



# 10º Encontro de Ensino Pesquisa e Extensão

*Patrocínio, MG, outubro de 2023*

## ROBÓTICA NA VIGILÂNCIA DE AMBIENTES NATURAIS USANDO COMPUTAÇÃO BIOINSPIRADA: ESTUDO DE CASO NO PARQUE NACIONAL DE SETE CIDADES

Heitor Castro Brasiel<sup>1</sup>, Danielli Araújo Lima<sup>2</sup>  
Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM) Campus Patrocínio  
Modalidade: Pesquisa  
Formato: Artigo Completo

**Resumo:** Os frequentes casos de queimadas no bioma Cerrado é um problema preocupante, afetando a fauna, flora e o ecossistema. Autômatos celulares e modelos computacionais, inspirados no comportamento das formigas, aprimoram a compreensão das dinâmicas ambientais e a detecção precoce de incêndios, fornecendo rotas de fuga. Apresentamos uma modelagem bidimensional do Cerrado, baseada na biologia computacional. Considerando vários tipos de vegetação, os robôs autônomos seguem regras predefinidas para otimizar a exploração do ambiente e sua travessia pelos quatro quadrantes da imagem. O projeto visa contribuir com estratégias de preservação diante dos desafios crescentes. Propomos três modelos distintos e, por meio de experimentação e análise estatística, demonstramos que os modelos com heurísticas de inteligência artificial superam os que não as incorporam.

**Palavras-chaves:** robótica; autômatos celulares; recursos ambientais; bioma cerrado.

### Introdução

As queimadas em ambientes naturais constituem uma ameaça persistente que coloca em risco a biodiversidade, a saúde dos ecossistemas e a segurança das comunidades próximas (FERREIRA et al., 2022). A rápida detecção e contenção desses incêndios são vitais para reduzir seus impactos devastadores. Além disso, as queimadas também contribuem significativamente para as emissões de gases de efeito estufa, como

---

<sup>1</sup>Estudante de Engenharia Elétrica, IFTM Campus Patrocínio, [heitor.brasiel@estudante.iftm.edu.br](mailto:heitor.brasiel@estudante.iftm.edu.br).

<sup>2</sup>Professora na área de Computação, IFTM Campus Patrocínio, [danielli@iftm.edu.br](mailto:danielli@iftm.edu.br).

o dióxido de carbono e o metano, agravando ainda mais as mudanças climáticas globais (LIMA; LIMA, 2014). Portanto, o desenvolvimento de ferramentas avançadas de detecção e monitoramento, como as abordagens baseadas em inteligência artificial e sensoriamento remoto, desempenha um papel crucial na mitigação desses incêndios e na preservação de nossos preciosos ecossistemas.

O modelo de comportamento das formigas, notório por sua eficácia na descoberta de rotas otimizadas e adaptativas, fornece a base para o desenvolvimento de uma simulação computacional bidimensional (SOUZA; LIMA, 2019). Adicionalmente, os autômatos celulares, reconhecidos como modelos matemático-computacionais discretos, são empregados para abstrair um conjunto de regras que possibilitam a manifestação de um comportamento global nos robôs por meio de interações locais com o ambiente e outros robôs (LOPES; LIMA, 2022). Assim, é possível usar as duas técnicas de computação bioinspirada com o intuito de melhorar o comportamento de busca do robô.

Neste trabalho, optamos por utilizar um ambiente baseado em uma imagem geográfica real do Parque Nacional de Sete Cidades, um bioma predominantemente de Cerrado. Este parque é uma área de preservação no Brasil, encontrando-se em uma região de transição entre os biomas do cerrado e da caatinga. Ele abrange uma extensão de 36 quilômetros, inteiramente dedicados à proteção do meio ambiente, e está situado em Piripiri, no norte do estado do Piauí. Essa escolha proporciona autenticidade e relevância à nossa simulação, permitindo a extrapolação dos resultados para situações do mundo real. Detalhamos minuciosamente a modelagem da vegetação do parque, suas características topográficas e a complexidade de seu ecossistema, em conformidade com o estudo de referência de (ALVARADO et al., 2019). Isso contribui significativamente para a fidelidade e aplicabilidade de nossa pesquisa.

