

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

EVERTON DOS SANTOS

**MODELO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO AUTÔMATOS
CELULARES APLICADO À SERRA DE SÃO DOMINGOS E ÁREAS
ADJACENTES**

Poços de Caldas/MG

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

EVERTON DOS SANTOS

**MODELO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO AUTÔMATOS
CELULARES APLICADO À SERRA DE SÃO DOMINGOS E ÁREAS
ADJACENTES**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos obrigatórios para obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Monitoramento Ambiental.

Orientador: Dr. Luiz Felipe Ramos Turci

Poços de Caldas/MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca campus Poços de Caldas

S237m Santos, Everton dos.

Modelo de propagação de incêndio utilizando autômatos celulares aplicado à Serra de São Domingos e áreas adjacentes / Everton dos Santos. -- Poços de Caldas/MG, 2018.

64 f. –

Orientador(a): Luiz Felipe Ramos Turci.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2018.
Bibliografia.

1. Propagação de incêndio – Modelagem de dados. 2. Autômatos celulares. 3. Sensoriamento remoto. I. Turci, Luiz Felipe Ramos. II. Título.

CDD – 628



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Alfenas. UNIFAL-MG
Campus Avançado de Poços de Caldas
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental - PPGCEA
Rodovia José Aurélio Vilela, nº 11.999. Cidade Universitária
CEP: 37715-400. Poços de Caldas, MG - Brasil



EVERTON DOS SANTOS

**MODELO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO UTILIZANDO AUTÔMATOS
CELULARES APLICADO À SERRA DE SÃO DOMINGOS E ÁREAS
ADJACENTES**

A banca examinadora abaixo-assinada, aprova a Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia Ambiental, pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Alfenas.

Área de Concentração:
Monitoramento Ambiental.

Aprovada em: 28 de fevereiro de 2018.

Prof. Dr. Luiz Felipe Ramos Turci

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)

Prof. Dr. Paulo Henrique Bretanha Junker Menezes

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)

Prof. Dr. Mayk Vieira Coelho

Instituição: Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me prover perseverança, paciência e discernimento para concluir mais essa etapa na vida.

Em segundo, gostaria de agradecer a minha família, por todo o suporte, carinho e compreensão durante toda a minha graduação e mestrado.

Também gostaria de agradecer à Bruna, por todo amor, companheirismo, paciência e incentivo durante o mestrado.

Aos meus amigos: Danilo Cruz, Rodrigo Mendes, Rhander Avelar, Tiago Mendes, Victor do Carmo, Douglas Guarda, Raphael Sorci, Jorge Fernando, Matheus Jareta, Lucas Mariano, Mateus Fernandes, Luiz Paulo, Bruna Pessoti, Amanda Nascimento, Silas Knust, Paulo Henrique Correa e Adriano Alves.

Ao meu orientador, Luiz Felipe R. Turci, que além de um mentor, se tornou um amigo.

Aos professores Rodolfo Maduro Almeida e Paulo Henrique Junker por todo auxílio prestado no desenvolvimento do trabalho.

À UNIFAL-MG e a CAPES, pelo financiamento desse projeto de mestrado.

“Do or do not. There is no try.”

Master Yoda

The Empire Strikes Back

RESUMO

O Parque Municipal da Serra de São Domingos (PMSSD), situado no município de Poços de Caldas/MG, sofre anualmente com a ocorrência de incêndios, que acarretam em perdas ambientais, sociais e econômicas. A existência de uma ferramenta que permita prever o comportamento de incêndios na área contribuiria no planejamento de combate, e até mesmo na prevenção dos mesmos. Neste sentido, o modelo de propagação de incêndios é uma importante ferramenta de simulação de cenários de propagação de incêndios em diferentes condições ambientais. Neste trabalho, apresenta-se a aplicação de um modelo probabilístico de propagação de incêndio, baseado no método dos autômatos celulares, similar a modelos já utilizados para estudo de dinâmica de incêndios na região do bioma Cerrado. O modelo baseia-se em probabilidades B e I , relacionadas ao processo de sustentabilidade e ignição dos incêndios, respectivamente; a definição de seus valores baseou-se na aquisição e análise de dados espaciais, como modelo digital de terreno; dados meteorológicos, como umidade e velocidade e direção do vento; e principalmente característica da cobertura vegetal. Outros parâmetros do modelo são totalmente empíricos e definidos aplicando-se algoritmos heurísticos de otimização. A análise das ocorrências de incêndio na área mostrou que a maioria dos eventos ocorre em áreas de vegetação rasteira, e que a topografia do local, bem como a condição dos ventos, influencia diretamente na propagação desses incêndios. As análises indicam uma grande sensibilidade do modelo a variações de alguns parâmetros meteorológicos, o que aponta a necessidade de obtenção de dados mais precisos para melhor estudo da dinâmica de propagação de incêndios na área. Apesar disso, as simulações conseguiram representar incêndios de até 67% da área afetada quando comparados à incêndios reais.

Palavras-chave: Modelagem. Modelo de propagação de incêndio. Autômatos celulares. Sensoriamento remoto.

ABSTRACT

The Serra de São Domingos Municipal Park (PMSSD), located in the city of Poços de Caldas / MG, suffers annually with the occurrence of fires, which lead to environmental, social and economic losses. The existence of a tool to predict the behavior of fires in the area would contribute to the planning of combat, and even to their prevention. In this sense, the fire propagation model is an important tool for simulating scenarios of fire propagation in different environmental conditions. In this work, the application of a probabilistic model of fire propagation, based on the cellular automata method is presented, similar to models already used to study fire dynamics in the Cerrado biome region. The model is based on probabilities B and I, related to the process of sustainability and ignition of fires, respectively; the definition of its values was based on the acquisition and analysis of spatial data, as a digital terrain model; meteorological data such as humidity and speed and wind direction; and mainly characteristic of the vegetal cover. Other parameters of the model are completely empirical and defined by applying heuristic optimization algorithms. The analysis of the occurrence of fire in the area showed that most of the events occur in areas of low vegetation, and that the topography of the place, as well as the condition of the winds, directly influences the propagation of these fires. The analyzes indicate a great sensitivity of the model to variations of some meteorological parameters, which indicates the need to obtain more accurate data to better study the dynamics of fire propagation in the area. Despite this, the simulations were able to represent fire of up to 67% of the affected area when compared to the actual fire.

Keywords: Modeling. Model of fire propagation. Cellular automata. Remote sensing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Classificação dos padrões de propagação do modelo e valores da velocidade adimensional de propagação.	19
Figura 2 –	Fluxograma com as etapas do processo do modelo.	24
Figura 3 –	Mapa do município de Poços de Caldas. Em vermelho, destaque da área de estudo.	26
Figura 4 –	Área afetada por incêndio. Data: 18/09/2017.	39
Figura 5 –	Área afetada por incêndio. Data: 24/09/2017.	40
Figura 6 –	NDVI diferencial entre as imagens da área de estudo nos dias 15/07/2013 e 01/09/2013 e compreendendo o incêndio de 31 de agosto de 2013.	41
Figura 7 –	Análise térmica da área de estudo no dia 01/09/2013. ...	42
Figura 8 –	Mapa de Cobertura Vegetal e Ocupação da Área de Estudo.	44
Figura 9 –	Exemplo de NDVI abrangendo a área de estudo.	45
Figura 10 –	Aceiros na área de estudo.	46
Figura 11 –	Mapa de elevação da área de estudo.	47
Figura 12 –	Mapa de declividade da área de estudo.	47
Figura 13 –	Comparativo entre incêndio real e simulações. (a) Incêndio real 18/09/2017; (b) simulação 1 - $f(x)$ mín = 0,79; (c) simulação 2 - $f(x)$ mín = 0,52; (d) simulação 3 - $f(x)$ mín = 0,72; (e) simulação 4 - $f(x)$ mín = 0,43.	54
Figura 14 –	Comparativo entre incêndio real e simulações. (f) Incêndio real 24/09/2017; (g) simulação 5 - $f(x)$ mín = 0,86; (h) simulação 6 - $f(x)$ mín = 0,43; (i) simulação 7 - $f(x)$ mín = 0,62.	56
Figura 15 –	Comparativo entre incêndio real e simulações. (j) Incêndio real 31/08/2013; (k) ponto de ignição 1 - $f(x)$ mín = 0,63; (l) ponto de ignição 2 - $f(x)$ mín = 0,52; (m) ponto de ignição 3 - $f(x)$ mín = 0,52.	58

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
2.1	OBJETIVOS GERAIS	12
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO	13
3.2	AUTÔMATOS CELULARES	15
3.3	MODELO PROBABILÍSTICO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO	16
3.4	SENSORIAMENTO REMOTO	20
4	METODOLOGIA	24
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	24
4.1.1	Caracterização da vegetação	27
4.1.2	Uso e ocupação do solo	28
4.1.3	Topografia	28
4.2	REGISTROS DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS	29
4.2.1	Ponto de ignição e área atingida	29
4.3	MODELO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO	31
4.3.1	Velocidade de propagação do fogo	31
4.3.2	Probabilidades D, B e I	31
4.3.3	Definição das constantes empíricas	34
5	RESULTADOS	38
5.1	DETERMINAÇÃO DE ÁREAS INCENDIADAS	38
5.1.1	Incêndios ocorridos em 2017	39
5.1.2	Incêndio ocorrido em 2013	40
5.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	43
5.2.1	Caracterização da vegetação	43
5.2.2	Uso e ocupação do solo	45
5.2.3	Topografia	46
5.3	AJUSTE DO MODELO	48
5.3.1	Constantes empíricas	49
5.4	SIMULAÇÕES	51

6	CONCLUSÕES	59
	REFERÊNCIAS	62

1 INTRODUÇÃO

Anualmente, os relatos de problemas ambientais, sociais e econômicos, causados por incêndios florestais em diversos lugares do mundo, são descritos em diversos meios de comunicação. Dentre esses problemas, pode-se citar a queda na qualidade do ar, que favorece problemas de saúde; as perdas relacionadas à fauna e flora; e os custos envolvidos para a contenção e prevenção desses incêndios. Dessa maneira, a compreensão das causas e consequências desses eventos de incêndios torna-se essencial para políticas de manejo e prevenção desses eventos.

Assim, o estudo dessas ocorrências de incêndios aliado à aplicação de técnicas que funcionem de forma preventiva, é fundamental para a criação de planos que busquem conter, minimizar ou extinguir os eventos de incêndio

A modelagem de propagação de incêndios com variação de parâmetros apresenta-se como uma ferramenta que permite simular condições e comportamentos desses eventos, de forma a compreender as diversas interações que os compõem. Os modelos matemáticos para propagação de incêndios não são estudos recentes, visto que alguns datam da década de 1940 (PASTOR et al., 2003), entretanto, a grande maioria é composto por um conjunto de equações, teóricas e/ou obtidas experimentalmente, de forma a representar o que de fato ocorre numa situação real de incêndio, como a velocidade de propagação do fogo, consumo de combustível vegetal e outros parâmetros. Com o surgimento simulações computadorizadas, os modelos evoluíram, de forma a tentar representar da melhor maneira possível os cenários de ocorrência de incêndio em áreas reais.

A associação de diversos modelos, juntamente com a utilização de sistemas de informações geográficas e recursos computacionais provocaram um aumento significativo na elaboração de ferramentas para combate e prevenção de incêndios florestais (PASTOR et al., 2003). Assim, a partir dos anos 80, órgãos responsáveis pelo monitoramento e combate aos incêndios florestais em diversos países, como Estados Unidos da América (EUA),

Canadá, França, Portugal, Austrália e outros, vêm utilizando modelos de propagação como ferramenta auxiliar em gestão e tomada de decisões (ANDRE; VIEGAS, 2001).

O paradigma dos autômatos celulares vem mostrando-se uma excelente ferramenta para a modelagem de sistemas complexos, utilizando de equações simples e tratando as variáveis, como tempo e espaço, de maneira discreta, com parâmetros finitos, o que faz com que modelos de propagação de incêndios, por exemplo, possam ser simulados com resultados satisfatórios. Os autômatos celulares vêm sendo utilizados por diversos pesquisadores e autores, como Oliveira (2005), D'Ambrosio et al. (2006) e Almeida (2012), por exemplo, que trataram justamente de cenários de propagação de incêndio, e outros autores como Lima (2007) e Li et al. (2015), que simularam sistemas de tráfego de veículos e planos de fogo em minerações subterrâneas, respectivamente.

Neste trabalho, apresenta-se a aplicação de um modelo probabilístico de propagação de incêndio, baseado no método dos autômatos celulares, similar ao modelo já utilizado para estudo de dinâmica de incêndios na região do bioma Cerrado por Almeida (2012). A área de estudo é o Parque Municipal da Serra de São Domingos, uma importante unidade de conservação da mata atlântica, localizada no município de Poços de Caldas, na região sul de Minas Gerais, apresentando espécies endêmicas de fauna e flora, muitas, ameaçadas de extinção, e que sofre anualmente com a ocorrência de incêndios.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral desse projeto é compreender os eventos de incêndio que ocorrem em uma área de interesse, e adequar um modelo de propagação para esses incêndios, tendo como objeto de estudo uma área localizada no município de Poços de Caldas-MG, que engloba o Parque Municipal da Serra de São Domingos (PMSSD).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Caracterização da área de estudo: elaboração de um banco de dados de informações georreferenciadas (cobertura vegetal, topografia, corpos hídricos, aceiros);
- b) Levantamento de dados de incêndios na área de estudo;
- c) Formulação do modelo computacional utilizando o método dos autômatos celulares;
- d) Ajuste do modelo;
- e) Validação do modelo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MODELOS DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO

Os modelos matemáticos dos incêndios florestais e propagação de fogo são, em geral, compostos por um conjunto de equações que resultam em valores numéricos para a evolução temporal-espacial de uma ou mais variáveis, como a taxa de propagação, altura das chamas, risco de ignição, consumo de combustível ou extinção do incêndio. Dessa forma, é possível obter uma descrição simplificada do comportamento do sistema que se espera representar (PASTOR et al., 2003).

Os modelos de propagação do fogo podem ser classificados de diversas maneiras: de acordo com a origem das equações, as variáveis estudadas ou o sistema físico a ser modelado.

Os modelos que estudam as variáveis do sistema podem levar em consideração as diversas variáveis dos incêndios, como a taxa de propagação do fogo, intensidade de queima, consumo de combustível e geometria das chamas. Os modelos baseados nos sistemas físicos consideram os incêndios de superfície, que atingem a vegetação inferior a 2 metros de altura, como árvores pequenas, arbustos e vegetação campestre; o incêndio de coroa, onde a frente de fogo espalha-se em geral pela copa da vegetação, podendo atingir também a superfície (PASTOR et al., 2003).

Os modelos teóricos, empíricos ou semi-empíricos estão fortemente relacionados à origem das equações. No primeiro, os modelos são gerados a partir das leis que regem a transferência de calor, combustão e mecânica dos fluidos, produzindo modelos com dificuldades de validação, embora possam ser aplicados para situações hipotéticas. No segundo, os modelos são formulados a partir de correlações extraídas de experimentos e históricos de ocorrência de incêndio, sendo aplicáveis somente a sistemas que possuam condições idênticas às usadas na concepção do modelo. No caso dos modelos semi-empíricos, sua formulação é através de expressões simplificadas, teóricas, e complementada com dados experimentais, podendo

ser validada para cenários que apresentem certas semelhanças entre si (PASTOR et al., 2003).

A modelagem de propagação do fogo em incêndios florestais também se diferencia pela maneira com que o espaço é representado, de forma contínua ou discreta, e pelos métodos da função de transição, podendo ser determinísticos ou probabilísticos (ALMEIDA, 2012).

Nos modelos que utilizam o método dos autômatos celulares, o espaço de interesse é representado por um arranjo de células, em que cada uma desta possui um conjunto de estados possíveis. Almeida (2012) define os possíveis estados para o modelo de propagação de fogo como sendo:

- Célula combustível – representando áreas com vegetação que pode sofrer ignição;
- Célula não-combustível – representando áreas sem vegetação, ou obstáculos à propagação, como rios, estradas e aceiros;
- Célula queimando – representando uma área em que ocorreu a ignição na vegetação;
- Célula queimada – representando uma área onde todo o combustível vegetal foi consumido pelo fogo.

