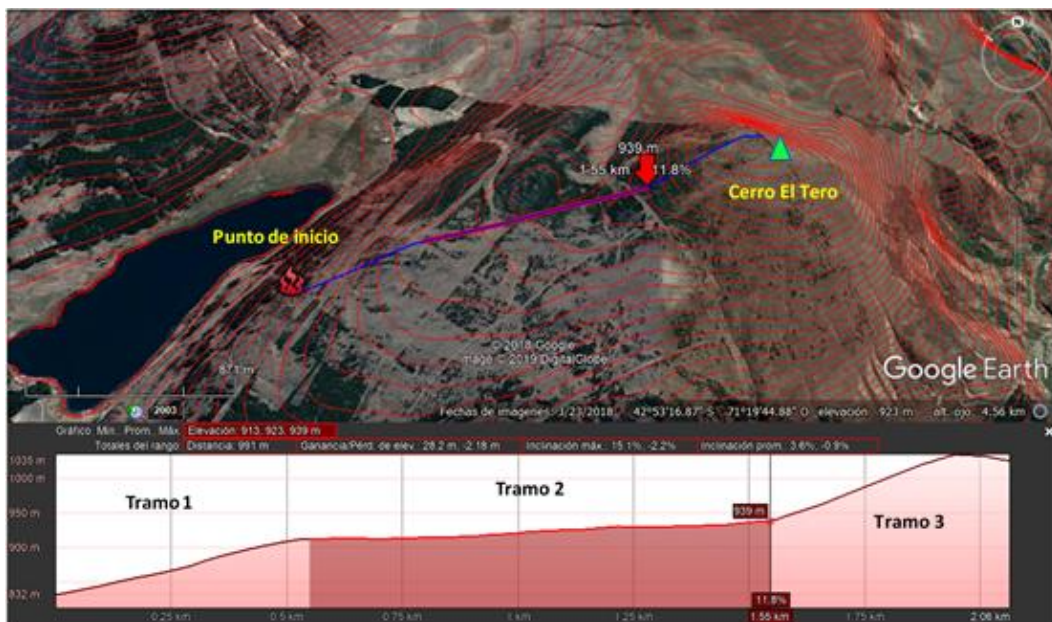


FIGURA 17. Tramos de las proyecciones asociados al perfil altitudinal.

Para obtener las pendientes y las exposiciones de cada tramo de proyección, utilicé la imagen de exposición de la zona y las curvas de nivel, como se muestra en las Figuras 18 y 19 respectivamente.

