

Sistema multiagente para Simular a Propagação de incêndios florestais

David Gomes Fidalgo

¹ Eduardo José Solteiro Pires; epires@utad.pt
² Arsénio Monteiro dos Reis; ars@utad.pt
³ José Paulo Barroso de Moura Oliveira; oliveira@utad.pt
⁴ António Manuel de Jesus Pereira; apereira@ipleiria.pt
⁵ João Manuel Pereira Barroso; jbarroso@utad.pt
* Correspondence: david.fidalgo1010@gmail.com
† Current address: Vila Real, Portugal

Abstract: Os incêndios florestais são fenómenos altamente destrutivos, com impactos ecológicos e climáticos severos. Este trabalho apresenta um modelo de simulação multiagente para propagação de incêndios florestais, utilizando a biblioteca Mesa em Python. O ambiente simulado integra variáveis ambientais dinâmicas, como temperatura, humidade, direção e velocidade do vento, e precipitação. Além disso, a emissão e dispersão de fagulhas (partículas incandescentes) e a degradação do ar, com monitorização dos níveis de CO, CO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ e O₂. A interface gráfica, com PySide6, permite a monitorização e controlo da simulação em tempo real, incluindo parâmetros ambientais e comportamento do fogo. A probabilidade de ignição de cada célula é calculada com base na distância ao fogo, altitude, tipo de vegetação e condições meteorológicas. Foram criados e testados doze cenários combinando diferentes níveis de temperatura, humidade, precipitação e vento. Os resultados indicam que ventos fortes (acima de 10m/s) favorecem a propagação generalizada do fogo, mesmo com humidade elevada, enquanto níveis elevados de precipitação podem inibir o avanço das chamas. A plataforma desenvolvida constitui uma ferramenta intuitiva e extensível para a compreensão das dinâmicas do fogo e para a avaliação de estratégias de mitigação sob diversas condições ambientais, contribuindo para uma gestão de risco mais eficaz.

Keywords: Forest Fire Simulation; Mesa; Multi Agent System; Fire Propagation

1. Introdução

Os incêndios florestais representam uma das ameaças ambientais mais devastadoras, causando destruição significativa dos ecossistemas, perda da biodiversidade e impactos climáticos severos. Anualmente, milhões de hectares são consumidos pelo fogo, destacando a importância crucial de desenvolver sistemas eficazes para prever e mitigar esses desastres naturais.

A previsão de incêndios florestais requer a análise de múltiplos fatores ambientais e meteorológicos, incluindo temperatura, humidade do ar, velocidade do vento e precipitação. No entanto, métodos tradicionais de monitoramento e detecção precoce apresentam limitações significativas, exigindo abordagens tecnológicas mais avançadas. Nesse contexto, a Inteligência Artificial oferece um grande potencial para desenvolver e estudar fenómenos em ambientes simulados através da simulação de comportamentos animais e processos naturais, possibilitando a previsão de resultados no mundo real.

Received:

Accepted:

Published:

Citation: . Title. *Journal Not Specified* 2025, 1, 0.

Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted to *Journal Not Specified* for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1.1. Enquadramento

Os incêndios florestais são eventos dinâmicos e complexos, influenciados pela interação de fatores como tipos de combustíveis vegetais, condições meteorológicas (vento, temperatura, humidade) e topografia. Essas variáveis influenciam significativamente o comportamento do fogo, dificultando previsões exatas sobre sua propagação. Os incêndios podem ocorrer em diferentes estratos da floresta: incêndios subterrâneos queimam matéria orgânica abaixo da superfície (húmus, raízes), geralmente lentamente e com pouca intensidade; incêndios de superfície consomem vegetação rasteira e madeira caída; e incêndios de copa, os mais severos, atingem as partes superiores das árvores. A passagem de um incêndio superficial para um incêndio de copa ocorre quando há continuidade vertical do combustível, baixa humidade da vegetação e condições de vento favoráveis. Estes incêndios propagam-se principalmente por três mecanismos: radiação térmica, convecção e projeção de partículas. A radiação térmica aquece materiais antes mesmo do contato direto com as chamas. A convecção acontece por meio de colunas de ar quente e chamas ascendentes, que podem espalhar o fogo através da direção causada pelo vento. A projeção de partículas (firebrands) pode criar focos secundários, dificultando o controlo das chamas [1].

As estratégias de combate dependem da intensidade e comportamento do fogo. Para incêndios de baixa intensidade, o ataque direto é preferível, permitindo combater diretamente a frente das chamas utilizando água, terra ou linhas de contenção próximas ao fogo, oferecendo segurança relativa às equipas envolvidas no combate [2].

Quando o incêndio é intenso e de rápida propagação, o ataque indireto torna-se necessário, envolvendo a criação de linhas de controle afastadas e o uso de fogo técnico, como contrafogos, aproveitando barreiras naturais ou artificiais. Embora o ataque indireto sacrifique áreas de vegetação, é frequentemente a única opção segura e eficaz em situações críticas [3].

Os Simuladores e modelos computacionais têm um papel fundamental na previsão e gestão desses eventos. Os modelos físicos utilizam equações de dinâmica dos gases e combustão; modelos empíricos baseiam-se em dados históricos para prever o comportamento do fogo; e os modelos híbridos combinam ambos. Simuladores como o FARSITE, que utilizam informações sobre terreno e vegetação, permitem prever detalhadamente a evolução de um incêndio, auxiliando significativamente nas decisões operacionais de combate.

Assim, compreender o comportamento dos incêndios e aplicar técnicas avançadas de previsão são elementos essenciais para melhorar a gestão e resposta a incêndios florestais, protegendo vidas, ecossistemas e bens materiais.

1.2. Background

Como referido na Secção 1.1, a previsão de incêndios florestais é um problema complexo que exige modelos capazes de lidar com múltiplas variáveis ambientais, como temperatura, humidade, vento e precipitação. Métodos de forma convencionais, baseados em análise estatística e previsões meteorológicas, apresentam limitações, pois dependem de informações centralizadas e, muitas vezes, não conseguem responder em tempo real a mudanças abruptas nas condições do ambiente.[4]

Nesse contexto, os sistemas multiagentes surgem como uma abordagem inovadora, inspirada na forma como organismos naturais interagem e reagem a ameaças no meio ambiente. Muitos animais demonstram comportamentos instintivos de antecipação ao perigo de incêndios. Por exemplo, bandos de pássaros e grupos de mamíferos ajustam seus padrões de deslocamento em resposta a variações de temperatura e vento, muitas vezes antes mesmo da chegada do fogo. Inspirando-se nesses processos naturais, um sistema

multiagente pode funcionar de forma distribuída, onde agentes autônomos interagem localmente para melhorar a precisão e eficiência das previsões.

Para avaliar o impacto do incêndio na qualidade do ar, monitorizam-se em cada iteração os níveis de CO, CO₂, PM_{2.5}, PM₁₀ e O₂, seguindo a razão

$$\frac{\Delta O_2}{\Delta CO_2}$$

medida por Ward et al. [5]. Nesse estudo, demonstrou-se que a quantidade de oxigênio consumido e de dióxido de carbono emitido mantém correlação direta com a intensidade da combustão: picos de CO₂ indicam fases de queima mais completa, enquanto aumentos relativos de CO acompanhados de queda abrupta de O₂ sinalizam queima ineficiente e maior formação de fumos densos.

Ao longo dos anos, diversos estudos foram conduzidos para aprimorar a detecção e previsão desses desastres ambientais. Karafyllidis et al. [6] foram pioneiros ao utilizar Autômatos Celulares (CA) para modelar a propagação do fogo. Essa abordagem, na qual cada célula interage apenas com seus vizinhos imediatos, é análoga a um sistema multiagente, onde agentes operam de forma independente, mas compartilham informações entre si para tomar decisões coletivas.

No entanto, prever incêndios exige mais do que apenas simular sua propagação. Métodos capazes de interpretar padrões complexos ao longo do tempo também se tornaram uma tendência. Natekar et al. [7] aplicaram Redes Neurais Recorrentes (RNN) como a LSTM para prever incêndios com base em séries temporais, identificando padrões históricos e ajustando as suas previsões de acordo com mudanças sutis no ambiente. Outra abordagem que pode ser integrada em sistemas multiagentes é o uso de modelos de inferência neuro-fuzzy, como o desenvolvido por Nebot e Mugica [8].

A lógica fuzzy permite que modelos tomem decisões mesmo com informações incertas ou incompletas, o que é essencial para agentes que operam em ambientes dinâmicos e imprevisíveis. Com isso, cada agente pode ajustar seu comportamento conforme novos dados se tornem disponíveis, melhorando a resposta do sistema como um todo.

Além disso, alguns estudos apontam que a combinação de diferentes técnicas de aprendizado automática pode aprimorar a robustez da previsão. Ghorbanzadeh et al. [9] compararam Redes Neurais Artificiais (ANN), Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) e Floresta Aleatória (RF), demonstrando que métodos híbridos podem melhorar a precisão das previsões. Em um sistema multiagente, essa abordagem pode ser aplicada distribuindo diferentes funções entre os agentes, tornando o sistema mais resiliente e eficiente.

A inteligência coletiva, inspirada no comportamento de enxames e colônias de animais, também tem sido explorada como uma alternativa para previsão de incêndios. Gaikwad et al. [10] utilizaram Algoritmos Genéticos (GA), Lógica Fuzzy (FL) e Redes Bayesianas (BN) para ajustar dinamicamente modelos de previsão. Em um sistema multiagente, agentes poderiam evoluir suas estratégias ao longo do tempo, melhorando a sua previsão e reação de acordo com a experiência adquirida, tal como ocorre em sistemas biológicos adaptativos.

Paralelamente, a detecção de incêndios também pode ser determinada através de redes de sensores distribuídas. Kumar et al. [11] propuseram um modelo baseado em redes de sensores sem fio, onde cada nó da rede funciona como um agente autônomo capaz de monitorar variáveis ambientais e comunicar alertas a outros agentes próximos. Essa abordagem permite um monitoramento descentralizado e em tempo real, reduzindo o tempo de resposta a incêndios.

Outra contribuição relevante nesse campo foi feita por Al Janabi et al. [12], que integraram sistemas multiagentes com inteligência artificial. Nesse estudo, os agentes são capazes de aprender localmente a partir dos dados da sua região e colaborar para refinar

previsões, tornando o sistema mais adaptativo e eficiente. Essa abordagem demonstra o potencial de um sistema multiagente onde os agentes interagem, aprendem e tomam decisões coordenadas para melhorar a detecção e contenção de incêndios.

Além dessas estratégias, alguns estudos exploraram a combinação de sensores locais e imagens de satélite para monitoramento de incêndios. Cortez e Moraes [13] analisaram a eficácia dessa abordagem e mostraram que, apesar de sua precisão ser limitada (61%), um sistema descentralizado de sensores poderia oferecer uma resposta mais eficaz. Quando aplicado a um sistema multiagente, cada agente pode funcionar como um sensor autônomo, otimizando a comunicação entre os nós e a reação ao perigo.

Adicionalmente, estudos que combinam sensores locais com imagens de satélite têm se mostrado promissores para a vigilância e avaliação de riscos. Em uma análise abrangente, Zhang et al. [14] destacam a importância de integrar dados de sensores remotos com modelos de simulação para não só detectar incêndios de forma precoce, mas também estimar emissões e prever riscos com maior acurácia. Essa abordagem, que se fundamenta na combinação de observações em larga escala com análises computacionais avançadas, reforça a viabilidade de sistemas multiagentes que colaboram por meio de múltiplas fontes de dados, possibilitando respostas mais rápidas e eficazes.

Além disso, modelos híbridos de aprendizagem profunda têm sido exploradas para melhorar a previsão de incêndios. Khamparia et al. [15] desenvolveram um modelo que combina Redes Neurais Convolucionais (CNN) e Redes Neurais Recorrentes (RNN), integrando dados de sensoriamento remoto e informações meteorológicas. Esse estudo demonstrou que a utilização simultânea de fatores como temperatura, humidade, velocidade do vento, índice de vegetação e dados históricos de incêndios permite um aumento na precisão das previsões. Esse tipo de abordagem pode ser adaptado para sistemas multiagentes, onde diferentes agentes podem se especializar na análise de diferentes fontes de dados, tornando a previsão mais robusta e adaptável a diferentes cenários ambientais.

Por fim, algumas abordagens eliminam a necessidade de previsões meteorológicas externas e operam com base exclusivamente em variáveis ambientais locais. Sakr et al. [16] demonstraram que a previsão de incêndios pode ser feita de maneira autônoma, analisando dados como temperatura, humidade e vento diretamente no local. Isso reforça a viabilidade de um sistema multiagente autônomo, onde cada agente pode operar de forma independente, tomando decisões localmente e reduzindo a dependência de uma infraestrutura centralizada. Diante dessas abordagens, fica evidente que os modelos mais promissores para a previsão de incêndios são aqueles que incorporam inteligência distribuída, aprendizagem adaptativa e cooperação entre agentes autônomos. Ao combinar técnicas como redes neurais recorrentes, lógica fuzzy, autômatos celulares e algoritmos inspirados no comportamento animal, um sistema multiagente pode oferecer previsões mais eficientes, permitindo respostas mais rápidas e eficazes à ameaça dos incêndios florestais.