Nos modelos determinísticos, a função de transição dos estados parte principalmente da taxa de propagação do fogo nas células, e as transições de estados dependem do tempo de queima da célula e do tempo de propagação às células vizinhas. Nos modelos probabilísticos, a propagação funciona como um evento aleatório, onde a transição dos estados se avalia por probabilidades, que levam em consideração o tipo, o acúmulo e a umidade do combustível vegetal. Efeitos de direção e velocidade do vento e topografia retornam a direção e forma de propagação do incêndio (ALMEIDA, 2012).

3.2 AUTÔMATOS CELULARES

A proposta dos autômatos celulares surgiu na década de 1940, autoria do cientista John Von Neumann, porém ganhou popularidade na década de 1970, sob a forma de um jogo de computador, chamado de “O Jogo da Vida”, desenvolvido pelo matemático John Conway. A partir desse instante, notou-se a infinidade de aplicações possíveis para o modelo dos autômatos celulares (OLIVEIRA, 2005). Após os anos 80, Stephen Wolfram estudou os autômatos celulares utilizando simples mecanismos determinísticos, obtendo resultados surpreendentemente complexos, o que levou a conclusão de que simples mecanismos poderiam modelar fenômenos complexos (LIMA, 2007). A estrutura de arranjo dos autômatos celulares e suas interações com as regiões vizinhas fizeram com que este modelo fosse um dos mais aceitáveis para simulações de incêndios florestais, devido à propagação do incêndio em si, que depende das características da área do entorno do foco deste incêndio.

Os autômatos celulares (AC) são modelos de sistemas físicos, com variáveis como tempo e espaço, tratadas discretamente, e cujos parâmetros físicos, como características de combustíveis e terreno no caso de modelagem de incêndios, compõem um conjunto de valores finitos (LI et al., 2015), sendo amplamente utilizados para modelagens e simulações de sistemas dinâmicos complexos, como a biologia reprodutiva, sistemas químicos auto organizáveis, planos de desenvolvimento urbano, sistemas de transportes e incêndios florestais, cuja evolução depende exclusivamente das interações locais das partes constituintes (D’AMBROSIO et al., 2006).

Um sistema de autômatos celulares consiste da divisão regular do espaço em células, sendo cada célula caracterizada por um estado que representa, da melhor forma possível, o seu estado real. As mudanças de estado das células dependem do estado atual da própria célula e das células vizinhas, marcadas por uma função de transição (D’AMBROSIO et al., 2006, LI et al., 2015). O arranjo do reticulado celular, ou a vizinhança das células, pode assumir diferentes configurações, de acordo com o propósito da

modelagem, como por exemplo, células quadradas, de dimensões L_x por L_y , ou hexagonais (D'AMBROSIO et al., 2006).

O estado de cada célula é composto por sub estados, que representam todas as características relevantes para a evolução do sistema em relação ao espaço correspondente à célula. Da mesma forma, a função de transição também pode ser dividida em diversos subcomponentes, podendo esses componentes serem distinguidos em dois tipos: transformações internas, que dependem das características da célula e de suas células vizinhas; e influencias externas, que descrevem alguma situação externa, que pode ser considerada como o ponto de partida para as simulações (D'AMBROSIO et al., 2006).

Comparando com outros métodos tradicionais de modelagem, os autômatos celulares são capazes de produzir resultados e evoluções de simulação complexos, utilizando parâmetros simples, uma vez que atua diretamente na interação de cada um dos componentes inseridos nas células representativas (LI et al., 2015).

3.3 MODELO PROBABILÍSTICO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO

Almeida (2012) propõe um modelo de propagação de incêndio utilizando autômatos celulares em que cada célula a ser utilizada pelo modelo possui uma variável de estado, chamada de S, que possui um conjunto de estados possíveis: E, V, F e O. E representa uma célula vazia, sem combustível vegetal; V representa uma célula combustível, que contém vegetação que pode ser consumida pelo fogo; F representa uma célula queimando; e O representa uma célula em que todo o combustível vegetal foi consumido.

A variável S é uma função de três probabilidades distintas: D, B e I. Cada uma destas probabilidades são funções de características e parâmetros provenientes da área de estudo. D está relacionada à vegetação disponível ao longo do espaço celular; B relaciona-se ao processo de combustão, em que, com o passar do tempo no modelo, uma célula pode passar do estado queimando (F) para o estado queimado (O); e I está relacionada ao processo

de ignição, em que ocorre o contágio de uma célula queimando (F) para uma célula com combustível vegetal (V) (ALMEIDA, 2012).

A probabilidade D refere-se à densidade e distribuição espacial da vegetação nas células dispostas no arranjo celular. Considerando uma área coberta inteiramente por vegetação, o valor da probabilidade D assume o valor de 1 ($D = 1$). Enquanto uma área com vegetação não contínua pode ser apresentada como $0 < D < 1$. A não continuidade da vegetação pode estar relacionada à obstáculos, naturais ou não, que devem ser representados no modelo (ALMEIDA, 2012).

A probabilidade B expõe a eficiência do processo de combustão da célula, onde valores elevados conduzem a um consumo mais rápido do combustível vegetal presente na célula. A combustão depende de três fatores essenciais: combustível, comburente e ignição. Com essa definição em mente, a combustibilidade e a sustentação da combustão são afetadas pelos efeitos atmosféricos, caso estes influenciem qualquer um desses três fatores (ALMEIDA, 2012).

Dessa maneira, a umidade relativa do ar afeta a possibilidade dos combustíveis vegetais de sustentarem o processo de combustão, uma vez que a vegetação absorve umidade pelo contato direto com a água, e também pelo vapor de água presente na atmosfera. Portanto, o teor de umidade é a relação, em porcentagem, da massa água contida no combustível comparado a sua massa seca. Dessa forma, tanto o rendimento da combustão, quanto a capacidade de ignição do combustível vegetal, são influenciados pelo teor de umidade do combustível. A quantidade de calor necessária para levar o combustível à ignição será maior quando o combustível vegetal apresentar maior umidade, uma vez que durante a propagação do fogo, o calor apresentado pela frente de fogo será utilizado para evaporar a água presente no combustível que ainda será consumido. Caso a quantidade de calor não for suficiente para que ocorra a evaporação desta umidade, o fogo será extinto (NELSON JR, 2001).

A probabilidade I demonstra a capacidade de ignição das células com vegetação no arranjo celular, de forma que valores elevados resultam em um aumento na capacidade de propagação do fogo de uma célula queimando (F)

para uma célula com combustível (V). O que separa a região da vegetação que ainda não sofreu a ignição da região em que a vegetação foi/está sendo consumida, é chamada de frente de fogo, região dominada pelas chamas e com produção de calor intensa. A frente de fogo espalha-se sobre a superfície sob diferentes formas: circular, onde o fogo se propaga em condições de superfícies planas, sem a ação dos ventos e vegetação homogênea, apresentando taxa de propagação do fogo constante; elíptica, onde a vegetação continua homogênea, mas a frente de fogo sofre efeitos da direção e velocidade dos ventos, e/ou declividade variada na superfície, sendo que a taxa de propagação do fogo varia no perímetro da frente de fogo; e a forma irregular, quando a vegetação é heterogênea, a velocidade e direção do vento não são constantes e o relevo também é heterogêneo (PYNE et al., 1996 apud ALMEIDA, 2012).

Almeida (2012) realizou uma extensa análise qualitativa do modelo probabilístico de propagação de incêndio utilizando autômatos celulares, analisando a probabilidade efetiva de propagação do fogo utilizando valores variados para D, B e I. A partir dessas análises determinaram-se as fronteiras críticas e padrões de propagação do fogo, bem como obtiveram-se valores para a velocidade adimensional de propagação do fogo, R_a , que variam entre 0 e 1. A classificação dos padrões de propagação do modelo para as diferentes velocidades propagação podem ser vistos na Figura 1.

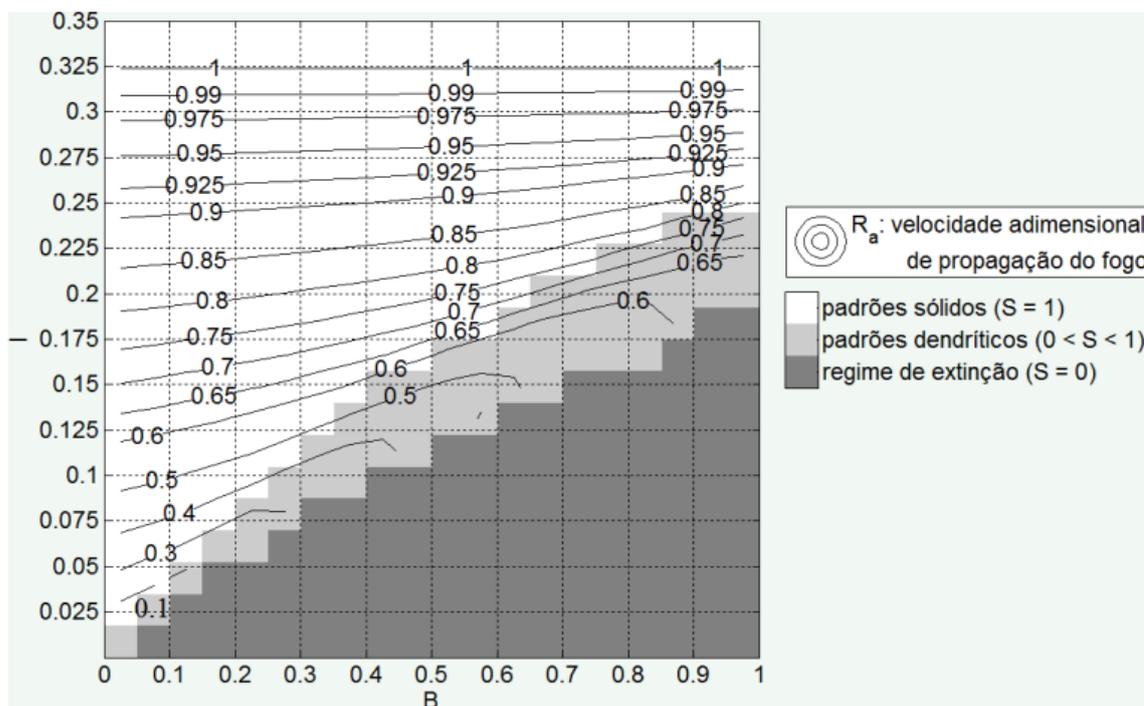


Figura 1 - Classificação dos padrões de propagação do modelo e valores da velocidade adimensional de propagação.

Fonte: ALMEIDA (2012, p. 49).

A velocidade R_a de propagação do fogo é estimada pela distância percorrida pela frente de fogo, que é a dimensão do espaço celular, dividida pelo tempo médio de propagação, expresso em iterações. A velocidade de propagação do fogo é considerada fundamental para estimar o desenvolvimento de um incêndio, mostrando a proporção do avanço do fogo ao longo do tempo.

O padrão sólido ($S = 1$) foi considerado quando os valores estimados de B e I produziram uma região de frente de fogo bem definida e sem chances de extinção, enquanto o padrão dendrítico ($0 < S < 1$) caracterizou-se pela propagação não uniforme e com chances de extinção. De acordo com o gráfico, observa-se que um valor de $I_{máx}$ encontrado é em torno de 0,325. Este limite superior de I define a máxima velocidade de propagação que o modelo pode representar, que é quando o fogo avança uma unidade de reticulado por iteração. A partir deste valor, os padrões de incêndios simulados já passam a sofrer influência da geometria do espaço celular (HARGROVE et al., 2000), e o padrão de propagação de uma frente de fogo

passa a apresentar formas quadradas, ao invés de apresentar formas arredondadas. Hargrove et al. (2000) destaca que esta distorção pode ser evitada mediante a definição de um limite superior para a probabilidade de propagação que, para o modelo proposto, é representado pelo valor de I_{\max} .

3.4 SENSORIAMENTO REMOTO

O sensoriamento remoto está estritamente relacionado à quantificação da radiação eletromagnética (REM), emitida ou refletida, dos alvos da superfície da Terra, assim como o refinamento e disponibilidade dessa informação de maneira que possa ser interpretada.

Dessa forma, a radiação solar é a fonte de radiação mais importante para o sensoriamento remoto, uma vez que os sensores, da maioria, dos satélites utilizam essa radiação para realizar o imageamento dos alvos na superfície. A radiação solar, ou energia, que chega até a superfície da Terra, em forma de ondas, interage com todos os objetos presentes, e pode ser dividida em três partes: transmitida, absorvida e refletida. Essa divisão da energia interativa pode ser utilizada, por exemplo, para determinar e diferenciar as vegetações existentes em uma área, pois cada tipo de vegetação apresenta essa divisão de maneira diferente. Essa divisão depende das características biológicas e físico-químicas de cada objeto (MOREIRA, 2011).

Os sensores utilizados pelos satélites para medir a radiação emitida ou refletida pelos alvos na superfície terrestre são chamados de radiômetros, que são capazes de identificar e registrar essa radiação, e a partir disso, criar um produto que possa ser interpretado, como uma fotografia, um gráfico ou uma imagem digital. Dessa forma, os sensores de satélites (orbitais), operam em faixas espectrais (ou bandas), que vão desde o visível até as micro-ondas. No quadro 1, é possível ver algumas especificações do satélite Landsat 8, como faixa espectral, nomenclatura das bandas e resolução.

Quadro 1 – Características de imageamento do satélite Landsat 8.

Landsat 8	Bandas	Comprimento de onda (μm)	Resolução (m)
Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Banda 1 – Ultra Azul (Coastal/Aerosol)	0,43 – 0,45	30
	Banda 2 – Azul (B)	0,45 – 0,51	30
	Banda 3 – Verde (G)	0,53 – 0,59	30
	Banda 4 – Vermelho (R)	0,64 – 0,67	30
	Banda 5 – Infravermelho Próximo (NIR)	0,85 – 0,88	30
	Banda 6 – Infravermelho Ondas Curtas 1 (SWIR1)	1,57 – 1,65	30
	Banda 7 – Infravermelho Ondas Curtas 2 (SWIR2)	2,11 – 2,29	30
	Banda 8 - Pancromática	0,50 – 0,68	15
	Banda 9 - Cirrus	1,36 – 1,38	30
	Banda 10 – Infravermelho Térmico 1 (TIRS1)	10,60 – 11,19	100 * (30)
	Banda 11 – Infravermelho Térmico 2 (TIRS2)	11,50 – 12,51	100 * (30)

* As bandas TIRS são adquiridas com 100 metros de resolução, mas as imagens são reprojctadas para uma resolução de 30 metros nos produtos finais.

Fonte: USGS (2016, Adaptado).

Os sistemas sensores imageadores tem suas características expressas por quatro propriedades de resolução: espectral, espacial, radiométrica e temporal. A resolução espectral trata da diferença de comportamento espectral entre os alvos na superfície terrestre, referindo-se à largura da faixa espectral em que o sensor opera. A resolução espacial trata da menor área que um sensor pode imagear tendo a habilidade de diferenciar alvos entre si. A resolução radiométrica é a sensibilidade do detector em poder diferenciar, numa área imageada, alvos que apresentam pequenas diferenças da radiação refletida e está relacionada à resolução espacial. Assim, a resolução temporal, também se relaciona à resolução espacial do sensor, uma vez que um sensor com alta resolução espacial possui uma faixa de

imageamento menor do que um sensor com média ou baixa resolução espacial (MOREIRA, 2011).

Com o avanço do sensoriamento remoto, diversos satélites passaram a orbitar a Terra, com sensores capazes de obter informações espectrais de diversos alvos na superfície, em várias bandas do espectro eletromagnético, como por exemplo, os sensores TM e OLI do projeto Landsat. Com isso, foram criados os índices de vegetação, com o intuito de realçar o comportamento espectral da vegetação em comparação com o solo e outros alvos na superfície. Existem diversos índices de vegetação: *Ration Vegetation Index* (RVI); *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI), *Perpendicular Vegetation Index* (PVI) e outros. Porém, os índices mais utilizados são: Razão Simples (RVI) e o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) (MOREIRA, 2011).