Este artigo visa explorar a aplicação da modelagem baseada em autômatos celulares e modelos matemáticos-computacionais bioinspirados para a vigilância e prevenção de incêndios em ambientes naturais. Para tanto, serão abordados os fundamentos teóricos que sustentam o uso de autômatos celulares e o modelo de comportamento das formigas, bem como a relevância das características da vegetação e do ecossistema na eficácia da simulação. A capacidade dos robôs de identificar possíveis focos de incêndio e traçar rotas de fuga eficientes pode ser de grande valia na preservação da fauna e flora locais, além de contribuir para a segurança de visitantes e moradores próximos

ao parque. A interseção entre a ciência da computação, a ecologia e a engenharia de prevenção de desastres que este estudo proporciona é um testemunho da abordagem multidisciplinar necessária para enfrentar os desafios ambientais contemporâneos.

## **Fundamentação Teórica**

Nesta seção serão explorados os conceitos sobre autômatos celulares que são modelos matemáticos onde cada célula segue regras simples com base em suas células vizinhas, além da definição modelo formiga, Adicionalmente, iremos trazer o conceito de busca Tabu, implementada por meio de uma fila bidimensional.

Os Autômatos Celulares (AC) representam uma classe distinta de modelos computacionais que se fundamentam na interação entre células organizadas em um arranjo estruturado. Cada célula interage com suas vizinhas de acordo com regras predefinidas (LIMA; LIMA, 2014), e essas interações locais culminam em comportamentos complexos e emergentes no sistema como um todo. Sua concepção surge como uma abordagem matemática de simulação capaz de descrever a complexa dinâmica de sistemas naturais. Nesse contexto, este artigo almeja apresentar uma aplicação específica dos AC para a modelagem de um cenário onde é possível explorar seu emprego na simulação de comportamentos de robôs autônomos (SOUZA; LIMA, 2019).

A ideia principal dos Autômatos Celulares está na forma como as células evoluem coordenadamente em um espaço. Cada célula assume um estado particular, que é atualizado a cada iteração (LIMA; OLIVEIRA, 2017). A combinação dessas regras, que podem variar de determinísticas a probabilísticas, é responsável por conduzir as transições de estados, deixando o sistema mais complexo (HORIBE; WALKER; RISI, 2021). Os ACs podem ser visualizados como estruturas organizadas em uma matriz multidimensional, sendo categorizados de acordo com a sua dimensão, podendo ser unidimensionais, bidimensionais ou tridimensionais (LIMA; OLIVEIRA, 2017). A dimensão espacial refere-se à organização das células dentro do reticulado que deve possuir uma geometria regular, onde todas as células tenham o mesmo tamanho (LIMA; OLIVEIRA, 2017). Um dos exemplos mais amplamente difundidos de AC-2D é o “Jogo da Vida”, do inglês Game of Life (GL), desenvolvido por Conway em 1970. Esse jogo ocorre em uma matriz de células quadradas, onde cada célula pode estar viva quando

seu estado é 1 ou morta quando seu estado é 0 (BRASIEL; LIMA, 2023). As regras de transição do GL, envolvendo vizinhos vivos e mortos, ditam a evolução das células ao longo do tempo, evidenciando padrões complexos e imprevisíveis.

Existe uma diversidade de trabalhos correlatos à aplicabilidade de Autômatos Celulares (ACs), uma vez que a flexibilidade dessa abordagem possibilita a representação de sistemas de diferentes naturezas, como propagação de doenças, criptografia (SILVA; SOARES; LIMA, 2016), fluxos de tráfego e, no contexto deste estudo, a robótica (SOUZA; LIMA, 2019). O trabalho de (FERREIRA et al., 2022) utiliza o trabalho precursor de (LIMA; LIMA, 2014) para o ajuste automático dos hiperparâmetros do AC que modela os incêndios no bioma Cerrado. No trabalho de (BRASIEL; LIMA, 2023), baseado no modelo precursor (LIMA; LIMA, 2014), em que os autores utilizam uma abordagem de Autômatos Celulares para simular a propagação de incêndios florestais em diferentes biomas, incluindo o Cerrado brasileiro. As simulações levaram em consideração a vegetação heterogênea, onde cada tipo de vegetação possui uma probabilidade de queima, as fontes de água e o fator vento, que pode influenciar a velocidade e a direção do fogo.