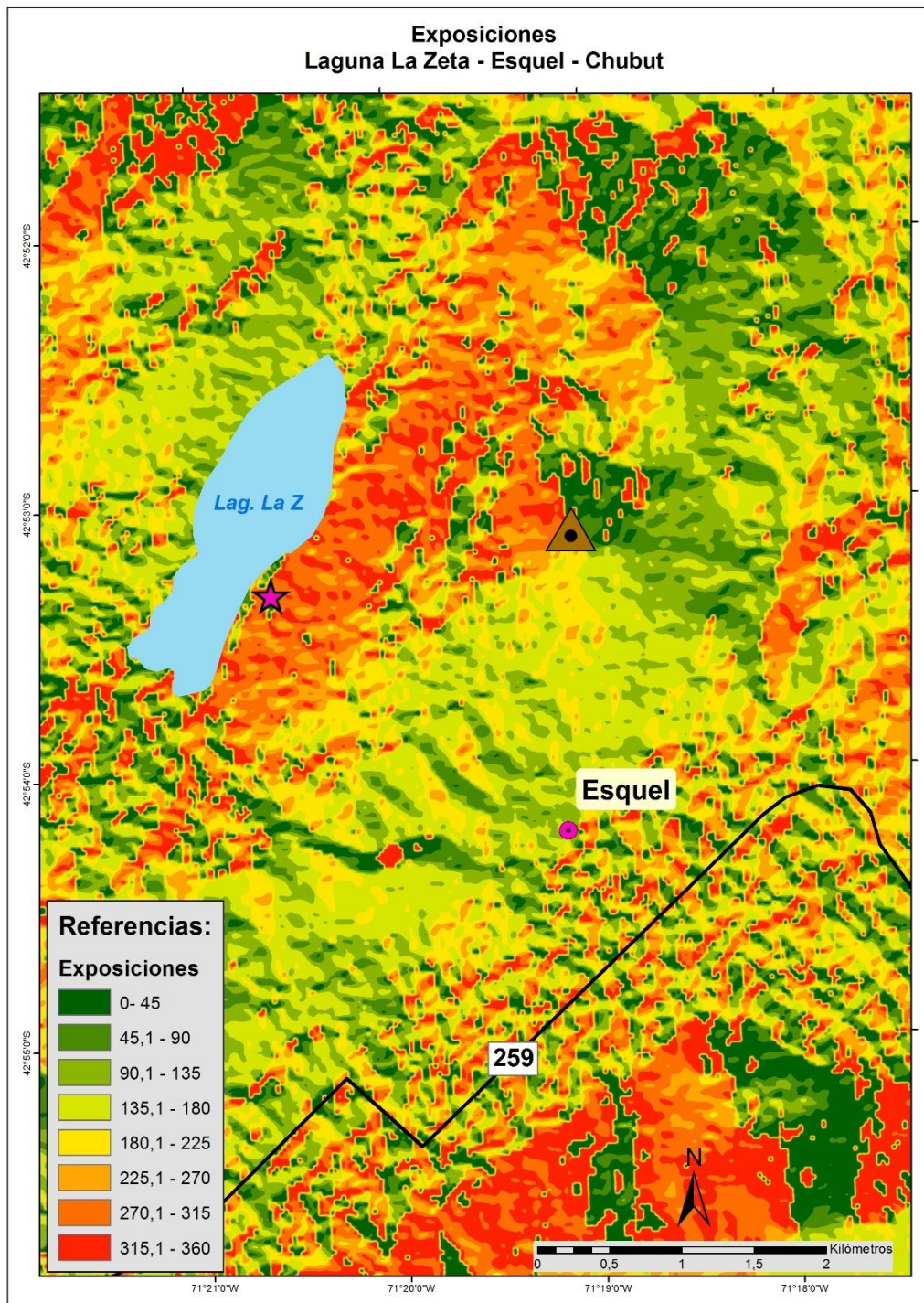


Figura 18. Exposiciones, zona Laguna La Zeta



Figura 19. Curvas de nivel, zona Laguna La Zeta, Esquel, Chubut

Luego, teniendo en cuenta los supuestos del FBP y habiendo obtenido los datos de entrada para comenzar la proyección, seguí los pasos de la guía “Field Guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System”.

6.1. Descripción de los resultados de proyección con el tipo de combustible C6

En el tramo 1, comencé la proyección a las 8:00 horas y tuvo una duración de 3 horas con 40 min, hasta completar los 550 m que es la distancia del tramo. La pendiente calculada es aproximadamente del 15 % y la exposición es ONO. Realicé una proyección para cada cambio de hora, para tener en cuenta las variaciones en la intensidad del viento y dirección, y ajustar por lo tanto el FFMC y el ISI. El BUI utilizado es el correspondiente al día anterior.

Para las primeras horas de proyección la velocidad de propagación fue muy baja, las distancias de avance cortas y el tipo de fuego fue de superficie hasta media mañana con intensidades bajas (clase 2). Hacia el final del tramo, hay un aumento importante en los valores de velocidad de propagación, distancia de avance, clase de intensidad (5), y el tipo de fuego cambia de “superficial” a “superficial con coronamientos intermitentes, y con una fracción de copa quemada mayor al 50%”. En cuanto a la proyección de superficie, perímetro y relación L/B, los calculé para todo el tramo, promediando los valores de las velocidades efectivas, teniendo en cuenta la dirección dominante del viento y la distancia de avance total del tramo.

En la primera hora de proyección, la velocidad de propagación en la cola del incendio “BROS” fue de 0, por lo tanto, la distancia de propagación del fuego de cola “DB” es de 0 m. Solo calculé el BROS para la primera hora de proyección, debido a que, para las horas siguientes considero que no debió haber quemado en retroceso porque la superficie ya está quemada.

En el tramo 2, la proyección inició a las 11:40 h hasta las 12:38 h completando los 960 m en aproximadamente 1 hora. La pendiente con exposición OSO, es muy leve en este sector, la cual consideré como terreno plano para la aplicación de este modelo de predicción, siendo el viento efectivo, el viento real medido en la estación Esquel Aero. El valor de BUI actualizado con el dato de las 12 h, se mantuvo igual al día anterior.

En este tramo, la velocidad de propagación de equilibrio fue alta, la distancia de avance fue mucho mayor que en el tramo anterior, la clase de intensidad de línea fue la más alta de la tabla (6: >10000 KW/m) y el tipo de fuego es “superficial con coronamientos intermitentes, y con un porcentaje de copa quemada mayor al 50 %”. La distancia total de avance proyectado es de 1005 m, si bien la distancia del tramo es de 960 m, es el valor más próximo al que pude ajustar la proyección. El viento efectivo promedio para todo el tramo, disminuyó con respecto al anterior. Teniendo en cuenta que este tramo es el más largo de los tres, hubo un notable incremento, tanto en el área como en el perímetro. En cuanto a la relación L/B, fue menor que en el tramo anterior, es decir, fue menos elíptico.

En el tramo 3 la distancia proyectada es de 560 m y duró menos de 30 min, según lo proyectado, antes de las 13 h ya había llegado el fuego al límite de las plantaciones con el otro tipo de combustible. La pendiente calculada fue de aproximadamente 20%, y la exposición OSO.

La dirección dominante del viento efectivo fue del sector OSO, la velocidad de propagación fue la más elevada de los tres tramos como así también, la distancia de avance que fue mayor en menor tiempo. La intensidad de línea continuó siendo alta y el tipo de fuego superficial con coronamiento intermitente con más del 50% de copa quemada.

Según el viento efectivo y la distancia de avance, la relación L/B fue de 2.9, más elíptico que los tramos anteriores y direccionado por el viento.

La velocidad de propagación de los flancos “FRS” solo la mencioné para este tramo, debido a que fue el que presentó mayor valor, dando como resultado un FRS de 4.5 m/min y un DF de 99 m.

Finalmente, luego de analizar los tres tramos, obtuve el área, el perímetro y la relación L/A total, resultado de haber promediado el viento efectivo de cada hora de proyección y de la distancia total de avance, dando como resultado **159/4857/2.0**. Las proyecciones de los tramos en el terreno se muestran en la Figura 19 y la proyección total en la Figura 20. Los resultados de la proyección se observan en el ANEXO 1.