O Índice de Vegetação da Diferença normalizada (NDVI), proposto por Rouse et al. (1973), permite realizar análises sobre a cobertura vegetal em uma região a partir do processamento de informações provenientes das imagens de satélite, especificamente das bandas Vermelho (R) e Infravermelho Próximo (NIR).

A banda R apresenta uma refletância na região do visível, e há alta absorção da energia do sol, devido à clorofila da vegetação, ocasionando assim uma baixa refletância; enquanto que a banda NIR apresenta uma refletância próxima do espectro eletromagnético, em que a absorção da luz solar é baixa, resultando numa alta refletância. Desta forma, a combinação destas duas bandas evidencia as áreas de vegetação nas imagens de satélite, proporcionando a possibilidade de análises.

Assim, o NDVI é a razão entre as diferenças dos valores de refletividade das bandas R e NIR e a soma dessas refletividades, conforme a equação proposta por Rouse et al. (1973):

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (1)$$

Os valores do NDVI variam no intervalo de -1 a 1, e indicam a proporção e condição da vegetação; em que valores próximos a 1 indicam vegetações mais saudáveis, e valores próximos a -1 indicam vegetação sob estresse. Importante salientar que BORATTO e GOMIDE (2013) observaram que em superfícies com nuvens ou a presença de água, a variação do NDVI é sempre menor que 0.

Atualmente, existem diversos satélites de sensoriamento em funcionamento, tais como: Landsat, Spot, CBERS, Ikonos, Quickbird e NOAA. Os satélites NOAA são satélites meteorológicos, mas que também são utilizados em estudos dos recursos terrestres. Os outros satélites citados são designados ao monitoramento e levantamento dos recursos naturais terrestres.

O Projeto Landsat é uma iniciativa em conjunto do serviço geológico americano (*United States Geological Survey* – USGS) e a agência espacial americana (*National Aeronautics and Space Administration* – NASA) e envolveu o lançamento de 8 satélites. Os três primeiros satélites foram lançados entre os anos de 1972 e 1978; os satélites 4 e 5 foram lançados em 1982 e 1984, respectivamente; o sexto satélite não conseguiu atingir a órbita terrestre durante seu lançamento, e assim, em 1999 foi lançado o satélite Landsat 7.

O satélite Landsat-8 possui dois sensores principais: o OLI (*Operational Land Imager*) e o TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). Esses sensores a bordo do satélite Landsat-8 possuem faixa de imageamento de 170 km norte-sul por 185 km leste-oeste, resolução temporal de aproximadamente 16 dias, resolução espacial de 30m para as bandas do visível, 15m para banda pancromática e 100m para as bandas termais (TIRS), sendo estas últimas reprojetaadas para a resolução de 30 m.

O satélite Quickbird foi um satélite de alta resolução, lançado em 2001 e que deixou de transmitir em 2015. Possuía uma resolução de 0,61 m para imagens em preto e branco e 2,44 m para imagens multiespectrais coloridas.

4 METODOLOGIA

Na Figura 2, pode-se observar um fluxograma para as etapas de realização desse trabalho.



Figura 2 - Fluxograma com as etapas do processo do modelo.

Fonte: Autor.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Parque Municipal da Serra de São Domingos (PMSSD) encontra-se localizado no município de Poços de Caldas, na região sul do estado de Minas Gerais, ocupando uma área de aproximadamente 367,60 ha, sendo 74,36% ocupado por mata atlântica; 13,26% por vegetação campestre; 6,09% por áreas de pastagem; 1,04% de solo exposto; 1,24% por áreas de culturas, principalmente café; 0,46% por áreas urbanizadas e 0,23% por

minerações inativas de bauxita, além de apresentar elevação de 1.200 a 1640 metros (CIPRIANI et al., 2011).

Em 2014, contudo, foi proposto pelo Instituto Estadual de Patrimônio Histórico e Artístico (IEPHA) um aumento da área do Parque, englobando a área já existente, tombada pela Lei Municipal nº 4.197 de 1988, e a área adjacente à Serra, que possui características semelhantes à área do Parque, porém com um maior envolvimento antropogênico, visto que também faria parte do novo limite uma área que é dedicada a chácaras e sítios (PMPC, 2014).

Devido à altitude média entre 1.200 e 1.700 metros, a vegetação observada na área ocupada pela Serra de São Domingos, em sua base e meio, é de porte arbóreo, com grande importância para os serviços ambientais, como o fornecimento de água, e a conservação da biodiversidade. Enquanto a parte superior da Serra, sujeita à uma maior intensidade de radiação solar e ação de correntes de vento com altas velocidades, é ocupada por vegetação campestre, chamado de Campos de Altitude (COSTA, 2010).

O clima da região é classificado como Cwb, pela classificação Koppen, apresentando verões brandos e invernos secos, com precipitações médias anuais variando entre 1.300 mm e 1.750 mm, e temperatura média anual de 17° C. A Serra de São Domingos intervém no clima da região no que diz respeito às precipitações, ocorrendo chuvas orográficas, onde há o choque de massas no relevo local, e no próprio parque é possível encontrar dois tipos de microclimas, onde a vegetação de base garante um clima mais ameno, com maior umidade, a parte superior, com vegetação rasteira, possui temperaturas menores e menos úmidas (COSTA, 2010).

Devido à baixa umidade durante a estação seca, entre junho e setembro, época em que são mais comuns os eventos de incêndio na região, entre os anos de 2010 e 2015 foram registrados aproximadamente 30 casos de incêndio no Parque da Serra de São Domingos e adjacências, desde simples focos de incêndio, afetando áreas próximas a 1.000 m², até eventos maiores, com áreas afetadas de 150.000 m² (CBM, 2010-2015).

Desta forma, para este trabalho, foi considerada a área proposta pelo IEPHA em 2014, sendo uma área consideravelmente maior (aproximadamente 1210 hectares), que engloba a área da Serra de São Domingos, a fim de expandir a área de estudos atingida por incêndios.

A delimitação da área de estudo foi possível graças à disponibilização dos arquivos com o limite da área, em formato *shapefile*, provenientes da Secretaria de Meio Ambiente da Prefeitura Municipal de Poços de Caldas (PMPC, 2016). Ainda, utilizando imagens do software Google Earth Pro, foi possível realizar correções no georreferenciamento da área, utilizando ferramentas do software ArcMap. A figura 3 ilustra a área do parque e a área ampliada, considerada para este trabalho.

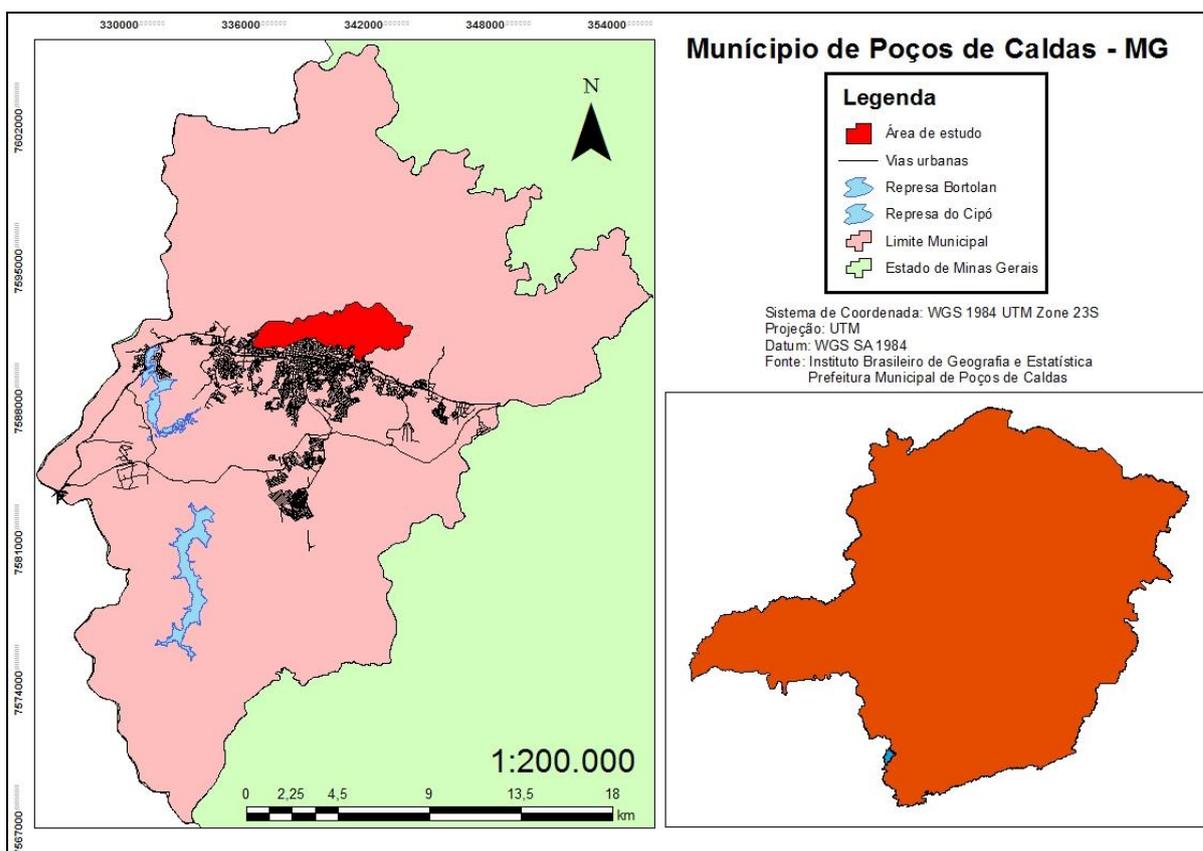


Figura 3 - Mapa do município de Poços de Caldas. Em vermelho, destaque da área de estudo.

Fonte: Autor.

4.1.1 Caracterização da vegetação

Com a definição da delimitação da área de estudo, foram realizados procedimentos de geoprocessamento, a fim de determinar dados de entrada para o modelo de propagação de incêndio.

Primeiramente, para a classificação da vegetação da área, foi utilizada uma imagem de alta resolução do satélite Quickbird, de 2009. Baseado em estudo de caracterização vegetal da área do parque (COSTA, 2010) e mapeamento de área de risco de incêndio (CIPRIANI et al., 2011), e utilizando-se de conhecimento prévio da área, foram definidas as classes em que seriam divididas a cobertura da área: floresta nativa, áreas agrícolas, vegetação arbórea e rasteira, vegetação de reflorestamento e zonas de intervenção antrópica, como construções.

Com a definição das classes de cobertura da área e a imagem em alta resolução Quickbird, foi utilizado o software ArcMap, e as ferramentas de construção de feições, para dividir a ocupação nas diferentes classes.

Além de classificar a vegetação, quantificou-se também a densidade vegetal na área na ocasião das ocorrências de incêndio. Foram utilizadas imagens do software Google Earth Pro, com datas mais recentes (2012, 2014, 2015).

Utilizando a linguagem de programação R e imagens de satélite do projeto Landsat, foram realizados os NDVIs, utilizando alguns pacotes desta linguagem de programação seguindo a metodologia descrita por MACHADO (2015), baseado no modelo de Rouse, para simular o efeito do acúmulo da vegetação durante a simulação dos incêndios.

Optou-se por utilizar as imagens dos satélites do Projeto Landsat, devido a boa resolução das imagens, facilidade em aquisição destas, e sua disponibilidade contínua desde a década de 1970. Como os boletins de ocorrência disponibilizados pelo Corpo de Bombeiros datam de 2010 a 2015, foram requisitadas todas as imagens que englobam este período de tempo.

Utilizando o pacote *raster* do R, foi possível exportar as bandas Vermelho e Infravermelha Próxima (R e NIR) e as converter em um produto matricial, em que cada elemento da matriz é um Número Digital, contendo

informações provenientes das imagens. Sabendo as coordenadas geográficas do parque, e estabelecendo uma resolução de 5 metros associaram-se as coordenadas aos números de linhas e colunas da matriz, então, utilizando o pacote *rgdal*, foi possível reprojeter as imagens, agora convertidas em matrizes, de acordo com os parâmetros desejados, a fim de extrair somente as informações pertinentes para este projeto, e exportar os NDVI em formato ASCII.

A fim de normalizar o índice, somou-se 1 a cada valor de célula NDVI, e dividiu-se o resultado por 2, para assim trabalhar com os valores de NDVI na faixa de 0 a 1, fornecendo valores de acúmulos para antes e após os eventos de incêndio, para compreender onde houve perda efetiva de vegetação.

4.1.2 Uso e ocupação do solo

Aceiros são definidos como obstáculos naturais ou não, que impedem a propagação do fogo em ocorrências de incêndio. Neste trabalho foram considerados aceiros: áreas urbanas, estradas, trilhas e corpos hídricos. Para localização desses, foram utilizadas cartas da Prefeitura Municipal de Poços de Caldas, onde estão detalhados esses elementos para o município. A seleção dos elementos que interessam a este trabalho fora obtida à partir do software ArcGIS.

Ao final das etapas de georreferenciamento e manipulação de rasters, todos esses arquivos foram exportados, tomando como limite máximo o arquivo *shapefile* da área do parque, para o formato ASCII, visto que este formato adequada os dados em formato matricial, ideal para a posterior leitura pelo modelo de propagação de incêndio.

4.1.3 Topografia

Para a obtenção do relevo da área de estudo, foi utilizado um Modelo Digital de Terreno (MDT) da região de Poços de Caldas, disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2011), baseados no modelo

SRTM e com resolução de 10 m. A partir desse MDT, foi possível extrair duas informações pertinentes: Elevação da área de estudo e declividade.

Utilizou-se a ferramenta de manipulação de arquivos *rasters* do ArcGIS para que fosse selecionada somente a área de delimitada para o estudo.

4.2 REGISTROS DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS

Com a definição da área de estudo, a vegetação que ocupa a área, topografia e aceiros, foi requerido junto ao Corpo de Bombeiros, os relatórios relacionados às ocorrências de incêndio na área, datadas de 2010 a 2015, em que foram observados dados como duração do incêndio, existência de combate às ocorrências, área queimada, localização do ponto de ignição.

Desta forma, para ajuste e teste do modelo foram selecionados alguns eventos que possuíam maior área afetada, de forma que fosse facilitada a delimitação da área afetada a partir de imagens de satélite, e melhor definição do provável ponto de ignição.

Em alguns dos incêndios estudados, a delimitação da área afetada foi realizada a partir de uma visita às áreas afetadas nos incêndios com o auxílio de um GPS. Em outros casos, partiu-se para análises termais e NDVI diferencial de imagens de satélite. Os prováveis pontos de ignição foram aqueles informados pelo Corpo de Bombeiros.

4.2.1 Ponto de ignição e área atingida

Após análise dos relatórios do corpo de bombeiros, para casos em que não havia indicação do ponto de ignição e da delimitação da área afetada, foi realizado uma análise térmica em uma imagem de satélite de um dia após um evento de incêndio, para determinar se era possível notar zonas com temperaturas maiores. Além disso também foi realizada uma análise NDVI diferencial utilizando uma imagem NDVI anterior e outra posterior à ocorrência, verificando se havia casamento das perdas vegetais indicadas por essa análise com as informações obtidas pelos relatórios dos bombeiros.

Pode-se realizar uma comparação entre NDVI utilizando o pacote *SDMTools*, para observar se houve perda ou ganho na vegetação. Sabendo as datas dos eventos de incêndio, e utilizando um NDVI de uma imagem anterior e o NDVI de uma imagem posterior aos eventos de incêndio, foi possível discernir se houve perda de vegetação após esses eventos, e verificar se a área afetada correspondia à área queimada registrada pelo Corpo de Bombeiros.