A aplicação dos ACs na modelagem de robótica autônoma representa um avanço significativo em direção à compreensão dos fatores que moldam o comportamento dos robôs (SOUZA; LIMA, 2019). Essa abordagem possibilita a simulação interativa desses elementos em escalas menores, simplificando a análise das complexas interações que influenciam o desempenho dos robôs. A robótica tem desempenhado um importante papel em uma variedade de aplicações, oferecendo eficiência e precisão em tarefas complexas e frequentemente perigosas. Isso tornou os robôs ferramentas valiosas em campos que vão desde a indústria até a exploração espacial.

Inspirados pelo comportamento das formigas, os feromônios invertidos têm ganhado destaque na navegação robótica (LOPES; LIMA, 2022). Essas substâncias são depositadas pelos robôs durante a exploração, criando uma espécie de “marcação” virtual que possibilita a identificação de áreas previamente visitadas e a coordenação entre os membros do enxame. Nesse modelo os robôs compartilham informações e coordenam suas ações de forma semelhante à busca de alimento por formigas. A probabilidade de o robô ir para uma célula com pequena quantidade de feromônio é maior do que a probabilidade de ele ir para uma célula com muito feromônio. A tomada de decisão

robótica frequentemente envolve considerações probabilísticas (SOUZA; LIMA, 2019). Os robôs enfrentam incertezas em ambientes complexos, e a integração de elementos probabilísticos em suas decisões é essencial para a adaptação a condições variáveis, como a probabilidade de encontrar recursos e caminhos, evitar obstáculos ou alcançar metas (LOPES; LIMA, 2022; LIMA; OLIVEIRA, 2017).

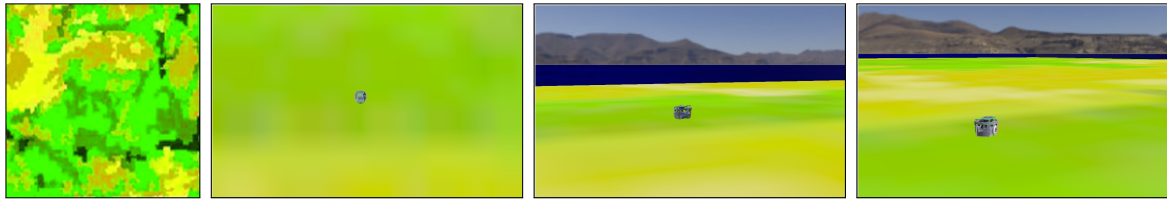
A busca Tabu, comumente usada na robótica, é eficaz para a navegação de robôs autônomos em ambientes complexos. Ela previne soluções ineficientes e aprimora a exploração do ambiente (LIMA; OLIVEIRA, 2017; LOPES; LIMA, 2022; SOUZA; LIMA, 2019). Na robótica, essa técnica é valiosa para otimizar a exploração, especialmente em mapeamento e busca de objetos. A busca Tabu pode ser integrada ao modelo de comportamento das formigas para evitar revisitar áreas recentemente exploradas, melhorando a eficiência da exploração. Isso é alcançado por meio de uma fila de memória de curto prazo que armazena as últimas posições exploradas, garantindo uma exploração inteligente e melhorando o desempenho na execução de tarefas de vigilância.

## **Proposta**

Nesta seção apresentaremos três modelos relacionados à exploração do ambiente por meio de robôs autônomos. Primeiro, será apresentado um modelo básico utilizando basicamente as regras de autômatos celulares e considerando a probabilidade da vegetação. Em seguida será apresentado um modelo que considera o feromônio invertido das formigas. Por fim, será discutido um modelo que leva em consideração a busca Tabu para a movimentação dos robôs.

A propagação de incêndios em florestas é influenciada pelo tipo de vegetação. Vegetações suscetíveis, como pastagens secas e florestas com muita madeira morta, aumentam o risco de ignição e rápida propagação. É vital considerar o tipo de vegetação na modelagem, pois afeta a movimentação do robô. Em caso de incêndio, o robô precisa identificar esse tipo de vegetação durante sua trajetória.

Para a simulação do ambiente foi utilizada uma imagem que retrata as principais vegetações do Parque Nacional das Sete Cidades, conforme Figura 1(a). Devido a qualidade da imagem, ao extrair a imagem para a simulação foi necessário tratar os pixels da imagem através de um cálculo de distância euclidiana para reconhecimento



(a) Parque de Sete Cidades. (b) Vista e-Puck no Webots superior. (c) Primeira vista e-Puck lateral. (d) Segunda vista e-Puck lateral.

