

# Modelado de Incendios Forestales con Influencia del Viento

Sofía Díaz Martínez, Sharid Silva Garcia, Francisco Rodríguez Rugeles

February 26, 2025

## 1 Introducción

Los incendios forestales son eventos naturales o provocados que afectan grandes extensiones de bosques, selvas o pastizales. Estos incendios pueden iniciarse por causas naturales, como rayos o erupciones volcánicas, o por la acción humana, ya sea intencional o accidental. Su propagación depende de múltiples factores, como la disponibilidad de material combustible, la temperatura y la humedad.

En este proyecto, se enfocará en el papel que juega el viento en la propagación de los incendios forestales. El viento puede influir de diversas maneras:

- Incrementa la velocidad de propagación del fuego al aportar oxígeno adicional a la combustión.
- Transporta brasas y chispas a largas distancias, facilitando la aparición de nuevos focos de incendio.
- Modifica la dirección del fuego, dificultando su control y aumentando su imprevisibilidad.

El estudio de los incendios forestales y su interacción con el viento es fundamental para:

- Predecir su comportamiento y mejorar las estrategias de prevención.
- Optimizar la asignación de recursos en la lucha contra el fuego.
- Desarrollar modelos computacionales que permitan simular distintos escenarios y evaluar estrategias de mitigación.

Las simulaciones computacionales permiten analizar diferentes condiciones ambientales y mejorar la toma de decisiones en la gestión de incendios forestales. Comprender cómo el viento influye en los incendios forestales es clave para prevenir catástrofes ambientales y humanas. El uso de modelos y simulaciones nos ayuda a anticiparnos y mejorar la respuesta ante estos eventos.

## 2 Formulación del Problema

Los incendios forestales representan una amenaza significativa para los ecosistemas y comunidades cercanas. La complejidad de su propagación radica en la interacción de múltiples factores ambientales, entre los cuales el viento juega un papel fundamental. La velocidad y dirección del viento pueden transformar un incendio controlado en un evento de rápida expansión y difícil contención.

Para abordar este problema, se plantean las siguientes preguntas clave:

- ¿Cómo afecta la velocidad y dirección del viento en la propagación del fuego?
- ¿Es posible predecir patrones de propagación del incendio en función de la intensidad y dirección del viento?
- ¿Cómo pueden utilizarse modelos computacionales para simular la propagación del fuego bajo diferentes condiciones de viento?

## 3 Modelo Conceptual

Los incendios forestales representan un fenómeno natural y antrópico con importantes repercusiones ecológicas, climáticas y socioeconómicas. Su estudio y modelado permiten comprender los factores que influyen en su propagación y brindar herramientas para su prevención y control. En este informe se presenta un modelo conceptual del funcionamiento de los incendios forestales, que servirá de base para el desarrollo de un modelo formal de simulación.

### 3.1 Elementos Fundamentales del Incendio

Para que un incendio forestal ocurra, deben estar presentes los siguientes elementos:

- **Combustible:** Incluye vegetación seca, hojarasca, árboles, pasto y troncos caídos. Su disponibilidad y tipo influyen en la intensidad del fuego.
- **Fuente de ignición:** Puede ser de origen natural, como rayos y erupciones volcánicas, o antrópico, como fogatas, colillas de cigarro mal apagadas y quemadas agrícolas.
- **Oxígeno:** Presente en el aire, es un elemento esencial para la combustión.
- **Calor:** Un aumento en la temperatura del combustible hasta su punto de ignición provoca el inicio y la propagación del fuego.

### 3.2 Factores que Influyen en la Propagación

La velocidad y dirección del incendio dependen de diversos factores ambientales y topográficos:

- **Tipos de combustibles:** La densidad, humedad y continuidad de la vegetación determinan la facilidad con la que el fuego se expande.
- **Condiciones meteorológicas:**
  - *Viento:* Influye en la dirección y rapidez de la propagación.
  - *Temperatura:* Temperaturas elevadas favorecen la ignición y propagación del fuego.
  - *Humedad:* Un ambiente seco y suelos con baja humedad facilitan la combustión.
- **Topografía:**
  - Pendientes pronunciadas permiten que el fuego ascienda rápidamente.
  - Valles y cañones pueden canalizar el viento y aumentar la intensidad del incendio.