Para obter os valores de temperatura, foi necessário realizar a conversão dos números digitais, em níveis de cinza, da banda 10 do satélite Landsat-8 para radiância espectral (TOA), sem correção atmosférica, a partir da equação proposta pelo USGS (2016):

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L , \quad (2)$$

Em que:

L_{λ} é a radiância espectral (Watts/m²*sr*µm);

M_L é o fator multiplicativo de redimensionamento da banda 10 (3,3420*E⁻⁰⁴);

Q_{cal} é o valor quantizado do pixel em nível de cinza (DN);

A_L é o fator aditivo de redimensionamento da banda 10 (0,100).

O valor da radiância espectral foi convertida em temperatura a partir da equação:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (3)$$

Em que:

T é a temperatura efetiva em Kelvin (K);

L_{λ} é a radiância espectral (Watts/m²*sr*µm);

K_1 é a constante de calibração 1 (774,8853 K);

K_2 é a constante de calibração 2 (1321,0789 K) .

4.3 MODELO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO

A obtenção dos parâmetros do modelo consiste na caracterização simplificada do processo, para representação de incêndios reais. Nesse procedimento, os processos complexos que envolvem um evento de incêndio são simplificados e representados por expressões empíricas e gerais, baseando-se na física do problema (ALMEIDA, 2012).

4.3.1 Velocidade de propagação do fogo

O espaço celular foi considerado utilizando células quadradas, de dimensões iguais a $\Delta l \times \Delta l$, com valores representativos de Δl igual a 5 metros. A matriz inteira para a área de estudo foi de 604x1625. A resolução temporal do modelo, é o intervalo Δt , definindo uma iteração do modelo.

Partindo da definição de espaço e tempo do modelo, podemos obter, a partir da velocidade adimensional de propagação de fogo R_a , a velocidade real de propagação do fogo, R (m/s), que se relacionam pela fórmula:

$$R = R_a \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (4)$$

Em casos extremos, pode-se aplicar a velocidade adimensional máxima de propagação do fogo para se descobrir o intervalo Δt , assim:

$$\Delta t = \frac{\Delta l}{R_{max}} \quad (5)$$

4.3.2 Probabilidades D, B e I

A partir do banco de dados georreferenciados gerados, foi possível extrair a densidade de vegetação (D) para a área de estudo, e também cada tipo de vegetação, que influenciará nos valores de B e I.

Logo, quanto mais combustível vegetal disponível, maior será a chance de sustentar o incêndio. Assumindo então que a probabilidade B depende do tipo de vegetação, do acúmulo de vegetação e do teor de umidade dessa vegetação, então B pode ser escrito como:

$$B = B_0 * (1/\lambda_M)^{b_2} \quad (6)$$

Em que:

B_0 é a probabilidade de extinção do fogo em uma célula com determinada classe e acúmulo vegetal;

b_2 é uma constante empírica ($0 < b_2 < 1$).

A matriz com valores da probabilidade B são, então, multiplicadas pela matriz com os valores de NDVI com escala ajustada, considerando-se assim o efeito do acúmulo de vegetação nas células.

A capacidade de a vegetação inflamar e a velocidade de propagação do fogo conseqüentemente depende, segundo apontam estudos teóricos e experimentais, exponencialmente do teor de umidade do combustível vegetal (ALMEIDA, 2012). Assim, o fator λ_M é dado por:

$$\lambda_M = \exp(-b_1 * M) \quad (7)$$

Em que:

M é o teor de umidade da vegetação ($0 < M < 100\%$);

b_1 é uma constante empírica ($0 < b_1 < 1$).

Assumindo que os efeitos de topografia, velocidade e direção do vento e umidade da vegetação influenciam a probabilidade de ignição, e que são independentes, podemos assumir a probabilidade I como:

$$I = I_0 * \lambda_S * \lambda_W * \lambda_M \quad (8)$$

Em que:

I_0 é a probabilidade de ignição para uma célula com determinada classe e acúmulo vegetal, ignorando os efeitos do vento, topografia e umidade;

λ_S é o fator que adiciona o efeito da declividade sobre a propagação;

λ_W é o fator que inclui o efeito do vento.

O fator λ_S adquire a seguinte forma:

$$\lambda_S = \exp(a * \theta_s) \quad (9)$$

Em que:

a é constante empírica que ajusta o efeito da inclinação da superfície sobre a probabilidade de ignição;

θ_s é o ângulo de inclinação da superfície, calculado em função do valor de elevação ($E_{(i,j)}$) atribuído a cada célula do modelo;

O valor de θ_s é calculado de duas maneiras distintas, dependendo se as células vizinhas forem adjacentes ou diagonais:

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{E_{(i^*,j^*)} - E_{(i,j)}}{\Delta l} \right), \text{ se } (i^*,j^*) \text{ for adjacente,} \quad (10)$$

$$\theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{E_{(i^*,j^*)} - E_{(i,j)}}{\Delta l \sqrt{2}} \right), \text{ se } (i^*,j^*) \text{ for diagonal.} \quad (11)$$

O fator λ_W , que inclui os efeitos do vento sobre a propagação do fogo é calculado por:

$$\lambda_W = 1 + c_1 * f(\omega) * U^{c_2} \quad (12)$$

Em que:

U é a velocidade do vento, $f(\omega)$ é um fator que adiciona o efeito da direção do vento sobre a probabilidade de ignição, e c_1 e c_2 são constantes empíricas ($0 < c_1, c_2 < 1$).

O fator $f(\omega)$ pondera o efeito do vento sobre as oito direções possíveis de propagação do fogo, definidas pela vizinhança das células adotadas no modelo. Seus valores podem ser: 0° N, 45° NE, 90° E, 135° SE, 180° S, 225° SO, 270° O e 315° NO. O fator $f(\omega)$ é dado por:

$$f(\omega) = \exp(c_3 * U(\cos(\omega) - 1)) \quad (13)$$

Em que:

U é a velocidade do vento, ω é o ângulo entre a direção de propagação do fogo e a direção do vento e c_3 é uma constante empírica ($0 < c_3 < 1$).

Para fixação dos valores de B_0 e I_0 , assumiu-se que a propagação dos incêndios se daria no regime dendrítico ($0 < S < 1$). Dessa forma, de acordo com a Figura 1, pode-se fixar os valores de $B_{0\text{máx}}$ como 0,80 e $B_{0\text{min}}$ como 0,20. Definida a faixa de valores para B_0 , e estabelecendo a velocidade adimensional de propagação de incêndio em diferentes coberturas vegetais utilizando-se os dados dos incêndios ocorridos, pode-se, a partir da relação estabelecida na Figura 1, estimar valores de I_0 .

4.3.3 Definição das constantes empíricas

Definidos os valores de I_0 e B_0 para as classes de vegetação, é necessário determinar os valores das constantes empíricas do modelo.

Para isso, é necessário que o modelo tenha a capacidade de reproduzir um incêndio real, o mais similar possível, dadas as condições em que esse ocorreu. Assim, é necessário encontrar uma solução ótima X , dentro de um espaço de busca de soluções candidatas, dentro do conjunto valores possíveis das constantes empíricas $X = (a, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3)$.

Segundo Almeida (2012), a escolha da solução ótima dá-se a partir de um comparativo que diz o quão adequado é a solução encontrada. Para isso, é feito uma comparação de área afetada, dos incêndios real e simulado. Sendo que a comparação é medida pela seguinte função:

$$f_A(x) = 1 - \frac{A(A_R \cap A_S)}{A(A_R \cup A_S)} \quad (14)$$

Onde o termo numerador ($A(A_R \cap A_S)$) e o termo denominador ($A(A_R \cup A_S)$) são, respectivamente, as áreas da intersecção e da união entre as áreas dos incêndios real (A_R) e o simulado (A_S). Se o incêndio simulado reproduz perfeitamente a área do incêndio real, então a função é igual a 0, enquanto qualquer outro resultado, temos que $0 < f(x) < 1$. Dessa forma, o interesse final do ajuste das constantes é minimizar a função $f(x)$.

Utilizou-se um algoritmo de vagalumes (YANG, 2008), baseado em meta-heurística, para a otimização das constantes empíricas. A ideia principal deste algoritmo é que emissões luminosas de um vagalume age como atração para outros vagalumes de seu enxame. De maneira geral, o algoritmo se baseia no comportamento de vagalumes (possíveis soluções) dentro de um espaço de busca, onde cada vagalume ocupa uma posição neste espaço. Três regras demarcam o funcionamento do algoritmo: os vagalumes se movimentam no espaço de busca orientados por um mecanismo de atração; essa atração é proporcional à luminosidade emitida pelos vagalumes e diminui em relação à distância entre eles; a intensidade da luminosidade emitida por um vagalume é quantificada pela consideração da sua posição em relação à função (quanto melhor considerada, maior brilho emitido).

Dessa maneira, um vagalume i estabelece uma solução candidata para o problema, $x_i^t = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_i(d))$, inserida em um espaço de busca S de dimensão d , onde $S \subset \mathbb{R}^d$, e desloca-se em seu interior em passos discretos de tempo t . A formulação do algoritmo é definido por duas propriedades: Como ocorre a variação de luz constatada pelos vagalumes menos brilhantes e como ocorre a atração entre os vagalumes.

Ao longo do espaço de busca, a intensidade de luz percebida por um vagalume i (menos brilhante e a ser atraído) que é emitida por um vagalume j (mais brilhante), diminui em função da distância entre esses vagalumes. Um fator de atratividade β é idealizado como:

$$\beta(r_{i,j}) = \beta_0 e^{-\gamma r_{i,j}^m} \quad (15)$$

Em que $r_{i,j}$ é a distância (geralmente utiliza-se a distância euclidiana) entre os vagalumes, β_0 é um parâmetro que estima a atratividade para uma distância $r_{i,j} = 0$, γ é o parâmetro de absorvidade, que avalia a absorção da luz pelo meio, e m é um parâmetro que controla a influência da distância sobre a atratividade ($m = 2$, para a distância euclidiana) (ALMEIDA, 2012).

O movimento do vagalume i em direção ao vagalume j é definido por:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta(r_{i,j}) * (x_j^t - x_i^t) + \alpha \epsilon_i \quad (16)$$

Onde o segundo termo (equação 15) do lado direito da equação 16 representa a atratividade e o terceiro termo ($\alpha \epsilon_i$) representa a aleatoriedade, onde α é um parâmetro de aleatoriedade, e ϵ_i é um vetor d -dimensional de números aleatórios. Assumindo $\beta_0 = 1$, pode-se afirmar que a atratividade é máxima a uma distância nula. Dessa forma, o desempenho do algoritmo fica condicionada às determinações dos parâmetros γ e α . O parâmetro γ designa o decrescimento da atratividade no espaço de busca, enquanto o parâmetro α designa a aleatoriedade do movimento do vagalume. O parâmetro α assume um valor inicial α_i e decresce ao longo das iterações do algoritmo, até um valor final α_f (YANG, 2010), conforme a equação 17 abaixo:

$$\alpha_{t+1} = \alpha_t \left(\frac{\alpha_f}{\alpha_i} \right)^{1/(N_{iter}-1)} \quad (17)$$

Onde $\alpha_{t=1} = \alpha_i$ e $t = 2, 3, \dots, N_{iter}$.

Durante a execução do algoritmo, cada vagalume possui uma posição no espaço, representando uma solução possível para as constantes, e o seu brilho, é proporcional à avaliação da solução referente à função $f(x)$. Em cada iteração do algoritmo, é atribuída novas posições para os vagalumes e o brilho é recalculado, ao decorrer das iterações, os vagalumes se amontoam em função das soluções ótimas encontradas

Para a otimização das constantes, utilizou-se um incêndio mapeado da área de interesse, com suas respectivas características meteorológicas, e atribuindo valores aleatórios a cada uma das constantes a serem encontradas, baseando-se em faixas de valores apresentadas por Almeida (2012) e definidos em outras literaturas:

Quadro 2 – Valores para os limites do espaço de busca para soluções das constantes empíricas.

Constante empírica	Limite inferior	Limite superior	Referência
a	0,040	0,080	(MCARTHUR, 1966; NOBLE et al., 1980)
b1	0,000	1,000	Definido hipoteticamente
b2	0,001	0,200	(CHENEY et al., 1998)
c1	0,000	1,000	Definido hipoteticamente
c2	0,800	1,200	(SULLIVAN, 2009)
c3	0,100	0,300	(ALEXANDRIDIS et al., 2008)

Fonte: ALMEIDA (2012, p. 91).

Com isso, foi definido que seriam realizadas 10 tentativas do algoritmo, utilizando um número de 20 vagalumes, e a cada número de tentativas, seriam feitas 10 simulações, afim de obter um valor médio para a função $f(x)$. Essas simulações são efetuadas pois se tratando de um método probabilístico, cada simulação resultaria em valores ligeiramente diferentes. Ao fim das 10 simulações para cada número de tentativa, seriam feitas 10 interações, para ajustar o conjunto de parâmetros dos vagalumes de forma a se aproximarem do melhor resultado parcial. Dessa forma, ao final de 10 interações, eram obtidos valores ótimos para cada constante, e se iniciava um novo ciclo, afim de sempre otimizar a função $f(x)$.

5 RESULTADOS

5.1 DETERMINAÇÃO DE ÁREAS INCENDIADAS

Entre os anos de 2010 e 2015, foram registradas trinta ocorrências de incêndios na área, entre esses, seis eventos não especificaram a vegetação em que ocorreram, enquanto do restante, cinco eventos foram registrados como ocorrendo na mata nativa, e o restante nas áreas de vegetação rasteira. As áreas atingidas variam desde 0,1 ha até 15 ha.

Analisando os boletins de ocorrência de incêndios disponibilizados pelo Corpo de Bombeiros, foi possível selecionar alguns eventos com potencial de simulação. O quadro 3 apresenta os eventos que apresentaram melhores características como maior área atingida e informações mais detalhadas do ponto de ignição.

Infelizmente, os relatórios de ocorrência de incêndios não contavam com coordenadas geográficas dos possíveis pontos de ignição, sendo que para esses eram feitas observações gerais apenas, explicando onde possivelmente iniciaram-se os eventos.

Quadro 3 – Resumo de Relatórios de Evento do Corpo de Bombeiros Militar

REDS ⁽¹⁾	Data	Horário do ocorrido	Localização da ocorrência	Local aproximado da ignição	Alvo do evento	Duração do combate (h)	Área queimada (m ²)
2010-0009922 38-001	31/08/2010	12:00	Zona rural	Vegetação rasteira	Área de proteção ambiental - APA	05:00	100000
2012-0016112 23-001	06/08/2012	16:29	Perímetro urbano	Fogo em pastagem alastrando para mata nativa	Campo / pasto	01:20	150000
2013-0179450 83-001	31/08/2013	11:00	Perímetro urbano	Incêndio interior da mata se alastrando para o campo	Mata / floresta	Não há dados	50000
2014-0170349 10-001	06/08/2014	11:45	Perímetro urbano	Incêndio em mata de vegetação mista	Ignorado	Não há dados	60000
2015-0205676 87-001	24/09/2015	13:20	Zona rural	Incêndio no campo e na mata possível início na trilha do lado posterior a serra	Ignorado	05:00	30000

Fonte: autor.

(1) Relatório de Evento de Defesa Civil

Os dois eventos escolhidos para potencial ajuste do modelo foram os eventos ocorridos em 18 e 24 de setembro de 2017, e utilizou-se o evento de 31 de agosto de 2013 para simulações.

5.1.1 Incêndios ocorridos em 2017

Após os eventos de setembro de 2017, foi possível verificar as áreas afetadas *in loco*, e com o auxílio de um GPS, foi possível determinar as áreas afetadas e seus possíveis pontos de ignição. As áreas afetadas por ambos os incêndios podem ser vistas nas figuras 4 e 5 abaixo.



Figura 4 - Área afetada por incêndio. Data: 18/09/2017.

Fonte: Autor.

O incêndio do dia 18 iniciou-se num ponto próximo à estrada que dá acesso à estátua do Cristo Redentor, alastrando-se pela área de vegetação rasteira até ao ponto conhecido como “trilha do cristo”, durando, aproximadamente, três dias e afetando uma área de 18,9 ha.



