

**Un modelo de objetos para la  
predicción del comportamiento del  
fuego en incendios sobre distintas  
superficies**

**Pertino Guillermina**

Octubre 2008

# Índice General

<b>Capítulo 1 - Introducción</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo 2 - Características del Fuego</b>	<b>6</b>
Administración del fuego	10
Prevención de incendios	10
Contención de incendios	11
Modelos matemáticos	12
Los incendios en Argentina	13
<b>Capítulo 3 - Predicción del comportamiento del fuego</b>	<b>17</b>
Factores que influyen el comportamiento	18
Condiciones climatológicas	18
Combustible	19
Topografía	20
Algoritmos matemáticos para la predicción	21
Velocidad de propagación del frente del fuego	21
Propagación del fuego en pastizales (Cheney et al.)	21
Propagación del fuego en pastizales y bosques (McArthur)	22
Mk4 y Mk5 para incendios en pastizales	23
Mk5 para incendios forestales	24
Estimación del perímetro del fuego	24
Principio de Huygens	25
Modelo Normal	25
<b>Capítulo 4 - Un modelo orientado a objetos para la predicción del comportamiento del fuego en incendios</b>	<b>27</b>
Sistemas de Información Geográfica	28
Modelo Orientado a Objetos	28
Fenómenos continuos	28
Arquitectura de campos continuos	28
Operaciones sobre campos continuos	30
Factores que influyen el comportamiento del fuego	33
Algoritmos para la predicción del comportamiento del fuego	34
Velocidad de propagación del frente del fuego	34
Estimación del perímetro del fuego	39
Factores de influencia primitivos o derivados	40
Criterio de selección de algoritmos	42
Mediador	43
Modelo de objetos completo	44
<b>Capítulo 5 - Simulación</b>	<b>46</b>
Quema controlada en Pichi Mahuida	46
Estudio del área y alcance de la quema	47
Condiciones óptimas para la quema	48

Configuración del modelo _____	49
Temperatura _____	51
Viento _____	53
Precipitaciones recientes _____	53
Índice de inflamabilidad _____	53
DEM _____	53
Recolección de los datos _____	54
Administración de la quema _____	54
<b>Capítulo 6 - Conclusiones y trabajo futuro _____</b>	<b>55</b>
Conclusiones _____	55
Trabajo futuro _____	56
<b>Referencias bibliográficas _____</b>	<b>57</b>

# Índice de figuras

Figura 2.1. El triángulo del fuego _____	6
Figura 2.2. Las partes del fuego en movimiento _____	8
Figura 2.3. Regionalización de la Argentina del PNMF _____	14
Figura 2.4. Hectáreas afectadas por regional, por tipo de incendio _____	15
Figura 2.5. Porcentaje de causas de incendio por regional _____	15
Figura 2.6. Superficie total y cantidad de incendios por año _____	15
Figura 2.7. Cantidad de hectáreas por tipo de vegetación por año _____	16
Figura 3.1. El triángulo del ambiente del fuego _____	17
Figura 3.2. Efectos indeseables del viento _____	19
Figura 3.3. Diferencias en la carga de combustible _____	20
Figura 3.4. Expansión del perímetro del fuego con el principio de Huygens _	25
Figura 3.5. Ciclo del modelo Normal _____	26
Figura 4.1. La arquitectura de campos continuos _____	29
Figura 4.2. Los factores que influyen el comportamiento del fuego _____	33
Figura 4.3. Instanciación de las clases FactorDeInfluencia y TipoDeInfluencia	34
Figura 4.4. Algoritmos para la predicción de la velocidad propagación del frente del fuego _____	35
Figura 4.5. Diagrama de instancias de una estimación utilizando el algoritmo RsMk5G _____	36
Figura 4.6. Diagrama de secuencia del método estimarVelocidadPropagacion de la clase Medidor _____	37
Figura 4.7. Algoritmos para la predicción del comportamiento del fuego _____	39
Figura 4.8. Factores de influencia primitivos y derivados _____	41
Figura 4.9. Criterios de selección de algoritmos _____	42
Figura 4.10. Clase Medidor _____	43
Figura 5.1. Departamento de Pichi Mahuida, Provincia de Río Negro _____	47
Figura 5.2. Características del entorno de la quema controlada _____	48
Figura 5.3. Acotación del modelo propuesto _____	50
Figura 5.4. Ampliación del modelo propuesto _____	52

# Capítulo 1

## Introducción

La ocurrencia de incendios es una amenaza constante para las personas y el medio ambiente. En todo el mundo se deben enfrentar incendios en múltiples ocasiones, en algunos sitios con más frecuencia que en otros. Además, los distintos tipos de incendios tienen distintas características, ya que no es lo mismo un incendio que se produce en un pastizal que un incendio forestal o un incendio que se produce en verano que uno que se produce en invierno. El efecto que tienen éstos incendios sobre las personas y el medio ambiente dependen de la severidad de cada incendio. En muchos casos, actuar con rapidez y eficacia pueden ser determinantes para lograr la contención y extinción temprana del fuego, de forma tal de minimizar sus efectos negativos.

El incremento de la velocidad de propagación del fuego desde el punto de ignición hasta que alcanza un estado de equilibrio, a partir del cual la velocidad se mantiene casi constante, es conocido como “fase de aceleración”. Inicialmente, la intensidad y el desarrollo del fuego están influenciados por el contacto directo de las llamas con el combustible superficial no quemado. A medida que se involucra más combustible, la intensidad del fuego es mayor y el tamaño de las llamas aumenta. El tiempo que dura esta fase varía dependiendo de las características del entorno donde se produce e incluso puede llegar a durar tan sólo unos pocos segundos. En algunos casos, atacar el fuego en las primeras instancias de la fase de aceleración puede significar la única posibilidad de extinción ya que una vez alcanzadas la máxima intensidad y velocidad de propagación el incendio se vuelve incontrolable.

Describir y explicar el proceso físico del desarrollo del fuego no es sencillo, sino todo lo contrario. Esto se debe a la reacción del fuego a la variabilidad de los factores que se encuentran en el entorno donde se produce. Los factores del entorno que influyen el comportamiento del fuego se pueden dividir en tres grandes grupos: las condiciones climatológicas, el combustible y la topografía.

Entre las condiciones climatológicas se pueden destacar el viento, la temperatura, las precipitaciones recientes y la humedad relativa. El viento es uno de los factores que tiene mayor influencia, ya que determina la dirección y velocidad de propagación del frente del fuego y le da forma. La temperatura, las precipitaciones recientes y la humedad no tienen influencia directa sobre el fuego, sino que influyen el grado de inflamabilidad del combustible.

El combustible puede ser muy variado; existen distintos tipos de combustible, con distinta densidad, tamaño de partículas y contenido de humedad. Influye

directamente en el comportamiento del fuego la cantidad de combustible, su estado de sequedad y si se presenta en el espacio de manera continua, facilitando así su propagación.

En cuanto a la topografía, el fuego reacciona de distinta manera si el suelo mantiene un nivel, o si hay cambios en la altura ya que el fuego se propaga con más facilidad cuesta arriba que cuesta abajo o si se mantiene en un determinado nivel. Además, las distintas configuraciones topográficas pueden facilitar, entorpecer o incluso impedir la propagación del fuego. Por ejemplo, ante la presencia de un río la propagación del fuego se puede ver comprometida.

La estimación del comportamiento del fuego intenta predecir la extensión del fuego y se la puede utilizar para preparar un plan de contingencia, de forma tal de controlar el fuego, prevenir su extensión y lograr su extinción, minimizando sus efectos negativos. Existen distintos tipos de incendios y los factores que pueden tener un gran impacto sobre el fuego en algunos casos pueden no tener tanta importancia en otros. Para los distintos tipos de incendios los factores que influyen en el comportamiento del fuego pueden no ser necesariamente los mismos.

Hoy en día existen en el mercado numerosos sistemas capaces de predecir el comportamiento del fuego y la gran mayoría presenta la desventaja de que sólo pueden ser utilizados para un número finito de entornos, aquellos entornos para los cuales fueron diseñados. El objetivo principal de este trabajo es proponer un modelo de objetos para predecir el comportamiento del fuego que no presente restricciones de aplicabilidad. O sea, un modelo de objetos para un sistema capaz de predecir el comportamiento del fuego en casi cualquier superficie. La imposibilidad de predicción en alguna superficie estaría dada, no por restricciones impuestas por el modelo de objetos, sino por la falta de un modelo matemático capaz de predecir el comportamiento del fuego en dicha superficie.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera: El capítulo 2 describe detalladamente las características del fuego, explica los distintos tipos de incendios que existen, introduce los tipos de modelos de predicción y finalmente explica la situación de la Argentina en el manejo de incendios. El capítulo 3 presenta la problemática de predecir el comportamiento del fuego, comenzando por el análisis de los distintos factores que influyen su comportamiento y luego proponiendo algunos algoritmos matemáticos para la predicción de la velocidad de propagación del frente del fuego y para la predicción del contorno del fuego. En el capítulo 4 se propone un modelo orientado a objetos, fácilmente extensible, para predecir distintos aspectos del comportamiento del fuego (la velocidad de propagación del frente del fuego y el perímetro del fuego) en base a una serie de factores de influencia. El capítulo 5 incluye una simulación de una quema controlada en el Noreste de la provincia de Río Negro, detallando cómo se adaptaría el modelo propuesto en base al objetivo que se persigue y a las características del entorno. Finalmente, en el capítulo 6 se incluyen las conclusiones, destacando la posibilidad de adaptación del modelo propuesto a otras problemáticas con características similares y los posibles trabajos a futuro.

# Capítulo 2

## Características del Fuego

El triángulo del fuego, presentado en la figura 2.1, es un triángulo equilátero en el cual cada lado se refiere a uno de los tres factores, combustible, comburente y energía, necesarios para la combustión y producción de llama. Para que se produzca el fuego, es necesario que coincidan los tres factores que conforman el triángulo.

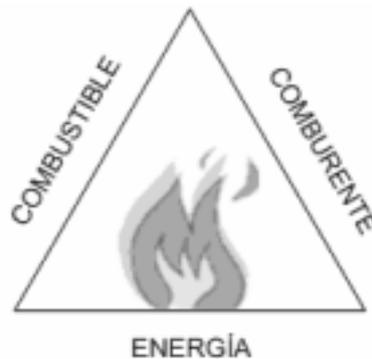


Figura 2.1. El triángulo del fuego

El combustible es usualmente material orgánico vegetal, vivo o muerto, subterráneo, superficial o aéreo, susceptible de ser quemado. El comburente es el oxígeno del aire y la energía se puede obtener de una chispa, temperatura elevada u otra llama. Si se remueve alguno de los factores, provocando que el triángulo esté incompleto, la llama no se produce o cesa.

La combustión es una oxidación rápida que se produce a altas temperaturas y deja como resultado final un residuo compuesto mayormente por sales minerales, llamado cenizas. La combustión consta de tres etapas: el precalentamiento, la combustión de los gases y la fase sólida. En la etapa de precalentamiento, la fuente de calor eleva la temperatura del combustible. Cuando alcanza los 100°C comienza a perder humedad en forma de vapor de agua. Con una temperatura cercana a los 200°C los compuestos volátiles de las resinas comienzan a evaporarse. A continuación comienza la etapa de combustión de los gases. Al llegar a los 300° o 400°C se inicia la gasificación de los componentes estructurales y la ignición del

material combustible. La temperatura sigue en aumento hasta los 500° o 600°C, momento en que la combustión continúa por sí sola aún si se retira la fuente de calor. Se emiten gases no quemados, vapor de agua y humo. Finalmente, la etapa de fase sólida se caracteriza por el combustible ardiendo con llama propia de color azulado, poco humo y baja emisión de gases de carbono.

El comportamiento del fuego es la manera en la que el fuego reacciona a los efectos del entorno en el que tiene lugar. Las variables asociadas al comportamiento del fuego son la velocidad de propagación, la longitud y altura de llama, la intensidad, la distancia de propagación, el área, el perímetro, la forma y la ocurrencia de focos secundarios. A grandes rasgos, entre los factores del entorno que afectan el comportamiento del fuego, se incluyen los combustibles (ubicación, forma y tamaño, compactación, continuidad, carga, composición química, contenido de humedad y densidad), la topografía (altura, exposición, pendiente y relieve) y las condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa, viento, precipitaciones y nubes). *“...La topografía puede influenciar el comportamiento del fuego de manera drástica. Cuando el fuego se produce en regiones con grandes pendientes, las llamas que avanzan precalientan la vegetación ascendente, incrementando la velocidad de propagación. De esta manera, el fuego puede avanzar con gran rapidez y mayor intensidad. Por el contrario, el fuego que baja por la pendiente tiene llamas más cortas y puede afectar levemente la vegetación. A diferencia de la topografía, que no varía, el clima fluctúa tremendamente, y esas fluctuaciones afectan considerablemente el comportamiento del fuego. Las grandes temperaturas reducen la humedad relativa, acercan los combustibles a la temperatura de ignición y facilitan la combustión. El viento incrementa la fuente de oxígeno y puede incrementar también la velocidad de propagación al quemar combustibles más allá del frente del fuego. El clima es un factor determinante del comportamiento del fuego y no se lo puede manipular como se puede manipular el combustible. La sequía tiene como consecuencia combustibles secos, que son más fáciles de prender. Cuando todos estos factores se presentan juntos, el comportamiento del fuego es extremo, casi sin importar el combustible y la topografía...”*[1].

El número de combinaciones posibles de los factores del entorno que afectan el comportamiento del fuego es infinito. *“...Las infinitas combinaciones, y el punto de ignición hacen que el crecimiento y el comportamiento de cada fuego sea único...”*[2]. Sin embargo, el fuego no actúa de manera impredecible o al azar. Cuando se produce fuego en entornos con condiciones similares, su comportamiento también tiende a ser similar.

La velocidad de propagación e intensidad del fuego no es homogénea y varía a lo largo del perímetro del fuego. La figura 2.2 representa un incendio en movimiento e incluye una serie de términos relacionados. Entre ellos se incluyen:

- Punto de ignición: Lugar donde se da origen al fuego.
- Cabeza del fuego: Sector o área del incendio donde el fuego presenta mayor velocidad de propagación; en algunos casos puede presentarse más de una.
- Fuego frontal: Fuego que avanza a favor del viento y/o la pendiente.
- Cola del fuego: Sector o área del incendio donde el fuego presenta menor velocidad de propagación.
- Fuego en retroceso: Fuego que avanza contra el viento y/o la pendiente, consumiendo oxígeno más lentamente que el fuego frontal y produciendo llamas de menor altura.

- Flancos: Partes del perímetro del fuego aproximadamente paralelas a la dirección principal de propagación. El fuego en los flancos avanza y retrocede alternadamente.
- Área quemada: Superficie sobre la cual se desplazó el fuego y consumió parte o todo el combustible existente sobre la misma.

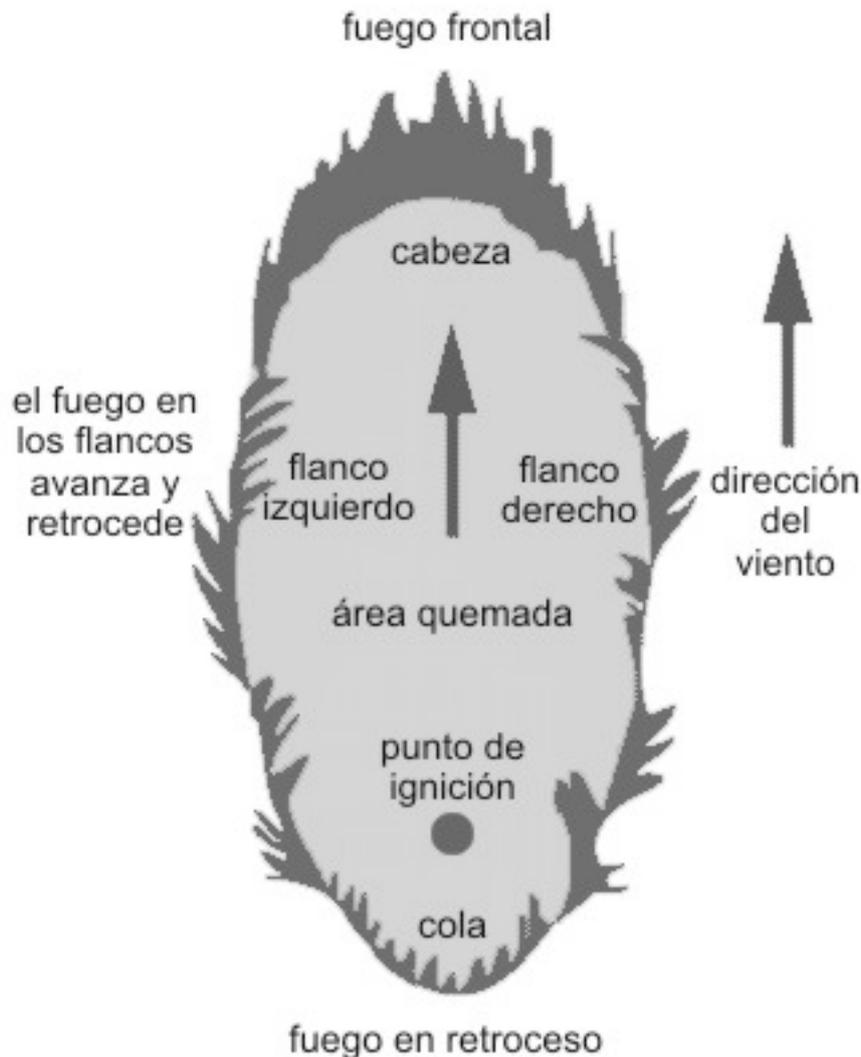


Figura 2.2. Las partes del fuego en movimiento

Existen distintos tipos de fuego que, siguiendo el enfoque tomado por el Plan Nacional de Manejo del Fuego de la República Argentina [3], se pueden clasificar de la siguiente manera:

- El **fuego de superficie** es el tipo más frecuente. El fuego consume sólo el mantillo superficial, la hojarasca, las ramas caídas y la vegetación de escasa altura. Comienza en los combustibles finos, ya que estos arden con mayor facilidad al ser más sensibles a las variaciones de humedad y temperatura. La duración e intensidad depende de la disponibilidad y condición de estos combustibles. Casi todos los fuegos comienzan siendo un fuego de superficie.

- El **fuego de copas** se propaga por las copas de los árboles o arbustos. Es un fuego de gran intensidad, rápido desplazamiento, conducido generalmente por el viento. No es tan común como el fuego de superficie, pero puede ser extremadamente destructivo y difícil de extinguir. Normalmente se presenta bajo condiciones climáticas extremas y la intensidad potencial puede modificar las condiciones atmosféricas, incluyendo la creación de vientos locales que pueden provocar un comportamiento errático del fuego.

El fuego de superficie se puede propagar rápidamente en los pastos secos y las camas de combustible de los bosques, incendiando las copas de los árboles. Se clasifica a los fuegos de copas como independientes o subordinados, para distinguir su grado de dependencia con el fuego de superficie.

- El **fuego rastrero** se propaga a través de combustibles superficiales, con llama de escasa altura y baja velocidad de propagación. Los combustibles superficiales consisten en vegetación parcialmente descompuesta que normalmente forma una capa compacta bajo los bosques, pastizales o matorrales. Estos fuegos pueden arder por días e incluso meses aunque el combustible esté húmedo.
- El **fuego de rescoldo** se propaga bajo la superficie del suelo alimentado por la materia orgánica seca y las raíces. Arde sin llama por un considerable período de tiempo y se propaga lentamente. Un caso, es el fuego denominado subterráneo que arde con poca presencia de oxígeno.

En el ámbito mundial, el fuego representa uno de los riesgos ambientales más críticos. *“...Cada año, se queman miles de hectáreas de bosques y otros tipos de vegetación, destruyendo árboles y recursos naturales. Esto produce una transformación progresiva de la tierra en desiertos, con todos los problemas que esto trae asociados...”* [4]. Además, *“...los incendios de la vegetación producen gases y emisiones de partículas que originan un impacto en la composición y funcionamiento de la atmósfera global...”* [5]. Sin embargo, el fuego no sólo posee efectos negativos en la naturaleza. En algunos ecosistemas, el fuego juega un papel importante en el plano ecológico, con respecto al mantenimiento de los ciclos biológicos, geológicos y químicos.

Un incendio es la ocurrencia de fuego no deseada, fuego que se extiende libremente y quema combustibles que no estaban destinados a arder. Dicho fuego no está planificado y por consiguiente no está bajo el control ni la supervisión humana. Comúnmente, los incendios se producen en bosques o vegetaciones abiertas, como los matorrales, pastizales, sabanas y estepas. Un incendio forestal afecta las formaciones boscosas. Un incendio rural se desarrolla en áreas rurales y afecta vegetación de tipo matorrales, arbustos y/o pastizales. Por último, cuando ocurre un incendio que se desarrolla en áreas de transición entre zonas urbanas y rurales, se lo denomina incendio de interfase.

Los incendios pueden originarse por distintos motivos. Un incendio por negligencia se produce por un descuido, por ejemplo a raíz de un fogón mal apagado. Un incendio intencional es provocado para obtener un beneficio, por ejemplo la quema de bosques para favorecer el desarrollo de pasturas. Un incendio natural es provocado por las sequías, altas temperaturas o tormentas eléctricas. Finalmente, están los incendios cuya causa es imposible determinar.