Diante dessas abordagens, fica evidente que os modelos mais promissores para a previsão de incêndios são aqueles que incorporam inteligência distribuída, aprendizagem adaptativa e cooperação entre agentes autônomos. Ao combinar técnicas como redes neurais recorrentes, lógica fuzzy, autômatos celulares e algoritmos inspirados no comportamento animal, um sistema multiagente pode oferecer previsões mais eficientes, permitindo respostas mais rápidas e eficazes à ameaça dos incêndios florestais.

Modelos baseados em agentes têm se mostrado capazes de reproduzir a propagação de incêndios florestais como um fenômeno emergente a partir de interações locais. Por exemplo, Katan & Perez propuseram o ambiente ABWiSE, no qual agentes móveis representam fragmentos da frente de fogo e, mesmo com regras simples, replicam padrões complexos de propagação comparáveis a simuladores físicos tradicionais [17].

Table 1. Resumo dos Artigos

Trabalho	Fatores	Modelo(s)	Precisão
[6]	Direção e velocidade do vento	Autômatos Celulares	N/A
[7]	Padrões temporais, histórico de incêndios	RNN (LSTM)	94.77%
[8]	Clima e condições meteorológicas	FIR, ANFIS	89%
[9]	Temperatura, humidade, vento	ANN, SVM, RF	88%
[10]	Aprendizado evolutivo, comportamento adaptativo	GA, FL, BN	90%
[11]	Redes de sensores distribuídas	Redes de Sensores sem fio	N/A
[12]	Aprendizado local e colaboração entre agentes	Sistemas Multiagentes com IA	N/A
[13]	Sensores locais e imagens de satélite	Monitoramento remoto via satélite	61%
[16]	Variáveis ambientais locais (temperatura, humidade, vento)	Previsão autônoma sem dados meteorológicos	96%
[14]	Sensores remotos, simulação de modelos, estimativa de emissões e previsão de riscos	Integração de sensores remotos e simulação de modelos	N/A
[17]	Propagação de fogo via agentes móveis (AB-WiSE)	Simulação multiagente distribuída	N/A
[18]	Regras adaptativas, dados empíricos	Híbrido: CA + agentes inteligentes	N/A
[19]	Manejo florestal, ignições estocásticas	Envision com módulo multiagente	N/A
[20]	Turfeiras, fogo superficial e subterrâneo	PeatFire (modelo acoplado multiagente)	N/A
[21]	Dispersão 3D de fumaça no tempo	Simulação multiagente em 4D	N/A

Já *Zhou et al.* desenvolveram um modelo híbrido que integra autômatos celulares com agentes inteligentes capazes de ajustar em tempo real as regras de difusão do fogo, melhorando a aderência a dados empíricos [18].

Em outro nível, Ager et al [19] incorporaram um módulo de fogo multiagente ao modelo de paisagem Envision, combinando ignições estocásticas e propagação mecanística em alta resolução, o que permitiu analisar como decisões de manejo florestal afetam regimes de fogo futuros.

No contexto de ecossistemas de turfeiras, Widyastuti et al. [20] criaram o PeatFire, que modela simultaneamente fogo superficial e subterrâneo, além de ações humanas, demonstrando como processos acoplados emergem de interações de múltiplos agentes.

Por fim, Smith et al. [21] estenderam o arcabouço multiagente para quatro dimensões, simulando a dispersão de fumaça em 3D mais o tempo, evidenciando a capacidade de agentes de partículas reproduzirem de forma realista a dinâmica temporal e vertical da pluma de fumaça.

Table 2. Número de artigos por fator considerado

Fator	Número de Artigos
Temperatura	7
Vento	6
Humidade	5
Precipitação	3
Padrões Temporais	4

Table 3. Número de artigos por técnica utilizada

Técnica	Número de Artigos
Aprendizagem Adaptativa	4
Autômatos Celulares	2
Lógica Fuzzy	3
Sistemas Multiagentes	7
Redes de Sensores	3
Simulação Espacial 4D	1
Modelos Híbridos (CA + agentes)	1
Simulação de Interações Socioambientais	2

1.3. Estrutura do Artigo

Este artigo está organizado da seguinte forma: na Secção 2 (Material e Métodos) será falado sobre o modelo multiagente, detalhando os agentes envolvidos, as variáveis ambientais consideradas e os métodos utilizados para o desenvolvimento da plataforma; na Secção 3 (Resultados) será apresentado os resultados de algumas simulações, incluindo gráficos e mapas de propagação entre cenários; por fim, na Secção 4 (Conclusão e Trabalho Futuro) discutimos as principais conclusões, evidenciamos os achados mais relevantes e apontamos direções para extensões futuras do sistema.

2. Material e Métodos

Como estratégia de modelação, optou-se pela utilização da **biblioteca multiagente Mesa**, escrita em Python, por se tratar de uma ferramenta aberta e flexível. O ambiente simulado é representado por um reticulado bidimensional, onde cada célula pode adoptar diferentes estados (por exemplo, vegetação intacta, em combustão ou queimada). Para além disso, foram incorporados mecanismos de dispersão de partículas incandescentes, simulando fenómenos de projecção de fagulhas, bem como um módulo simplificado de qualidade do ar, que avalia a concentração de poluentes em função do número de áreas a arder.

A modelação do fogo abrange ainda factores atmosféricos, nomeadamente temperatura, direcção e intensidade do vento, humidade e precipitação. Estes podem ser ajustados dinamicamente ao longo da simulação, reproduzindo variações climáticas e permitindo estudar cenários diversos, desde condições de elevada secura (mais propensas a incêndios) até a períodos chuvosos.

Neste modelo, as variáveis meteorológicas são parametrizadas para refletir fielmente as condições ambientais que afetam a propagação do fogo e a dispersão de fagulhas. Cada variável—temperatura, humidade, precipitação e vento—é definida dentro de um intervalo específico e interage de forma dinâmica com os agentes, permitindo explorar cenários climáticos diversos.

- **Temperatura (°C):** varia continuamente entre 0 °C e 40 °C, permitindo simular desde dias frios a ondas de calor moderadas.
- **Humidade (%):** expressa como a percentagem de vapor de água presente no ar, com valores entre 0 % (ar completamente seco) e 100 % (saturação).
- **Precipitação (%):** interpretada como a probabilidade de ocorrência de chuva em cada iteração, variando de 0 % (céu limpo) a 100 % (chuva certa).
- **Vento:** definido por módulo e direcção; a velocidade pode atingir até 15 m/s, abrangendo brisas leves a ventos fortes, e a direcção é escolhida entre 0° e 360°.
- **Dispersão de fagulhas:** em cada passo, gera-se um número variável de partículas incandescentes – proporcional à velocidade do vento – que se deslocam consoante essa velocidade e direcção; o seu *alcance máximo* antes de apagarem também depende da rapidez do vento, modelando assim a projecção realista de fagulhas.

O método a usar será um sistema multi-agente, que é um conjunto de agentes que coexistem num mesmo ambiente e interagem, quer cooperando para atingir objetivos comuns, quer competindo por recursos, ou ainda operando de forma mista; estes agentes tomam decisões descentralizadas com base em modelos internos (objetivos, crenças e capacidades), adaptam-se a mudanças ambientais, partilham informação para coordenar tarefas e geram comportamentos coletivos emergentes que permitem resolver problemas distribuídos, dinâmicos e complexos de forma mais flexível, robusta e escalável do que uma abordagem monolítica centralizada.

O ambiente num sistema multi-agente é o espaço que define as variáveis do “mundo” (como temperatura, humidade, vegetação ou obstáculos), fornece percepções aos agentes e processa as suas ações, atualizando o estado global conforme as interações locais; é este contexto comum que condiciona o comportamento de cada agente e permite que, através das suas decisões autónomas, surjam dinâmicas coletivas e padrões emergentes que refletem a evolução do sistema como um todo.

3. Resultados

Nesta secção, apresentam-se os primeiros resultados obtidos com a simulação do modelo multiagente desenvolvido com a biblioteca **Mesa**, integrando também uma interface gráfica interativa construída com **PySide6**. O objetivo do sistema é permitir a visualização, manipulação e análise do comportamento do fogo em diferentes condições ambientais, de forma intuitiva e científica.

3.1. Comportamento do Modelo

A simulação ocorre num ambiente reticulado bidimensional, onde cada célula representa uma parcela de terreno que pode conter vegetação (pinheiro ou eucalipto), estrada, rio ou estar vazia. Cada patch florestado funciona como um agente autónomo, capaz de transitar entre diferentes estados: *florestado*, *em perigo*, *em combustão* ou *queimado*, dependendo das condições locais e do impacto de agentes vizinhos.

Um dos principais mecanismos de propagação do fogo entre patches vizinhos baseia-se na equação 3.1 que leva em conta diversos fatores ambientais. A probabilidade final P de ignição de um patch vizinho é dada por:

$$P = \frac{1}{d} \cdot \left(\alpha_{alt} \cdot \frac{1}{h} + \alpha_{prec} \cdot R + \alpha_{altu} \cdot H + \alpha_{hum} \cdot \frac{1}{u} + \alpha_{vento} \cdot V + \alpha_{temp} \cdot T \right) \cdot F \quad (1)$$

Na equação 3.1, d representa a distância ao foco de incêndio, enquanto h corresponde à altitude do *patch*. A variável R indica a ausência de chuva, assumindo o valor 1 se o local estiver seco e 0 se estiver a chover. A altura da árvore é representada por H , e u refere-se à humidade relativa do ar. O fator do vento, V , é calculado com base na direção e intensidade do vento. A temperatura ambiente é dada por T , e F corresponde ao fator do tipo de árvore, com valores típicos como 0,8 para eucalipto e 0,5 para pinheiro. Por fim, α_i representa os pesos atribuídos empiricamente a cada variável, calibrados com base em dados experimentais ou observacionais.

Esta fórmula permite simular de forma realista a influência de condições como ventos fortes, baixa humidade ou calor extremo, criando situações onde o fogo se alastra rapidamente, inclusive gerando novos focos à distância através de partículas incandescentes (*fragulhas*).

3.2. Agentes do Modelo

O modelo desenvolvido assenta numa arquitectura multiagente, onde diferentes tipos de agentes desempenham papéis específicos na simulação do comportamento do fogo em ambiente florestal. Esta abordagem permite uma representação mais flexível e realista das dinâmicas envolvidas, integrando factores ambientais, físicos e biológicos.

Os principais agentes considerados no sistema são:

- **PatchAgent** — representa uma célula do terreno e constitui a unidade base da simulação. Cada patch pode encontrar-se em diferentes estados, nomeadamente: *florestado*, *em combustão*, *queimado*, *em perigo*, *estrada*, *rio* ou *vazio*. Para além do estado, cada patch possui propriedades como o tipo de árvore (eucalipto ou pinheiro), altura da vegetação, altitude e um tempo de combustão associado. São também os patches florestados que, quando em chamas, originam a emissão de fagulhas.
- **FragulhaAgent** — modela partículas incandescentes projectadas a partir de zonas em combustão, que são transportadas pelo vento. Cada fragulha calcula o seu trajeto com base na direção e intensidade do vento e pode dar origem a novos focos de

incêndio ao atingir patches com vegetação. Este comportamento simula de forma simplificada o fenómeno da ignição por projecção de brasas.

- **AirAgent** — funciona como um agente de monitorização da qualidade do ar no ambiente simulado. A sua função é calcular os níveis de poluentes atmosféricos (CO, CO₂, PM2.5 e PM10) e o teor de oxigénio (O₂), em função da quantidade de área ardida no momento. Desta forma, é possível acompanhar o impacto ambiental do incêndio ao longo do tempo.

A combinação destes agentes permite reproduzir, de forma simplificada mas funcional, os principais mecanismos de propagação do fogo e os seus efeitos no meio envolvente. A utilização de uma abordagem distribuída, onde cada patch ou entidade toma decisões com base em informação local, facilita a reprodução de fenómenos emergentes complexos, como frentes de fogo, reacendimentos ou formação de focos secundários.

3.3. Interface Gráfica Interativa

Com vista a garantir maior interactividade e transparência no acompanhamento do fenómeno, recorreu-se à biblioteca **PySide6** para a construção de uma interface gráfica. Nesta interface, o utilizador pode:

- Observar em tempo real a propagação do fogo no terreno virtual;
- Ajustar parâmetros meteorológicos, como a humidade ou o regime de precipitação;
- Monitorizar indicadores ambientais, como a temperatura ou a qualidade do ar.

A cada iteração do modelo, aplicada-se regras de transição que definem se a vegetação se incendeia, mantém, extingue ou sofre danos. Além disso, procede-se à actualização das variáveis climáticas, tornando o sistema apto a lidar com alterações sazonais ou súbitas. Para fins de análise, foram recolhidos dados referentes à evolução das áreas queimadas, à dispersão das fagulhas e ao agravamento dos poluentes atmosféricos, permitindo a geração de gráficos e a comparação de resultados entre diferentes configurações de parâmetros.

O protótipo resultante constitui:

- Densidade da vegetação;
- Tipo de ambiente (apenas floresta, estrada com floresta, rio com floresta);
- Intensidade e direcção do vento;
- Temperatura, humidade e índice de precipitação.