6.2 Descripción de los resultados de proyección con el tipo de combustible C4

Para esta proyección, realicé el mismo procedimiento que en la proyección anterior, cambiando únicamente el tipo de combustible. El tramo 1 tuvo una duración de 2 h con 15 min, hasta completar la distancia total del tramo.

En el tramo 1, la velocidad de propagación se fue incrementando con el aumento horario del FPMC, al igual que la distancia de avance y las intensidades, que al comienzo fueron altas (clase 4) cambiando a muy altas (clase 5) al final del tramo. El tipo de fuego en la primera hora de proyección fue “superficial con coronamientos intermitentes”, cambiando hacia final del tramo a “superficial con coronamientos intermitentes, y con una fracción de copa quemada mayor al 50%”.

La proyección de superficie, perímetro y relación L/B, los calculé igual que en la proyección C6, teniendo en cuenta la dirección dominante del viento y la distancia de avance total del tramo.

El BROS para este tramo, fue de 0,6 m/min y la DB fue de 36 m.

La proyección del segundo tramo de 960 m, se completó en 2 h. La intensidad de línea y la velocidad de propagación se incrementaron hacia finales del tramo. Las características del tipo de fuego, cambió de “superficial con coronamientos intermitentes, y con fracción de la copa quemada mayor al 50%” a “fuego continuo de copa”.

En cuanto al resultado de superficie y perímetro hubo un incremento importante respecto al tramo anterior; y en relación al L/B fue más elíptico debido al aumento del viento efectivo.

En el tramo 3, la distancia proyectada por el fuego fue de 560 m en 20 min. Se registró la mayor velocidad de propagación con respecto a los tramos anteriores, la

intensidad se mantuvo en valores altos y el tipo de fuego continuó siendo “fuego de copa continuo”.

Con respecto a la FRS para este tramo fue de 3,94 m/min y la DF de 90,6 m. Al igual que en la proyección con C6, solo calculé estas variables para el caso en donde el ROS fue el mayor de toda la proyección con C4.

Finalmente obtuve el área, el perímetro y la relación L/A total, del mismo modo que en la proyección con C6, dando como resultado **152/4800/2.1**. Las proyecciones en el terreno de los tramos se observan en la Figura 21 y de la proyección total en la Figura 22. Los resultados de la proyección se observan en el ANEXO 2.

6.3 Análisis de las proyecciones

Analizando primeramente entre proyecciones, observé un mejor ajuste con el combustible más cerrado (C6), ya que registró mayor intensidad entre las 11 y 13 h, confirmando las observaciones del personal de combate de fuego en el incendio. Ellos observaron que la mayor intensidad ocurrió entre las 11:30 y las 13 h. Esto no se ve reflejado en la proyección con el modelo C4, ya que la mayor actividad del fuego se dio a partir de las 10 de mañana y se mantuvo hasta acabar la proyección a las 12:40 h.

Las diferencias más marcadas entre las dos proyecciones se presentaron en el tipo de fuego; C4 presentó en los últimos 900 m aproximadamente “fuego de copa continuo”, información que no pudo ser corroborada por los testigos en el incendio, mientras que con C6 no superó el “fuego superficial con coronamientos intermitentes, y con más del 50% de la copa quemada”. También las proyecciones se diferenciaron en las clases de intensidades en la cabeza del incendio, siendo más altas con C4 y con mayor velocidad de avance con respecto a C6 en las primeras horas de proyección. Además, la proyección de 2060 m con C4 culminó 20 min antes que la misma proyección con C6.

Otra diferencia importante fue la que tuvieron ambas proyecciones con respecto a BROS, siendo nula con el modelo C6 y de 0,6 m/min con el modelo C4. Con respecto a FRS no hubo diferencias significativas.

Comparando las superficies afectadas resultantes de ambas proyecciones, no presentaron cambios importantes, C4 fue levemente menor que C6; asimismo, al comparar la dirección de avance entre el fuego proyectado con los dos modelos y el

fuego real, obtuve diferencias significativas. Pude inferir que la dirección general de avance Oeste-Este que tuvo el incendio, como se observa en la imagen (Figura 19), responde a la interacción entre el viento equivalente por pendiente de dirección dominante del OSO y al viento intenso del sector ONO que afectaba el incendio.

CONCLUSIONES

- Analizar y describir las entradas y salidas de los sistemas FWI y FBP, me permitió tener una visión más clara de sus componentes y comprender que representan cada uno de ellos en relación al fuego.
- La ocurrencia de incendios en la jurisdicción del SPMF, está altamente influenciada por las condiciones climáticas; por esto es importante, conocer cómo se relacionan la época de fuego con el clima y, con patrones específicos que ocurren en forma frecuente en cada temporada, aumentando el peligro de incendios y/o favoreciendo el comportamiento extremo de los incendios activos.
- La estructura modular o de subsistemas del CFFDRS, permitió primeramente que se implementara con éxito el subsistema FWI en el área de estudio, representando de manera confiable la disponibilidad para arder del combustible. Dado que el FWI es, a través de sus indicadores, variable de ingreso del FBP, esto hace a la confiabilidad de las proyecciones obtenidas con el sistema, entendiendo que el modelo de comportamiento utilizado, fuese el apropiado.
- Al analizar las diferencias entre proyecciones de comportamiento del fuego y lo ocurrido realmente, encontré la razón por la que la dirección de avance del fuego real difiere de la dirección de avance del fuego proyectado. Esto se debió a que la trayectoria del fuego proyectado, responde a la velocidad y dirección del viento efectivo, calculado con datos de la estación meteorológica Esquel Aero. De haber contado con datos meteorológicos confiables tomados en el lugar del incendio, el viento efectivo hubiese sido más representativo. Esto pone de manifiesto la importancia de contar con datos meteorológicos provenientes de estaciones portátiles en terreno, para poder realizar una proyección más ajustada y de utilidad operativa para el SPMF y los servicios de manejo del fuego en general.