### 3.3 Tipos de Incendios Forestales

Los incendios forestales pueden clasificarse según su propagación y el tipo de vegetación afectada:

- **Incendios superficiales:** Se propagan sobre el suelo, afectando pastizales, arbustos y hojarasca.
- **Incendios subterráneos:** Queman la materia orgánica del suelo y las raíces de las plantas. Son de combustión lenta y pueden ser difíciles de detectar.
- **Incendios de copa:** Afectan la parte alta de los árboles y se propagan rápidamente por las copas, siendo los más difíciles de controlar.

### 3.4 Impactos de los Incendios Forestales

Los incendios forestales generan efectos negativos en diversos aspectos:

- **Ecológicos:** Pérdida de biodiversidad, alteración del ciclo del agua y degradación del suelo.
- **Climáticos:** Liberación de grandes cantidades de gases de efecto invernadero, lo que contribuye al calentamiento global.
- **Socioeconómicos:** Pérdida de recursos forestales, afectación de comunidades cercanas y costos elevados en tareas de prevención y combate.

## 4 Modelo Formal

Para modelar el viento en la simulación de incendios forestales, se considera el uso de una estructura de grafos bidimensional en lugar de una cuadrícula bidimensional. Este enfoque permite representar de manera más realista la distribución de los árboles, ya que en la naturaleza no suelen estar organizados de forma uniforme.

### 4.1 Estructura del Modelo

El uso de grafos bidimensionales facilita la representación de conexiones irregulares entre los elementos del ecosistema. Cada nodo del grafo representa un árbol o una unidad de vegetación, y las aristas modelan la interacción entre ellos.

### 4.2 ¿Qué es un Grafo?

Un grafo es una estructura matemática compuesta por un conjunto de vértices y aristas. En el contexto de esta simulación, los vértices representan los árboles y las aristas modelan la relación de flamabilidad y la distancia entre ellos.

Se utiliza un grafo debido a su versatilidad en la representación de la disposición de los árboles. Esta estructura permite modelar desde una cuadrícula regular de árboles hasta distribuciones aleatorias, adaptándose a distintos escenarios de simulación. Gracias a esta flexibilidad, el modelo puede representar configuraciones realistas del bosque y su comportamiento frente a la propagación del fuego.

### 4.3 Implementación Tecnológica

La simulación se desarrolla utilizando herramientas de desarrollo web debido a su capacidad de visualización y versatilidad lógica. Las tecnologías empleadas incluyen:

- **CSS:** Para el diseño visual de la interfaz.
- **HTML:** Para la estructura y organización de los elementos en la simulación.
- **JavaScript:** Para la lógica de propagación del fuego y modelado del viento.

### 4.4 Modelo Matemático del Viento

A nivel matemático, se utiliza un modelo donde el viento se representa como un vector bidimensional, donde la primera coordenada corresponde a la velocidad y la segunda al ángulo. Esto permite representar tanto la velocidad del viento como su dirección en el plano cartesiano. Para determinar si un árbol se incendiará o no, se utilizan dos reglas basadas en normas diferentes:

#### 4.4.1 Primera Regla: Vector Resultante

Se utiliza la siguiente fórmula para representar el viento como un vector bidimensional:

$$V_x = v \cdot \cos(\theta \cdot \pi/180) \quad (1)$$

$$V_y = v \cdot \sin(\theta \cdot \pi/180) \quad (2)$$

Esto nos proporciona la conversión de sus componentes fundamentales.