Cotidianamente, el fuego es utilizado como herramienta de manejo de la tierra. *“...Si se lo utiliza correctamente, el fuego es una herramienta muy beneficiosa y de bajo costo para el manejo de la tierra y el hábitat silvestre. Por ejemplo, el fuego puede reducir las hojas y la basura en el suelo de los bosques y dejar la tierra*

*expuesta, de forma tal que los pájaros puedan encontrar semillas fácilmente...*” [6]. Según [7], las quemas controladas consumen los combustibles finos vivos y muertos, reduciendo el impacto y la dificultad de extinción de los fuegos indeseados o incluso reduciendo la probabilidad de que se produzcan incendios en el futuro. Sin embargo, el uso incorrecto del fuego, puede resultar en incendios incontrolables, de gran tamaño y extremadamente difíciles de extinguir.

La capacidad de predecir el comportamiento del fuego puede permitir, ante una situación de incendio, la creación de un plan de contingencia para determinar los esfuerzos y acciones necesarias para obtener el control del fuego y posteriormente lograr su extinción. A su vez, puede servir para determinar bajo qué circunstancias es posible realizar una quema controlada, de forma tal de mantener el control en el transcurso de toda la quema.

## **Administración del fuego**

Las personas encargadas de proteger, cuidar y mantener bosques, campos cubiertos con arbustos y árboles pequeños o pastizales, necesitan comprender y anticipar el comportamiento del fuego en dichos contextos. De esta manera, se pueden llegar a evitar los eventuales incendios y en el caso que ocurran, reducir drásticamente su impacto.

Se puede dividir la pelea contra el fuego en dos: la prevención de incendios y la contención de incendios. En ambos casos, es muy importante contar con herramientas capaces de predecir el comportamiento y la propagación del fuego, teniendo en cuenta las condiciones particulares del lugar donde se desarrolla.

Según [8], existen una serie de puntos que resumen aspectos del comportamiento del fuego que pueden ser utilizados en las operaciones de contención del fuego o quema controlada:

- El tiempo que tarda el fuego desde que comienza hasta alcanzar su intensidad potencial es muy variable y depende mayormente de los cambios en la dirección del viento.
- Generalmente, mientras mayor sea el viento, mayor será el tiempo que tarde el fuego en alcanzar su intensidad potencial.
- Fuegos con un frente mayor a 200 metros alcanzarán su velocidad de propagación potencial en unos pocos minutos.
- Cuando el fuego alcanza un frente lo suficientemente ancho, su respuesta a un incremento sostenido en la velocidad del viento es muy rápida.

Las condiciones variables del viento que soplan el fuego en varias direcciones pueden cambiar el comportamiento del fuego dramáticamente. Particularmente, pueden causar el rápido crecimiento de la cabeza del fuego o incluso transformar un flanco en cabeza. La topografía también es un componente determinante de la velocidad de propagación del fuego. La velocidad de propagación se duplica cada 10 grados de incremento en la pendiente.

## **Prevención de incendios**

Muchos de los factores que influyen el comportamiento del fuego no son manipulables por el hombre. *“...La velocidad de propagación está afectada por la velocidad del viento, el contenido de humedad del combustible, el tamaño de las partículas del combustible, la altura de la vegetación, la densidad de las raíces del*

*combustible, el porcentaje de combustible muerto y la topografía...* [9]. La velocidad del viento y la topografía tienen un gran impacto sobre el fuego, sin embargo el hombre no las puede modificar. En cambio, se puede reducir el número de incendios removiendo una parte del combustible en determinadas áreas. Existen diversas formas de hacerlo, como por ejemplo, mediante una quema controlada de baja intensidad, cortando una selección de árboles o podando las ramas bajas y el matorral circundante. Las quemas controladas son el principal medio para la reducción del riesgo de incendio. *“...Se ha demostrado que al duplicar el combustible en un bosque se duplica la velocidad de propagación y se cuadruplica la intensidad del fuego... Dado que la cantidad de combustible disponible determina la cantidad de temperatura que puede ser liberada por el fuego, las quemas de baja intensidad para reducir la carga del combustible son un componente que puede ser utilizado para reducir el riesgo de fuego...”* [9].

Las quemas de baja intensidad para la reducción de combustible no se pueden llevar a cabo de forma aleatoria. Hay una serie de factores que ayudan a decidir cuál es el momento indicado para realizar una quema controlada, siendo el clima el más importante ya que lo que se intenta es evitar que el fuego esté fuera de control.

## **Contención de incendios**

*“...La fase de crecimiento inicial del fuego puede proveer una oportunidad única para la extinción de incendios que serían imposibles de controlar una vez que alcanzan su máxima intensidad y velocidad de propagación...”* [10]. *“...La incapacidad de detectar un incendio en las etapas iniciales y realizar acciones de contención rápidas, agresivas y eficaces es uno de los factores más limitantes en el control de los incendios en el mundo...”* [11]. Esto demuestra que ante una situación de incendio, se debe actuar con rapidez y resolución. En algunos casos, no se logra actuar con velocidad o de manera correcta. Esto puede suceder porque el fuego se produce en áreas con acceso limitado y en la mayor parte de los casos porque el plan de contingencia no es el adecuado.

Para proveer una respuesta efectiva a los incendios que se pudieran producir, se deben tener en cuenta, según [11], cuatro etapas de análisis y evaluación: 1) determinar el potencial de fuego y riesgo, 2) detectar el inicio del fuego, 3) monitorear el fuego activo, y 4) realizar evaluaciones posteriores al fuego.

El potencial de fuego cuantifica la posibilidad de que se produzca fuego en caso de ignición y depende de la cantidad de combustible vivo o muerto y su contenido de humedad. La cantidad de vegetación se podría estimar utilizando algún mecanismo de detección remota, en lo posible de alta resolución. Una vez obtenido el mapa de cobertura base, se pueden monitorear los cambios a medida que pasa el tiempo. El contenido de humedad de la vegetación muerta se estima en base a las condiciones climáticas locales.

Para evitar incendios de gran magnitud, difíciles de controlar, se deben llevar a cabo acciones de supresión de manera inmediata. Los encargados de controlar el fuego deben ser capaces de planificar estrategias de protección adecuadas para la zona, estableciendo como prioridad las actividades de prevención y reducción de riesgo de incendio.

El inicio del fuego puede ser detectado por sensores satelitales, a través de las bandas visibles, térmicas o del infrarrojo medio, o por humanos. Una vez detectado el fuego, es necesario monitorearlo de forma tal de poder determinar las acciones necesarias para su extinción. El monitoreo incluye el mapeo del crecimiento y cambio del perímetro del fuego activo.

Una vez lograda la extinción, se debe determinar el alcance y el impacto del fuego. Con esta información se pueden modificar los mapas de vegetación base, usados para el análisis y la evaluación. Además, esta información puede ser de mucha utilidad para la rehabilitación de las áreas quemadas.

## Modelos matemáticos

*“... Aunque tenemos un conocimiento general de los factores que influyen en el comportamiento del fuego, las interacciones de estos factores y la manera en que el fuego se comporta son muy complejas. Como consecuencia, el comportamiento y la severidad del fuego pueden ser comprendidos y predichos en términos generales, pero no se pueden realizar predicciones exactas...”* [2]. Se han desarrollado distintos modelos para predecir el comportamiento del fuego que son ampliamente usados ya que han demostrado ser herramientas de gran utilidad. *“...Se utilizan modelos en los distintos aspectos del manejo del fuego: a) antes que se produzca el fuego, para calcular el riesgo de incendio, b) antes que se produzca el fuego, para entrenar a los bomberos y crear un escenario de entrenamiento, c) cuando se produce el fuego, para planificar estrategias de extinción...”* [12].

Cuando se construye un modelo, lo primero que se hace es definir la meta del modelo. Esto incluye definir su alcance, los parámetros de entrada, qué procesos físicos se van a tener en cuenta y cuáles van a ser ignorados, los parámetros de salida necesarios y algún escenario para la prueba. Hoy en día existen numerosos modelos que son utilizados para comprender y caracterizar el comportamiento del fuego. Estos modelos están clasificados según [12] en:

**Modelos empíricos:** Un modelo empírico está basado principalmente en estadísticas. Predice el comportamiento en base a condiciones promedio y acumulando el conocimiento obtenido en fuegos experimentales o fuegos históricos. Están limitados porque sólo pueden proveer una representación del comportamiento del fuego en aquellos contextos para los cuales se han recolectado datos previamente. *“...La caracterización del frente del fuego está estáticamente relacionada con parámetros relevantes como el tipo de combustible, la carga, el contenido de humedad, la velocidad del viento y dirección, y la inclinación del suelo...”* [13]

El modelo empírico más conocido es el modelo de McArthur para pastizales y bosques. Este modelo no incluye ningún mecanismo físico sino que es puramente una descripción estática de los incendios de prueba. Se puede esperar que una predicción usando un modelo empírico sea bastante precisa si el área de estudio está razonablemente representada en el modelo.

**Modelos físicos:** Un modelo físico está basado en principios físicos de la dinámica de fluidos y las leyes de conservación de la energía y de la masa. Este tipo de modelos tienen la capacidad de predecir con más exactitud y en un dominio más amplio que los modelos empíricos. Sin embargo, se requiere un conocimiento adecuado de las relaciones físicas subyacentes para lograr el objetivo deseado.

**Modelos semi-empíricos:** Un modelo semi-empírico está basado en leyes físicas, pero está enriquecido con algunos factores empíricos. El modelo más utilizado es el modelo de Rothermel, que es la base de muchos sistemas ampliamente utilizados como BEHAVE fire behavior prediction system, FARSITE fire area simulation, National Fire Danger Rating System (NFDRS), etc.

A pesar de ofrecer mucha ayuda, los modelos presentan una serie de limitaciones en el uso práctico que deben ser tenidas en cuenta. Como los modelos son abstracciones de la realidad, y no la realidad misma, las predicciones obtenidas

pueden tener errores de precisión. Los modelos, por necesidad, simplifican mucho de lo que sucede en la realidad para facilitar la comprensión del proceso. Incluso cuando el modelo es casi perfecto, si no se cuenta con datos precisos, la predicción realizada está limitada. Los datos de entrada del modelo deberían ser exactos para obtener una predicción correcta. *“...Los mapas de combustibles más detallados normalmente tienen una resolución de 30 metros aproximadamente, pero esta escala no es capaz de reflejar la variabilidad dentro del área, como concentraciones densas de combustible o matorrales de árboles. Esta variabilidad podría ser importante y podría tener consecuencias significativas sobre el crecimiento del fuego pero no es tenido en cuenta para el modelado...”* [2]. También se debe tener en cuenta que *“...los modelos de propagación basan su progreso asumiendo como verdaderos todos los pasos de la evolución del perímetro. Esto desencadena una acumulación progresiva de errores. Cada modelo, de acuerdo a los errores observados al ser validados con fuegos reales, tiene un tiempo de simulación bajo el cual el error acumulado es aceptable...”* [13].

## Los incendios en Argentina

El Plan Nacional de Manejo de Fuego de Argentina (PNMF), dependiente de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, realizó en el año 2000 una regionalización del país. A partir de ese año, todos los datos relacionados a los incendios producidos en nuestro país se presentan agrupados según dicha regionalización. La figura 2.3, tomada de [14], presenta la regionalización de Argentina.

La Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación determinó hace ya varios años, que el tipo de vegetación en la Argentina se divide en:

**Bosque:** agrupación de plantas en las que predominan los árboles u otra vegetación leñosa cuya cobertura es de al menos el 20% de la superficie.

**Bosque nativo:** bosque que ha evolucionado a partir de organismos que ya estaban en el lugar (predominio de especies autóctonas) y cuya cobertura es de al menos el 20% de la superficie y la altura de los árboles a la madurez es mayor o igual a 7 metros.

**Bosque cultivado:** plantación forestal obtenida mediante la implantación de árboles o estacas.

**Pastizal:** terreno de pastos, en el que el combustible principal es hierba, sin importar la altura.

**Arbustal o matorral:** terreno con plantas que se diferencian de las hierbas por sus tallos persistentes y leñosos, y de los bosques por su poca altura (hasta 7 metros) y su tendencia a ramificarse desde la base.

Todos los análisis realizados desde el año 2000, basan su estudio de los incendios en la Argentina en la regionalización del país y en los tipos de vegetación mencionados anteriormente. Anualmente, la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable, publica la Estadística de Incendios Forestales donde se evalúan la cantidad de incendios producidos, la superficie afectada por tipo de vegetación y las principales causas.

**1. Regional Norte:**

- Santiago del Estero
- Chaco
- Formosa
- Santa Fe

**2. Regional NOA:**

- Jujuy
- Salta
- Catamarca
- Tucumán

**3. Regional NEA:**

- Misiones
- Corrientes
- Entre Ríos

**4. Regional Centro:**

- San Juan
- San Luis
- Córdoba
- La Rioja

**5. Regional Pampeana:**

- La Pampa
- Mendoza
- Buenos Aires

**6. Regional Patagónica:**

- Neuquén
- Río Negro
- Chubut
- Santa Cruz
- Tierra del Fuego

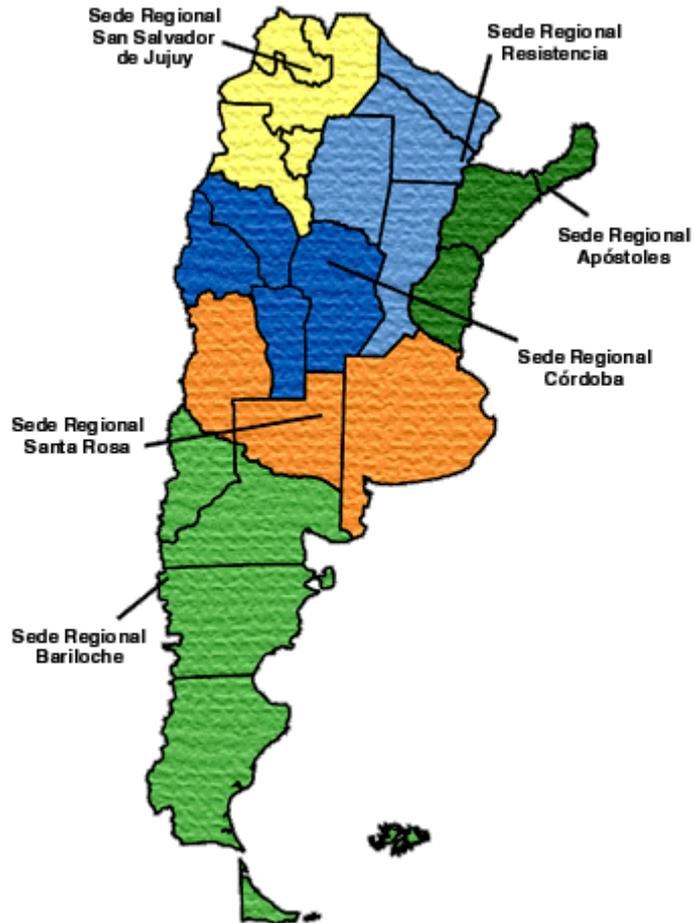


Figura 2.3. Regionalización de la Argentina del PNMF

Las tablas de las figuras 2.4 y 2.5 fueron tomadas de la Estadística de Incendios Forestales 2006 [15]. Dichas tablas indican la cantidad de incendios producidos y las hectáreas afectadas durante el año 2006 en todo el país. La figura 2.4 muestra la cantidad de hectáreas afectadas por tipo de vegetación para cada regional. La figura 2.5 muestra el porcentaje de las causas de los incendios por regional.

Para el año 2006 en la regional Pampeana se concentró la mayor cantidad de incendios, los cuales alcanzaron el 34%, seguida por la Patagónica con el 19%, luego la Norte con el 16%, NOA con un 14% y un 17% restante en las regionales NEA y Centro. Si se considera la superficie total afectada del año 2006, la regional Pampeana concentró el 49%, la Patagónica el 20%, la regional Centro un 12% y el 19% restante se distribuyó entre Norte, NOA y NEA.

Regional	Cantidad	Hectáreas					
		Superficie total	Bosque nativo	Bosque cultivado	Arbustal	Pastizal	Sin determinar
Porcentaje		100,00%	17,52%	2,68%	22,75%	57,05%	0,00%
Total	11243	746829,2628	130866,5741	20015,2618	169907,7093	426039,279	0,4386
Centro	706	90940,8	39438	124	15281,75	36097,05	-
NEA	1225	17382,66	368,4	11075,45	890,2	5048,61	-
NOA	1560	54040,739	8091,935	2037,195	15019,044	28892,565	-
Norte	1756	65633,175	28343,5	4857	1328,875	31103,8	-
Pampeana	3832	365907,2424	39724,824	1381,1577	69866,2558	254935,0049	-
Patagónica	2164	152924,6464	14899,9151	540,4591	67521,5845	69962,2491	0,4386

Figura 2.4. Hectáreas afectadas por regional, por tipo de incendio

Regional	Cantidad	Causas			
		Negligencia	Intencional	Natural	Desconocida
Porcentaje		25,56%	16,09%	4,75%	53,60%
Total	11243				
Centro	706	31,73%	64,02%	3,12%	1,13%
NEA	1225	45,96%	17,80%	0,08%	36,16%
NOA	1560	35,71%	9,87%	3,08%	51,35%
Norte	1756	17,14%	35,02%	3,36%	44,48%
Pampeana	3832	16,70%	6,00%	10,13%	67,17%
Patagónica	2164	27,22%	6,47%	0,74%	65,57%

Figura 2.5. Porcentaje de causas de incendio por regional

A su vez, la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable publica las Series Estadísticas Forestales que complementan la información que suministra el Anuario de Estadística Forestal y permiten evaluar el comportamiento histórico de las principales características del sector forestal. Por ejemplo, de las Series Estadísticas Forestales 2000-2006 [16] se tomaron las figuras 2.6 y 2.7 las cuales representan la evolución de las variables cantidad y superficie total afectada en el período 2000-2006 y la evolución de las variables superficie por tipo de vegetación en el mismo período.

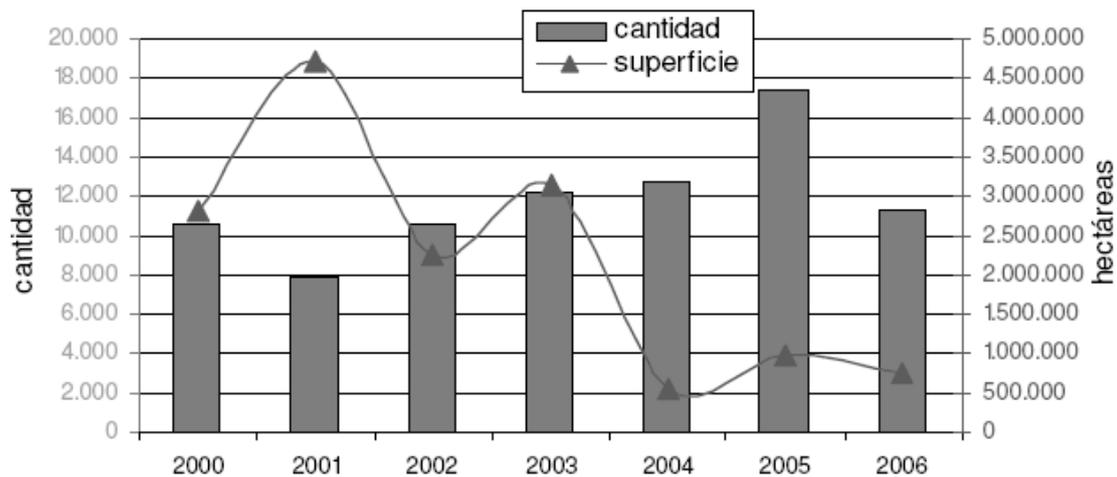


Figura 2.6. Superficie total y cantidad de incendios por año

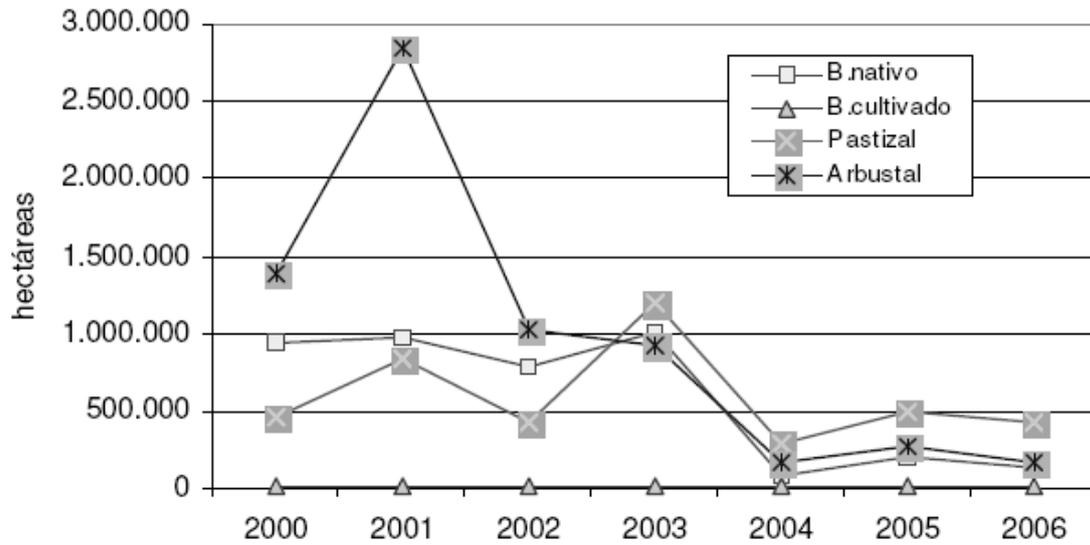


Figura 2.7. Cantidad de hectáreas por tipo de vegetación por año

Según se concluye en [15], la disminución en la cantidad de incendios en el año 2006 se debe entre otras causas, a la mejoría en las campañas de prevención, el equipamiento y la capacitación aunque también incidieron las condiciones climáticas favorables como más lluvias y mejores condiciones atmosféricas. El decrecimiento en la superficie afectada por incendios se debió a un mayor control y prevención. Por consiguiente, al mejorar la capacidad de predicción del comportamiento del fuego, en los próximos años se podría reducir aún más la cantidad de incendios y la cantidad de hectáreas afectadas en todo el país.