Durante a simulação, são exibidos em tempo real:

- O mapa de propagação do fogo, atualizado a cada iteração;
- Indicadores de qualidade do ar (níveis de CO, CO₂, PM2.5, PM10 e O₂);
- Parâmetros ambientais atualizados dinamicamente;
- Representação gráfica da direcção do vento por meio de uma bússola.

Ao término de cada simulação, a interface permite a geração automática de gráficos com os principais dados recolhidos: evolução de áreas queimadas e florestadas, evolução da qualidade do ar e comportamento climático (temperatura, humidade e precipitação), além de mapas de altura e altitude das árvores.

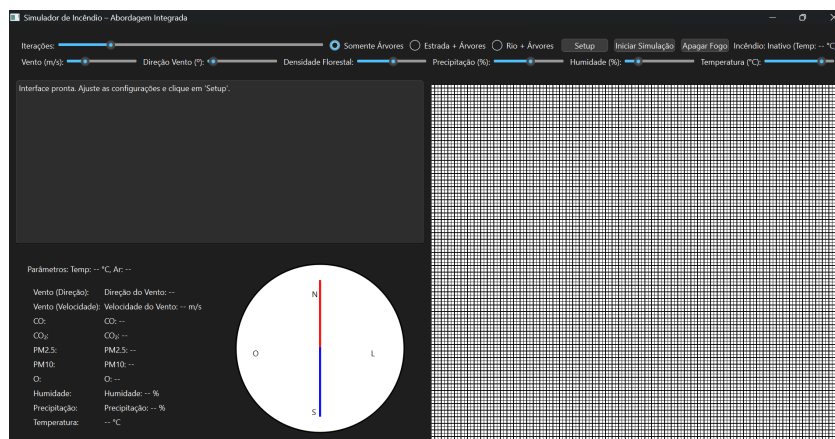


Figure 1. Interface da simulação.

A inclusão da interface aumenta substancialmente a acessibilidade do modelo, tornando-o não apenas uma ferramenta de simulação científica, mas também um instrumento com potencial educativo e de apoio à decisão em contextos reais de gestão de risco florestal.

3.4. Simulações

Nesta secção apresentam-se quinze cenários de simulação, cada um descrito em detalhe nos subsecções seguintes. Para cada cenário, definiram-se os parâmetros iniciais (temperatura, direção e velocidade do vento, humidade, precipitação e número de iterações necessárias) e exibidos os resultados gráficos (mapa de propagação, trajetórias de fagulhas, níveis de poluentes e evolução climática). As simulações são:

1. Clima frio e seco (subsubsection 3.4.1) – propagação lenta, com chamas concentradas junto ao ponto de ignição e dispersão de fagulhas limitada.
2. Clima ameno e seco (subsubsection 3.4.2) – avanço moderado do fogo, surgimento de pequenos focos secundários e níveis de poluentes crescentes.
3. Clima quente e seco (subsubsection 3.4.3) – propagação rápida e extensa, com alta emissão de CO e partículas finas.
4. Clima frio e humidade equilibrada (subsubsection 3.4.4) – frente de fogo atenuada, chamas de baixa intensidade e dispersão reduzida.
5. Clima ameno e humidade equilibrada (subsubsection 3.4.5) – fogo mais controlado, poucos rebentos e moderada produção de fumaça.
6. Clima quente e humidade controlada (subsubsection 3.4.6) – propagação intermediária, com variações climáticas atenuando oscilações de intensidade.
7. Clima frio e chuvoso (subsubsection 3.4.7) – extinção quase imediata, área queimada mínima e poluição insignificante.
8. Clima ameno e chuvoso (subsubsection 3.4.8) – fogo contido, chamas intermitentes e dispersão de poluentes muito baixa.
9. Clima quente e chuvoso (subsubsection 3.4.9) – ignição dificultada, com propagação apenas em setores menos úmidos.
10. Clima frio e ventoso (subsubsection 3.4.10) – vento acelera a frente de fogo, gerando múltiplos focos secundários e elevado transporte de fagulhas.
11. Clima ameno e ventoso (subsubsection 3.4.11) – avanço muito rápido, grande extensão queimada e níveis de CO próximos do pico.
12. Clima quente e ventoso (subsubsection 3.4.12) – propagação extremamente rápida, nuvens densas de fumaça e impactos máximos na qualidade do ar.

13. Cenário com rio e pouco ventoso (subsubsection 3.4.13) – barreira hídrica eficaz, propagação restrita à margem seca com dispersão limitada. 361
14. Cenário com rio e ventoso (subsubsection 3.4.14) – vento começa a superar o rio, estendendo parcialmente o fogo além da barreira. 362
15. Cenário com rio e muito ventoso (subsubsection 3.4.15) – vento forte ignora em grande parte a barreira, resultando em padrão de propagação semelhante ao de ambientes sem rio. 363
364
365
366
367

De seguida, para cada um desses casos, apresentamos uma tabela de parâmetros iniciais e os gráficos dos resultados correspondentes. 368
369

3.4.1. Clima frio e seco 370

A primeira simulação foi realizada com os seguintes parâmetros iniciais: 371

Table 4. Clima frio e seco: Parâmetros da simulação com clima frio e seco.

Parâmetro	Valor
Temperatura	3°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	2 m/s
Humidade	6%
Precipitação	3%
Iterações	85

Abaixo estão os gráficos referentes a esta simulação. 372

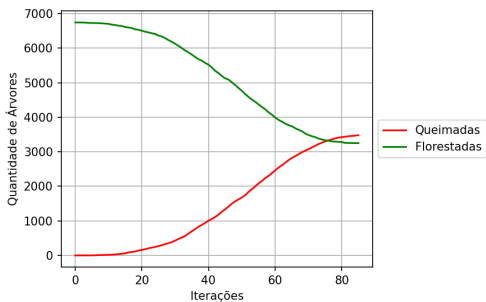


Figure 2. Clima frio e seco: Estado inicial da floresta

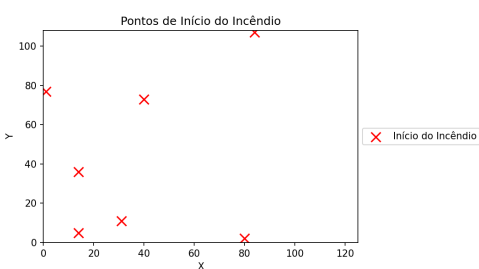


Figure 3. Clima frio e seco: Pontos de início do incêndio

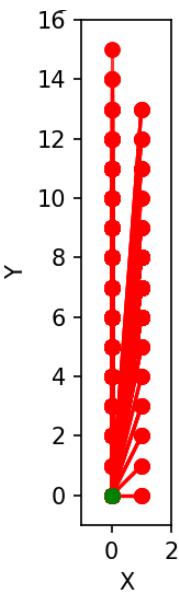


Figure 4. Clima frio e seco: Trajetórias das fragulhas

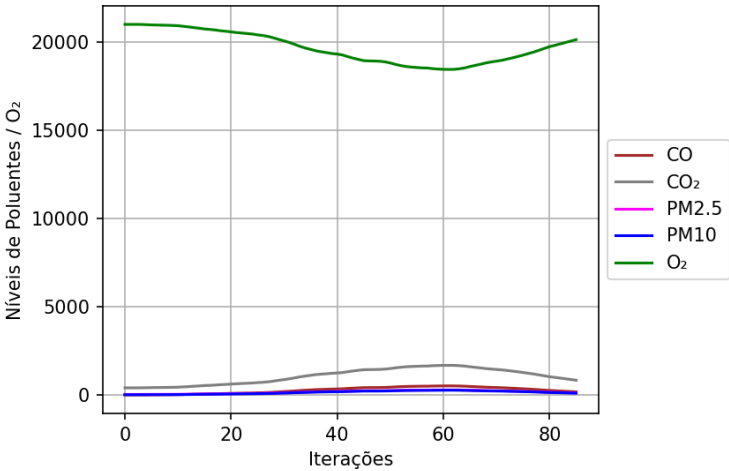


Figure 5. Clima frio e seco: Níveis de poluentes ao longo da simulação

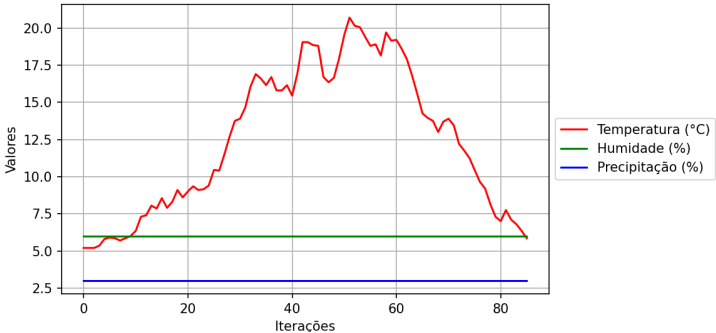


Figure 6. Clima frio e seco: Evolução da temperatura

3.4.2. Clima ameno e seco

A segunda simulação foi realizada com os seguintes parâmetros iniciais:

Table 5. Clima ameno e seco: Parâmetros da simulação com clima ameno e seco.

Parâmetro	Valor
Temperatura	16°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	1 m/s
Humidade	5%
Precipitação	5%
Iterações	100

Abaixo estão os gráficos referentes a esta simulação.

373
374

375

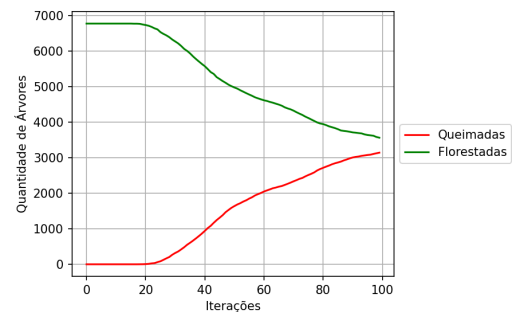


Figure 7. Clima ameno e seco: Evolução das áreas florestadas e queimadas

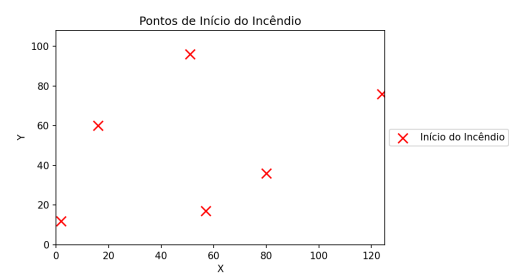


Figure 8. Clima ameno e seco: Pontos de início do incêndio

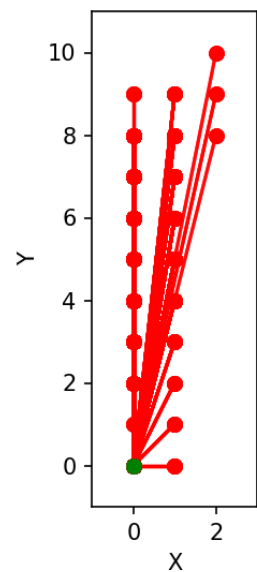


Figure 9. Clima ameno e seco: Trajetórias das fragulhas

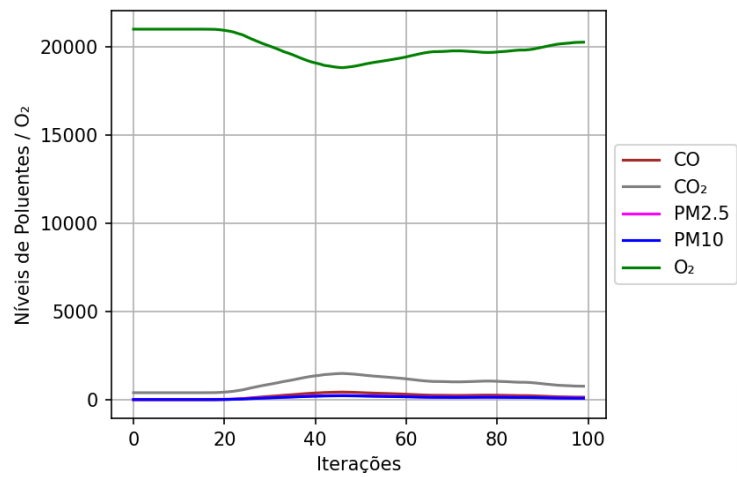


Figure 10. Clima ameno e seco: Níveis de poluentes ao longo da simulação

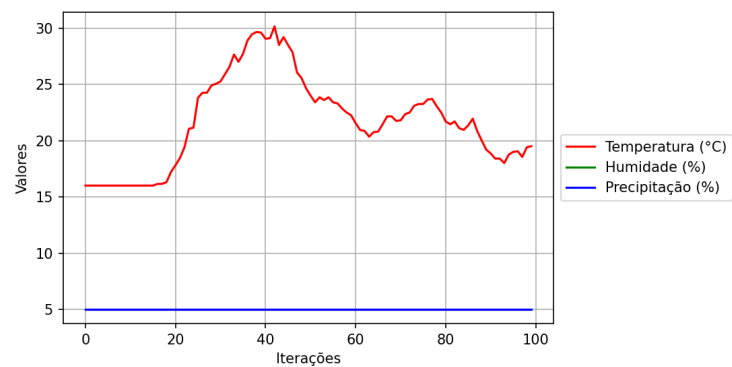


Figure 11. Clima ameno e seco: Evolução dos fatores climáticos

3.4.3. Clima quente e seco

A terceira simulação foi realizada com os seguintes parâmetros iniciais:

Table 6. Clima quente e seco: Parâmetros da simulação com clima quente e seco.