Figura 1: Floresta heterogênea utilizada neste trabalho para avaliação e simulação dos robôs no cenário do Parque Nacional das Sete Cidades, Brasil e passos de simulação de um robô E-Puck no software Webots.

de padrões de cores, por meio de clusterização por cores de pixels. A aplicação de robótica nesta área de vigilância ambiental pode ser realizada por meio de simulações computacionais realísticas. Um software bastante utilizado para simulação espacial bidimensional (2D) de ambiente  $L$  (lattice ou reticulado) é o Webots que também possui um reticulado com células onde é possível inserir robôs, drones, objetos, texturas, na Figura 1(b) é apresentada uma vista superior, enquanto que nas Figuras 1(c) e 1(d) são apresentadas as vistas laterais.

Para a aplicação da vigilância de robótica em meio ambiente, mais específico no Parque Nacional de Sete Cidades, foi definido que a imagem teria 6 classes onde cada uma representaria um tipo de vegetação que receberia a classe pelo cálculo da distância euclidiana do valor RGB do pixel. Após definir a classe, ou seja, a vegetação presente naquele pixel da imagem, os valores dos pixels foram passados para um matriz. Foram utilizados seis tipos de vegetação, incluindo Cerrado Rupestre, Campo Limpo, Cerrado típico, Cerradão, Floresta perenifólia, Mata Ripária (ALVARADO et al., 2019; MATOS; FELFILI, 2010).

Para cada vegetação foi atribuída uma classe ( $C_i$ ,  $i \leq 6$ ) sendo: ( $C_1$ ) Cerrado Rupestre, ( $C_2$ ) Campo Limpo, ( $C_3$ ) Cerrado típico, ( $C_4$ ) Cerradão, ( $C_5$ ) Floresta perenifólia e ( $C_6$ ) Mata Ripária. Em nosso trabalho, respectivamente foi definido uma probabilidade de visita pelo robô de  $\{1.0, 0.95, 0.9, 0.8, 0.7, 0.0\}$ . Na Mata Ripária foi decidido que o robô não visitaria por ser uma vegetação mais densa e com probabilidade muito baixa de propagação de incêndio.

O modelo inicial foi desenvolvido com o objetivo de testar a aleatoriedade do robô em sua exploração do ambiente. O robô se locomove de forma probabilística de acordo com o valor de probabilidade da vegetação em volta da sua célula  $x_{ij}$ . No en-

tanto, reconhecendo a necessidade de aprimorar a eficácia da missão de vigilância e a detecção de incêndios, optou-se por incorporar o “Modelo de Feromônio Invertido das Formigas”, (LIMA; OLIVEIRA, 2017; SOUZA; LIMA, 2019; LOPES; LIMA, 2022). Em ambos os modelos as vegetações são representadas dentro de células de uma matriz  $200 \times 200$  sendo guardado nessas células a classe da vegetação. Também possui outra matriz de mesma dimensão que armazena as posições atuais dos robôs. Porém para o modelo baseado no modelo formiga foi necessário criar outra matriz para armazenar o feromônio. Quando o robô percorre uma célula durante sua missão de vigilância, ele registra essa célula como visitada e atribui um valor de feromônio invertido a essa localização na matriz. Para a tomada de decisão do próximo valor, após alguns testes de eficiência do robô  $r_k \in N$  (onde  $N$  é o número de robôs), foi decidido que o valor de feromônio máximo seria  $5 \times 10^3$ . Na primeira iteração toda vegetação é recebida o feromônio igual a 0 exceto em vegetações onde o robô é proibido de vigiar que é atribuído o valor  $5 \times 10^3$ . Além disso, na célula principal da matriz feromônio é somado o valor  $2 \times 10^3$  e nas células em volta é somado o valor  $10^3$ , de forma que não ultrapasse o valor do feromônio máximo.