# Capítulo 3

## Predicción del comportamiento del fuego

El fuego es un fenómeno extremadamente complejo y por lo tanto, predecir su comportamiento no es una tarea sencilla. La propagación del fuego depende de muchos factores, los cuales se pueden dividir en: condiciones climatológicas, características del combustible y topografía. Cada uno de estos factores influencia el comportamiento del fuego de distinta manera y con diferente intensidad, dependiendo de las características particulares del fuego.

El triángulo del ambiente del fuego representa la influencia de las condiciones climatológicas, el combustible y la topografía en el fuego. Éstos tres factores, junto con el fuego mismo, que está en el centro del triángulo, y la interacción entre ellos componen el ambiente del fuego. En la figura 3.1 se puede ver el triángulo del ambiente del fuego.

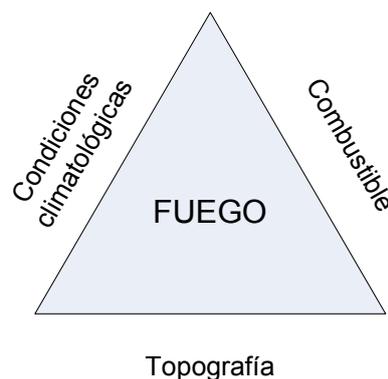


Figura 3.1. El triángulo del ambiente del fuego

No es lo mismo predecir el comportamiento del fuego en un incendio forestal que en un incendio en pastizales. Los factores que afectan cada tipo de incendio pueden variar, e incluso algunos factores determinantes para una predicción pueden ser despreciables en otra. Por ejemplo, según un estudio realizado en [17], el tipo de combustible o pasto no parece ejercer influencia sobre la velocidad de propagación del

fuego en pastizales, mientras que el tipo de vegetación puede ser de gran influencia en un incendio forestal. Por lo tanto, no es posible generalizar la influencia de estos factores en el fuego, sino que se debe analizar el fuego para cada contexto particular y así poder determinar cómo ejercen influencia los factores en ese entorno.

Existen numerosos algoritmos matemáticos para predecir el comportamiento del fuego. No existe un único algoritmo capaz de predecir el comportamiento del fuego en cualquier circunstancia, sino que cada algoritmo es aplicable a un número limitado de incendios que tienen determinadas características.

## **Factores que influyen en el comportamiento**

Ya se vio que existen tres grupos de factores que influyen en el comportamiento del fuego: las condiciones climatológicas, el combustible y la topografía. Teniendo en cuenta la posibilidad de manipulación, por parte del hombre, de estos factores para reducir el riesgo de incendio, se los puede clasificar como estáticos o dinámicos. El único factor que se puede modificar es el combustible, ya que se lo puede cortar, quemar, retirar, etc. De esa manera, se puede modificar la carga del combustible para evitar incendios de gran intensidad. En cambio, las condiciones climatológicas y la topografía son estáticas y no pueden modificarse bajo ninguna circunstancia.

Ya se aclaró que no todos los factores tienen el mismo impacto sobre el fuego, y que algunos tienen más influencia que otros. Los factores que tienen un mayor impacto sobre el comportamiento del fuego son la dirección y velocidad del viento y la topografía ya que pueden modificar su comportamiento drásticamente.

### ***Condiciones climatológicas***

El viento, la humedad atmosférica, las precipitaciones y la temperatura son los factores climatológicos más destacados que afectan el comportamiento del fuego. El viento es el factor climatológico con mayor influencia, ya que determina la velocidad y la dirección de propagación y establece la forma del fuego.

Bajo condiciones inestables, el viento puede fluctuar rápidamente, a veces haciéndolo girar 25 a 30 grados de la dirección que prevalece y variando un 50% sobre y debajo de la velocidad media. La naturaleza esporádica del viento en condiciones inestables hace que el comportamiento del fuego sea errático y más difícil de estimar y suprimir. La figura 3.2 muestra como un cambio en la dirección del viento de noreste a sudeste puede causar que un flanco del fuego se convierta en un nuevo frente de fuego mucho más grande y difícil de controlar que el frente original. El viento también puede influenciar la probabilidad de ocurrencia de nuevos focos de incendio. Los nuevos focos pueden provocarse por chispas transportadas por el viento más allá del perímetro del fuego.

La humedad relativa es una medida de la humedad en el aire y es importante porque afecta el contenido de humedad del combustible y por consiguiente su inflamabilidad. Por ejemplo, en condiciones secas, la humedad del combustible se transfiere a la atmósfera y el combustible se vuelve cada vez más inflamable.

La temperatura, así como también la humedad relativa, afecta el comportamiento del fuego indirectamente influenciando el contenido de humedad del combustible y facilitando las formaciones de viento local. Cuando la temperatura aumenta, el contenido de humedad del combustible tiende a decrecer y cuanto más alta la temperatura del combustible, más fácil se alcanza la temperatura de ignición.

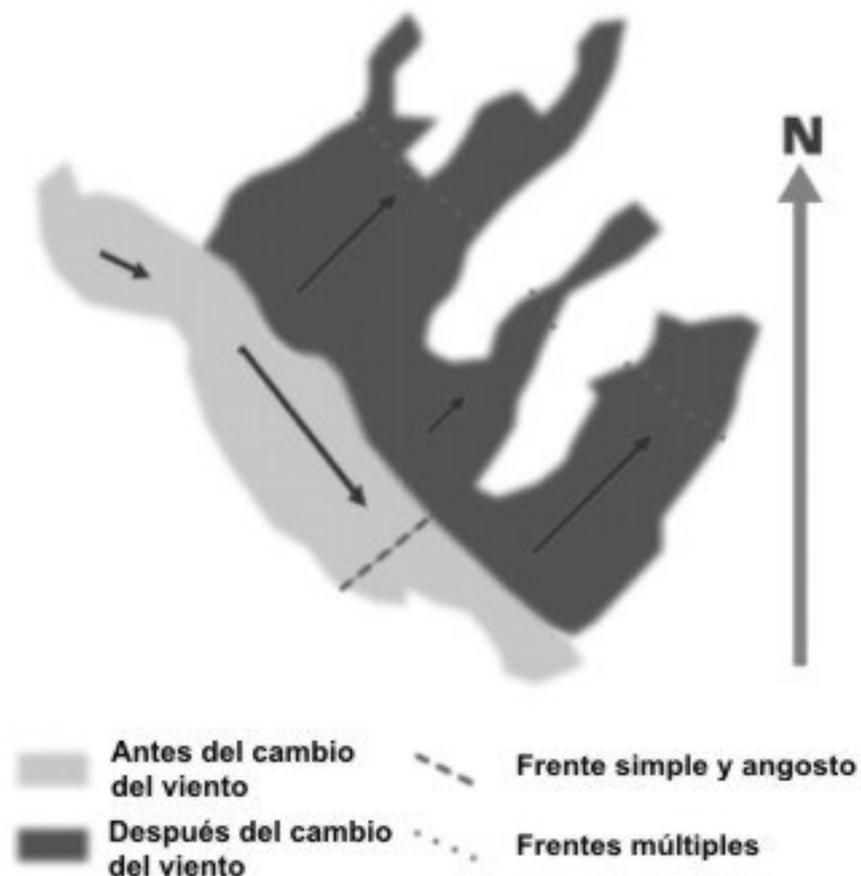


Figura 3.2. Efectos indeseables del viento

Las condiciones climatológicas son los factores más inconstantes que influyen el comportamiento del fuego. Dado los cambios continuos e inconsistentes que sufren permanentemente, son poco predecibles y por lo tanto son los más complejos de modelar.

### **Combustible**

El tipo y la cantidad de combustible pueden jugar un papel importante para determinar el tipo de incendio y la intensidad del fuego. La carga de combustible varía espacial y temporalmente. Varía anualmente ya que algunos años pueden ser más secos o húmedos que otros y puede variar incluso entre las distintas estaciones del año. Los años más húmedos pueden presentar una carga de combustible mayor y con más continuidad que los años más secos. La figura 3.3, tomada de *Johnson, A. 2002. North Australian fuel guide: Sturt Plateau and Victoria River district. Tropical Savannas CRC, Darwin*, muestra distintas cargas de combustible en pastizales (kg/ha).

*“...La mayor parte de los combustibles poseen un ciclo de vida en el cual anualmente la planta muere o se vuelve inactiva y se seca...”* [18] El grado de sequedad indica que tan verde está el combustible. A diferencia del contenido de humedad del combustible, la cual varía diariamente, las variaciones de sequedad se dan por los cambios de estación. *“...El contenido de humedad de los combustibles finos como las pasturas o cosechas afectan el potencial de ignición y las características de propagación del fuego. La humedad afecta estos parámetros básicamente incrementando la cantidad de calor que debe ser absorbido por el*

combustible para alcanzar la temperatura de ignición... A medida que decrece el contenido de humedad de la planta, se incrementan la intensidad y la velocidad de propagación del fuego..." [18].

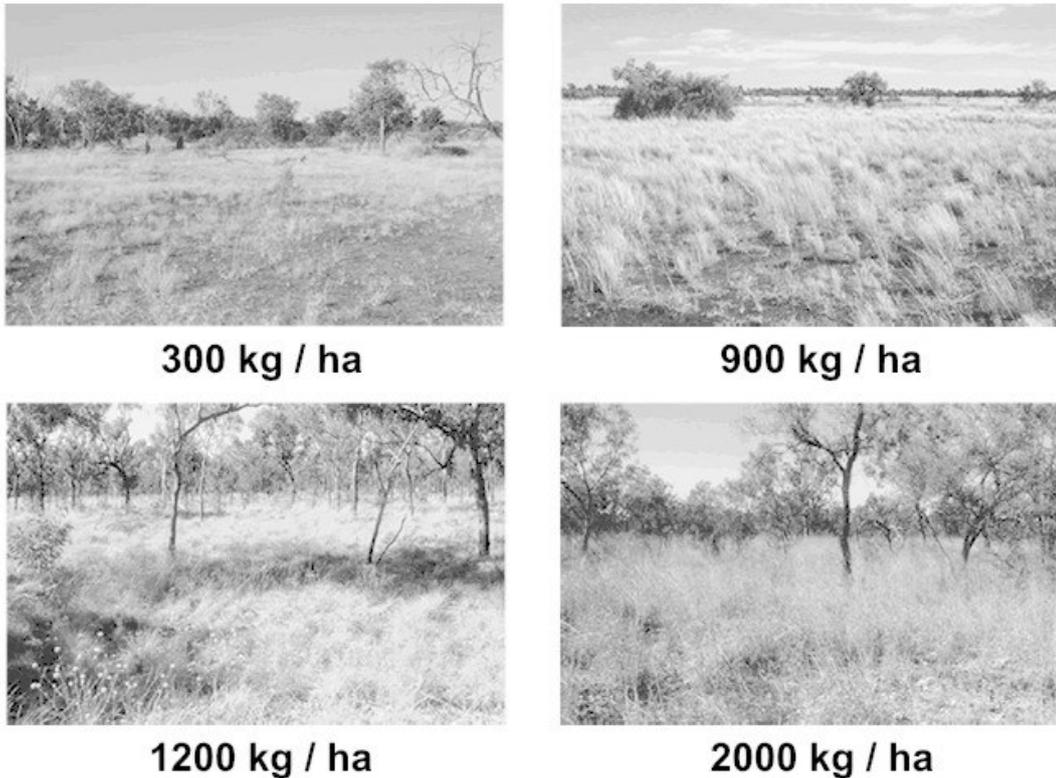


Figura 3.3. Diferencias en la carga de combustible

En [19] se agrupan los cambios en el tiempo del combustible en 5 categorías: cambios de sucesión, cambios anuales, cambios estacionarios, cambios diurnos y cambios abruptos. Los cambios de suceso ocurren en el orden de las décadas o siglos; la vegetación y el combustible cambian debido a patrones normales de sucesión. Los cambios anuales ocurren en el orden de los años; los efectos de la sequía se pueden ir acrecentando en el transcurso de los años. Los cambios estacionarios ocurren semanal o mensualmente a lo largo del año; cuando el componente verde del combustible vivo se va secando. Los cambios diurnos ocurren dentro del ciclo de 24 horas; el contenido de humedad del combustible fino cambia entre el día y la noche. Finalmente, los cambios abruptos son inmediatos; la ignición de fuego dada por la caída de un rayo puede ser un ejemplo de ello.

### **Topografía**

La topografía afecta la manera en que se inicia y se propaga un incendio. Los factores topográficos que afectan el comportamiento del fuego incluyen la inclinación del suelo, la elevación, el aspecto y la configuración de la tierra.

Las inclinaciones del suelo afectan el desarrollo del fuego ya que el fuego se propaga con más facilidad cuesta arriba que hacia abajo. Esto sucede porque las llamas están más cerca del combustible y el fuego lo precalienta. Se podría decir que

cada 10% de incremento en la inclinación del suelo, se duplica la velocidad de propagación del fuego. En caso del fuego que va cuesta abajo sucede lo contrario.

En cuanto al aspecto topográfico y la configuración de la Tierra, puede ocurrir que favorezca, entorpezca e incluso impida la propagación del fuego. Si el aspecto se presenta de forma continua, sin ninguna barrera que restrinja la propagación, el fuego se va a esparcir libremente. En cambio, ante la presencia de un cordón montañoso, un río o cualquier cambio abrupto en la configuración del suelo, el desarrollo del fuego se puede ver altamente comprometido ya que actúan como barreras naturales.

Se puede decir que la topografía es una variable constante, aunque puede cambiar espacialmente de manera brusca. Esto permite predecirla y modelarla fácilmente.

## **Algoritmos matemáticos para la predicción**

Los factores que influyen en el fuego son muchos, y todos ellos tienen un impacto sobre su comportamiento con diferentes características. Un modelo es una aproximación, lo más similar posible, del mundo real. Al sufrir un proceso de abstracción, cuando se desarrolla un modelo o algoritmo matemático, los factores que ejercen una influencia despreciable para determinadas circunstancias, no son tenidos en cuenta.

La variedad de algoritmos existentes es muy extensa e incluso en un futuro se pueden diseñar nuevos algoritmos. Cada algoritmo basa su estimación en un conjunto de factores determinados, tiene un dominio de aplicación y una serie de restricciones. Por lo tanto, a la hora de seleccionar el algoritmo más apropiado para una estimación determinada se deben tener en cuenta los criterios bajo los cuales fue creado el algoritmo.

A modo de base para el estudio del comportamiento del fuego, a continuación se presentan una serie de algoritmos para la predicción de la velocidad de propagación del frente del fuego y un par de algoritmos para la estimación del perímetro del fuego.

### ***Velocidad de propagación del frente del fuego***

Se conoce como velocidad de propagación del frente del fuego a la velocidad de propagación del fuego que se extiende en la misma dirección que el viento. Los algoritmos para la predicción de la propagación del frente del fuego se caracterizan por su simplicidad. Normalmente realizan la estimación en base a un pequeño conjunto de factores que ejercen influencia sobre el fuego. Los factores varían básicamente por el dominio de aplicación del algoritmo.

A continuación se presentan un conjunto de algoritmos para predecir la velocidad de propagación del frente de fuego en pastizales y en bosques. Existen distintos tipos de vegetación y cada uno de estos tipos debería tener su propio algoritmo, desarrollado especialmente y teniendo en cuenta las características particulares de ese tipo de vegetación.

Ninguno de los algoritmos presentados tiene en cuenta barreras naturales o artificiales, que impidan la libre extensión del fuego como puede ser un río o una ruta. En dicho caso se debería utilizar otro algoritmo que las tome bajo consideración.

### **Propagación del fuego en pastizales (Cheney et al.)**

Cheney, Gould y Catchpole propusieron en 1998 un modelo empírico para predecir la velocidad de propagación del fuego en pastizales. La estimación se realiza en base a

la velocidad de viento a 10 metros, el contenido de humedad del combustible muerto y el grado de sequedad del pasto en tres tipos de pastura definidos. El modelo no tiene en cuenta las características del combustible (carga y especie del combustible) ya que luego de un extenso estudio realizado en 1993, los autores determinaron que para un modelo práctico la influencia del combustible puede ser descripta separando los combustibles en pasturas naturales imperturbadas, pasturas que han sido cortadas o pastadas y pasturas que han sido considerablemente cortadas o que son discontinuas.

“...La velocidad de propagación del fuego en pastizales depende del crecimiento inicial del fuego, el tipo de pastura, la velocidad del viento, y el contenido de humedad del combustible vivo y muerto...” [20]. Una vez completada la fase de crecimiento, el modelo propuesto puede ser escrito de manera simplificada de la siguiente manera:

$$R_{sch} = f(i, U_{10}, M_f, C)$$

donde,

$R_{sch}$  = velocidad de propagación de Cheney et. al

$i$  = tipo de pastura

$U_{10}$  = velocidad del viento a 10 metros

$M_f$  = contenido de humedad del combustible muerto

$C$  = grado de sequedad del pasto

Este modelo presenta una restricción ya que parece sobre-predecir cuando se comparan los resultados obtenidos para incendios en pasturas que han sido cortadas o pastadas a velocidades del viento moderadas (25 – 45 km/h).

### **Propagación del fuego en pastizales y bosques (McArthur)**

Alan G. McArthur llevó a cabo un extenso estudio sobre el comportamiento del fuego a principios de 1960. A partir de este estudio, que incluía los resultados de más de 800 incendios experimentales y observaciones de incendios, construyó una serie de tablas que permitieron predecir el riesgo de incendio y el posible comportamiento del fuego.

La primera versión de las tablas, llamadas McArthur Fire Danger Rating Systems FDRS, se comenzó a utilizar en 1967 y de ahí en más las tablas fueron mejorando con el tiempo. Hoy en día se utilizan ampliamente 3 de ellas: Mk4 y Mk5 para incendios en pastizales y Mk5 para incendios forestales. Según [21], “Los índices de riesgo de incendios de McArthur sólo son aplicables en bosques y pastizales. Para otros tipos de vegetación, como pastizales donde crecen arbustos y otras pequeñas plantas o pastizales ásperos con arbustos bajos, se necesitan desarrollar nuevos algoritmos...”.

Las métricas FDRS se utilizan principalmente para estimar el riesgo de incendio y por consiguiente estipular los niveles de alerta y respuesta ante un posible incendio. El uso secundario, aunque no menos importante, de las métricas es para predecir el comportamiento del fuego, o más puntualmente la velocidad de propagación del frente del fuego.

### **Mk4 y Mk5 para incendios en pastizales**

El Mk4 para pastizales es una métrica que no sólo predice el riesgo de incendio en base al grado de sequedad del pasto, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento, sino que también provee un estimado para la velocidad de propagación del frente del fuego en suelos con poca o sin inclinación.

De forma simplificada, se puede obtener la velocidad de propagación del frente del fuego de un incendio en pastizales de esta forma:

$$R_{Mk4G} = f(C, T, H, U_{10})$$

donde,

$R_{Mk4G}$  = velocidad de propagación de McArthur para incendios en pastizales

C = grado de sequedad del pasto (0 – 100%)

T = temperatura (0 – 45°C)

H = humedad relativa (0 – 100%)

$U_{10}$  = velocidad del viento a 10 metros

El Mk5 para pastizales es una versión posterior al Mk4 para pastizales que incorpora la carga del combustible a la estimación. De manera simplificada, se obtiene la velocidad de propagación del frente del fuego de la siguiente manera:

$$R_{Mk5G} = f(C, T, H, U_{10}, P_f)$$

donde,

$R_{Mk5G}$  = velocidad de propagación de McArthur para incendios en pastizales

C = grado de sequedad del pasto (0 – 100%)

T = temperatura (0 – 45°C)

H = humedad relativa (0 – 100%)

$U_{10}$  = velocidad del viento a 10 metros

$P_f$  = carga del combustible (0 – 25 toneladas/hectárea)

El grado de sequedad del pasto se estima en base al número de áreas verdes. Las pasturas que están 100% secas son aquellas que no tienen áreas verdes.

Cuando el viento cambia abruptamente, el comportamiento del fuego es errático, particularmente en los combustibles finos que responden a los cambios en el viento rápidamente. Por lo tanto, las estimaciones obtenidas bajo dichas características pueden diferir de la realidad.

Estas métricas fueron diseñadas para ser aplicadas en pastizales sin pendiente o con una leve inclinación. La velocidad de propagación se duplicará con 10° de pendiente y se cuadruplicará en una pendiente de 20°.

### **Mk5 para incendios forestales**

El Mk5 para incendios forestales permite estimar la velocidad de propagación del frente del fuego en base a la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del viento, la carga del combustible, el factor de sequía y la topografía. El factor de sequía es una métrica del combustible disponible, influenciado por las precipitaciones recientes y la época del año. Aunque McArthur no fue capaz de cuantificar con exactitud el efecto de la topografía en el desarrollo del fuego, proveyó un método de estimación basado en la experiencia para los efectos del suelo.