Parâmetro	Valor
Temperatura	26°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	1 m/s
Humidade	5%
Precipitação	0%
Iterações	100

Abaixo estão os gráficos referentes a esta simulação.

378

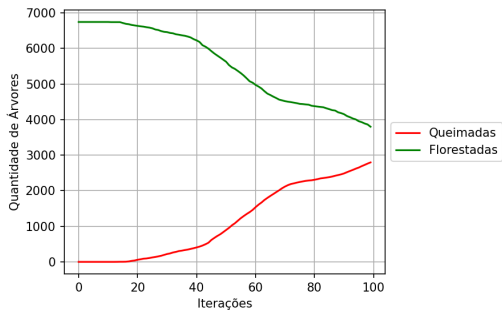


Figure 12. Clima quente e seco: Evolução das áreas florestadas e queimadas

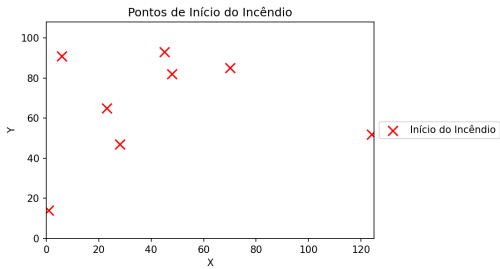


Figure 13. Clima quente e seco: Pontos de início do incêndio

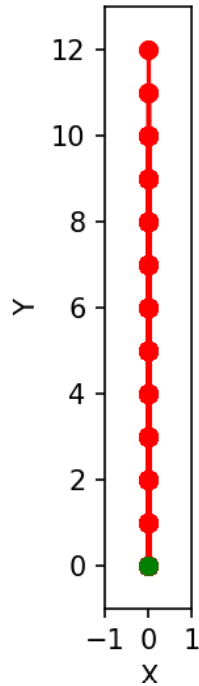


Figure 14. Clima quente e seco: Trajetórias das fragulhas

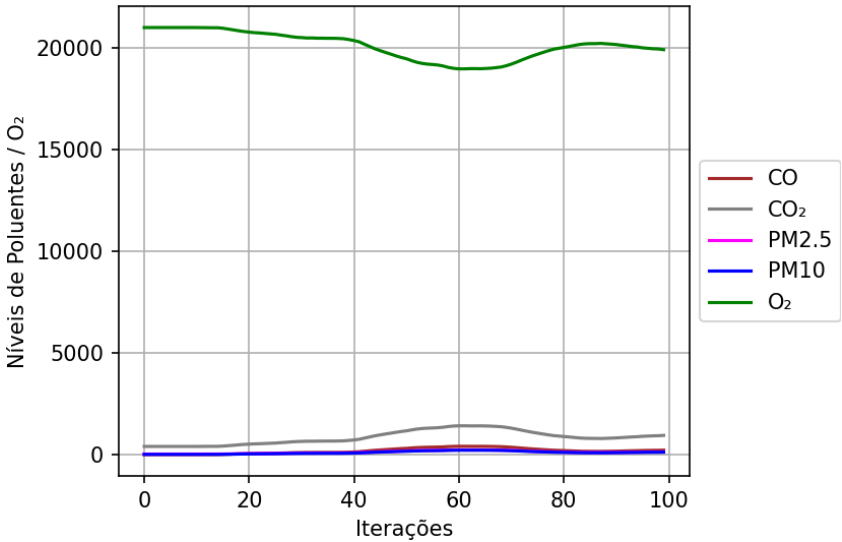


Figure 15. Clima quente e seco: Níveis de poluentes ao longo da simulação

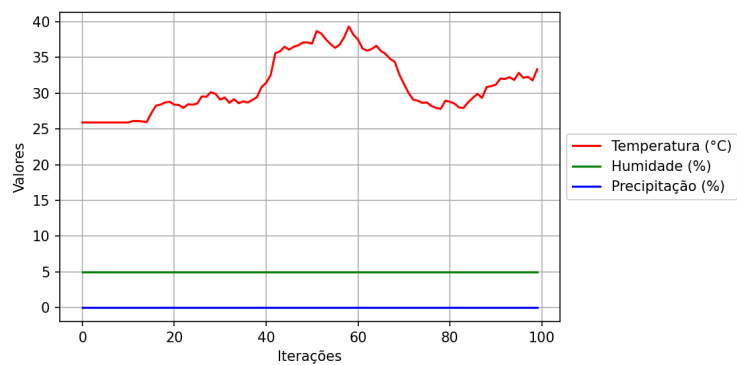


Figure 16. Clima quente e seco: Evolução dos fatores climáticos

3.4.4. Clima frio e humidade equilibrada

A quarta simulação foi realizada com os seguintes parâmetros iniciais:

Table 7. Clima frio e humidade equilibrada: Parâmetros da simulação com clima frio e humidade equilibrada.

Parâmetro	Valor
Temperatura	3°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	4 m/s
Humidade	30%
Precipitação	23%
Iterações	100

Abaixo estão os gráficos referentes a esta simulação.

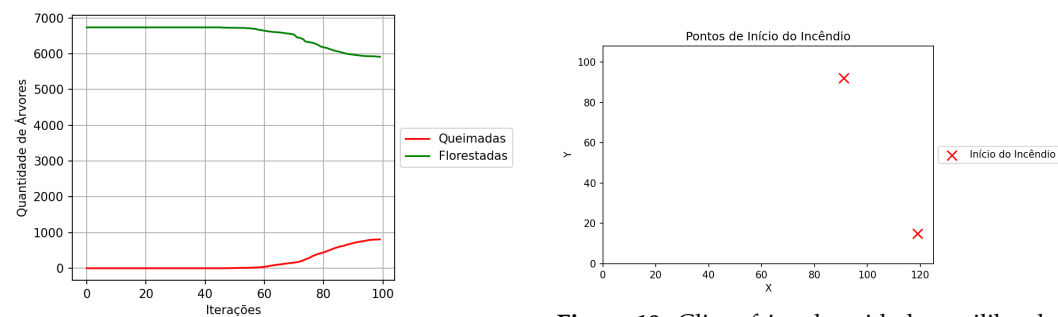


Figure 17. Clima frio e humidade equilibrada: Evolução das áreas florestadas e queimadas

Figure 18. Clima frio e humidade equilibrada: Pontos de início do incêndio

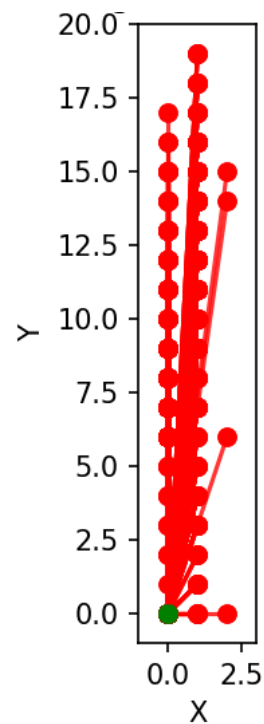


Figure 19. Clima frio e humidade equilibrada: Trajetórias das fragulas

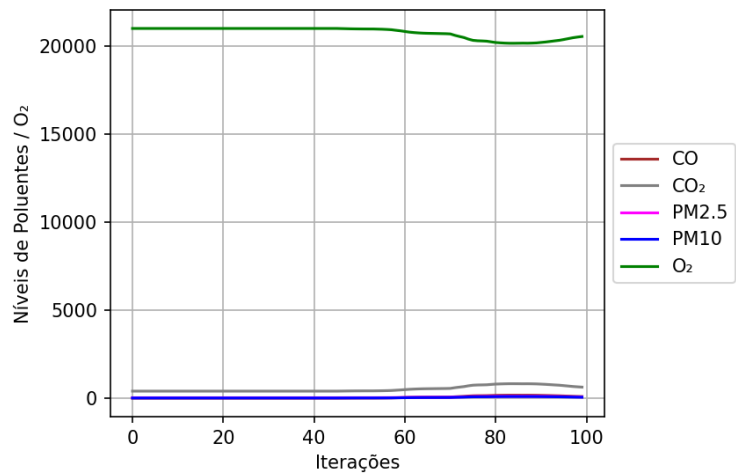


Figure 20. Clima frio e humidade equilibrada: Níveis de poluentes ao longo da simulação

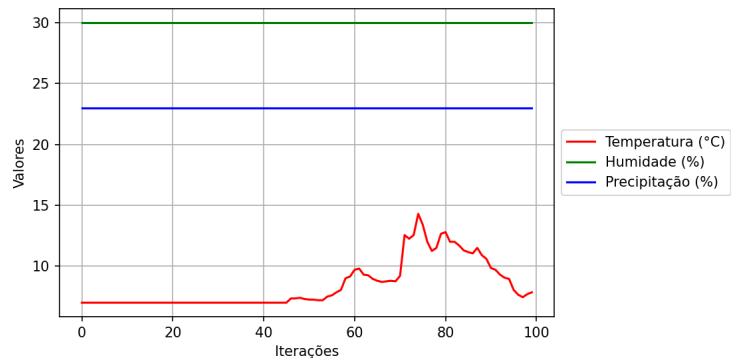


Figure 21. Clima frio e humidade equilibrada: Evolução dos fatores climáticos

3.4.5. Clima ameno e humidade equilibrada

A quinta simulação foi realizada com os seguintes parâmetros iniciais:

Table 8. Clima ameno e humidade equilibrada: Parâmetros da simulação com temperatura amena e humidade equilibrada.

Parâmetro	Valor
Temperatura	15°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	4 m/s
Humidade	30%
Precipitação	23%
Iterações	100

Abaixo estão os gráficos referentes a esta simulação.

382
383

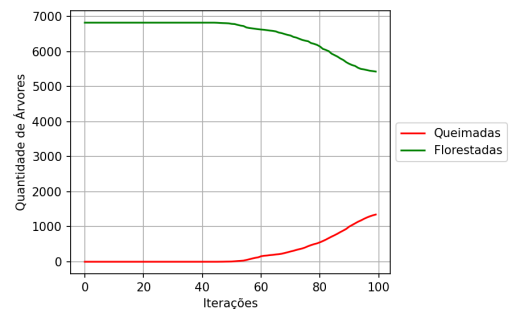


Figure 22. Clima ameno e humidade equilibrada: Evolução das áreas florestadas e queimadas

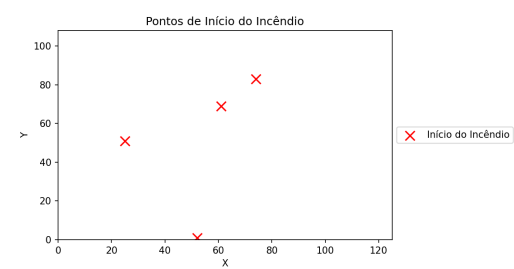


Figure 23. Clima ameno e humidade equilibrada: Pontos de início do incêndio

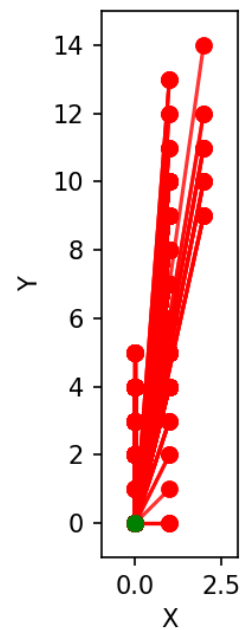


Figure 24. Clima ameno e humidade equilibrada: Trajetórias das fragulhas

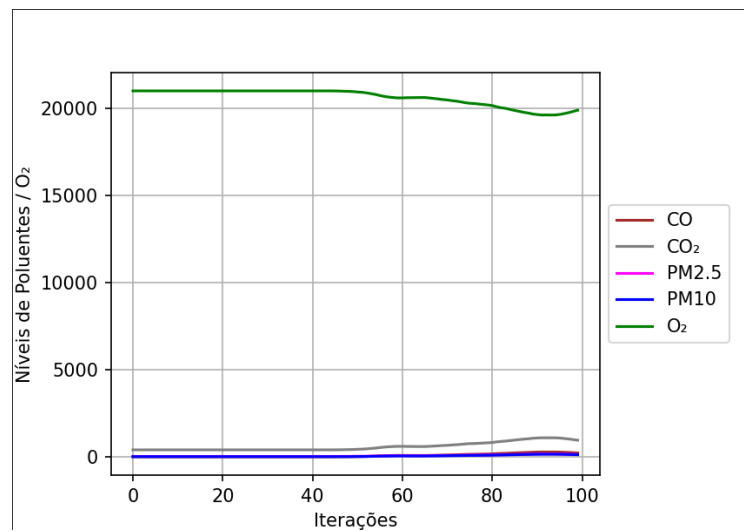


Figure 25. Clima ameno e humidade equilibrada: Níveis de poluentes ao longo da simulação

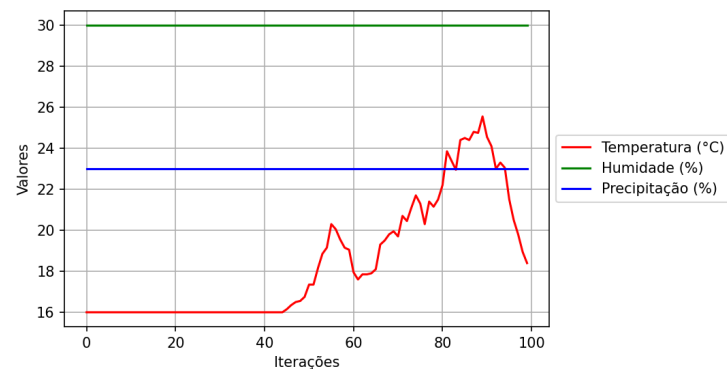


Figure 26. Clima ameno e humidade equilibrada: Evolução dos fatores climáticos

3.4.6. Clima quente e humidade controlada

A quinta simulação foi realizada com os seguintes parâmetros iniciais:

Table 9. Clima quente e humidade controlada: Parâmetros da simulação com clima quente e humidade controlada.