Figura 5 - Área afetada por incêndio. Data: 24/09/2017.

Fonte: Autor.

O incêndio do dia 24 tem dois possíveis pontos de ignição: um próximo à rampa de voo livre existente na área ou num local conhecido como “trilha do mountain bike”. Essa ocorrência durou por apenas algumas horas e atingiu uma área de 18,7 ha.

5.1.2 Incêndio ocorrido em 2013

O evento de 31 de agosto de 2013 possui uma imagem de satélite do dia seguinte à ocorrência, 1º de setembro de 2013, o que possibilitou realizar uma análise térmica a fim de determinar o possível ponto de ignição, e averiguar se a área atingida corresponde àquela relatada no boletim do Corpo de Bombeiros.

Primeiro, foi realizado um NDVI diferencial entre um NDVI posterior ao evento, feito a partir das imagens do dia 01/09/2013 e um NDVI anterior ao evento, feito a partir das imagens do dia 15/07/2013, podendo ser visualizado na figura 6.

A escolha do NDVI anterior ao evento se deu pelo fato de que eram as imagens que não contavam com cobertura de nuvens, fazendo com que

houvesse um espaço de tempo de 45 dias, mas onde não houve registros de ocorrências de incêndios neste período, a não ser a ocorrência do dia 31 de agosto. Este NDVI diferencial tem como intuito compreender se houve perda de vegetação causada pelo incêndio, e se essa informação é compatível com o relatório do Corpo de Bombeiros. Analisando visualmente a Figura 6, em vermelho têm-se as áreas com perda de vegetação entre as datas utilizadas. Nota-se perda em muitas outras áreas além daquela indicada no relatório do Corpo de Bombeiros como sendo a área atingida pelo incêndio. Assim, o uso do NDVI diferencial não se mostra uma boa ferramenta para mapeamento de uma área afetada por um incêndio. Talvez, utilizando-se imagens de um dia subsequente ao término do incêndio, quando a imagem existir e não contiver muitas nuvens, o NDVI diferencial possa ser usado para esse fim.

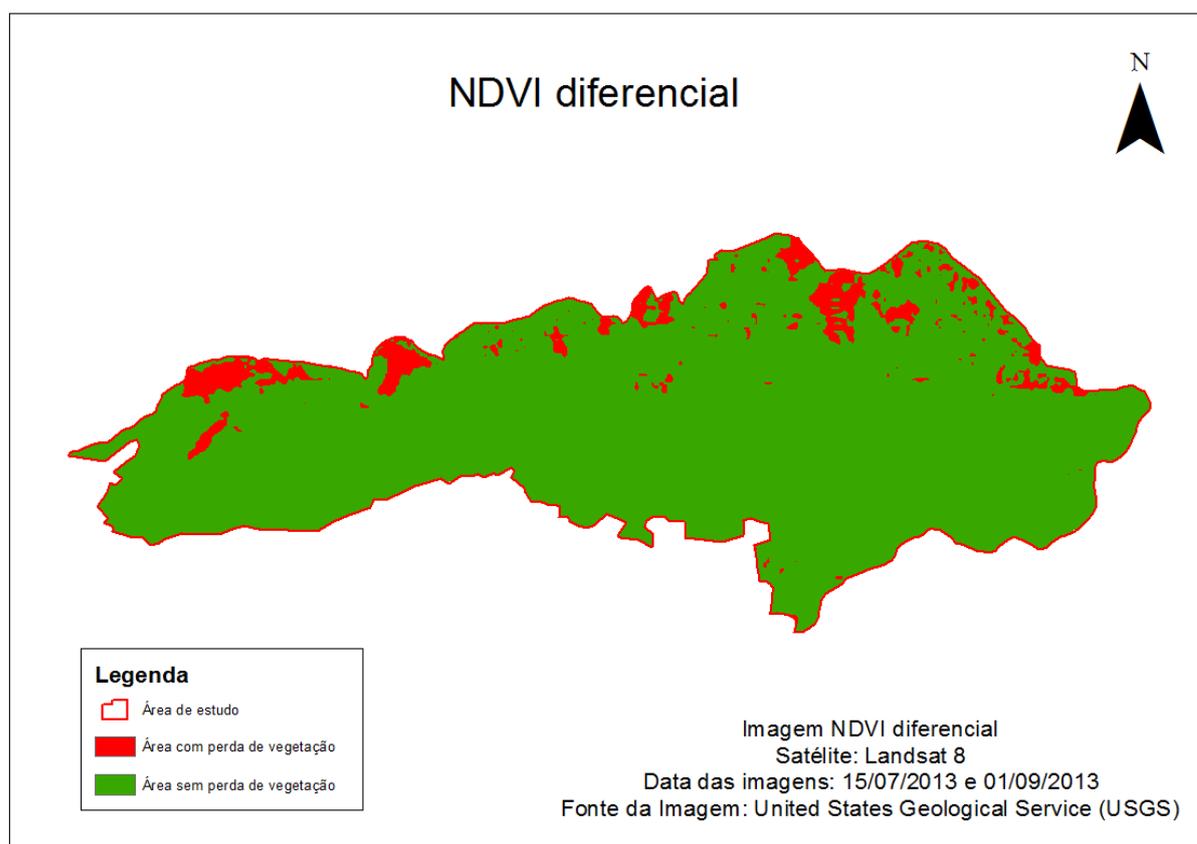


Figura 6 - NDVI diferencial entre as imagens da área de estudo nos dias 15/07/2013 e 01/09/2013 e compreendendo o incêndio de 31 de agosto de 2013.

Fonte: Autor.

A análise térmica seguiu o modelo proposto pelo USGS, que converte os valores de radiância espectral em reflectância, podendo assim calcular o valor da temperatura na atmosfera.

Para a análise térmica foi determinante a utilização de uma imagem de satélite de apenas 1 dias após o evento de incêndio, uma vez que testes mostraram que imagens de alguns dias após o evento perdem sua capacidade de apresentar valores significativos de temperatura de atmosfera, pois existe a tendência de estabilização da temperatura, como mostrado por Benali et al. (2016), onde após 72 horas entre a ocorrência de um incêndio e o seu registro pelas imagens de satélite, muito da informação se perde.

A figura 7 ilustra a análise térmica de uma imagem do dia 01 de setembro de 2013, um dia após à ocorrência de incêndio de 31 de agosto de 2013.

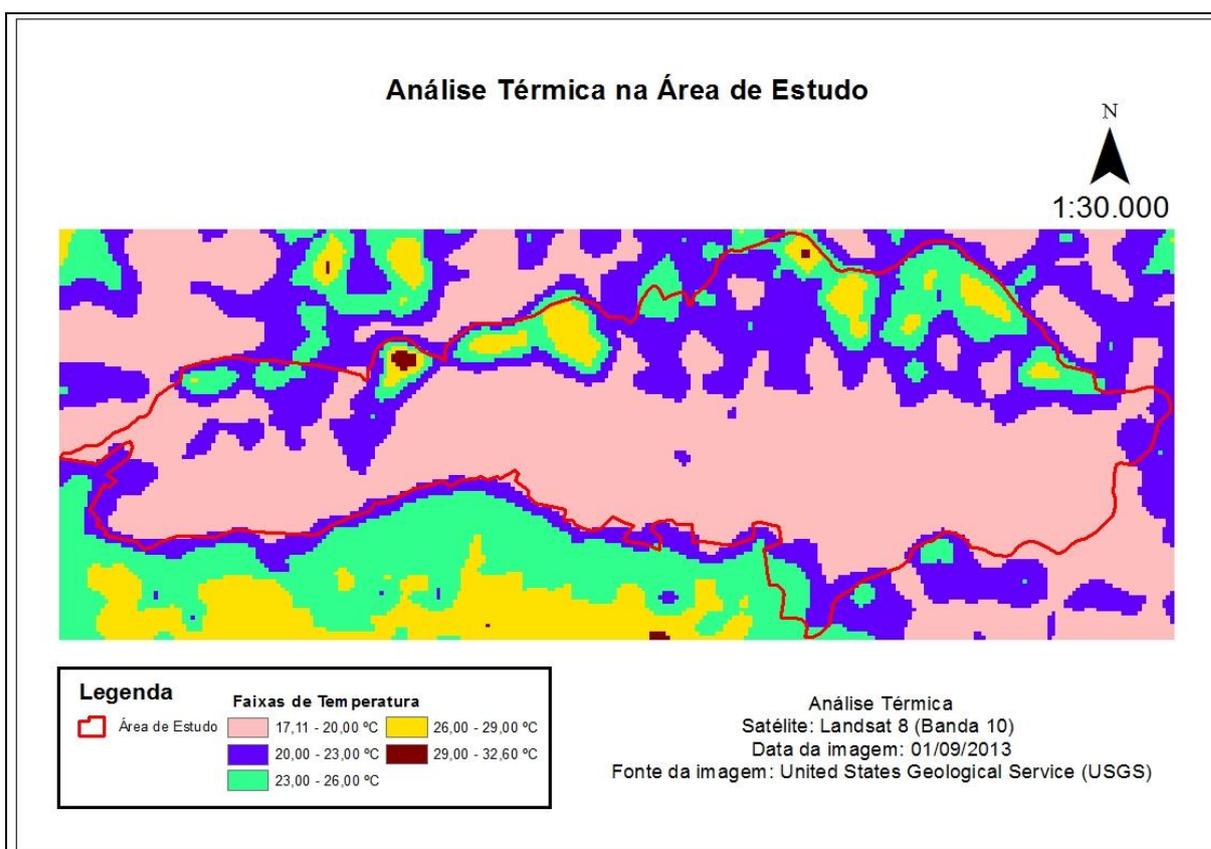


Figura 7 - Análise térmica da área de estudo no dia 01/09/2013.

Fonte: Autor.

A área considerada como sendo o incêndio ocorrido em 31 de agosto, é a área de maior temperatura, e que corresponde à área apresentada pelo NDVI diferencial da figura 6. A área afetada por esse incêndio foi calculada, utilizando o programa ArcGIS, como sendo de 4,7 ha, o que corresponde à área afetada reportada pelo Corpo de Bombeiros, que foi de 5 ha. A análise térmica da imagem de satélite não permitiu estabelecer o ponto de ignição para esse incêndio, o que fez com que alguns pontos fossem testados durante as simulações, afim de tentar encontrar o ponto mais provável.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

5.2.1 Caracterização da vegetação

A partir da caracterização da vegetação da área, utilizando imagens de alta resolução do satélite QuickBird, foi possível elaborar um mapa de cobertura da área de estudo, conforme ilustra a figura 8, em que: 1 – Mata nativa; 2 – Plantações; 3 – Vegetação arbórea/rasteira; 4 – Área de reflorestamento; 5 – Áreas urbanizadas.

Após a conclusão dos NDVI, notou-se que as imagens que apresentavam nuvens sobre a área de estudo retornaram valores errôneos, que não condiziam com a situação da vegetação da área de estudo no momento em que a imagem foi capturada, partindo assim para a seleção desses arquivos e descarte de seus resultados.

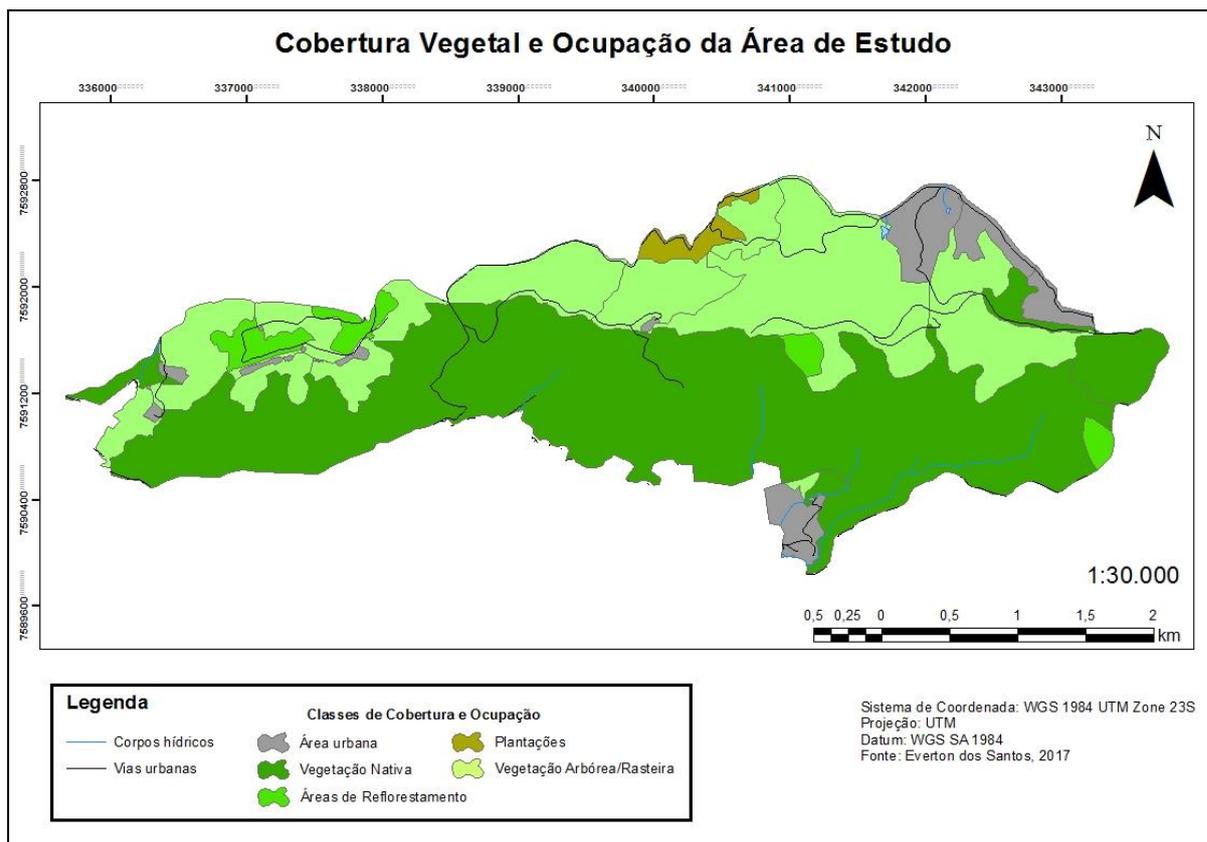


Figura 8 - Mapa de Cobertura Vegetal e Ocupação da Área de Estudo.

Fonte: Autor.

É possível notar que a classe Mata nativa ocupa a maior parte da área de estudo (55%), entretanto, é onde menos ocorre incêndios. Por outro lado, a classe de vegetação rasteira, que ocupa 34% da área, é a vegetação onde ocorre a maioria dos incêndios. A área de reflorestamento ocupa 3%, enquanto as áreas urbanas e plantações ocupam, respectivamente, 6% e 1%.

A figura 9 abaixo mostra um exemplo de imagem NDVI para a área de estudo, a escala representa os valores encontrados para o NDVI exemplificado, que varia entre 0,00 e 0,58, numa escala total de -1 a 1.