De forma simplificada, se puede obtener la velocidad de propagación del frente del fuego de un incendio forestal de la siguiente manera:

$$R_{Mk5F} = f(T, H, U_{10}, P_f, S, G)$$

donde,

$R_{Mk5F}$  = velocidad de propagación de McArthur para incendios forestales

T = temperatura (0 – 45°C)

H = humedad relativa (0 – 100%)

$U_{10}$  = velocidad del viento a 10 metros (0 – 70 km/hr)

$P_f$  = carga del combustible (toneladas/hectárea)

S = factor de sequía (0 – 10)

G = inclinación del suelo (°)

La inestabilidad atmosférica no está considerada en el Mk5 para incendios forestales. Sin embargo, la velocidad de propagación estimada con esta métrica considera situaciones inestables y puede ser menor para condiciones de estabilidad.

### ***Estimación del perímetro del fuego***

Los algoritmos propuestos hasta el momento fueron diseñados para estimar la velocidad de propagación del frente del fuego. Los algoritmos  $R_{sCh}$ ,  $R_{Mk4G}$  y  $R_{Mk5G}$  estiman la velocidad de propagación del fuego en pastizales y el algoritmo  $R_{Mk5F}$  la estima en incendios forestales. Sin embargo, conocer la velocidad de propagación del frente de fuego puede no ser suficiente para determinar el conjunto de acciones que se deben llevar a cabo para lograr la extinción de un incendio. Conocer la velocidad de propagación del frente, la cola y los flancos del fuego o incluso saber si el fuego mantiene la forma de una elipse o toma una forma totalmente irregular conlleva a una óptima predicción y por ende a la posibilidad de realizar un ataque exitoso o realizar una quema controlada favorable. Por esta razón se incluyen algoritmos para la estimación del perímetro del fuego, algoritmos que indican qué forma toma el fuego luego de haber transcurrido un tiempo determinado. Claramente, obtener dicho

resultado es mucho más complejo, pero también lo es el contenido de la información obtenida.

Algunos algoritmos para la estimación del perímetro del fuego basan su estimación en la velocidad de propagación del frente del fuego. A continuación se presentan dos algoritmos, uno que basa la estimación en la velocidad del frente del fuego y otro que es totalmente independiente y basa su estimación en un conjunto de factores de influencia.

## Principio de Huygens

En [22] se propone un algoritmo de expansión del perímetro del fuego basado en el principio de propagación de ondas de Huygens. El algoritmo se basa en que el perímetro del fuego puede ser visto como un conjunto discreto de puntos los cuales se aproximan a una curva. En el tiempo  $t$ , cada punto del perímetro se expande como una pequeña elipse. El nuevo perímetro del fuego en el tiempo  $t + \Delta t$  está definido por el contorno que envuelve las elipses.

El algoritmo presupone que cada punto se propaga como una elipse independientemente de sus vecinos. “... Los parámetros de la elipse en cada punto del perímetro del fuego pueden ser estimados de la velocidad de propagación del frente del fuego y la velocidad del viento...” [22]. La figura 3.4 muestra cómo se calcula el nuevo perímetro en el tiempo  $t + \Delta t$ .



Figura 3.4. Expansión del perímetro del fuego con el principio de Huygens

Este algoritmo puede ser aplicado bajo condiciones topográficas y meteorológicas diversas y con una gran variedad de combustibles ya que lo único que se necesita es un algoritmo que estime la velocidad de propagación del frente del fuego para dichas características. Sirve para completar de manera sustancial la información obtenida los algoritmos descritos anteriormente. La confiabilidad del algoritmo de Huygens está estrechamente relacionada con la confiabilidad del algoritmo utilizado para obtener los parámetros de las elipses, o sea la velocidad de propagación del frente del fuego.

## Modelo Normal

En su trabajo “*Forest Fire Management Using Geospatial Information System*”, F. Hoseinali y M. A. Rajabi [23] sugieren un modelo flexible para la predicción del comportamiento del fuego que se basa en la teoría de percolación. “... La teoría de percolación muestra como la interconexión de un sistema afecta su comportamiento...” [24]. El dominio se representa mediante una matriz  $M$  de  $n \times m$ . Cada posición de la matriz tiene 4 vecinos más próximos, aquellos con quienes comparte un lado. Los vecinos que están en diagonal son los siguientes vecinos más próximos. “... Cuando se simula el comportamiento del fuego, sólo los vecinos más próximos son afectados por los vecinos en llamas...” [24].

En el modelo normal se asume que cuando el fuego comienza a arder, su intensidad es baja, luego aumenta hasta alcanzar la intensidad máxima y finalmente disminuye hasta que se extingue. En el transcurso de la vida del fuego, una posición  $M[i,j]$  en llamas emite calor a los vecinos más próximos  $M[i-1,j]$ ,  $M[i,j-1]$ ,  $M[i+1,j]$  y

$M[i,j+1]$ . La cantidad de calor emitida depende del viento, la topografía, el índice de inflamabilidad, la temperatura ambiental y las precipitaciones. Si el calor recibido por una celda es mayor a su grado de inflamabilidad, comienza a arder y el proceso continúa hasta que el fuego se extingue por completo. La figura 3.5 ilustra este ciclo.

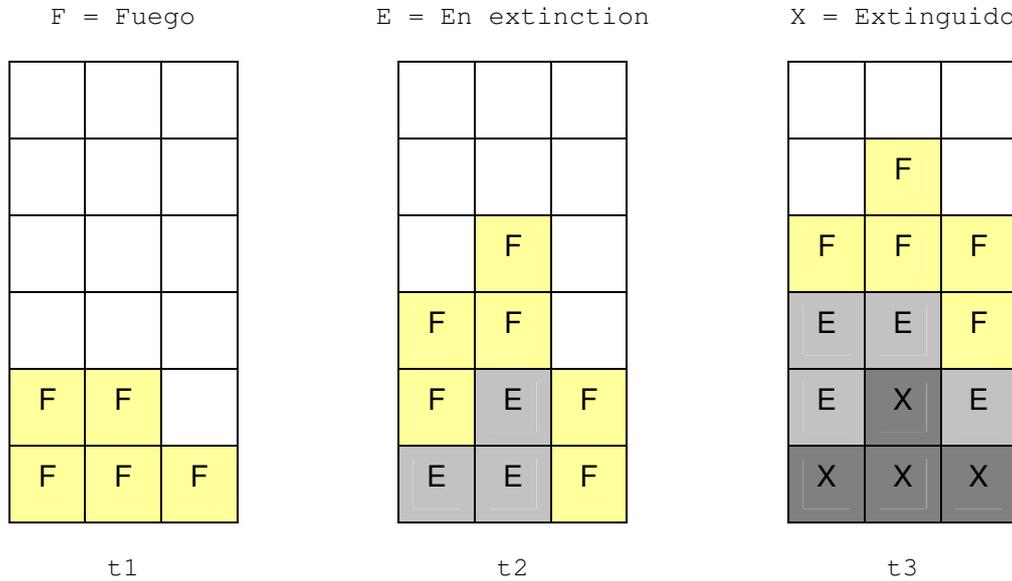


Figura 3.5. Ciclo del modelo Normal

De forma simplificada, se puede obtener una predicción del comportamiento del fuego de la siguiente manera:

**$M_{Normal} = f (U, DEM, I, T, P)$**

donde,

- $M_{Normal}$  = matriz de dominio resultante del modelo Normal
- U = dirección y velocidad del viento
- DEM = modelo digital de elevación (Digital Elevation Model)
- I = matriz de índices de inflamabilidad
- T = temperatura
- P = precipitaciones recientes

La matriz resultante representa la composición del incendio en el tiempo  $t + \Delta t$  estimada mediante el modelo Normal. Este modelo no depende de otro algoritmo, como es el caso del principio de Huygens. Es más complejo que los modelos para predecir la velocidad de propagación del frente del fuego, pero a su vez el resultado obtenido es más completo ya que estima la forma que toma el fuego transcurrida determinada cantidad de tiempo.

# Capítulo 4

## Un modelo orientado a objetos para la predicción del comportamiento del fuego en incendios

Ya se vio en los capítulos anteriores que para predecir el comportamiento del fuego en un lugar determinado, se debe contar con una descripción detallada del entorno donde se produce y con algún mecanismo que determine su posible comportamiento en esas circunstancias. La descripción del entorno sólo debe incluir aquellos datos relevantes para la predicción.

Para que un sistema capaz de predecir el comportamiento del fuego sea de utilidad, la información asociada debe ser lo más amplia y certera posible. Si se tiene un sistema que realiza estimaciones, pero no se cuenta con la información del entorno o esa información no es lo suficientemente precisa, el sistema pierde su eficacia y deja de cumplir con su propósito.

Además, un sistema de estas características tendría una gran aplicabilidad si no estuviera limitado a realizar estimaciones sólo en determinadas circunstancias, por ejemplo en incendios en pastizales o en incendios forestales únicamente. Lo más razonable sería poder realizar una estimación en cualquier entorno donde se pudiera producir un incendio, incluso en lugares no contemplados con anterioridad.

Al crear un sistema para predecir el comportamiento del fuego en cualquier circunstancia, la mejor opción es diseñar un Sistema de Información Geográfica o GIS. Según [25], *“...Un GIS es diseñado para coleccionar, almacenar, y analizar objetos y fenómenos para los cuales la ubicación geográfica es una característica importante o crítica para el análisis...”*. En este caso, toda la información asociada es naturalmente geográfica. Todos los factores que influyen el comportamiento del fuego, e incluso el fuego mismo, sólo tienen sentido en una posición geográfica determinada. Si no se trataran estos datos geográficamente, no servirían de nada ya que perderían su esencia.

## **Sistemas de Información Geográfica**

La complejidad de la información geográfica implica una simplificación que es ineludible cuando se modela la realidad. *“...Hoy en día la aplicación de GIS para el manejo de desastres se ha extendido considerablemente e incluso, en algunos casos, es inevitable... Los GIS son una herramienta muy poderosa para manejar información espacial, y han probado su potencial en el manejo de incendios forestales...”* [23]. Existen muchas aplicaciones GIS para el manejo de incendios forestales entre las cuales se destacan los GIS para determinar el riesgo o probabilidad de incendio, GIS para quemas controladas, GIS para la prevención de incendios y su extensión, GIS para la simulación de incendios, etc.

Los GIS para la predicción del comportamiento de incendios utilizan varias capas de información junto con diferentes modelos de estimación. Los modelos varían en su complejidad. Los modelos más simples tienen pocos parámetros y son fáciles de utilizar pero los resultados obtenidos pueden no ser suficientes o confiables. Los modelos muy complejos, que se basan en el detalle de las características físicas del fuego, basan la estimación en una mayor cantidad de parámetros y son mucho más confiables siempre y cuando se cuente con toda la información necesaria y esa información esté completa y actualizada. Por lo tanto, encontrar un modelo óptimo que utilice la mayor cantidad de parámetros y tenga un nivel de simplicidad aceptable es uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de diseñar un GIS para la predicción de incendios forestales.

## **Modelo Orientado a Objetos**

Básicamente lo que se busca lograr, con el diseño de un modelo Orientado a Objetos que prediga el comportamiento del fuego, es proporcionar un modelo para un sistema libre de restricciones de aplicabilidad. Eso es, un sistema que permita realizar estimaciones en cualquier dominio, haya sido previamente planificado o no. A continuación se tratan cada uno de los componentes involucrados en la predicción del comportamiento del fuego y se propone una forma de representarlos mediante el uso de objetos. Finalmente se unen todas las clases de forma tal de obtener el modelo de objetos completo.

## **Fenómenos continuos**

El fuego y los factores que afectan su comportamiento son fenómenos continuos ya que se extienden a lo largo de un espacio continuo. Almacenar y utilizar datos continuos en una computadora no es trivial. Esto se debe a que, en teoría, requiere medir el fenómeno en todas las posiciones pertenecientes al dominio, las cuales son naturalmente infinitas. Por lo tanto, se debe buscar alguna manera de representar dichos fenómenos de manera finita. *“...La forma más usual de manipular este tipo de información es mediante la creación de un muestreo de los datos. Se toman los valores asociados al fenómeno en determinadas posiciones dentro del área de estudio y el resto de los valores se calculan mediante algún método de estimación; el método de estimación utiliza los valores del muestreo como punto de partida para el cálculo...”* [26].

## **Arquitectura de campos continuos**

Los campos continuos permiten modelar y utilizar fenómenos continuos a partir de un muestreo de datos. *“...Los datos representados por campos continuos pueden ser de dos tipos: escalares y vectoriales. Un campo continuo escalar retorna datos unidimensionales, como por ejemplo un número. En cambio, un campo continuo vectorial retorna datos  $n$ -dimensionales, denotados por una tupla  $(d_1, d_2, \dots, d_n)$ ...”* [26].

Para simplificar la representación de los distintos campos continuos, se puede decir que todos los campos continuos, ya sean escalares o vectoriales, retornan datos n-dimensionales, con n mayor o igual a 1. Por ejemplo, se puede utilizar un campo continuo escalar para representar la temperatura atmosférica, donde para cada posición geográfica sólo se tiene un dato cuyo valor cae dentro del rango [0, 45]. En cambio, se puede utilizar un campo continuo vectorial para representar el viento, donde el valor en una posición tiene una magnitud y una dirección.

En [27] se propone una arquitectura orientada a objetos para la manipulación de campos continuos en el contexto de las aplicaciones geográficas. La figura 4.1 muestra la arquitectura allí propuesta, la cual contempla los aspectos de muestreo y representación de los datos y los métodos de estimación.

Un campo continuo debe tener un conjunto de muestras del fenómeno representado y algún mecanismo de estimación con el cual se estimarán los valores del fenómeno en los lugares no muestreados. Además debe tener un dominio de aplicación. Las estimaciones de los valores no muestreados se realizan en base a dos o más valores muestreados y el dominio de campo continuo representa un límite dentro del cual se pueden realizar estimaciones de valores. Podría suceder que se cuente con muestras que están fuera del dominio para lograr una mayor precisión en las interpolaciones cerca de los límites de dominio. La representación y el método de estimación utilizados para un fenómeno dependen de cada caso particular y de las características del fenómeno. En general existe un método de estimación por defecto para cada representación.

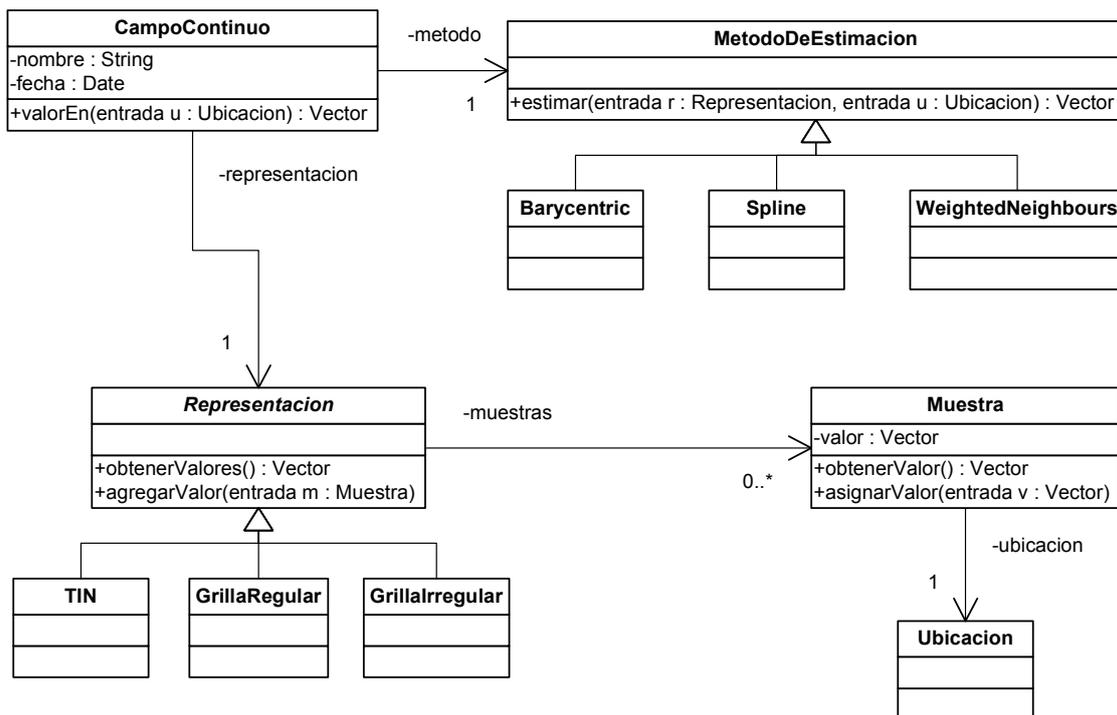


Figura 4.1. La arquitectura de campos continuos

Los campos continuos pueden variar en la forma en que se toman y almacenan las muestras, y en la manera en que se estiman los datos no muestreados. Cada campo continuo tiene como colaborador una representación. Esto se logra mediante la instanciación del patrón estructural Bridge el cual permite "...desacoplar una

*abstracción de su implementación de forma tal que ambas puedan variar independientemente...”[28].*

La arquitectura define una jerarquía de modelos de datos espaciales para las representaciones de campos, en la cual se incluyen los más utilizados: grillas de puntos regulares, grillas de puntos irregulares y TINs (redes trianguladas irregulares). En las grillas de puntos regulares, se toman muestras en cada intersección de un grilla regular. La ubicación de cada punto de la muestra lo determina la grilla, independientemente del fenómeno. En el caso de las grillas de puntos irregulares se almacenan los valores del fenómeno en ubicaciones puntuales esparcidas irregularmente. La ubicación de los puntos puede estar dada por el fenómeno. Por último, los TINs dividen el área en regiones triangulares. El valor del fenómeno se especifica sólo en los nodos de los triángulos y en base a los valores de los nodos se pueden calcular los valores en cualquier parte del triángulo.

Los métodos de estimación, que representan el algoritmo que permite interpolar el valor que toma el fenómeno en un punto a partir de la muestra, están estrechamente relacionados con la representación del campo. Se puede ver el método de estimación  $F$  como una función de la representación  $r$  que contiene la muestra y un punto  $p$ .

$$F(r, p) = \text{valor del fenómeno estimado en } p$$

Mediante el uso de patrón de comportamiento Strategy, el cual permite *“...definir una familia de algoritmos, encapsular cada uno, y hacerlos intercambiables y permite que el algoritmo varíe independientemente de los clientes que lo usan...”[28]*, la clase CampoContinuo tiene asociado un MetodoDeEstimacion representado en una jerarquía separada.

En el código 4.1, se incluye la definición de la clase CampoContinuo, junto a la definición de algunos de los métodos más importantes. El método `public Vector valorEn (Ubicacion u) throws ErrorDeDominio` es el método clave de los campos continuos; si existe una muestra en la ubicación `u` devuelve el valor de la muestra, en caso contrario le pide al método de estimación que estime el valor en esa ubicación. Si se solicita una estimación para una ubicación fuera del dominio se eleva la excepción `ErrorDeDominio`.

## **Operaciones sobre campos continuos**

En [27] se proponen también una gran variedad de operaciones sobre campos continuos las cuales se dividen en dos tipos dependiendo de la cantidad de campos que intervienen: operaciones unarias y operaciones n-arias. Las operaciones n-arias son mucho más complejas que las operaciones unarias debido a la posible variedad de representaciones y métodos de estimación de los campos continuos involucrados. Además, se debe tener en cuenta que los campos continuos pueden tener distinto dominio de aplicación y las posiciones geográficas de las muestras pueden no coincidir.

Por lo general las operaciones sobre campos continuos no se aplican en forma aislada. En la mayoría de los casos, el resultado de una operación se toma como entrada para otra. En el contexto de la predicción del comportamiento del fuego son útiles las siguientes operaciones:

- Selección por zona: La selección por zona es una operación unaria que toma un campo continuo y una zona definida por una topología de polígono y retorna un nuevo campo continuo que tiene por dominio la zona pasada.
- Selección por condición: La selección por condición es una operación unaria que toma un campo continuo y un parámetro conocido como criterio de

selección. El resultado de aplicar esta operación es un nuevo campo continuo que cumple con el criterio de selección. Por ejemplo, se podría tener el parámetro  $p$  y al aplicar la selección por condición, obtener un nuevo campo continuo sólo con aquellos sectores que superen  $p$ .

- Unión de campos continuos: La unión de campos continuos es una operación binaria, que toma dos campos continuos y retorna un nuevo campo continuo que representa la unión de dichos campos continuos.

```

package camposContinuos;

import java.util.*; import excepciones.ErrorDeDominio;

public class CampoContinuo {
    private Date fecha;
    private String nombre;
    private MetodoDeEstimacion metodo;
    private Representacion representacion;

    /* El método estimar de la clase MetodoDeEstimacion eleva la excepción ErrorDeDominio si
     * se quiere estimar en una ubicación que está fuera del dominio del campo continuo
     */
    public Vector valorEn(Ubicacion u) throws ErrorDeDominio {
        if (this.hayMuestraEnUbicacion(u))
            return this.getRepresentacion().obtenerValorDeMuestraEn(u);
        else return this.getMetodo().estimar(this.getRepresentacion(), u);
    }

    public boolean hayMuestraEnUbicacion(Ubicacion u){
        return this.getRepresentacion().hayMuestraEnUbicacion(u);
    }

    /* Verifica que el dominio del campo continuo pasado como parámetro esté incluido en el
     * dominio del campo continuo receptor.
     */
    public boolean incluyeDominio(CampoContinuo cc){
        return (this.getRepresentacion().incluyeDominio(cc));
    }
    ...
}

```

Código 4.1. Definición de la clase CampoContinuo

## Factores que influncian el comportamiento del fuego

Como se mencionó anteriormente, tanto el fuego como los factores que influncian su comportamiento son fenómenos continuos. En el caso de fuego, cada representación de este fenómeno va a ser una instancia de la clase CampoContinuo. Para cada valor muestreado interesan básicamente dos aspectos: la intensidad y la dirección hacia donde se está propagando en ese lugar, aunque se podría tener también asociada la altura de las llamas o cualquier otro aspecto que sea necesario.