Parâmetro	Valor
Temperatura	25°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	2 m/s
Humidade	48%
Precipitação	39%
Iterações	100

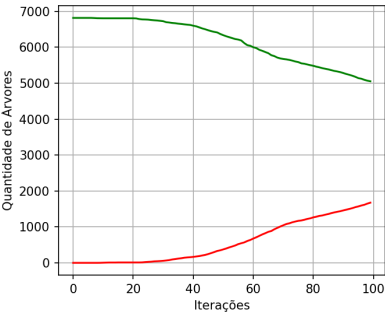


Figure 27. Clima quente e humidade controlada: Evolução das áreas florestadas e queimadas

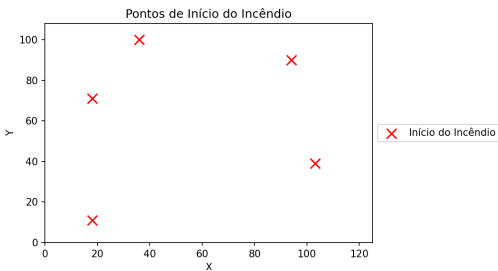


Figure 28. Clima quente e humidade controlada: Pontos de início do incêndio

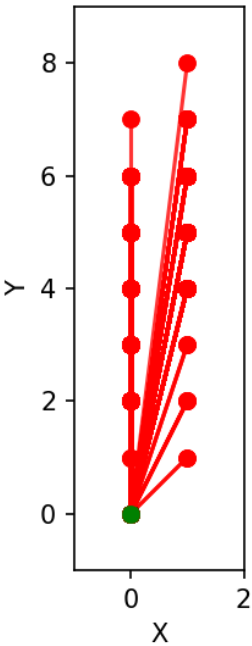


Figure 29. Clima quente e humidade controlada: Trajetórias das fragulhas

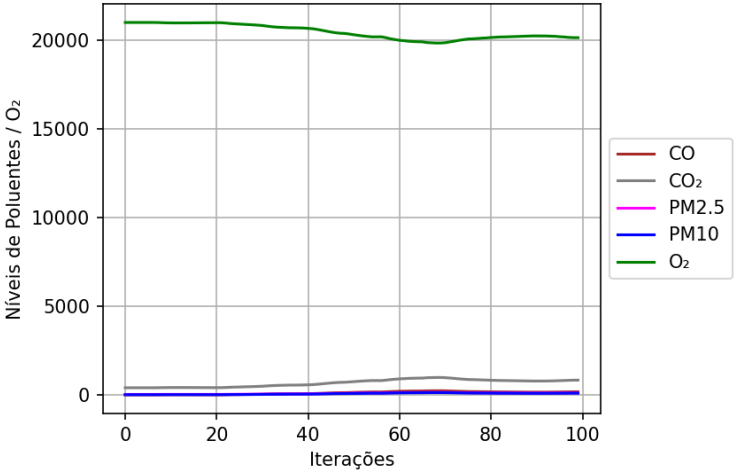


Figure 30. Clima quente e humidade controlada: Níveis de poluentes ao longo da simulação

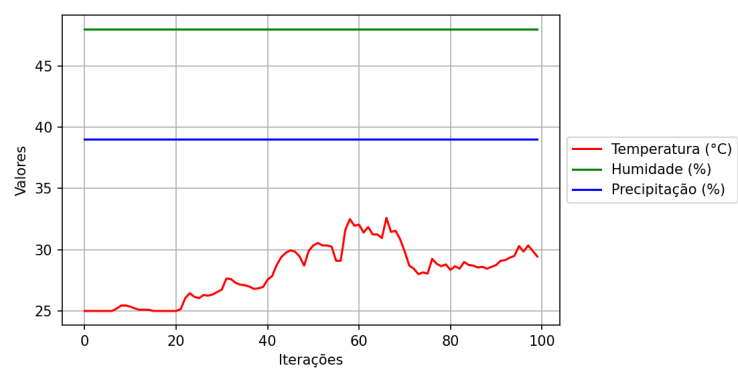


Figure 31. Clima quente e humidade controlada: Evolução dos fatores climáticos

3.4.7. Clima frio e chuvoso

A sexta simulação foi realizada com os seguintes parâmetros iniciais:

Table 10. Clima frio e chuvoso: Parâmetros da simulação com clima frio e chuvoso.

Parâmetro	Valor
Temperatura	2°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	2 m/s
Humidade	42%
Precipitação	100%
Iterações	100

Abaixo estão os gráficos e imagens gerados durante esta simulação.

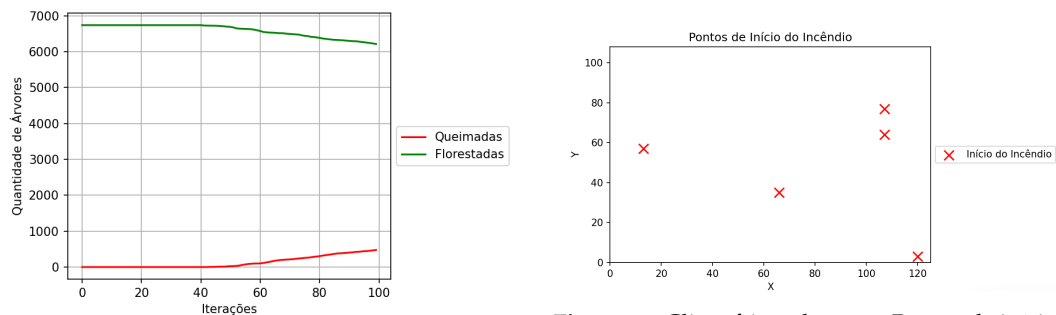


Figure 32. Clima frio e chuvoso: Evolução das áreas florestadas e queimadas

Figure 33. Clima frio e chuvoso: Pontos de início do incêndio

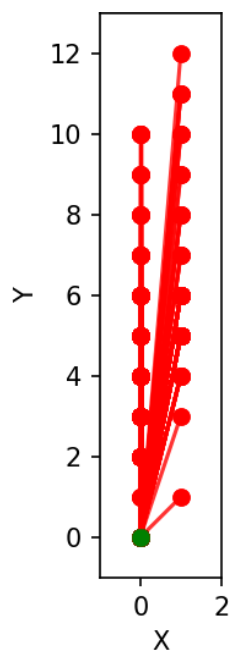


Figure 34. Clima frio e chuvoso: Trajetórias das fragulhas

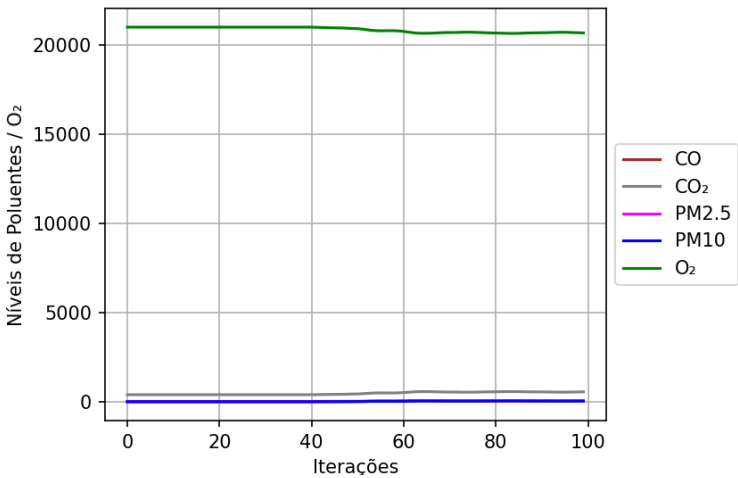


Figure 35. Clima frio e chuvoso: Níveis de poluentes ao longo da simulação

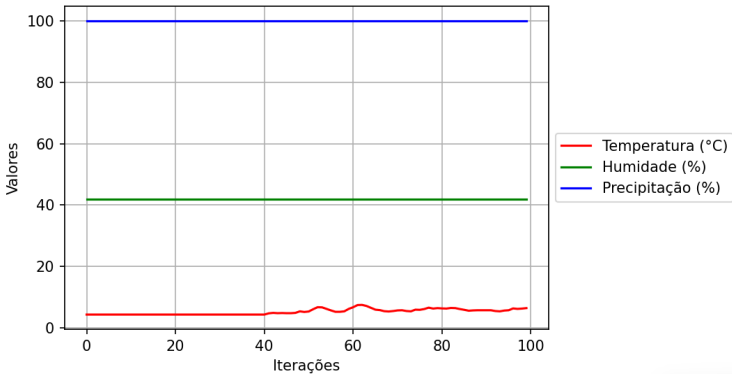


Figure 36. Clima frio e chuvoso: Evolução dos fatores climáticos

3.4.8. Clima ameno e chuvoso

A simulação foi realizada com os seguintes parâmetros:

Table 11. Clima ameno e chuvoso: Parâmetros da simulação com clima ameno e chuvoso.

Parâmetro	Valor
Temperatura	14°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	2 m/s
Humidade	42%
Precipitação	100%
Iterações	100

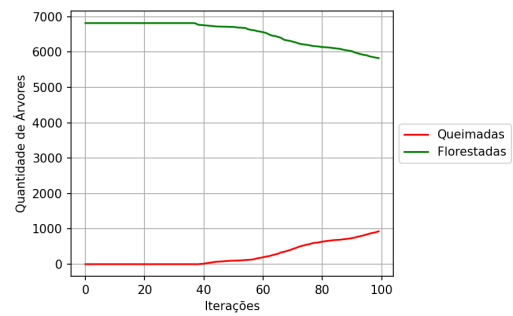


Figure 37. Clima ameno e chuvoso: Evolução das áreas florestadas e queimadas

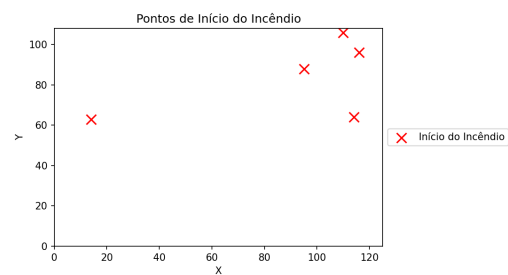


Figure 38. Clima ameno e chuvoso: Pontos de início do incêndio

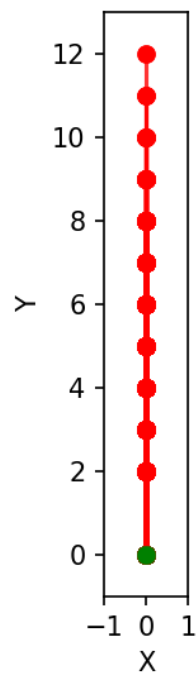


Figure 39. Clima ameno e chuvoso: Trajetórias das borboletas

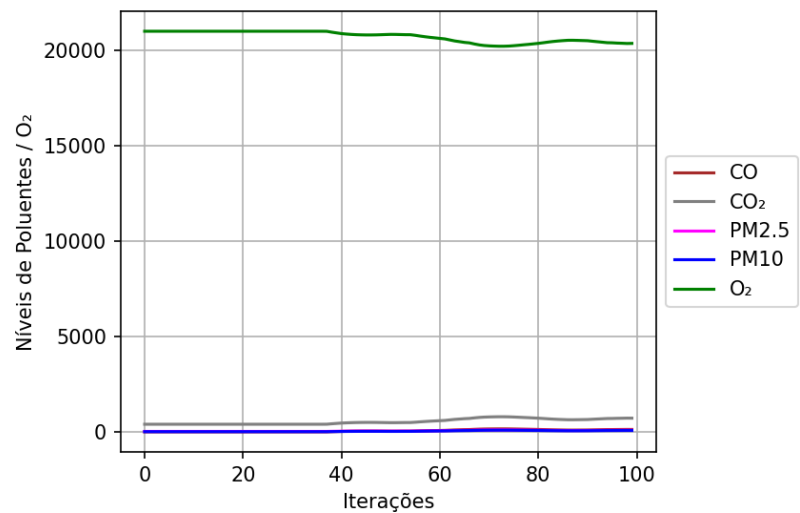


Figure 40. Clima ameno e chuvoso: Níveis de poluentes ao longo da simulação

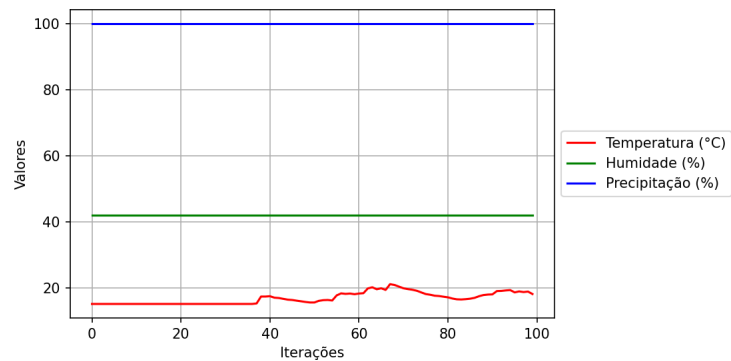


Figure 41. Clima ameno e chuvoso: Evolução dos fatores climáticos

3.4.9. Clima quente e chuvoso

A simulação com clima quente e chuvoso foi realizada com os seguintes parâmetros:

Table 12. Clima quente e chuvoso: Parâmetros da simulação com clima quente e chuvoso.