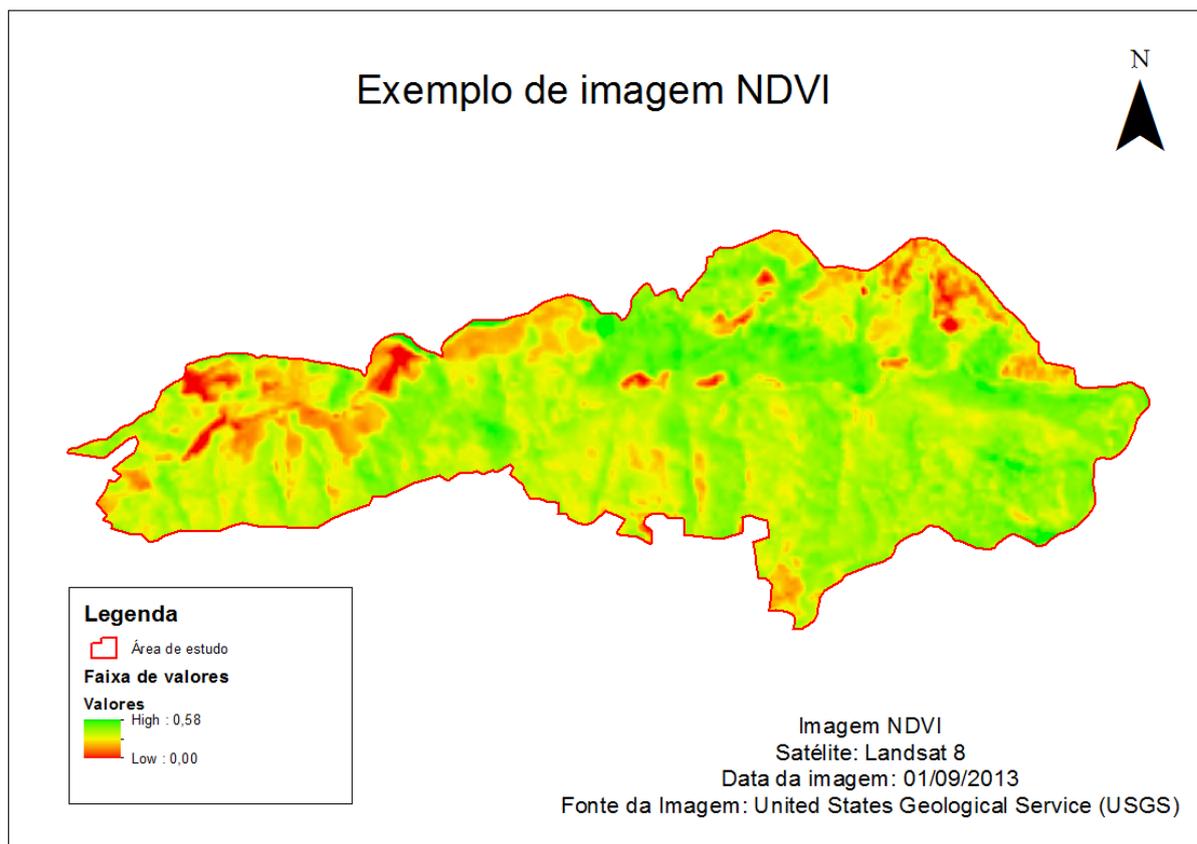


Figura 9 - Exemplo de NDVI abrangendo a área de estudo.

Fonte: Autor.

5.2.2 Uso e ocupação do solo

A partir do banco de dados da Prefeitura Municipal de Poços de Caldas, foi possível extrair os aceiros presentes na área de estudo, como as estradas e os corpos hídricos, e elaborar um mapa com essas informações, conforme a figura 10.

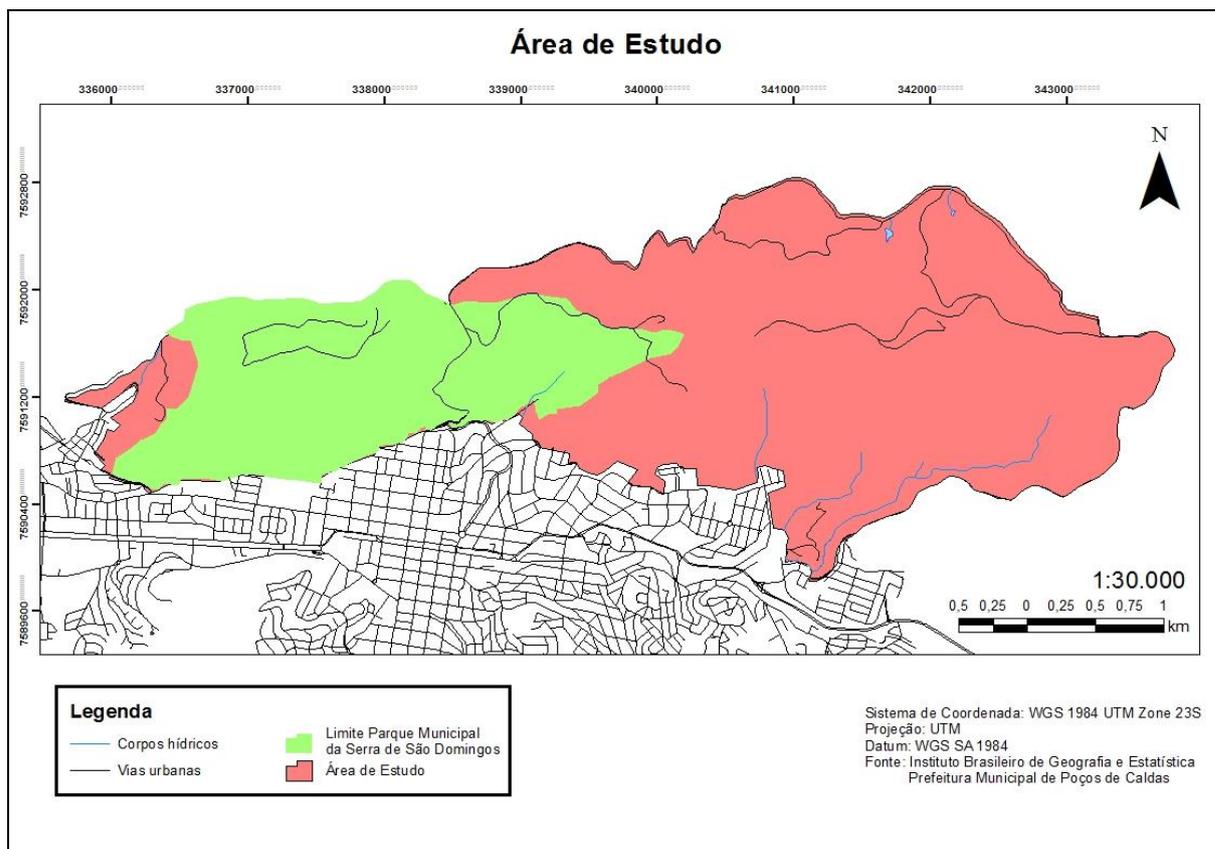


Figura 10 - Aceiros na área de estudo.

Fonte: Autor.

5.2.3 Topografia

A partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) disponibilizado no banco de dados do INPE, foi possível recortar apenas a área de interesse, e obter um mapa de elevação do terreno (Figura 11) e um mapa de declividade (Figura 12), a partir das classificações propostas pelo EMBRAPA, para a área de estudo.

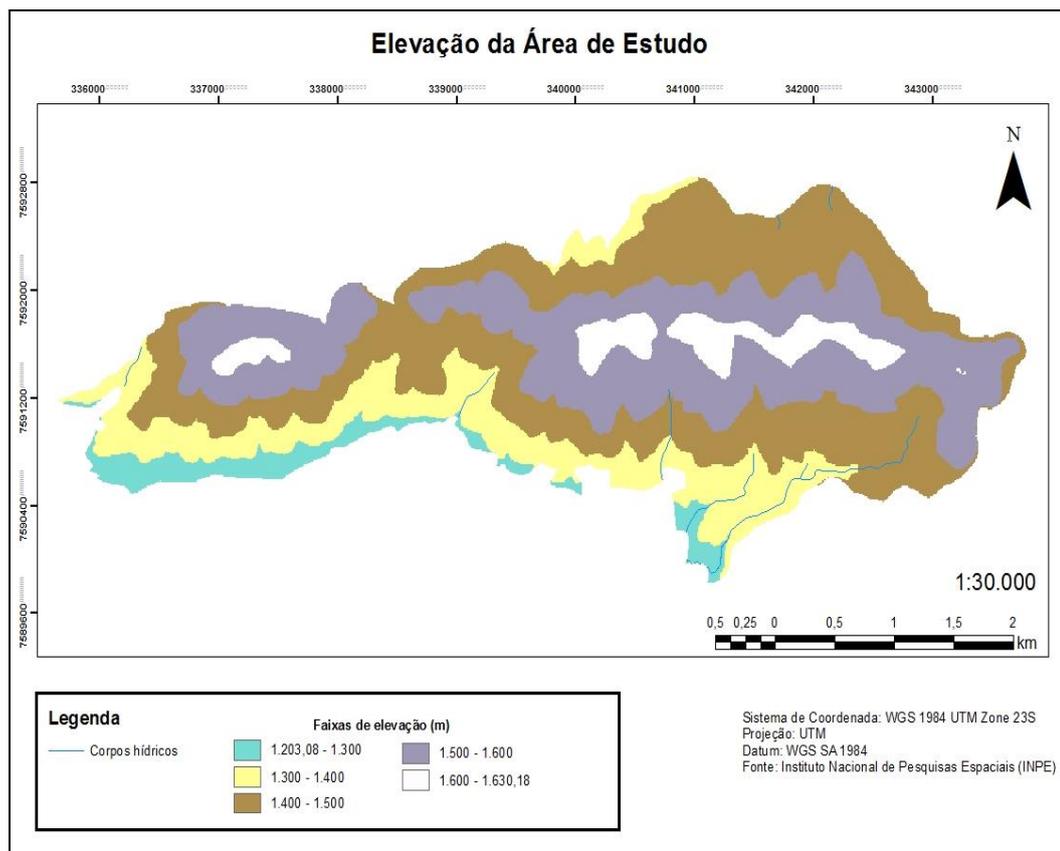


Figura 11 - Mapa de elevação da área de estudo.

Fonte: Autor.

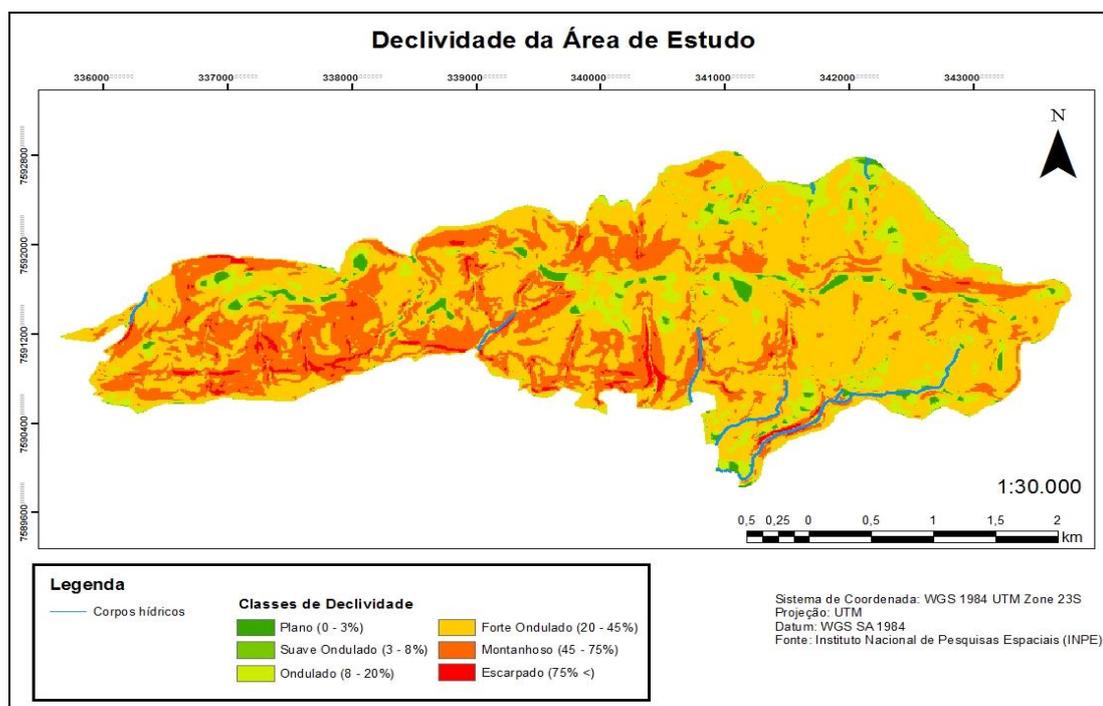


Figura 12 - Mapa de declividade da área de estudo.

Fonte: Autor.

5.3 AJUSTE DO MODELO

Analisando os relatórios de incêndios fornecidos pelo Corpo de Bombeiros, pode-se analisar a relação das áreas afetadas por tempo de duração dos incêndios, para compreensão das velocidades de propagação em diferentes tipos de vegetação.

No período analisado (2010-2015), ocorreram o dobro de incêndios em vegetação rasteira em relação à mata nativa e área de reflorestamento.

De acordo com a análise dos relatórios, pode-se atribuir que a velocidade de propagação média para a vegetação rasteira, a mata nativa e a área de reflorestamento seriam de, respectivamente: 42,7 m²/min, 8,3 m²/min e 30 m²/min.

Assim, analisando a velocidade de propagação dos incêndios para a vegetação rasteira, pode-se assumir que a velocidade de propagação de incêndio na área de reflorestamento é de 70% da velocidade de propagação na vegetação rasteira, enquanto que a velocidade de propagação na mata nativa é de 20%. Assumindo que a mata nativa teria B_0 igual 0,8 (máximo) e que a vegetação rasteira tem B_0 igual a 0,2 (mínimo), de acordo com o gráfico da Figura 1, pode-se encontrar os valores de I_0 a partir de B_0 e da velocidade de propagação.

Dessa forma, pode-se atribuir à vegetação rasteira os valores de velocidade máxima de propagação, e conseqüentemente, I_0 máximo, de 0,325 e B_0 mínimo, de 0,2. De acordo com os relatórios, ocorrem 3 vezes mais incêndios na vegetação rasteira do que nas áreas de reflorestamento, definiu-se assim I_0 da área de reflorestamento como sendo a terceira parte de I_0 da vegetação rasteira, logo, 0,1. Com a velocidade e I_0 , foi possível determinar B_0 como sendo 0,4, para o regime de propagação dendrítico. Partindo do mesmo princípio, para a Mata Nativa, o valor de B_0 foi fixado em 0,8, e assumindo 20% da velocidade de propagação da vegetação rasteira, chegou-se ao valor de I_0 de 0,05.

Assim, os valores determinados de B_0 e I_0 para as classes de vegetação foram:

Quadro 4 – Valores escolhidos para as probabilidades I_0 e B_0 para as classes de vegetação utilizadas.

	Mata Nativa	Veg. Rasteira	Reflorestamento
I_0	0,05	0,325	0,10
B_0	0,80	0,20	0,40

Fonte: Autor

5.3.1 Constantes empíricas

Os valores encontrados durante a execução do algoritmo de ajuste do modelo levaram em consideração um incêndio com área afetada, condições meteorológicas e ponto de ignição conhecidos, de forma a otimizar os parâmetros do modelo para que a simulação represente o melhor possível o incêndio real.

O incêndio utilizado para a otimização das constantes empíricas, iniciou-se no dia 18 de setembro de 2017 à noite. O ponto de ignição desse evento foi identificado pelo Corpo de Bombeiros em um ponto da estrada que dá acesso à Serra de São Domingos, alastrando-se pela vegetação rasteira até alcançar uma trilha conhecida na região como “trilha do cristo”.

A trilha funcionou como aceiro natural, impedindo que o fogo se alastrasse para outras áreas da Serra, e não se propagou ao se aproximar do limite entre a vegetação rasteira e a mata nativa. Com o auxílio de um GPS, foi possível estimar a área afetada, que foi de aproximadamente 18,9 ha.1

Quadro 5 – Condições meteorológicas durante a ocorrência de incêndio iniciada em 18/09/2017.

Data	Umidade (%) Máx - Mín - Média	Velocidade do vento (km/h) Máx - Média	Direção do vento
18/09/2017	60 - 24 - 41	10,0 - 4,0	NE
19/09/2017	55 - 19 - 38	9,0 - 4,0	ESE
20/09/2017	47 - 32 - 42	12,0 - 6,0	E

Fonte: Autor.

Para a otimização das constantes empíricas, foi considerado a umidade média, velocidade média e direção do vento para o dia 18 de setembro, dia do início do incêndio.

Para o processo de otimização, foi utilizado um computador com um processador Core I3 de 3,1 GHz e 4GB de memória RAM, e o processo inteiro levou aproximadamente 25 dias.