Los factores de influencia, aparte de tener asociados los datos que representan el fenómeno, tienen asociado un tipo, el cual indica qué factor de influencia se está representando. En la figura 4.2 se propone una manera de representar los factores de influencia utilizando campos continuos. Con el fin de simplificar el diagrama, la arquitectura de campos continuos está representada por la clase CampoContinuo.

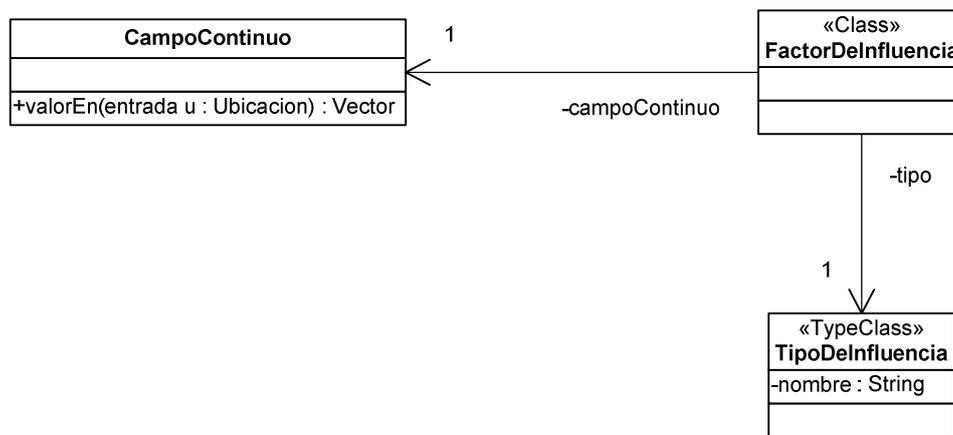


Figura 4.2. Los factores que influncian el comportamiento del fuego

Es necesario hacer una distinción entre las clases FactorDeInfluencia y TipoDeInfluencia. Una instancia de la clase TipoDeInfluencia representa sólo el concepto de un factor que influncia el comportamiento del fuego. Al tratar con tipos de influencia es posible agregar, eliminar o incluso estudiar factores conceptuales en lugar de valores. La clase TipoDeInfluencia es una instancia del patrón estructural Type Object cuya intención es *“...desacoplar instancias de sus clases de forma que las clases se puedan implementar como instancias de una clase...”* [29]. En cambio, una instancia de la clase FactorDeInfluencia es un conjunto de valores que modifican el comportamiento del fuego en una región particular. Un FactorDeInfluencia tiene siempre un TipoDeInfluencia asociado que define su tipo.

Para aclarar la diferencia entre FactorDeInfluencia y TipoDeInfluencia, en la figura 4.3 se presenta un diagrama de instancias con dos instancias de la clase Temperatura. Ambas instancias, Temperatura20080101Zona1 y Temperatura20080101Zona2 apuntan a la misma instancia de TipoDeInfluencia, ya que ambas representan el mismo tipo de influencia, la temperatura. Sin embargo, cada una de ellas apunta a un campo continuo independiente, el cual incluye el conjunto de muestras particulares de temperatura del día 01/01/2008 en las zonas 1 y 2 respectivamente. También se incluyó una instancia de TipoDeInfluencia que representa el viento, pero para la cual no hay ninguna instancia de la clase FactorDeInfluencia.

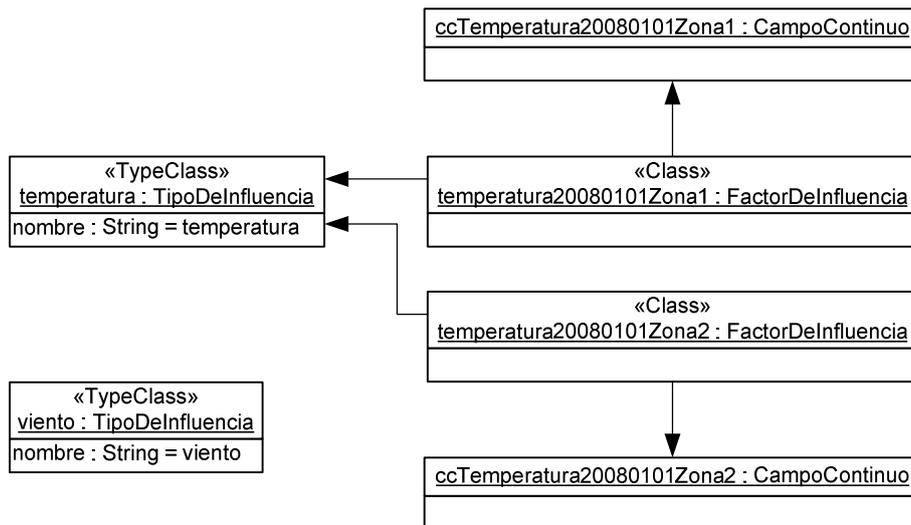


Figura 4.3. Instanciación de las clases FactorDeInfluencia y TipoDeInfluencia

Al tener asociado un campo continuo, cada factor de influencia tiene un dominio definido para el cual se puede invocar al método `valorEn(u: Ubicacion): Vector` y obtener el valor correspondiente al fenómeno en determinada ubicación dentro del dominio. En el caso del fuego, que es una instancia de la clase `CampoContinuo`, sucede lo mismo.

## Algoritmos para la predicción del comportamiento del fuego

El comportamiento del fuego tiene asociados muchos aspectos. La relevancia de dichos aspectos depende de qué es lo que se está buscando cuando se realiza una estimación. En este caso particular, son de interés dos aspectos: la velocidad de propagación del frente del fuego y el perímetro del fuego.

El fuego es un fenómeno de gran complejidad y su comportamiento varía dependiendo del entorno donde se desarrolla. Existe una gran diferencia entre predecir el comportamiento del fuego en pastizales o en bosques y por lo tanto se debe contar con una serie de algoritmos capaces de estimar el fuego producido en las distintas circunstancias. Además, múltiples algoritmos son aplicables en un contexto determinado, cada uno basando su estimación en un conjunto de factores de influencia que pueden ser exactamente iguales, sólo en parte iguales o totalmente distintos uno de otro.

Es necesario modelar la manera en que los factores de influencia modifican el comportamiento del fuego. El punto de mayor importancia a tener en cuenta al modelar los algoritmos para la predicción del comportamiento del fuego es que el modelo sea fácilmente extensible, de forma tal de poder agregar nuevos algoritmos en el futuro. Ésta es la clave de este modelo, tener la posibilidad de ampliar con facilidad el dominio de aplicación, permitiendo incorporar nuevos algoritmos de predicción, incorporar algoritmos que estimen en lugares donde antes no se podía estimar, algoritmos más exactos, algoritmos que utilizan determinado grupo de factores para la predicción, etc. Dicho de otra manera, tener un modelo que permita estimar el comportamiento del fuego en casi cualquier situación.

### Velocidad de propagación del frente del fuego

Los algoritmos que estiman velocidad de propagación del frente del fuego se caracterizan principalmente por su simplicidad. Cada algoritmo requiere un conjunto de factores de influencia para realizar la estimación y este conjunto varía dependiendo

del dominio del algoritmo y los factores contemplados como significantes para la predicción. La figura 4.4 muestra una forma de representar los algoritmos de predicción de la velocidad del frente del fuego. La clase abstracta *AlgoritmoVPF* define una interfaz común para los distintos algoritmos. Cada algoritmo  $R_{sCh}$ ,  $R_{sMk4G}$ ,  $R_{sMk5G}$ ,  $R_{sMk5F}$ , o cualquier otro algoritmo, está definido como una subclase concreta de esta clase e implementa la interfaz de su superclase abstracta. Esta jerarquía muestra otra instanciación del patrón Strategy.

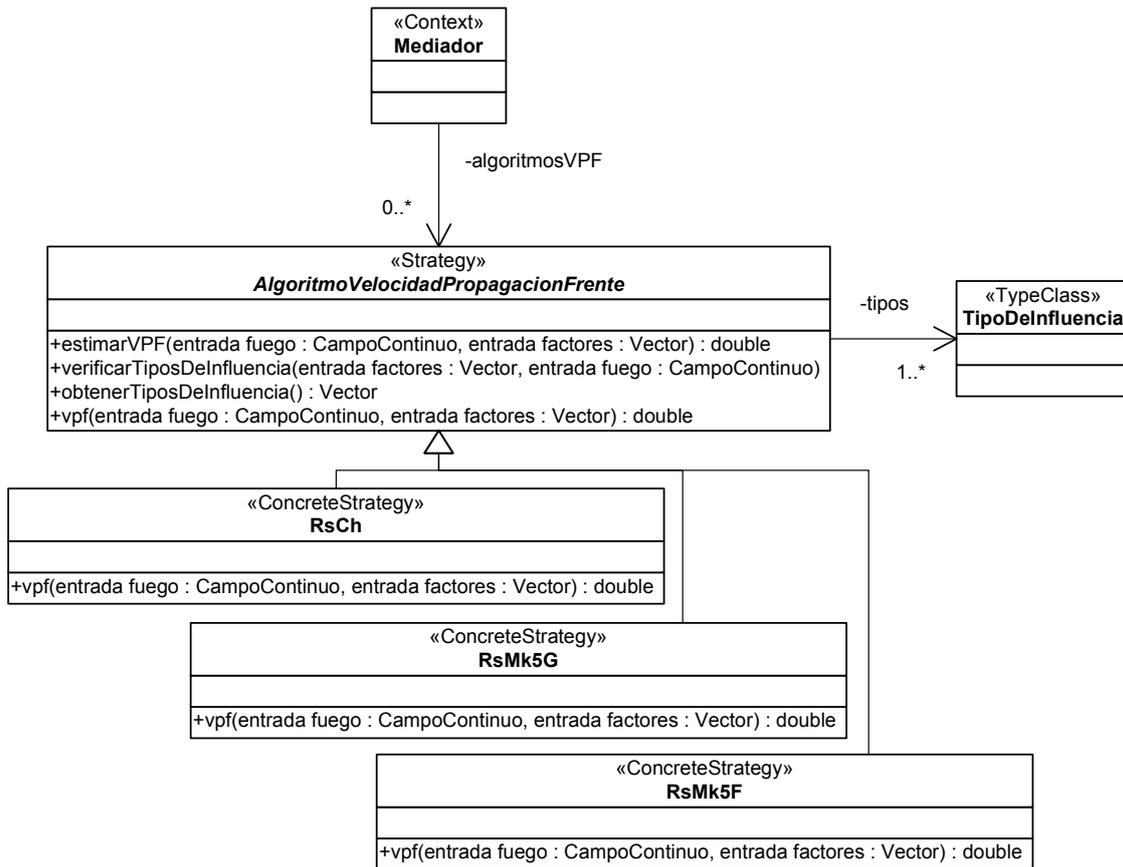


Figura 4.4. Algoritmos para la predicción de la velocidad propagación del frente del fuego

El diagrama de instancias de la figura 4.5 ilustra como una instancia del algoritmo  $R_{sMk5G}$  apunta a una serie de instancias de la clase *TipoDeInfluencia*, las cuales representan el conjunto de tipos de influencia requeridos por dicho algoritmo para realizar la estimación. En este caso particular, cada instancia de  $R_{sMk5G}$  necesita la temperatura, el viento, la humedad, el grado de sequedad del pasto y la carga del combustible para llevar a cabo la estimación de la velocidad de propagación del frente del fuego en pastizales. A su vez, se incluyeron varias instancias de la clase *FactorDeInfluencia* de forma tal que, suponiendo que los dominios de los factores de influencia fuesen mayores o iguales al dominio del fuego, se pueda ver como sería el diagrama de instancias de una predicción utilizando el algoritmo  $R_{sMk5G}$ .

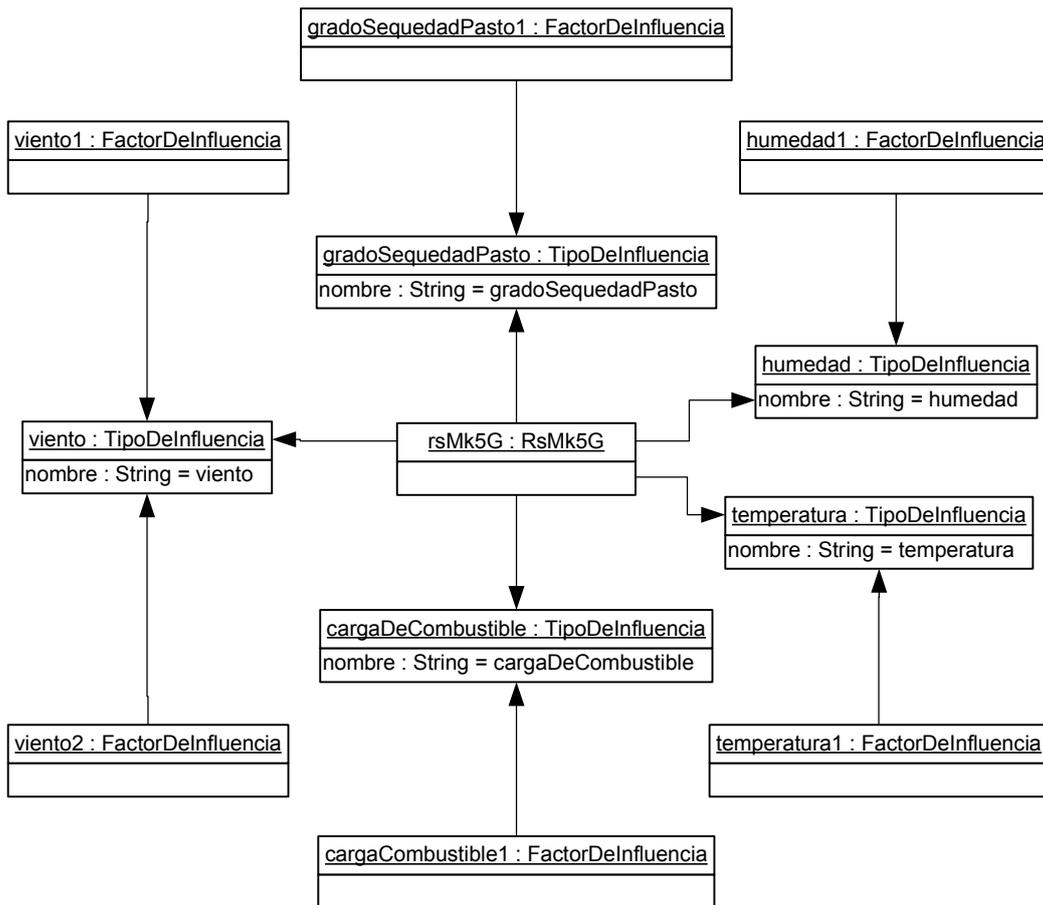


Figura 4.5. Diagrama de instancias de una estimación utilizando el algoritmo RsMk5G

Cada algoritmo conoce el conjunto de tipos de influencias que necesita para realizar la estimación de manera independiente. El método `estimarVPF(fuego: CampoContinuo, factores: Vector): double` de la clase abstracta `AlgoritmoVPF` define el comportamiento común de todos los algoritmos para la predicción de la velocidad de propagación del frente del fuego.

Cada subclase concreta de la clase `AlgoritmoVPF` debe proveer una implementación para el método abstracto `vpf(fuego: CampoContinuo, factores: Vector): double`. Éste método es el que incluye la lógica de cada algoritmo particular.

El Mediador es el encargado de proveerle al algoritmo toda la información que necesita para una predicción. Dado un fuego determinado, el Mediador es el encargado de obtener la colección de factores de influencia cuyo tipo y dominio coinciden con los tipos requeridos por el algoritmo y el dominio del fuego respectivamente. Una vez obtenida la colección de factores de influencia, se la pasa al algoritmo, junto con el fuego, para que se realice la estimación. La figura 4.6 presenta el diagrama de secuencia del método `estimarVelocidadPropagación(fuego: CampoContinuo): double` de la clase `Mediador`.

En el código 4.2, se incluye la definición de la clase abstracta `AlgoritmoVPF`, junto con la implementación del método concreto `estimarVPF(fuego: CampoContinuo, factores: Vector): double`.

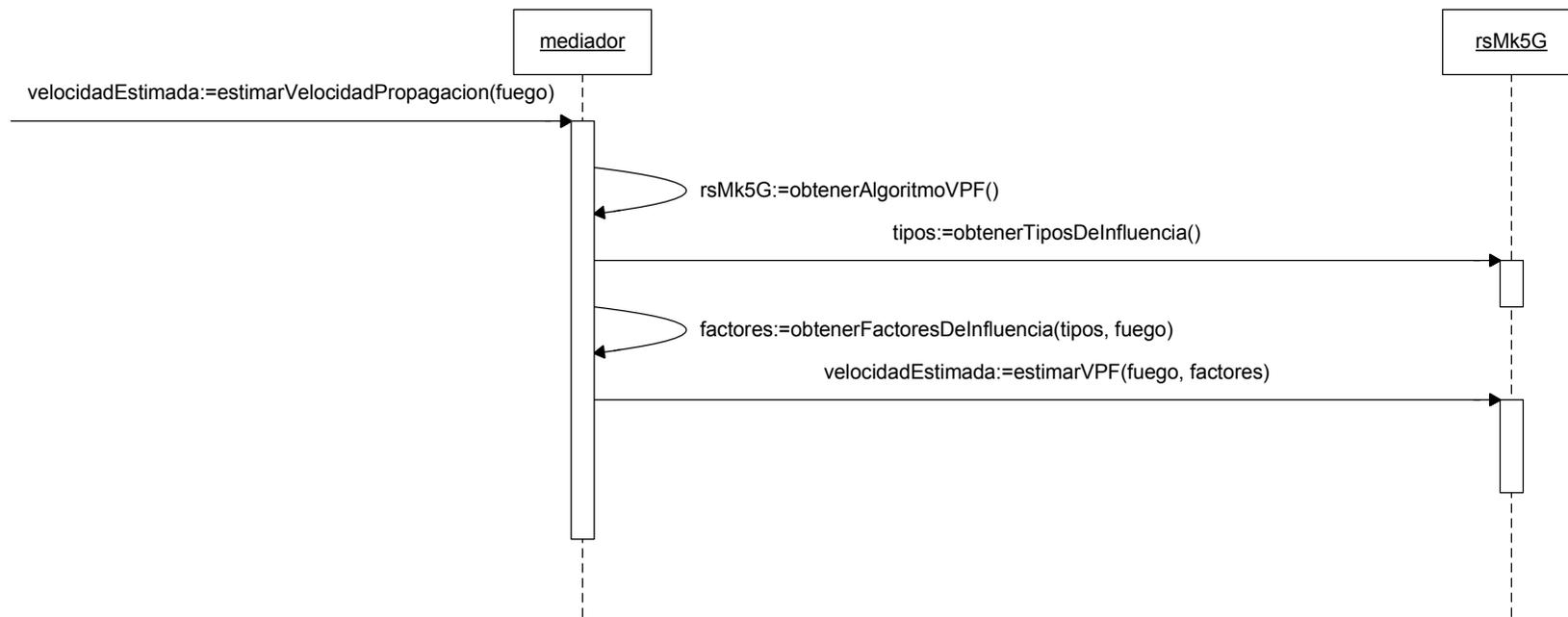


Figura 4.6. Diagrama de secuencia del método `estimarVelocidadPropagacion` de la clase `Mediator`

```

public abstract class AlgoritmoVPF {
    private Vector tipos;

    // Define el comportamiento particular de cada algoritmo
    public abstract double vpf (CampoContinuo fuego, Vector factores);

    /* Define el comportamiento común de todos los algoritmos para
    * la estimación de la vpf del fuego
    */
    public double estimarVPF(CampoContinuo fuego, Vector factores) throws FactoresIncompletos {
        this.verificarTiposDeInfluencia(factores, fuego);
        return (this.vpf(fuego, factores));
    }

    /* Verifica que los factores pertenezcan al dominio del fuego
    * e incluyan todos los factores requeridos por el algoritmo
    */
    public void verificarTiposDeInfluencia (CampoContinuo fuego, Vector factores) throws FactoresIncompletos {
        FactorDeInfluencia factor;
        Vector tiposDeInfluencia = this.obtenerTiposDeInfluencia();
        for (int i=0; i < factores.size(); i++){
            factor = (FactorDeInfluencia)factores.get(i);
            if (!factor.incluyeDominio(fuego)) throw new FactoresIncompletos();
            tiposDeInfluencia.remove(factor.getTipo());
        }
        if (!tiposDeInfluencia.isEmpty()) throw new FactoresIncompletos();
    }

    public Vector obtenerTiposDeInfluencia() {
        return tipos;
    }
}

```

Código 4.2. Definición de la clase AlgoritmoVPF

## Estimación del perímetro del fuego

En el capítulo anterior se introdujeron dos tipos de algoritmos para estimar el comportamiento del fuego. Se podría decir que uno de los tipos está basado en la velocidad de propagación del frente del fuego, y que depende de otro algoritmo para llevar a cabo la estimación. El otro tipo está basado en un conjunto de influencias, de manera análoga a los algoritmos para estimar la velocidad de propagación del frente del fuego. Por lo tanto, la clase abstracta *AlgoritmoEC* define el comportamiento común de todos los algoritmos de predicción del comportamiento del fuego. Esta clase tiene dos subclases abstractas, la clase *BasadoEnInfluencias* y la clase *BasadoEnVPF*. La figura 4.7 muestra el modelo de objetos propuesto para representar los algoritmos de estimación del comportamiento.