- A mi parecer la proyección con el modelo C6, reflejó bien la superficie afectada, el tipo de fuego y los momentos de mayor intensidad. Debe tenerse en cuenta que el combustible presente en el lugar no es igual al que describe el Sistema FBP; sin embargo, la mayoría de las variables de salida del sistema se aproximaron al comportamiento real del incendio. En la proyección realizada con el modelo C4, no representó lo ocurrido en el incendio, principalmente, debido a que con este modelo las mayores intensidades se registraron a partir de las 10 de la mañana, una hora y media antes de lo descrito por los testigos en el lugar. Además, el tipo de fuego con este modelo, presentó “fuego de copa continuo” la última hora de proyección, información que no pudo ser corroborada por los testigos. Con respecto a BROS, FRS, DB y DF, no pude realizar una comparación con lo sucedido realmente, debido a que no contaba con información detallada de esas variables.
- Al realizar este trabajo corroboré que se puede aplicar el sistema FBP en ciertos tipos de combustible de la zona, y a través de la aplicación práctica, dejo una descripción de los procesos de aplicación para futuros usuarios.
- Para continuar con la implementación del CFFDRS, es necesario llevar a cabo tareas de investigación, que permitan clasificar la vegetación de nuestro país en tipos de combustible y desarrollar los modelos de comportamiento del fuego en cada uno de ellos. Debido a que no siempre es factible en la zona la realización de quemas de ensayo para modelar el comportamiento del fuego, es de suma importancia documentar el comportamiento de los incendios, mediante estudios de caso, que recauden información de los mismos. Se estaría iniciando así con la fase de desarrollo de un sistema de predicción de comportamiento del fuego adaptado a las asociaciones vegetales presentes en nuestro país.

ANEXO 1: Proyección con C6

Tramos de proyección	Hora	Viento real (Km/h) y dirección	FMMC	Viento equivalente (Km/h)	Viento Efectivo (Km/h)	ISI	BUI	ROS (m/ min)	Tipo de Fuego	Intensidad (KW/m)	Distancia de avance (m/hs)	Distancia total de avance (m)	Área (ha)/Perímetro (m)/ L/A	Área (ha)/Perímetro (m)/ L/A
Tramo 1 (0 -550 m) Pendiente calculada: 15 %; Exposición: ONO	8	13 OSO	80	3 ONO	15 OSO	2	182	0.1	Superficie	2 (10-500)	5 m / hs	5 m a las 9 hs		12/1336/2.0 8-11:40 hs; vto efec. Prom. 14 Km/h; 550 m distancia de avance
	9	15 SO	83	3 ONO	16,4 OSO	3	182	0,3	Sup	2 (10-500)	18 m / hs	23 m a las 10 hs	< 0.1 / 61/ 2.0	
	10	15 SO	86	3 ONO	16,4 OSO	5	182	3*	Sup./Corona miento intermitente	5 (4000-10000)	180 m /hs	203 m a las 11 hs	1,6/4300/2.0	
	11	7 SO	90	3 ONO	8,6 OSO	7	182	<u>9*</u>	Sup./Corona miento intermitente/ con 50% CFB	6 (>10000)	347 m/ 40 min.	550 m a las 11:40 hs	8/ 985 / 1.4	
TRAMO 2 (550-1500 m) Pendiente calculada: aprox. 0 %	11:40	7 SO	90	NULO	7 SO	7	182	<u>9*</u>	Sup./Corona miento intermitente; CFB 50%	6 (>10000)	198 m /20 min.	748 m a las 12 hs	2,5 / 563 / 1.2	47/2544/1.75 (entre 11:15 - 12:30 hs); Vto. efect.prom. 12,5; distancia de avance 950 m)
	12	18 OSO	90	NULO	18 OSO	11	182	21*	Sup./Corona miento intermitente; > a CFB 50%	6 (>10000)	752 m /38 min	1500 m a las 12:38	17 / 1600 / 2.5	
TRAMO 3 (1500-2060 m) Pendiente calculada: 21,7 %, aprox.20 %; Exposición: OSO	12:38	18 OSO	90	4 OSO	22 OSO	13	182	26*	Sup./Corona miento intermitente; > a CFB 50%	6 (>10000)	560 m /22	2060 m a las 13 hs	9/ 1235/ 2.9	9/1 235/2,9 (entre 12:38 - 13 hs); Vto. efect. 22; distancia de avance 560 m)