Ao fim do algoritmo de otimização, as seguintes constantes foram encontradas:

Quadro 6 – Valores estimados das constantes durante o ajuste

Constante empírica	Valor
a	0,0645
b ₁	0,0783
b ₂	0,0233
c ₁	0,1617
c ₂	0,8304
c ₃	0,1303

Fonte: Autor.

Estes valores, quando comparados com os valores encontrados por Almeida (2012) no Quadro 7, demonstram certas similaridades e algumas disparidades.

Quadro 7 – Valores estimados das constantes empíricas do modelo durante o ajuste.

Constante empírica	Valor estimado
a	0,0645 ± 0,0103
b ₁	0,3140 ± 0,0094
b ₂	0,0061 ± 0,0015
c ₁	0,1852 ± 0,0191
c ₂	1,0159 ± 0,0881
c ₃	0,2102 ± 0,0271

Fonte: Almeida (2012, p. 92).

Vale ressaltar que o ajuste utilizado por Almeida (2012) foi realizado utilizando-se um número muito maior de simulações, interações e repetições. Entretanto é possível notar algumas similaridades na grandeza dos valores obtidos em sua tese quanto nesse projeto. Os valores das constantes a , c_1 , c_2 e c_3 , apresentam valores relativamente próximos. Já os valores encontrados para as constantes b_1 e b_2 estão fora da faixa encontrada por Almeida (2012). Para esse ajuste, a correspondência entre as áreas incendiadas real e simulada foi de 55%. Como discutiremos a seguir, acredita-se que essa baixa correspondência deve-se, entre outros fatores, à falta de ajuste dos parâmetros b_1 e b_2 .

Uma vez que as constantes b_1 e b_2 influenciam diretamente na probabilidade de sustentabilidade da propagação do fogo (B), é de vital importância que as informações relacionadas à umidade sejam obtidas o mais próximo possível da área de estudo em questão. Há influência da altitude e dos ventos na área de estudo, que reduzem consideravelmente a umidade no local.

5.4 SIMULAÇÕES

Com a obtenção das constantes empíricas e a determinação anterior dos parâmetros I_0 e B_0 para cada tipo de vegetação, foram realizadas algumas simulações para dois eventos de incêndios: 18/09/2017 e 24/09/2017. Alguns dados de entrada foram avaliados durante essas simulações: Simulações com umidade e velocidade do vento média para os dois eventos; Simulações com umidade mínima e velocidade do vento máxima para os dois eventos; Simulações com direção do vento alterado para a ocorrência do dia 18 de setembro, utilizando dados meteorológicos do dia 19 de setembro; Variação nos pontos de ignição para o evento do dia 24 de setembro. Foram realizadas dez repetições para cada condição de simulação proposto, a fim de verificar as condições de representatividade do modelo proposto, obtidos a partir de comparações entre as áreas, conforme equação 14.

Quadro 8 – Quadro resumo das simulações realizadas.

Simulação 1	Incêndio 18/09/2017 Umidade média – 41% Velocidade média e direção do vento – 4,0 km/h - NE
Simulação 2	Incêndio 18/09/2017 Umidade mínima – 24% Velocidade máxima e direção do vento – 10,0 km/h - NE
Simulação 3	Incêndio 18/09/2017 Umidade média – 38% Velocidade média e direção do vento – 4,0 km/h - ESE
Simulação 4	Incêndio 18/09/2017 Umidade mínima – 19% Velocidade máxima e direção do vento – 9,0 km/h - ESE
Simulação 5	Incêndio 24/09/2017 Umidade média – 44% Velocidade média e direção do vento – 4,0 km/h - NE
Simulação 6	Incêndio 24/09/2017 Umidade mínima – 28% Velocidade máxima e direção do vento – 16,0 km/h - NE
Simulação 7	Incêndio 24/09/2017 Umidade mínima – 28% Velocidade máxima e direção do vento – 16,0 km/h - NE

Fonte: Autor.

A diferença entre as simulações 5, 6 e 7 foram os pontos de ignição adotados para o incêndio e a utilização dos valores médio para umidade e velocidade do vento (simulação 5) e valor mínimo para umidade e máximo para velocidade do vento (simulações 6 e 7). Houve uma discordância de informações acerca da exatidão do ponto de ignição para esse incêndio, então dois pontos de ignição foram testados (ponto 1 para a simulação 5 e 6; ponto 2 para a simulação 7), baseados nas informações recebidas pelo Corpo de Bombeiros. Um dos pontos de ignição testado era mais próximo à rampa de voo livre existente na área, a outra era mais à esquerda da rampa, como pode ser visto na figura 5.

Ao final das dez repetições para cada uma das condições propostas para as simulações, foi possível fazer a média dos valores encontrados para

$f(x)$, e foram selecionados, entre as dez repetições de cada condição, as simulações que obtiveram $f(x)$ mínimo, para efeito de comparação visual com a área afetada pelos incêndios reais.

Quadro 9 – Valores de $f(x)$ médio e mínimo para cada simulação executada.

	$f(x)$ médio	$f(x)$ mínimo	$f(x)$ máximo
Simulação 1	0,83	0,79	0,89
Simulação 2	0,66	0,52	0,73
Simulação 3	0,79	0,72	0,84
Simulação 4	0,55	0,43	0,66
Simulação 5	0,88	0,86	0,92
Simulação 6	0,55	0,43	0,61
Simulação 7	0,73	0,62	0,85

Fonte: Autor.

Devemos salientar algumas particularidades das duas ocorrências de incêndio: embora tenha havido combate ao fogo nas duas situações, a ocorrência do dia 18/09/2017 perdurou por aproximadamente três dias, mostrando certa sustentabilidade da propagação do fogo por parte da vegetação, enquanto a ocorrência do dia 24/09/2017 durou apenas algumas horas. O conhecimento da duração do incêndio é de grande valia, pois a partir dessa informação seria possível obter com maior precisão a velocidade de propagação do fogo naquela determinada região, e assim atribuir valores mais precisos para as probabilidades fundamentais I_0 e B_0 .

Outro problema relacionado à simulação, é que se sabia com certa precisão o ponto de ignição do incêndio do dia 18/09, enquanto que para o incêndio do dia 24/09, foi necessário escolher o ponto de ignição baseado em informações vagas fornecidas pelo Corpo de Bombeiros. A definição do ponto de ignição é primordial para a simulação, uma vez que pontos de ignição muito longe do ponto real geram simulações pouco representativas.

O trabalho apresentado por Almeida (2012) não deixa claro se os dados meteorológicos a serem utilizados seriam a média do dia da ocorrência

de incêndio ou a umidade mínima e velocidade máxima do vento. A aquisição dos dados meteorológicos deve ser procedida de estações que representem com maior fidelidade às condições na área de interesse, uma vez que, neste trabalho, por se tratar de uma região serrana, pode haver disparidade entre os dados da estação e as condições que realmente estão ocorrendo na área.

A figura 13 abaixo nos mostra visualmente o resultado das simulações do incêndio do dia 18 de setembro e suas condições meteorológicas testadas.

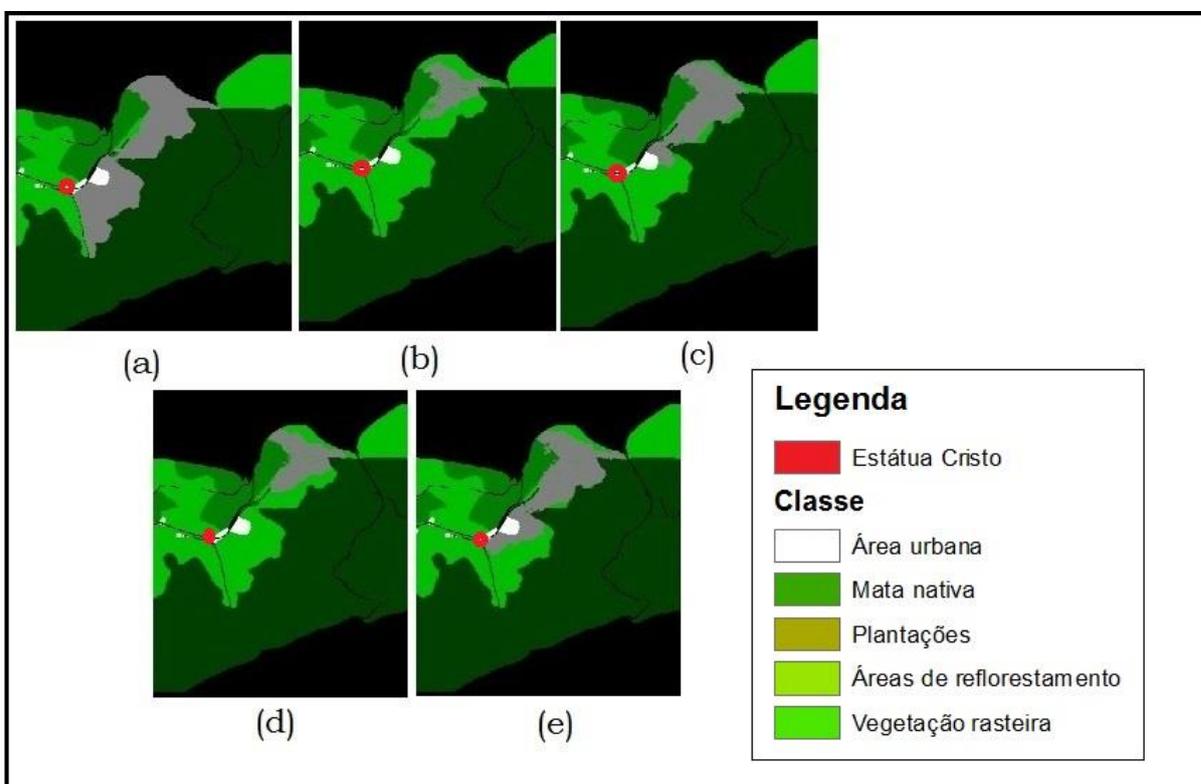


Figura 13 - Comparativo entre incêndio real e simulações. (a) Incêndio real 18/09/2017; (b) simulação 1 - $f(x)$ mín = 0,79; (c) simulação 2 - $f(x)$ mín = 0,52; (d) simulação 3 - $f(x)$ mín = 0,72; (e) simulação 4 - $f(x)$ mín = 0,43.

Fonte: Autor.

Observou-se durante as simulações que os melhores resultados foram obtidos com a utilização da umidade do ar mínima e a velocidade máxima do vento. Pode-se creditar essas respostas por parte da simulação devido ao cálculo da probabilidade I (equação 8) que dependem diretamente dessas

variáveis, e da probabilidade B (equação 6) que depende diretamente da umidade.

É notável que a simulação 4 tenha obtido resultados melhores que a simulação 2, tanto na média, quanto no valor mínimo obtido. A mudança da velocidade e direção do vento pode ser justificada pela duração do incêndio real, que se iniciou na noite do dia 18 de setembro e perdurou durante todo o dia 19 seguinte. Sendo um incêndio morro abaixo, a direção preferencial dos ventos no dia 18 desfavorece a propagação do incêndio, ao passo que a direção do dia 19, favorece o mesmo. Seria interessante obter uma série histórica de velocidade e direção do vento no local, para que essas mudanças de condições fossem consideradas durante a execução do modelo. Além disso, seria fundamental que se soubesse com exatidão a velocidade de propagação do fogo no local de estudo, uma vez que essa informação acarretaria no conhecimento da constante de tempo de propagação do incêndio a cada iteração do modelo, fazendo com que as simulações retornassem melhores resultados em comparação com incêndios reais. Entretanto, seria necessário monitorar um incêndio sem a intervenção do Corpo de Bombeiros, ou um experimento de queima controlada na área para estimação da constante de tempo.

Nas simulações envolvendo o incêndio do dia 24 de setembro (Figura 14), novamente os melhores resultados obtidos foram utilizando os valores mínimos para umidade e máximo para velocidade do vento. É importante ressaltar a importância de saber com a máxima precisão o ponto de ignição dos incêndios, pois há melhores resultados utilizando o ponto de ignição mais à esquerda da rampa de voo livre (simulação 6).

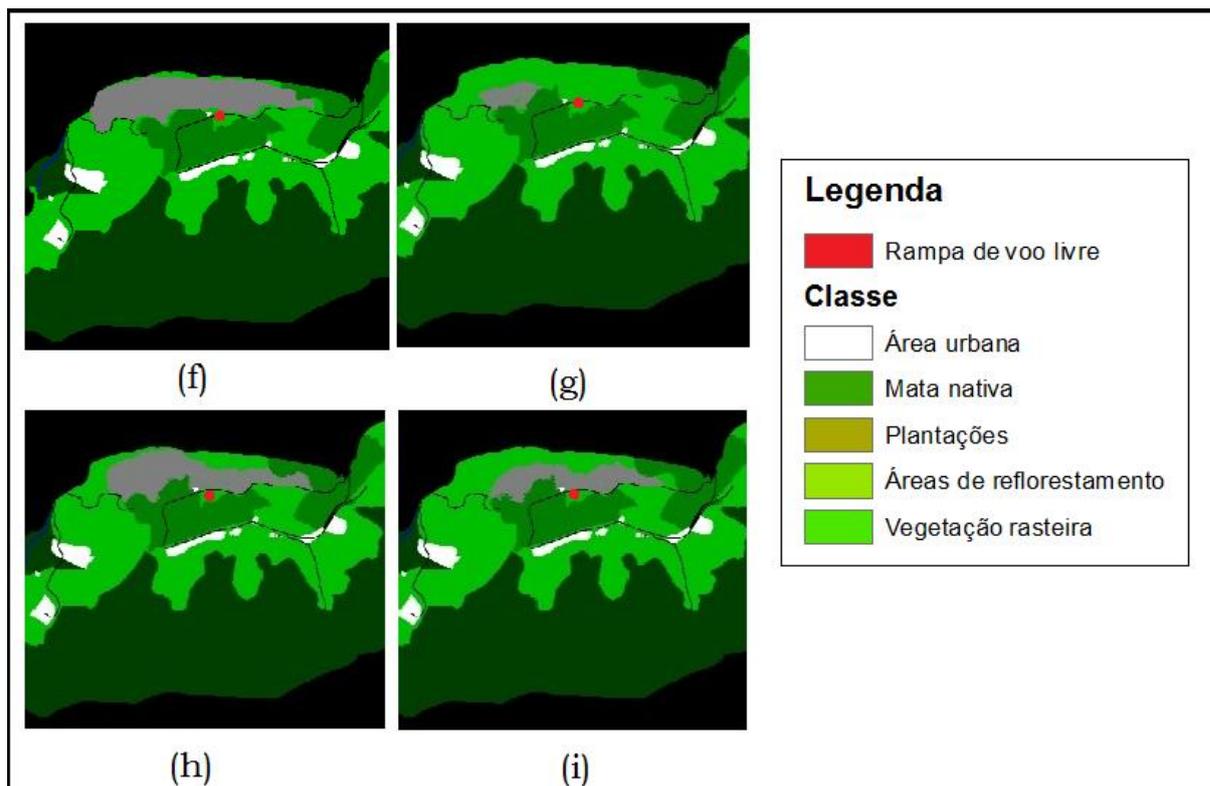


Figura 14 - Comparativo entre incêndio real e simulações. (f) Incêndio real 24/09/2017; (g) simulação 5 - $f(x)$ mín = 0,86; (h) simulação 6 - $f(x)$ mín = 0,43; (i) simulação 7 - $f(x)$ mín = 0,62.

Fonte: Autor.

Observa-se que a simulação 6 conseguiu reproduzir 67% da área afetada pelo incêndio, enquanto a simulação 7 conseguiu reproduzir 48%. A importância do ponto de ignição também é associada à direção do vento, pois o ponto de ignição mais à esquerda (simulação 6) conseguiu reproduzir uma área afetada muito maior que a simulação 7, devido à influência da direção do vento na propagação do fogo.