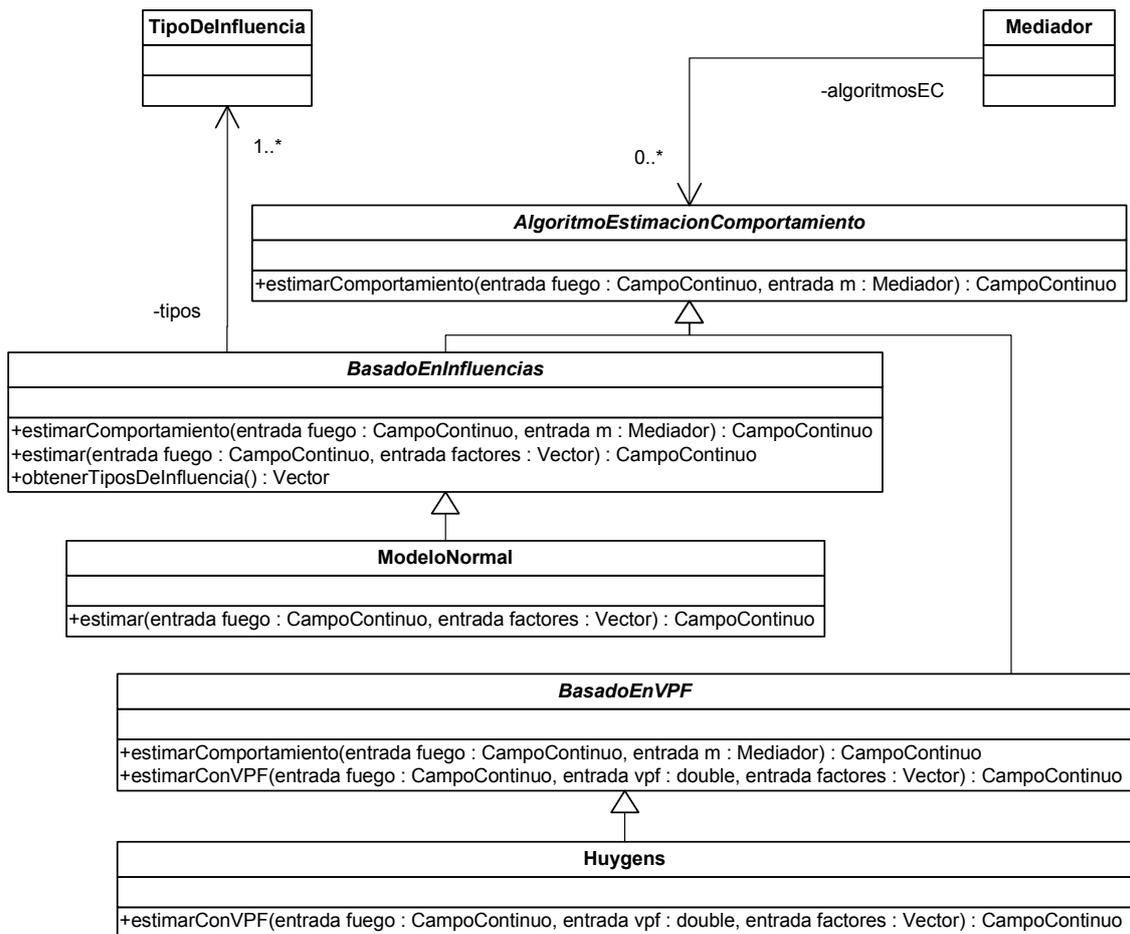


Figura 4.7. Algoritmos para la predicción del comportamiento del fuego

La clase abstracta *AlgoritmoEC* es muy sencilla y básicamente incluye un único método abstracto `estimarComportamiento(fuego: CampoContinuo, m: Mediator): CampoContinuo` que debe ser implementado por todas las subclases. La clase abstracta *BasadoEnInfluencias* define el comportamiento del método `estimarComportamiento` e incorpora un nuevo método abstracto `estimar(fuego: CampoContinuo, factores: Vector): CampoContinuo` que es definido por todas las subclases concretas. El código 4.3 incluye parte de la definición de la clase *BasadoEnInfluencias*.

```

public abstract class BasadoEnInfluencias extends AlgoritmoEC {
    private Vector tipos;

    public abstract CampoContinuo estimar(CampoContinuo fuego,
        Vector factores);

    public CampoContinuo estimarComportamiento(CampoContinuo
        fuego, Mediator m) throws FactoresIncompletos {
        Vector influencias =
            m.obtenerFactoresDeInfluencia(this.getTipos(), fuego);
        this.verificarTiposDeInfluencia(fuego, influencias);
        return(this.estimar(fuego, influencias));
    }
    ...
}

```

Código 4.3. Definición de la clase BasadoEnInfluencias

El método `estimarComportamiento` de la clase `BasadoEnInfluencias` es muy sencillo. Primero le pide al mediador el conjunto de factores de influencia que existen para el dominio mayor o igual que el del fuego y que sean de alguno de los tipos que necesita el algoritmo. Luego verifica que en el conjunto de factores obtenidos se encuentren todos los tipos requeridos por el algoritmo para realizar la estimación. Si falta alguno de los tipos, se eleva la excepción `FactoresIncompletos`. Finalmente, invoca al método `estimar` con el fuego y la colección de factores de influencia.

La clase abstracta `BasadoEnVPF` también es muy sencilla. El método abstracto `estimarConVPF (f: CampoContinuo, vpf: double): CampoContinuo` debe ser implementado por todas las subclases concretas. En el código 4.4 se incluye la definición de la clase `BasadoEnVPF`.

```

public abstract class BasadoEnVPF extends AlgoritmoEC {

    public abstract CampoContinuo estimarConVPF(CampoContinuo
        fuego, double vpf);

    public CampoContinuo estimarComportamiento(CampoContinuo
        fuego, Mediator m) throws FactoresIncompletos{
        double vpf;
        vpf = m.estimarVelocidadPropagacion(fuego);
        return (this.estimarConVPF(fuego, vpf));
    }
    ...
}

```

Código 4.4. Definición de la clase BasadoEnVPF

El método `estimarComportamiento` de la clase `BasadoEnVPF` primero le pide al mediador que estime la velocidad de propagación del frente del fuego y luego estima el nuevo perímetro del fuego en base a la velocidad obtenida.

## Factores de influencia primitivos o derivados

La cantidad de información necesaria para que un sistema de estas características sea útil es mucha. Además, los distintos algoritmos requieren que dicha información tenga un formato particular, como es el caso del algoritmo  $R_{sch}$  donde la influencia del

combustible está clasificada en pasturas naturales imperturbadas, pasturas que han sido cortadas o pastadas y pasturas que han sido considerablemente cortadas o discontinuas. En caso de no contar con la información de alguna de las influencias requeridas por el algoritmo, la estimación no puede ser llevada a cabo, provocando que el sistema sea improductivo.

Como algunas influencias pueden derivarse de otras, es preciso contar con algún mecanismo de derivación de influencias de forma de poder estimar, incluso cuando no se cuenta con la información de todas las influencias necesarias. Una influencia derivada se calcula en base a una o más influencias existentes. Existen dos tipos derivación de influencias; la derivación en base a una influencia, la cual puede ser vista como una adaptación de los datos, y la derivación basada en más de una influencia la cual es más compleja. En la figura 4.8 se extiende el modelo de factores de influencia para que se puedan especificar factores de influencia primitivos y derivados.

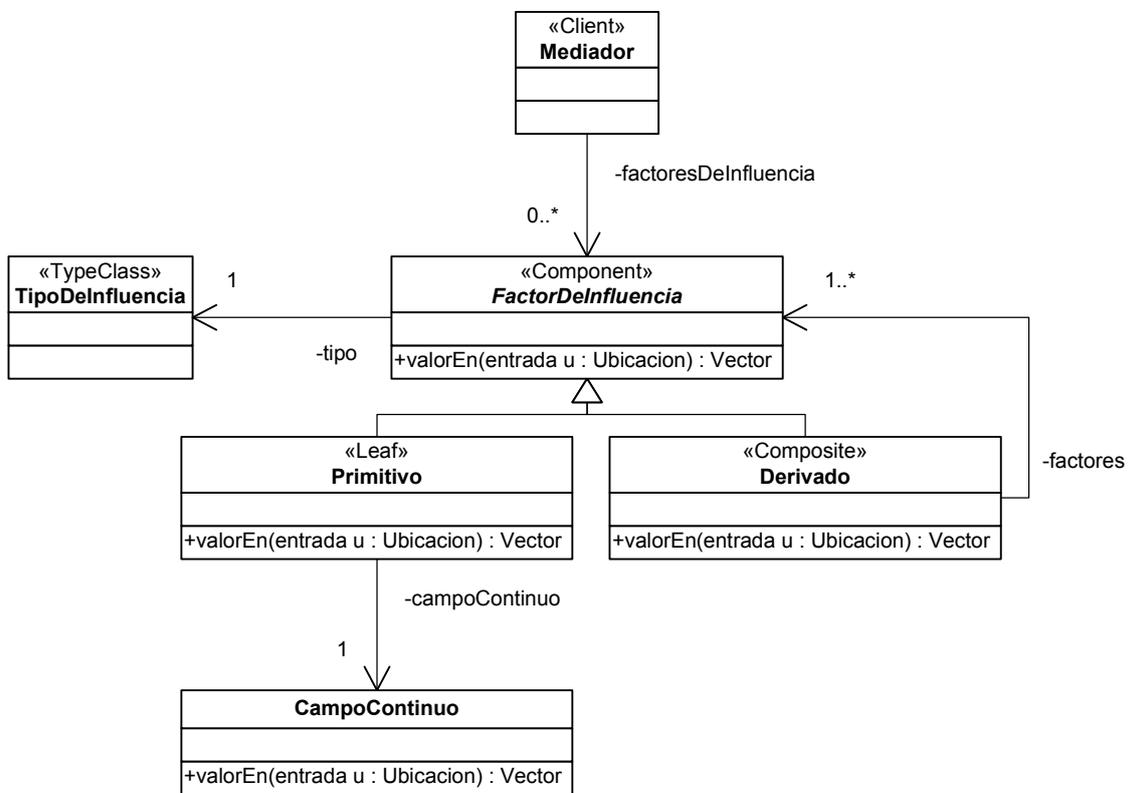


Figura 4.8. Factores de influencia primitivos y derivados

La jerarquía de factores de influencia representa una instancia del patrón estructural Composite que permite "... componer objetos en estructura de árbol para representar jerarquías parte-entero. El patrón Composite permite a los clientes tratar a los objetos individuales y a las composiciones de objetos de manera uniforme..." [28]. La clase FactorDeInfluencia declara una interfaz común para todos los objetos en la composición. La clase Primitivo representa los factores de influencia atómicos ya que se pueden definir independientemente de otras influencias. La clase Derivado representa aquellos factores de influencia cuyos valores se calculan en base a los valores de otros factores de influencias.

## Criterio de selección de algoritmos

La cantidad de algoritmos que se pueden tener para cada dominio particular es ilimitada. Se pueden agregar tantos algoritmos como se crea necesario, tanto para los algoritmos para la predicción del comportamiento del fuego como para los algoritmos de velocidad de propagación del frente del fuego. Contar con muchos algoritmos diferentes permite tener un dominio de aplicación mucho mayor, ya que los distintos algoritmos basan su estimación en distintos aspectos y factores de influencia.

En determinados casos, puede suceder que un solo algoritmo se pueda utilizar para estimar. Sin embargo, en la mayor parte de los casos, puede suceder que exista más de un algoritmo aplicable. En dichas circunstancias, es necesario seleccionar cuál es el algoritmo que se va a utilizar.

Existen algunas características de los algoritmos que pueden ser comparadas entre sí. Por ejemplo, dos algoritmos que estiman la velocidad de propagación del frente del fuego pueden tener distinto margen de error, distinto tiempo de ejecución, etc. Éstas características pueden ser utilizadas para determinar, partiendo de un grupo de algoritmos, cuál es el “mejor” algoritmo.

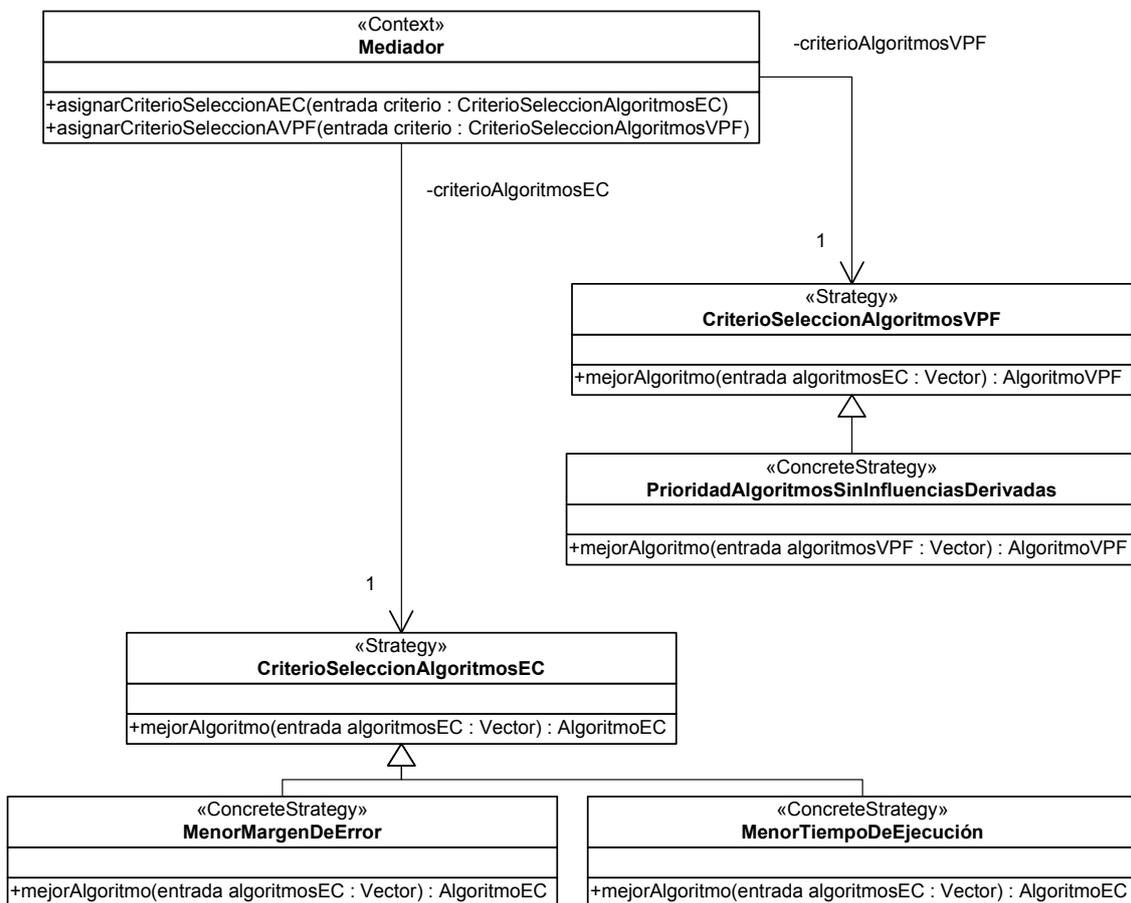


Figura 4.9. Criterios de selección de algoritmos

La figura 4.9 incluye la representación de los criterios de selección de algoritmos. Aquí también se puede ver, en dos oportunidades, la instanciación del patrón Strategy con una pequeña variación. Las clases CriterioSeleccionAlgoritmoEC y CriterioSeleccionAlgoritmosVPF no sólo definen una interface común a todos los criterios de selección de algoritmos, sino que definen también un criterio de selección

muy sencillo. Dicho criterio consiste en seleccionar el primer algoritmo de la lista de algoritmos recibida, sin importar las características de ese algoritmo.

Cada subclase de `CriterioSeleccionAlgoritmoEC` debe proporcionar una implementación para el método `mejorAlgoritmo(algoritmosEC: Vector): AlgoritmoEC`, el cual seleccionará y devolverá el algoritmo considerado óptimo por el criterio de selección implementado. Las subclases de `CriterioSeleccionAlgoritmoVFP` actúan de manera similar, salvo que los algoritmos que manipulan son de la clase `AlgoritmoVFP`. Cada una de ellas debe sobrescribir el método `mejorAlgoritmo(algoritmosVFP: Vector): AlgoritmoVFP`.

La clase `Mediador` conoce en todo momento el `criterioAlgoritmosVFP` y el `criterioAlgoritmosEC` que se deben utilizar para desambiguar la selección de algoritmos cuando se tiene más de una posibilidad. Por defecto, los criterios de selección utilizados son aquellos definidos en las clases `CriterioSeleccionAlgoritmosEC` y `CriterioSeleccionAlgoritmosVFP`, que toman el primer algoritmo de la colección de algoritmos aplicables. Sin embargo, tener la capacidad de subclasificar éstas clases, permite configurar de innumerables maneras la selección de algoritmos según la conveniencia.

## Mediador

Lo único que falta para completar el modelo de objetos es una clase responsable de la coordinación de todas las clases involucradas en la predicción del comportamiento del fuego. Las clases involucradas en esta tarea son: `CriterioSeleccionAlgoritmosEC`, `CriterioSeleccionAlgoritmosVFP`, `AlgoritmoEstimacionComportamiento`, `AlgoritmoVelocidadPropagacionFrente` y `FactorDeInfluencia`.

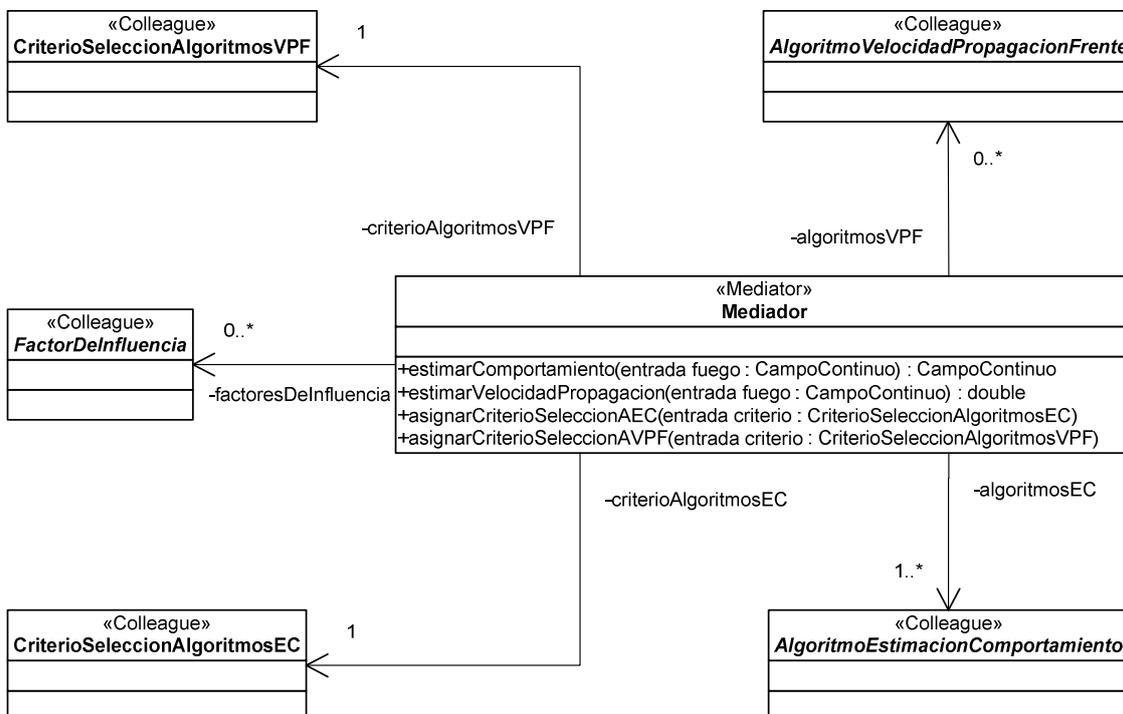


Figura 4.10. Clase Mediador

Como esta clase debe encapsular el comportamiento cooperativo de las clases involucradas, se aplica el patrón Mediator que permite “...definir un objeto que encapsula como un conjunto de objetos interactúan. El patrón Mediator promueve el

*bajo acoplamiento evitando que los objetos se refieran entre sí explícitamente, y permite variar su interacción independientemente...” [28]. La figura 4.10 muestra la clase Mediador.*

La clase Mediador tiene dos métodos de estimación cuya única entrada es un campo continuo que representa el fuego. Dichos métodos son muy similares, ya que ambos comienzan realizando una selección de los algoritmos que se pueden aplicar en el contexto de ese fuego particular. La selección de algoritmos es extremadamente sencilla, ya que sólo se tiene en cuenta que estén disponibles todos los factores de influencia, ya sean primitivos o derivados, requeridos por el algoritmo en el dominio del fuego. Una vez obtenidos todos los algoritmos aplicables, se selecciona el algoritmo óptimo, dependiendo de cuál haya sido el criterio de selección asignado.

## **Modelo de objetos completo**

Si se unen todas las clases anteriores, se obtiene el modelo de objetos presentado en la figura 4.11. El modelo fue construido en base a Patrones de Diseño ampliamente usados lo cual resulta en un modelo flexible y fácilmente extensible. Los patrones de diseño permiten reusar una solución exitosa a problemas recurrentes.