#### 4.4.2 Segunda Regla: Ángulo de Propagación

La segunda regla se basa en el ángulo formado respecto al vector de propagación original. Este se calcula mediante la fórmula:

$$\theta = \arcsin \left( \frac{\vec{V} \cdot \vec{P}}{\|\vec{V}\| \cdot \|\vec{P}\|} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

donde  $\vec{V}$  es el vector del viento y  $\vec{P}$  el vector de propagación original.

## 5 Suposiciones y Aproximaciones

Para simplificar el modelo y facilitar su análisis, se hacen las siguientes suposiciones:

- Se asume que si en el grafo un árbol está conectado a otro, independientemente de la distancia entre ellos, la probabilidad de que se incendie es siempre 1. No obstante, esto no ignora la influencia del viento sobre las normas establecidas.
- Se supone que el viento permanece constante durante todo el incendio, manteniendo tanto su ángulo como su velocidad.
- Se considera que el terreno es plano y uniforme, sin variaciones en la topografía. Además, todos los árboles tienen el mismo tamaño.
- Se ignoran las fuentes originales del incendio y el modelo se enfoca exclusivamente en la dirección y velocidad del viento como factores de propagación. Asimismo, se asume que el incendio afecta a cada árbol de manera uniforme.
- No se analizan los impactos ambientales, climáticos o sociales del incendio, ya que el objetivo principal es estudiar la propagación del fuego dentro del bosque bajo las condiciones establecidas.

## 6 Simulación y Resultados

La extensión del proyecto seleccionada fue la influencia del viento en la propagación de incendios forestales. El objetivo es determinar cómo las corrientes de aire afectan la propagación del fuego y cómo pueden modificar su dirección y alcance.

Para modelar este fenómeno, se representa el viento como un vector bidimensional que influye en la propagación del fuego. Si el viento es lo suficientemente fuerte en una dirección, puede alterar el rumbo del incendio, afectando ciertas áreas mientras protege otras. La simulación busca identificar qué zonas quedan más expuestas al fuego debido a esta influencia.

En la simulación se consideran dos factores clave:

- La distribución de los árboles ya no sigue una grilla regular, sino que se modela mediante un grafo, lo que permite representar de manera más realista la estructura de los bosques, que no se organizan de forma perfectamente cuadrículada.
- Cada árbol se representa como un vértice en el grafo, y las aristas indican la distancia a la que el fuego puede propagarse. La cantidad de árboles vecinos no aumenta con la presencia del viento, pero sí puede disminuir si la dirección del viento impide la propagación en ciertas direcciones.
- Se tiene en cuenta que el ángulo puede variar, por lo que se añade un nuevo parámetro, se tiene en cuenta el ángulo de ataque, de un árbol a otro, que está dentro de un rango factible.

Para la implementación de la simulación, se utilizó JavaScript debido a su versatilidad en la generación de elementos visuales mediante CSS y HTML. No se emplearon librerías externas, limitándose al paquete estándar de JavaScript, lo que garantiza una mayor flexibilidad en la representación y manipulación de los datos.

Ver la simulación en el [GitHub](#)

## 7 Conclusión

Los resultados sugieren que el viento es un factor clave en la propagación del fuego y es bueno considerarse en modelos predictivos para la gestión de incendios forestales. Al conocer la velocidad y el ángulo del viento, y al hacer suposiciones que permiten simplificar un modelo complejo a un modelo representable a través de herramientas computacionales y matemáticas, se pueden realizar predicciones no tan alejadas del mundo real, además da paso a que se pueda crear modelos más complejos para predicciones más exactas teniendo en cuenta otros factores que hacen más rigurosa una predicción.

## Referencias

## References

- [1] Gobierno de Argentina. *Variables que influyen en el comportamiento del fuego*. 2025. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/fuego/conocemas/variables>.
- [2] Bomberos de Navarra. *Incendios forestales*. 2025. Disponible en: [https://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros\\_documentos/forestal2.pdf](https://www.bomberosdenavarra.com/documentos/ficheros_documentos/forestal2.pdf).