As simulações referentes ao incêndio de 31 de agosto de 2013 precisaram de alguns ajustes, pois a estação meteorológica que forneceu os dados para as simulações dos incêndios de 2017 ainda não estava em funcionamento durante a época do incêndio. Dessa maneira, foram utilizados dados da estação meteorológica da Indústrias Nucleares do Brasil (INB), que se situa entre os municípios de Poços de Caldas e Caldas (MG). E como não houve a possibilidade de determinar o ponto de ignição para este incêndio utilizando a análise térmica da imagem de satélite, alguns pontos

de ignição foram testados, apenas para verificar o funcionamento do modelo, com relação às probabilidades e constantes estabelecidas. Com isso, foram simulados três repetições para cada ponto de ignição, e seus valores de $f(x)$ e resultado visual podem ser visualizados no Quadro 10 e Figura 15.

Quadro 10 – Condições meteorológicas utilizadas para simulação do incêndio de 31 de agosto de 2013.

Umidade mínima (%)	24
Velocidade do vento máxima (km/h)	11,0
Direção do vento	SSE

Fonte: Autor.

Os pontos de ignição escolhidos foram: 1 – ponto mais à esquerda do incêndio; 2 – ponto mais ao centro; 3 – ponto mais à direita.

Quadro 11 – Valores de $f(x)$ médio e $f(x)$ mínimo para o incêndio de 31 de agosto de 2013.

	$f(x)$ médio	$f(x)$ mínimo
Ponto de ignição 1	0,72	0,63
Ponto de ignição 2	0,53	0,52
Ponto de ignição 3	0,69	0,52

Fonte: Autor.

Observa-se que os pontos 2 e 3 resultaram valores melhores de $f(x)$ quando comparados ao ponto 1. Isso pode-se ser justificado devido à direção do vento utilizado e da topografia do local. Enquanto a propagação do fogo no ponto 1 iria de morro abaixo, os outros pontos se beneficiavam da condição de propagação morro acima.

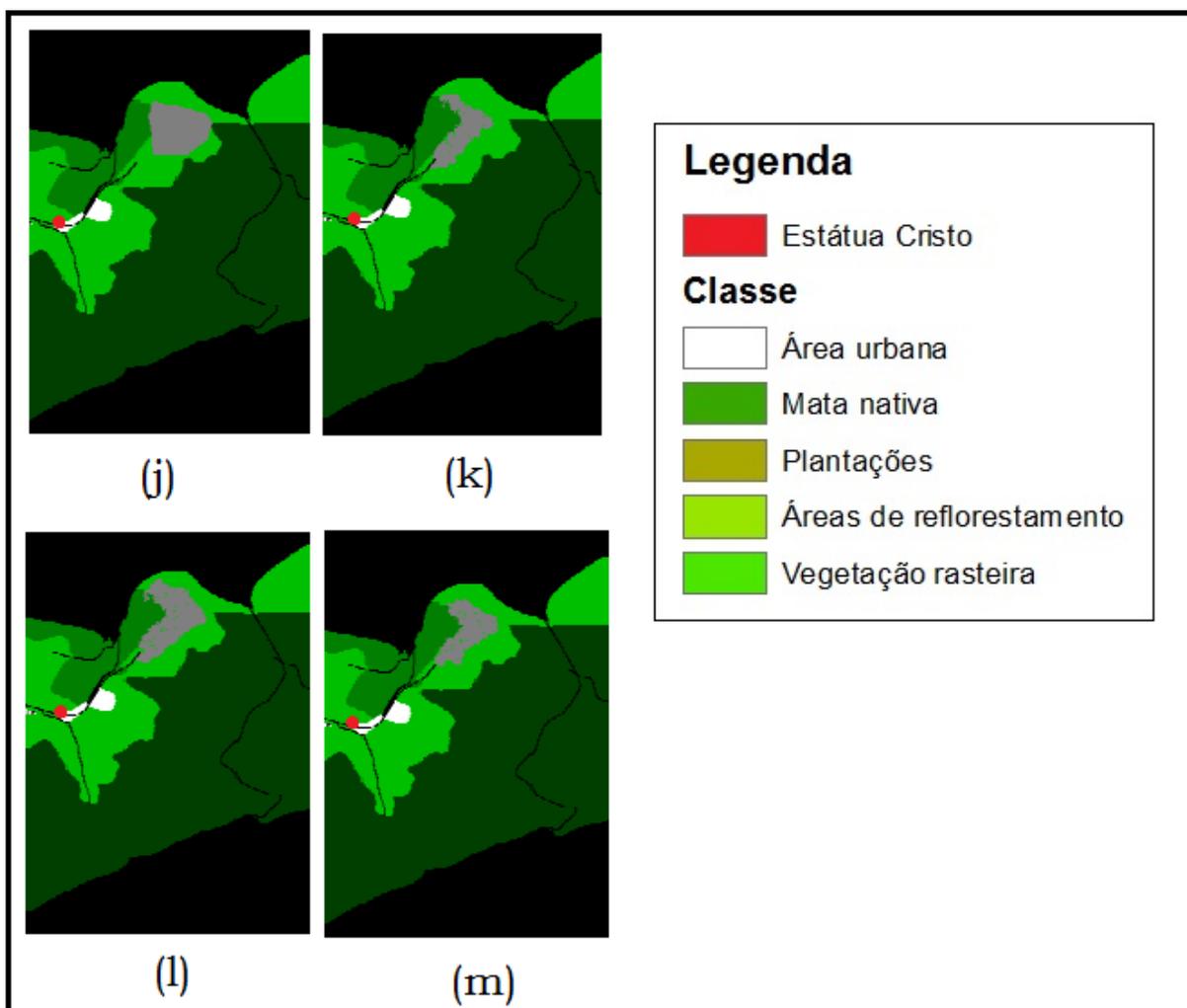


Figura 15 - Comparativo entre incêndio real e simulações. (j) Incêndio real 31/08/2013; (k) ponto de ignição 1 - $f(x)$ mín = 0,63; (l) ponto de ignição 2 - $f(x)$ mín = 0,52; (m) ponto de ignição 3 - $f(x)$ mín = 0,52.

Fonte: Autor.

Novamente, vale ressaltar a importância de se conhecer os pontos de ignição dos incêndios, pois ao escolher pontos aleatórios, conforme executado nas simulações para o incêndio de 2013, perde-se em representatividade do modelo.

6 CONCLUSÕES

A proposta desse trabalho foi compreender as variáveis e mecanismos que influenciam a ocorrência de incêndios no Parque Municipal da Serra de São Domingos e adequar um modelo matemático de propagação de incêndios que fosse representativo para a área em questão.

O levantamento de informações acerca das ocorrências de incêndio na área mostrou que a grande maioria dos eventos de incêndio ocorrem nas áreas com vegetação considerada vegetação rasteira. Há relatos de ocorrências de incêndio nas outras classes de vegetação (mata nativa e reflorestamento), mas são mínimos se comparados à vegetação rasteira. O relevo da área também influencia na propagação do fogo, uma vez que há a tendência do incêndio se propagar morro acima, aliada às correntes de vento da região. As informações obtidas a respeito das ocorrências de incêndio no parque são, contudo, muito imprecisas no que diz respeito à delimitação da área atingida, e do ponto de ignição.

Os resultados obtidos pelas simulações explicitam a necessidade de informações precisas acerca dos dados meteorológicos, como a umidade e a variação da direção do vento, e também do conhecimento do ponto de ignição dos incêndios. Embora as simulações 2 e 4 tenham usado os valores mínimos para umidade e valores máximos para velocidade do vento, a simulação 2 conseguiu, em média, representar 34% da área afetada pelo incêndio real, enquanto a simulação 4 conseguiu representar, em média, 45% da área afetada. Atribui-se que os melhores resultados obtidos pelas simulações 4 sejam provenientes da direção do vento utilizada, que favoreceu a propagação do fogo morro acima na área.

A escolha das probabilidades elementares I_0 e B_0 se mostraram acertadas, ao ponto de que o modelo simula os incêndios na área em sua maioria na vegetação rasteira, assim como nos eventos reais. Existe a necessidade de um estudo mais aprofundado relativo à capacidade

combustível da vegetação da região, afim de se refinar ainda mais os valores escolhidos para I0 e B0, além de criar a possibilidade da existência de subclasses para as vegetações existentes na área.

Há a necessidade de compreender a velocidade de propagação de fogo que ocorre na área, afim de se atribuir a variável tempo ao modelo. O estudo desse comportamento se daria a partir de um incêndio de área conhecida e tempo de persistência conhecido, sem intervenções naturais (chuva) ou antropogênicas (combate ao incêndio). Entretanto, por se tratar de uma área de grande valor (socioambiental) para o município, pode-se descartar essa possibilidade. Outra maneira seria a realização de incêndios controlados, em áreas similares, com vegetação e topografia similares, para esse fim. Ou ainda, o monitoramento *in loco* de um incêndio real.

Existe também a problemática acerca dos dados meteorológicos, uma vez que não há uma estação de coleta de dados no local. Esses dados influenciam diretamente na otimização referente às constantes empíricas do modelo e nas simulações, uma vez que os dados utilizados foram coletados de uma estação no centro da cidade, que não sofre com o efeito topográfico e dos ventos que ocorre na área de estudo.

A otimização das constantes empíricas carece de uma maior capacidade de processamento, uma vez que um maior número de simulações resultaria em constantes mais refinadas, que pudessem refletir melhor as condições da área de estudo. O processo de otimização, utilizado nesse trabalho, durou aproximadamente 20 dias, pelo número reduzido de tentativas, vagalumes e repetições viabilizados (2 mil simulações). Almeida (2012), por outro lado, realizou, durante seu processo de otimização, aproximadamente 48 mil simulações, o que seria inviável, sem a utilização de um cluster de aproximadamente 40 núcleos de processamento, o que levaria aproximadamente 2 meses.

Pode-se considerar que o modelo, apesar da necessidade de refinamento, consegue representar relativamente o problema proposto, que era a propagação de incêndio na área. A topografia e as classes vegetais são representativas, enquanto as condições meteorológicas necessitam de melhor análise, para atender perfeitamente o modelo.

REFERÊNCIAS

ALEXANDRIDIS, A. et al. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through spetses island in 1990. **Applied Mathematics and Computation**, v. 204, n. 1, p. 191 – 201, 2008.

ALMEIDA, R. M. **Modelagem da propagação do fogo como ferramenta de auxílio à tomada de decisão no combate e prevenção de incêndios no Parque Nacional das Emas, GO**. 2012. 121 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, 2012.

ANDRE, J.C.S.; VIEGAS, D. X. Modelos de propagação de fogos florestais: Estado da arte para utilizadores (parte I: Introdução e modelos locais). **Silva Lusitana**, v. 9, n. 2, p. 237-264. 2001.

BENALI, A. et al. Determining fire dates and locating ignition points with satellite data. **Remote Sensing**, v. 8, n. 326. 2016.

BORATTO, I.M.P.; GOMIDE, R.L. Aplicação dos índices de vegetação NDVI, SAVI e IAF na caracterização da cobertura vegetativa da região Norte de Minas Gerais. INPE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 16, 2013, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013. p. 7345 – 7352.

CHENEY, N.P.; GOULD, J.S.; CATCHPOLE, W.R. Prediction of fire spread in grasslands. **International Journal of Wildland Fire**, v. 8, n. 1, p. 1 – 13, 1998.

CIPRIANI, H.N. et al. Fire risk map for the Serra de São Domingos Municipal Park, Poços de Caldas, MG. **CERNE**, Lavras, v. 17, n. 1, p. 77-83. 2011.

COELHO, A.L.N.; RAMOS, A.L.D.; BERGAMASCHI, R.B.; Aplicação dos Produtos Landsat-8/TIRS/OLI e Aster/GDEM na Avaliação do Comportamento Termal de Superfície, Usos e Topografia. INPE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO – SBSR, 17, 2015, João Pessoa, PB. **Anais...** João Pessoa, 2015. p. 1323 – 1330.

CORPO DE BOMBEIROS MILITAR (CBM) – 1ª Companhia Independente De Poços De Caldas – 6º Comando Operacional Do Estado De Minas Gerais. **Relatórios de Eventos de Defesa Civil**. Poços de Caldas, 2010-2015.

COSTA, M. P. **Ecologia da vegetação arbórea na Serra de São Domingos, Poços de Caldas (MG)**. 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Lavras, UFLA, Lavras, 2010.

D'AMBROSIO, D. et al. A model for the simulation of forest fire dynamics using cellular automata. In: INTERNATIONAL ENVIRONMENTAL MODELLING AND SOFTWARE SOCIETY – iEMSs, 3, 2006, Vermont, EUA. **Proceedings...** Vermont, 2006.

HARGROVE, W. et al. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. **Ecological Modelling**, v. 135, p. 243-263, 2000.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil**. 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Divisão de Geração de Imagens**. 2008. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/portugues/index.php>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

LI, C. et al. Visualization and simulation model of underground mine fire disaster based on Cellular Automata. **Applied Mathematical Modelling**, v. 39, p. 4351-4364. 2015.

LIMA, E. B. **Modelos microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares**. 2007. 113 f. Dissertação (Mestrado em Computação) - Universidade Federal Fluminense, UFF, Niterói, 2007.

MACHADO, R.B.; **Criação de imagem NDVI a partir de imagens Landsat 8 (Sensor OLI)**. Laboratório de Planejamento para Conservação da Biodiversidade – LaBIO. 2015. Disponível em: <<http://conservacao.bio.br/index.php/k2-noticias/item/77-criacao-de-imagem-ndvi-a-partir-de-imagens-landsat-8-sensor-oli>>. Acesso em: 20 maio 2017.

MCARTHUR, A. G. **Weather and grassland fire behaviour**. Forestry and Timber Bureau, Department of National Development, Commonwealth of Australia, 1966.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologia de aplicação**. 4 ed. Viçosa, MG. Ed. UFV, 2011.

NELSON JR, R. M. Water relations of forest fuels. In: JOHNSON, E. A.; MIYANISHI, K. (Ed.). **Forest fires: behavior and ecological effects**. San Diego, CA: Academic Press, 2001. p. 79 – 149.

NOBLE, I.R.; GILL, A.M.; BARY, G.A.V. Macarthur's fire-danger meters expressed as equations. **Australian Journal of Ecology**, v. 5, n. 2, p. 201-203, 1980.

OLIVEIRA, M. G. A. **Propagação do fogo e dinâmicas florestais**. 2005. 89 f. Dissertação (Mestrado em Estatística aplicada e modelação). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, UP, Porto, 2005.

PASTOR, E. et al. Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 29, n. 2, p. 139-153, 2003.

PREFEITURA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS (PMPC). Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico, Artístico, Cultural e Turístico de Poços de Caldas (CONDEPHACT-PC). **Ata da 94ª reunião ordinária do Conselho Deliberativo Municipal de Defesa do Patrimônio Histórico, Artístico, Cultural e Turístico do Município de Poços de Caldas**. 2014. Disponível em: <http://www.pocosdecaldas.mg.gov.br/site/?page_id=23501>. Acesso em: 6 fev. 2017.

PREFEITURA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS (PMPC). Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Poços de Caldas. 2016.

PREFEITURA MUNICIPAL DE POÇOS DE CALDAS (PMPC). **Lei Municipal nº 4.197, de 19 de maio de 1988**. Cria O Parque Municipal de Poços de Caldas e dá outras providências. Poços de Caldas/MG, 01 de junho de 1988.

PYNE, J.S.; ANDREWS, P.L.; LAVEN, R.D. **Introduction to wildland fire**. 2 ed. New York, NY: John Wiley & Sons, 1996.

ROUSE, J.W. et al. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE-1 SYMPOSIUM, 3, 1973, Washington, EUA. **Proceedings...** Washington, 1973. v.1, sec. A, p. 309-317.

SULLIVAN, A.L. Wildland surface fire spread modelling, 1990-2007. 2: Empirical and quase-empirical models. **International Journal of Wildland Fire**, v. 18, n. 4, p. 387-403, 2009.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). 1879. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Earth Explorer**. 1879. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **Landsat 8 (L8) Data Users Handbook**. V. 2.0. Sioux Falls, SD, 2016.

YANG, Xin-She. **Nature-inspired metaheuristic algorithms**. Frome, UK: Luniver Press, 2008.