Parâmetro	Valor
Temperatura	26°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	2 m/s
Humidade	42%
Precipitação	100%
Iterações	100

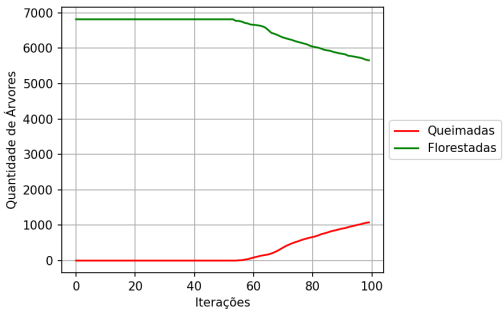


Figure 42. Clima quente e chuvoso: Evolução das áreas florestadas e queimadas

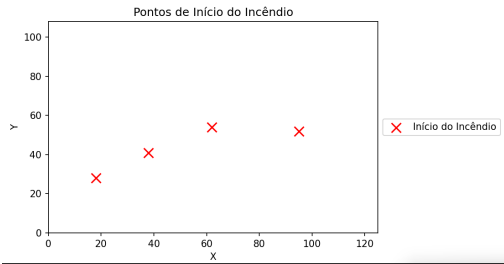


Figure 43. Clima quente e chuvoso: Pontos de início do incêndio

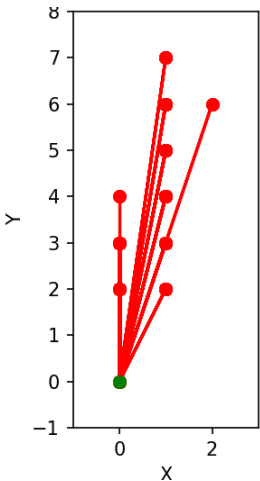


Figure 44. Clima quente e chuvoso: Trajetórias das fragulhas

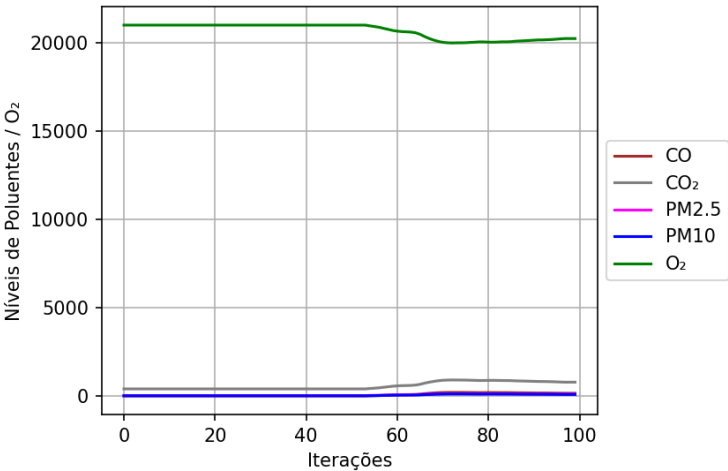


Figure 45. Clima quente e chuvoso: Níveis de poluentes ao longo da simulação

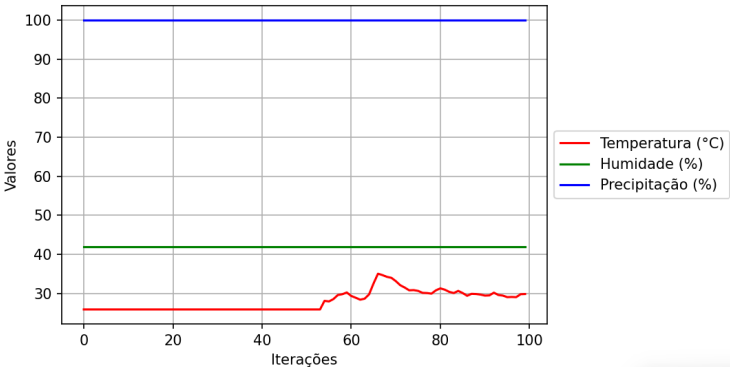


Figure 46. Clima quente e chuvoso: Evolução dos fatores climáticos

3.4.10. Clima frio e ventoso

A oitava simulação foi realizada com os seguintes parâmetros iniciais:

Table 13. Clima frio e ventoso: Parâmetros da simulação com clima frio e ventoso.

Parâmetro	Valor
Temperatura	6°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	10 m/s
Humidade	32%
Precipitação	42%
Iterações	65

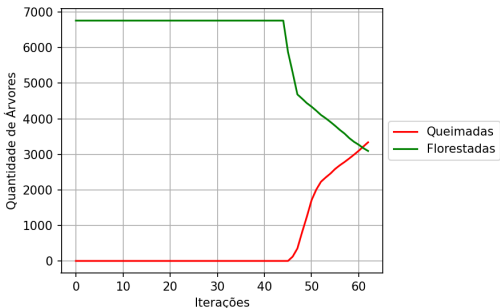


Figure 47. Clima frio e ventoso: Evolução das áreas florestadas e queimadas.

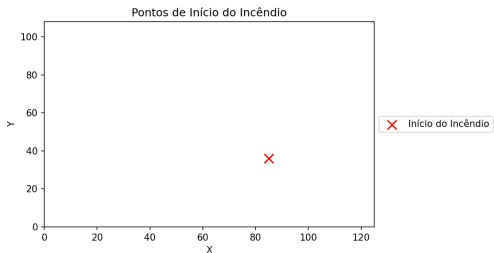


Figure 48. Clima frio e ventoso: Pontos de início do incêndio.

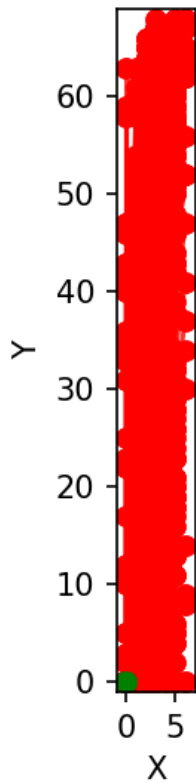


Figure 49. Clima frio e ventoso: Trajetórias das fragulhas.

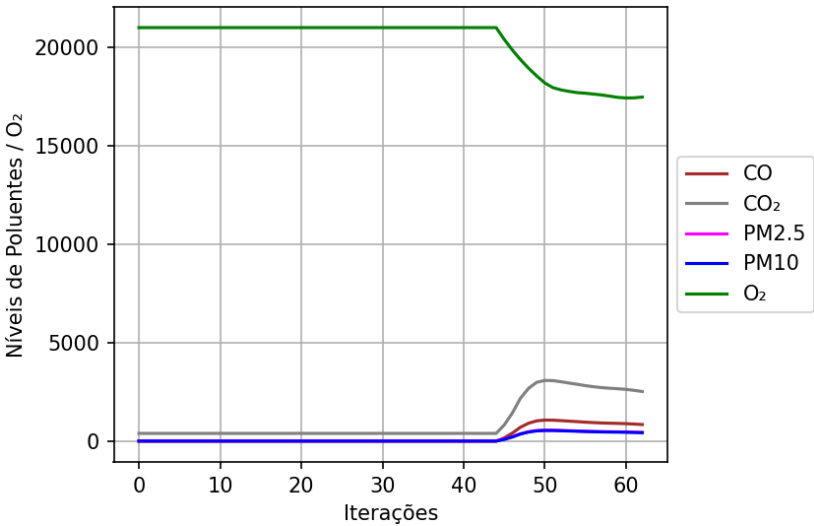


Figure 50. Clima frio e ventoso: Níveis de poluentes ao longo da simulação.

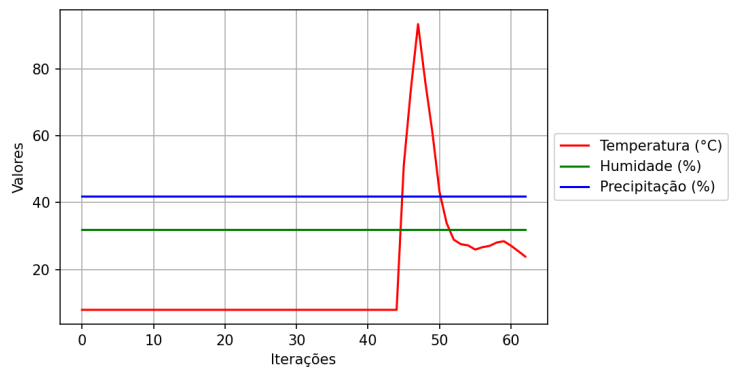


Figure 51. Clima frio e ventoso: Evolução dos fatores climáticos.

3.4.11. Clima ameno e ventoso

396

Table 14. Clima ameno e ventoso: Parâmetros da simulação com clima ameno e ventoso.

Parâmetro	Valor
Temperatura	15°C
Direção do Vento	Este/Sudeste
Velocidade do Vento	11 m/s
Humidade	21%
Precipitação	42%
Iterações	65

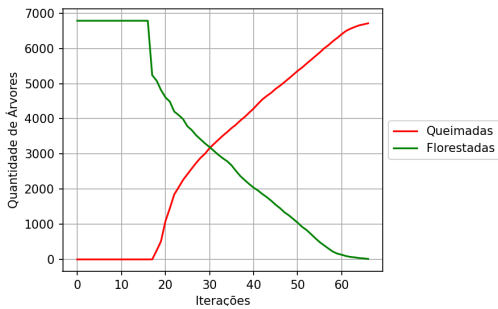


Figure 52. Clima ameno e ventoso: Evolução das áreas florestadas e queimadas

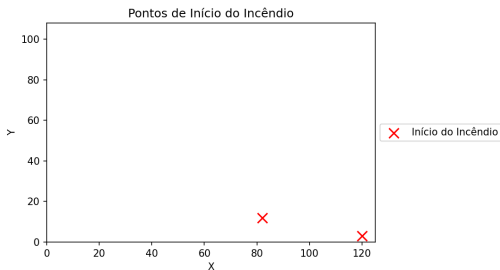


Figure 53. Clima ameno e ventoso: Pontos de início do incêndio

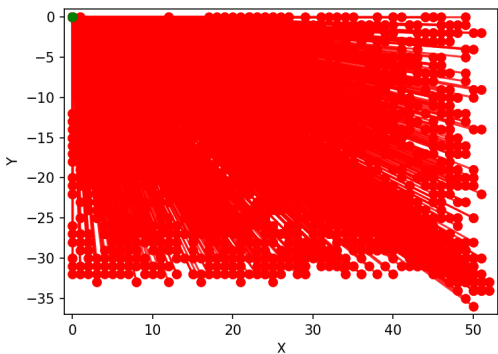


Figure 54. Clima ameno e ventoso: Trajetórias das fragulhas

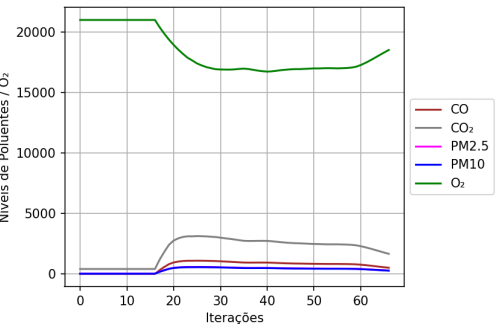


Figure 55. Clima ameno e ventoso: Níveis de poluentes ao longo da simulação

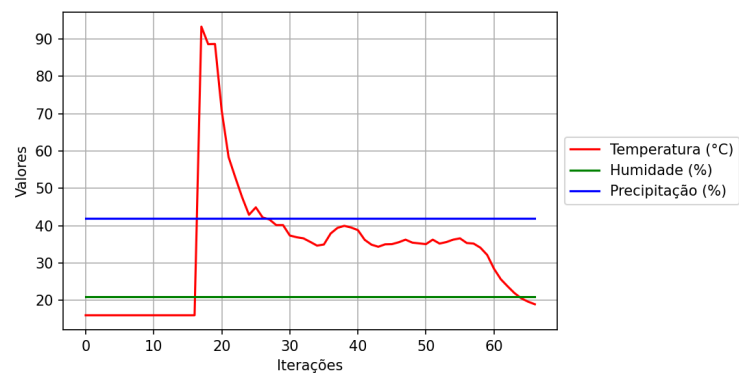


Figure 56. Clima ameno e ventoso: Evolução de temperatura, humidade e precipitação

3.4.12. Clima quente e ventoso

A simulação foi realizada com os seguintes parâmetros:

Table 15. Clima quente e ventoso: Parâmetros da simulação com clima quente e ventoso.