Ao planejar sua próxima movimentação, o robô na célula  $r_k \in x_{ij}$  leva em consideração os níveis de feromônio invertido nas células vizinhas. As células com valores mais baixos de feromônio invertido são consideradas mais atrativas, pois indicam que essas áreas ainda não foram suficientemente inspecionadas. O cálculo da movimentação é realizado probabilisticamente de acordo com o tipo de vegetação das células ao redor e o valor do feromônio dessas células. Para cada célula, é atribuída uma probabilidade de visita para o robô  $r_k \in x_{ij}$ ,  $prob_v(x_{ij})$  através da seguinte fórmula:

$$prob_v^r(x_{ij}) = \theta - x_{ij} \times prob_b(x_{ij}) \quad (1)$$

Após isso é sorteado uma célula com base na probabilidade dos valores e então realizado a movimentação do robô. Os níveis de feromônio invertido nas células são atualizados dinamicamente a cada iteração. À medida que o robô continua sua movimentação, os valores de feromônio invertido nas células é decrementado em 1.0 até zerar novamente caso o robô não passe naquela célula novamente durante  $t$  iterações.

A implementação do modelo final envolveu a incorporação da “Busca Tabu” no modelo de feromônio invertido das formigas como um elemento essencial para otimizar

o trajeto de exploração do robô. Uma das principais características da Busca Tabu neste contexto é a utilização de uma fila  $Q$  bidimensional para armazenar as últimas posições visitadas pelo robô. Essa fila atua como uma memória de curto prazo que registra as coordenadas  $(i, j)$  das células  $x_{ij}$  por onde o robô passou recentemente, evitando que o robô retorne a áreas já inspecionadas, economizando tempo e recursos.

O funcionamento da fila bidimensional é relativamente simples. Quando o robô se move para uma nova célula, as coordenadas  $(i, j)$  dessa célula são adicionadas à fila correspondente com o valor 1.0. No entanto, a fila tem um tamanho máximo predefinido. Quando ela atinge sua capacidade  $|Q|$  máxima (60 posições), o primeiro elemento (a célula mais antiga) é removido, e as novas coordenadas são inseridas no final da fila. Na implementação do modelo final também foi incorporado um sistema de múltiplos robôs para otimizar ainda mais a missão de vigilância.

## Resultados experimentais

Para testar os 3 robôs, usamos uma imagem real representada por um plano de  $200 \times 200$  células de autômatos celulares (ACs), onde cada pixel corresponde a uma célula  $x_{ij}$  quadrada. Parâmetros incluem número máximo de iterações ( $10^4$ ), valor máximo de feromônio ( $5 \times 10^3$ ), feromônio na célula atual ( $2 \times 10^3$ ) e feromônio nas células vizinhas ( $10^3$ ). A eficiência do robô é medida pelo número de ciclos de vigilância  $C_T$  (completed tasks), quando os robôs visitam todos os 4 quadrantes do plano ( $L$  reticulado do AC que representa o Parque Nacional de Sete Cidades) ao menos uma vez dentro do limite de iterações.

Conduzimos experimentos para avaliar o desempenho do robô. Inicialmente, implementamos um modelo básico aleatório, sem uso de feromônio, considerando a probabilidade da vegetação, que favorece áreas mais secas e rasteiras. No entanto, este modelo mostrou baixo desempenho, como evidenciado na Tabela 1 para o primeiro modelo e na linha azul do gráfico da Figura 2, podemos dizer que este modelo apresentou uma baixa eficácia devido a vegetação heterogênea onde ele tende ir para vegetações com probabilidades maiores.

No segundo modelo com a adição do feromônio inspirado pelo comportamento das formigas, o desempenho do robô melhorou consideravelmente. Conduzimos quatro