ANEXO 2: Proyección con C4

Tramos de proyección	Hora	Viento real (Km/h)y dirección	FMMC	Viento equivalente (Km/h)	Viento Efectivo (Km/h)	ISI	BUI	ROS (m/ min)	Tipo de Fuego	Intensidad (KW/m)	Distancia de avance	Distancia total de avance m	Área (ha)/Perimetro (m)/ LJA	Área (ha)/Perimetro (m)/ LJA
Tramo 1 (0-550 m) Pendiente calculada: 15 %; Exposición: ONO	8	13 OSO	80	5 ONO	16,8 OSO	2	182	2*	Sup./Coronamiento intermitente	4 (2000-4000)	103 m / hs	103 m / hs	0,4/236/2.2	12/1335/2.2 8 - 10:33 hs; vto efec. Prom. 16,5; 550 m distancia de avance
	9	15 SO	83	5 ONO	16,4 OSO	3	182	3*	Sup./Coronamiento intermitente; CFB 50%	5 (4000-10000)	180 m / hs	283 m a las 10 hs	1,5/430/2.2	
	10	15 SO	86	5 ONO	16,4 OSO	6	182	8*	Sup./Coronamiento intermitente; > CFB 50%	6 (>10000)	267 m / en 33 min	550 m a las 10:33 hs	3 / 667 / 2.2	
TRAMO 2 (550-1500 m) Pendiente calculada: aprox. 0 %	10:33	15 SO	86	NULO	15 SO	5	182	6*	Sup./Coronamiento más del CFB 50%	5 (4000-10000)	162 m / 27 min	712 m a las 11 hs	1 / 404 / 2.0	45/2540/1.8 10:33-12:17 hs; vto efec. prom. 13; 950 m distancia de avance
	11	7 SO	90	NULO	7 SO	6	182	8*	Sup./Coronamiento más del CFB 50%	6 (>10000)	480 m / h	1192 m a las 12 hs	15/ 1277/ 1.3	
	12	18 OSO	90	NULO	18 OSO	11	182	18	Fuego de copa continuo	6 (>10000)	308 m / 17 min	1500 m a las 12:17	3/707/2.4	
TRAMO 3 (150 - 2060 m) Pendiente calculada: 21,7 %, aprox.20 %; Exposición: OSO	12:17	18 OSO	90	7 OSO	24 O	15	182	26	Fuego de copa continuo	6 (>10000)	560 m / 23 min	2060 m a las 12:40 hs	8/1220/3,3	8/1220/3,3 12:17-12:40 hs; vto efec. Prom. 24; 560 m distancia de avance

Imagen 20: Relación L/B de cada tramo con la proyección con C6.



Imagen 21: Proyección total con C6.



Imagen 22: Relación L/B de cada tramo con la proyección con C4.