El modelo propuesto presenta una serie de cualidades y ventajas, las cuales se enumeran a continuación:

- Como consecuencia de la naturaleza de la orientación a objetos, el modelo es fácil de comprender ya que está muy cerca del mundo real.
- Es posible especificar y manipular múltiples algoritmos para la predicción del comportamiento del fuego y la estimación de la velocidad de propagación del frente del fuego como objetos de primera clase. Esto permite que los usuarios elijan el algoritmo que van utilizar, dependiendo de sus necesidades. Lo mismo sucede con los criterios de selección de algoritmos.
- Dado que son objetos, es posible agregar nuevos algoritmos. Esto permite incorporar algoritmos para contextos no tenidos en cuenta hasta el momento o algoritmos más modernos, exactos y mejorados. Lo mismo sucede con los criterios de selección de algoritmos.
- La posibilidad de derivar factores de influencias amplía la aplicabilidad del sistema, permitiendo realizar estimaciones incluso en circunstancias donde no se cuenta con toda la información para llevar a cabo la estimación.

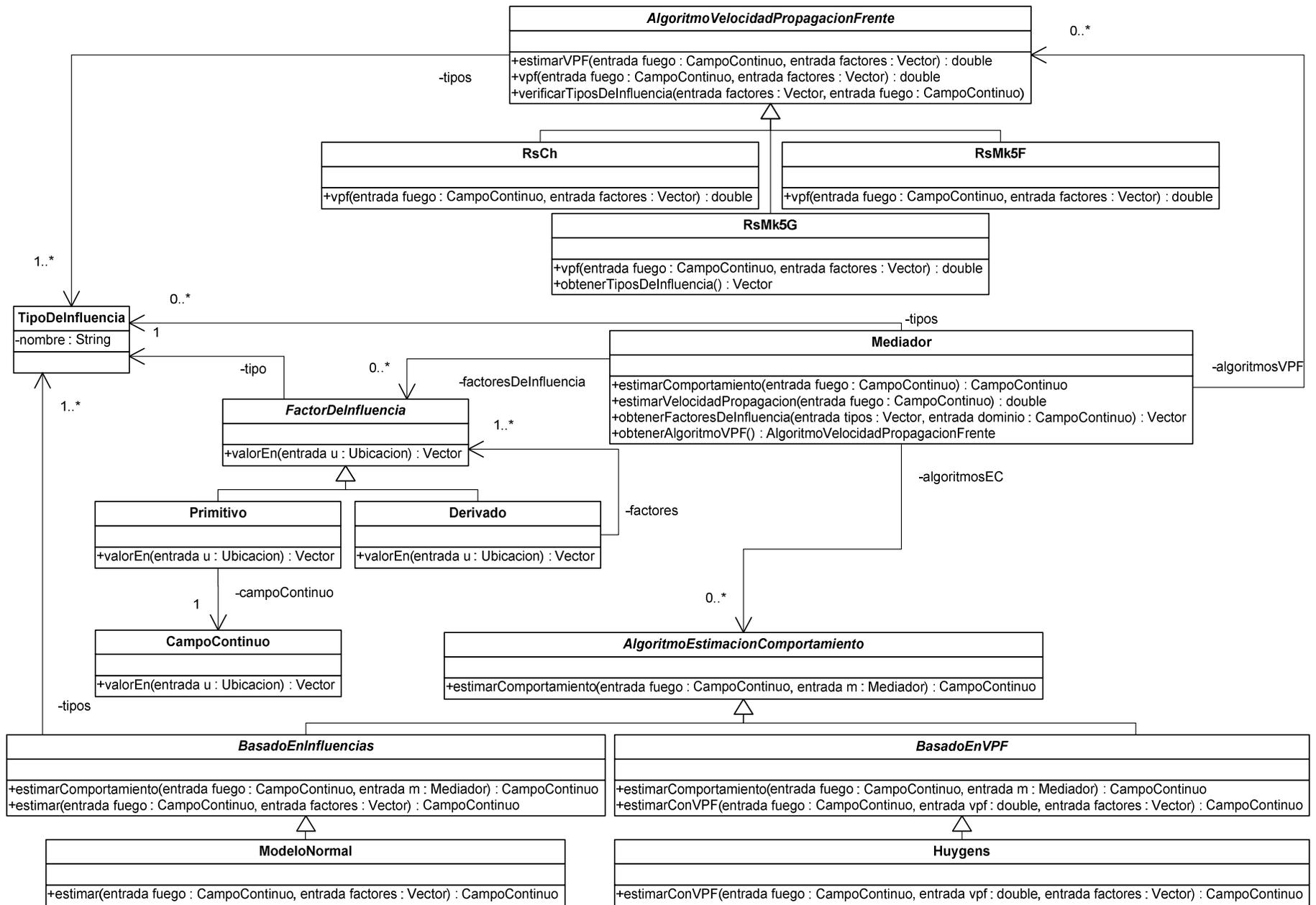


Figura 4.11. Modelo de objetos completo

# Capítulo 5

## Simulación

El Noreste de la provincia de Río Negro es una región donde los incendios son recurrentes. *“...La vegetación de esta región presenta dos estratos principales: uno de arbustos y otro inferior de gramíneas (pastos). Posee una cobertura relativamente alta (>60%) especialmente en años con buenas precipitaciones, en los que se produce un gran desarrollo del estrato gramíneo. Una vez pasada la época favorable los pastos se secan y generan una abundante acumulación de material fino que favorece la propagación del fuego... Presenta un clima subtemplado seco de transición, con veranos cálidos e inviernos moderados, sin exceso estacional de agua. Las precipitaciones promedian los 270 milímetros anuales y presentan una alta variabilidad, con tendencia a concentrarse en otoño y primavera. El clima es ventoso, especialmente en primavera y verano, y contribuye a hacer más marcado el déficit de humedad del suelo y propagar el fuego...”*[30].

En esta región el fuego se utiliza como una herramienta de manejo de pastizales. Se queman los pastizales para limpiar el suelo de los campos. Por lo general, los incendios se mantienen bajo control y la superficie quemada es baja. Sin embargo, en algunos casos estos incendios prescritos se escapan del control humano y provocan un gran número de efectos no deseados. Además, cuando se combinan factores como sequías prolongadas o tormentas eléctricas, los incendios de la zona adquieren proporciones catastróficas. Esto fue lo que sucedió en el verano del 2000/2001.

### Quema controlada en Pichi Mahuida

Siendo una región propensa a la ocurrencia de incendios, naturales e intencionales, en el Noreste de la provincia de Río Negro se debe enfrentar el fuego en múltiples y variadas ocasiones. Por lo tanto, se tomará dicha región como contexto para un ejemplo de aplicación de los conceptos presentados y el modelo de objetos propuesto anteriormente.

Al Noreste de la provincia de Río Negro se encuentra el Departamento de Pichi Mahuida (ver Figura 5.1). *“...La mayor parte de la superficie que ocupa el Monte en el Departamento de Pichi Mahuida se destina exclusivamente a la ganadería extensiva sobre el campo natural (cría y recria), y es una práctica común de los productores realizar quemadas controladas para favorecer el acceso de los animales al pasto y regular el crecimiento de los arbustos...”*[31].

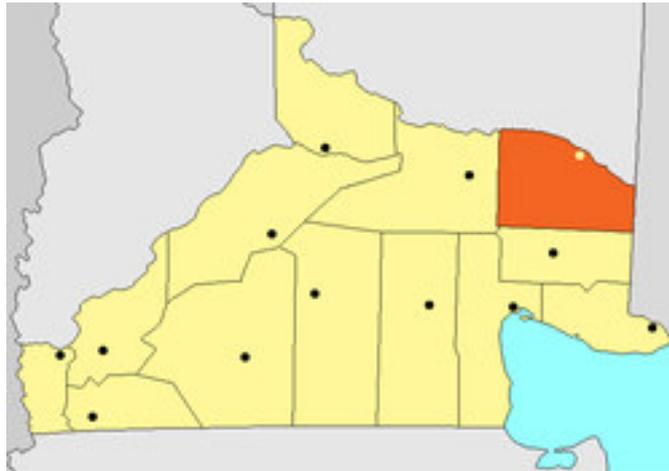


Figura 5.1. Departamento de Pichi Mahuida, Provincia de Río Negro

Para poder llevar a cabo una quema controlada existen una serie de pasos que se deben seguir. Antes que nada, se debe determinar cuál es el resultado esperado de la quema y de esa manera orientar la labor a obtener ese resultado esperado. Es imposible llevar a cabo una quema exitosa si no se tiene bien definida cuál es su finalidad y cuáles son los efectos que se quieren provocar.

Se debe realizar un minucioso análisis del entorno donde se producirá la quema. Esto incluye analizar factores como el tipo de vegetación y la cobertura, la humedad del combustible, la temperatura, las precipitaciones recientes, la topografía del terreno, etc. También se debe analizar donde, cuándo y de qué manera se realizaron quemas controladas en la zona ya que las experiencias exitosas de otros pueden servir para orientar y las quemas no exitosas para alertar.

Puede ser necesario analizar el entorno en las distintas estaciones del año ya que puede suceder que las condiciones para la quema puedan ser mejores en otro momento. Está claro que cuando se analizan las condiciones en otras épocas del año se las estudia en base a promedios tomados de años anteriores y que en el futuro pueden diferir ampliamente de esos promedios.

### ***Estudio del área y alcance de la quema***

Primero que nada se debe determinar las razones por las cuáles se realizará una quema controlada. De esta manera se estipula cuáles son los efectos que se esperan obtener a través de la quema, por ejemplo qué extensión se desea quemar, qué intensidad deberá alcanzar el fuego, etc.

Las quemas controladas no deben realizarse de manera indiscriminada. Para que una quema sea beneficiosa, debe dar resultados positivos no sólo en forma inmediata, sino también a largo plazo. Por eso, una quema exitosa debería estar acompañada por una planificación de la recuperación y conservación del suelo y las especies vegetales que involucra.

Existen varias razones para realizar una quema controlada. Según [32], entre las más comunes, se pueden encontrar:

- Controlar y suprimir especies arbustivas no deseable
- Impedir la invasión de plantas de poca utilidad
- Aumentar la producción de pasto y, por ende, la capacidad de carga

- Mejorar la distribución de los animales quemando en zonas donde no llegan comúnmente
- Mejorar el acceso de los animales a zonas de matorrales cerrados
- Adelantar el rebrote de las plantas forrajeras
- Reducir el peligro de un fuego mucho más intenso al eliminar el mantillo y el material seco e inútil
- Preparar el suelo para una siembra

La figura 5.2, que fue tomada del sitio web de la Secretaría de Minería de la República Argentina (<http://www.mineria.gov.ar/>), muestra las características del suelo donde se planea realizar la quema. Se presentan dos estratos, uno de arbustos y otro de gramíneas. El estrato de arbustos es el predominante y es de 1,5 metros de altura. La cobertura es del 40-50%.



Figura 5.2. Características del entorno de la quema controlada

En el caso de esta quema controlada, lo que se busca es controlar las especies arbustivas y aumentar la producción de pasto. Esta zona es utilizada principalmente para la cría de ovinos, pero también se la utiliza para algunos bovinos y una mejora en la producción de pasto del campo implicaría directamente una mejora en la cría de los animales.

### ***Condiciones óptimas para la quema***

Para planear y ejecutar una quema controlada es indispensable saber cómo afectan al fuego los factores del entorno donde se produce. Por lo tanto, los aspectos más importantes a determinar implican establecer las condiciones óptimas para que el fuego se propague de manera controlada y se limite sólo a quemar aquellos combustibles destinados a arder. En el Boletín Oficial de la Provincia de Río Negro N° 4514 publicado el 10 de mayo del 2007 en Viedma [33], se incluyen una serie de recomendaciones técnicas para llevar a cabo una quema controlada de pastizales o arbustales en la zona. Por lo tanto, la quema se deberá basar en esta serie de recomendaciones.

Se sabe que las quemas responden bien cuando la dirección y velocidad del viento son constantes, ya que un comportamiento errático del fuego provoca un comportamiento inesperado del fuego. No es aconsejable, en esta zona, realizar quemas con vientos de velocidad superior a los 24km/h ya que el fuego se propaga con demasiada velocidad e intensidad. Sin embargo, la propagación del fuego se dificulta si el viento tiene una velocidad por debajo de los 13km/h.

La humedad relativa no debe ser menor del 20% y por encima del 40% se dificulta la propagación. Si la humedad relativa es baja, se corre el riesgo de que el fuego sea más intenso y se propague a lugares no deseados. Cuando la humedad es demasiado alta, es posible que se salven de la quema algunas manchas o que algunos sectores ardan insuficientemente para los efectos deseados.

La temperatura óptima para realizar una quema de pastizales o arbustales es alrededor de los 15°C y no debe superar los 27°C. Además, si hay hacienda en el sitio de la quema, se la debe retirar con suficiente anticipación para acumular material fino que colabore con la propagación del fuego.

Una vez planteados los objetivos de la quema y analizadas las condiciones óptimas del entorno, sólo faltaría determinar en qué momento se puede efectuar la quema controlada. Aquí es donde se saca provecho del modelo de objetos propuesto ya se podrían realizar todo tipo de estimaciones, sin necesidad de quemar ni correr riesgo alguno.

## **Configuración del modelo**

Para concluir con la simulación y lograr una completa comprensión del modelo propuesto, se presenta a continuación la configuración inicial del sistema para predecir el comportamiento del fuego en el Noreste de la Provincia de Río Negro, en el Departamento de Pichi Mahuida.

Ya se vio que en la región predominan los arbustos y las gramíneas. Por lo tanto, si se quiere predecir el comportamiento del fuego, se necesita contar con al menos una subclase concreta de `AlgoritmoEstimacionComportamiento` aplicable a las características de la región. Un algoritmo de estimación del comportamiento del fuego puede depender de la velocidad de propagación del frente del fuego o puede fundar su estimación en base a un conjunto de tipos de influencia. Para esta instanciación se propone utilizar el modelo normal, que realiza la estimación en base a la dirección y velocidad del viento, el modelo digital de elevación, la matriz de índices de inflamabilidad, la temperatura y las precipitaciones recientes. Como el modelo normal no depende de la velocidad de propagación del frente del fuego, no es necesario contar con algoritmos que la estimen.

Para esta instanciación del modelo, existen una serie de clases que no van a ser utilizadas. Por lo tanto, el modelo de objetos propuesto se puede acotar, de forma tal de mantener sólo aquellas clases necesarias para este caso concreto. En la figura 5.3 se presenta el modelo simplificado. Se eliminó por completo la jerarquía `AlgoritmoVPF`, ya que no se van a realizar estimaciones de la velocidad de propagación del frente del fuego. También se eliminó la subclase abstracta `BasadoEnVPF` y sus subclases, dejando solamente como subclase concreta de `AlgoritmoEC` la clase `ModeloNormal`. Así, las estimaciones se van a poder realizar únicamente utilizando el modelo normal y basándose en los siguientes factores: viento, dem, `indiceInflamabilidad`, temperatura y precipitaciones.

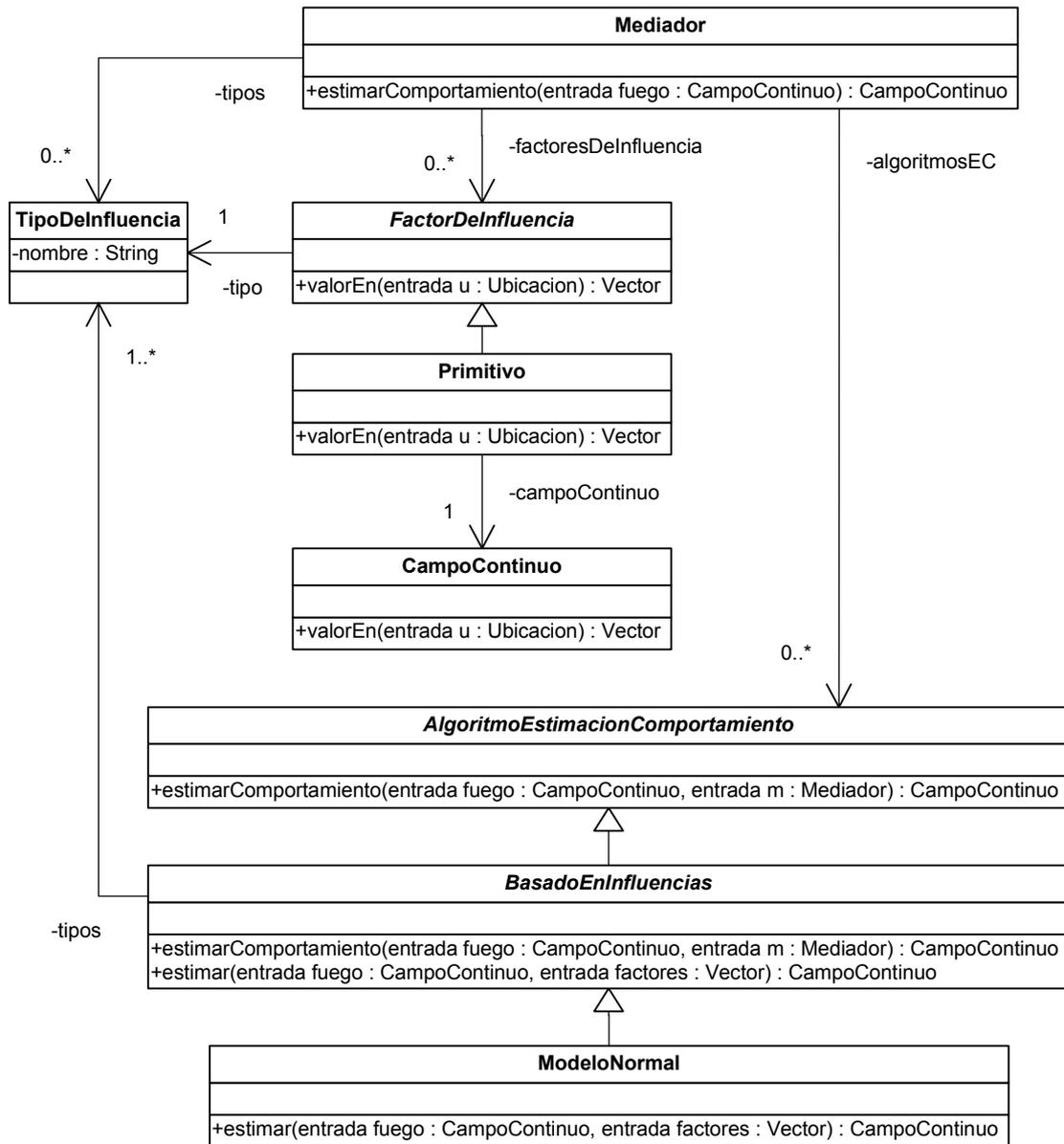


Figura 5.3. Acotación del modelo propuesto

En el modelo simplificado, también se modificó la jerarquía de factores de influencia. Dado que en este caso no se van a derivar factores de influencia, la subclase concreta Derivado fue suprimida que la jerarquía FactorDeInfluencia. Sólo se van a poder realizar estimaciones en aquellas circunstancias para las cuales se cuenta con mediciones de todos los factores requeridos por el modelo Normal.

A continuación, en el código 5.1, se presenta una posible versión del constructor de la clase Mediator, donde se crea una instancia de la clase ModeloNormal, se crean los tipos de influencia requeridos por el algoritmo del modelo normal y se los agrega a la colección de tipos de influencia del Mediator.

Ya se estaría en condiciones de realizar estimaciones utilizando el modelo normal. Sin embargo, faltaría disponer de la información relacionada a los distintos tipos de influencia utilizados por el algoritmo. Se deben realizar mediciones, en el Departamento de Pichi Mahuida, de los distintos factores que afectan el comportamiento del fuego según el modelo normal: viento, dem, indiceInflamabilidad, temperatura y precipitaciones. Mientras más exactas, representativas y completas

sean las mediciones de los factores, más amplio será el dominio de aplicación y mayor la utilidad del sistema.

```
Mediador() {
    ModeloNormal modeloNormal;
    TipoDeInfluencia viento = new TipoDeInfluencia("viento");
    TipoDeInfluencia dem = new TipoDeInfluencia("dem");
    TipoDeInfluencia indiceInflamabilidad = new
TipoDeInfluencia("indiceInflamabilidad");
    TipoDeInfluencia temperatura = new
TipoDeInfluencia("temperatura");
    TipoDeInfluencia precipitaciones = new
TipoDeInfluencia("precipitaciones");

    factores = new Vector();
    algoritmosVPF = new Vector();
    algoritmosEC = new Vector();

    modeloNormal = new ModeloNormal();
    modeloNormal.agregarTipoDeInfluencia(viento);
    modeloNormal.agregarTipoDeInfluencia(dem);
    modeloNormal.agregarTipoDeInfluencia(indiceInflamabilidad);
    modeloNormal.agregarTipoDeInfluencia(temperatura);
    modeloNormal.agregarTipoDeInfluencia(precipitaciones);

    algoritmosEC.add(modeloNormal);

    tipos.add(viento);
    tipos.add(dem);
    tipos.add(indiceInflamabilidad);
    tipos.add(temperatura);
    tipos.add(precipitaciones);
}
```

Código 5.1. Definición de constructor de la clase Mediador

La recolección y el almacenamiento de la información asociada a los distintos tipos de influencia es una de las tareas más complejas. Para cada factor de influencia, se debe determinar de qué manera se va representar el fenómeno y cómo se van a tomar y almacenar las muestras. La estimación de los valores no muestreados se puede realizar por el método que mejor se adapte al tipo de representación utilizada. A continuación se evalúa en detalle cada uno de los tipos de influencia requeridos por el modelo normal.