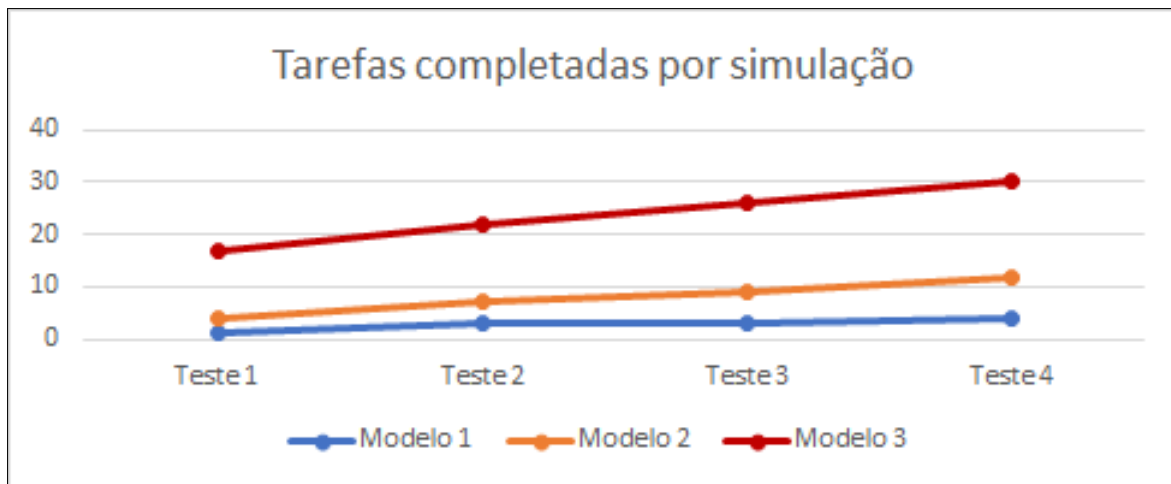


Figura 2: Gráfico do desempenho dos 3 modelos.

simulações, cada uma com  $10^4$  iterações. Após a simulação, geramos matrizes de calor no Software Matlab, em que cores mais intensas, como amarelo, representam maior quantidade de feromônio ( $5 \times 10^3$ ), enquanto cores mais escuras, como preto, indicam menor quantidade (zero). O robô, na maioria das simulações, conseguiu completar o ciclo de vigilância, visitando os quatro quadrantes de  $3 \geq C_T \geq 8$ ] vezes. Isso é evidenciado na linha laranja da Figura 2, que apresenta as médias de feromônio no ambiente após a conclusão das simulações utilizando o modelo de formiga para fins de vigilância. Cada Figura 3(a), 3(b), 3(c) e 3(d) representa a quantidade média de feromônio no ambiente após a conclusão de simulações usando o modelo de formiga para fins de vigilância. Esses mapas são essenciais para avaliar o comportamento e a eficácia do modelo de formiga na vigilância, mostrando como a distribuição de feromônio evolui ao longo das simulações em diferentes cenários de ciclos.

No terceiro modelo foi implementado a Busca Tabu por meio de uma fila de tamanho  $|Q| = 60$ . Essa adição representou um avanço considerável, pois permitiu que o robô evitasse visitar células já percorridas recentemente, aumentando significativamente a área de cobertura do robô, como é possível observar nas Figuras 4(a), 4(b), 4(c) e 4(d). Como ele visitou uma área maior, possibilitou que o feromônio médio das células tivesse um valor maior e devido a implementação da fila, o robô conseguiu completar o percurso de vigilância visitando os quatro quadrantes de 13 a 18 vezes, conforme é observado na linha vermelha da Figura 2 e na última linha da Tabela 1.

Na Tabela 1 a média reflete o desempenho médio geral de cada modelo nos testes, enquanto o desvio padrão indica o quanto as pontuações individuais variaram em