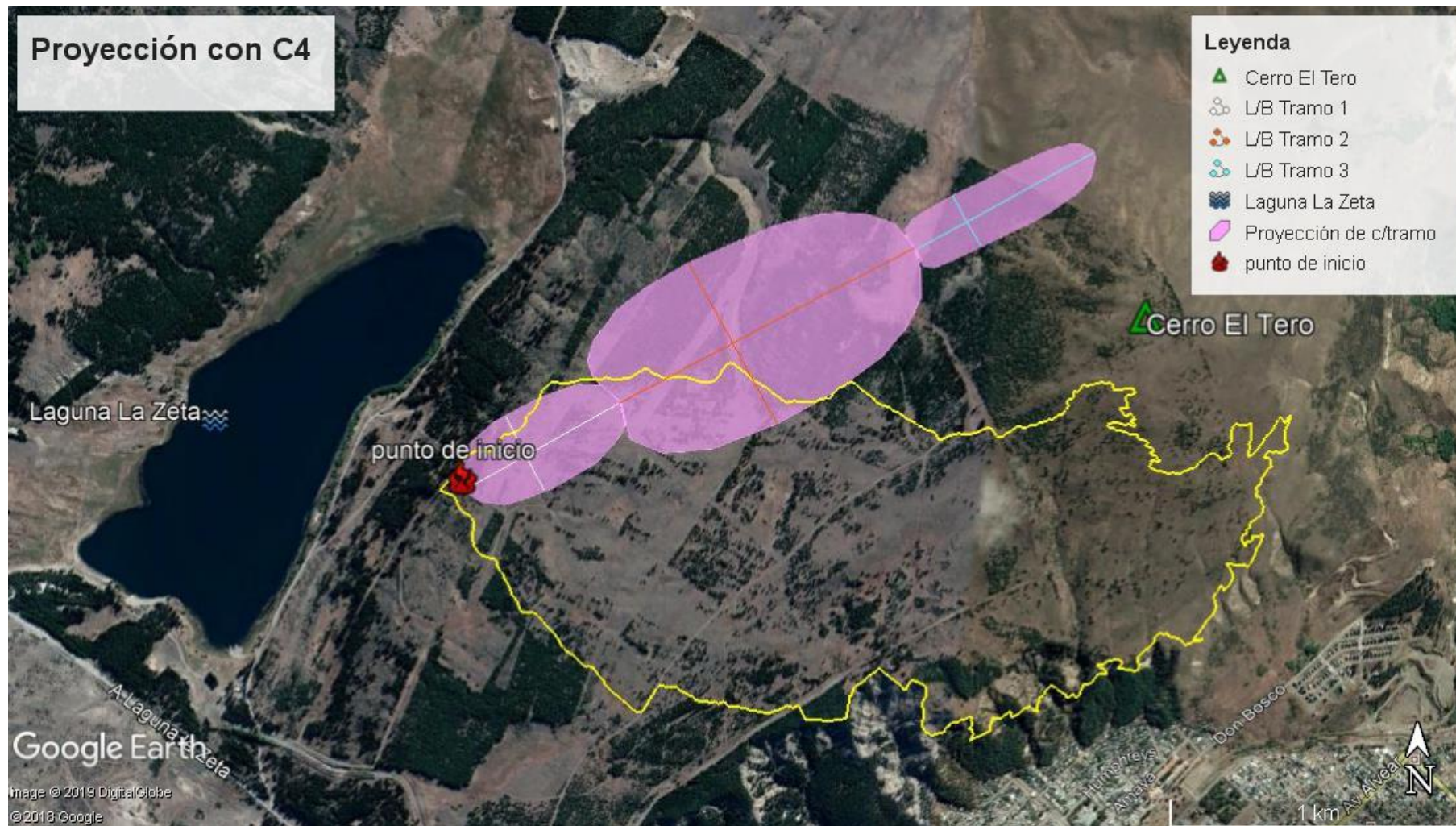
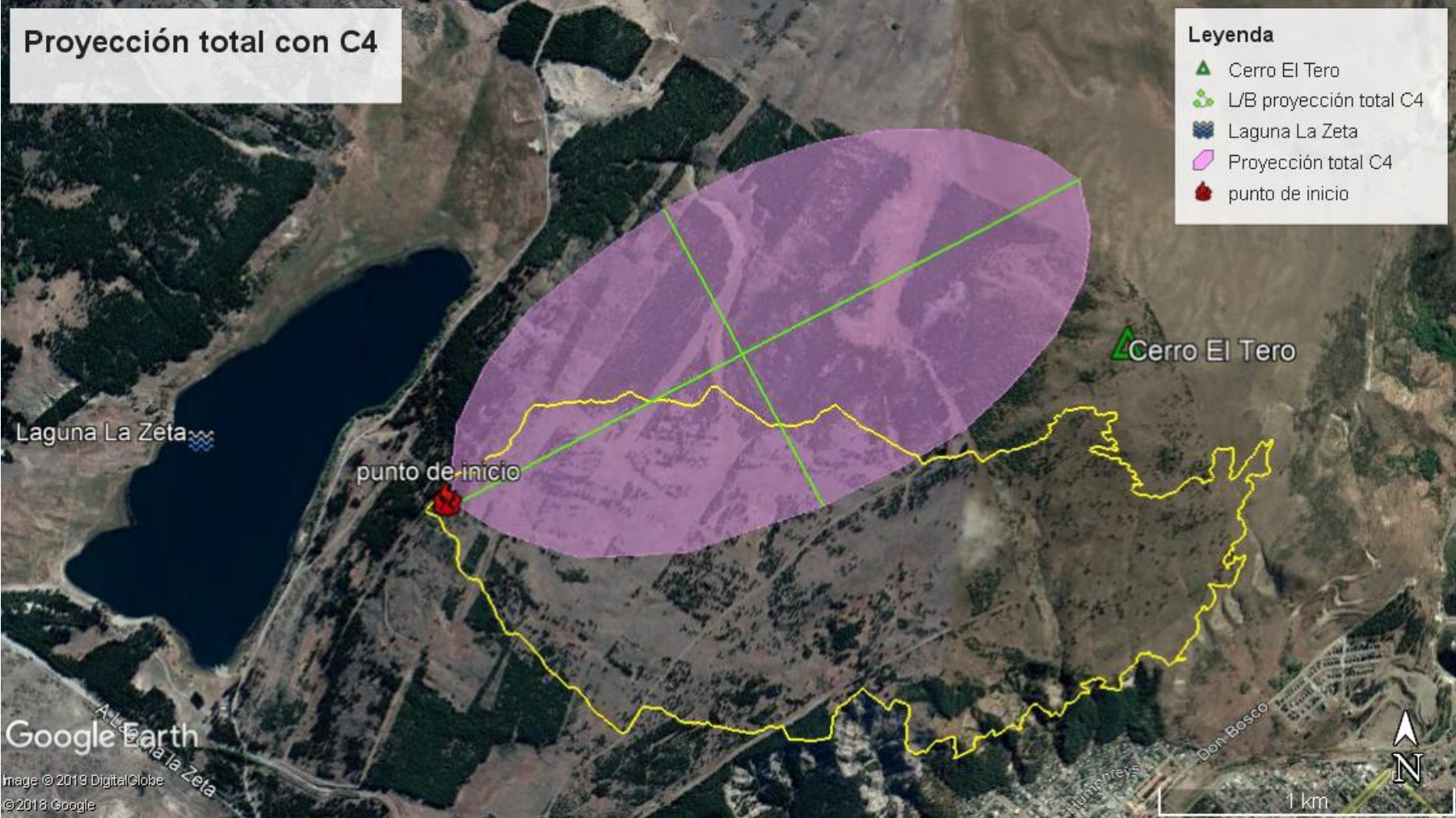