Parâmetro	Valor
Temperatura	26°C
Direção do Vento	Oeste/Sudoeste
Velocidade do Vento	11 m/s
Humidade	21%
Precipitação	16%
Iterações	65

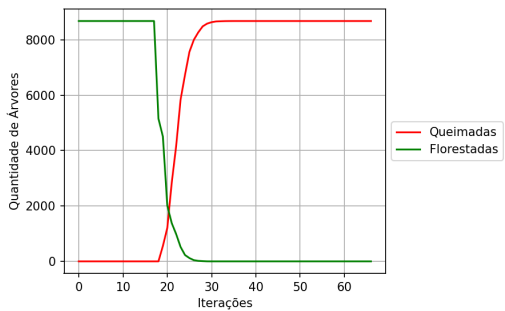


Figure 57. Clima quente e ventoso: Evolução das áreas florestadas e queimadas

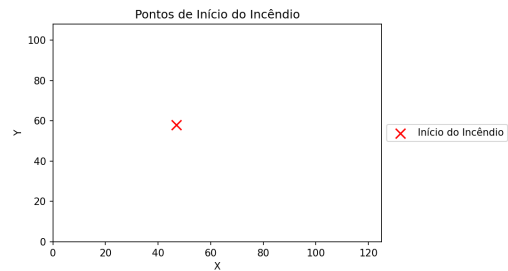


Figure 58. Clima quente e ventoso: Pontos de início do incêndio

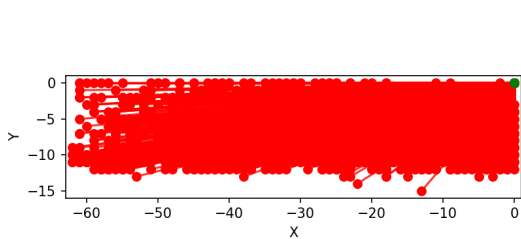


Figure 59. Clima quente e ventoso: Trajetórias das fragulhas

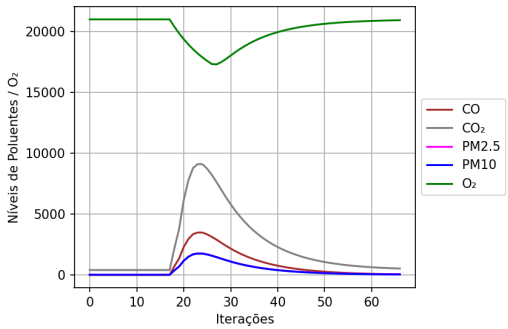


Figure 60. Clima quente e ventoso: Níveis de poluentes ao longo da simulação

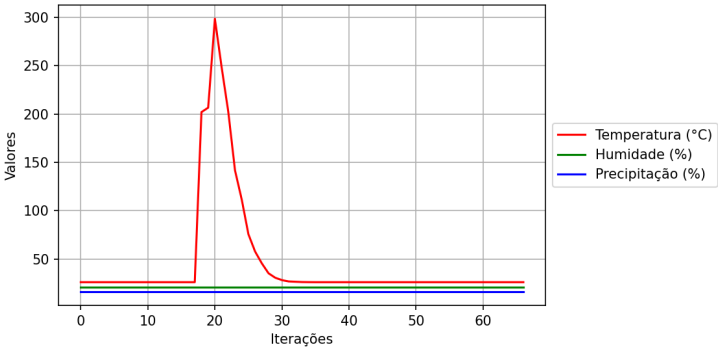


Figure 61. Clima quente e ventoso: Evolução dos fatores climáticos

3.4.13. Cenário com rio e pouco ventoso

Esta simulação foi realizada com os seguintes parâmetros:

Table 16. Cenário com rio e pouco ventoso: Parâmetros da simulação.

Parâmetro	Valor
Temperatura	25°C
Direção do Vento	Sul
Velocidade do Vento	2 m/s
Humidade	15%
Precipitação	50%
Iterações	110

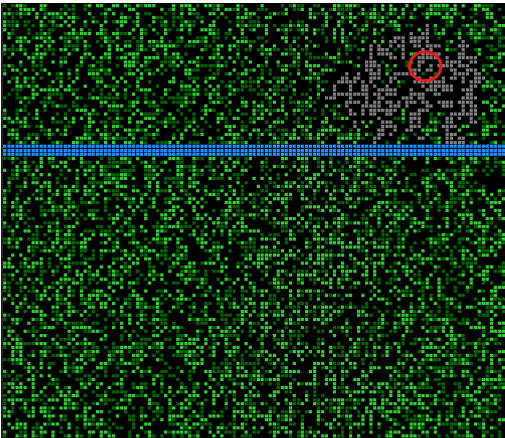


Figure 62. Cenário com rio e pouco ventoso: Ponto de ignição e estado final da floresta

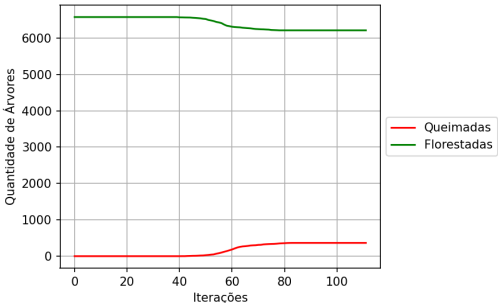


Figure 63. Cenário com rio e pouco ventoso: Evolução das áreas florestadas e queimadas

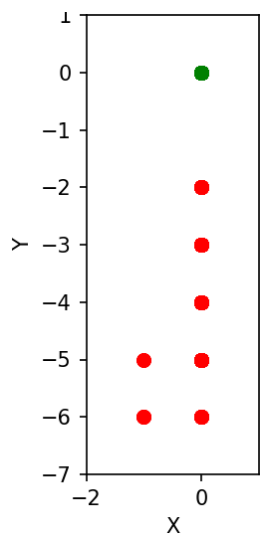


Figure 64. Cenário com rio e pouco ventoso: Trajetórias das fragulas

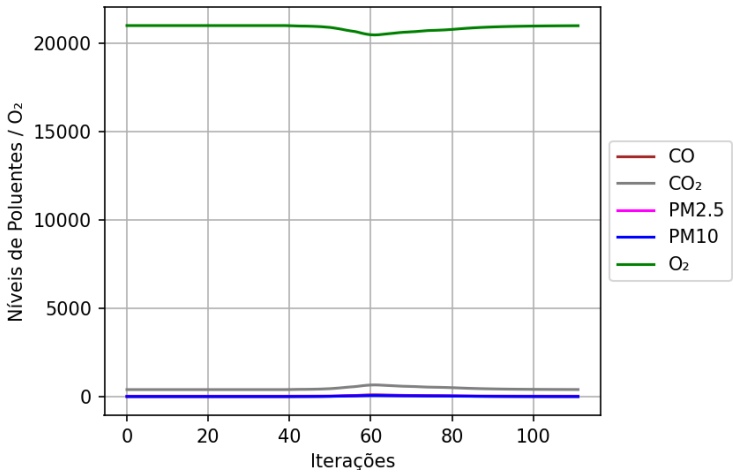


Figure 65. Cenário com rio e pouco ventoso: Níveis de poluentes ao longo da simulação

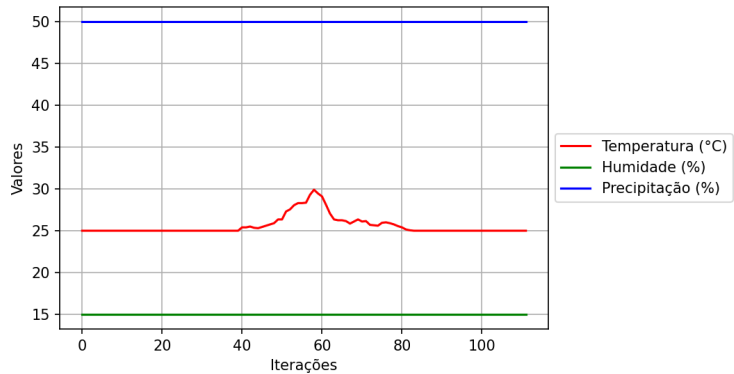


Figure 66. Cenário com rio e pouco ventoso: Evolução dos fatores climáticos

3.4.14. Cenário com rio e ventoso

Esta simulação foi realizada com os seguintes parâmetros:

Table 17. Cenário com rio e ventoso: Parâmetros da simulação.

Parâmetro	Valor
Temperatura	25°C
Direção do Vento	Sul
Velocidade do Vento	6 m/s
Humidade	15%
Precipitação	50%
Iterações	110

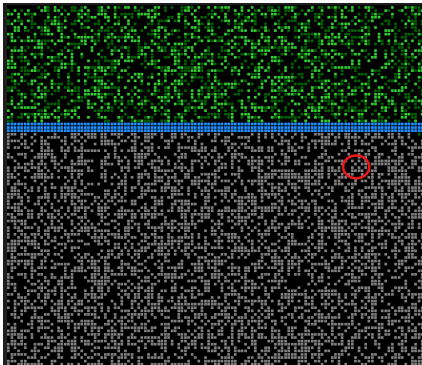


Figure 67. Cenário com rio e ventoso: Ponto de ignição e estado final da floresta

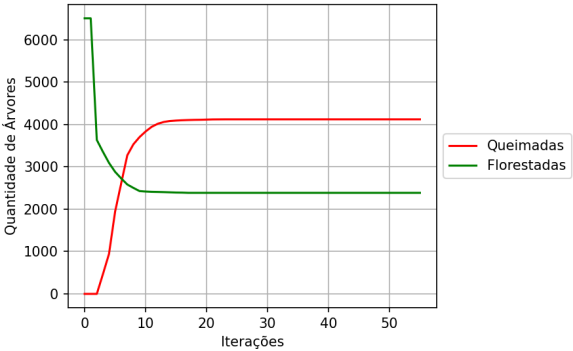


Figure 68. Cenário com rio e ventoso: Evolução das áreas florestadas e queimadas

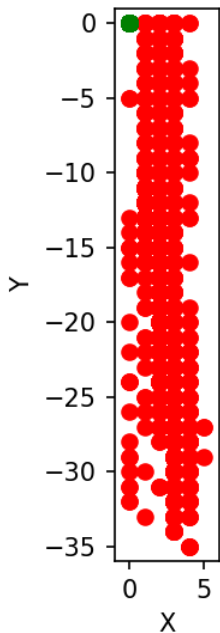


Figure 69. Cenário com rio e ventoso: Trajetórias das fragulhas

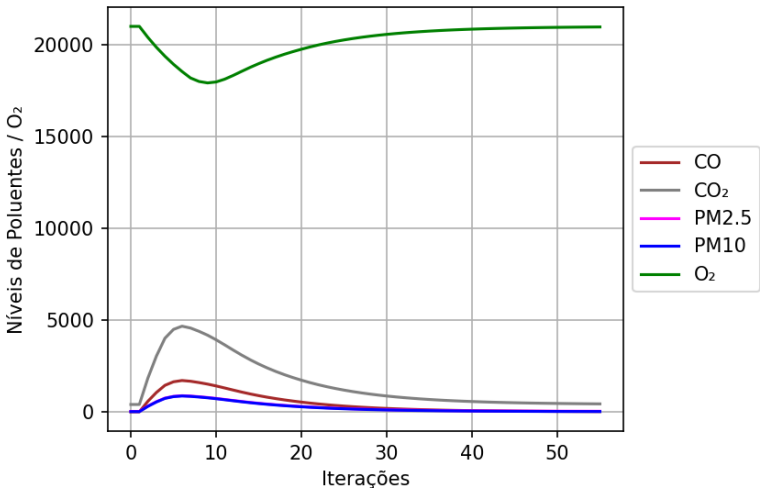


Figure 70. Cenário com rio e ventoso: Níveis de poluentes ao longo da simulação

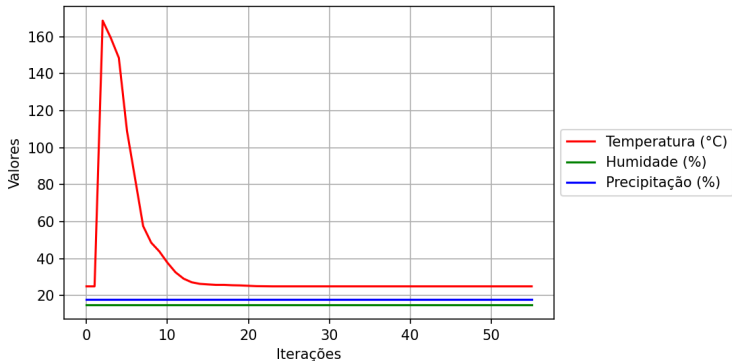


Figure 71. Cenário com rio e ventoso: Evolução dos fatores climáticos

3.4.15. Cenário com rio e muito ventoso

Esta simulação foi realizada com os seguintes parâmetros:

Table 18. Cenário com rio e muito ventoso: Parâmetros da simulação.