## Temperatura

La temperatura es uno de los factores de influencia más sencillos. Se la puede medir interpretando las imágenes obtenidas de los satélites meteorológicos que proveen una cobertura de baja resolución y de alta frecuencia de datos ambientales entre los que se incluyen la temperatura, humedad, cobertura de nubes, etc. La serie de satélites NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) y GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) son ampliamente utilizados en el monitoreo y pronóstico del tiempo. Las imágenes de GOES se distribuyen electrónicamente y en tiempo casi real.

Los valores medidos de temperatura van a caer dentro del rango [-10, 45]. Dado que no van a existir cambios abruptos en la temperatura, sino que se va a mantener casi estable y los cambios van a ser graduales, se la puede representar

mediante una grilla regular de puntos. Por lo tanto, las representaciones de las distintas mediciones de temperatura van a ser instancias de la clase GrillaRegular.

Otra forma de medir la temperatura es mediante la lectura de termómetros, los cuales pueden estar situados en estaciones meteorológicas. Esto puede ser útil cuando no se tiene acceso a las imágenes satelitales o no se cuenta con los medios para procesarlas. En este caso, las mediciones de temperatura son mucho más sencillas y no es necesario utilizar un campo continuo para representarla. Es por esto que es necesario ampliar el modelo propuesto, permitiendo representar factores de influencia para los cuales se tiene solamente un valor o un conjunto de valores, medidos en un punto. En la figura 5.4 se propone una ampliación del modelo que permite representar factores de influencia simples.

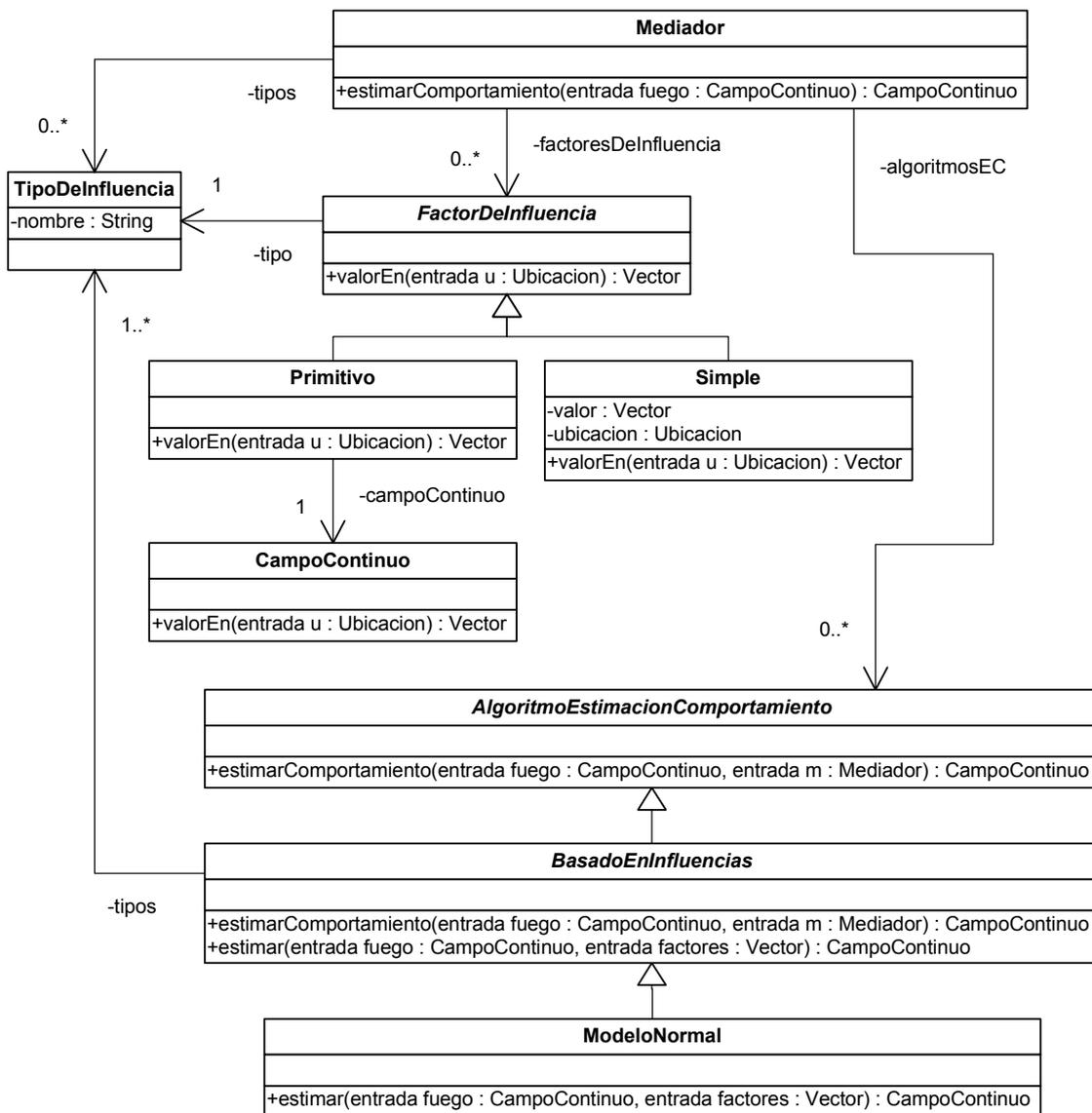


Figura 5.4. Ampliación del modelo propuesto

Para el caso de la quema controlada, contar con una medición en un punto, lo más cercano posible a la quema, de la temperatura es suficiente y es por esto que se propone representar este factor como una instancia de la clase Simple.

## Viento

En cuanto al viento, se deben tener en cuenta dos aspectos: la dirección y la velocidad. La dirección del viento es una medida de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , siendo  $360^\circ$  equivalente a  $0^\circ$  y la velocidad en kilómetros por hora cae dentro del rango de valores (0, 100]. El anemómetro es el instrumento utilizado para medir tanto la dirección como la velocidad del viento. Las muestras de viento van a estar dadas por la ubicación geográfica de los anemómetros, los cuales van a distar unos de otros de manera irregular. Por lo tanto, la representación que mejor se adapta es la de redes trianguladas irregulares o TINs, donde cada anemómetro representa un vértice de triángulos.

En este caso también puede convenir representar al viento como una instancia de la clase Simple donde el valor medido y almacenado en una ubicación determinada va a constar de dos partes, la dirección y la velocidad.

## Precipitaciones recientes

Las precipitaciones recientes modifican directamente el contenido de humedad del combustible. Por lo tanto, es necesario poder saber cuantos milímetros cayeron en los últimos días y poder estimar los milímetros acumulados. Este tipo de mediciones se pueden realizar a través de pluviómetros situados en las estaciones meteorológicas o mediante la interpretación de las imágenes obtenidas por los satélites meteorológicos, como en el caso de la temperatura. Por lo tanto, este tipo de mediciones van a tener también una representación de tipo GrillaRegular.

## Índice de inflamabilidad

El índice de inflamabilidad es un parámetro que indica cuánto calor debe recibir una celda para comenzar a arder. Éste parámetro está determinado básicamente por las características del combustible: el tipo, la densidad, el grado de sequedad, etc. Suponiendo que directamente se evalúa el aspecto índice de inflamabilidad, entonces todos los objetos serán instancias de la clase Primitivo, subclase concreta de la clase abstracta FactorDeInfluencia. El índice de inflamabilidad también podría ser una instancia de la clase Derivado, ya que se podría calcular este índice en base a otros factores de influencia relacionados a las características del combustible.

Volviendo entonces a los índices de inflamabilidad como instancias de la clase Primitivo, cada uno de estos objetos tiene como tipo al TipoDeInfluencia cuyo nombre es "índiceInflamabilidad". Además, cada uno tiene un CampoContinuo asociado, que incluye los valores del índice dentro del dominio del campo continuo. Dado que las estructuras regulares están orientadas a las características del espacio, estos campos pueden tener una representación de tipo GrillaRegular. Las muestras se pueden adquirir procesando imágenes digitales tomadas desde algún satélite o por vía aérea.

El índice de inflamabilidad se modifica en el corto plazo. Con los cambios de estaciones, el combustible cambia su densidad y su contenido de humedad, y por consiguiente cambia el índice de inflamabilidad. Es por esto que las mediciones de este factor se deben realizar con frecuencia.

## DEM

El DEM, o Modelo Digital de Elevación, representa la inclinación y el aspecto del terreno. Este tipo de influencia es estático, o sea que no se modifica en el corto ni el largo plazo. Por lo tanto, las muestras se deben tomar por única vez y permanecen casi inalterables.

Para representar el DEM, se propone que cada instancia de la clase Primitivo tenga un CampoContinuo asociado cuya representación sea una instancia de la clase

TIN. Se propone usar redes trianguladas irregulares, ya que se utilizan menos puntos dado que se pueden capturar sólo aquellos puntos críticos donde se presentan discontinuidades en el terreno. Si se representara el DEM como una grilla con celdas regulares, se tendrían serios problemas a la hora de determinar el tamaño de la celda. Si la celda es muy pequeña, la cantidad de datos almacenados sería demasiado grande y se usarían más celdas de las necesarias si hay poca variabilidad espacial. En cambio, si la celda es demasiado grande, la cantidad de datos almacenados sería menor, pero podría suceder que la grilla no tenga el detalle suficiente para capturar en detalle el terreno. Por lo tanto, los TIN son los que mejor se adaptan a esta problemática ya que representan la superficie terrestre como un conjunto interconectado de triángulos donde para cada uno de los vértices se tienen las coordenadas geográficas (latitud y longitud) y la elevación. Los valores dentro de cada triángulo se estiman realizando triangulaciones.

Gran parte de la información topográfica ya existe en formato digital y puede ser reutilizada justamente por su invariabilidad en el tiempo. Si se quisiera obtener información de lugares no digitalizados aún, se podría lograr analizando imágenes aéreas o satelitales.

## **Recolección de los datos**

Ya se ha configurado el modelo de objetos propuesto, de forma tal de adaptarlo a las necesidades puntuales de la realización de quemas controladas en el Noreste de Río Negro. Para poder realizar las estimaciones, sólo quedaría pendiente realizar un relevamiento, lo más completo posible, del área a quemar y sus alrededores. Ya se propuso cómo representar los distintos factores de influencia, lo que restaría es obtener la mayor cantidad de datos posibles.

## **Administración de la quema**

En base a las condiciones óptimas de quema planteadas en el Boletín Oficial de la Provincia de Río Negro N° 4514 se pueden armar una serie de combinaciones de las características “óptimas” del entorno y realizar estimaciones del comportamiento del fuego con esas características. Por ejemplo, se podría comenzar estimando el comportamiento del fuego con la temperatura promedio de un día de enero, ya que la quema es más efectiva en altas temperaturas y la velocidad del viento rondando los 20km/h.

En base al comportamiento del fuego obtenido por las estimaciones con las distintas combinaciones de características, se puede determinar cuál o cuáles mejor se adaptan a los objetivos planteados. De ahí en más sólo quedaría preparar el entorno y esperar a que se cumplan o al menos se aproximen las características del entorno a alguna de las combinaciones que mejor se adaptan.

# Capítulo 6

## Conclusiones y trabajo futuro

### Conclusiones

En este trabajo de grado se propuso un modelo de objetos para predecir dos aspectos del comportamiento del fuego: la velocidad de propagación del frente y la extensión del perímetro del fuego.

La utilización del modelo Orientado a Objetos permitió el uso de una serie de Patrones de Diseño ampliamente utilizados y testeados. Como resultado, y a diferencia de los sistemas existentes que solo pueden ser utilizados en aquellos entornos para los cuales fueron diseñados, se obtuvo un modelo flexible y altamente usable ya que presenta la posibilidad de configurarlo de manera de predecir el comportamiento del fuego en diferentes superficies y entornos.

Como consecuencia, su ventaja principal radica en su facilidad de extensión y evolución. El modelo no está limitado a realizar estimaciones en base a una serie de algoritmos predeterminados, sino que se enfatizó la posibilidad de enriquecer y configurar el modelo como mejor se adapte a las necesidades particulares de cada usuario del sistema. Agregar nuevos algoritmos de predicción para cualquiera de los dos aspectos del comportamiento del fuego, es extremadamente simple e implica solamente que se cree una nueva subclase. La posibilidad de agregar nuevos algoritmos de estimación hace que se puedan realizar estimaciones en cualquier lugar para el cual se cuente con al menos un algoritmo matemático que estime el comportamiento del fuego en ese entorno. A su vez, el modelo también puede ser extendido fácilmente para que se estimen otros aspectos del comportamiento del fuego, aunque no hayan sido contemplados previamente.

La posibilidad de desacoplar el campo continuo que representa el fuego y los factores que influyen en su comportamiento de las características particulares como el método de estimación que se utiliza o las diferentes maneras de representar las muestras permiten la configuración de cada uno de estos elementos de acuerdo a las necesidades del caso a considerar, produciendo poco impacto en el resto de las entidades involucradas. Por otra parte, el modelo permite integrar la definición de las características del fuego que se está desarrollando, con otra información relevante, como por ejemplo, los factores climáticos.

El modelo tampoco está limitado a realizar estimaciones sólo cuando se cuenta con toda la información requerida por el algoritmo. En algunos casos, los algoritmos demandan que la información tenga un formato particular, como por ejemplo que el

tipo de pastura esté dividido en tipos predefinidos. Si algún factor de influencia no cumple con las características requeridas se puede obtener una derivación, en base a uno o más factores de influencia y de ese modo se puede realizar la estimación.

## **Trabajo futuro**

Para obtener estimaciones del comportamiento del fuego, el modelo propuesto no es suficiente ya que por sí sólo no puede realizar ninguna estimación. Por lo tanto, es necesario que se continúe trabajando sobre algunos puntos hasta obtener un sistema informático que pueda ser utilizado por los bomberos o cualquier otra institución o persona que tenga que lidiar con el fuego. Como no formaban parte de la línea central de investigación, los algoritmos matemáticos en este trabajo fueron tomados como una caja negra, con la cual a partir de una serie de parámetros de entrada se obtiene una salida, sin importar cómo se obtiene esta salida. Es por esto que como primer paso es necesario realizar un estudio minucioso y detallado de los distintos algoritmos matemáticos para la predicción del comportamiento del fuego. El objetivo del estudio de los distintos algoritmos matemáticos radica en seleccionar un subgrupo de algoritmos de estimación. Una vez seleccionado el subgrupo de algoritmos se debe proceder a la implementación de un sistema que, utilizando dicho subgrupo de algoritmos, estime el comportamiento del fuego.

Otra línea de trabajo futuro podría ser la generalización del modelo propuesto de forma tal que permita realizar estimaciones del comportamiento de cualquier fenómeno cuya propagación esté directamente influenciada por los factores del entorno donde se produce y no que esté orientado únicamente al fuego. De esta manera, el modelo genérico podría ser configurado para estimar cualquier fenómeno con estas características, como por ejemplo la propagación del petróleo en los océanos, la fuga de gases o químicos y el movimiento o deshielo de glaciares.

# Referencias bibliográficas

- [1] Aplet, Greg and Crist, Michele. March 2003. Fire and Fuels: Does Thinning Stop Wildfires? The Wilderness Society – Ecology and Economics Research Department Report.
- [2] Graham, Russell T. et al. April 2004. Science Basis for Changing Forest Structure to Modify Wildfire Behavior and Severity. U. S. Department of Agriculture Forest Service Report.
- [3] Dentoni, María C. y Muñoz Mariam. 2001. Glosario de Términos Relacionados con el Manejo del Fuego. Reporte del Plan Nacional de Manejo del Fuego – Secretaría de Desarrollo Sustentable y Política Ambiental. Argentina.
- [4] Abdalhaq, Baker. June 2004. A Methodology to Enhance the Prediction of Forest Fire Propagation. Tesis de doctorado de la Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona, España.
- [5] Incendios Globales – Un Mensaje del Centro Global para el Monitoreo de los Incendios. International Strategy for Disaster Reduction Report - <http://www.unisdr.org/>.
- [6] West, Ben. 2005. Prescribed Burning in Southern Pine Forests: Fire Ecology, Techniques, and Uses for Wildlife Management. Mississippi State University. USA.
- [7] Bushfire Cooperative Research Centre and Australasian Fire Authorities Council. April 2006. Fire Note: The Use of Prescribed Fire in Bushfire Control.
- [8] Cheney, N. P. and Gould, J. S. 1997. Letter to the Editor: Fire Growth and Acceleration. International Journal of Wildland Fire 7(1): 1-5.
- [9] Mc Cormick, Bill. 2002. Bushfires: Is Fuel Reduction Burning the Answer? Information and Research Services Publications.
- [10] Rasmussen, J. H. and Fogarty L. G. 1997. Fire Growth, Fire Behavior and Firefighter Safety – A Review of the Lessons form “A Case Study of Grassland Fire Behavior and Suppression: the Tikokino Fire of January 1991. Fire Technology Transfer Note Number 14 of the New Zealand Forest Fire Research Institute.
- [11] Levine, J. S., Bobbe, T., Ray, N., Singh, A. and Witt, R. G. 1999. Wildland Fires and the Environment: a Global Synthesis. United Nations Environment Programme - Division of Environmental Information, Assessment and Early Warning. 99-1.
- [12] Bodrožić, L., Narasivić, J and Stipaničev, D. Fire Modeling in Forest Fire Management. Department for Modellingg and Intelligent Systems, Faculty of Electrical Engineering, Machine Engineering and Naval Architecture, University of Split, Croatia.
- [13] Sánchez, I. October 2001. Fire Related Models Characteristics and Recommendations on Models Standarisation. CLIFF: Cluster Initiative for Flood and Fire Emergencies. CLIFF/WP400/D4-3.

- [14] Dentoni, María C., Muñoz, Miriam M. y Epele Fernando. 2007. Implementación de un Sistema Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios: La Experiencia Argentina. *Patagonia Forestal* 13(4): 9-12.
- [15] Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Junio de 2007. Estadística de Incendios Forestales 2006. ISSN 1850-7239.
- [16] Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable. Diciembre de 2007. Series Estadísticas Forestales 2000-2006. ISSN 1850-7174.
- [17] Cheney, N. P., Gould, J. S. and Catchpole W. R. 1993. The Influence of Fuel, Weather and Fire Shape Variables on Fire-Spread in Grasslands. *International Journal of Wildland Fire* 3(1): 31-44.
- [18] Garvey, M. and Millie S. September 1999. Grassland Curing Guide. Business Planning and Review – Victorian Country Fire Authority.
- [19] Andrews, Patricia L. and Williams, Jerry T. 1998. Fire Potential Evaluation in Support of Prescribed Fire Risk Assessment. Tall timbers Fire Ecology Conference Proceedings, No. 20. Tallahassee, FL.
- [20] Cheney, N. P., Gould, J. S. and Catchpole W. R. 1998. Prediction of Fire Spread in Grasslands. *International Journal of Wildland Fire* 8(1): 1-13.
- [21] Catchpole, Wendy. 1999. The International Scene and its Impact on Australia. Fire! The Australian Experience - Proceedings of the 1999 Seminar.
- [22] Knight, Ian and Coleman John. 1993. A Fire Perimeter Expansion Algorithm Based on Huygen's Wavelet Propagation. *International Journal of Wildland Fire* 3(2): 73-84.
- [23] Hoseinali, F. and Rajabi, M. A. Forest Fire Management using Geospatial Information System. Department of Geomatics Engineering, University of Tehran, Iran.
- [24] Borlawsky, Tara. 2000. Forest Fire Simulation Using Percolation Theory.
- [25] Aronoff, Stan. Geographic Information Systems: A Management Perspective. WDL Publications. Fourth Printing, 1995. ISBN 0-921804-91-1. Canada.
- [26] Polasek, L., Zambrano, A. y Gordillo, S. An Architecture to Manipulate Continuous Fields in GIS Applications. LIFIA – Facultad de Informática – UNLP.
- [27] Zambrano, A. F. 2001. Manipulación de Campos Continuos y su Aplicación a los Sistemas de Información Geográfica. Tesina de Grado. Facultad de Informática – UNLP.
- [28] Gamma, E., Helm, R., Johnson, R. and Vlissides, J. Design Patterns – Elements of Reusable Object-Oriented Software. Addison Wesley Longman, Inc.
- [29] Johnson, R. and Woolf, B. 1997. The Type Object Pattern. <http://www.ksc.com/article3.htm>
- [30] Bran, D., Cecchi, G., Ayesa, J., López, C., Barrios, D. y Umaña, F. 2003. Evaluación y Monitoreo de Áreas Afectadas por Grandes Incendios en el NE de la Provincia de Río Negro (Argentina) por Medio de Imágenes SAC-C y Landsat-TM. INTA Regional Patagonia Norte.
- [31] Villasuso, N. M., Bolla, D. y Kröpfl, A. Cambios en la Vegetación Producidos por una Quema Controlada en el Monte Nor-Oriental Rionegrino. Centro Regional Zona Atlántica, Universidad Nacional del Comahue. INTA EEA, Valle Inferior.
- [32] Anderson, David L. 1984. El Fuego como Elemento de Manejo del Pastizal Natural. Informativo Rural, E.E.A. INTA San Luis, Villa Mercedes, 20:3-4
- [33] Boletín Oficial de la Provincia de Río Negro N° 4514. Secretaría General de la Gobernación – Dirección Boletín Oficial. Viedma, 10 de mayo del 2007.