Imagen 23: Proyección total con C4



ANEXO 3: Glosario de Siglas

- BISI:** *Back Initial Spread Index* (Índice de propagación inicial en retroceso).
- BFI:** *Back Fire Intensity* (Intensidad del fuego de retroceso).
- BROS:** *Back Rate of Spread* (Tasa o velocidad de propagación de retroceso).
- BUI:** *Buildup Index* (Índice de carga disponible).
- CFB:** *Crown Fraction Burnt* (Fracción de copa quemada).
- CFDRS:** *Canadian Forest Fire Danger Rating System* (Sistema canadiense de evaluación de peligro de incendios).
- CHF:** *Contenido de Humedad Foliar*.
- CSF:** *Crown Spread Factor* (Factor de propagación de copa).
- DB:** *Distance Back* (Distancia de Propagación en la cola del incendio).
- DC:** *Drought Code* (Código de sequía).
- DF:** *Distance Flank* (Distancia de propagación en los flancos del incendio).
- DH:** *Distance Head* (Distancia de propagación en la cabeza del incendio).
- DMC:** *Duff Moisture Code* (Código de humedad del mantillo).
- ET:** *Elapsed Time* (Tiempo transcurrido).
- FBP:** *Fire Behavior Prediction* (Predicción de comportamiento del fuego).
- FC:** *Fuel Consumption* (Consumo de combustible).
- FFI:** *Flank Fire Intensity* (Intensidad del fuego de flanco).
- FOP:** *Fire Occurrence Prediction* (Sistema de predicción de ocurrencia de incendios).
- FRS:** *Flank Rate of Spread* (Velocidad de propagación del flanco).
- FWI:** *Fire Weather Index* (Índice meteorológico de peligro de incendios).
- ISI:** *Initial Spread Index* (Índice de propagación inicial).
- LB:** *Long Base* (Razón largo/ancho).
- PNMF:** *Plan Nacional de Manejo del Fuego*.
- ROS:** *Rate of Spread* (Tasa o velocidad de propagación).
- SMN:** *Servicio Meteorológico Nacional*.
- SNEPI:** *Sistema Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios*.
- SNMF:** *Servicio Nacional de Manejo del Fuego*.
- SPMF:** *Servicio Provincial de Manejo del Fuego*.
- SSBeI:** *Subsecretaría de Bosques e Incendios*.
- TFC:** *Total Fuel Consumption* (Consumo total de combustible).

BIBLIOGRAFIA

- Alexander, M.E. 1985: Estimating the length-to-breadth ratio of elliptical forest fire patterns. Pages 287-304 in Donoghue, L.R.; Martin, R.E. (Ed.) Proceedings of the Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology. 29 April- 2 May, Detroit, Michigan. Society of American Foresters, Bethesda, Maryland, SAF Publication 85-04.
- Anderson, H. E. 1983. Predicting wind-driven wild land fire size and shape. USDA For. Serv., Intermt. For. Range Exp. Stn., Ogden, Utah. Res. Pap. INT-305. 26p.
- Archibald, D.J.; Luke, A.B.; Coneybeare, W.C. 1994. Early summer prescribed fire in northern Ontario. Ontario Ministry of Natural Resources, Northeast Science & Technology, Timmins, Ontario. Technical Note TN-010. 12 p.
- Barrows, J.S. 1951 Fire behavior in northern Rocky Mountain forests. US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Station Paper No. 29, Missoula, Montana. 103 pp. + Appendices.
- Bianchi L. y Withinton, T. Estudio de caso n°1 incendio La Zeta. Inédito.
- Burgan, R. E., 1987. Concepts and interpreted examples in advanced fuel modelling. Gen. Tech. Rep. INT-238. Ogden UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Research Station, 40 pp.
- Byram, G. M. 1959. Combustion of forest fuel. Pages 61-89 in K. P. Davis, ed., Forest fire: control and use. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Cabrera A. L. 1971. Fitogeografía de la República Argentina. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, Vol. XIV, N° 1-2. Buenos Aires, Argentina. 42 pp.
- Casas A. L. 2017. Análisis de indicadores del sistema FWI asociados a la ocurrencia y comportamiento del fuego en la provincia de Chubut. 34 pp.
- Cheney, N. P. and Gould, J. S., 1995. Fire growth in grassland fuels. International Journal of Wildland Fire 5, 237-247.

- Cheney, N. P. and Sullivan, A., 1997. Grassfires, fuel, weather and fire behavior. (CSIRO: Melbourne.)
- Cheney, N. P. and Gould, J. S., 1997. Fire growth and acceleration. *International Journal of Wildland Fire* 7, 1-5.
- Chrosiewicz, Z. 1986. Foliar moisture content variations in four coniferous tree species of central Alberta. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 157-162.
- Deacon, A. 1986. The shape of a fire burning under the influence of a constant wind. *Aust. Defence Force Acad., Maths Dep., Campbell, ACT. Rep. 11/86. 29p.*
- Dentoni, M. C. 2011. Modelos de combustibles para arbustales de la región andina de las provincias de Río Negro, Chubut y Santa Cruz. Folleto de divulgación n° 30; 12 p.
- Dentoni, M. C. y Muñoz M. M. 2012. Sistemas de evaluación de peligro de incendios. Informe Técnico n°1 Plan Nacional de Manejo del Fuego. 36 pp.
- Dentoni, M. C., Muñoz, M. M. y Marek, D. S. 2015. Fire danger rating as a tool for fire management. Implementation of the CFFDRS: the Argentine experience. En: Alexander, M. E. y Leblon, B. *Current International Perspectives on Wildland Fires, Mankind and the Environment*. Nova Publishers Pags. 101-120.
- Fogarty, N., Hopkins, D., Holst, P. 1998. Lamb production from diverse genotypes 1994-1997 Final report Cowra Agricultural Research and Advisory Station 33 pp. NSW Agriculture
- Forestry Canada Fire Danger Group 1992: Development and structure of the Canadian Forest Fire Behavior Prediction System. Forestry Canada, Science and Sustainable Development Directorate, Ottawa, Ontario, Information Report ST-X-3. 63 pages.
- Fuglem, P.L.; Murphy, P.J. 1980. Foliar moisture content and crown fires in Alberta conifers. Alberta Energy and Natural Resources, Alberta Forest Service, Edmonton, Alberta. ENR Rep.No. 158. 47 p.