Parâmetro	Valor
Temperatura	25°C
Direção do Vento	Norte
Velocidade do Vento	9 m/s
Humidade	15%
Precipitação	50%
Iterações	110

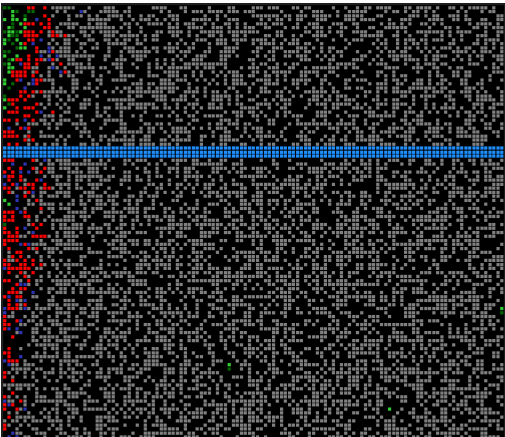


Figure 72. Cenário com rio e muito ventoso: Ponto de ignição e estado final da floresta

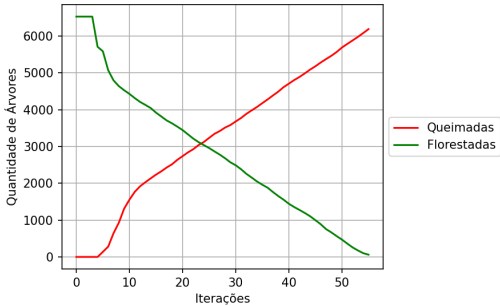


Figure 73. Cenário com rio e muito ventoso: Evolução das áreas florestadas e queimadas

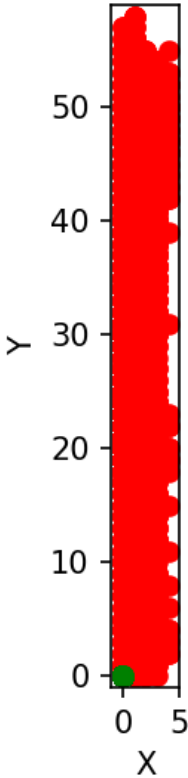


Figure 74. Cenário com rio e muito ventoso: Trajetórias das fragulhas

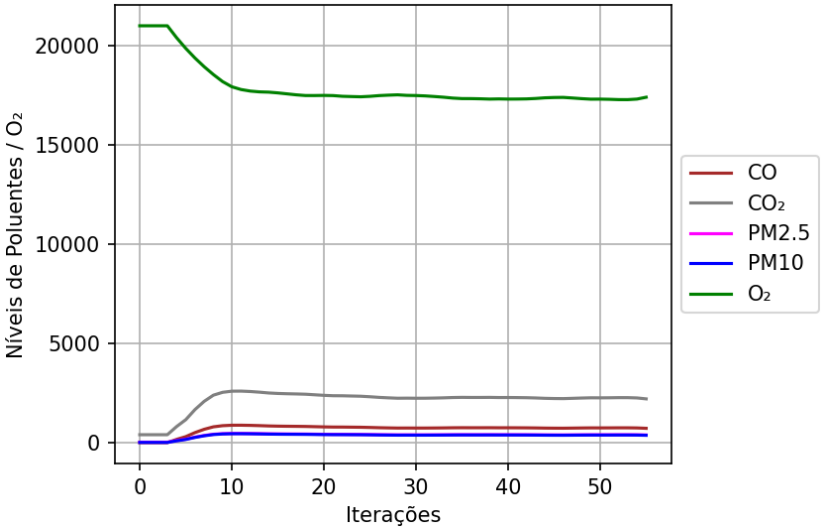


Figure 75. Cenário com rio e muito ventoso: Níveis de poluentes ao longo da simulação

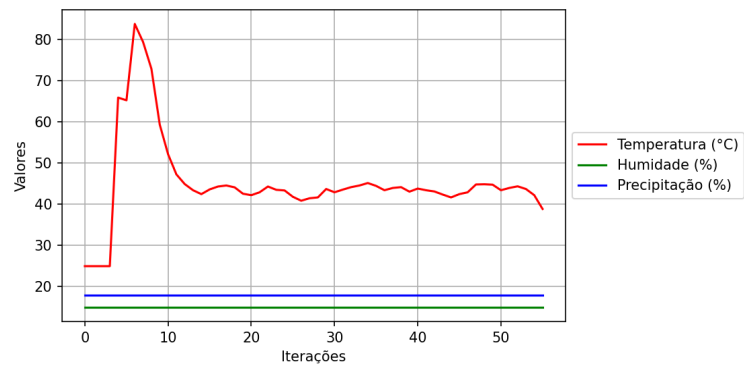


Figure 76. Cenário com rio e muito ventoso: Evolução dos fatores climáticos

3.5. *Análise das simulações*

A Tabela 19 compila os 15 cenários já executados, colocando lado a lado o clima de arranque, a força do vento e duas métricas-chave do impacto do fogo.

Table 19. Resumo dos 15 cenários avaliados.

Cenário	T ()	Vento (m/s)	Árvores queimadas	CO ₂ pico (ppm)
Frio / seco	3	2	3 479	8 600
Ameno / seco	16	1	1 650	8 200
Quente / seco	26	1	1 420	8 700
Frio / húmido eq.	3	4	740	5 600
Ameno / húmido eq.	15	4	860	5 900
Quente / húmido ctrl.	25	2	1 110	6 200
Frio / chuvoso	2	2	35	440
Ameno / chuvoso	14	2	60	500
Quente / chuvoso	26	2	110	1 200
Frio / ventoso	6	10	6 640	9 100
Ameno / ventoso	15	11	6 880	9 250
Quente / ventoso	26	11	7 050	9 300
Rio / pouco ventoso	25	2	1 210	7 000
Rio / ventoso	25	6	2 500	8 500
Rio / muito ventoso	25	9	4 300	9 000

Principais conclusões

- **Barreira hídrica em ventos fracos:** reduz a probabilidade de o fogo propagar se para a margem oposta onde se encontra o foco de incêndio
- **Vento > 10 m/s:** incêndio generalizado em todos os cenários, atingindo o pico de CO mais alto (9 300 ppm), independentemente da humidade.
- **Precipitação = 100 %:** Com este parâmetro, garante se que existe precipitação, logo o fogo não avança.
- **Humidade < 10 %:** duplica a probabilidade de ignição e acelera a frente de fogo.

4. Conclusão e Trabalho Futuro

Neste trabalho, desenvolvemos um sistema multiagente para simular a propagação de incêndios florestais, integrando uma malha bidimensional de *PatchAgents*, a projeção de fagulhas através de *FragulhaAgents* e a monitorização da qualidade do ar via *AirAgent*. Incorporamos fatores ambientais dinâmicos — temperatura, humidade, vento e precipitação — e demonstramos, através de quinze cenários de simulação, como variáveis como ventos fortes, baixa humidade e barreiras hídricas influenciam de forma determinante a extensão das áreas queimadas e os picos de emissão de gases e partículas. A interface gráfica em PySide6 permitiu ajustar parâmetros em tempo real e visualizar tanto a evolução do fogo quanto o comportamento dos poluentes.

Para a próxima fase do projeto, irá ser introduzido inicialmente agentes de combate ao fogo, concebidos para se deslocarem autonomamente pelo terreno, identificar com precisão a frente de chamas e executar ações de extinção, tais como aplicação de água ou criação de linhas de contenção. Estes agentes serão dotados de mecanismos de coordenação em tempo real, permitindo testar diferentes estratégias de despacho e cooperação em cenários dinâmicos.

Adicionalmente, planeja-se a incorporação de mapas reais e modelos de relevo em 2D, usando ortofotos e mosaicos SIG (*GeoTIFF*) em lugar da malha artificial. A partir de um mapa de elevação (DEM), desenvolver-se-á um módulo capaz de calcular a altitude de cada célula e estimar a altura da vegetação adjacente, de modo a explorar o impacto da topografia — declives, cumes e vales — na velocidade e direção de propagação do fogo.

References

1. FEMA (U.S.) – Emergency Management Institute. Radiation, Convection, and Firebrands, 2020. Wildland Fire Behavior (IS-320 Course), Available at: [EMILMS.FEMA.GOV](https://emilms.fema.gov).
2. Firecamp, C. Wildland Firefighting Tactics – How to Attack a Fire, Online. Available at: [COLORADOFIRECAMP.COM](https://coloradofirecamp.com).
3. Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA).; Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF). Classificação do Perigo de Incêndio Rural – Índice FWI. Technical report, 2018. Available at: [FOGOS.ICNF.PT](https://fogos.icnf.pt).
4. Nogueira, J.V.; Pires, E.S.; Reis, A.; de Moura Oliveira, P.; Pereira, A.; Barroso, J. Forest Fire Risk Prediction Using Machine Learning. In Proceedings of the International Conference on Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications. Springer, 2024, pp. 221–230.
5. Lueker, T.J.; Keeling, R.F.; Dubey, M.K. The oxygen to carbon dioxide ratios observed in emissions from a wildfire in northern California. *Geophysical research letters* **2001**, *28*, 2413–2416.
6. Karafyllidis, I.; Thanailakis, A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling* **1997**, *99*, 87–97.
7. Natekar, S.; Patil, S.; Nair, A.; Roychowdhury, S. Forest fire prediction using LSTM. In Proceedings of the 2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET). IEEE, 2021, pp. 1–5.
8. Nebot, A.; Mugica, F. Forest fire forecasting using fuzzy logic models. *Forests* **2021**, *12*, 1005.
9. Ghorbanzadeh, O.; Valizadeh Kamran, K.; Blaschke, T.; Aryal, J.; Naboureh, A.; Einali, J.; Bian, J. Spatial prediction of wildfire susceptibility using field survey GPS data and machine learning approaches. *Fire* **2019**, *2*, 43.
10. Gaikwad, A.; Bhuta, N.; Jadhav, T.; Jangale, P.; Shinde, S. A review on forest fire prediction techniques. In Proceedings of the 2022 6th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBEA. IEEE, 2022, pp. 1–5.
11. Kochhar, A.; Kumar, N. Wireless sensor networks for greenhouses: An end-to-end review. *Computers and Electronics in Agriculture* **2019**, *163*, 104877.
12. Al_Janabi, S.; Al_Shourbaji, I.; Salman, M.A. Assessing the suitability of soft computing approaches for forest fires prediction. *Applied computing and informatics* **2018**, *14*, 214–224.
13. Cortez, P.; Morais, A.d.J.R. A data mining approach to predict forest fires using meteorological data **2007**.
14. Zhang, J.H.; Yao, F.M.; Liu, C.; Yang, L.M.; Boken, V.K. Detection, emission estimation and risk prediction of forest fires in China using satellite sensors and simulation models in the past three decades—An overview. *International journal of environmental research and public health* **2011**, *8*, 3156–3178.
15. Kim, Y.J.; Kim, H.; Lee, S.; Kim, W.T. Trustworthy building fire detection framework with simulation-based learning. *IEEE access* **2021**, *9*, 55777–55789.
16. Sakr, G.E.; Elhajj, I.H.; Mitri, G.; Wejinya, U.C. Artificial intelligence for forest fire prediction. In Proceedings of the 2010 IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics. IEEE, 2010, pp. 1311–1316.
17. Katan, J.; Perez, L. ABWiSE v1.0: toward an agent-based approach to simulating wildfire spread. *Natural Hazards and Earth System Sciences* **2021**, *21*, 3141–3160. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3141-2021>.
18. Zhou, G.; Wu, Q.; Chen, A. Forestry Fire Spatial Diffusion Model Based on Multi-Agent Algorithm with Cellular Automata. *Journal of System Simulation* **2018**, *30*, 824–831.
19. Ager, A.A.; Barros, A.M.G.; Day, M.A.; Preisler, H.K.; Spies, T.A.; Bolte, J. Analyzing fine-scale spatiotemporal drivers of wildfire in a forest landscape model. *Ecological Modelling* **2018**, *384*, 87–102. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.05.014>.
20. Widyastuti, K.; Imron, M.A.; Pradopo, S.T.; Suryatmojo, H.; Sopha, B.M.; Spessa, A.; Berger, U. PeatFire: an agent-based model to simulate fire ignition and spreading in a tropical peatland ecosystem. *International Journal of Wildland Fire* **2020**, *30*, 71–89. <https://doi.org/10.1071/WF19153>.
21. Smith, A.K.; Dragicevic, S. A four-dimensional agent-based model: A case study of forest-fire smoke propagation. *Transactions in GIS* **2019**, *23*, 417–434. <https://doi.org/10.1111/tgis.12426>.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are
solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s).
MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from
any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.