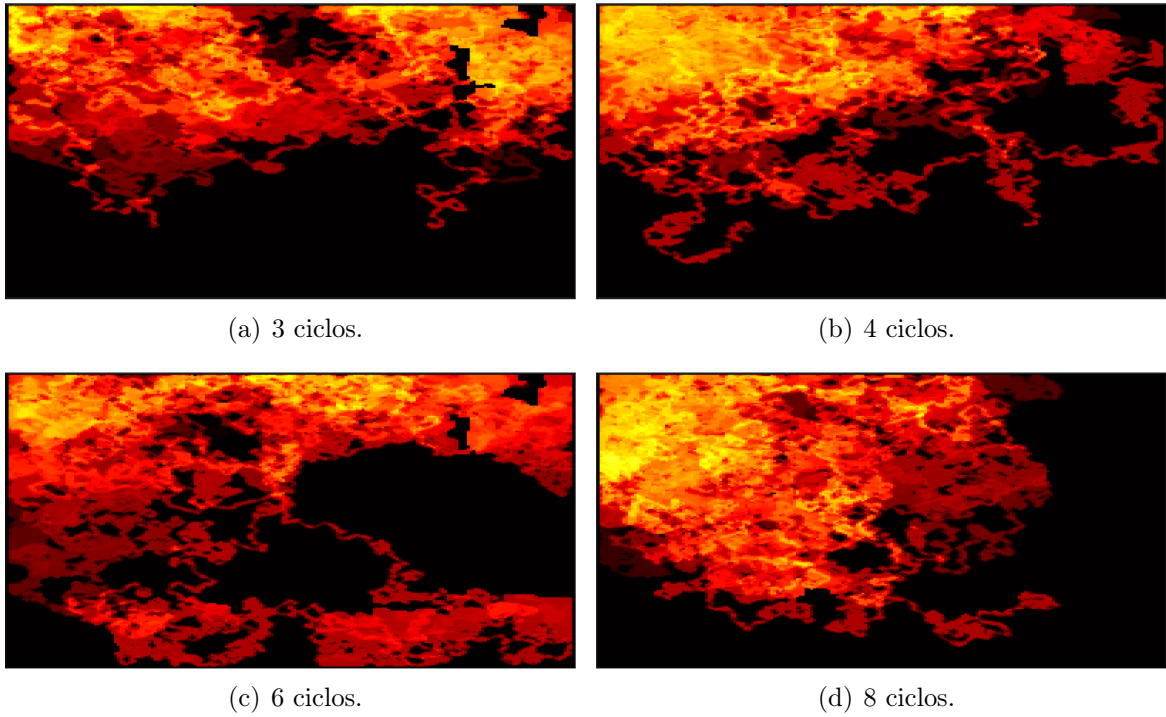


Figura 3: Mapas de quantidade de feromônio médio no ambiente ao final da simulação com o modelo formiga aplicado na vigilância

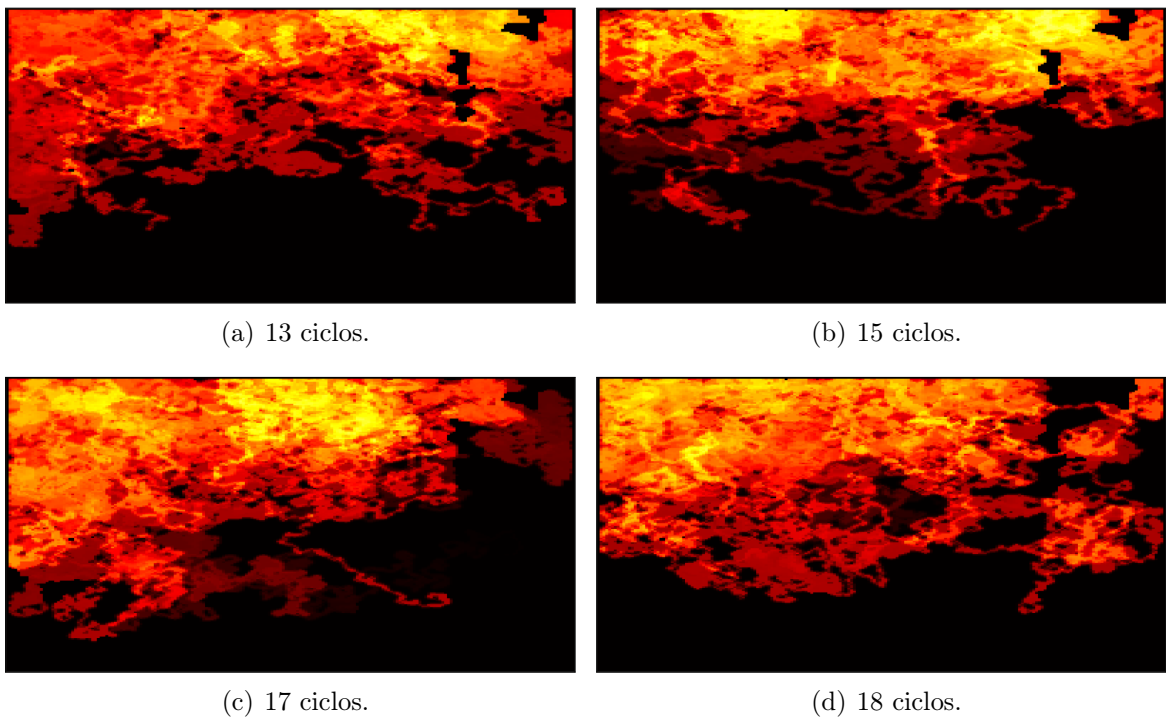


Figura 4: Mapas de quantidade de feromônio médio no ambiente ao final da simulação com o modelo formiga e uma fila aplicada na vigilância

relação à média. Quanto maior o desvio padrão, maior a variabilidade nos resultados. Portanto, o Modelo 1 possui a menor média, com desempenho inferior em comparação

Tabela 1: Médias e desvios dos 4 experimentos considerando-se os 3 modelos propostos.