- Gary, H. L. 1971. Seasonal and diurnal changes in moisture contents and water deficits in Engelmann spruce needles. *Bot. Gaz.* 132(4): 327-32.
- Harrington, J.B., Flannigan, M.D. y Van Wagner, C.E. 1983. A Study of the relation of components of the fire weather index to monthly provincial area burned by wildfire in Canada 1953-80. Pentawa National Forestry Institute, Canadian Forestry Service, Department of the Environment. Information Report PI-X-25. 65pp.
- Hepp, A. y Vial, E. 1979. Estudio del comportamiento del fuego en los incendios forestales de la V Región. Tesis, Universidad de Chile.
- Julio, G. 1991. Manual de Inventario de Combustibles Forestales. Publicación Docente N° 27. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile. 71 p.
- Kiil, A. D. 1971. Forest-habitat inventory requirements for fire danger rating. Pages 61-66 *in* Proc. Symp. Forest Land Inventory Manage. (Feb. 12-13, 1970, Edmonton, Alta.). Dep. Fish. For. Can. For. Serv., North. For. Res. Cent., Edmonton, Alta.
- Lawson, B. D. 1972. An interpretive guide to the Canadian Forest Fire Behavior System. Environ. Can., Can. For. Serv., Pac. For. Res. Cent., Victoria, B. C. Rep. BCP-3-72. 19 P.
- Lawson, B. D. 1977. Fire Weather Index-the basis for fire danger rating in British Columbia. Fish. Environ. Can., Can. For. Serv., Pac. For. Res. Cent., Victoria, B.C. Rep. BC-P-17.24 p.
- Lawson et al., 1985. A system for predicting fire behavior in Canadian forest. Pages 6-16 *in* Proc. 8th Conf. Fire. For. Meteorol. (Apr. 29-May 2, Detroit, Mich.). Soc. Am. For., Bethesda, Md. SAF Publ. 85-04.
- Linzon, S. N. 1969. Seasonal water content and distribution in eastern white pine. *Forestry Chronicle* 45:38-43.

- Little, C. H. A. 1970a. Derivation of the springtime starch increase in balsam fir (*Abies balsamea*). *Can. J. Bot.* 48: 1995-99.
- Little, C. H. A. 1970b. Seasonal changes in carbohydrate and moisture content in needles of balsam fir (*Abies balsamea*). *Canadian Journal of Botany* 48:2021-2028.
- Merrill, D. F. and Alexander, M. E. eds. 1987. Glossary of forest fire management terms. 4 th ed. Natl. Res. Counc. Can., Can. Comm. on For. Fire. Mgmt., Ottawa. Publ. NRCC 265216. 91 p.
- Quintilio, D. 1978. Fire behavior in natural forest stand. Pages 14-16 in Proc. Fire. Ecol. Resour. Manage. Workshop (Dec. 6-7, 1977; Edmonton Alta.). Environ. Can. For. Serv. North. For. Res. Cen., Edmonton, Alta. Inf. Rep. NOR-X-210.
- Springer, E.A.; Van Wagner, C.E. 1984. The seasonal foliar moisture trend of black spruce at Kapuskasing, Ontario. *Canadian Forestry Service Research Notes* 4: 39-42.
- Stocks, B. J. 1977. Fire behavior research in Ontario. USDA For. Serv. Washington. D. C. Fire Manage Notes 38 (2): 9-11,19.
- Taylor, S.W.; Pike, R.G.; Alexander, M.E. 1997. Field guide to the Canadian Forest Fire Behavior Prediction (FBP) System. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, Alberta. Special Report 11. 60 p.
- Tymstra, C., Bryce, R. W., Wotton, B. M., Taylor, S. W. y Armitage, O. B., 2010. Development and structure of Prometheus: the Canadian wildland fire growth simulation model. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, Edmonton, AB. Information Report NOR-X-417
- Van Wagner, C. E. 1965. Describing forest fires – old ways and new. *For. Chron.* 41:301-305.

- Van Wagner, C. E. 1967. Seasonal variation in moisture content of eastern Canadian tree foliage and the possible effect on crown fires. Can. Dep. For. Rural Develop., Forest. Br. Publ. 1204.
- Van Wagner, C. E. 1969. A simple fire-growth model. For. Chron. 45:103-104.
- Van Wagner, C.E. 1974. A spread index for crown fires in spring. Environment Canada, Canadian Forestry Service, Petawawa Forest Experiment Station., Chalk River, Ontario. Information Report PS-X-55. 12 p.
- Van Wagner, C. E. 1974a. Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index. Environ. Can., Can. For. Serv., Ottawa, Ont. Publ. n° 1333. 44 p.
- Van Wagner, C. E. 1977b. Conditions for the start and spread of crown fire. Can. J. For. Res. 7(1): 23-24.
- Van Wagner, C. E. 1977d. In readers' forum. Fire Technol. 13:349-50.
- Van Wagner, C. E. 1987. Development and structure of the canadian forest fire weather index system. Canadian Forestry Service, Ottawa; Ontario. Forestry Technical Report 35. 37pp.
- Van Wagner, C. E. 1989. Prediction of crown fire behavior in conifer stands. Pages 207-212 *in* Proc. 10th Conf. Fire For. Meteorol., April 17-21, 1989, Ottawa, Ont.