Modelos Propostos	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Média	Desvio Padrão
Modelo 1	1	3	3	4	2.75	1.258306
Modelo 2	3	4	6	8	5.25	2.217356
Modelo 3	13	15	17	18	15.75	2.217356

com os outros modelos, enquanto os Modelos 2 e 3 têm médias mais altas, indicando desempenho superior e ambos apresentam desvio padrão baixo e similar entre si, indicando boa consistência entre os resultados.

### Considerações finais

Neste artigo, apresentamos um controlador de robô baseado em autômatos celulares e feromônio invertido das formigas, melhorando a capacidade de vigilância e exploração autônoma em ambientes complexos. Além disso, introduzimos uma abordagem com o uso de uma fila bidimensional através da busca tabu, que armazena as células recentemente visitadas pelo robô, aprimorando significativamente seu desempenho na missão de vigilância ao evitar movimentos redundantes. Ao analisar os dados e mapas de calor gerados por meio de nossos experimentos, fica evidente que o modelo que incorpora o conceito de feromônio das formigas e a estratégia da busca Tabu se destaca como o mais eficiente entre os modelos anteriores, resultando em ciclos completos de vigilância mais abrangentes e um desempenho aprimorado do robô. No entanto, há espaço para melhorias, como o uso de equipes maiores de robôs e a otimização dos valores de feromônio e fila para se adaptarem a ambientes específicos. Essas melhorias podem tornar esse modelo ainda mais poderoso e versátil em aplicações de robótica autônoma e exploração de ambientes desafiadores.

### Referências

ALVARADO, S. T. et al. Effects of fire suppression policies on fire regimes in protected areas in the Cerrado. **Biodiversidade Brasileira-BioBrasil**, n. 1, p. 200–200, 2019.

BRASIEL, H. C.; LIMA, D. A. Exploring the influence of wind, vegetation and water sources on the spread of forest fires in the Brazilian Cerrado Biome using Cellular

Automata. In: SBC. ANAIS do XIV Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais. [S.l.: s.n.], 2023. P. 61–70.

FERREIRA, M. et al. Automatic Evolutionary Adjustment of Cellular Automata Model for Forest Fire Propagation. In: SPRINGER. INTERNATIONAL Conference on Cellular Automata for Research and Industry. [S.l.: s.n.], 2022. P. 235–245.

HORIBE, K.; WALKER, K.; RISI, S. Regenerating soft robots through neural cellular automata. In: SPRINGER. GENETIC Programming: 24th European Conference, EuroGP 2021, Held as Part of EvoStar 2021, Virtual Event, April 7–9, 2021, Proceedings 24. [S.l.: s.n.], 2021. P. 36–50.

LIMA, D.; LIMA, H. Autômatos celulares estocásticos bidimensionais aplicados a simulação de propagação de incêndios em florestas homogêneas. In: SBC. ANAIS do V Workshop de Computação Aplicada a Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais. [S.l.: s.n.], 2014. P. 15–24.

LIMA, D. A.; OLIVEIRA, G. M. A cellular automata ant memory model of foraging in a swarm of robots. **Applied Mathematical Modelling**, Elsevier, v. 47, p. 551–572, 2017.

LOPES, H. J.; LIMA, D. A. Surveillance task optimized by Evolutionary shared Tabu Inverted Ant Cellular Automata Model for swarm robotics navigation control. **Results in Control and Optimization**, Elsevier, v. 8, p. 100141, 2022.

MATOS, M. d. Q.; FELFILI, J. M. Florística, fitossociologia e diversidade da vegetação arbórea nas matas de galeria do Parque Nacional de Sete Cidades (PNSC), Piauí, Brasil. **Acta botânica brasílica**, SciELO Brasil, v. 24, p. 483–496, 2010.

SILVA, E. C.; SOARES, J. A.; LIMA, D. A. Autômatos celulares unidimensionais caóticos com borda fixa aplicados à modelagem de um sistema criptográfico para imagens digitais. **Revista de Informática Teórica e Aplicada**, v. 23, n. 1, p. 250–276, 2016.

SOUZA, N. L. B.; LIMA, D. A. Tabu search for the surveillance task optimization of a robot controlled by two-dimensional stochastic cellular automata ants model. In: IEEE. 2019 Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2019 Workshop on Robotics in Education (WRE). [S.l.: s.n.], 2019. P. 299–304.